

# Tables des matières

Résumé .....	iii
Abstract.....	v
Tables des matières.....	vii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures.....	x
Remerciements.....	xi
Avant-propos .....	xii
Introduction .....	1
Chapitre 1 .....	2
1.1. Revue de littérature.....	2
1.1.1. Le marché de la construction .....	2
1.1.2. Spécificités du climat nordique .....	3
1.1.3. Le matériau CLT .....	3
1.1.4. Le système constructif en CLT .....	6
1.1.5. L'enveloppe du bâtiment .....	6
1.1.6. La performance énergétique et durabilité du système constructif en CLT.....	12
1.1.7. L'expérimentation .....	12
1.1.8. Les simulations hygrothermiques .....	13
1.2. Objectif.....	16
1.2.1. Objectif général .....	16
1.2.2. Objectifs spécifiques.....	16
1.3. Sommaire méthodologique .....	17
1.3.1. Expérimentations .....	17
1.3.2. Simulations .....	18
1.3.3. Logiciels utilisés .....	18
1.3.4. Paramètres utilisés pour la simulation .....	18
Chapitre 2 .....	21
Modeling the Impact of Assembly Tolerances Regarding Air Leaks on the Energy Efficiency and Durability of a Cross-laminated Timber Structure .....	21
2.1.1. Résumé .....	21
2.1.2. Abstract .....	21
2.1.3. Introduction.....	22

2.1.4. Materials and Methods .....	23
2.1.5. Results and Discussion .....	30
2.1.6. Conclusion.....	39
Conclusion .....	40
Bibliographie.....	42

## Liste des tableaux

Table 1-1. Liste complète des paramètres utilisés pour la simulation.....	20
Table 2-1. Hygrothermal properties of materials used for the simulations.....	25
Table 2-2. Approximate temperature observed through thermography and modeling for 4 Pa and 50 Pa of vacuum (infiltration) with the dimensioned gap.....	31
Table 2-3. Reference gap widths in the CLT and insulation layer.....	33

# Liste des figures

Figure 1-1. Panneau de CLT (Nordic Structures, 2015). .....	4
Figure 1-2. Procédé de fabrication du CLT (FPInnovation, 2011). .....	5
Figure 1-3. Méthode d'assemblage plateforme (FPInnovation, 2011). .....	6
Figure 1-4. Méthodes d'assemblage mur-mur, (a) mi-bois, (b) joint plat recouvert d'une planche, (c) joint plat (Hossain, et al., 2016). .....	6
Figure 2-1. Complete envelope (left) (Pineault, et al., 2016) and simplified version (right).....	24
Figure 2-2. Thermal imagery taken from the inside during a blower door test at 4 Pa and 50 Pa .....	27
Figure 2-3. Effect of air infiltration on wall temperature, seen in cross section, for 4 Pa and 50 Pa after 45 minutes. ....	27
Figure 2-4. (Top left) WUFI modeling of the impact of using two insulation panels, considering the skin/core/skin effect. ....	31
Figure 2-5. (Top right) WUFI modeling of using one insulation panel, without the skin effect .....	31
Figure 2-6. (Bottom) COMSOL modeling with parameters from the literature. ....	31
Figure 2-7. Average temperature on the edge of the gap (inside) at 4 Pa for different gap widths in the insulation layer .....	32
Figure 2-8. Temperature profile along the surface of the wall with infiltration induced by 4 Pa and 50 Pa of depression. ....	32
Figure 2-9. Heat flux through the wall in cases of an exfiltration, an infiltration and without any gap. The light gray area represents the heat flux specific to the convection. ....	33
Figure 2-10. Overall heat transfer coefficient U, calculated from the above-mentioned heat flux values, compared with Quebec and PassivHaus standards. ....	34
Figure 2-11. Overall heat transfer coefficient for the wall with an increasing gap from 0 mm to 20 mm. ....	35
Figure 2-12. Maximum velocity of the air in the gap across the wall.....	35
Figure 2-13. . Graphical representations of heat flux vectors seen on the cross-section of the wall (top view) with the gap at the center for exfiltration (left) and infiltration (right). ....	35
Figure 2-14. Graphic representation of favorable conditions for mold growth in the wall due to exfiltration, for different air relative humidity values.....	37
Figure 2-15. Schematic representation of measurements taken along the gap, not to scale .....	37
Figure 2-16. Position in the wall of locations where there is a risk of mold growth. The red vertical line represents the boundary between the XPS (left) to the CLT (right). ....	38
Figure 2-17. Dew point of the exfiltrated air for its different relative humidities according to the position in the wall along the gap and temperature in the gap. The black vertical line represents the boundary between the XPS (left) to the CLT (right). ....	38

# Remerciements

Ce projet est né de l'intérêt de nombreux intervenants pour la construction verte. La recherche d'une efficacité énergétique dans le bâtiment allant de pair avec une utilisation de matériaux durables a été mon leitmotiv initial. Je remercie Pierre Blanchet de m'avoir proposé un sujet touchant tous ces aspects. Merci à mon codirecteur, André Potvin, pour son implication initiale et son intérêt pour la construction écologique.

Merci à Louis Gosselin pour ses conseils et recommandations pendant l'exploitation de mes données.

Merci aux techniciens du CRMR de m'avoir aidé dans la mise en forme de panneaux de CLT et pour l'instrumentation lors de mes tests sur hot-box/cold-box.

Merci au partenaire industriel, Chantiers Chibougamau, pour le matériel d'exception qu'est le CLT. Je tiens à souligner que Chantiers Chibougamau est un des moteurs de l'utilisation de ce matériau en Amérique du Nord.

# Avant-propos

Le projet présenté dans ce manuscrit a été réalisé dans le cadre de la Chaire industrielle de recherche du CSRNG sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB), sous la direction de M. Pierre Blanchet, professeur au Département des sciences du bois et de la forêt de l'Université Laval, et sous la codirection de M. André Potvin, professeur à l'École d'architecture de l'Université Laval.

Cette étude a été réalisée dans le cadre du programme de maîtrise en sciences du bois et est présentée sous forme d'un mémoire par articles. Un article scientifique rédigé en anglais est inclus dans ce manuscrit. Les travaux se sont déroulés exclusivement dans les locaux du Centre de recherche sur les matériaux renouvelables (CRMR) du Département des sciences du bois et de la forêt, à l'Université Laval, sur des équipements du CIRCERB et du CRMR.

L'article rédigé et soumis constituant la seconde partie de ce mémoire est le suivant :

Martin, U., Blanchet P., Potvin A. (2017). *Modeling the impact of assembly tolerances with leakages on the energy efficiency and the durability for a Cross-laminated Timber structure. Journal of Building Physics.* Soumis

L'étudiant Ulysse Martin, auteur de ce mémoire, est aussi l'auteur principal de l'article scientifique mentionné ci-dessus. Les travaux de planification, réalisation expérimentale, interprétation des résultats et rédaction de l'article ont été faits par l'étudiant. Les différents coauteurs ci-dessus mentionnés ont vérifié l'ensemble des résultats préliminaires avant le début des travaux finaux. Ils ont aidé à l'interprétation de certains résultats et apporté des corrections nécessaires à l'article avant sa soumission à la revue scientifique.

Les résultats des travaux de recherche ont aussi été présentés à différentes occasions :

- Poster pour l'école professionnelle du CIRCERB, juillet 2017,
- Présentation pour le Bureau de direction du CIRCERB, novembre 2017,
- Cours SBO 6000, Séminaire II, mai 2017, Québec, QC, Canada.

# Introduction

Le domaine de la construction est responsable d'une part non négligeable de l'émission de gaz à effet de serre par l'entremise de matériaux énergivores tels que le béton ou l'acier. Ces matériaux sont prépondérants dans les bâtiments de moyenne hauteur. Alors que la surface urbaine se fait de plus en plus rare et coûteuse au mètre carré, les nouveaux bâtiments tendent à gagner en hauteur. Depuis plusieurs décennies, le bois est de retour dans les matériaux envisagés pour bâtir en hauteur. Les mentalités ont été marquées par l'omniprésence du béton et de l'acier, mais le bois refait ses preuves projet après projet. La hauteur des bâtiments en bois et la confiance de la population envers ce matériau sont en hausse. Avec les progrès dans les adhésifs, le bois se décline sous de nombreux matériaux composites, ce qui permet d'utiliser judicieusement ses propriétés orthotropes. Le *Cross-Laminated Timber (CLT)*, développé par la compagnie Autrichienne KLH (pour *KreuzLagen Holz*) au milieu des années 1990, est une solution de rechange efficace au béton. Il s'agit d'un matériau composé de planches collées orthogonalement, obtenant ainsi la capacité d'avoir une résistance dans le plan, à la manière d'un mur de béton armé. Le CLT est encore nouveau aux yeux des bâtisseurs nord-américains et en est encore à devoir faire ses preuves pour lever les barrières dues au manque de connaissances sur ses propriétés. À terme, ce matériau a un fort potentiel en Amérique du Nord, de par la nécessité de construire des bâtiments à faible empreinte environnementale et la demande pour des bâtiments de moyenne hauteur. L'empreinte énergétique d'un bâtiment ne se limite pas à sa construction : le chauffage et la climatisation sont des charges qui s'appliquent jusqu'à la fin de la vie utile d'un bâtiment. Plus la durée de vie d'un bâtiment sera grande, plus importante sera la part des charges de chauffage et de climatisation. Par l'amélioration du comportement de chacun, la conscientisation de la population à l'environnement permet de conduire à une augmentation de la performance énergétique des bâtiments.

Les études concernant l'efficacité énergétique du CLT ne sont pas nombreuses; la majorité des études concernent la résistance structurale, ou la résistance au feu. Toutefois plusieurs études ont porté sur les potentielles accumulations d'humidité dans les murs en climat nordique (Ozolins, et al., 2013) (Winter, et al., 2012), ainsi que sur la capacité du CLT à évacuer l'humidité de construction (Lepage, 2012) (Al Sayegh, 2012). Des études ont également porté sur la perméabilité à l'air des bâtiments (Janols, et al., 2013) (Skogstad, et al., 2011). Ces auteurs ont remarqué que le CLT peut être une barrière à l'air tant que les fissures dans les planches et entre les planches restent minimales et tant que l'assemblage des panneaux entre eux est fait avec une très faible tolérance. Des observations de bâtiments en CLT ont montré que ces tolérances d'assemblage sont nécessaires lors de la construction, mais peuvent atteindre des proportions non souhaitées avec des effets indésirables par la suite.

# Chapitre 1

## 1.1. Revue de littérature

Savoir si un système constructif est viable à long terme est important pour des bâtiments visant une haute performance énergétique. Lors de la conception, le dimensionnement de l'isolation et de la masse thermique va déterminer les charges de chauffage et de climatisation durant toute la vie utile du bâtiment. Pour un bâtiment ayant une longue durée de vie, à terme, cela peut représenter une somme importante variant selon l'efficacité énergétique du bâtiment (Audenaert, et al., 2008), (Erlor, 2011).

Les technologies de mécanique du bâtiment et le coût de l'énergie font que les stratégies ont beaucoup évolué en 50 ans (Bomberg, et al., 2002). On cherche aujourd'hui à réduire la demande énergétique des bâtiments et à augmenter leur durabilité (Gouvernement du Québec, 2016). La gestion de l'humidité est devenue un point essentiel dans la conception des enveloppes et de la mécanique du bâtiment.

### 1.1.1. Le marché de la construction

Le marché de la construction peut être séparé en deux secteurs : la construction résidentielle et la construction non résidentielle. En 2016, la part de la valeur des permis de bâtir pour la construction résidentielle comptait pour 64 % alors que la part pour la construction non résidentielle (commercial, institutionnel et public) était de 30 % (Statistique Canada, 2017).

Depuis 2012, au Canada, le nombre d'unités de logement dans la construction résidentielle est en croissance, et particulièrement les logements multiples, le nombre de logements unifamiliaux étant plutôt constant (Statistique Canada, 2017). La Société canadienne d'hypothèques et de logement (SCHL) nuance un peu la croissance du marché car l'offre est déjà importante. Toutefois, la SCHL prévoit que le vieillissement de la population engendrera davantage de mises en chantier de logements collectifs dans les prochaines années (Société canadienne d'hypothèques et de logement, 2016).

Un rapport de McGraw Hill pour le Conseil du bâtiment durable du Canada (McGraw Hill Construction, 2014) estime qu'il y a une demande pour des bâtiments plus écologiques dans le secteur non résidentiel comme dans le secteur résidentiel. Les intervenants estiment que pour les secteurs non résidentiel et résidentiel respectivement, presque la moitié et un tiers des projets seront « verts ».

D'après ce rapport, la demande est due au choix des clients, à la responsabilisation des intervenants à l'écologie (architectes, entrepreneurs et clients) ou à la pression normative. Une des barrières perçues est également le

manque d'éducation de la population à l'écologie. Le principal frein à la construction « verte » est la perception que le coût initial est plus important. Les principaux avantages de la construction « verte » sont la réduction de la consommation du bâtiment en énergie et en eau (McGraw Hill Construction, 2014).

Le bois et les produits d'ingénierie dérivés sont de bons candidats pour la construction « verte » (WoodWorks, 2011) par rapport aux autres matériaux de construction.

### 1.1.2. Spécificités du climat nordique

Le climat nordique est caractérisé par un hiver très froid et long. De ce fait, la saison de chauffage est prépondérante sur la saison de climatisation (ASHRAE, 2007). Durant l'hiver, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur crée un important gradient de température dans l'enveloppe.

En saison de chauffage, malgré la plus basse humidité relative ambiante à l'intérieur, la pression de vapeur est supérieure.

$$P_{vapeur}(T, \varphi) = P_{vapeur\_saturante}(T) \times \varphi \quad (1-1)$$

La pression de vapeur, équation (1-1), est ce qui motive le transport d'humidité soit la diffusion de vapeur (Künzel, 1995), dans le domaine hygroscopique, qui correspond à une humidité relative de 0 % à 98 %.  $P_{vapeur\_saturante}$  est la pression de vapeur saturante (en Pascal),  $\varphi$  est l'humidité relative (en pourcentage). Au-delà du domaine hygroscopique, Künzel (1995) a déterminé que l'humidité se condense et que l'eau se déplace alors par capillarité.

### 1.1.3. Le matériau CLT

Le CLT est un matériau composite composé de planches collées orthogonalement se présentant sous forme de panneaux, comme présenté sur la Figure 1-1. Le CLT comprend entre trois (3) et neuf (9) couches selon la résistance structurale désirée (FPInnovation, 2011). Au Québec, le bois composant le CLT est le même que celui qui est utilisé pour la construction en ossature légère, à savoir un mélange de SPF (pour *spruce-pine-fir*) (Nordic Structures, 2015). Le procédé de fabrication du CLT, illustré par la Figure 1-2, comprend 9 étapes du début à la fin :

- Sélection du bois, basée sur contrôle visuel et mécanique,
- Entreposage du bois sélectionné,
- Rabotage du bois aux dimensions nécessaires,
- Sciage du bois à la longueur/largeur du panneau, cette étape peut faire suite à une étape de rabotage de planches de diverses longueurs,
- Application de l'adhésif sur les rangs de planches (non visible sur le schéma),
- Empilage d'une nouvelle épaisseur de planche,
- Pressage du panneau, jusqu'à polymérisation de l'adhésif,
- Mise aux dimensions du panneau et sablage,
- Emballage et expédition des panneaux.

Selon le producteur, des variations du CLT sont disponibles ; certains font des traits de scie dans la longueur des planches afin de réduire le stress pouvant survenir avec les variations d'humidité. D'autres collent les planches sur chant en plus du collage sur la grande surface : cela permet de limiter l'élargissement des joints entre les planches au cas où le panneau sècherait dans le mur.

