

Démonstration du système Carbonbloc

Préparé par Mathieu Castonguay, Ing.jr. Coarchitecture
Révisé par Normand Hudon, architecte, président, Coarchitecture



Ce rapport a été réalisé dans le cadre du Programme de vitrine technologique pour les bâtiments et les solutions innovantes en bois

12 décembre 2021

Mathieu Castonguay
Auteur

Normand Hudon
Réviseur

Prénom, nom
Titre de l'approbateur

Avis de non-responsabilité

Le contenu et les résultats de ce rapport sont produits et présentés par le promoteur du projet. Le ministère des Forêts, de la Faune et des Parcs ainsi que le Fonds vert ne sont donc pas responsables du contenu de ce document.

Table des matières

1.	Sommaire exécutif et synthèse de l'étude	1
2.	Introduction	2
2.1.1	Contexte	3
2.2	Titre et lieu de réalisation du projet de construction	3
2.3	Description du projet de construction	4
2.3.1	Analyse d'adaptation du système Carbonbloc	5
2.3.2	Description de la solution innovante	9
2.3.2.1	Système constructif	9
2.3.2.2	Préfabrication	11
2.3.3	Échéancier global et durée	12
2.3.4	Budget global	15
2.3.5	Partenaires	15
2.3.6	Défis et risques généraux	16
3.	Détails de l'étude	17
3.1	Introduction et hypothèses de départ	17
3.2	Objectifs	18
3.3	Méthodologie	19
3.4	Résultats et analyse	19
3.4.1	Niveaux de performances du système Carbonbloc	20
3.4.1.1	Isolation thermique	22
3.4.1.2	Performance économique	24
3.4.1.3	Gestion des risques liés à l'humidité excessive	24
3.4.1.4	Résistance au feu	26
3.4.2	Aspects réglementaires	27
3.4.3	Bilan carbone	28
3.4.3.1	Séquestration	29
3.4.3.2	Production de la paille	30
3.4.4	Évolution du système Carbonbloc	31
3.5	Conclusions	34
3.6	Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie	34
3.7	Recommandations	35
4.	Bibliographie	35

1. Sommaire exécutif et synthèse de l'étude

L'étude faisant l'objet du présent rapport a pour objectif de démontrer la performance d'un nouveau système de panneaux structuraux préfabriqués de très haute performance environnementale optimisé à la fois pour le marché local et l'exportation. Le système baptisé Carbonbloc tient son nom du fait qu'il est composé à 97,3% de matériaux renouvelables biosourcés qui permettent de stocker une quantité de carbone importante, voir supérieure, aux émissions attribuables au cycle de vie complet du bâtiment.

Le projet présenté est porté par Coarchitecture, une firme d'architectes de Québec reconnue pour son avant-gardisme en matière de développement durable. Le produit Carbonbloc est composé en partie d'une ossature de bois d'ingénierie manufacturé par Chantiers Chibougamau et sa filiale Nordic, un des partenaires du projet. Le Carbonbloc utilise de la paille comme matériau isolant. Ce résidu agricole est à la fois abondant, économique et performant. Des membranes d'étanchéité à l'air et à la vapeur ainsi que des connecteurs d'acier complètent le système de panneau conçu pour offrir une performance globale exemplaire en climat nordique.

La preuve de concept du système Carbonbloc a été réalisée dans le cadre du projet de Laboratoire vivant construit sur le campus de l'Université Laval grâce à une collaboration avec la chaire de recherche CIRCERB. L'objectif principal de ce projet est de démontrer qu'à l'aide du système Carbonbloc, on peut permettre à un bâtiment de répondre aux besoins d'une famille canadienne typique avec une autonomie complète en énergie et une empreinte carbone négative. Autrement formulé, plus on construira de tels bâtiments, moins il y aura de de CO₂ dans l'atmosphère, et ce, pour toute la vie utile de ces bâtiments.

Le volet « vivant » du laboratoire consiste à établir un profil d'occupation du bâtiment pour une famille de 2 adultes et 2 enfants qui leur permettra de vivre aussi normalement que possible avec un impact environnemental soutenable par les écosystèmes planétaires et à coût abordable, ce qui est rendu possible en grande partie par le système Carbonbloc.

En parallèle avec le système Carbonbloc, le laboratoire vivant teste un système géothermique muni d'une pompe à chaleur à échange direct avec du CO₂ comme gaz réfrigérant qui a reçu l'appui financier du MEI et du CRIQ. C'est grâce à une synergie avec l'enveloppe ultra performante que la demande en énergie est réduite, que la puissance des systèmes électromécaniques peut être grandement diminuée et que l'énergie requise pour assurer le confort des occupants peut être entièrement produite sur place de façon renouvelable au moyen de panneaux photovoltaïques.

L'étude faisant l'objet du présent rapport démontre les résultats probants obtenus en regard des éléments suivants :

- Installations nécessaires au préusinage et à la préfabrication;
- Optimisation des méthodes d'assemblage des panneaux;
- Niveau de préfabrication optimal pour réduire les délais de construction et les coûts;
- Accélération substantielle de la construction grâce aux connecteurs développés spécifiquement pour le système;
- Résistance thermique et étanchéité supérieures acquises conduisant à une faible demande en énergie
- Bilan de carbone exemplaire.

2. Introduction

Le projet faisant l'objet du présent rapport est le développement d'un système de panneaux isolés structuraux préfabriqués destinés à former des enveloppes de bâtiments. Le nom de produit Carbonbloc est envisagé pour la commercialisation et sera utilisé aux fins du rapport. Le système propose les 3 caractéristiques innovantes suivantes :

1. Une composition à 97,3% de matériaux biosourcés renouvelables, soit le bois et la paille, procurant une capacité de stockage de carbone visant à compenser en grande partie, voire entièrement, les émissions de GES des nouvelles constructions.
2. Une résistance thermique ainsi qu'une étanchéité à l'air et à la vapeur supérieures aux normes les plus exigeantes à l'échelle internationale, permettant au produit de contribuer de façon significative à la réduction de la demande en énergie des bâtiments.
3. Une stratégie de préusinage locale permettant d'emballer le système de façon compacte afin de réduire les coûts de transport et rendre le produit attractif par les marchés extérieurs soucieux de mettre à contribution le secteur du bâtiment dans leurs efforts de lutte aux changements climatiques.

Le système Carbonbloc a été développé, à la base, comme un moyen de lutter contre les changements climatiques et offrir à l'humain une solution réellement durable pour construire son habitat. Le système utilise un cadre structural en bois lamellé-collé auquel est intégré un système de connecteurs d'acier conçu spécifiquement et optimisé pour le produit. L'isolation est réalisée en paille compressée. Des éléments de bois d'ingénierie et de bois d'œuvre sont utilisés pour intégrer des ouvertures avec une grande flexibilité.

La vitrine technologique du produit Carbonbloc est intégrée à un projet complet de bâtiment nommé Laboratoire vivant qui a été construit sur le campus de l'Université Laval. Ce laboratoire a pour principal objectif de démontrer que la très haute performance du produit Carbonbloc utilisé en synergie avec d'autres stratégies innovantes permet à une famille typique d'atteindre l'autonomie énergétique en climat nordique.

Bien que certains systèmes électromécaniques demeurent à mettre en service à ce jour, le Laboratoire vivant est actuellement habité par une famille de 4 personnes. Il a déjà été possible de constater la résistance thermique supérieure du système au courant des hivers 2019 et 2020 alors que le confort thermique du bâtiment était assuré uniquement par un système de chauffage auxiliaire¹.

Le rapport présente les grands résultats et les principales observations faites lors de la réalisation du Laboratoire vivant. Par souci de conformité au PVT, le rapport présente également les grandes lignes de l'étude effectuée sur l'application du système Carbonbloc à un bâtiment multirésidentiel de 6 étages ainsi que les principaux ajustements apportés aux composantes du système.

Les principales activités présentées dans le rapport ont été réalisées pendant la période visée par la convention d'aide financière signée entre Coarchitecture et le MFFP, soit de mars 2018 à août 2021.

¹ La puissance totale du système de chauffage auxiliaire installé au Laboratoire Vivant est de 3 000 W

2.1.1 Contexte

Malgré l'amélioration des pratiques, notamment avec la croissance des bâtiments ayant obtenu des certifications environnementales, l'industrie de la construction demeure une source croissante de dégradation de l'environnement. Elle doit relever ses standards de façon significative afin de permettre au Canada d'honorer les engagements qu'il a pris en matière de lutte aux changements climatiques dans le cadre de la COP 26 de Glasgow. L'enjeu principal est la décarbonation des systèmes de construction et l'élimination de l'utilisation d'énergies fossiles lors de l'exploitation des immeubles, ce qui contribuera au maintien de la stabilité du climat planétaire. D'autres enjeux environnementaux sont aussi à considérer, mais dans une moindre mesure en termes de priorités.

Disposant de ressources forestières abondantes et d'une industrie capable de les exploiter de façon durable, le Québec est un fournisseur important de bois, un matériau décarboné que l'industrie de la construction peut substituer au béton et à l'acier, deux grands contributeurs au réchauffement climatique. Cependant, le cadre réglementaire de l'industrie de la construction (code du bâtiment, réglementations municipales, écoles de formation, syndicats, etc.) engendre une certaine inertie qui s'oppose à un changement nécessaire des pratiques de l'industrie, notamment à cause des risques engendrés la combustibilité du bois. La préfabrication d'un système constructif novateur répondant aux diverses contraintes normatives constitue une voie de contournement pour les précurseurs souhaitant apporter des solutions s'inscrivant de façon cohérente dans la logique du développement durable.

Coarchitecture est une firme d'architectes impliquée activement dans plusieurs initiatives liées au bâtiment durable, notamment le créneau ACCORD Québec BVI (bâtiment vert et intelligent) et la chaire industrielle de recherche sur la construction écoresponsable en bois (CIRCERB) de l'Université Laval. C'est ainsi qu'elle a pu solliciter les appuis financiers du MEI, du MFFP, du CRIC et de la SHQ par l'entremise de Québec International pour réaliser son projet de Laboratoire vivant sur le campus de l'Université Laval. Dans la logique de grappe industrielle prônée par la démarche ACCORD, Coarchitecture a développé un partenariat avec Nordic, LGT et Laroche qui ont fourni des efforts en capitaux propres et en nature pour compléter le financement du projet de laboratoire.

Le système Carbonbloc est l'une des composantes principales à l'étude. C'est un produit qui n'existe pas dans l'écosystème de construction nord-américain et qui est essentiel à l'atteinte des objectifs cités en introduction. Nordic, une filiale de Chantiers Chibougamau, l'un des principaux manufacturiers de bois d'ingénierie au Québec, est à la recherche de nouveaux débouchés pour ses produits. Ayant collaboré avec Coarchitecture sur plusieurs projets avec des structures de bois, Nordic est un partenaire naturel pour le développement du produit Carbonbloc.

Aussi, afin de construire les panneaux, Coarchitecture a conclu une entente avec un entrepreneur général, les Charpentistes, qui a été rémunéré à coût majoré, offrant la flexibilité nécessaire à l'optimisation des méthodes de préusinage, d'assemblage, de transport et d'érection du système Carbonbloc.

2.2 Titre et lieu de réalisation du projet de construction

Démonstration du système Carbonbloc au sein du projet de Laboratoire vivant

Campus de l'Université Laval

2540, rue Marie-Fitzback, Québec (Québec) G1V 2J2

2.3 Description du projet de construction

Le Laboratoire vivant érigé sur le campus de l'Université Laval prend la forme d'une maison unifamiliale de deux étages dont la superficie totale est de 182,5 m². Les fondations du sous-sol de 19,6 m² 211 pi² sont en bois. Le rez-de-chaussée et l'étage sont construits avec les modules Carbonbloc et ont des superficies respectives de 70 m² (753 pi²) et 55 m² (592 pi²).

Le Laboratoire Vivant est une preuve de concept démontrant la performance du système Carbonbloc. Il s'agit du premier bâtiment expérimental permettant de valider un large éventail de caractéristiques techniques du système, de mettre en œuvre les techniques d'assemblage envisagées et d'expérimenter l'équipement destiné à insérer l'isolant en paille à l'intérieur des modules.

