

**Lab
Interfaces
Bois**

Recherche et
développement
sur la
construction en
bois au Québec

Rapport de synthèse

Recherche et Développement Système de panneau d'enveloppe en bois préfabriqué

Louis Carignan

M. Designer

Bac. Arch.

Supervisé par

Cassandra Lafond ing., M.Sc.

Scientifique sénior, Systèmes de construction

Stage FPInnovations x Chaire Fayolle-Magil Construction

29 Août 2025

CHAIRE
FAYOLLE-MAGIL
CONSTRUCTION



Table des matières

Mise en contexte	2
Isolant en fibre de bois (panneau semi-rigide)	3
Isolant en fibre de bois (en vrac)	5
Isolant en fibre de chanvre (panneau semi-rigide)	7
Isolant en fibre de chanvre (en vrac)	9
Tableau comparatif des 4 isolants	11
Panneau isolant rigide en fibre de bois	12
Tableau des caractéristiques techniques	13
Cartographie du processus de production de panneaux en bois d'ingénierie	14
Cartographie du processus de production de panneaux en ossature légère	19
Adaptation à une production hybride au Québec	23
Approche DfMA (Design for Manufacturing and Assembly)	25
Recommandations préliminaires	27
Matrice d'évaluation des systèmes de panneaux préfabriqués	28
Définition des indicateurs d'évaluation	29
Comment utiliser la matrice	36
Évaluation de 3 systèmes de panneaux	38
Résultats dans la matrice Excel	46
Analyse du questionnaire	47

Mise en contexte

La tendance vers la construction verte connaît une croissance fulgurante depuis une décennie, représentant aujourd'hui environ 5 % du marché de la construction. Cette évolution touche principalement les secteurs non résidentiels et multifamiliaux, où les considérations environnementales influencent de plus en plus les choix de conception.

Dans ce contexte, ce travail s'inscrit dans une démarche de recherche et développement visant la création d'un nouveau panneau d'enveloppe préfabriqué en bois. L'objectif est de maximiser l'intégration de matériaux biosourcés, tant pour réduire l'empreinte carbone des bâtiments que pour favoriser une approche durable, locale et industrialisable de la construction. (Lavoie, 2010)

Pourquoi l'enveloppe préfabriquée

Dans un contexte où les pratiques de construction durable tendent à se normaliser, appuyées par une base de données scientifiques de plus en plus rigoureuse, de nombreuses municipalités adoptent désormais des exigences en matière de performance environnementale sur leur territoire. Ces réglementations visent principalement les bâtiments publics, incluant les écoles, les édifices gouvernementaux, les bureaux et les bâtiments industriels.

Cette évolution réglementaire ouvre la voie à une adoption plus large de matériaux biosourcés, notamment ceux à base de bois. Le bois se distingue non seulement par ses qualités physiques et techniques, mais aussi par ses attributs environnementaux : matériau renouvelable, recyclable, réutilisable, et souvent issu de ressources locales, il participe activement à la stratégie de décarbonation du secteur de la construction. Chaque mètre cube de bois peut stocker jusqu'à une tonne de CO₂, contribuant ainsi à réduire la concentration de gaz à effet de serre dans l'atmosphère.

Contrairement aux idées reçues, le secteur du bâtiment est le principal émetteur de CO₂, devant les secteurs du transport et de l'industrie. Il représente environ 40 % des émissions totales, soit 22 % pour le résidentiel et 18 % pour le commercial (Lavoie, 2010). La grande majorité de ces émissions — plus de 80 % — sont liées à l'exploitation et à la performance énergétique des bâtiments. Dès lors, l'amélioration de l'enveloppe thermique des constructions devient un levier stratégique pour atteindre les objectifs de réduction des émissions.

Dans ce cadre, les isolants biosourcés apparaissent comme des solutions pertinentes, d'autant plus lorsqu'ils sont intégrés à des systèmes constructifs préfabriqués. La préfabrication en atelier permet un meilleur contrôle de la qualité, réduit les pertes de matériaux, raccourcit les délais de chantier et limite les impacts environnementaux liés au transport et à la construction in situ.

Au Québec, l'adoption progressive de normes telles que Novoclimat illustre cette volonté de structurer la performance énergétique autour de cibles précises. La norme exige notamment des niveaux de résistance thermique élevés pour les murs extérieurs (R-24,5), les murs de sous-sol (R-4) et la toiture (R-41), ce qui renforce la nécessité de recourir à des isolants performants, durables et à faible empreinte carbone.

Ainsi, le recours à des isolants alternatifs biosourcés intégrés à des panneaux préfabriqués en bois constitue une réponse à la fois technologique et environnementale aux défis contemporains de la construction durable. (Lavoie, 2010)

Isolant en fibre de bois (panneau semi-rigide)

Les panneaux isolants en fibre de bois semi-rigide constituent une solution biosourcée performante pour l'isolation thermique et acoustique des murs, planchers et plafonds. Composés de fibres de bois résineux, généralement issues de forêts certifiées, ces panneaux offrent une résistance thermique élevée (jusqu'à R-4 par pouce) tout en assurant un confort hygrothermique optimal, tant en hiver qu'en été. Leur structure ouverte à la diffusion de vapeur permet de réguler l'humidité intérieure, contribuant ainsi à la durabilité des parois et à la qualité de l'air.

Naturellement renouvelables, non toxiques et sécuritaires à manipuler, ces isolants sont souvent traités au borate, un additif qui améliore leur résistance au feu, aux moisissures et aux insectes. Leur profil environnemental favorable les rend particulièrement adaptés aux constructions à faible empreinte carbone, en remplacement des isolants conventionnels comme la laine minérale ou la fibre de verre. (TimberHP, 2023)

Mise en œuvre dans une enveloppe préfabriquée en usine

L'isolant en panneau de fibre de bois s'intègre par ajustement à friction dans une ossature bois ou acier à entraxe standard (16" ou 24"). Une légère compression assure sa tenue mécanique sans fixation supplémentaire. Dans les configurations horizontales (plafonds, toitures), un support complémentaire peut être requis selon l'orientation de la paroi en atelier.

Avant la pose, les cavités doivent être nettoyées de tout débris, et les travaux d'étanchéité à l'air réalisés (application de rubans, mousses, calfeutrants aux joints et percements). La découpe des panneaux s'effectue à l'aide d'outils à dents fines, en usine ou sur gabarit, pour garantir un ajustement sans jeu et éviter les ponts thermiques.