Le type d'adhésif utilisé pour lier les planches entre elles peut varier selon le manufacturier. L'industrie produisant le CLT au Québec utilise de la résine polyuréthane. La quantité d'adhésif utilisé est de  $4,94 \text{ kg/m}^3$ , soit un peu moins de 1 % en masse par rapport au CLT ( $515 \text{ kg/m}^3$ ) (Nordic Structures, FPInnovations, 2013).



Figure 1-1. Panneau de CLT (Nordic Structures, 2015).

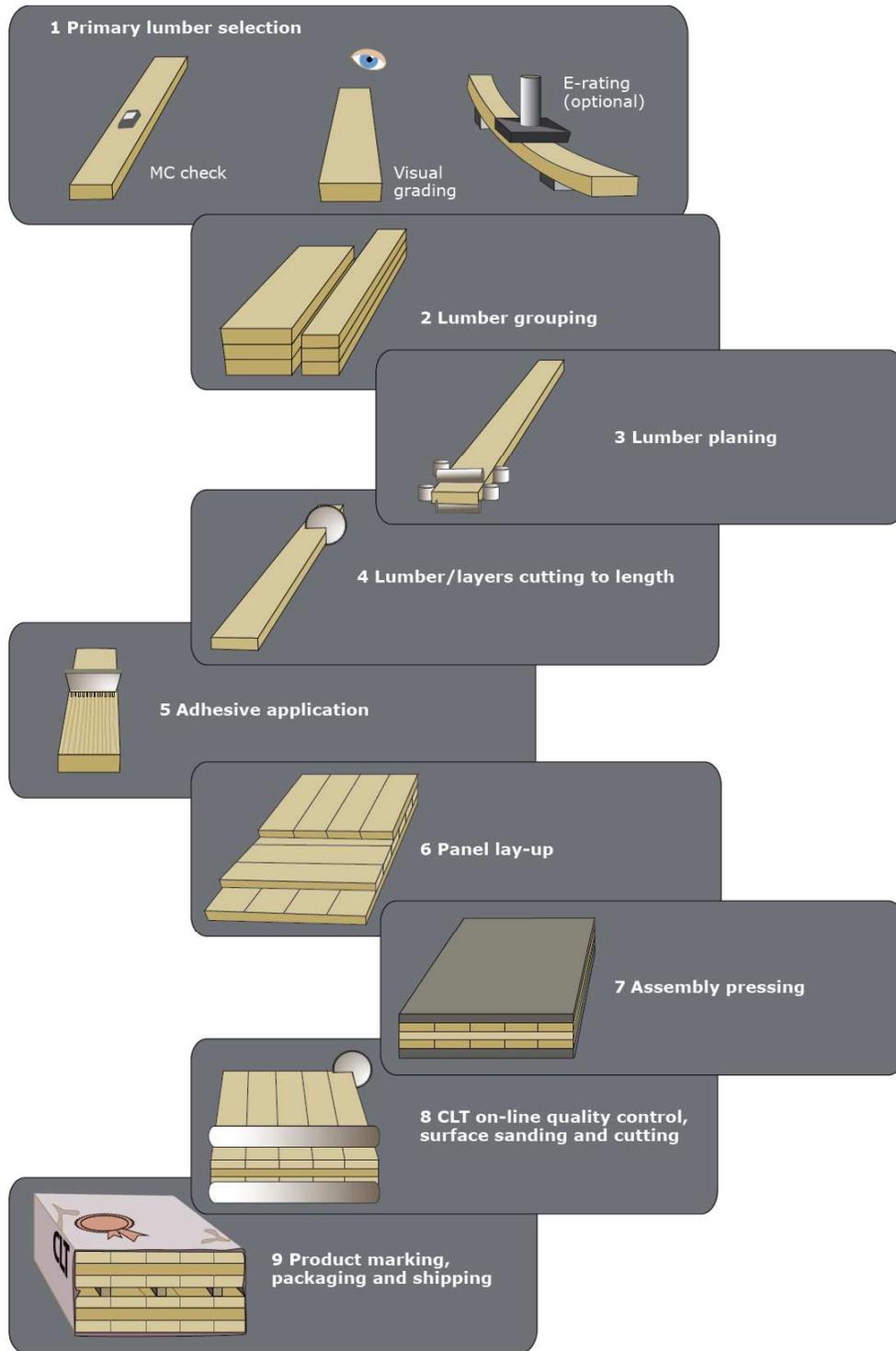


Figure 1-2. Procédé de fabrication du CLT (FPInnovation, 2011).

### 1.1.4. Le système constructif en CLT

Le CLT est un matériau fabriqué par panneaux. Les panneaux sont préfabriqués et usinés aux dimensions finales, juste après l'étape de pressage. L'utilisation de la presse est généralement optimisée; les panneaux aux dimensions maximales peuvent peser plusieurs tonnes. Il est donc nécessaire de faire l'usinage des panneaux en usine, où les outils le permettent.

De nombreux modes d'assemblage existent. Ces assemblages sont souvent référencés dans les guides techniques (Wallner-Novak, et al., 2014), (FPInnovation, 2011). Le CLT pouvant être utilisé pour des murs, des planchers ou des toits, des assemblages existent pour chaque type de jonction. Un assemblage mur/plancher pour une construction de type plateforme est présenté à la figure 1-3, des assemblages mur-mur verticaux sont présentés à la figure 1-4. Les assemblages requièrent souvent des opérations d'usinage particulières qui se répercutent sur le prix selon Hossain *et al.* (2016). Pour garder le prix au minimum, certains assemblages sont plus simples que d'autres (Hossain, et al., 2016), par exemple le joint plat présenté à la Figure 1-4 (c).

Afin que l'assemblage des panneaux soit plus facile, un jeu est toléré entre les panneaux. Cette tolérance d'assemblage correspond à la tolérance de manufacture, qui est de 3,2 mm en largeur, 6,4 mm en longueur et 2 % de l'épaisseur du panneau pour l'épaisseur (APA – The Engineered Wood Association, 2011).

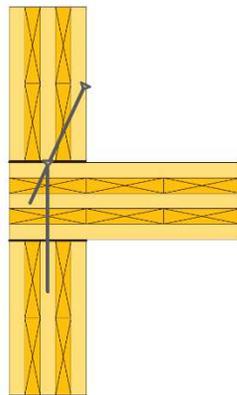


Figure 1-3. Méthode d'assemblage plateforme (FPInnovation, 2011).

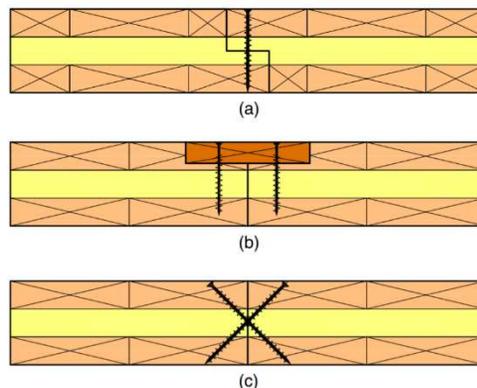


Figure 1-4. Méthodes d'assemblage mur-mur, (a) mi-bois, (b) joint plat recouvert d'une planche, (c) joint plat (Hossain, et al., 2016).

### 1.1.5. L'enveloppe du bâtiment

L'enveloppe du bâtiment est la couche entourant le volume habitable. Elle assure la protection contre l'environnement extérieur, comme le décrit Hutcheon (1953). La structure du bâtiment est souvent comprise

dans l'enveloppe, comme c'est le cas pour l'ossature légère, mais il arrive que ce ne soit pas le cas : murs rideaux, ossature massive, etc.

Deux environnements séparés par une paroi vont tendre à s'équilibrer en ce qui a trait à la température et à l'humidité relative, selon la capacité de la paroi à laisser passer la chaleur et l'humidité (Allen, 2005). Chaleur et humidité relative sont très liées, car la teneur en humidité de l'air dépend grandement de la température. Une paroi peut « laisser passer » la chaleur et l'humidité par diffusion à travers la matière constituant la paroi ou par fuite à travers un manque de matière dans la paroi.

Pour conserver la chaleur (ou l'énergie) du côté de la paroi que l'on souhaite (à l'intérieur en hiver et à l'extérieur en été), des matériaux thermiquement isolants sont utilisés (Finch, et al., 2013), comme de la laine de verre, de roche ou des mousses synthétiques. À l'échelle d'un bâtiment, la performance énergétique représente la quantité d'énergie que le bâtiment nécessite pour garder un intérieur à une température confortable. La qualité thermique d'un bâtiment est aussi référée sous l'appellation « efficacité énergétique du bâtiment ».

#### **1.1.5.1. L'efficacité énergétique de l'enveloppe**

L'efficacité énergétique est un concept décrivant l'objectif de réduire la consommation énergétique (International Energy Agency, 2016). L'énergie est au cœur de la problématique environnementale actuelle, avec le besoin de réduction des émissions de gaz à effet de serre. L'énergie est vitale pour l'économie, et réduire sa dépendance énergétique permet aujourd'hui de s'affranchir des fluctuations du prix de l'énergie – il s'agit de sécurité énergétique. À l'échelle de l'habitation, améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment permet de faire des économies de chauffage/climatisation et d'améliorer le confort thermique.

Améliorer l'efficacité énergétique d'un bâtiment consiste à renforcer la barrière qui permet de conserver un environnement (intérieur) confortable, autrement dit à s'isoler des conditions climatiques extérieures.

La première mention de recherche sur l'impact de l'ajout d'isolation dans la cavité des murs est attribuée à Greig (1922). Le climat venteux et froid des prairies de la Saskatchewan a motivé la recherche sur l'optimisation thermique. Des maisonnettes tests instrumentées ont été utilisées pour évaluer la performance de différents matériaux. La création d'organismes comme la Société canadienne d'hypothèques et de logement (CMHC en anglais) et la division de recherche sur le bâtiment du *National Research Council of Canada* (NRCC) ont permis de normaliser les avancés en science du bâtiment (Hutcheon, et al., 1980).

L'amélioration de l'isolation a amené un nouveau problème : l'augmentation de la résistance thermique du mur induit le refroidissement du mur, ce qui a pour effet de réduire l'écart entre la température et le point de rosée. Cela induit plus de risques de condensation et donc de dégâts dus à l'humidité. En réponse à ce problème,

Hechler et al. (1942) et Joy et al. (1948) ont mené des recherches sur la diffusion d'humidité, phénomène alors jugé prépondérant dans le transfert d'humidité. Le contrôle de la diffusion d'humidité a été réglé par l'usage de matériaux pare-vapeur placés du côté intérieur de l'enveloppe (Handegord, 1960), que ce soit pour un mur ou un plafond.

Bomberg (2002) explique que la facilité pour calculer le transfert de vapeur par diffusion a donné plus d'importance à ce phénomène qu'il n'aurait dû en avoir. Tant que le débit d'exfiltration était assez important, ou l'épaisseur du mur assez faible, les murs étaient suffisamment chauds pour que la vapeur n'ait pas l'occasion de se condenser (Bomberg, et al., 2002). L'amélioration de l'isolation et la démocratisation de l'usage du pare-vapeur ont refroidi les murs et ralenti les exfiltrations, ce qui a fait surgir de problèmes d'humidité (Greig, 1922; Handegord, 1960). La continuité des couches de contrôle (pare-air, isolation, pare-vapeur) est importante pour que le mur soit fonctionnel (Lstiburek, 2007).

Un bâtiment est composé de nombreux matériaux joints ensemble pour former la structure et l'enveloppe. Ces matériaux vont souvent se déformer sous des contraintes, mécaniques, thermiques ou hygriques, durant la vie du bâtiment. Une enveloppe « étanche » est très complexe à conserver à cause des fissures et espacements laissés entre les composants constituant l'enveloppe (Baker, et al., 1976).

L'impression de contrôle sur le transfert de vapeur a rapidement été rattrapée par les études de différents auteurs présentant l'importance majeure du transfert de vapeur par les fuites d'air (Wilson, 1961) (Wilson, et al., 1966). Garden (1965) présente aussi les nombreux dégâts pouvant apparaître avec le temps à cause des infiltrations et exfiltrations. Les conséquences des fuites peuvent se manifester sous forme de dégâts sur les matériaux et sous forme de pertes énergétiques (Jackman, 1974)(pris de (Younes, et al., 2012)). Les impacts sur les matériaux sont décrits plus en détail dans la section « La durabilité ».

En ce qui concerne les pertes énergétiques, Jokisalo *et al.* (2008) ont déterminé que les fuites à travers l'enveloppe causaient une augmentation des charges de chauffage pouvant aller jusqu'à 30 %. Cette étude a été réalisée sur une maison unifamiliale en Finlande en hiver (climat semblable au climat québécois). L'habitation a été construite en 2000 et dispose d'une isolation aux standards finlandais :  $U \leq 0,25 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . La proportion de perte énergétique par les fuites peut paraître importante, toutefois c'est le résultat de l'isolation de l'enveloppe. Augmenter l'isolation va réduire les pertes par conduction, mais induira une augmentation de la part des pertes dues aux infiltrations. Pour les édifices de bureaux, VanBronkhorst *et al.* (1995) ont déterminé que les fuites sont responsables de 15 % des coûts énergétiques en moyenne aux É.-U.

La méthode de calcul traditionnellement utilisée pour estimer l'impact d'une infiltration considère que l'énergie sensible « perdue » est le résultat du produit du taux de transfert massique par la différence d'enthalpie de l'air intérieur/extérieur (McQuinston, et al., 2005), ou autrement exprimé par l'équation (1-2) :

$$q_s = \dot{m}C_p(t_{int} - t_{ext}) \quad (1-2)$$

Où  $\dot{m}$  est le flux de masse d'air (en  $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ),  $C_p$  est la capacité thermique massique de l'air (en  $\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})^{-1}$ ),  $t_{int}$  et  $t_{ext}$  sont les températures intérieures et extérieures.

Si on considère la présence d'une ventilation mécanique, maintenant l'humidité relative intérieure à un niveau constant, il est alors possible d'ajouter la chaleur latente nécessaire à l'humidification de l'air infiltré (McQuinston, et al., 2005), présenté par l'équation (1-3) :

$$q_l = \dot{m}(W_{int} - W_{ext})i_{fg} \quad (1-3)$$

Où  $(W_{int} - W_{ext})$  est la différence des taux d'humidité intérieur et extérieur (en  $\text{kgv}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) et  $i_{fg}$  est la chaleur latente de vaporisation pour les conditions intérieures (en  $\text{J}\cdot\text{kgv}$ ).

Cependant il a été observé par Bhattacharyya *et al.* (1995) que les résultats de l'équation de la chaleur sensible et les mesures réalisées en laboratoire ne convergent pas systématiquement. Bhattacharyya arrive à la conclusion que selon le chemin parcouru par l'air, le mur agit plus ou moins comme un échangeur thermique. Cet auteur propose une correction, représenté par  $\varepsilon$ , de l'équation pour tenir compte de cet effet – équation (1-4). L'auteur base son travail sur des expérimentations où l'entrée et la/sortie(s) de l'infiltration dans le mur sont contrôlées.

$$q_s = (1 - \varepsilon)\dot{m}C_p(t_{int} - t_{ext}) \quad (1-4)$$

Buchanan et al. (2000) reprend la théorie de Bhattacharyya (1995) pour la modéliser et ainsi simplifier l'évaluation de l'impact d'une infiltration sur un mur en ossature « traditionnelle ». Buchanan observe une bonne corrélation entre ses résultats de modélisation et ceux issus des expérimentations faites par Bhattacharyya. Buchanan a permis d'observer que selon la composition du mur, le chemin d'infiltration et le taux d'infiltration, la récupération de chaleur peut varier de 20 % à 40 %. Ces recherches ont été effectuées sans tenir compte de l'humidité relative sur des murs en ossature légère.