En plus du système Carbonbloc, le Laboratoire vivant regroupe plusieurs innovations, notamment un système de chauffage et climatisation géothermique horizontal à expansion directe au CO₂. Une serre et des panneaux photovoltaïques permettent de produire nourriture et énergie en vue d'aider une famille typique de 4 personnes à vivre de façon totalement autonome et environnementalement exemplaire.

Orienté franc Sud en intégrant les stratégies d'architecture bioclimatique, le bâtiment met à contribution l'énergie solaire passive pour réduire sa demande en énergie de chauffage l'hiver. Il présente une toiture munie de 42 panneaux photovoltaïques inclinés de façon optimale pour produire toute l'énergie dont ses occupants ont besoin chaque jour de l'année.



Figure 1 : Vue générale du Laboratoire vivant (été 2021)

L'ossature des panneaux préfabriqués Carbonbloc ainsi que les connecteurs d'acier ont été dimensionnés afin de supporter les charges d'un édifice de 6 étages. Cependant, les fondations sur pieux métalliques vissés sont prévues pour les deux étages construits. La section 2.3.2 Système constructif présente plus en détail le système constructif mis à l'essai.

La figure suivante présente le plan d'aménagement du Laboratoire Vivant construit sur le campus de L'Université Laval.



Figure 2 : Plans du Laboratoire Vivant

Le Système Carbonbloc du Laboratoire vivant est composé de 3 panneaux de planchers isolés, de 12 modules de mur et de 3 panneaux de toit. Les murs ont une épaisseur de 406 mm. Les panneaux utilisés pour le plancher du RDC et le toit ont une épaisseur de 610 mm afin d'offrir une résistance thermique supérieure. Une annexe non chauffée composée de 6 modules de 302 mm d'épaisseur pour les murs et 406 mm pour le plancher et la toiture sert de portique pour les occupants. Le plancher de l'étage est composé d'un module de poutre de service et de 6 modules de planchers. Tous les modules ont été préfabriqués et plusieurs ont été pourvus des matériaux de finition intérieurs et extérieurs ainsi que de certains éléments mécaniques.

Les superficies de plancher sont les suivantes :

Niveau	Aire de plancher ² sans serre (m ²)	Aire de plancher ² avec serre (m ²)
SS	19,7	19,7
1	70,0	84,2
2	55,0	78,6
Total	144,7	182,5

Aire de bâtiment³ : 111,7 m²

Aire du grenier (rangement dans le comble du toit) : 40,11m²

2.3.1 Analyse d'adaptation du système Carbonbloc

Le bâtiment 1 du complexe La Garde situé au 2 900 Chemin Sainte-Foy à Québec a été utilisé aux fins d'analyse du système Carbonbloc afin d'élaborer un bâtiment de référence conforme aux exigences du PVT, soit un projet multi résidentiel, I

Le complexe La Garde est un ensemble de 3 immeubles de logements locatifs partageant un stationnement souterrain qui s'étend sous les 3 bâtiments. Les bâtiments 1 et 2 du complexe offrent des locaux commerciaux en façade du chemin Sainte-Foy. Les trois bâtiments sont érigés avec une structure de béton et atteignent jusqu'à 8 étages.

² Aire de plancher : Faces intérieures de murs extérieurs moins les vides techniques verticaux et les puits d'escalier

³ Aire de bâtiment : Faces extérieures des murs extérieurs de l'étage le plus grand.



Figure 3 : Complexe La Garde



Figure 4 : Projet

Le bâtiment 1 illustré à l'intérieur du pointillé bleu sur la figure 4 compte 4 étages en façade et 8 étages pour la partie arrière. La topographie du terrain est en pente vers l'arrière du lot, faisant en sorte que la partie arrière du bâtiment compte plus d'étages. L'immeuble compte 69 logements et une partie du rez-de-chaussée abrite des locaux commerciaux. Le tableau suivant présente la répartition des logements par types.

Tableau 1 : Répartition des logements du bâtiment 1

	studio	3 1/2	4 1/2	5 1/2	total
Niveaux ignorés aux fins d'analyse					
niv 8	1	2	4	0	7
niv 7	1	2	4	0	7
niv 6	2	7	5	1	15
niv 5	2	7	5	1	15
niv 4	2	7	5	1	15
niv 3	2	1	4	1	8
niv 2	2	3	4	0	9
niv 1	3	2	2	1	8
total	12	28	25	4	69
	17%	41%	36%	6%	100%

Pour pouvoir être comparé, la superficie totale et le nombre d'étages ont dû être ajustés puisque le Code de construction impose une limite l'aire de plancher à 1 500 m² et la hauteur à 6 étages aux bâtiments d'habitation combustibles. Les niveaux 3 et 8 ont été retirés de l'analyse. La superficie du Projet à l'étude a donc été réduite à 1 427 m² avec une aire de plancher de 7 680 m² au total.

Le Projet est donc une adaptation du bâtiment 1 en vue de respecter les exigences du Code de construction du Québec en utilisant le système Carbonbloc.

190 modules du système Carbonbloc d'une hauteur de 7,315 m supportant chacun deux niveaux de plancher ont été utilisés pour l'analyse. Le système de plancher est majoritairement formé de deux modules de 200 pouces de longueur placés de part et d'autre d'un module central de 300 pouces de longueur. Ces modules sont posés côte à côte pour former les « 2 pattes » du « L ». La structure des planchers compte donc 376 panneaux et le toit est constitué de 93 panneaux.

Cette analyse a servi de base à la réalisation du bilan GES. La structure et l'ensemble des éléments applicables à l'élaboration du bilan GES sont donc représentatifs de la solution habituellement rencontrée. Le stationnement entièrement en béton a été considéré comme identique. Pour s'adapter aux modifications dans le nombre d'étages, l'analyse considère que l'ensemble du stationnement a été relevé d'un étage. Les parapets, les balcons, les murs intérieurs, les escaliers et tous les autres éléments mécaniques et architecturaux du projet n'ont pas été considérés dans la présente analyse des GES, et ce, tant pour le bâtiment de référence que pour le Projet.

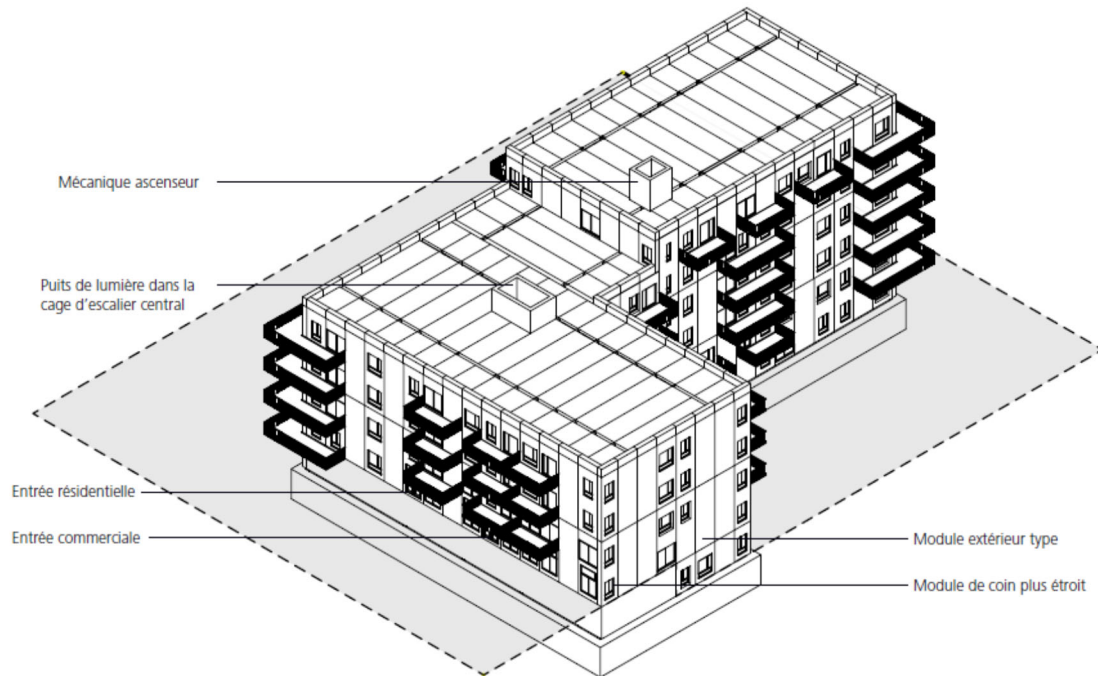


Figure 5 : Modélisation présentant les panneaux du Projet

Les cages d'ascenseur et d'escaliers sont réalisées en béton et reprennent les charges latérales. Ces éléments ont été considérés comme identiques au bâtiment de référence puisque des analyses complémentaires sont encore requises pour valider la résistance latérale du système Carbonbloc. Le système Carbonbloc permet d'ailleurs l'emploi de structures hybrides puisque le phénomène de retrait du bois est minimisé par l'élimination des éléments de structure en bois chargés perpendiculairement à la fibre. Cette caractéristique permet d'accrocher les planchers aux structures de béton sans crainte de variation significative des niveaux de plancher. Les dispositifs de compensation du retrait ne sont pas non plus requis.

Le tableau suivant présente les superficies des différents usages du scénario de référence.

Tableau 2 : comparaison des superficies totales selon les usages (en m^2)

	RÉPARTITION DES USAGES (PI.CA.)				
	logements	commerces	circulations	techniques	total
Complexe La Garde	57496	2594	12066	9904	82061
	70%	3%	15%	12%	100%
Proposition	59219	3061	14044	6344	82668
	72%	4%	17%	8%	100%
Excédent	2%	1%	2%	-4%	

2.3.2 Description de la solution innovante

Carbonbloc est un système constructif composé de panneaux structuraux isolés préfabriqués. La structure principale des panneaux est constituée de membrures de bois lamellé-collé reliées entre elles au moyen de connecteurs propres au système Carbonbloc. Le système de connexion en acier permet d'assembler à la fois la structure interne que les différents panneaux entre eux. La structure secondaire est principalement formée de poutrelles en I à âme en OSB ce qui élimine pratiquement les ponts thermiques de l'enveloppe, une exigence du nouveau CNÉB 2015 (modifié) qui sera rehaussée dans le futur. Le CNÉB 2017 est déjà en application dans certaines provinces.

Le système Carbonbloc se veut un outil de lutte aux changements climatiques. Par conséquent, il vise à améliorer la performance énergétique en offrant une grande résistance thermique. En plus de l'efficacité énergétique, Carbonbloc se distingue par sa très faible empreinte carbone. Les matériaux qui le constituent sont majoritairement constitués (à 97,3% pour les murs extérieurs) de matériaux renouvelables. L'isolation est réalisée au moyen de paille compressée. Des éléments de bois d'ingénierie et de bois d'œuvre complètent l'assemblage et permettent d'intégrer les ouvertures avec une grande flexibilité pour s'adapter aux différents concepts architecturaux.

Le système Carbonbloc répond à un besoin qui n'est pas comblé par les produits existants dans l'écosystème de construction, notamment en atteignant les 3 objectifs suivants :

1. Offrir un prix concurrentiel, notamment grâce à l'effet combiné de matériaux à faibles coûts et de la préfabrication;
2. Offrir une performance énergétique supérieure aux normes les plus exigeantes à l'échelle internationale;
3. Réduire, à long terme, la quantité de CO₂ dans l'atmosphère grâce à des composantes biosourcées à très faible impact environnemental.

Dans le cadre du projet, les parements extérieurs et la finition intérieure ont été effectués en atelier. Le projet a permis d'évaluer l'efficacité de la stratégie maximisant la préfabrication

2.3.2.1 Système constructif

Le système constructif Carbonbloc est un ensemble de modules de panneaux structuraux isolants dont la combinaison et l'assemblage permettent de construire une grande variété de bâtiments pour lesquels la construction combustible est autorisée. Carbonbloc est conçu à la base pour produire le plus faible impact environnemental possible. La proportion de matériaux renouvelables utilisés dans sa fabrication est très élevée. Le préusinage et l'assemblage des composantes nécessitent très peu d'énergie et limite la génération de matières résiduelles en comparaison avec la construction sur site.