Le positionnement précis des panneaux dans les cavités permet une isolation continue et homogène, limitant les vides et assurant la performance thermique. L'isolant est comprimé dans les cavités pour améliorer l'étanchéité, sans être excessive pour ne pas altérer sa structure ni ses propriétés isolantes.

La performance et la durabilité de l'assemblage reposent sur une stratigraphie conforme aux principes de gestion de l'humidité et à la respiration des murs :

- **Côté intérieur (zone chauffée)** : un pare-vapeur hygrovariable est appliqué pour bloquer la vapeur en hiver et permettre le séchage vers l'intérieur en saison chaude. Il est recouvert d'un parement intérieur (gypse, bois, etc.) adapté au projet.
- **Cavité isolée** : l'isolant en fibre de bois occupe la totalité de l'espace entre les montants. L'étanchéité à l'air est renforcée aux interfaces critiques (fenêtres, joints de panneaux, liaisons mur/plafond) à l'aide de produits d'étanchéité (mastic, rubans spécialisés, membranes continues).
- **Côté extérieur** : un panneau pare-pluie rigide perméable à la vapeur (panneau de fibre de bois dense, OSB avec membrane intégrée ou panneau multifonction) est apposé directement sur l'ossature. Il est complété par une membrane pare-intempéries (WRB) microperforée ou perméable à la vapeur.
- **Revêtement extérieur** : est installé avec un espace de ventilation d'au moins $\frac{3}{4}$ po pour favoriser le séchage de la paroi.

Principes constructifs à respecter

- Pas de membranes étanches des deux côtés de la paroi : éviter les assemblages pare-vapeur + pare-pluie étanche qui bloqueraient le séchage.
- L'étanchéité à l'air doit être continue, indépendamment de la résistance à la vapeur.
- Le mur doit sécher vers l'extérieur en période de chauffage.
- Les éléments électromécaniques doivent être traités en usine pour maintenir la performance globale du mur en phase chantier.

Isolant en fibre de bois (en vrac)

L'isolant en cellulose de fibre de bois soufflée est une solution biosourcée en vrac conçue pour offrir une excellente isolation thermique et acoustique dans les combles, murs, planchers et plafonds. Issu de fibres de bois résineux certifiées et traité au borate pour assurer une protection contre le feu, les moisissures et les insectes, cet isolant est biosourcé, recyclable, non toxique, et sécuritaire pour les installateurs. Offert en vrac libre pour les combles ou en dense-pack pour les cavités fermées, il combine performance thermique (jusqu'à R-60) et régulation hygrothermique, même dans les climats froids.

Grâce à sa perméabilité à la vapeur et à ses propriétés hygroscopiques, cet isolant contribue à la durabilité des murs et à la stabilité de la température intérieure, tout en stockant du carbone dans la masse isolante. Il représente une alternative biosourcée performante aux isolants minéraux conventionnels. (TimberHP, 2023)

Mise en œuvre dans une enveloppe préfabriquée en usine

d'une souffleuse à isolation équipée d'un long boyau (≥ 100 pi) et d'une lance ou aiguille adaptée. Dans le cadre de la préfabrication, il est utilisé en dense-pack dans les murs, planchers ou plafonds fermés, avec une toile respirante tendue ou une membrane perspirante fixée sur l'ossature en usine.

Avant l'application, les cavités doivent être nettoyées et préparées. L'isolant est ensuite injecté sous pression contrôlée pour assurer une répartition homogène limitant le tassement. La densité de pose est surveillée par la pression de retour (3,0 à 3,5 psi) et par l'observation du ralentissement du débit en sortie de machine. Une fois l'insufflation complétée, la toile peut être aplanie à l'aide d'un rouleau, et les incisions de contrôle doivent être scellées avec un ruban adhésif adapté.

Ce procédé assure une isolation continue, sans ponts thermiques ni vides, tout en s'adaptant à des géométries complexes.

Pour optimiser la performance de l'isolant dans une enveloppe préfabriquée, la composition murale doit respecter les règles de diffusion et de gestion de l'humidité :

Côté intérieur : application d'une membrane hygrovariable agrafée à l'ossature, permettant un séchage vers l'intérieur en été tout en bloquant la vapeur en hiver. Elle peut être posée avant ou après insufflation selon la méthode.

Cavité isolée : l'isolant est insufflé à haute densité ($\approx 48 \text{ kg/m}^3$) à travers une toile ou une membrane fixée en usine. Les points critiques (jonctions, ouvertures, transitions) doivent être étanchéisés à l'air avec mastics, rubans ou membranes continues.

Côté extérieur : intégration d'un panneau pare-pluie rigide et perméable à la vapeur (ex. : fibre de bois dense, OSB avec membrane intégrée), suivi d'une membrane WRB et d'un bardage ventilé, avec un espace d'air $\geq \frac{3}{4}$ po.

Principes constructifs à respecter

- Éviter les membranes étanches des deux côtés de la paroi : elles bloqueraient le séchage naturel.
- Favoriser le séchage vers l'extérieur, tout en permettant un certain séchage vers l'intérieur selon les conditions climatiques.
- L'isolant doit être à l'abri de l'eau liquide, mais libre d'échanger la vapeur (matériau hygroscopique et perspirant).
- Un bon conditionnement en machine est essentiel : mauvaise densité = tassement ou poches d'air.
- La préfabrication est compatible, à condition de définir précisément les cavités, d'assurer la tension de la toile, et de calibrer l'équipement pour un contrôle qualité rigoureux.

Isolant en fibre de chanvre (panneau semi-rigide)

L'isolant en panneau souple de fibre de chanvre est un matériau biosourcé conçu pour offrir une excellente performance thermique, acoustique et hygrothermique dans les parois des bâtiments. Constitué de fibres de chanvre industriel non traitées chimiquement, il est inséré par ajustement à friction dans des structures à ossature de bois ou d'acier. Ce matériau naturel se distingue par sa résilience biologique, sa stabilité dimensionnelle et son faible impact environnemental, avec une émission carbone incorporée réduite ($\approx 0,68 \text{ kg CO}_2 \text{ éq. / RSI}$).