Avec l'amélioration des pratiques, les bâtiments sont devenus de plus en plus étanches, ce qui a rendu nécessaire l'utilisation de ventilation mécanique, le renouvellement de l'air ne se faisant plus par les murs et

fenêtres. Il existe aujourd'hui des ventilations mécaniques pourvues d'échangeur de chaleur permettant de récupérer la chaleur de l'air vicié sortant du bâtiment pour préchauffer l'air frais entrant.

La motivation derrière l'amélioration de la performance énergétique des bâtiments est principalement l'augmentation du coût de l'énergie nécessaire au chauffage et à la climatisation (Bomberg, et al., 2002). Ainsi, dans les années 1980, le gouvernement canadien a soutenu un programme pour le développement d'habitations saines et efficaces, le programme R-2000 (Natural Resources Canada, 2012) (Shaw, et al., 2001). D'autres programmes avec des objectifs similaires, mais plus ambitieux, ont vu le jour, notamment l'institut PassivHaus (Passive House Institute, 2015), qui décrit les cinq points importants pour l'efficacité énergétique d'un bâtiment :

- L'isolation thermique
- Des fenêtres hautes performances
- La ventilation avec récupération de chaleur
- L'étanchéité à l'air du bâtiment
- L'absence de ponts thermiques

### **1.1.5.2. La durabilité**

#### **a. Par rapport au bâtiment**

Une accumulation d'humidité avec une température suffisamment élevée peut mener au développement de moisissures en surface (Johansson, 2012), et à de la pourriture dans le bois dans les pires cas. La moisissure ne détériore pas la structure du bois en profondeur comme peut le faire la pourriture (Zabel, et al., 1992) (Viitanen, 1994), mais va induire une décoloration en surface des matériaux. Cette décoloration est un indice assez évident d'un problème d'humidité dans le mur.

Les problèmes d'humidité proviennent d'accumulations excessives. La diffusion ne permet pas d'atteindre une humidité critique lorsqu'elle est gérée par une membrane n'autorisant qu'un certain flux de par sa perméabilité. Les déplacements d'air à travers l'enveloppe représentent un risque supérieur, la quantité d'eau portée par déplacement d'air étant bien supérieure à la diffusion.

L'utilisation de matériaux faisant barrière ou frein à la vapeur du côté chaud permet de limiter le flux entrant dans le mur, la perméabilité des matériaux utilisés dans le mur étant idéalement croissante de l'intérieur vers l'extérieur, afin que le mur sèche vers l'extérieur (en climat froid). Toutefois, dans certaines situations, il est préférable que le mur puisse sécher vers l'intérieur : en séchant rapidement, on évite les accumulations d'humidité.

**b. Par rapport aux occupants**

De plus, un problème d'humidité dans un mur peut être responsable de la mauvaise qualité de l'air intérieur. Une forte humidité ou la présence de moisissure sont les causes de problèmes respiratoires chez l'Homme (Fisk, et al., 2007) (Pirhonen, et al., 1996).

Rapport-Gratuit.com

### **1.1.6. La performance énergétique et durabilité du système constructif en CLT**

Comme expliqué précédemment, le CLT est un matériau constitué de planches de bois collées orthogonalement entre elles. Avec son importante épaisseur (100 mm au minimum), un panneau CLT a un effet pare-vapeur et pare-air, et un certain degré d'isolation thermique en plus de sa fonction structurale de base.

L'effet pare-vapeur et pare-air n'est utilisable que si le panneau est continu, comme pour une membrane. La différence avec une membrane est que le CLT est hygroscopique et ses dimensions vont varier avec la teneur en humidité. Le retrait dû au séchage du bois peut faire fissurer les planches ou élargir les joints entre les planches. Dans la majorité des cas les planches ne sont pas collées sur chants et n'ont pas été sciées dans leur longueur pour relâcher le stress. Skogstad (2011) a évalué la perméabilité à l'air de panneaux de CLT et d'assemblages plancher/mur. Il a pu déterminer que les panneaux peuvent effectivement remplir un rôle de membrane, mais qu'il est préférable d'utiliser une membrane. Il a aussi pu constater que les assemblages de CLT doivent être renforcés de joints souples et élastiques pour être étanches.

Lepage (2012) et (McClung, et al., 2014) ont évalué la durabilité des panneaux de CLT vis-à-vis de l'humidité de construction. Lepage a ainsi expérimenté et simulé une prise d'humidité accidentelle (pour représenter l'humidification lors de la construction) et observé comment le CLT sèche une fois « emmuré ». Lepage arrive à la conclusion que les compositions de murs en CLT utilisées dans le système constructif en CLT canadien sont durables pour une utilisation normale. Cette durabilité, selon Lepage, est due à la capacité de stockage d'humidité ainsi qu'aux propriétés de résistance à la vapeur et thermique du CLT. Toutefois, lors d'événements d'humidification importante, la durabilité du système est compromise. La capacité de séchage du mur de CLT est alors primordiale pour réduire la durée des périodes où l'humidité est en excès ainsi que les problèmes qui en découlent. L'utilisation de membranes pare-air de forte perméabilité permet de ne pas ralentir le phénomène de séchage du mur.

À l'aide d'un logiciel de simulation (Delphin), Wang (2016) a modélisé différentes compositions de murs en CLT selon le système constructif canadien pour évaluer la performance hygrothermique avec et sans infiltration d'eau de pluie dans le mur. Comme Lepage, Wang arrive à la conclusion qu'il est préférable d'utiliser des membranes de forte perméabilité à la vapeur d'eau pour que le système sèche plus vite.

### **1.1.7. L'expérimentation**

Le prototypage et l'expérimentation sont des méthodes aussi utilisées qui permettent d'observer la performance d'un système durant une période d'instrumentation.

Ces expérimentations in situ peuvent prendre la forme de reproduction d'un système constructif à échelle réduite ou de l'instrumentation de bâtiments « réellement » en service.

Une des particularités du premier cas est que, souvent, dans un bâtiment test, à échelle réduite, l'intérieur est chauffé/climatisé, mais inoccupé. Cela ne représente pas entièrement l'impact d'un occupant, qui va moduler la température en fonction de son ressenti du confort thermique, ou de la vapeur générée par l'activité humaine.

L'instrumentation de bâtiment quotidiennement utilisé est plus complexe. Il faut poser les capteurs lors de la construction pour éviter d'importuner les occupants. Les occupants permettent de mettre le bâtiment à l'épreuve dans des conditions réalistes; néanmoins tous les occupants n'ont pas un comportement semblable, ce qui peut faire fluctuer la charge d'humidité et de chauffage. Ce genre d'expérimentation permet davantage de faire l'évaluation d'un projet pilote venant appuyer un concept.

L'inconvénient majeur des expérimentations est qu'elles requièrent d'être faites sur une longue période et ne donnent des résultats que pour des cas particuliers de climat et de système constructif. Toutefois les résultats des expérimentations in situ servent souvent de base de comparaison avec des simulations, afin de valider le modèle utilisé (Winter, et al., 2012), (Ozolins, et al., 2013), (Janols, et al., 2013), (Glass, et al., 2015).

### **1.1.8. Les simulations hygrothermiques**

Les technologies actuelles permettent de faire des modèles informatiques représentant des phénomènes physiques s'appliquant sur des systèmes. La simulation permet d'avoir rapidement des résultats, notamment lors de la représentation de phénomène lent, comme la diffusion de chaleur et d'humidité.

La modélisation informatique est une aide à la conception, à la manière du prototypage. Cela permet d'évaluer un système avant qu'il ne passe en production.

Les résultats de modélisations dépendent beaucoup des paramètres utilisés. Les principaux paramètres concernent le climat extérieur, souvent bien documenté pour de nombreuses villes, et les matériaux. Les conditions climatiques intérieures dépendent des conditions extérieures, du type de bâtiments, de l'occupation et de la norme de confort observée. Ces paramètres sont souvent implémentés dans le logiciel de modélisation, comme c'est le cas pour le logiciel *Wärme Und Feuchte Instationär*, communément raccourci par WUFI (Fraunhofer IBP).

#### **1.1.8.1. Paramètres**

Pour simuler les transferts de chaleur et de masse à travers un mur, il faut connaître les propriétés hygrothermiques des matériaux. Certaines propriétés vont changer en fonction de la température ou de

l'humidité (d'autant plus pour des matériaux hygroscopiques comme le bois). Les propriétés doivent donc tenir compte de la teneur en humidité du matériau et de la température.

Toutes les propriétés des matériaux ne sont pas aussi fréquemment utilisées dans l'industrie ou la recherche, et certaines sont plus longues ou complexes que d'autres à déterminer. En considérant la variété de matériaux utilisés en construction, il est difficile d'avoir des données homogènes sur un matériau spécifique si une étude n'a pas été faite spécialement pour ce matériau (en spécifiant bien son origine). Pour pallier le manque d'informations sur les propriétés des matériaux de construction, Kumaran *et al.* (1996) (2002) ont fait un travail d'agrégation d'information sur les propriétés hygrothermiques des matériaux. De nombreux chercheurs de 14 pays différents ont participé à ce travail; la mise en commun de matériaux similaires, mais ayant diverses origines, permet d'observer une certaine variabilité dans leur propriétés.

Cette variabilité a été rapportée comme un frein à la simulation hygrothermique (Wu, 2007). Wu considère que l'agrégation de différents paramètres ne provenant pas spécifiquement d'un matériau est risquée. Toutefois Al-Sayegh (2012) a montré que les propriétés de panneaux de CLT d'origines diverses (canadiens et européen) étaient similaires. Une comparaison de la perméabilité à la vapeur du CLT avec l'épinette testé par Wu (2007) a également montré une forte correspondance (Al Sayegh, 2012).

#### **1.1.8.2. Logiciels WUFI et COMSOL**

De nombreux logiciels permettent de faire de la modélisation hygrothermique (Delgado, et al., 2013). Si tous les logiciels ne donnent pas les mêmes résultats, les validations faites par la suite permettent de donner du crédit à un logiciel plutôt qu'à un autre. Cela permet aussi aux développeurs d'affiner leur modèle. La convivialité du logiciel et la richesse de sa base de données sont également des critères de sélection.

Künzel (1995) présente la méthode de calcul utilisé par WUFI dans son travail de thèse et fait une des premières validations du logiciel. WUFI est un logiciel de modélisation plus complet et précis que la méthode de Glaser jusque-là utilisé (Glaser, 1958). Le modèle a été maintenu à jour et WUFI est désormais un logiciel incontournable pour faire de la simulation hygrothermique ou HAM pour *Heat Air and Moisture*.

Pour un climat nordique (Finlande), Winter (2012) a comparé des simulations hygrothermiques faites sur le logiciel WUFI avec des mesures *in situ*, sur des bâtiments en bois massif. Winter a observé une bonne corrélation entre les mesures et les résultats des modélisations informatiques, ce qui a permis de valider WUFI pour ce cas particulier.

COMSOL Multiphysics est un logiciel de simulation pouvant coupler de nombreuses physiques simultanément. Le couplage de plusieurs types de physique permet par exemple de modéliser la convection naturelle générée

par un gradient de température. Parmi les physiques gérées par COMSOL, on peut citer les transferts de chaleur et de masse, l'acoustique et la mécanique des structures. Un des avantages de COMSOL est son module de création de géométrie, assez similaire à ce qu'on peut retrouver sur des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO ou CAD en anglais).

Ozolins (2013) a comparé des simulations hygrothermiques faites sur COMSOL avec des simulations faites sur WUFI ainsi que des expérimentations. L'expérimentation portait sur des bâtiments en ossature légère et en bois massif dans un climat nordique (Riga, Lettonie). Ozolins a pu observer une bonne corrélation entre les résultats des simulations et les mesures prises.

Une analyse comparative des résultats de simulation HAM en 3D de COMSOL (Knarud, et al., 2015) par rapport à un travail de référence sur les analyses hygrothermiques (Hagentoft, 2002) permet d'appuyer la validité de COMSOL.

Kersten (2013) a utilisé COMSOL afin de proposer une méthode pour simuler l'effet du transfert de chaleur et de masse dans un mur doté d'une cavité, cela afin de mieux comprendre les échanges de chaleur entre les parois et le fluide dans la cavité.

## **1.2. Objectif**

### **1.2.1. Objectif général**

Par une approche expérimentale et de simulation, établir la performance du système constructif en panneaux lamellés-croisés (CLT) en termes de performance énergétique et de durabilité en situation de climat nordique.

### **1.2.2. Objectifs spécifiques**

- Mesurer les caractéristiques thermiques des panneaux de CLT.
- Mesurer les caractéristiques thermiques de la composition d'enveloppe des logements en CLT.
- Évaluer l'impact sur la performance énergétique d'une jonction entre deux panneaux de CLT, en présence d'infiltration ou d'exfiltration.
- Évaluer l'impact sur la durabilité d'une jonction entre deux panneaux de CLT, en présence d'exfiltration.

## 1.3. Sommaire méthodologique

### 1.3.1. Expérimentations :

#### 1.3.1.1. Constitution de l'enveloppe des bâtiments mobiles (logements de camp forestier testés par le SEREX).

Les bâtiments mobiles ont été conçus afin d'avoir le plus d'espace de vie possible tout en étant dans les normes de largeur pour les convois sur routes. Dans cet esprit, les murs sont souhaités minces et composés des matériaux suivants :

- CLT 3 couches, 97 mm,
- Isolant Polyisocyanurate ( $k=0.024$  W/mK), 69,85 mm.

Un parement extérieur de tôle, posé sur des tasseaux est également présent, toutefois cette couche n'apporte pas de protection thermique ni ne fait obstacle à la vapeur ou au passage de l'air. Le revêtement extérieur sert exclusivement à faire barrière à la pluie, au rayonnement solaire et au vent dans une moindre mesure (la couche d'air sous le revêtement est ouverte/ventilé avec l'extérieur).

#### 1.3.1.2. Équipement.

Les mesures de la conductivité thermique et de la capacité thermique massique du CLT ont été mesurées avec l'instrument suivant :

- Fox lasercomp 314.

#### 1.3.1.3. Normes suivies :

Les mesures de la conductivité thermique et de la capacité thermique des panneaux de CLT réalisées avec la Fox 314 ont été faites respectivement dans l'esprit des normes :

- *Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*, (ASTM C518-17, 2017),
- *Standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products*, (ASTM C1784-14, 2014).

Dans son étude des bâtiments mobiles, le SEREX a utilisé le guide et la norme ci-dessous, pour la thermographie et pour l'infiltrométrie respectivement :

- *Manual for Thermographic Analysis of Building Enclosures*, (Canadian General Standards Board 149-GP-2MP, 1986),
- *Standard Test Methods for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door*, (ASTM E1827-11, 2017).

### **1.3.2. Simulations.**

La composition de l'enveloppe des bâtiments mobiles en CLT pour la simulation suit la composition des bâtiments réels :

- CLT 3 couches 97 mm,
- Isolant Polyisocyanurate/Polyuréthane ( $k = 0,025 \text{ W/mK}$ ), 69,85 mm.

Comme précédemment, le revêtement extérieur n'est pas considéré par l'étude car il n'influence ni le transfert de chaleur ni le transfert d'humidité. Une fraction du rayonnement solaire et de la pluie battante peut entrer en compte dans les flux de chaleur et de masse traversant l'enveloppe, toutefois ces conditions sont occasionnelles et dépendent beaucoup de l'orientation du bâtiment et du contexte géographique locale. C'est pourquoi la pluie battante et le rayonnement solaire ne sont pas considérés dans nos simulations.

Pour obtenir une performance thermique de l'enveloppe de R24.5, tel qu'on peut le rencontrer dans la construction résidentielle, l'épaisseur d'isolant doit être plus importante, la constitution de l'enveloppe est alors :

- CLT 3 couches 97 mm,
- Isolant Polystyrène Extrudé (XPS) ( $k = 0,029 \text{ W/mK}$ ), 101,6 mm.