Pour atteindre ces objectifs, le système constructif Carbonbloc regroupe les innovations suivantes :

- Préusinage de composantes pouvant être exportées en « kits » et assemblés à proximité des sites de construction.
- Structure à claire-voie (accélération et réduction des coûts)
- Structure primaire et secondaire en bois d'ingénierie issu majoritairement de résidus forestiers (têtes d'épinettes et copeaux).
- Système de connecteurs « Bloc » permettant un pré-assemblage et une érection rapide de la structure
- Points de levage intégrés au système de connexion « Bloc »
- Connecteurs avec tiges collées
- Possibilité d'installer les portes et fenêtres en atelier grâce à la rigidité de l'ossature
- Transport par remorque plateforme avec toile escamotable pour chargement/déchargement rapide

- Isolant en paille compactée

Actuellement, le système est constitué de 4 types de panneaux⁴ auquel des colonnes peuvent s'ajouter pour réaliser des immeubles de 6 étages ou moins. Les panneaux sont tous structuraux et le système de connexion permet de les assembler efficacement au chantier grâce au positionnement final automatique des panneaux. Chaque panneau peut inclure des éléments préinstallés en usine tels que les revêtements, les membranes d'étanchéité à l'eau, à l'air et à la vapeur, les portes et fenêtres, certains éléments d'insonorisation et de mécanique. Tous les panneaux extérieurs sont isolés avec de la paille compactée grâce à un procédé unique. Les toits sont également réalisés en poutrelles plus hautes de telle sorte qu'une grande résistance thermique peut être atteinte. Les planchers intérieurs sont, pour leur part, similaires aux planchers standard. Enfin, les planchers isolés ont une structure semblable aux modules de toit. Tous les éléments du système sont préfabriqués prêts à recevoir les éléments de finition.

Le système Carbonbloc possède une trame structurale standard de 100 pouces (2 540 mm) de largeur. Les murs extérieurs sont porteurs et l'assemblage de la structure est à claire-voie. Les planchers peuvent avoir des portées jusqu'à 300 pouces (7 620 mm). La hauteur entre les planchers peut atteindre 12 pieds (3 656 mm). Un grand nombre de combinaisons sont possibles à l'intérieur des limites des modules. Les modules peuvent également être adaptés pour correspondre à une trame particulière. Les dimensions standard sont cependant optimales pour minimiser les matières résiduelles, la taille de la structure et le transport.

Les modules Carbonbloc sont pourvus d'un cadre structural en bois lamellé-collé qui évite entièrement l'utilisation de pièces de bois chargées perpendiculairement aux fibres. Cette caractéristique augmente considérablement la stabilité dimensionnelle de l'ensemble du système et permet l'intégration d'éléments structuraux en béton notamment des cages d'escaliers d'issues. Cette caractéristique offre une grande flexibilité au système.

Les modules sont conçus pour résister aux charges de conception courantes appliquées aux bâtiments résidentiels. Tous les modules sont en mesure de recevoir des éléments structuraux permettant d'accueillir des charges plus importantes si cela s'avère nécessaire. De manière générale, la résistance du système est plus élevée que ce qui est requis, mais cela permet d'augmenter la standardisation, augmente l'interchangeabilité et le potentiel de réutilisation des composants et simplifie également la production.

La reprise des charges latérales est assurée par le système de contreventement intégré à la structure du Carbonbloc. Cependant, en fonction des ouvertures pratiquées sur les façades, ce système peut nécessiter l'ajout de murs de refend à l'intérieur de la structure. Ces murs peuvent être constitués de panneaux Carbonbloc ou en formule hybride. Actuellement, la résistance latérale des panneaux fait encore l'objet de recherche et développement, l'intégration de murs de refend en béton permet de rencontrer les niveaux de résistance requis.

L'installation des panneaux au chantier est également très rapide. Le système de connecteurs structuraux spécialement développé pour faciliter l'assemblage des panneaux au chantier positionne automatiquement le module à assembler avec ses points de fixation. Le système est également conçu pour permettre l'utilisation de boulonneuses et de clés à cliquet (à batterie ou pneumatique). D'autres caractéristiques uniques permettent favoriser un assemblage efficient.

Des accessoires de levage spécifiquement conçus facilitent la manutention des panneaux. Ces derniers peuvent être stockés et transportés à plat ou sur le côté. Le système permet le déchargement et l'installation directe au chantier.

⁴ Un panneau de contreventement intérieur est actuellement en développement.

La séquence de construction et les caractéristiques particulières du système permettent l'érection du bâtiment en « escalier » permettant ainsi l'installation rapide de la toiture. Une fois la toiture installée, les protections temporaires peuvent être retirées des modules. La figure 6 illustre de manière schématique la séquence de montage.



Figure 6 : Représentation du système modulaire Carbonbloc

La figure 7 représente une étude de projet de complexe de logements autonomes réalisés avec le système Carbonbloc.



Figure 7 : Exemple du type de bâtiment multirésidentiel envisagé pour le système Carbonbloc

2.3.2.2 Préfabrication

Le projet de démonstration a permis la mise en place d'un atelier de préfabrication des panneaux requis pour le Laboratoire Vivant. Cet atelier visait à reproduire, à échelle réduite, le procédé de préfabrication du système constructif. L'atelier loué était à l'origine un garage servant au lavage de véhicules lourds d'une superficie de 3 000 pi².

Au cours du projet, cet atelier a permis la mise à l'essai des différents procédés de production envisagés afin d'estimer avec plus de précision le coût de revient du système. L'expérience a démontré qu'il était relativement simple d'atteindre un bon niveau de productivité pour la fabrication

des panneaux sans qu'il soit nécessaire de mettre en place des équipements industriels coûteux. Plusieurs étapes présentent un bon potentiel d'automatisation qu'il sera possible d'optimiser une fois la production lancée.

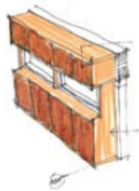
Le poids des panneaux isolés nécessite des équipements de manutention de capacité moyenne. Le stockage des panneaux à plat est simple et efficace, mais complique la logistique d'expédition lorsque l'espace de stockage est réduit, ce que nous avons constaté lors de la préfabrication des panneaux du laboratoire vivant. Avec l'équipement de compaction de la paille, c'est l'un des enjeux les plus importants de l'étape de préfabrication.

L'isolation des panneaux est constituée de paille insérée et compactée en usine au moyen d'une machine pouvant utiliser tous les types de ballots de paille. Un prototype de cet équipement a été testé au cours du projet. Bien que la cadence de production souhaitée n'ait pas été atteinte, la méthode de compaction et de mise en place de la paille a démontré sa versatilité et son efficacité. Le prototype n'a pas été en mesure d'atteindre la cadence de production désirée puisque c'est la machine qui se déplaçait sur le module et non pas l'inverse. Cette configuration entraînait la correction régulière de la trajectoire du prototype ce qui prenait un temps considérable. La cadence maximale obtenue lors d'un essai pratiquement parfait a permis d'estimer la productivité du procédé de compactage en continu à environ 10 panneaux par heure.

2.3.3 Échéancier global et durée

Le système Carbonbloc est le fruit d'un processus de recherche scientifique et de développement expérimental qui s'est poursuivi sur plusieurs années. L'intérêt pour développer un système constructif neutre en carbone remonte à 2009. Ce processus a débuté par des essais de résistance thermique d'un premier concept de panneau isolé avec 16 pouces de paille compactée au moyen d'un béliet hydraulique. La réalisation des premiers prototypes remonte à 2010. L'élaboration du concept de Laboratoire vivant a été initiée en 2012. La première structure réalisée avec le système constructif a été construite en 2016.

2009



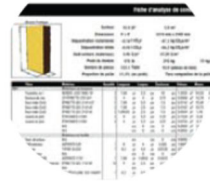
Lancement du projet de conception d'un système constructif de modules préfabriqués isolés en paille au bilan carbone neutre

2010



Premiers essais d'un prototype de système de production pour la compaction de la paille

2011



Poursuite des démarches de conception des modules préfabriqués et confirmation de la valeur environnementale positive de la construction en bois

2011



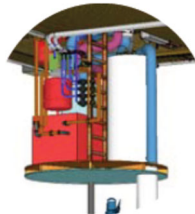
Essais climatiques concluants : les performances isolantes du module préfabriqué sont au rendez-vous

2012



Développement des systèmes d'ancrages plutôt que de l'emboîtement et analyse des pertes thermiques des ouvertures dans l'enveloppe

2013



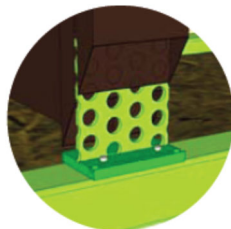
Conception de volets extérieurs servant de pare-soleil, développement d'un système de géothermie de surface lié à une pompe à chaleur insérée dans une salle mécanique préfabriquée et raffinement du bilan de carbone du prototype

2013



Rencontre avec un investisseur chinois pour la création d'un édifice multirésidentiel de 6 étages mettant en œuvre le système développé

2014



Révision et standardisation de la structure et des ancrages des modules, optimisation du système de fabrication et révision de la pompe à chaleur pour répondre aux critères de la certification Living Building Challenge

2015



Poursuite de la conception détaillée du système constructif et de la machinerie pour le système de production, atteinte des objectifs de performance de la conception de la pompe à chaleur et complétion du prototype virtuel

2016



Construction d'une portion de la structure à échelle réelle

2016



Construction d'un prototype de la pompe à chaleur et tests de performance en laboratoire

2017



Préfabrication des panneaux Carbonbloc en vue de la construction d'un premier bâtiment mettant en œuvre le système complet.

2018



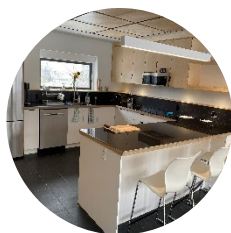
Construction du Laboratoire vivant sur le campus de l'Université Laval.

2019



Travaux de construction intérieure du Laboratoire Vivant, installation des systèmes mécaniques, cloisons, serre et terrasses.

2020



Travaux de finition intérieure du Laboratoire Vivant, tirage de joints, peinture, installation des finis de planchers, de la cuisine. Début de la mise en service et début de l'occupation.

Ces étapes préliminaires ont permis de démontrer la faisabilité et le potentiel que pouvait représenter le système constructif. Le projet de démonstration a démarré officiellement le 16 mars 2018, pratiquement un mois avant le début de la construction du Laboratoire Vivant. L'échéancier suivant présente les principales activités réalisées au cours de la période couverte par le programme Vitrine technologique (PVT).

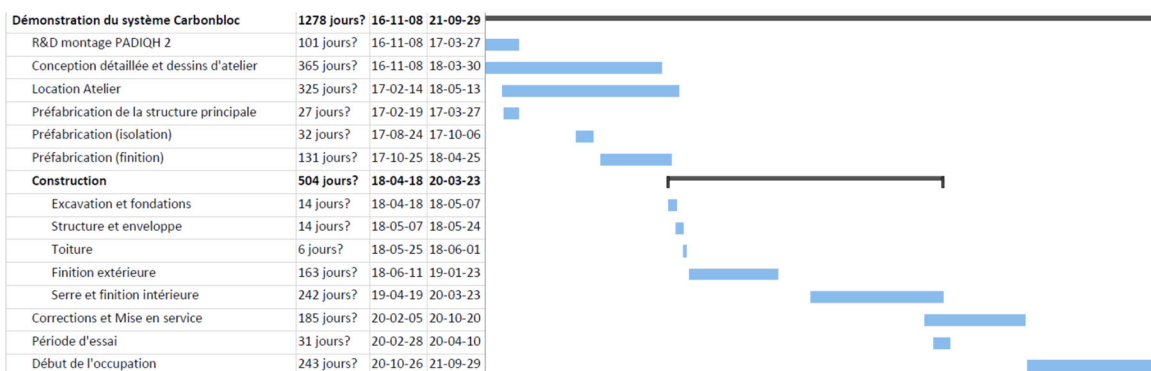


Figure 8 : Échéancier global du Laboratoire Vivant et du projet de démonstration du système Carbonbloc

Afin de recueillir les données probantes qui permettront de convaincre de la performance supérieure du système et effectuer les calculs du coût global (), la réalisation d'un plan d'affaires doit être reportée. Aussi, il était prévu d'utiliser le Laboratoire Vivant comme un bâtiment de démonstration auprès de clients potentiels, ce qui aurait permis de recueillir des manifestations d'intérêt. Or, les mesures d'isolement liées à la pandémie de la COVID-19 ont considérablement ralenti notre démarche qui devrait reprendre lorsque les mesures sanitaires seront levées.