Hygroscopique et perméable à la vapeur, le panneau de chanvre participe activement à la régulation de l'humidité intérieure, tout en conservant ses performances isolantes dans des climats rigoureux. Il représente une alternative saine et renouvelable aux isolants minéraux et synthétiques, adaptée à la construction durable. (Nature Fibre, 2024)

Mise en œuvre dans une enveloppe préfabriquée en usine

L'installation s'effectue par compression latérale, sans fixation mécanique, entre les montants d'une ossature en bois ou en acier. Grâce à son effet ressort, le panneau tient fermement en place, assurant une continuité isolante sans affaissement. Cette méthode de pose est rapide et intuitive, autant pour les professionnels que pour les autoconstructeurs.

Avant la pose, il est essentiel de :

- Travailler dans un environnement sec ;
- Inspecter chaque matelas isolant (absence d'humidité, de moisissures, de déformations ou de tassement) ;
- Découper les panneaux avec une surcote de $30 \text{ mm} \pm 5 \text{ mm}$ pour garantir un ajustement serré dans la cavité.
-

Les jonctions critiques (murs/planchers, murs/plafonds) doivent être soigneusement calfeutrées avec des chutes d'isolant pour prévenir les ponts thermiques. Les distances de sécurité autour des sources de chaleur (conduits, foyers, luminaires non IC) doivent être rigoureusement respectées.

La performance thermique et hygrométrique du panneau de fibre de chanvre dépend de son intégration dans une enveloppe respirante, conçue pour permettre le transfert contrôlé de vapeur d'eau et assurer l'étanchéité à l'air :

- **Côté intérieur (zone chauffée)** : installer un pare-vapeur hygrovariable permettant à la paroi de sécher vers l'intérieur pendant la saison chaude, tout en limitant l'humidité en hiver. Ce pare-vapeur doit être compatible avec les autres composants de la paroi.
- **Cavité isolée** : le matelas isolant est inséré par friction entre les montants. L'étanchéité à l'air (pare-air) est assurée par des rubans, mousses expansives ou mastics aux interfaces, jonctions et percements.
- **Côté extérieur** : mise en place d'un pare-pluie rigide perméable à la vapeur (comme un panneau en fibre de bois dense ou un OSB avec WRB intégré), recouvert d'une membrane pare-intempéries (WRB perméable), puis d'un revêtement extérieur ventilé. Cet agencement permet à la paroi de sécher vers l'extérieur.

Principes clés

- Le chanvre est hygroscopique : il doit pouvoir gérer naturellement l'humidité sans être enfermé entre deux membranes étanches.
- L'étanchéité à l'air (pare-air) est essentielle pour prévenir les fuites et optimiser la performance thermique.
- Le matériau est non toxique et non irritant : seuls des équipements de protection de base sont requis.
- Compatible avec la préfabrication : sa pose en atelier assure précision, rapidité et qualité de mise en œuvre.

Isolant en fibre de chanvre (en vrac)

L'isolant de fibre de chanvre soufflée est un matériau biosourcé, recyclable et non toxique, formulé à partir de fibres végétales naturelles (principalement du chanvre et du bois recyclé) et enrichi d'agents ignifuges et antifongiques à faible toxicité. Offrant une excellente isolation thermique et acoustique, il est destiné à l'insufflation dans les murs, planchers, plafonds, toitures à faible pente et combles. Sa capacité à réguler l'humidité et à ralentir les transferts thermiques en fait une solution performante pour les climats froids et humides.

Avec une valeur R de 3,7 par pouce ($\approx$ RSI 13 pour 35 cm), une perméabilité à la vapeur et un faible impact carbone intrinsèque ($\approx 0,2 \text{ kg CO}_2 \text{ éq/m}^2 \cdot \text{RSI}$), cet isolant est parfaitement aligné avec les objectifs de construction faible carbone. Il représente une alternative biosourcée aux isolants synthétiques ou minéraux. (Nature Fibre, 2024)

Mise en œuvre dans une enveloppe préfabriquée en usine

L'isolant en cellulose de fibre de chanvre peut être intégré dans un système préfabriqué à ossature bois selon un procédé d'insufflation dense (dense-pack), compatible avec les pratiques industrielles en atelier fermé. La mise en œuvre s'effectue au moyen d'une cardeuse professionnelle, équipée d'un boyau de soufflage et d'une buse rotative ou d'une lance à injection.

Les cavités doivent être entièrement fermées à l'aide d'une membrane de retenue ou d'un pare-vapeur hygrovariable, agrafé avec chevauchements scellés. Cette membrane sert à la fois de support à l'insufflation et de contrôle de la vapeur. Un lattage vertical et horizontal, espacé aux 16 pouces, est recommandé afin de limiter les déformations de la membrane lors du soufflage sous pression.

La densité visée est de 48 kg/m^3 , mesurée manuellement ou par contrôle de la contre-pression (3,0 à 3,5 psi). Ce niveau de densité garantit une isolation uniforme, sans tassement à long terme, et une bonne continuité thermique et acoustique. Chaque cavité doit être vérifiée après l'injection pour éviter les zones sous-remplies ou les poches d'air.

L'approche en préfabrication permet un contrôle rigoureux de la densité d'insufflation, une meilleure gestion des résidus, et une réduction des erreurs d'exécution sur chantier. De plus, la manipulation de la fibre sèche en atelier permet de protéger l'isolant des aléas climatiques, condition essentielle à la durabilité du matériau.

Pour assurer la performance durable de l'isolant de fibre de chanvre, l'assemblage mural doit respecter les principes fondamentaux d'un comportement hygrothermique équilibré:

- **Côté intérieur** : installation d'un pare-vapeur hygrovariable qui régule les transferts de vapeur selon les saisons, tout en servant de membrane de retenue pour l'insufflation.
- **Cavité isolée** : remplie densément sans tassement, assurant un matelas isolant homogène, sans interruption thermique ni phonique.
- **Côté extérieur** : emploi d'un pare-pluie rigide perméable à la vapeur (panneau de fibre de bois rigide ou OSB avec membrane intégrée), recouvert d'une membrane pare-intempéries (WRB) et d'un bardage ventilé.

Ce système favorise un séchage vers l'extérieur, tout en protégeant l'isolant des infiltrations d'eau liquide. L'usage combiné d'un pare-air continu (rubans, mastics, jonctions étanches) et d'un pare-vapeur intelligent évite toute condensation piégée et assure la longévité de l'enveloppe.