### **1.3.3. Logiciels utilisés.**

Pour la simulation des transferts hygrothermiques, deux logiciels ont été choisis, WUFI (Fraunhofer IBP) et COMSOL (COMSOL Multiphysics® Inc., 2017).

### **1.3.4. Paramètres utilisés pour la simulation :**

Le tableau 1-1 présente les paramètres utilisés lors de la simulation de façon plus détaillée que dans l'article. Les sources dont proviennent les paramètres sont données dans l'article.

Dans la formule du calcul de la masse volumique de l'air humide,  $\rho_a$  et  $\rho_v$  sont respectivement la masse volumique de l'air et de la vapeur d'eau, fonction de la température, équation (1-5) et (1-6). Où  $M_a = 0,02897 \text{ kg/mol}$  et  $M_v = 0,018 \text{ kg/mol}$  sont les masses molaires de l'air et de l'eau,  $pA$  est la pression absolue en pascal (Pa),  $R_{const} = 8.3144 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$  est la constante des gaz et  $T$  la température en kelvin (K).

La variable  $X_a$  est la fraction molaire d'air sec dans le mélange d'air humide, dont le calcul est présenté équation (1-7).  $X_v$  est la fraction molaire de vapeur d'eau, calculée selon la formule (1-8) où  $\varphi$  est l'humidité relative,  $pA$  la pression absolue et  $P_{saturation}(T)$  la pression de vapeur saturante qui est fonction de la température.

$$\rho_a = \frac{pA \cdot M_a}{R_{const} \cdot T} \quad (1-5)$$

$$\rho_v = \frac{pA \cdot M_v}{R_{const} \cdot T} \quad (1-6)$$

$$X_a = 1 - X_v \quad (1-7)$$

$$X_v = \frac{\varphi \cdot P_{saturation}(T)}{pA} \quad (1-8)$$

Au tableau 1-1, dans la formule pour le calcul de la capacité thermique massique de l'air humide,  $M_a$  et  $M_v$  sont les masses molaires respectives de l'air et de l'eau. Dans la même formule,  $Cp_a$  et  $Cp_v$  sont les chaleurs spécifiques de l'air et de la vapeur d'eau, calculées par COMSOL en fonction de la température.

Dans la formule de la perméabilité de vapeur pour l'air stagnant, proposée par Schirmer (1938), prise de (Wu, 2007),  $P_0$  est la pression atmosphérique,  $T$  la température de l'air en kelvin (K),  $R_v$  est la constante spécifique pour la vapeur d'eau ( $R_v = 461,5 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ) et  $P_a$  est la pression ambiante en pascal (Pa).

Tableau 1.4-1. Liste complète des paramètres utilisés pour la simulation.

	Air		CLT		XPS	
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_a \cdot X_a + \rho_v \cdot X_v$		515		48	
Conductivité thermique [W/(m.K)]	0.024		0.11		0.029	
Capacité thermique massique [J/(kg.K)]	$\frac{(X_a \cdot M_a \cdot Cp_a + X_v \cdot M_v \cdot Cp_v)}{(X_a \cdot M_a + X_v \cdot M_v)}$		1286		1500	
Teneur en eau [kg/m <sup>3</sup> ]	0	0	0	0	0	0
	0.5	0.484	0.2	26.38	0.5	0.461
	0.6	0.723	0.35	36.43	0.6	0.684
	0.7	1.11	0.5	47.73	0.7	1.06
	0.8	1.88	0.65	61.55	0.8	1.79
	0.85	2.62	0.8	79.13	0.85	2.49
	0.9	4.03	0.9	92.95	0.9	3.83
	0.91	4.48	0.95	110.54	0.91	4.26
	0.92	5.03	0.99	200.98	0.92	4.78
	0.93	5.71	0.995	247.45	0.93	5.43
	0.94	6.59	0.999	373.06	0.94	6.27
	0.95	7.77	0.9995	432.1	0.95	7.38
	0.96	9.4	0.9999	563.99	0.96	8.94
	0.97	11.8	1	851.63	0.97	11.3
	0.98	15.9			0.98	15.1
	0.99	23.9			0.99	22.7
	0.995	31.7			0.995	30.2
	1	47.1			1	44.8
Perméabilité à la vapeur [kg/(Pa.m.s)] ou [s]			0.1	7E-13	0.1	2.00E-3
			0.2	1E-12	0.2	4.00E-3
			0.3	2E-12	0.3	7.00E-3
			0.4	3E-12	0.4	5.00E-3
			0.5	5E-12	0.5	1.00E-2
			0.6	8E-12	0.6	2.00E-2
			0.7	1E-11	0.7	4.00E-2
			0.8	2E-11	0.8	7.00E-2
			0.9	4E-11	0.9	1.00E-1
			1	7E-11	1	2.00E-1
Coefficient de diffusion [m <sup>2</sup> /s]			0	2.00E-10	0.287	1.10E-11
			0.8	2.00E-10	0.508	8.60E-12
			0.9	4.00E-10	0.509	8.50E-12
	0.282		1	8.00E-10	0.615	7.20E-12
					0.691	9.50E-12
					0.812	1.10E-11
					1	1.10E-11

## Chapitre 2

# Modeling the Impact of Assembly Tolerances Regarding Air Leaks on the Energy Efficiency and Durability of a Cross-laminated Timber Structure

### 2.1.1. Résumé

Les fuites d'air ont un impact négatif reconnu sur l'efficacité énergétique et la durabilité des bâtiments, en particulier dans les régions climatiques froides. Dans le système constructif en CLT, les fuites d'air sont concentrées aux jonctions entre plusieurs panneaux et aux jonctions des panneaux avec d'autres éléments. Cette étude se base sur des simulations des transferts de chaleur et de masse au travers un espace libre, une tolérance d'assemblage, entre deux panneaux de CLT en présence de fuites d'air pour un climat froid. Un cas de fuite existant sur un bâtiment a servi à dimensionner une surface d'infiltration modèle. L'objectif de ce travail était d'évaluer l'impact sur la performance énergétique et la durabilité d'une infiltration et d'une exfiltration pour une tolérance d'assemblage variable, selon différents niveaux d'humidité relative de l'air. Les infiltrations se sont avérées avoir un impact plus important sur l'efficacité énergétique que les exfiltrations, toutefois les infiltrations ne sont pas une menace pour la durabilité, contrairement aux exfiltrations. La variation de la tolérance d'assemblage dans le CLT a un impact limité sur l'efficacité énergétique et la durabilité, car le débit d'air maximum dans l'infiltration/exfiltration est modéré par une dépendance avec le chemin de fuite dans le reste du mur. Comme attendu, exfiltration et haute humidité relative de l'air ont un effet synergique très dommageable pour le mur dans le cas d'un climat froid.

### 2.1.2. Abstract

Air leaks are known to have considerable impact on the energy load and durability of buildings, particularly in cold climates. In massive wood construction using Cross-laminated Timber (CLT), air leaks are most likely to be concentrated at the joints between panels and with other elements. This study used simulations of heat, air and moisture transfers through a gap between two CLT panels causing air leakage in winter conditions under a cold climate. A real leakage occurrence was sized to validate the simulations. The aim of this work was to assess the impact on energy loads and durability of an air leak, either as infiltration or exfiltration, for different gap widths and relative humidity levels. Infiltrations were seen to have a greater impact on energy load than exfiltrations but did not seem to pose a threat for durability, as opposed to exfiltrations. Gap sizes in CLT may vary, but the effect

on energy load and durability was found to be sensitive to the leakage path in the rest of the wall. As expected, a combination of winter exfiltration and high level of interior relative humidity was found to be particularly damageable.

### **2.1.3. Introduction**

Cross-laminated Timber (CLT) building construction is viable and cost-effective by comparison to steel/concrete systems in mid-rise buildings, in both residential and non-residential sectors (Laguarda Mallo, et al., 2014) (Lehmann, 2012). CLT allows for the construction of taller wood buildings (6 stories and more), thus opening up a market that has not yet been significantly penetrated by wood products in Canada and the USA (Crespell, et al., 2011). Wooden products offer the additional advantage of being more environmentally friendly than the materials they tend to replace. The ecological footprint of CLT buildings is lesser than that of their concrete counterparts (O'Connor, et al., 2011) due to the renewable nature of wood, the shorter building time required and reduced waste on the building site (Laguarda Mallo, et al., 2014). In Europe, where CLT originates, demand for CLT has increased in the last 25 years (Schickhofer, 2015). If the North American CLT market follows the same trend, with growing demand for renewable and durable building materials, demand and applications for CLT should increase in the future (Natural Resources Canada, 2016). It would be of interest to analyze the CLT building system while it is in its growing phase, and provide recommendations as the market develops in North America.

There are numerous methods of assembling CLT panels. The simple method selected in this work consisted in fastening two flat surfaces with butt-joints, which could also be used in angles and flat junctions. CLT panel assembly commonly leads to the creation of gaps at the junction of two panels. Such gaps are referred to as “assembly tolerance” when under control, or “gap” when not under control. A tolerance is permitted at the design stage to ease assembly on the construction site. Whenever the gap exceeds the tolerance, it becomes a gap that is distributed through the whole length and thickness of the panel. At this point the CLT system no longer serves as a physical barrier to air movement, caused by a pressure differential between on both sides of the wall. In the event of leakage or defect in the vapor barrier and air barrier layers, a gap in the CLT can act as a shortcut for air transfer through the wall, in the form of infiltration or exfiltration.

Infiltration/Exfiltration cause a significant loss of energy, hence increased energy consumption in the short term. Exfiltration may also have an impact on the durability of the envelope over the longer term, and lead to an accumulation of moisture within the wall (Ojanen, et al., 1996). Wood is an organic material subject to biodegradation. Under certain conditions of temperature and relative humidity, mold, rot and insects are the main

threat to its durability (Viitanen, et al., 1991). The structural integrity of the wall, often bearing wall in a CLT construction, can be threaten

The aim of this paper was to model an assembly gap in a CLT wall to analyze its impact in conjunction with an air leak on energy efficiency and durability. The simulations required hygrothermal parameters for the building materials, known boundary conditions and software capability for computing the different dynamic physical phenomena. To model the behavior of a gap in a wall, Leakage size being the most determinant factor of infiltration/exfiltration, the surface of leakage was firstly estimated for an existing CLT building located in the province of Quebec, Canada using thermal imagery of an infiltration and simulations.

## **2.1.4. Materials and Methods**

### **2.1.4.1. Envelope Composition**

As shown in Figure 2-1, a simplified envelope was used to facilitate modeling. It excluded the external facing, which does not play a key role in hygrothermal transfers through the wall, given that the air layer behind the facing is vented to the outside. The CLT is the structural material and the extruded polystyrene (XPS) provides insulation. The CLT also serves as a vapor barrier due to its low vapor permeability and its thickness (Lepage, 2012). In practice, however, it is widely recommended to use a vapor barrier that is designed for this specific job (Skogstad, et al., 2011).

In the first part of the study, a temporary home for workers built with CLT was taken as a reference. The thickness of the three-ply CLT panels was 97 mm, and the thickness of the insulation was 70 mm. In the second part, a permanent residential building with standard insulation ( $R_{24} = 4.23$  RSI) was considered. CLT and insulation thicknesses were 97 mm and 101.6 mm (4 inches) respectively.

To further simplify the model, the thickness of insulation was considered to be one homogeneous layer instead of multiple layers. Simulations with WUFI (*Wärme Und Feuchte Instationär*) showed no significant differences between one or two layers of insulation material for a given overall thickness.

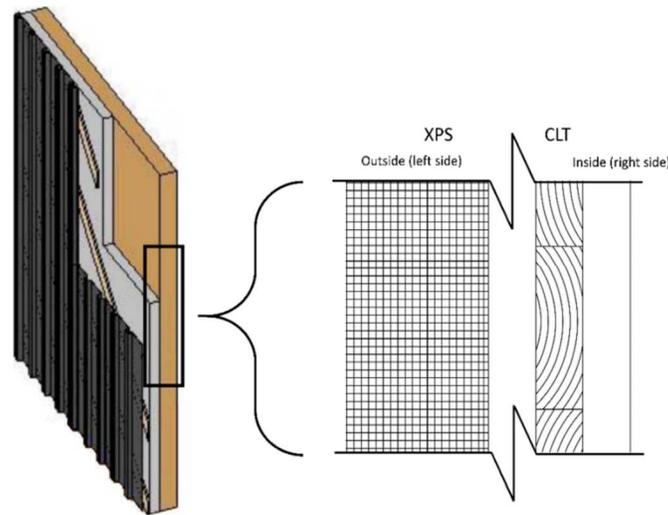


Figure 2-1. Complete envelope (left) (Pineault, et al., 2016) and simplified version (right)

## 2.1.4.2. Hygrothermal Parameters of Materials and Climatic Conditions

### a. Hygrothermal Parameters

The HAM (Heat Air and Moisture) model requires six main parameters, i.e.: thermal conductivity, heat capacity, density, moisture content, permeability and the diffusion coefficient of water vapor. These parameters vary, more or less substantially, according to relative humidity.

The CLT was manufactured by Chantier Chibougamau (Quebec, Canada) from selected Spruce-Pine-Fir (SPF) lumber, mostly black spruce (*Picea mariana* Mill). In this study, black spruce was assumed to share similar hygric properties with European spruce of the same genus used in European CLT due to the lack of more specific data. Thermal conductivity and heat capacity were measured in our facilities following (ASTM C518-17, 2017) and (ASTM C1784-14, 2014) standards respectively. The density was obtained from the manufacturer of the CLT. Water vapor permeability for wood was taken from Wu (2007), who used Canadian spruce (*Picea mariana*) in conjunction with the manufacturer's data. The CLT moisture content was derived from WUFI (Fraunhofer IBP). The diffusion coefficient was obtained from Krus (1999).

The thermal conductivity and water vapor permeability values of XPS insulation used for modeling were provided by Owens Corning (2011). The other properties were extracted from the WUFI database, except the diffusion coefficient, which was determined by curve fitting with WUFI and the COMSOL Multiphysics modeling tool. As with the solid materials, the hygrothermal properties of the air gap were related to the temperature and relative humidity. Thermal conductivity, heat capacity and moisture content were also obtained from WUFI. The density of moist air was calculated with the perfect gas law for a mix of two species. The permeability of stagnant air was calculated as suggested by Schirmer (1938) as cited by Wu (2007). The diffusion coefficient of water vapor in air came from Cussler (2009) in conjunction with the values found by Mostinsky (2011).

The parameters used in COMSOL are summarized in Table 2-1 for the different materials in the envelope.

Table 2-1. Hygrothermal properties of materials used for the simulations.

• Properties	Materials		
	CLT	Air	Insulation (XPS)
• Thermal conductivity ( $W / (m \cdot K)$ )	0.11	0.024	0.029
• Heat capacity ( $J / (kg \cdot K)$ )	1286	1000	1500
• Density ( $kg/m^3$ )	515	$\rho_{air\ humid} = \frac{P_{air\ sec}}{R_{air\ sec} \times T} + \frac{P_{vapeur}}{R_{vapeur} \times T}$	
• Water vapor permeability ( $ng / (Pa \cdot s \cdot m)$ )	Interpolation	$\delta_a = \frac{2.306 \times 10^{-5} \times P_0}{R_v T P_a} \left( \frac{T}{273.13} \right)^{1.81}$	
• Moisture content ( $kg/m^3$ )	Interpolation	Interpolation	Interpolation
• Diffusion coefficient ( $m^2/s$ )	2E-10 to 8E-10	2.82E-05	1.00E-12

## b. Climatic Conditions

The temperature used to simulate exterior climate conditions was -12°C, this being the average January temperature in Quebec City, Quebec, Canada. The measurements were taken at the Jean-Lesage airport meteorological base (ASHRAE, 2009). The relative humidity, set at 80 %, was based on measurements taken in January in Quebec at a similar temperature.