2.3.4 Budget global

Au moment de rédiger le présent rapport, le budget global du projet est évalué à 1 091 654\$ en dépenses directes auxquelles il faut ajouter 233 083 \$ en salaires internes versés depuis le début du projet. Ces dépenses couvrent l'ensemble des coûts reliés au développement, la préfabrication, la construction et l'opération du Laboratoire Vivant.

La portion du budget attribuable au système constructif Carbonbloc est évaluée à 719 237 \$ ce qui inclut les dépenses reliées à la préfabrication et à la construction du Laboratoire Vivant, mais exclut tous les éléments mécaniques, la location de l'atelier de préfabrication et les frais reliés à l'opération.

2.3.5 Partenaires

Coarchitecture a réalisé le Laboratoire vivant en partenariat avec Nordic, LGT et Laroche. Le système Carbonbloc a été développé par Coarchitecture avec la collaboration de Nordic.

2.3.6 Défis et risques généraux

Le projet de démonstration du système Carbonbloc et la construction du Laboratoire vivant constituent la première mise en œuvre du système constructif. Cette transition entre la recherche et développement et la construction d'un premier bâtiment a posé plusieurs défis techniques, logistiques, financiers et humains.

Construire un premier bâtiment mettant en œuvre un nouveau système structural représente un défi en soi. Viser à atteindre des performances exemplaires en matière de résistance thermique, de coûts et de rapidité d'érection rehaussait considérablement le niveau de difficulté.

Parmi les défis surmontés par l'équipe du projet, il y a eu la mise en place d'un atelier pour la préfabrication des différents panneaux. Cet atelier devait être suffisamment représentatif de l'aménagement prévu pour la future usine de production afin de permettre l'évaluation de la cadence de production sans pour autant disposer de l'ensemble des infrastructures et des outils prévus. Le seul projet de démonstration ne justifiait pas les investissements requis tout en étant une étape cruciale pour la mise en place d'une ligne de préfabrication. De même, trouver et former la main-d'œuvre, assurer un milieu de travail sécuritaire a demandé des efforts considérables.

Les solutions et mesures identifiées au début du projet pour minimiser les risques techniques ont été mises en place et plusieurs ajustements ont dû être faits tout au long du projet. Le tableau suivant présente certains des risques identifiés au début du projet et les solutions mises en place pour les surmonter.

<i>Risque</i>	<i>Description</i>	<i>Solution mise en œuvre</i>
<i>Techniques</i>	Cadence de préfabrication	Équipements spécialisés (montage et installation)
	Dommages dus au transport	Supports spéciaux et emballage
	Jonction des panneaux	Détails et procédure d'assemblage
	Effet de la taille du bâtiment	Analyse dynamique (vents et séisme) et essai en laboratoire sur des échantillons.
<i>Financiers</i>	Coût global du système	Stratégie de préfabrication et équipements
	Coût des infrastructures	Plan d'expansion et partenaires
	Craintes de promoteurs	Bâtiment de démonstration
<i>Réglementaires</i>	Code de construction	Homologation CSA A277 et ASTM C518
	Cote de résistance au feu	Tests de résistance (laboratoire universitaire), consultant spécialisé, puis essais d'homologation

3. Détails de l'étude

3.1 Introduction et hypothèses de départ

Problématique : Le projet provient du constat suivant : aucun système constructif auquel l'industrie de la construction a accès n'est réellement durable. La construction actuelle, peu importe le type de bâtiment ou la nature des matériaux mis en œuvre, engendre une dégradation de l'environnement.

Hypothèse : Maximiser l'utilisation de matériaux biosourcés locaux devrait permettre de construire un bâtiment qui aurait un impact positif sur l'environnement à coût abordable.

Le Laboratoire Vivant a été conçu comme s'il s'agissait d'une unité d'un complexe multirésidentiel. Il devait permettre d'établir la faisabilité et l'efficacité de stratégie de préfabrication développée pour le système Carbonbloc. La réalisation du Laboratoire vivant devait notamment permettre de déterminer si le niveau de préfabrication envisagé satisfaisait toutes les attentes. L'assemblage de la structure et des panneaux n'avait jamais été réalisé de façon complète et la construction du Laboratoire vivant devait permettre d'adapter les procédures d'assemblage.

Le projet de démonstration du système Carbonbloc a également permis d'évaluer l'impact du système constructif sur l'aménagement de logements. Un projet d'immeuble multirésidentiel réalisé par Coarchitecture a été utilisé comme bâtiment de référence pour évaluer l'impact de l'utilisation de la trame structurale standard du système Carbonbloc.

La paille est utilisée comme isolant dans les bâtiments depuis plus d'un siècle. C'est à la suite de l'invention de la presse à foin, aussi appelée « balleuse », dans les années 1890 que la construction en paille s'est développée. La première maison en paille a été construite vers 1896-1897. Neuf des premiers bâtiments construits en paille au tournant du 20^e siècle étaient toujours debout et en usage 100 ans plus tard.



Figure 9 : Pilgrim Holiness Church, Arthur – Nebraska, construite en 1928

Le système Carbonbloc est-il adapté à la réalité actuelle et offre-t-il la performance requise pour répondre à l'ensemble des exigences réglementaires actuellement en vigueur et est-il suffisamment abordable pour représenter une solution pertinente aux enjeux actuels?

3.2 Objectifs

L'objectif principal de l'étude est de démontrer et documenter qu'il est possible de construire un bâtiment à impact positif sur l'environnement et à coût abordable principalement grâce à 3 stratégies :

1. Une composition à 97,3% de matériaux biosourcés renouvelables, soit le bois et la paille, procurant une capacité de stockage de carbone visant à compenser en grande partie, voire entièrement, les émissions de GES des nouvelles constructions.
2. Une résistance thermique ainsi qu'une étanchéité à l'air et à la vapeur supérieures aux normes les plus exigeantes à l'échelle internationale, permettant au produit de contribuer de façon significative à la réduction de la demande en énergie des bâtiments ainsi qu'à produire leur propre énergie sur place.
3. Le préusinage local permettant d'empaqueter le système de façon compacte afin de réduire les coûts de transport et rendre le produit attractif par les promoteurs soucieux de mettre à contribution le secteur du bâtiment dans leurs efforts de lutte aux changements climatiques à l'échelle internationale.

Le projet de Laboratoire vivant est en voie de démontrer que l'objectif principal est atteint. Cependant, certains systèmes électromécaniques demeurent à mettre en service. Néanmoins, nous avons constaté que le système Carbonbloc faisant l'objet de l'étude financée par le MFFP atteint les performances exemplaires anticipées en matière de résistance thermique et d'étanchéité.

La poursuite de cet objectif nous a permis d'obtenir des données essentielles en vue de passer progressivement à l'étape de commercialisation du produit innovant, notamment à propos des activités suivantes :

- Poursuivre la recherche scientifique et le développement expérimental Carbonbloc et l'amener à un niveau de développement suffisant pour entamer la prochaine étape qui consistera à réaliser un bâtiment de démonstration multirésidentiel de 6 étages à vocation immobilière;
- Mettre à l'essai un équipement pour l'installation de la paille dans les panneaux et expérimenter en atelier les méthodes d'assemblages en vue de concevoir un système de production industriel plus performant pour l'étape de commercialisation.
- Documenter les différentes étapes de préfabrication et de construction, identifier les opportunités d'amélioration et remettre en question les éléments qui posent des contraintes excessives.
- Identifier et expérimenter l'utilisation de produits complémentaires requis ayant le plus faible impact environnemental possible dans une perspective de performance à long terme.
- Obtenir une preuve d'assurabilité pour un bâtiment construit avec le système Carbonbloc;

3.3 Méthodologie

Le développement du système Carbonbloc fait l'objet d'un processus de recherche scientifique et de développement expérimental (R&D) réalisé par Coarchitecture en collaboration avec Nordic et la chaire CIRCERB. Le développement effectué suit un plan établi par la firme, en collaboration avec ses partenaires. Le plan de développement a priorisé l'atteinte des objectifs par rapport au respect de l'échéancier.

Des indicateurs ont été mis en place pour évaluer l'atteinte de chaque objectif. Les moyens mis en œuvre sont décrits à la section 3.4.

Le projet de démonstration du système Carbonbloc a été structuré de la manière suivante :

1. Déterminer les niveaux de performances requis pour chaque critère
2. Louer et aménager un local industriel répondant aux besoins prévus pour la préfabrication des panneaux Carbonbloc;
3. Regrouper, réparer et modifier les panneaux de première génération réalisés avec l'appui du programme PADIHQ de la SHQ;
4. Fabriquer la structure principale des 18 panneaux d'enveloppe du Laboratoire Vivant;
5. Ériger, sur le site de l'atelier, la structure pour évaluer les emboitements et les jonctions;
6. Démonter la structure, effectuer les modifications nécessaires à la suite des observations;
7. Assembler le prototype d'équipement pour insérer l'isolant en paille;
8. Isoler les panneaux;
9. Préfabriquer l'ensemble des panneaux, leur finition et les autres éléments préfabriqués
10. Ériger la structure et l'enveloppe du Laboratoire Vivant
11. Évaluer le taux d'infiltration
12. Assembler les éléments de structure complémentaire;
13. Compléter la construction du bâtiment
14. Réévaluer le taux d'infiltration et la consommation d'énergie
15. Occuper le bâtiment en permanence et en évaluer le rendement
16. Évaluer l'impact du système Carbonbloc sur la construction d'un immeuble multirésidentiel.

3.4 Résultats et analyse

La préfabrication est une stratégie clé du système Carbonbloc puisqu'elle vise à atteindre une productivité suffisante dans l'intégration de la paille à l'intérieur des panneaux et d'en standardiser la compaction. Actuellement, la construction traditionnelle de maisons isolées en paille demande trop de main-d'œuvre pour permettre de construire des bâtiments à prix concurrentiels. La préfabrication est une stratégie souvent utilisée dans l'industrie pour réduire les coûts de main-d'œuvre au chantier. Elle permet également de gagner en efficacité en optimisant les infrastructures de travail en même temps qu'elle permet de réduire le coût associé à la main-d'œuvre.

La préfabrication requiert une main-d'œuvre plus spécialisée lors de l'assemblage des éléments au chantier. Peu de manufacturiers de murs en panneaux ajoutent des éléments de finition à leurs produits. L'objectif de démontrer la performance du système Carbonbloc nous a incités à intégrer plusieurs éléments aux modules de panneaux. La logique qui a guidé la préfabrication était de maximiser les éléments installés en atelier afin de minimiser les opérations au chantier.

Le système Carbonbloc étant très rigide, il permet l'installation des portes et fenêtres en atelier et l'expérience a démontré qu'il était fonctionnel de procéder ainsi. Lors de la construction du Laboratoire Vivant, le niveau de finition a été augmenté encore davantage. La préfabrication assure le contrôle de l'humidité et de la qualité des panneaux. Les gabarits et procédés de fabrication

permettent une grande précision dimensionnelle facilitant l'installation rapide des panneaux au chantier.