Principes clés

- L'isolant est hygroscopique : il doit être associé à un pare-vapeur intelligent pour permettre un bon séchage de la paroi.
- La densité d'insufflation doit être rigoureusement contrôlée pour éviter le tassement.
- Il offre une très bonne performance acoustique et une inertie thermique élevée.
- Le respect des dégagements autour des sources de chaleur est essentiel.
- Compatible avec la préfabrication, si les cavités sont bien définies et les membranes bien tendues.

Tableau comparatif des 4 isolants

	Fibre de bois		Fibre de chanvre	
	Matelas	Cellulose	Matelas	Cellulose
Résistance thermique	R : 4/pouce	R : 3,3/pouce	R : 4/pouce	R : 3,7/pouce
Résistance à l'humidité	ASTM C739	ASTM C739	ASTM C1338	ASTM C1338
Empreinte carbone	1.1346 kg CO ₂ éq. / m ² kg	0,2 kg CO ₂ éq./ m ² kg	0,68 kg CO ₂ éq. / m ² kg	0,2 kg CO ₂ éq./ m ² kg
Durabilité	80 ans	50 ans	80 ans	50 ans
Comportement au feu	ASTM E-84	ASTM E-84 classe A	CAN/ULC-S102	CAN/ULC S703 / ASTM E84 Classe A
Sources	1, 9, 10, 14, 15	1, 9, 11, 12, 13, 15	2, 4, 5, 6	2, 7, 8

Panneau isolant rigide en fibre de bois

Isolant rigide biosourcé pour l'extérieur de l'enveloppe préfabriquée en bois

Le panneau isolant rigide en fibres de bois est pensé pour une pose à l'extérieur de l'enveloppe, avant le parement. Sans être conçu pour un système constructif exclusif, il s'intègre aisément dans une approche préfabriquée à ossature bois, en remplissant plusieurs fonctions essentielles : isolation thermique continue, écran pare-pluie rigide, coupe-vent et support d'enduit.

Ce panneau est particulièrement adapté à une démarche de construction durable, grâce à sa fabrication en procédé sec à base de fibres de bois et à sa certification PEFC. Il s'inscrit pleinement dans le choix de matériaux isolants biosourcés compatibles avec la préfabrication : léger, utilisable, performant et recyclable.

Il offre une bonne perméabilité à la vapeur ($\mu = 3$), favorisant l'équilibre hygrothermique des parois. Sa valeur R atteint $4,75 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$ à 200 mm d'épaisseur, soit environ 3,44 par pouce, ce qui assure une isolation efficace en toute saison. Il présente une faible absorption d'eau, une bonne tenue mécanique, et une émission de COV très faible (classe A+).

L'étude d'Imken et ses collègues (2021) montre que la longueur des fibres de bois a un impact important sur les propriétés physiques et mécaniques des panneaux isolants en fibres de bois. Les fibres de bois d'essence feuillus sont généralement plus courtes et contiennent plus de poussière que celles de bois résineux. Cependant, elles peuvent être utilisées efficacement dans la fabrication de panneaux rigides en les mélangeant avec des fibres de bois résineux ou en procédant à un tri pour retirer les particules fines.

Cette méthode permet d'optimiser les performances du panneau tout en valorisant des ressources forestières locales et renouvelables. En intégrant des fibres de bois feuillus, le panneau isolant rigide s'inscrit dans une démarche durable, contribuant à préserver les forêts et à réduire l'empreinte carbone.

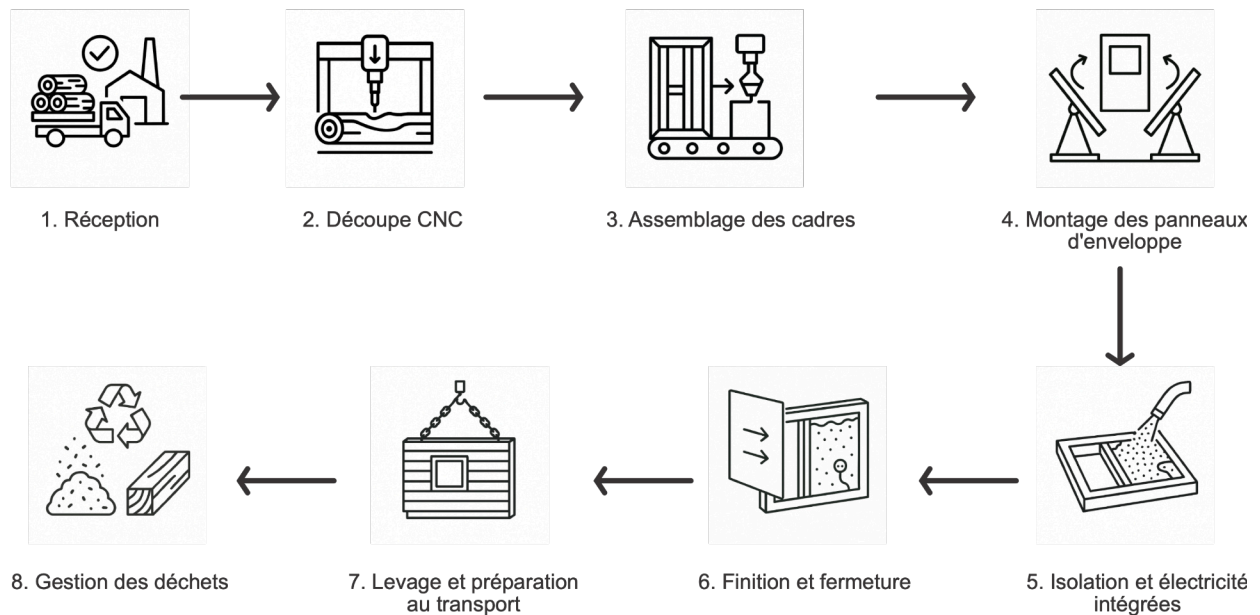
Tableau des caractéristiques techniques

Propriété	Valeur / Description
Composition	Fibres de bois, résine polyuréthane, paraffine
Procédé de fabrication	Procédé à sec
Conductivité thermique (λ)	0,042 W/(m·K) (selon NF EN 12667)
Valeur R par pouce	$\approx 3,44$
Réaction au feu	Classe E (EN 13501-1)
Perméabilité à la vapeur (μ)	3 (très perméable)
Valeur Sd (ép. 100 mm)	0,30 m
Absorption d'eau à court terme	$\leq 1,0$ kg/m ²
Capacité thermique massique (c)	2100 J/(kg·K)
Classe d'émission COV	A+ (très faibles émissions dans l'air intérieur)
Certifications	PEFC, ISO 9001:2015

Sources : (Imken, 2021) (STEICO SE.,2022)

Analyse des pratiques actuelles dans l'industrie de la préfabrication en bois

Cartographie du processus de production de panneaux en bois d'ingénierie



Étapes de la préfabrication en bois d'ingénierie

1. Réception

Plateforme logistique inspirée de l'industrie automobile

- Chargement de panneaux et bois sur des plateformes mobiles.
- Classement automatisé par type de matériaux et projets.
- Acheminement automatique vers les postes CNC.