In the absence of external facing, the outside conditions were applied directly to the insulation. Simulations with WUFI showed that the temperature and relative humidity behind the external facing are close to exterior conditions. Interior conditions were based on ASHRAE Standard 55, which sets a range of temperature and relative humidity conditions for thermal comfort.

### **2.1.4.3. Modeling and Validation**

COMSOL Multiphysics, which was selected as the main modeling tool, is not specialized in hygrothermal modeling but it allows to jointly model HAM and CFD (Computational Fluid Dynamic) while using CFD data to update the HAM model.

COMSOL is more efficient in addressing complex domain geometry than WUFI. To validate COMSOL results, simulations with the two tools were compared in both steady and transient states. WUFI is a reference in the domain and has been validated multiple times in in-situ studies.

### **2.1.4.4. Gap Sizing**

This section describes the method to determine the gap parameters subsequently used in this research. The method is based on thermograms of a corner showing evidences of an infiltration and modeling of the same corner. Thermal imagery and infiltration analyses were conducted by Pineault *et al.* (2016) following the ONGC-149-GP-2MP and ASTM E1827–11 standards respectively. Instead of regarding the gap's path in the wall as complex, it was assumed that the gaps in CLT and in the insulation were aligned, which makes it the worst case scenario. The modeling of the walls and the gap was carried out on COMSOL with boundary conditions set to reflect measured data and observations. As the size of the gap increased, so did the leakage rate, cooling the surface on each side of the assembly. Such cooling was observed on thermal imagery and could be estimated with the color scale represented in Figure 2-2. With multiple COMSOL iterations, the width of the gap in the insulation was determined. The assembly tolerance between CLT panels was set at 2 mm, in accordance with in-situ observations.

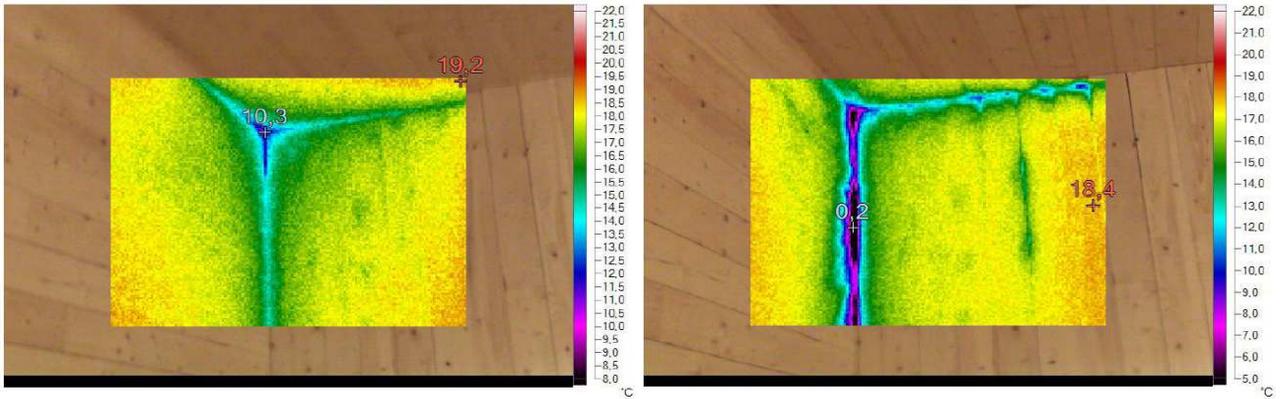


Figure 2-2. Thermal imagery taken from the inside during a blower door test at 4 Pa and 50 Pa

To assess the impact of an infiltration/exfiltration at the junction between two panels, the size (or surface) of the gap section must be known in both the CLT and the insulation. The size of a gap was determined from thermographic pictures from an angle junction in a CLT building with the CLT left visible, as shown in Figure 2-2. More simply put, we use the case of a gap in a corner (angle) wall of CLT for the sizing. A thermogram was taken at 4 Pa of depressurization/vacuum (exterior minus interior) and another at 50 Pa to force infiltrations. The modeling results shown in Figure 2-3 allows the observation of the temperature drop across the wall and along the interior wall's surface.

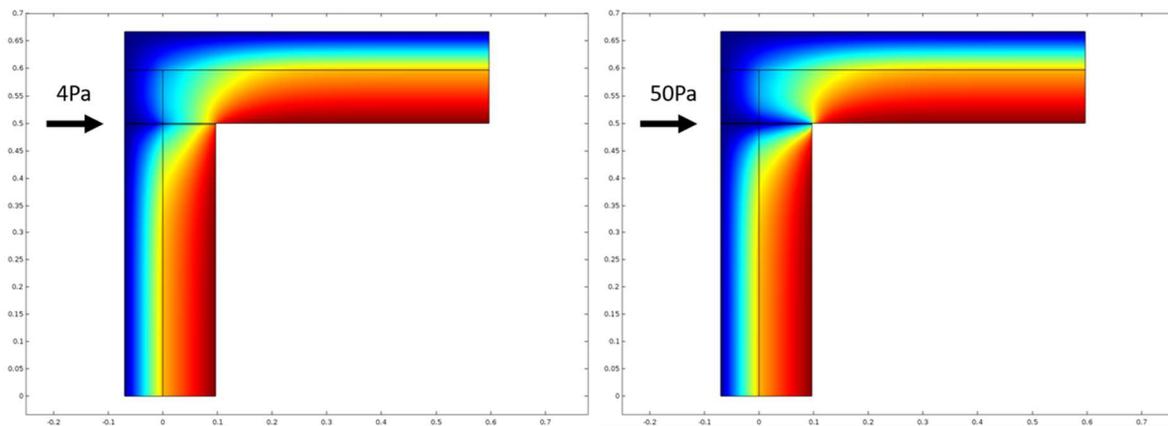


Figure 2-3. Effect of air infiltration on wall temperature, seen in cross section, for 4 Pa and 50 Pa after 45 minutes.

## 2.1.4.5. Energy Efficiency and Durability

### a. Energy Efficiency

The heat flux equation (2-1) through the wall is the sum of the conduction flux equation (2-2), the convection flux equation (2-3) and the radiative flux equation (2-4). The radiation, equation (2-4), was not considered, because it was found to be negligible compared to the other two transfer modes ( $\sim 1.2 \text{ E-3 W / m}^2$ ).

$$q_{wall} = q_{conduction} + q_{convection} + q_{radiation} \quad (2-1).$$

$$q_{cond} = -k \times \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (2-2).$$

$$q_{conv} = h \times \Delta T \quad (2-3).$$

$$q_{rad} = \varepsilon \times \sigma \times \Delta T^4 \cong 0 \quad (2-4).$$

The heat flux due to the air leakage can be estimated by equation (2-5). The air leakage for both infiltration and exfiltration is provoked by a pressure differential of 4 Pa, CFD calculation was done using COMSOL. The total heat flux per square meter is described by equation (2-6), flux are calculated in COMSOL.

$$q_{leakage} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (2-5)$$

$$q_{total} = \frac{A_{wall}}{A_{total}} \times q_{wall} + \frac{A_{leakage}}{A_{total}} \times q_{leakage} \quad (2-6)$$

The overall heat transfer coefficient, U-value as defined in equation (2-7), was also used. It helped with comparisons between different envelope characteristics, independently of the temperature difference on each side of the wall.

$$U = \frac{1}{R_{\acute{e}qui}} = \frac{q_{total}}{\Delta T} \quad (2-7)$$

### b. Durability

Favorable conditions for the growth of mold and rot on Picea wood were described by Hukka, (1999), Viitanen and Ojanen (2007). With the temperature and relative humidity profiles obtained from simulations, it was possible to identify conditions favorable to mold growth.

WUFI uses a special type of graph (temperature on x-axis and relative humidity on y-axis) to show if a chosen position in the wall is at risk at any time in the simulation. In our case, the temperature and relative humidity were constant. Points were placed in space rather than over time to determine if conditions favorable to mold growth developed in the wall. In the case of air exfiltration modeling, the relative humidity ranged from 30 % to 60 %, which is considered acceptable according to Standard 55 (ASHRAE, 2013). Besides mold risk, the risk of condensation (relative humidity =100%) in the wall was monitored.

## 2.1.5. Results and Discussion

The results are presented in four sections: the validation of the model, the sizing of the gap, the simulation of energy efficiency, and the assessment of durability.

### 2.1.5.1. Model Validation

Figure 2-4, Figure 2-5 and Figure 2-6 show the temperature and relative humidity curves through the thickness of the wall without a gap, such as modeled with WUFI and COMSOL. Boundary conditions were the same in both cases. The materials were the same; however COMSOL used the parameters presented in Table 2-1 while WUFI used parameters from its materials database.

In Figure 2-4, the impact of using two insulating panels in a skin/core/skin configuration was simulated for comparisons with the simplified model shown in Figure 2-5. The water vapor permeability of the skin being different from that of the core, the relative humidity profile was not linear. However, Figure 2-4 and Figure 2-5 show no difference in the relative humidity at the boundary with the CLT, which supports the decision to model a single layer of insulation with homogeneous properties. A difference in relative humidity profiles was observed between Figure 2-5 and Figure 2-6. The difference between WUFI and COMSOL was under 5% in the XPS. It was greater in the CLT, as COMSOL tends to overestimate relative humidity by comparison with WUFI.

The results from both models were close enough to validate the parameters used in the COMSOL model. This validation was mandatory to allow using COMSOL in complex cases with confidence.

In Wu (2007), the author noticed that it was rare to find hygrothermal parameters for specific building materials. Indeed there are different building systems used across the world and even if wood is a common material, it is used under various forms made from various species. Al Sayegh (2012) and Lepage (2012) showed that differences between CLTs from various origins (Europe and Canada) mainly came from the cracks in the wood and the way boards are glued together, this having an effect on the permeability of the panels. Ozolins (2013) evaluated hygrothermal properties of multi-layered walls in cold climate using COMSOL and WUFI and confronted the results with in-situ measurements. He concluded that both COMSOL and WUFI allowed a representative modeling under cold climate conditions. WUFI modeling was also validated by Winter (2012) for massive wooden structures in cold climate.

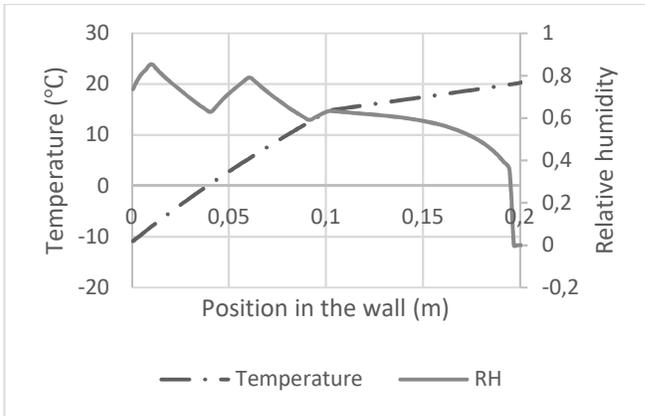


Figure 2-4. (Top left) WUFI modeling of the impact of using two insulation panels, considering the skin/core/skin effect.

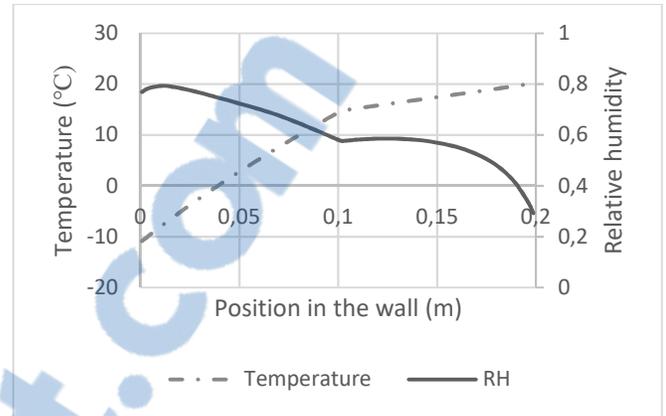


Figure 2-5. (Top right) WUFI modeling of using one insulation panel, without the skin effect

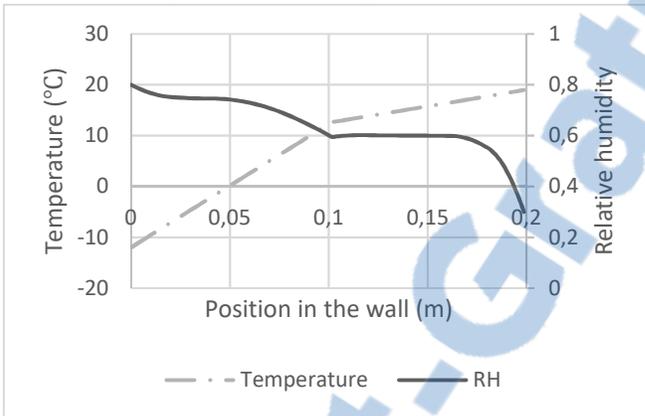


Figure 2-6. (Bottom) COMSOL modeling with parameters from the literature.

### 2.1.5.2. Gap Sizing

Table 2-2 contains data on the range of temperatures observed with the thermal camera imaging along the wall, and the temperature calculated with COMSOL for the wall at an angle connection.

Table 2-2. Approximate temperature observed through thermography and modeling for 4 Pa and 50 Pa of vacuum (infiltration) with the dimensioned gap.

	Without gap (°C)	With gap, 4 Pa (°C)	With gap, 50 Pa (°C)
Thermography	18.4-19.2	10-14	0.2-7
Modeling	18.4	12	3

Figure 2-7 presents the average temperature on the interior edge of the gap for different gap widths in the insulation layer. It can be noticed that the temperature decreased with increasing width. For a 4 Pa pressure difference, a 0.72-mm gap width yielded a temperature in the target range.

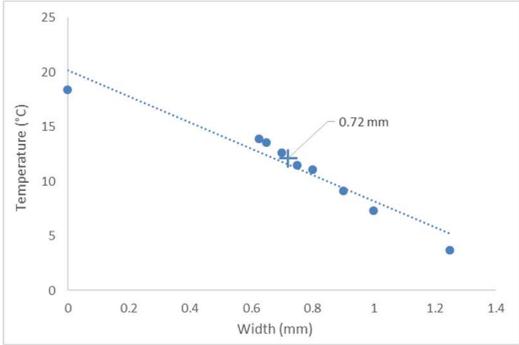


Figure 2-7. Average temperature on the edge of the gap (inside) at 4 Pa for different gap widths in the insulation layer

Figure 2-8 shows the temperature profile along the surface of the wall, with the angle and the gap in the middle. The surface temperature near the edge of the gap for a 50 Pa depression also fell within the range of observable temperatures on the thermograms.