La préfabrication s'est montrée avantageuse pour plusieurs aspects, mais pas pour les éléments de finition intérieure et des revêtements extérieurs qui se sont avérés problématiques lors de l'installation au chantier. Aucun dommage observable n'a détérioré les finitions lors du transport ou de l'installation. L'idée était d'accélérer l'exécution en réduisant le nombre d'éléments à installer au chantier. Cependant, le temps d'ajustement requis au chantier a nécessité jusqu'à 5 fois plus de temps que l'installation de panneaux avec un moindre niveau de finition. L'expérience nous a permis d'établir le juste niveau de préfabrication pour optimiser le rapport qualité-prix du produit.

Plusieurs caractéristiques du système Carbonbloc contribuent à le rendre abordable. En plus de permettre de générer des économies d'énergie, le système permet l'installation des portes et fenêtres en usine ce qui contribue à accélérer la fermeture de l'enveloppe lors de la construction. Cet avantage permet de devancer les travaux intérieurs et diminuer les frais généraux associés à la construction.

Le système est également optimisé pour le transport et l'érection au chantier. Les panneaux de murs ont une hauteur de deux étages et utilisent une structure à claire-voie ce qui réduit le nombre de panneaux à installer au chantier tout en permettant le transport par remorque plateforme avec ou sans toile rétractable. Ce système structural limite le nombre de joints entre les panneaux et élimine pratiquement le phénomène de retrait du bois en comparaison avec le système structural à plateforme qui est le plus couramment utilisé.

Comparativement aux panneaux préfabriqués conventionnels, l'épaisseur des panneaux du système Carbonbloc est sensiblement plus importante. Le système a donc été développé et testé pour s'assurer que le transport et l'érection étaient efficaces. Jusqu'à 10 panneaux peuvent être livrés par chargement standard.

3.4.1 Niveaux de performances du système Carbonbloc

Le tableau suivant présente les enjeux pour les structures de bois et les solutions apportées par le système Carbonbloc.

Considérations particulières pour les bâtiments de 5 ou 6 étages à ossature légère en bois Tiré de [1]			
Catégorie	Élément	Enjeux	Réponse
Structure	Charpente à ossature légère de moyenne hauteur	Plusieurs détails ou pratiques souvent utilisés pour les petits bâtiments à ossature légère (partie 9) ne sont pas acceptables dans le contexte d'un bâtiment de moyenne hauteur qui doit être conçu selon les directives de la partie 4 du CNBC.	La conception du système Carbonbloc respecte les exigences de la partie 4 du Code.
	Murs porteurs	Puisque les murs porteurs supportent des charges accrues, les montants doivent être retenus latéralement selon leur axe faible durant la construction (avant la pose du revêtement). L'augmentation des charges peut impliquer l'emploi de montants ayant une résistance accrue, notamment à partir de bois	La conception du système Carbonbloc est faite en considérant les portées et les charges d'un bâtiment de 6 étages. Le système utilise du bois lamellé-collé et des connecteurs en acier spécifiquement conçus. Les calculs préliminaires démontrent que les dimensions des éléments structuraux sont adéquates.

		MSR, ou la réduction des espacements.	
		Le contrôle de qualité étant critique, la préfabrication des murs comporte plusieurs avantages, dont l'assurance de respecter les classes de bois et des teneurs en humidité prescrites, la précision de fabrication et la diminution du temps requis pour la construction au chantier	Le système Carbonbloc est un système préfabriqué. Le respect des normes applicables et le guide de contrôle de la qualité qui sera développé vont garantir le respect des prescriptions réglementaires et la qualité des constructions.
	Lisses et sablières	Les contraintes en compression perpendiculaire au fil, en flexion et en cisaillement doivent être vérifiées. Comme les lisses et sablières contribuent considérablement au mouvement vertical, le choix du matériau et de la teneur en humidité est d'une grande importance.	Le système Carbonbloc ne comporte pas de lisses ou de sablières. Aucune composante de la structure supportant les charges de plancher ou de toiture n'est soumise à une compression perpendiculaire au fil.
	Mouvement vertical	Le mouvement vertical doit être calculé et clairement indiqué sur les plans de structures afin de s'assurer que les éléments architecturaux et la mécanique du bâtiment puissent être conçus en conséquence. Tous les éléments doivent respecter la classe d'humidité spécifiée par l'ingénieur en structure.	Le mouvement vertical du système Carbonbloc est de 0,70 mm par étage (4,21 mm au total pour 6 étages, 5,59 mm en incluant les parapets).
	Solives de plancher	Selon le détail d'assemblage choisi, les extrémités des solives des planchers inférieurs sont susceptibles de reprendre d'importantes charges verticales et de contribuer de façon significative au mouvement vertical. Les solives préfabriquées ajourées ou en I sont fortement recommandées.	La structure à claire-voie du système Carbonbloc élimine les charges verticales aux extrémités des solives des planchers.
	Poutres et linteaux	Les réactions aux appuis des poutres et linteaux se cumulent vers les étages inférieurs et exigent des surfaces d'appui de plus en plus grandes pour éviter le poinçonnement. Des éléments en bois d'ingénierie sont recommandés en raison de leur faible teneur en humidité et de leur résistance accrue.	La structure à claire-voie du système Carbonbloc et l'absence de composantes de bois supportant les charges des planchers et toits perpendiculairement au fil minimisent ces problématiques.
	Charges latérales	Les déformations du système de résistance aux forces latérales deviennent critiques et doivent être calculées selon	La résistance latérale du système Carbonbloc a été étudiée de manière préliminaire. Les simulations

		une nouvelle méthode de calcul spécifique. Pour que le système calculé soit mis en œuvre de façon adéquate, l'emplacement et la composition des murs de refend, ainsi que le positionnement des ancrages, doivent être clairement indiqués sur les plans de structure. Les ancrages au chantier doivent également être installés de façon très précise.	effectuées démontrent que le clouage des panneaux est le facteur limitant la résistance latérale ce qui est typique. En fonction du nombre et de la position des ouvertures, le système peut supporter les charges latérales évaluées jusqu'à 6 étages lorsque les ouvertures sont limitées. Un système de renfort a été développé pour permettre au système de supporter les charges latérales prévues avec un taux d'ouverture des façades pouvant atteindre 75%. Ce système a été intégré au Laboratoire Vivant.
		Pour la réalisation du système de résistance aux charges latérales d'un bâtiment de moyenne hauteur en bois, l'utilisation d'ancrages avec compensateur de retrait est fortement recommandée à moins qu'un système offrant une performance équivalente soit détaillé par l'ingénieur en structure.	L'utilisation de bois d'ingénierie avec une stabilité dimensionnelle élevée, l'utilisation de compensateurs de retrait ne nous apparaît pas nécessaire.
Sécurité incendie	Résistance au feu : 1 heure	Combustibilité des matériaux	Panneaux de gypse type X et système de gicleurs. Protection des ancrages supportant les planchers du système à claire-voie par gypse et isolant en laine de roche.
Préfabrication	Standardisation	Flexibilité et qualité architecturale	Le système Carbonbloc optimise le préusinage des composantes et la préfabrication en vue d'accélérer et faciliter l'installation au chantier tout en offrant une grande flexibilité pour des ouvertures de dimensions variées.
Décarbonation	Bilan carbone	Réduction des émissions	Séquestration d'une quantité de carbone dans l'isolant et la structure supérieure à celle des émissions des composantes du bâtiment.

3.4.1.1 Isolation thermique

De nombreuses études indépendantes ont été menées afin de déterminer la valeur isolante de la paille. Plusieurs de ces études ont étudié l'effet de certains paramètres qui influencent le niveau d'isolation. Le facteur qui apparaît comme ayant la plus grande influence est le taux de compaction de la paille.

L'isolant utilisé dans le système Carbonbloc est fait de paille compactée. La densité de la paille à l'intérieur des panneaux est optimisée pour atteindre le meilleur facteur isolant. La résistance

thermique atteinte pour les murs est de RSI 7,7 et les ponts thermiques sont minimisés de telle sorte que la valeur RSI effective d'un panneau standard est de RSI 7,4. Ce niveau de performance est deux fois à celui exigé par le Code.

Dans certaines circonstances, la paille peut présenter une conductivité thermique de 0,038 W/mK. Cette faible conductivité est comparable à celle de la laine de roche et du polystyrène expansé qui présentent respectivement une conductivité thermique de 0,033 et de 0,034 W/mK.

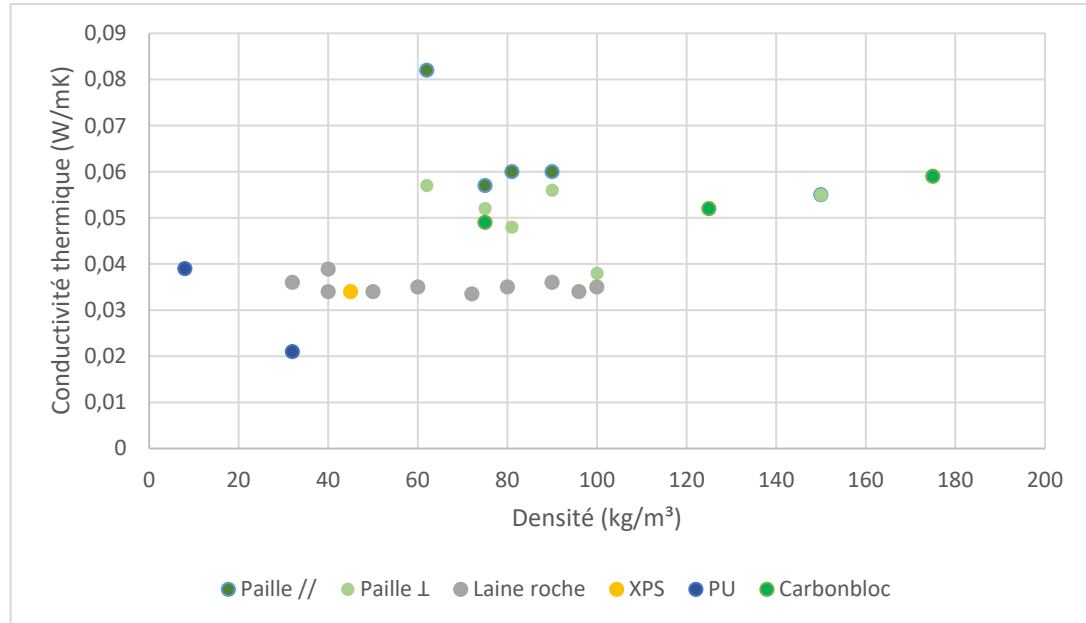


Figure 10: Conductivité thermique en fonction de la densité de différents isolants

En prenant en considération l'ensemble des études qui ont mesuré la conductivité thermique de la paille, la densité optimale serait de 110 kg/m³ et permettrait d'atteindre une conductivité thermique de 0,042 W/mK.

Les mesures de conductivité thermique ont été effectuées en laboratoire à l'Université Laval de manière indépendante par un étudiant à la maîtrise. Il a mesuré une conductivité thermique variant entre 0,049 et 0,059 W/mK pour des densités se situant entre 75 et 175 kg/m³. Selon ces résultats, la densité de 125 kg/m³ de la paille aléatoire présente une résistance thermique de 0,052 W/mK. Cette densité est très près de la densité utilisée dans le système Carbonbloc. Ainsi la valeur RSI par pouce de la paille du Carbonbloc est de 0,48.

Le facteur d'isolation de la paille du système Carbonbloc est plus faible que ce qui été mesuré dans certaines études, mais il est tout à fait à l'intérieur des valeurs mesurées par d'autres chercheurs. La paille du système Carbonbloc présente une résistance thermique 36% moins élevée que la laine de roche, mais son coût en est 4 fois moins élevé ce qui permet d'augmenter l'épaisseur pour compenser.

La structure du système est conçue de manière à minimiser les ponts thermiques et les essais en laboratoire réalisés au début du projet (2011) ont montré que les panneaux Carbonbloc ne présentent pas de variations de température de surface typique des ponts thermiques alignés sur les éléments de structure secondaire. Les essais en cours au Laboratoire vivant vont permettre, entre autres, d'évaluer les ponts thermiques effectifs ainsi que leur variation éventuelle.