(NS Builders, 2022)

2. Découpe CNC

Panneaux bois (CLT) et gypse

- Découpe précise avec point de manipulation intégrés (prises, gaines, etc.).
- Grues à ventouses pour manipulation.
- Coordination avec maquette BIM.



(NS Builders, 2022)

Bois lamellé-collé (glulam)

- Usinage : tenons, perçages, entailles, rainures.
- Intégration de points de levage (straps).
- Préparation pour insertion de connecteurs.



(NS Builders, 2022)

3. Assemblage des cadres

Montants des murs avec panneaux pré-perçés

- Assemblage bois massif + panneau.
- Positionnement automatisé par goupilles numériques.



(NS Builders, 2022)

4. Montage des panneaux d'enveloppe

Sur tables fixes numérisées

- Pose des montants dans rainures pré-usinées.
- Fixation du contreventement (OSB).
- Ajout de bandes horizontales pour structure secondaire.



(NS Builders, 2022)



(NS Builders, 2022)

5. Isolation et électricité intégrées

Remplissage + parement isolant extérieur

- Isolation en laine roche et fibre de bois.
- Intégration des boîtiers électriques et gaines.
- Agrafage mécanisé des panneaux isolants.



(NS Builders, 2022)

6. Finition et fermeture

Pose des membranes et parements

- Application de membranes, clins ou bardage.
- Finitions esthétiques (alignement vis/agrafes).
- Détails de bardage prévus pour le site.



(NS Builders, 2022)



(NS Builders, 2022)

7. Levage et préparation au transport

Rotation verticale + conditionnement

- Mise en position verticale sur plateforme.
- Enrobage plastique thermo-rétractable.
- Empilage sur plateformes de transport selon la séquence de montage sur le chantier.



(NS Builders, 2022)

8. Gestion des déchets (idéalement)

Recyclage et valorisation énergétique

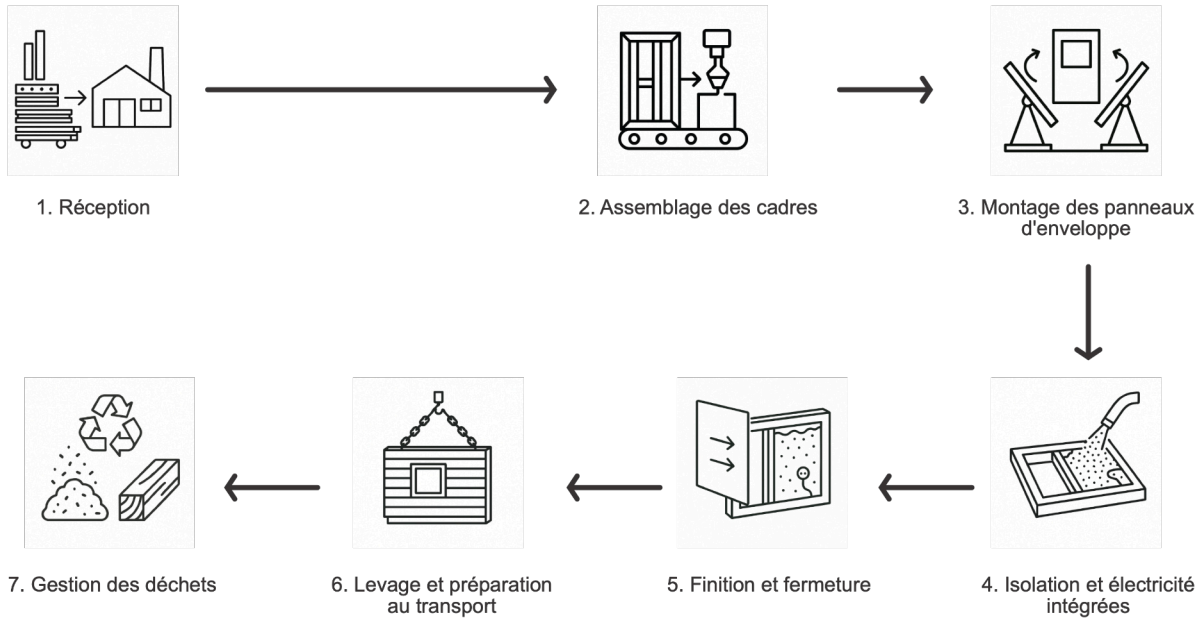
- Poussière de bois valorisée en chauffage.
- Gypse collecté séparément et recyclé.
- Film plastique recyclé via un partenaire local.
- Le «blocking» permet de valoriser les grandes retailles de bois en autres composantes non-structurales