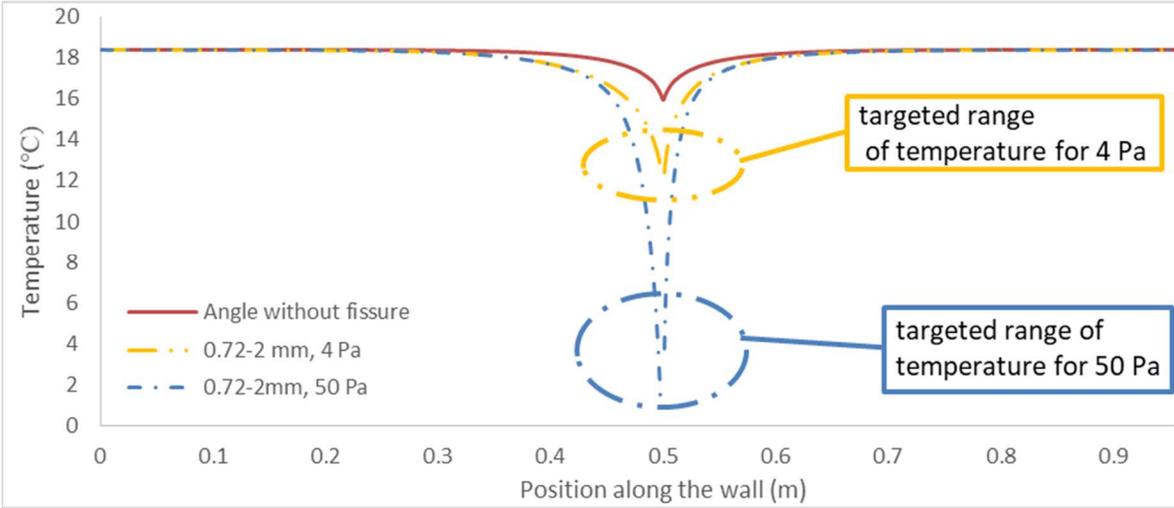


Figure 2-8. Temperature profile along the surface of the wall with infiltration induced by 4 Pa and 50 Pa of depression.

The gap widths shown in Table 2-3 served as a reference for the estimation of assembly tolerance impact, i.e. that of gap width variations in the CLT layer.

Table 2-3. Reference gap widths in the CLT and insulation layer.

	Gap Width (mm)
CLT	2
Insulation	0.72

### 2.1.5.3. Energy Efficiency

Figure 2-9 presents the average heat flux ( $W/m^2$ ) when exfiltration or infiltration occurs through a wall, and for a wall without any gap. The data were obtained from COMSOL simulations. The infiltration and exfiltration were induced by a pressure difference of 4 Pa. A simulation with WUFI is also provided for comparison purposes. In the case of a wall without gap, the results were similar for COMSOL and WUFI.

The dark gray part represents the heat flux through the wall. The light gray represents the heat flux through the gap, in cases of exfiltration and infiltration. As can be observed, the heat flux through the wall was slightly greater with an infiltration than in the two other cases. This may be due to cooling being induced by the infiltration. The wall being cooler, the heat flux was greater. The part of heat flux passing through the gap was greater with infiltration (7.16 W) than with exfiltration (3.05 W).

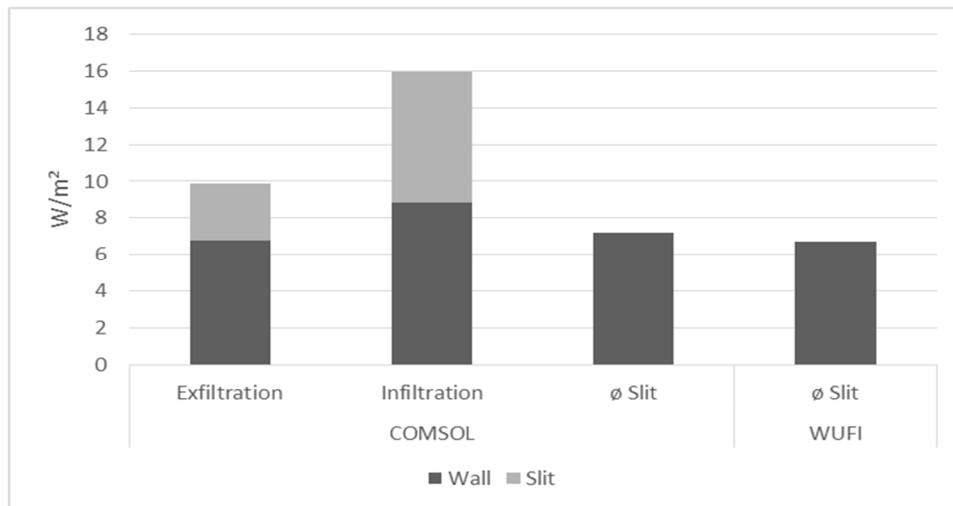


Figure 2-9. Heat flux through the wall in cases of an exfiltration, an infiltration and without any gap. The light gray area represents the heat flux specific to the convection.

Figure 2-10 represents the overall heat transfer coefficient calculated from the above-mentioned flux values. As can be observed, the occurrence of infiltration or exfiltration led to deterioration of the insulating capacity of the wall. Values set in standards for Quebec (Régie du bâtiment du Québec, 2012) and for PassivHaus (Canadian

Passive House Institut, 2012) are shown for comparison. PassivHaus is a standard for very high energy efficient buildings.

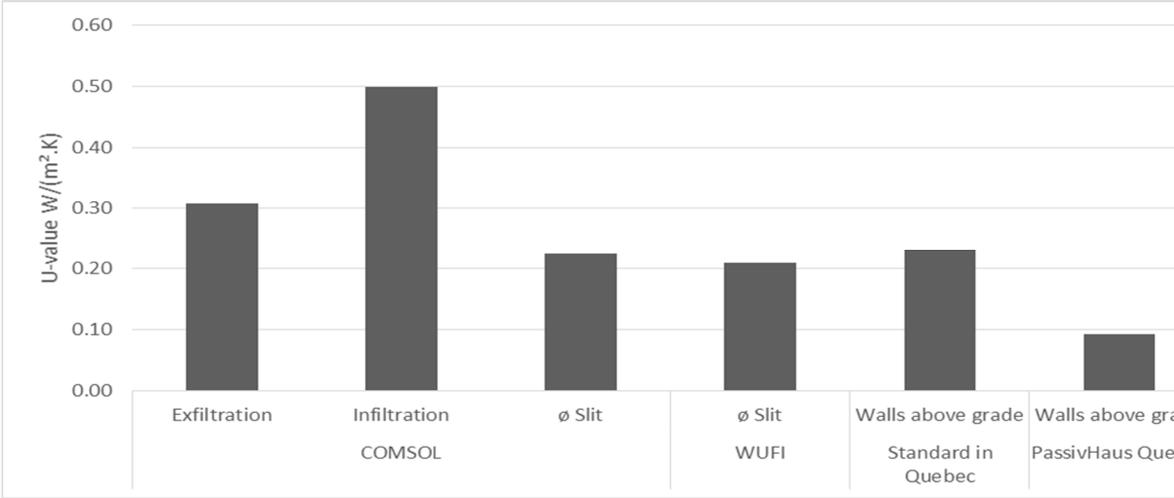


Figure 2-10. Overall heat transfer coefficient U, calculated from the above-mentioned heat flux values, compared with Quebec and PassivHaus standards.

Figure 2-11 shows how the heat transfer coefficient (U-value) changed when the gap in the CLT increased from 0 mm to 20 mm. The heat flow increased (hence the U-value increased) as the gap expanded from 0 mm to 3 mm, after which it stabilized.

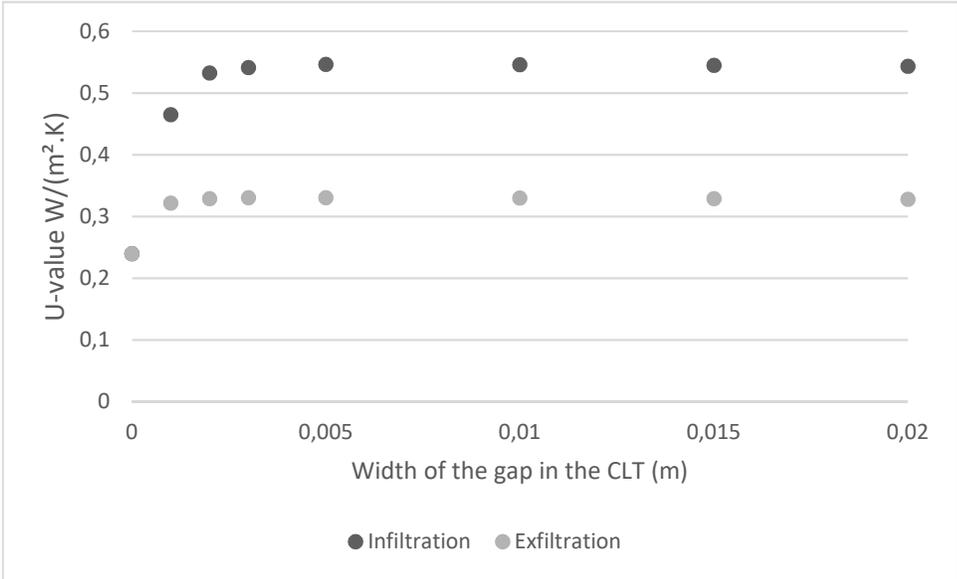


Figure 2-11. Overall heat transfer coefficient for the wall with an increasing gap from 0 mm to 20 mm.

Figure 2-12 presents the velocity of the air in the middle of the gap, as it flows across the wall, for both infiltration (left to right) and exfiltration (right to left).

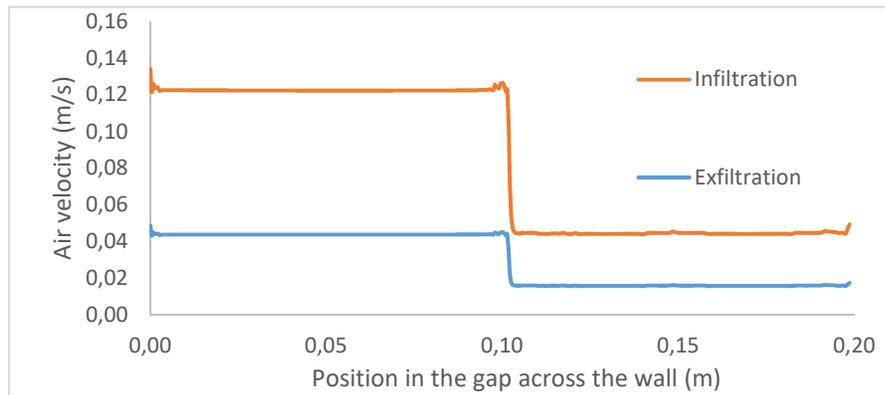


Figure 2-12. Maximum velocity of the air in the gap across the wall

Flux lines are illustrated on Figure 2-13, for both exfiltration (left) and infiltration (right). This representation helps to show the magnitude of the heat transfer from the wall to the fluid in the case of infiltration.

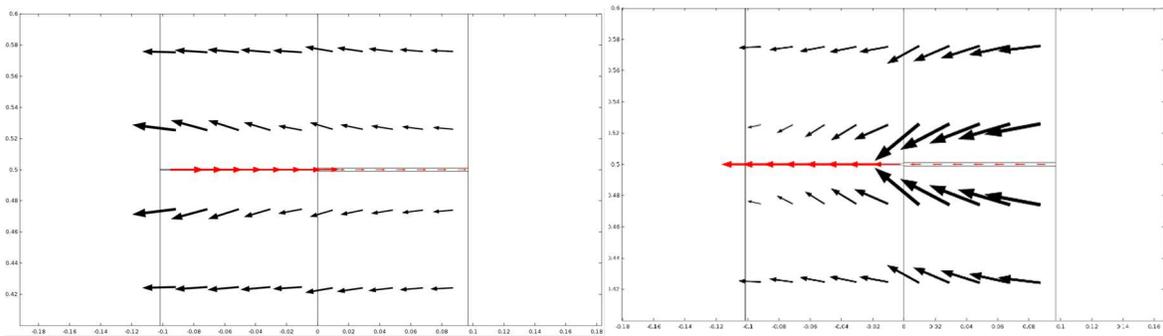


Figure 2-13. Graphical representations of heat flux vectors seen on the cross-section of the wall (top view) with the gap at the center for exfiltration (left) and infiltration (right).

Bhattacharyya (1995) explained that the heat flux induced by the occurrence of exfiltration/infiltration is the difference of enthalpy between two environments at different temperatures multiplied by the leakage rate, or in another way calculated with specific heat as shown before equation (2-5) from (McQuinston, et al., 2005).

The difference between heat flux of infiltration and exfiltration is partly due to the difference in leakage rate. Indeed, even if the pressure difference is the same, the geometry of the gap does not allow the same velocity of

the fluid. As shown on Figure 2-12, in the case of exfiltration air velocity increased with the contraction of the path. Conversely, air velocity decreased as the air path expanded. Even though the air velocity at the outlet was the same in both infiltration and exfiltration modes, the section of the gap was such that the flow rate was greater for infiltration than exfiltration.

Buchanan (2000) noticed, however, that the heat exchanges between the wall and the air running through the gap were not negligible. The wall is insulated from the exterior, which makes it warm (8 °C on average). An infiltration of cold air has more impact on the wall than an exfiltration of cold air, in terms of energy, as can be observed with the vectors of the flux shown in Figure 2-13. Figure 2-10 clearly shows that, without a gap, the wall meets the Quebec standard, but not the PassivHaus standard. In both cases, the gap downgraded the insulating capacity of the wall.

As can be observed on Figure 2-11, a plateau was attained as soon as the gap reached 3 mm, with both infiltration and exfiltration. This plateau is caused by the mass flow rate reaching a maximum for the parameters applied. The pressure drop rate in the gap was inversely proportional to the width of the gap, and decreased as the gap widened. Beyond 3 mm, there was no more change in the pressure drop rate, which had an impact on the mass rate flow.

The difference between exfiltration and infiltration is also partly due to a difference in mass flow rates. In the case of exfiltration there was a sudden contraction of the flow path, while for infiltration it was a sudden enlargement, thus the different behaviors from a flow perspective (Massey, et al., 2005). Ojanen and Kumaran (1996) showed that the relative humidity differential between the exterior and interior environments did not have a significant impact on heat flux, but had an important impact on the moisture content of the materials. Furthermore, given that infiltrated air is dryer than interior air, modern mechanical systems have to humidify the fresh air to compensate, which is costly in energy.

### 2.1.5.4. Durability

Figure 2-14 shows how temperature and relative humidity conditions in the air and the wall can be favorable to mold growth, as described by Hukka (1999), for different values of exfiltrated air humidity (represented by the curves). It can be observed that the air relative humidity (RH) of 30 % (lowest curve labeled: RH-30) does not induce any risk, as all the dots are below the threshold for mold growth. The curves for air relative humidity values of 40 %, 50 % and 60 % are in part above the threshold, which means that, in case of exfiltration, these relative humidity levels can induce a risk of mold growth in the wall, on the surface of the gap. The higher the line is above the threshold, the faster mold will be able to grow. The curves correspond to the temperature and relative humidity levels of positions in the wall along the gap, as shown as the line **a** on Figure 2-15. These conditions become more favorable for mold as the relative humidity increases.

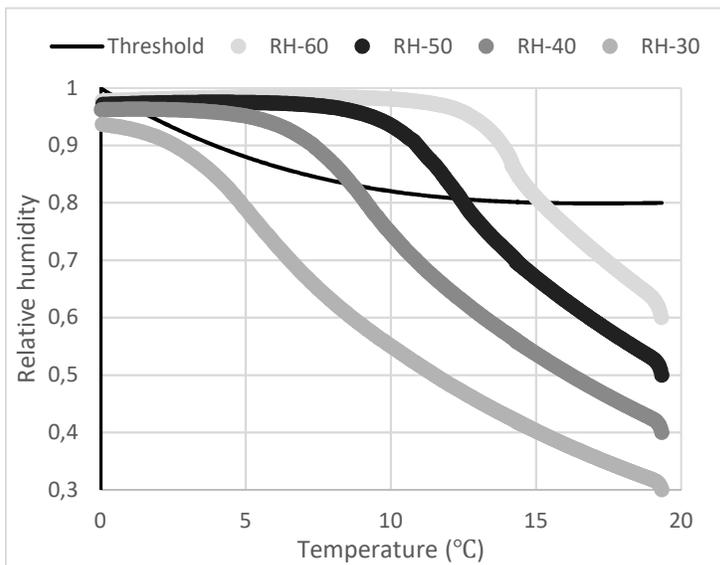


Figure 2-14. Graphic representation of favorable conditions for mold growth in the wall due to exfiltration, for different air relative humidity values.