En plus d'être un isolant naturel performant, la nature du matériau en fait également un excellent isolant acoustique. Cet aspect sera également analysé. Si les premières observations effectuées

au Laboratoire vivant démontrent une performance acoustique intéressante, des panneaux de cloisons intérieures pourraient éventuellement être développés.

3.4.1.2 Performance économique

La paille est l'isolant le plus abordable qu'il soit possible de trouver actuellement. La figure suivante présente le coût unitaire de l'isolant requis pour atteindre la même résistance thermique de même que l'épaisseur requise.

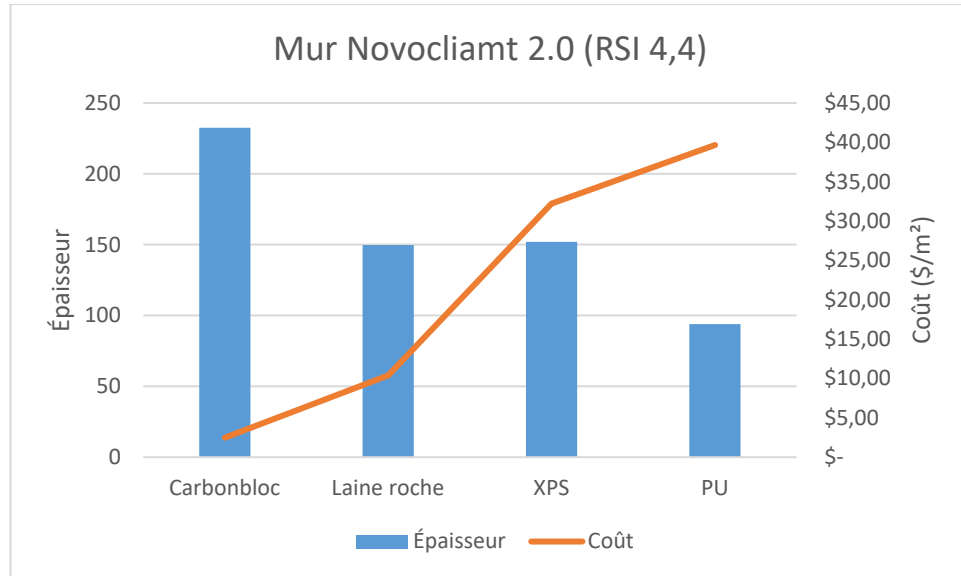


Figure 11: Comparaison du coût et de l'épaisseur requise des isolants pour atteindre la résistance thermique prescrite pour un mur Novoclimat 2.0

Il est donc nécessaire d'installer 232 mm de paille ou 145 mm de laine de roche pour atteindre une valeur RSI 4,4. Malgré l'épaisseur supplémentaire, le coût de la paille est de 2,48 \$/m² comparativement à 10,38 \$/m² pour la laine de roche. Le coût des isolants à base de pétrole, mis à part leur coût environnemental, est encore plus élevé.

Le faible coût des principaux matériaux utilisés nous a permis de réaliser les panneaux Carbonbloc à 145,53 \$/m², et ce, sans plan de production optimisé ni économies d'échelle. Ce coût est environ 30% supérieur à un mur NovoClimat, mais 1,75 fois la valeur isolante. Combiné avec les économies en systèmes électromécaniques, en consommation d'énergie et les crédits carbone, il est déjà possible d'affirmer que le système pourra s'avérer le meilleur rapport qualité-prix sur le marché dans une perspective de coût global.

3.4.1.3 Gestion des risques liés à l'humidité excessive

Comme le bois et toutes les autres matières organiques, la paille peut se décomposer. Cependant, pour que ce phénomène puisse se produire, l'humidité doit être supérieure à 20% pour une période prolongée.

La préfabrication, la gestion de la qualité et les procédures de transport et de construction permettent au système Carbonbloc de maintenir en tout temps un taux d'humidité inférieur à 20%. Une fois installé, le taux d'humidité mesuré au Laboratoire Vivant est inférieur à 10% sur toute l'année. La littérature scientifique, les guides de construction en paille et ainsi que l'« International Residential Code » (IRC) précisent que l'humidité de la paille doit être inférieure à 20%. L'IRC stipule que la densité minimale doit être de 104 kg/m³ pour la partie sèche. Au taux de compaction et d'humidité standard, le système Carbonbloc présente une densité sèche de 110 kg/m³.

MOISSISURE = BACTÉRIE + NUTRIMENT + **HUMIDITÉ > 20%**
~~MOISSISURE~~ = BACTÉRIE + NUTRIMENT + **HUMIDITÉ < 20%**

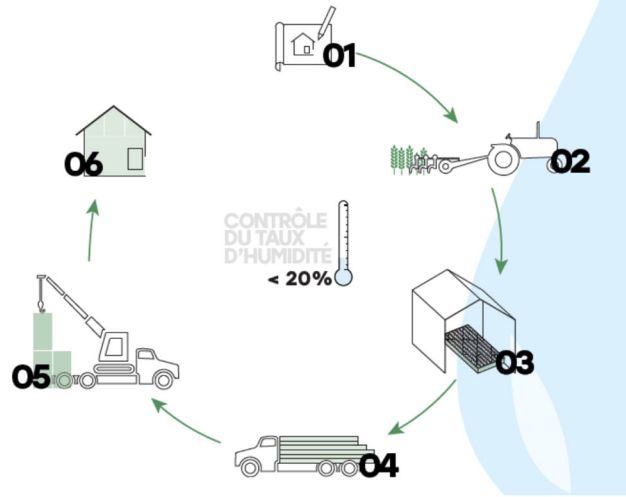


Figure 12 : Schéma de contrôle de l'humidité

L'expérience acquise a permis de démontrer que la phase critique était l'entreposage des panneaux et l'érection de la structure au chantier. L'entreposage doit impérativement protéger les panneaux de l'exposition à la pluie ou la neige. Au cours du projet, deux panneaux ont été endommagés en raison d'un entreposage extérieur sous toile qui avait permis que de la neige s'accumule dans l'espace entre deux panneaux en raison de la rupture d'une courroie. Cette expérience a permis de constater qu'une procédure de contrôle est nécessaire, mais aussi qu'il était possible de réparer les panneaux en place. D'ailleurs, les observations ont permis de constater que l'âme des poutrelles en OSB était l'élément qui présentait la plus grande dégradation à la suite de l'exposition à une forte humidité.

Certains détails architecturaux, l'assemblage des panneaux en chantier et les protections temporaires ont été révisés à la suite de la construction du Laboratoire Vivant.

3.4.1.4 Résistance au feu

Le système constructif n'a pas encore obtenu de cote de résistance au feu émise par les autorités compétentes, mais présente tout de même une résistance au feu d'au moins une heure en raison de l'application de l'Annexe D (Division B) du Code. De manière générale l'installation des panneaux de gypse procure le niveau de protection minimal. À l'exception des étriers en acier galvanisé supportant les poutrelles des toits et planchers, les différents connecteurs d'acier du système sont protégés par de l'isolant incombustible et les plaques de gypse. Les détails de jonction, leur position dans l'assemblage structural, l'utilisation de gypse de type X combiné au comportement sous feu de la paille étudié en laboratoire permettent de penser que l'obtention d'un degré de résistance au feu d'au moins une heure des différents éléments du système Carbonbloc pourra être obtenu rapidement une fois la production standardisée et homologuée.

Les figures et extraits suivants sont tirés du mémoire de Maîtrise de M. Frédéric Blondin [2], ayant effectué des recherches sur un système représentatif du Carbonbloc grâce au partenariat de Coarchitecture avec la chaire CIRCERB de l'Université Laval



Figure 13 : État de l'échantillon après l'essai de résistance au feu

Cet essai représente le comportement d'un module de plancher isolé en paille sans panneaux de gypse. On remarque dans le graphique suivant que la protection thermique offerte par la paille est tout à fait comparable à la laine de roche. En fait, pendant les 30 premières minutes, elle est plus efficace à freiner l'augmentation de température au-dessus de l'échantillon, mais après 40 minutes, le taux d'augmentation de température change probablement en raison de la combustion superficielle de la paille.

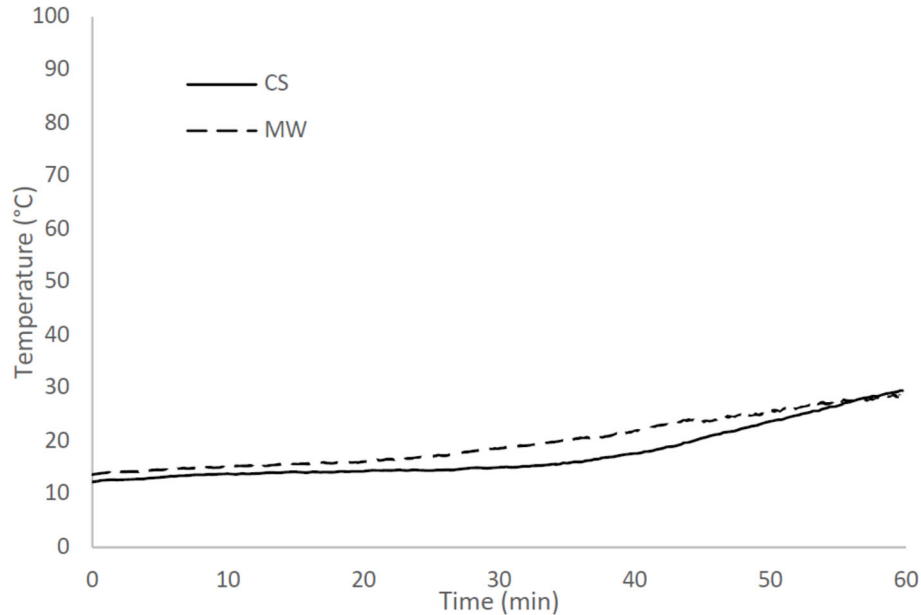


Figure 14 : Profil de température moyenne à sa surface non exposée au feu de l'échantillon isolé avec de la paille compactée et de la laine minérale.

Selon les résultats du test du cône calorimètre, la plus faible densité de paille compressée (75 kg/m^3) émet moins d'énergie en brûlant que les autres densités (125 et 175 kg/m^3) et que les matériaux d'isolation combustibles disponibles commercialement. Elle a d'ailleurs une meilleure propriété isolante que les autres densités de paille. Le taux de dégagement de chaleur était inférieur à celui des matériaux d'isolation biosourcés (Multitherm et Thermowall-gf) et était beaucoup plus faible que celui de l'isolant en polystyrène extrudé (XPS). Ces résultats suggèrent que la paille compressée serait probablement moins susceptible de contribuer à un stade précoce d'incendie de bâtiment.

[...] À la lumière de ces résultats, la paille compressée semble avoir un comportement au feu moins risqué lorsque comparée aux matériaux d'isolation combustibles conventionnels actuellement utilisés. Comparativement au matériau d'isolation incombustible tel que la laine minérale, elle a augmenté la charge combustible de l'assemblage. Cependant, l'impact de la paille compressée sur le comportement au feu de l'assemblage était moins important que prévu par rapport à l'assemblage isolé avec un matériau incombustible. Considérant que la température d'inflammation du bois a été atteinte 25% plus vite dans l'ensemble isolé avec de la paille compressée dont la conductivité thermique était supérieure de 26% à celle de l'isolant en laine minérale, le risque incendie n'est pas nécessairement proportionnel à la charge calorifique du matériau isolant, mais serait plutôt lié au transfert de chaleur dû à une plus grande conductivité thermique.

3.4.2 Aspects réglementaires

La vérification de la conformité aux exigences applicables du Code de construction a été réalisée. Cette analyse a permis de constater que seuls deux éléments du système devaient être adaptés. Le premier est l'exigence de certification à la norme CAN/CSA-A277-16. Cette norme encadre la

préfabrication de composants de bâtiments et assure que les procédés de préfabrication garantissent la conformité au Code et le même niveau de qualité que la construction au chantier.