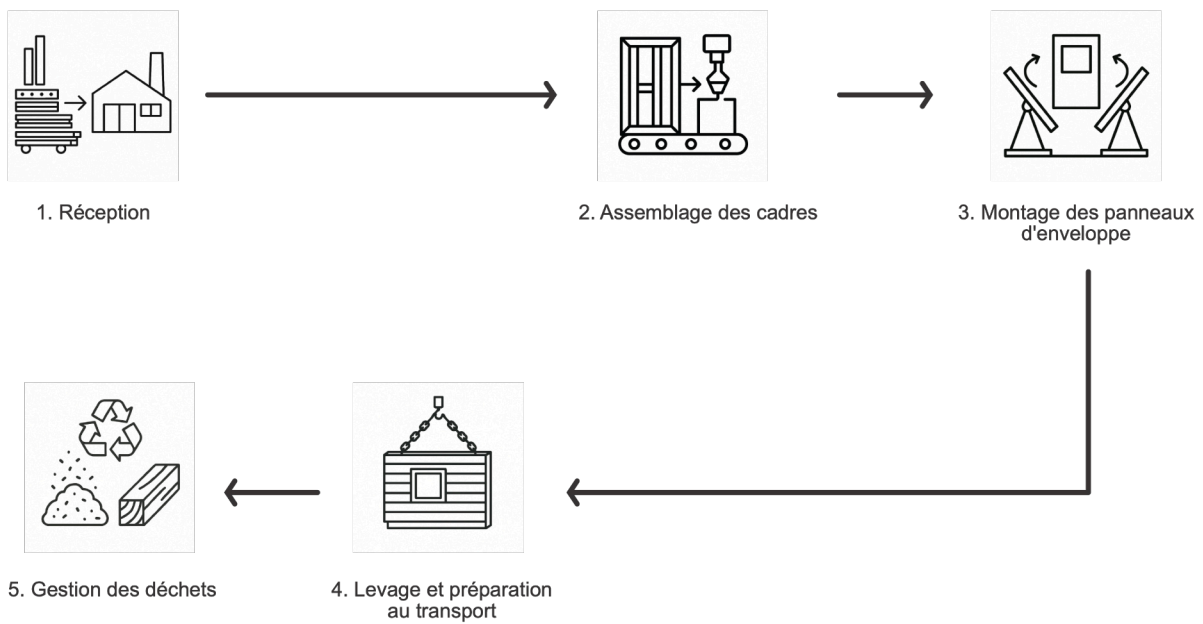
(NS Builders, 2022)

Cartographie du processus de production de panneaux en ossature légère

Panneau fermé



Panneau ouvert



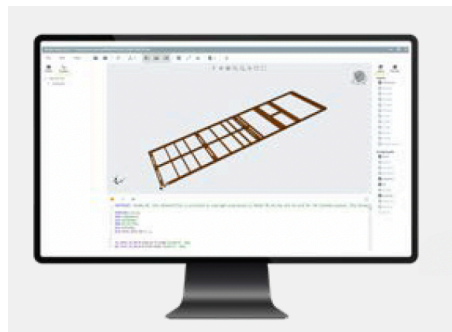
Étapes de la préfabrication en ossature légère

1. Réception des matériaux

- Réception de bois d'œuvre précoupé (montants, traverses, poutres, contreventement)
- Inspection de la qualité et entreposage temporaire par zones (ossature, parements, isolants, MEP)

Technologies :

- Chariots motorisés / convoyeurs d'entrée
- Scanners de lots pour traçabilité (RFID ou QR)



(Randek AB, 2023)

2. Assemblage des cadres

- Positionnement automatisé ou semi-automatisé des montants et traverses sur tables d'assemblage
- Clouage ou vissage robotisé, vérification de l'équerrage et des ouvertures (portes, fenêtres)
- Préassemblage de sous-composants complexes : linteaux, coins, multi-montants

Technologies:

- Stud Feeder (Randek) : alimentation et positionnement des montants
- Robotic Framing Unit (Randek) ou WEM 150 (WEINMANN) : clouage automatisé sur table
- Presses d'aboutage pour montants longs
- Système de vérification de cambrure (Crown Check)



(Randek AB, 2023)

3. Montage des panneaux d'enveloppe

- Pose du parement extérieur (ex. OSB), parfois avec encollage automatique
- Fixation mécanique (clous, vis ou agrafes) via robots ou ponts multifonctions
- Pour les panneaux fermés : retournement du panneau puis pose du parement intérieur

Technologies:

- Robotic Sheathing Unit (Randek) : pose, clouage, vissage automatisés
- Pont multifonction WALLTEQ (WEINMANN) : découpe, perçage, fixation, marquage
- Unité d'encollage (Robotic Gluing) avec trajectoire CNC
- CNC intégré pour découpes de fenêtres, portes



(Randek AB, 2023)

4. Isolation et intégration des services

Pour les panneaux fermés :

- Insertion automatisée de l'isolant (soufflé ou matelassé)
- Intégration des conduits électriques, passages de plomberie
- Pose de membrane pare-vapeur ou pare-air

Pour les panneaux ouverts :

- Cavités laissées accessibles pour une pose ultérieure sur site ou en atelier secondaire

Technologies:

- Robotic Insulation Unit : soufflage ou pose de panneaux semi-rigides
- Dérouleur de membrane + coupe automatique à longueur
- Projecteurs laser pour positionnement des gaines
- Tables HMI avec affichage de plans CAD

5. Finition et fermeture

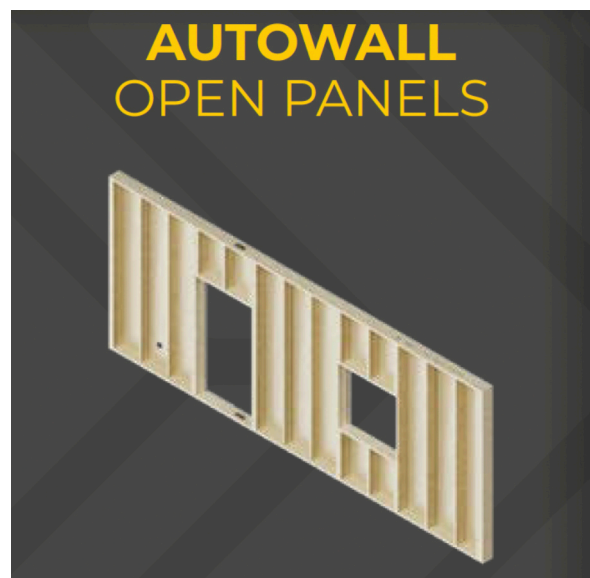
- Ajouts de détails architecturaux ou techniques (ex. fourrures, ancrages)
- Pose du parement intérieur (panneaux de gypse, fibre de bois, etc.) pour les panneaux fermés
- Vérification dimensionnelle et contrôle qualité en ligne

Technologies:

- Système de retournement automatisé (Turning Station)
- Pont multifonction secondaire (WEINMANN)



(Randek AB, 2023)



(Randek AB, 2023)