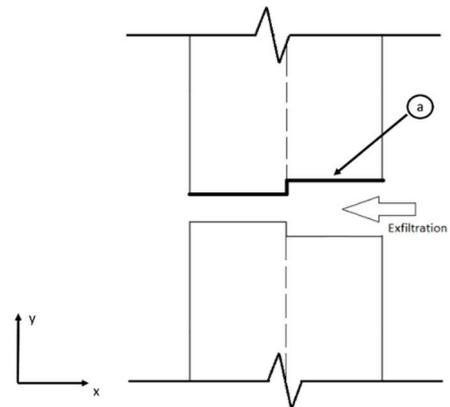


Figure 2-15. Schematic representation of measurements taken along the gap, not to scale

Figure 2-16 shows the positions in the wall where conditions are favorable for mold growth. The y-axis represents the relative humidity of the exfiltrated air entering the gap. The vertical line traces the transition between CLT on the right and XPS on the left, showing that the spreading of the mold increases until reaching the CLT layer at a relative humidity between 50 % and 60 %.

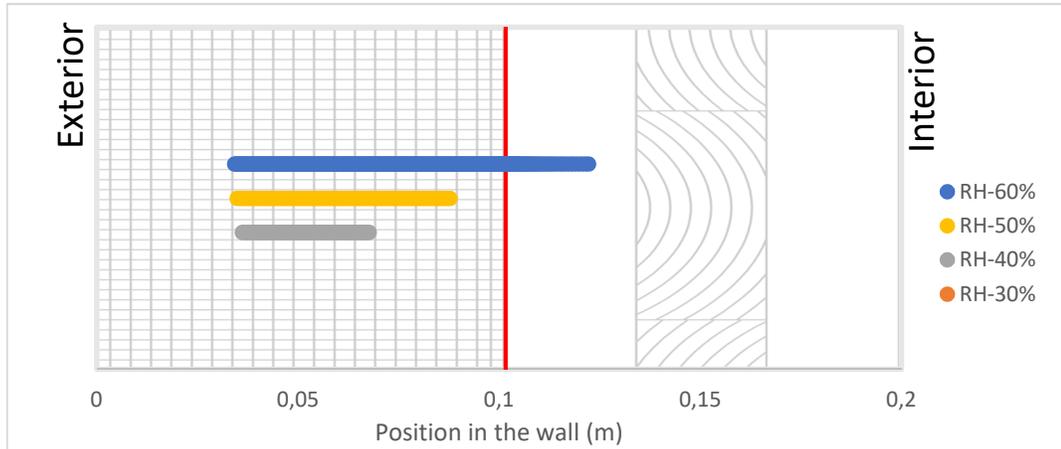


Figure 2-16. Position in the wall of locations where there is a risk of mold growth. The red vertical line represents the boundary between the XPS (left) to the CLT (right).

Figure 2-17 represents the dew point curves ( $T_{dp}$ ) of the exfiltrated air according different relative humidities and the surface temperature of the wall in the slit ( $T_{surface}$ ), represented by the upper curve. Condensation forms on surfaces when the air is saturated in water vapor at surface temperature, in other words when dew point equals the surface temperature, shown in the figure by lines superposed with the  $T_{surface}$  curve. This figure shows that condensation occurs in every case of simulated exfiltration, near the outlet of the gap. The increase in relative humidity near the outlet is due to the temperature drop. It appears that condensation occurs only in the insulation layer.

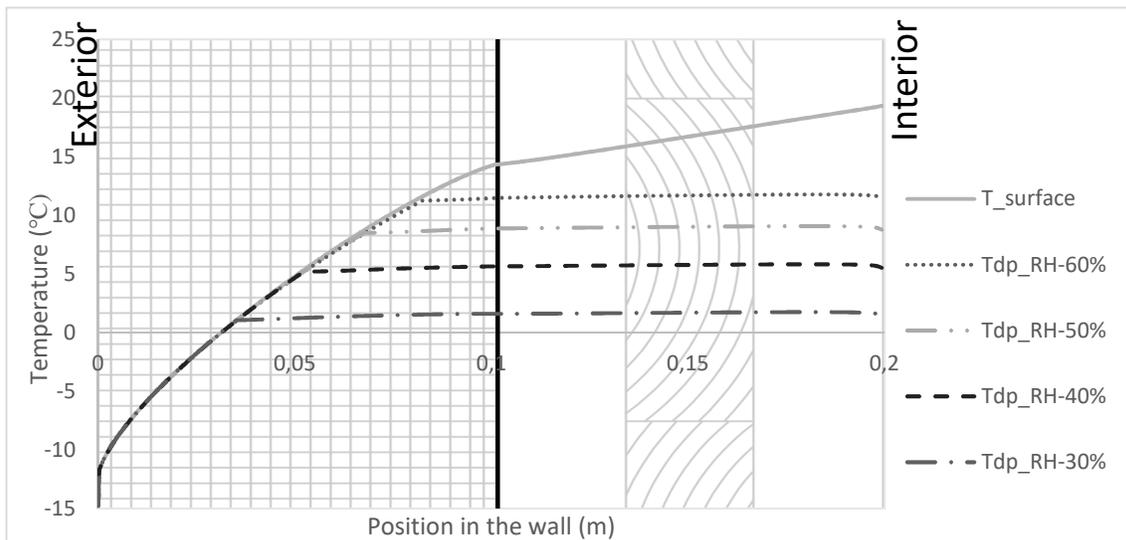


Figure 2-17. Dew point of the exfiltrated air for its different relative humidities according to the position in the wall along the gap and temperature in the gap. The black vertical line represents the boundary between the XPS (left) to the CLT (right).

Condensation in winter can be a particular cause of moisture accumulation. Moisture condenses and solidifies as ice when temperature falls below zero Celsius. Warmer weather causes the ice to melt and create favorable conditions for mold (Winter, et al., 2012). In an in-situ study, Winter (2012) observed that diffusion through the wall was not enough to create an accumulation of ice under the external facing. It seems clear, however, that air exfiltration will cause moisture accumulation in the wall near the outlet of the gap whenever the relative humidity reaches or exceeds 30 %.

As regards durability, infiltration was not found to represent a risk in winter because the dry exterior air didn't lead to moisture accumulation (results not shown).

## **2.1.6. Conclusion**

Coupled HAM and CFD simulations were conducted on a model of a CLT wall assembly involving leakage at the joint between panels. The effect of varying gaps on energy efficiency was analyzed, and the durability of a defective assembly was assessed. In terms of energy efficiency, infiltration was found to have the worst impact, significantly downgrading the U-value of the surrounding wall. Gaps should be kept as small as possible, preferably under 2 mm, to mitigate the effects on energy loss.

This research indicate that exfiltration can lead to mold growth in the wall when the indoor relative humidity reaches or exceeds 40 %. If the relative humidity of the exfiltrated air reaches 60 %, the conditions favorable for mold growth will extend to the CLT layer and may lead to biological deterioration in the long term, as mold growth is slower in insulation if it's not an organic material. In all the relative humidity conditions used in the simulations, exfiltration induced the occurrence of condensation in the wall, near the outlet of the gap. This leads to moisture accumulation and, eventually, mold growth on any organic materials constituting the external facing or insulation's bracing.

This work confirms the desirability to avoid any air movement in the wall through either infiltration or exfiltration, as concentrated air leakage entails serious consequences. In combination with a specific membrane, the CLT provides safety as long as it is continuous. To prevent the energy loss and durability problems identified in this research, the design of CLT assemblies should anticipate wood shrinkage and other causes for gaps. If necessary, overlapping assemblies, elastic/adhesive sealing membranes or adhesives should be considered.

The simulations presented in this report were designed to replicate real conditions as closely as possible, but temperature and humidity conditions vary in the short and long terms, which was not modeled in this work. It would be of interest to simulate the effects of a gap under a range of climate conditions over a longer period.

## Conclusion

Le CLT est un matériau d'ingénierie prometteur pour le développement de bâtiments de moyenne et grande hauteur. Les panneaux de bois massif permettent de faire un pas vers l'efficacité énergétique de par leur nature pare-air/vapeur et l'isolation supplémentaire qu'apporte l'épaisseur de bois. Les tolérances d'assemblages sont nécessaires lors du montage de la structure, mais n'ont pas d'utilité lors du service du bâtiment. Au contraire, elles raccourcissent le chemin des éventuelles infiltrations/exfiltrations.

Nous avons analysé l'impact d'une fuite d'air traversant l'espace libre créé par la tolérance d'assemblage. L'analyse a pris la forme d'une modélisation des transferts de chaleur et de masse sous l'influence d'une différence de pression. Si la pression est plus grande à l'intérieur qu'à l'extérieur, il y a exfiltration et inversement pour une infiltration. Des conditions aux frontières (température et humidité relative) correspondantes à ce qui peut être mesuré en janvier au Québec ont été appliquées. Les résultats de la modélisation ont été le flux de chaleur traversant la fissure, le flux traversant le mur de part et d'autre de la fissure ainsi que la distribution de l'humidité relative dans la fissure.

L'article *Modeling the impact of assembly tolerances with leakages on the energy efficiency and the durability for a Cross-laminated Timber structure* présente de quelle manière les différentes analyses ont été réalisées et les impacts sur l'efficacité énergétique et la durabilité d'une fuite d'air traversant une tolérance d'assemblage.

Le flux thermique d'un mur d'un mètre carré comportant une fissure d'un mètre linéaire a été comparé pour différents cas : un cas d'exfiltration, un cas d'infiltration et un cas de mur sans fissure. La fissure « modèle » était un espacement de 0,72 mm dans l'isolation et 2 mm dans le CLT. La part du flux due à l'air traversant la fissure et la part due à la conduction à travers le mur ont été séparées. Cela a permis d'observer qu'une infiltration est plus énergivore qu'une exfiltration. De plus, une partie de l'énergie est transférée au mur, refroidissant celui-ci ou le réchauffant, selon le cas. L'évolution du flux a été analysée alors que la tolérance d'assemblage augmente. Lorsque l'espacement est très faible, la friction sur les parois ralentit l'air et réduit le débit d'air, ce qui réduit directement l'impact de la fuite (infiltration et exfiltration). En augmentant, un flux de chaleur maximum est atteint entre 2 mm et 3 mm. Ce maximum est dû au fait que la section de fuite dans le reste de l'enveloppe est constante.

L'humidité relative dans le mur a été observée dans le cas d'une exfiltration à travers la fissure « modèle », lorsque l'humidité de l'air exfiltré est variable. L'impact sur l'humidité relative d'une infiltration est davantage une réduction de la teneur en humidité des matériaux, ce qui n'est pas dommageable. À 30 % d'humidité relative dans l'air, on ne décèle pas d'accumulation pouvant mener à un développement fongique, toutefois ce risque

apparaît dans l'isolation dès 40 %. La localisation des risques fongique est majoritairement confinée à l'isolation, mais entre 50 et 60 %, le CLT devient à risque.

De la condensation intervient au sein de l'isolation pour toutes les humidités relatives simulées, localisée juste sous le revêtement extérieur et s'étendant vers l'intérieur à mesure que l'humidité relative de l'air augmente. Cette condensation risque de s'accumuler sous forme de glace, ce qui n'est pas de l'eau utile pour les champignons, mais peut l'être à la suite d'un réchauffement des conditions extérieures, comme au printemps.

Les problèmes d'infiltration se répercutent essentiellement sur la facture énergétique, alors que les exfiltrations vont souvent être aussi responsables de condensation ou biodégradation du revêtement extérieur et éventuellement de la dégradation de l'isolant selon sa nature.

Il est possible de limiter les risques d'infiltration et d'exfiltration en s'assurant minutieusement de la continuité du pare-air, et dans une seconde mesure de la continuité du pare-vapeur. Lors de la phase de conception d'une structure en CLT, il est recommandé de favoriser des assemblages recouvrant (mi-bois) ou recouvert d'une planche. Cela a pour effet direct de rallonger le passage de l'air. Malgré toutes les mesures prises, il peut y avoir des fuites; l'utilisation de joints adhésifs souples/expansibles peut faire obstacle à l'air tout en amortissant les variations dimensionnelles des panneaux qui surviendront lors du service du bâtiment.

## Bibliographie

- Al Sayegh G.** Hygrothermal Properties of Cross-Laminated Timber and Moisture Response of Wood at High Relative Humidity. - Ottawa : Carleton University, 2012. - p. 130.
- Allen E.** How Buildings Work: The Natural Order of Architecture [Book]. - [s.l.] : Oxford University Press, 2005. - 3rd. - 019516198X.
- APA – The Engineered Wood Association** Standard for Performance-Rated Cross-Laminated Timber [Report]. - Tacoma : American National Standards Institute, 2011.
- ASHRAE** Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings Standard 90.1- 2007 [Book]. - 2007. - SI Edition : p. 113.
- ASHRAE** Handbook - Fundamentals [Book]. - Atlanta : American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2009. - p. 880. - ISBN-10: 1933742550.
- ASHRAE** Standard 55-2013 // Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. - Atlanta : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2013. - p. 54.
- ASTM C1784-14** standard Test Method for Using a Heat Flow Meter Apparatus for Measuring Thermal Storage Properties of Phase Change Materials and Products. - West Conshohocken : ASTM International, 2014.
- ASTM C518-17** Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus. - West Conshohocken : ASTM International, 2017.
- ASTM E1827-11** Standard Test Methods for Determining Airtightness of Buildings Using an Orifice Blower Door. - West Conshohocken : ASTM International, 2017.
- Audenaert A., De Cleyn S. H. and Vankerckhove B.** Economic analysis of passive houses and low-energy houses compared with standard houses [Journal] // Energy Policy. - 2008. - pp. 47-55.
- Baker M. C., Hutcheon, N. B., Latta J. K., Handegord G. O., Plewes W. G. and Crawford C. B.** Cracks, Movements and Joints in Buildings [Conference] // Division of Building Research, Building Science Seminar. - Ottawa : National Research Council of Canada, Division of Building Research, 1976. - Vol. 2.

- Baker M.C.** CBD-111. Decay of Wood [Online] // <http://web.mit.edu>. - 1969. - [http://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd111\\_e.html](http://web.mit.edu/parmstr/Public/NRCan/CanBldgDigests/cbd111_e.html).
- Bhattacharyya S. and Claridge D. E.** The Energy Impact of Air Leakage Through Insulated Walls [Journal]. - College Station, TX : ASHRAE, 1995. - Vol. 117.
- Bomberg M. and Onysko D.** Heat, Air and Moisture Control in Walls of Canadian Houses: A Review of the Historic Basis for Current Practices [Journal] // Journal of Thermal Envelope and Building Science. - [s.l.] : Sage Publications, July 2002. - 1 : Vol. 26.
- Bomberg M., Onysko D. and Lstiburek J.** Review of Air Barrier Issues [Conference] // Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings International Conference 9th. - Clearwater Beach : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2004.
- Buchanan C. R. and Sherman M. H.** A mathematical model for infiltration heat recovery [Journal]. - Berkeley : eScholarship, University of California, 2000.
- Cammalleri V. and Lyon E. G.** Condensation in the Building Envelope: Expectations and Realities [Conference] // The Industrial Protective Coatings Conference and Exhibit. - New Orleans : [s.n.], 2003.
- Canadian General Standards Board 149-GP-2MP** Manual for Thermographic Analysis of Building Enclosures // Canadian General Standards Board Catalogue. - [s.l.] : Canadian General Standards Board, 1986. - Vol. 149.
- Canadian Passive House Institut** Design Fundamentals [Online] // CanPHI. - 2012. - <http://www.passivehouse.ca/fundamentals/>.
- COMSOL Multiphysics® Inc.** COMSOL : Multiphysics Software Product Suite. - 2017.
- Crespell P. and Gaston C.** The Value Proposition for Cross-Laminated Timber [Report]. - Montréal : FPInnovations, 2011. - p. 26.
- Cussler E. L.** Diffusion Mass Transfer in Fluid Systems [Book]. - Cambridge : Cambridge University Press, 2009. - 3rd : Vol. 1 : p. 647. - ISBN-10: 0521871212.
- Delgado Joao M.P.Q., Barreira E., Ramos Nuno M.M. and De Freitas V. P.** Hygrothermal Numerical Simulation Tools Applied to Building Physics [Book]. - Porto : Springer, 2013.