Il pourrait s'avérer nécessaire de développer une norme spécifique à la qualification de la paille comme isolant. Le Code demande que les matériaux isolants soient conformes aux normes applicables. Or, aucune norme n'est directement applicable à la paille. Dans l'intervalle, l'équivalence de la paille compactée dans les modules Carbonbloc pourra être démontrée au niveau de la performance en fonction des normes comparables du *Tableau 5.9.1.1. Normes applicables aux éléments de séparation des milieux différents et aux ensembles de construction exposés au milieu extérieur*. La paille compressée a une composition et des propriétés similaires à la fibre de cellulose qui rencontre la norme *CAN/ULC-S703 Isolant en fibre cellulosique (IFC) pour les bâtiments*. La norme *CAN/ULC-706.1 Panneaux isolants en fibres de bois pour bâtiments* prescrit également des propriétés physiques comparables à celles du Carbonbloc. Des échantillons provenant de panneaux peuvent également être évalués selon la norme ASTM C518 pour en déterminer la conductivité thermique.

Dans l'attente du développement d'une norme applicable à l'utilisation de paille comme isolant dans un système de mur préfabriqué, comme le système Carbonbloc, les informations, données et observations acquises permettent de démontrer que la paille tel qu'utilisée constitue une solution de rechange équivalente à des matériaux acceptables identifiés au *Tableau 5.9.1.1. du Code*.

3.4.3 Bilan carbone

Selon le bilan carbone réalisé sur les matériaux de la structure d'un bâtiment multirésidentiel, le système Carbonbloc permet de réduire les émissions de 45% par rapport au scénario de référence, soit une réduction estimée à 965,7 tonnes de GES.

Les émissions par logement du bâtiment de référence s'élèvent à 25,7 tonnes de GES par unité alors qu'elles sont de 14,2 tonnes de GES pour le projet construit avec le système Carbonbloc. Ceci représente une réduction de 11,5 tonnes par logement.

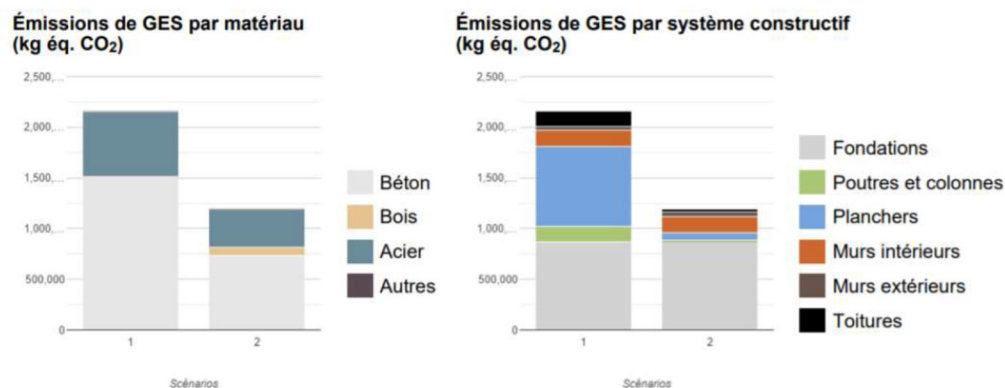


Figure 15 : Bilan de GES comparatif d'un bâtiment multirésidentiel en béton et construit avec le système Carbonbloc

Comparativement au bâtiment de référence, l'utilisation du système Carbonbloc permet de réduire les émissions des planchers de 33,1%, de 6,1 % pour les colonnes et de 5,8 % pour la toiture. Lorsqu'on considère les émissions de GES au-dessus des fondations, la réduction globale des émissions du système Carbonbloc est de 74,6 %.

L'analyse de l'ensemble du procédé et des émissions reliées à la préfabrication des composants du système Carbonbloc n'a pas été réalisée puisque les opérations n'étaient pas très représentatives d'un procédé de production complet. Cependant, l'impact de la préfabrication des panneaux sera évalué et intégré à la déclaration environnementale de produit qui sera réalisée subséquemment. Puisque le procédé de préfabrication consiste essentiellement en des opérations

mécaniques, qu'une très faible quantité de produits chimiques est nécessaire pour le collage des tiges et le traitement de la paille, on peut conclure que l'énergie requise pour la production des panneaux n'affectera pas significativement le bilan des émissions déjà mesuré. Il est envisageable que la réduction du volume de résidus de préusinage et l'impact réduit de la construction hors site permettent de réduire les émissions totales.

Il est à noter qu'au cours de la construction du Laboratoire Vivant, la phase de construction a généré 8 fois plus de matières résiduelles que la préfabrication.

Aux fins d'évaluation, le bilan carbone du Laboratoire vivant prend en considération la séquestration de carbone dans l'isolant en paille. Cette évaluation vise à déterminer s'il est possible de séquestrer au moins autant de carbone dans l'isolant que ce qui a été émis par la production des autres matériaux principaux. Le même outil d'évaluation des GES, Gestimat, a été utilisé pour en évaluer l'impact. La paille a été considérée comme un « autre » matériau et un coefficient d'émission négatif a été utilisé pour représenter la séquestration. Le tableau suivant présente les résultats de cette analyse.

Émissions de GES (kg éq. CO₂)

		Matériaux				Total GES	%
		Béton	Bois	Acier	Autres		
Systèmes constructifs	Fondations	0	996	3 346	1 323	5 665	45.2
	Poutres et colonnes	0	0	0	0	0	0
	Planchers	0	569	527	-4 868	-3 772	30.1
	Murs intérieurs	0	0	0	0	0	0
	Murs extérieurs	0	2 179	1 690	-13 463	-9 593	76.5
	Toitures	0	360	255	-5 462	-4 847	38.6
Total GES		0	4 104	5 818	-22 470	12 547	100
%		0	32.7	46.4	179	100	
GES par m²		0	26.9	38.2	147	82.3	

Figure 16 : Bilan carbone du Laboratoire vivant, avec prise en compte de la séquestration

Gestimat ne prend pas en compte les valeurs négatives dans l'évaluation du bilan carbone, mais calcule néanmoins que la paille émet -23,8 tonnes de GES (les valeurs négatives de la colonne « Autres » correspondent aux entrées de la paille). Globalement le Laboratoire vivant a généré 16,9 tonnes de GES, mais présente tout de même un bilan de -12,5 tonnes de GES.

3.4.3.1 Séquestration

Le système Carbonbloc utilise le principe de stockage à cycle court et limite considérablement les émissions des procédés associés à la construction pour parvenir au bilan carbone négatif. Le principal objectif du projet de Laboratoire Vivant était de faire cette démonstration et de maintenir ce bilan sur toute la vie utile du bâtiment.

La séquestration du carbone fait l'objet de débats et tous les modes de séquestration ne sont pas reconnus ni encadrés. Quelques protocoles encadrent la séquestration de CO₂ dans certaines formations géologiques. C'est notamment le cas en Alberta depuis 2015 et Californie depuis 2018. Ce mode de séquestration, comme plusieurs autres d'ailleurs, font l'objet de critiques notamment,

en raison des incertitudes quant à la pérennité du stockage. Le système Carbonbloc propose un mode de séquestration complètement différent.

La séquestration de CO₂ dans le système Carbonbloc est faite par les végétaux, qui captent le carbone atmosphérique pour constituer leur propre structure. Le procédé de séquestration consiste à interrompre le cycle naturel du carbone et à l'emmagasiner dans des immeubles. Les arbres permettent de constituer la structure du bâtiment et la paille permet de les isoler thermiquement. Le carbone y est stocké tant et aussi longtemps que l'immeuble demeure en place. Le puits de carbone ainsi constitué peut persister au-delà de la vie utile du bâtiment dans la mesure où ce dernier est remplacé par un bâtiment construit avec les mêmes matériaux.

Ce stockage du carbone n'est pas reconnu actuellement, mais, il n'en est pas moins concret : le CO₂ constituant les fibres végétales était présent dans l'atmosphère lors de la croissance des végétaux. L'utilisation de paille comme isolant fait en sorte que le CO₂ stocké dans le bâtiment était présent dans l'atmosphère dans l'année précédant la construction. Si l'ensemble des autres procédés qu'implique cette construction ne sont pas responsables de plus d'émissions que la paille n'en a stocké, cette construction engendre une réduction nette du carbone dans l'atmosphère lors de sa construction.

Le bois est un puits de carbone important et significatif du système Carbonbloc puisqu'il séquestre environ 614 kg CO₂e [3] par m³. Pour sa part, la paille permet de séquestrer 157 kg/m³, ce qui peut sembler moins intéressant que le bois. Or, en considérant la période de croissance du bois et de la paille, cette dernière permet de stocker 15 fois plus de carbone par m³ que le bois (en considérant une récolte de bois tous les 60 ans).

La paille utilisée dans l'isolation du bâtiment proposé permet de séquestrer 220 tonnes de GES. Si le bilan carbone du projet avait comptabilisé la séquestration rapide du carbone par la paille, il se serait élevé à 983 tonnes de GES. Les fondations comprenant un stationnement de 97 cases et le recours aux murs de refend en béton font en sorte que le bâtiment ne peut être neutre en carbone.

L'introduction prochaine d'un système de contreventement à la structure interne du système Carbonbloc permettra d'améliorer significativement le bilan carbone du système constructif. Si on omet le stationnement, ce qui sera possible dans un futur prévisible avec les voitures intelligentes, et en considérant uniquement la séquestration due à la paille, le bilan carbone du système constructif du bâtiment étudié s'élève à 118 tonnes de GES. Avec l'ajout du système de contreventement au Carbonbloc, qui viendrait réduire les émissions des murs de refend qui s'élève à 160 tonnes, il est plausible d'atteindre la neutralité carbone pour la construction au-dessus des fondations avec du béton conventionnel.

3.4.3.2 Production de la paille

L'intérêt de la paille comme puits de carbone provient du fait qu'elle est renouvelée annuellement et qu'elle est un sous-produit de la production de céréales. Puisque l'impact environnemental de la production de paille est déjà généré par la production des céréales, l'augmentation de l'utilisation de la paille n'entraînera pas de modification importante des pratiques actuelles, mais répartira plutôt l'impact sur plusieurs secteurs économiques.

Des études agronomiques démontrent que la récolte de la paille n'a qu'un faible impact sur les sols et ne demande qu'une faible augmentation de la fertilisation. La hauteur de coupe peut être adaptée à ce type de récolte de manière à maintenir un apport suffisant en matière organique dans le sol.

Des ententes préalables avec différents producteurs de grains devront être conclues avant la mise en production du système Carbonbloc afin de sécuriser l'approvisionnement régional en paille. En effet, les producteurs planifient les récoltes de la paille en fonction des besoins du marché et dans

la perspective où la demande de paille pour la production du système Carbonbloc deviendra significative, il est très probable qu'elle génère localement des perturbations.

3.4.4 Évolution du système Carbonbloc

La construction du Laboratoire Vivant a été une étape essentielle dans le développement du système Carbonbloc. Elle a non seulement permis de valider plusieurs hypothèses, mais elle a aussi révélé certaines opportunités d'amélioration du système.

L'isolation des interfaces entre les modules doit être légèrement compressée lors de l'assemblage des panneaux pour éliminer les ponts thermiques aux joints entre les panneaux. Cette compaction, bien que très limitée exerce une force considérable qui a compliqué la mise en place des panneaux du Laboratoire Vivant. Une nouvelle version a été développée à la suite de cette expérience. Cette itération utilise le propre poids des panneaux pour compacter l'isolation insérée dans les joints horizontaux alors que l'espace a été légèrement augmenté dans les joints verticaux afin que l'isolation puisse être installée plus aisément au chantier une fois les panneaux mis en place. Les figures suivantes illustrent les changements effectués au système constructif.