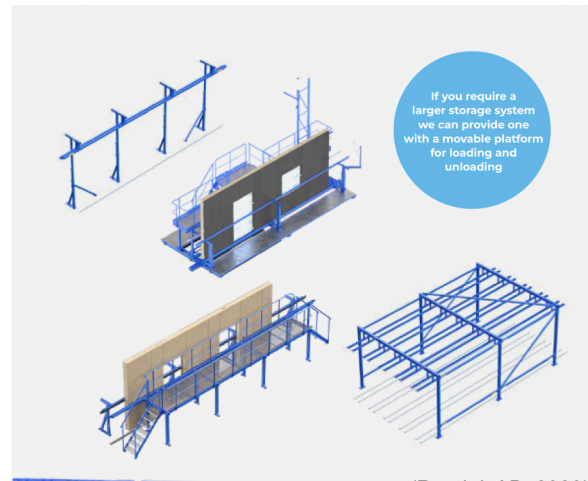
(Randek AB, 2023)

6. Levage et préparation au transport

- Déplacement vers zone d'empilage par chariots ou systèmes de levage sous vide
- Palettisation ou groupement des panneaux selon les séquences de montage prévues
- Étiquetage et documentation logistique intégrée (numérisation, suivi RFID possible)

Technologies:

- Systèmes de levage par vide (Venturi ou électrique)
- Convoyeurs motorisés vers la zone de stockage
- Module de planification logistique (Multiwall Stacker / Randek Planning)



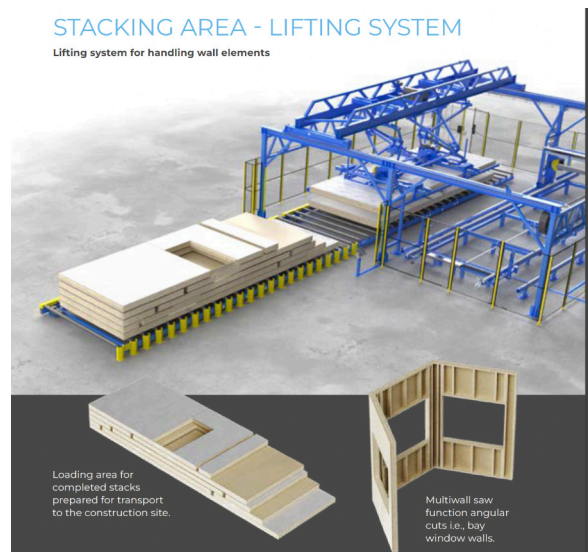
(Randek AB, 2023)

7. Gestion des déchets

- Collecte automatisée des retailles de bois, OSB, gypse ou isolant
- Tri par matériau pour réemploi, recyclage ou valorisation
- Intégration des pertes dans les outils de suivi de production pour retour d'expérience

Technologies :

- Unités de collecte automatisée par convoyeurs latéraux
- Capteurs de volume de chutes pour rapport de rendement



(Randek AB, 2023)

Adaptation à une production hybride au Québec

Sur la base des observations européennes, notamment celles issues du cas de l'usine Terhalle (Ahaus-Ottenstein, Allemagne) et de l'analyse multicritère pondérée (MCA) présentée par Orłowski (2019), une réflexion sur l'adaptation de ces procédés au contexte québécois permet de dégager les fondements d'un scénario réaliste pour la mise en œuvre d'une ligne de production hybride à Carleton, dans l'usine des Habitations Mont Carleton (HMC).

Vers une préfabrication optimisée et contextualisée

Au Québec, la préfabrication est souvent limitée à la transposition des pratiques de chantier sous abri, sans tirer parti de l'automatisation ni des innovations spécifiques à l'environnement d'usine (constat partagé par les partenaires de la chaire Fayolle-Magil). La nouvelle chaîne de production projetée à l'usine HMC vise à dépasser ce modèle par une intégration sélective de procédés automatisés, en lien avec une stratégie hybride combinant ossature légère et panneaux en bois lamellé-collé (glulam) pour les composantes préfabriquées de l'enveloppe.

Cette approche permettrait de répondre à la double contrainte de polyvalence dans les types de projets (petites séries personnalisées, typique du marché québécois hors-métropole) et de hautes performances thermiques compatibles avec le climat rigoureux du Québec.

Préparation numérique et coordination de la production

La gestion numérique des données est essentielle pour une chaîne hybride. Inspirée du système MES de Terhalle, la ligne de production de HMC pourrait intégrer des fichiers de production standardisés (type WUP ou IFC) transférés aux machines de coupe et d'assemblage, afin d'assurer une continuité entre les phases de modélisation BIM, de fabrication de l'ossature légère, et de taille des panneaux lamellés-collés. (Orłowski, 2019)

Assemblage de l'ossature légère et intégration du lamellé-collé

L'étape critique pour l'usine HMC sera l'adaptation de postes d'assemblage capables de gérer à la fois les cadres en montants de bois et l'intégration structurelle de panneaux en bois lamellé-collé (par exemple pour les zones de refend ou les points porteurs). L'utilisation d'un pont multifonction comme le Weinmann Waltec M380, capable de clouer, visser et usiner sur table, permettrait une flexibilité accrue.

L'ajout d'un poste de clouage automatique, comme le recommande l'étude MCA, est également pertinent pour gagner en cadence tout en maintenant la variabilité nécessaire à une production personnalisée.

Isolation biosourcée : insufflation contrôlée et performance thermique

Dans une optique de réduction de l'impact environnemental, l'usine prévoit l'intégration d'isolants biosourcés, compatibles avec les solutions d'insufflation denses. Le système Weinmann Insufill, éprouvé chez Terhalle, pourrait être un modèle à suivre, particulièrement pour assurer une densité et un remplissage conformes dans des cavités de tailles variables.

Le climat québécois impose des niveaux de performance élevés, et ce système permet de s'assurer d'un remplissage complet, limitant les ponts thermiques.

Pose automatisée des membranes pare-intempéries

L'étude MCA recommande fortement la Randek Automation pour automatiser cette tâche, essentielle à la durabilité des panneaux fermés. Cette technologie, si intégrée aux ponts multifonction, pourrait réduire les risques d'erreurs humaines tout en augmentant la cadence.