- Erler P.** Passive Houses in a Cold Climate [Report]. - Copenhagen : Copenhagen School of Design & Technology, 2011.
- Fang L., Clausen G. and Fanger P.O.** Impact of Temperature and Humidity on the Perception of Indoor Air Quality [Journal] // Indoor Air. - 1998. - pp. 80-90.
- Fick A.** Über diffusion [Book]. - [s.l.] : Annalen der Physik und Chemie, 1855. - Vol. 170 : pp. 59-86.
- Finch G., Wang J. and Ricketts D.** Guide for Designing Energy-Efficient Building Enclosures [Report]. - [s.l.] : FPInnovations, 2013. - p. 242. - ISSN 1925-0509.
- Fisk W. J., Lei-Gomez Q. and Mendell M. J.** Meta-analyses of the associations of respiratory health effects with dampness and mold in homes [Journal] // Indoor Air. - 2007. - pp. 284-296.
- FOAMULAR® 150 Rigid Foam Insulation** [Online]. - Owens Corning, 2011. - September 11, 2017. - <http://www.foamular.com/foam/products/foamular-150.aspx>.
- FPInnovation** CLT Handbook [Book]. - Québec : FPInnovation, 2011.
- Fraunhofer IBP** WUFI® Pro 6.1. - Holzkirchen : [s.n.].
- Garden G.K.** Control of Air Leakage is Important // Canadian Building Digests. - [s.l.] : Division of Building Research, National Research Council Canada, 1965.
- Glaser H.** Vereinfachte Berechnung der Dampf-Diffusion Durch geschichtete Waende ( Simplified calculation of vapor diffusion through laminated walls by precipitation of water and ice) [Journal] // Kaelte technik. - December 1958. - 12 : Vol. 10. - pp. 386-390.
- Glass S. V., Kochkin, V., Drumheller S. C. and Barta L.** Moisture Performance of Energy-Efficient and Conventional Wood-Framge Wall Assemblies in a Mixed-Humid Climate [Journal] // buildings. - 2015. - pp. 759-782.
- Gouvernement du Québec** Politique énergétique 2030. - Québec : Gouvernement du Québec, 2016.
- Greig A. R.** Wall Insulation [Journal]. - Saskatoon : University of Saskatchewan, College of Engineering, 1922. - Bulletin No. 1.
- Hagentoft C-E.** HAMSTAD-FInal Report: Methodology of HAM-Modeling. [Report] = Report R-02-8. - Göteborg : Chalmers University of Technology, 2002.

- Handegord G. O.** Vapour Barriers in Home Construction // Canadian Building Digest. - [s.l.] : Division of Building Research, National Research Council Canada, 1960.
- Hechler F. G., McLaughlin E. R. and Queer E. R.** Simultaneous heat and vapor transfer characteristics of an insulating materials // ASHVE Transactions. - 1942. - Vol. 48. - p. 505.
- Hossain A., Danzig I. and Tannert T.** Cross-Laminated Timber Shear Connections with Double-Angled Self-Tapping Screw Assemblies [Journal] // Journal of Structural Engineering. - [s.l.] : American Society of Civil Engineers, 2016. - 11 : Vol. 142.
- Hukka A. and Viitanen H. A.** A mathematical model of mould growth on wooden material [Journal] // Wood Science and Technology. - [s.l.] : Springer-Verlag, 1999. - 6 : Vol. 33. - pp. 475-485.
- Hutcheon N. B. and Handegord G. O.** Evolution of the Insulated Wood-Frame Wall in Canada [Conference] // CIB Triennial Congress. - Oslo : [s.n.], 1980. - Vol. 1b. - pp. 434-438.
- Hutcheon N. B.** Fundamental Considerations in the Design of Exterior Walls for Buildings [Report] / National Research Council Canada. - Ottawa : Division of Building Research, 1953. - Technical Report no. 13.
- International Energy Agency** Energy efficiency [Online] // International Energy Agency.org. - 2016. - October 2017. - <https://www.iea.org/topics/energyefficiency/>.
- Jackman P. J.** Heat loss in buildings as a result of infiltration [Journal]. - [s.l.] : Building Services Engineer, 1974. - 42. - pp. 6-15.
- Janols H., Rönnelid M., Wik T., Brannstrom M. and Helling H.** Passive Cross Laminated Timber Buildings [Report]. - Falun : Centrum för Energi-och Resurseffektivitet I Byggnade och Förvaltning, 2013.
- Johansson P.** Critical Moisture Conditions for Mould Growth on Building Materials [Report]. - Lund : Lund University, 2012.
- Jokisalo J., Kalamees T., Kurnitski J., Eskola L., Jokiranta K. and Vinja J. A** Comparison of Measured and Simulated Air Pressure Conditions of a Detached House in a Cold Climate [Journal] // Journal of Building Physics. - Helsinki : [s.n.], 2008. - 1 : Vol. 32. - pp. 67-89.

- Joy F.A., Queer E. R. and Schreiner R. E.** Water Vapor Transfer through Building Materials [Journal]. - State College : Pennsylvania State College, Engineering Experiment Station, 1948. - 61.
- Kersten B. and van Schijndel J.** Modeling the Heat Exchange in Cavities of Building Constructions Using COMSOL Multiphysics [Conference] // 2013 COMSOL Conference. - Rotterdam : COMSOL Multiphysics, 2013.
- Knarud J. I. and Geving S.** Implementation and benchmarking of a 3D hygrothermal model in the COMSOL Multiphysics software [Journal] // Energy Procedia. - Trondheim : [s.n.], 2015. - Vol. 78. - pp. 3440 – 3445.
- Krus M. and Vik A.** Determination of Hygric Material Properties and Calculation of the Moisture Balance of Wooden Prisms [Conference] // Proceedings of the 5th Symposium Building in the Nordic Countries. - Göteborg - Sweden : Symposium Building Physics in the Nordic Countries, 1999. - pp. 313-320.
- Kumaran M. K.** Material Properties [Report]. - [s.l.] : International Energy Agency, 1996.
- Kumaran M. K., Lackey J., Normandin N., van Reenen D. and Tariku F.** Summary Report from Task 3 of MEWS Project at the Institute for Research in Construction - Hygrothermal Properties of Several Building Materials [Report]. - Ottawa : National Research Council Canada, 2002. - pp. 1-68.
- Künzel H. M.** Simultaneous Heat and Moisture Transport in Building Components [Report]. - Stuttgart : Fraunhofer IRB, 1995.
- Laguarda Mallo M. F. and Espinoza O.** Outlook for Cross-Laminated Timber in the United States [Journal]. - [s.l.] : BioResources, 2014. - 4 : Vol. 9. - pp. 7427-7443. - ISSN: 19302126.
- Lehmann S.** Sustainable Construction for Urban Infill Development Using Engineered Massive Wood Panel Systems [Journal] // Sustainability. - Adelaide : MDPI Open Access Journals, 2012. - 10 : Vol. 4. - pp. 2707-2742. - ISSN 2071-1050.
- Lepage R. T. M.** Moisture Response of Wall Assemblies of Cross-Laminated Timber Construction in Cold Climates // Thesis. - Waterloo : University of Waterloo, 2012. - p. 125.

- Lstiburek J. W.** The perfect Wall [Journal]. - Westford : Amer. Soc. Heating, Ref. Air-Conditioning Eng. Inc., 2007. - 5 : Vol. 49.
- Massey B. and Ward-Smith J.** Mechanics of fluids [Book]. - [s.l.] : Taylor & Francis CRC Press, 2005. - 8th : p. 704. - pp. 260-262. - ISBN-10: 0415362059.
- McClung R., Ge H., Straube J. and Wang J.** Hygrothermal performance of cross-laminated timber wall assemblies with built-in moisture: field measurements and simulations [Journal]. - [s.l.] : Building and Environment, 2014. - Vol. 71.
- McGraw Hill Construction** Canada Green Building Trends: Benefits Driving the New and Retrofit Market [Report]. - [s.l.] : Canada Green Building Council, 2014.
- McQuinston F., Parker J. D. and Spitler J. D.** Heating Ventilating and Air Conditioning [Book]. - [s.l.] : Wiley, 2005. - p. 642. - ISBN : 978-0-471-47015-1.
- Mostinsky I. L.** Diffusion Coefficient [Online] // Thermopedia. - February 2, 2011. - January 2017. - <http://www.thermopedia.com/content/696/>.
- Natural Resources Canada** Cross-Laminated Timber [Online] // Natural Resources Canada. - June 24, 2016. - september 11, 2017. - <http://www.nrcan.gc.ca/forests/industry/products-applications/15829>.
- Natural Resources Canada** The R-2000 Standard [Online] // Natural Resources Canada. - July 1, 2012. - <http://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/housing/new-homes/5089>.
- Nofal M. and Kumaran K.** Biological damage function models for durability assessments of wood and wood-based products in building envelopes [Journal] // European Journal of Wood and Wood Products. - 2011. - 4 : Vol. 69. - pp. 619-631.
- Nordic Structures** Données Techniques, Nordic X-Lam. - Montréal : Nordic Structure Bois, 2015.
- Nordic Structures, FPIinnovations** Environmental Product Declaration: Nordic X-Lam [Report]. - Montréal : Nordic Structures, 2013.
- O'Connor J., Mahalle L. and Berry A.** Environmental performance of Cross-Laminated Timber. - [s.l.] : FPIinnovations, February 2011. - p. 18.

- Ojanen T. and Kumaran K.** Effect of Exfiltration on the Hygrothermal Behaviour of a Residential Wall Assembly [Journal]. - [s.l.] : Journal of thermal insulation and building envelopes, 1996. - Vol. 19. - pp. 215-227.
- Ozolins A., Jakovics A. and Ratnieks A.** Moisture Risks in Multi-layered Walls - Comparison of COMSOL Multiphysics® and WUFI®PLUS Models with Experimental Results [Conference] // Moisture Risks in Multi-layered Walls - Comparison of COMSOL Multiphysics® and WUFI®PLUS Models with Experimental Results. - Rotterdam : COMSOL Multiphysics®, 2013. - p. 6.
- Passive House Institute** Energy standards [Online] // Passive House Institut. - 2015. - [http://passiv.de/en/03\\_certification/02\\_certification\\_buildings/08\\_energy\\_standards/08\\_energy\\_standards.html](http://passiv.de/en/03_certification/02_certification_buildings/08_energy_standards/08_energy_standards.html).
- Pineault D. and Bérubé-Dufour M.** RAPPORT FINAL (SEP490945-15) : Vérification de la performance et optimisation des maisons de chantier fabriquées en CLT. [Report]. - Amqui : SEREX, 2016. - p. 52.
- Pirhonen I., Nevalainen A., Husman T. and Pekkanen J.** Home dampness, moulds and their influence on respiratory infections and symptoms in adults in Finland [Journal] // European Respiratory Journal. - 1996. - pp. 2618-2622.
- Régie du bâtiment du Québec** Code de Construction du Québec : Partie 11 : Efficacité Énergétique. - [s.l.] : Gouvernement du Québec, 2012.
- reThink Wood** Green Building and Wood Products: Increasing recognition of wood's environmental advantages [Report]. - [s.l.] : reThinkWood, 2015.
- Schickhofer G.** Glued Wood Products for Structural Use, Cross Laminated Timber [Conference] // 3rd European Forest Week, SILVA2015. - Engelberg - Switzerland : [s.n.], 2015. - p. 41.
- Schirmer R.** Die Diffusionswiderstandszahl von Wasserdampf-Luftgemischen und die Verdampfungsgeschwindigkeit. [Book]. - [s.l.] : VDI Beiheft Verfahrenstechnik, 1938. - p. 170.
- Shaw C. Y., Magee R. J., Swinton M. C., Riley M. and Robar J.** Canadian experience in healthy housing [Conference] // International Symposium on Current Status of Indoor

Air Pollution by Organic Compounds and Countermeasures for Healthy Housing. - Tokyo : National Research Council Canada, 2001.

**Skogstad H. B., Gullbrekken L. and Nore K.** Air leakages through cross laminated timber (CLT) constructions [Conference] // NSB 2011 9th Nordic Symposium on Building Physics. - Tampere : Norwegian University of Science and Technology, 2011. - pp. 89-96.

**Société canadienne d'hypothèques et de logement** Perspectives du marché de l'habitation. Faits saillants.. - 2016.

**Statistique Canada** Permis de bâtir. - Ottawa : [s.n.], July 2017. - Publication No 64-001-X. - ISSN 1496-3949.

**Statistique Canada** Valeur des permis de bâtir délivrés, selon le secteur de construction [Online] // Statistique Canada. - 10 2017. - October 2017. - <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/l02/cst01/manuf16-fra.htm>. - publication no 64-001-X .

**Tamura G. T.** Measurement of air leakage characteristics of house enclosures [Journal]. - [s.l.] : ASHRAE, 1975. - Vol. 81 (Part 1). - pp. 202-211.

**VanBronkhorst D. A., Persily A. K. and Emmerich S. J.** Energy Impacts of Air Leakage in U.S. Office Buildings [Conference] // Implementing the Results of Ventilation Research. AIVC Conference, 16th. Proceedings.. - Palm Springs : National Institute of Standards and Technology, 1995. - pp. 379-391.

**Viitanen H. and Ojanen T.** Improved Model to Predict Mold Growth in Building Materials [Journal]. - Espoo : American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2007. - p. 8.

**Viitanen H. and Ritschkoff A. C.** Mould growth in pine and spruce sapwood in relation to air humidity and temperature [Book]. - Uppsala - Sweden : Swedish University of Agricultural Sciences, 1991. - p. 40.

**Viitanen H.** Factors affecting the development of biodeterioration in wooden constructions. [Journal] // Materials and Structures. - 1994. - pp. 483-493.

- Wallner-Novak M., Koppelhuber J. and Pock K.** Cross-Laminated Timber Structural Design: Basic design and engineering principle according to Eurocode [Book]. - Vienna : proHolz Austria, 2014.
- Wang L. and Ge H.** Hygrothermal performance of Cross-Laminated Timber wall assemblies: A stochastic approach [Journal]. - Montreal : Building and Environment, 2016. - Vol. 97.
- Wilson A. G. and Garden G. K.** Moisture Accumulation in Walls Due to Air Leakage [Journal]. - Ottawa : Division of Building Research, National Research Council Canada, 1966. - 227.
- Wilson A.G.** Air Leakage in Buildings // Canadian Building Digests 23. - [s.l.] : National Research Council Canada, 1961.
- Winter S., Schulte-Wrede M. and Jebens K.** Highly insulated wooden structures in Nordic climate [Conference] // World Conference on Timber Engineering. - Auckland : WCTE, 2012. - p. 8.
- WoodWorks** Wood and Green Building [Report]. - [s.l.] : WoodWorks, 2011.
- Wu Y.** Experimental Study of Hygrothermal Properties for Building Materials. - Montréal : Concordia University, 2007.
- Younes C., Shdid C. A. and Bitsuamlak G.** Air infiltration through building envelopes: A review [Journal] // Journal of Building Physics. - Miami : [s.n.], 2012. - 3 : Vol. 35. - pp. 267-302.
- Zabel R. and Morrell J.** Wood Microbiology: decay and its prevention. [Book]. - San Diego : Academic Press, 1992. - 978-0-12-775210-5.