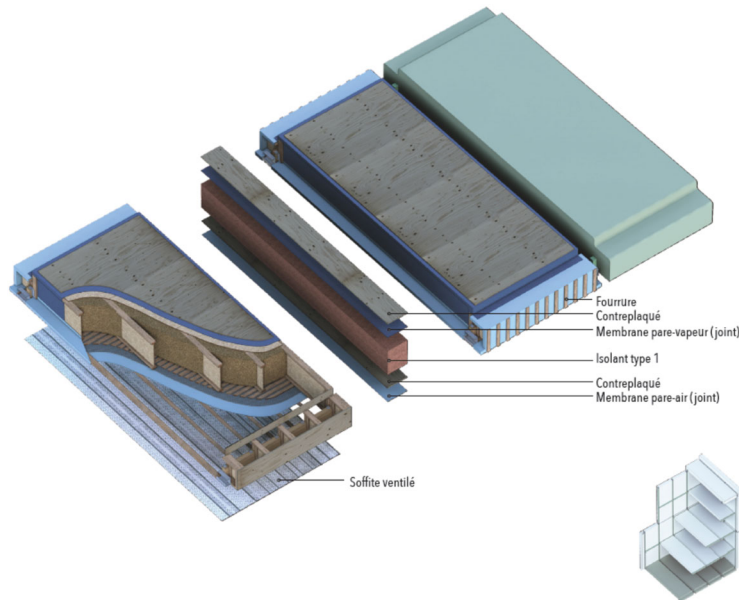


Figure 17 : panneaux de plancher isolés

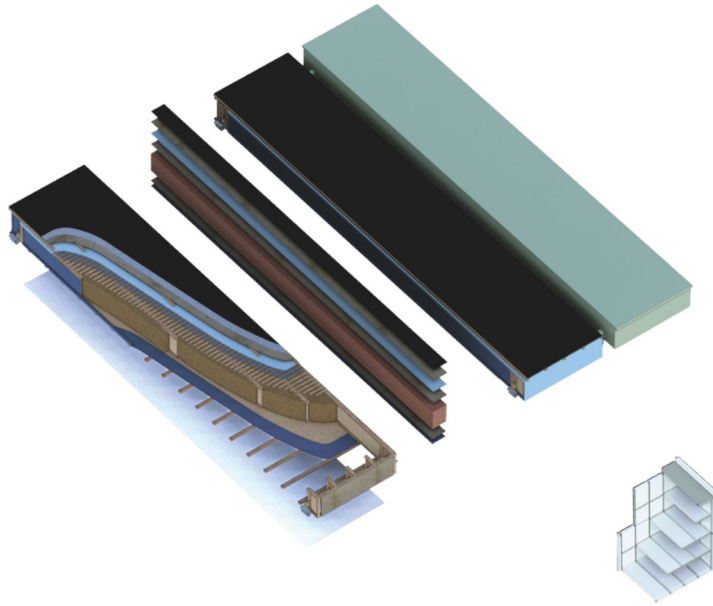


Figure 18 : panneaux de toit

Lors de la construction du Laboratoire Vivant, les conditions météorologiques ont nécessité l'installation de protections temporaires pour prévenir les dommages que les intempéries auraient pu provoquer. Ces protections temporaires n'ont pas offert la protection optimale et ont réduit la productivité de l'érection de l'enveloppe. L'expérience acquise a permis de limiter l'utilisation des protections temporaires à certaines conditions particulières. Les changements apportés aux panneaux du système Carbonbloc permettent d'utiliser les membranes pare-air et pare-vapeur comme protection intégrale des panneaux dès la sortie de l'atelier jusqu'à la fermeture complète de l'enveloppe du projet en construction. Les connecteurs structuraux des panneaux de toit ont également été simplifiés ce qui a également permis de réduire le nombre de connecteurs utilisé dans le système structural.

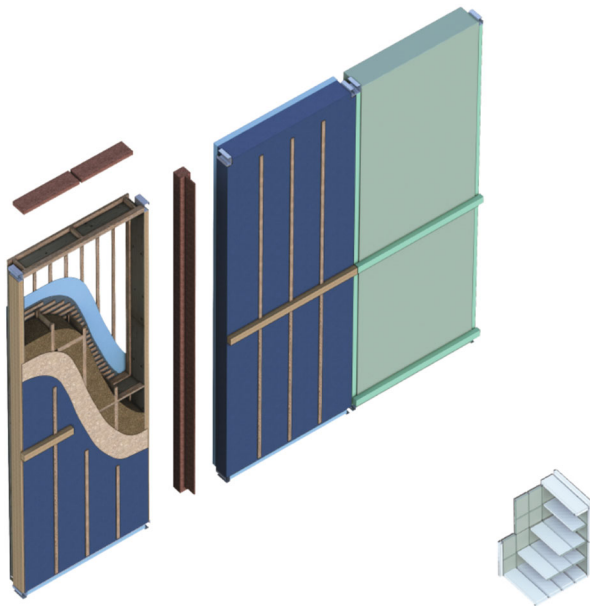


Figure 19 : panneaux de murs

Les panneaux muraux ont globalement performé tel qu'a attendu. L'enjeu de la jonction verticale est le seul élément qui a posé un défi significatif et l'évolution du système intègre maintenant la même approche de jonction que celle utilisée pour les panneaux horizontaux.

Le changement le plus important se situe au niveau des ouvertures. L'utilisation du Laboratoire Vivant sur toutes les saisons a permis de constater que la position du plan des fenêtres présentait un risque d'infiltration et raison de l'accumulation de glace et de neige sur les tablettes. Malgré toute l'attention portée à l'installation et à l'étanchéité des fenêtres, la taille des tablettes de fenêtre fait en sorte qu'en hiver, de l'eau liquide peut se retrouver près de la fenêtre (microclimat créé par la cavité de l'ouverture permettant à la neige de fondre plus rapidement près de la fenêtre), mais pouvant geler en bordure de la tablette. Ce phénomène de barrage de glace augmente significativement les risques d'infiltration. Il a donc été décidé de déplacer le plan de l'ouverture vers la face extérieure du mur même si cela entraîne une légère réduction de l'efficacité énergétique. La performance à long terme s'en trouvera bonifiée.

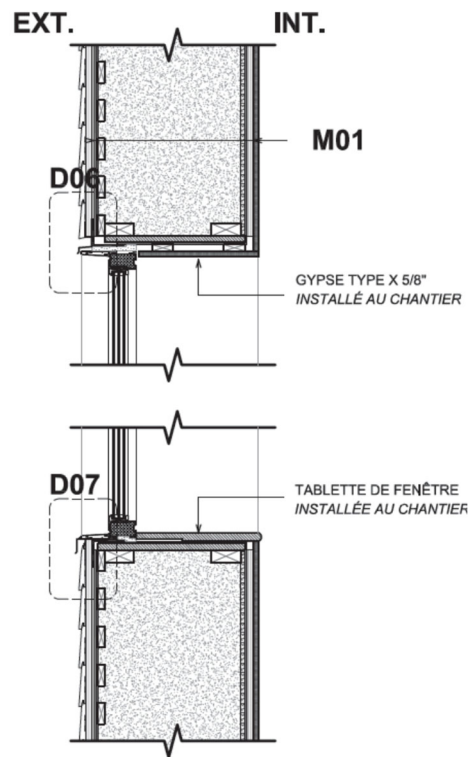


Figure 20 : Modification de l'installation des portes et fenêtres

3.5 Conclusions

Le projet de démonstration du système Carbonbloc a permis d'analyser en situation réelle d'application une nouvelle manière de construire des bâtiments ayant un impact environnemental réellement soutenable. Surtout, il a permis d'évaluer la performance du système sous plusieurs angles, ce qui a fourni de précieuses données nécessaires à l'élaboration du modèle d'affaires qui permettra de commercialiser cette innovation.

Pour être une alternative concrète aux pratiques actuelles du secteur de la construction, le système Carbonbloc doit pouvoir rencontrer un cahier des charges ambitieux. Le projet de démonstration a permis d'en apprécier plusieurs éléments. D'abord, la construction du Laboratoire vivant et les autres recherches effectuées ont démontré qu'une enveloppe thermique efficace pouvait être réalisée de manière économique grâce à l'utilisation de paille compactée.

L'isolation à base de paille peut être effectuée efficacement par un procédé industriel intégré à la préfabrication des panneaux structuraux en bois. Cette combinaison technologique permet de réaliser des panneaux structuraux isolants à un prix compétitif, dans la mesure où les capacités de production sont adaptées.

La structure des panneaux et de l'ensemble du système permet de supporter les charges d'un immeuble résidentiel de 6 étages et la trame structurale dictée par le système n'affecte pas significativement l'aménagement des logements.

Le système Carbonbloc peut rencontrer les exigences du Code de construction s'il est préfabriqué conformément aux exigences de la norme CAN/CSA-A277-16. Aucune contrainte réglementaire insurmontable n'a été identifiée et le système Carbonbloc peut respecter l'ensemble des exigences applicables pour être utilisé dans la construction d'immeubles résidentiels et commerciaux jusqu'à 6 étages.

Le projet de démonstration a fourni les informations tangibles nécessaires aux différentes analyses économiques et stratégiques qui permettront d'entreprendre les prochaines étapes menant à la commercialisation du système Carbonbloc. Ces données permettent de mieux planifier les différentes étapes et processus de préfabrication, la logistique de production et d'expédition ainsi que la construction.

La réalisation du Laboratoire Vivant a permis d'identifier plusieurs améliorations au système et a aussi révélé certains risques qui n'avaient pas été identifiés au préalable.

3.6 Retombées et rayonnement des solutions développées et potentiel de reproductibilité pour l'industrie

Il est clair que la lutte aux changements climatiques fera appel à la décarbonation de l'industrie de la construction. Cette industrie est contrainte par des lois, normes et réglementations de diverses natures qui l'amène à une certaine inertie, faisant en sorte que ses émissions de GES ont tendance à persister. Pour changer cette situation insoutenable à long terme, des initiatives audacieuses comme le système Carbonbloc sont nécessaires et parviendront graduellement à prendre des parts de marché à mesure qu'elles prouveront leur valeur.

De grands changements auquel l'industrie apportera une certaine résistance sont nécessaires dans chacun des maillons de la chaîne de valeur. L'étude du système Carbonbloc expose clairement les défis qui sont à relever, mais aussi les bénéfices qui sont atteignables par la suite.

Réussir à réduire la concentration de CO₂ dans l'atmosphère en construisant l'habitat qui répond aux besoins humains d'une façon qui est financièrement abordable est une innovation qui peut faire une grande différence positive. C'est une démonstration éloquentes de la capacité

d'entreprises du Québec à profiter de ses avantages comparatifs afin de conjuguer le développement économique au développement durable.

Les stratégies utilisées pour le système Carbonbloc permettent d'atteindre directement l'objectif de réduction des émissions de GES fixés pour 2030. D'autres initiatives pourront s'en inspirer pour l'atteindre de façon plus graduelle ou différente en profitant des leçons apprises par Coarchitecture et ses partenaires grâce au soutien financier du MFFP et des autres ministères et organismes engagés dans le développement durable.

3.7 Recommandations

Mettre en place une petite usine pilote permettant de produire plusieurs panneaux par semaine et initier la mise en marché de maisons individuelles similaires au Laboratoire vivant pour développer l'expertise, mettre en place les réseaux d'approvisionnement et permettre aux entrepreneurs de prendre de l'expérience dans l'installation du Carbonbloc.

Formaliser une entente de partenariat avec un partenaire industriel capable de supporter la mise en œuvre d'une usine pilote.

Construire un bâtiment multirésidentiel de démonstration entièrement en réalisé en Carbonbloc et présentant un bilan carbone négatif.

4. Bibliographie

- [1] CECOBOIS, «Guide technique sur la conception de bâtiments de 5 ou 6 étages à ossature légère en bois».
- [2] F. Blondin, «Caractérisation du risque incendie de la paille compressée comme isolant d'une structure en bois,» Québec, 2019.
- [3] FPInnovation, «Documents techniques,» août 2018. [En ligne]. Available: https://www.nordic.ca/data/files/datasheet/file/EPD_Nordic_Lam.pdf. [Accès le 2021].
- [4] C. MAGWOOD, Essential Prefab Straw Bale Construction : the complete step-by-step guide, Gabriola Island, British-Colombia: New Society Publisher, 2016, p. 147.
- [5] Groupe CSA, *Mode opératoire visant la certification des bâtiments, des modules et des panneaux préfabriqués*, Toronto, Ontario: Groupe CSA, 2016, p. 32.