Finition extérieure et habillage bois

Dans le cas d'une production avec bardage préinstallé, une station de coupe et de pose comme la HOLZMA HPP 300 multiTec pourrait être envisagée pour la découpe précise et rapide des parements. Ce procédé permettrait de produire des panneaux prêts à poser, réduisant ainsi le travail sur chantier — un avantage crucial dans les régions éloignées comme la Gaspésie.

Logistique interne et stockage

L'organisation du stockage nécessite des solutions performantes. Les systèmes HOMAG TLF (stockage automatisé de panneaux) ou Hundegger Pick and Feed (alimentation des lignes) pourraient contribuer à fluidifier les opérations et limiter les manipulations manuelles, source de blessures et d'imprécision.

Un modèle d'automatisation graduelle et stratégique

Conformément aux constats de l'étude MCA, l'automatisation ne doit pas être vue comme un objectif total, mais comme un levier à appliquer aux étapes critiques, là où elle génère des gains mesurables en qualité, cadence ou sécurité.

Pour l'usine des Habitations Mont Carleton, une stratégie d'automatisation par paliers, adaptée aux contraintes de budget, d'espace et de main-d'œuvre, permettrait de construire un modèle de préfabrication hybride cohérent avec les réalités québécoises tout en s'inspirant des meilleures pratiques européennes.

Conclusion

L'adaptation des procédés observés en Allemagne à l'usine HMC montre la faisabilité d'une chaîne de production hybride alliant ossature légère et panneaux en bois lamellé-collé. En intégrant des technologies ciblées (ponts multifonctions, postes d'insufflation, automatisation de membranes), ce modèle vise à concilier flexibilité artisanale, qualité industrielle, et performance environnementale, dans une approche contextualisée au territoire québécois.

Approche DfMA (Design for Manufacturing and Assembly)

DfMA

Le Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) est une méthode de conception issue de l'industrie manufacturière qui vise à optimiser simultanément la fabrication et l'assemblage dès les premières phases du design. Appliquée à la construction, elle consiste à concevoir les bâtiments de manière à simplifier les processus de préfabrication (hors site) et de montage (sur site), tout en réduisant les coûts, les délais et les erreurs.

Dans un contexte comme celui du Québec, où la préfabrication est encore trop souvent une simple transposition du chantier à l'intérieur, le DfMA représente une approche stratégique pour structurer une véritable production industrielle adaptée à des composants bois complexes, comme des enveloppes hybrides en ossature légère et panneaux lamellé-collé.

Pourquoi est-ce important en préfabrication ?

L'application des principes du DfMA dans un projet de préfabrication permet avant tout une optimisation rigoureuse de la conception. Cela se traduit par une réduction du nombre de pièces, une standardisation intelligente des composants, ainsi qu'une prise en compte dès l'amont des tolérances nécessaires à un assemblage rapide et précis. En parallèle, cette approche favorise une intégration poussée avec les technologies numériques. L'usage du BIM, des outils de simulation, des plateformes cloud et des modèles paramétriques crée un lien direct entre la conception, la production en usine et la logistique, assurant ainsi une continuité fluide et maîtrisée du projet.

Cette structuration du processus améliore également la qualité de fabrication et la sécurité en chantier. En déplaçant une grande partie des tâches vers l'usine, où les environnements sont contrôlés, on réduit la part de main-d'œuvre exposée aux aléas du chantier, tout en augmentant la précision des assemblages. Enfin, le DfMA encourage une meilleure circularité des matériaux et des systèmes, notamment en intégrant des principes de démontabilité dès la conception (Design for Disassembly – DfD), ouvrant la voie à la réutilisation des composants en fin de vie.

Ces considérations prennent tout leur sens dans le cadre du projet des Habitations Mont Carleton, qui vise à développer un système constructif modulaire, biosourcé et adapté aux conditions climatiques du Québec.

Constats tirés de la littérature (Rankohi et al., 2022)

L'article propose une revue systématique de 52 articles scientifiques jusqu'en 2022. Il identifie quatre axes majeurs d'application du DfMA dans la construction :

1. Technologies :

- Outils de simulation, partage d'information en temps réel, réalité augmentée pour la formation et la sécurité.
- Développement de systèmes adaptés à la préfabrication numérique (BIM, IoT, plateformes cloud).

2. Domaines d'application :

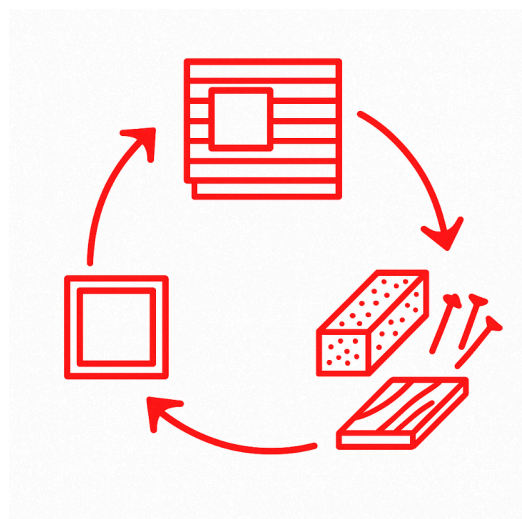
- Optimisation de la conception.
- Assurance qualité.
- Intégration de la chaîne d'approvisionnement.
- Automatisation de l'assemblage.
- Réduction des coûts et des délais.

3. Cycle de vie du projet :

- Le DfMA est surtout appliqué aux phases de design, fabrication et assemblage, mais tend à s'élargir vers la logistique, la maintenance, et la déconstruction, dans une optique de circularité.

4. Préfabrication :

- Le DfMA est particulièrement adapté aux approches industrialisées : murs panneaux en bois ou systèmes volumétriques.
- Il est très pertinent pour les structures hybrides, combinant panneaux en bois d'ingénierie et montants standards.



Réemploi et/ou recyclage des panneaux ?

Recommandations préliminaires

L'intégration du DfMA dans la chaîne de production de l'usine des Habitations Mont Carleton permettrait d'orchestrer de manière cohérente les interactions entre les cadres en ossature légère et les panneaux en bois lamellé-collé, utilisés non pas comme structure primaire, mais comme surfaces techniques jouant plusieurs rôles : contreventement, support de l'isolation et membrane respirante. En anticipant ces fonctions dès la conception, il devient possible d'élaborer des détails d'assemblage adaptés à la fabrication automatisée et à un montage rapide, réduisant ainsi les manipulations complexes.

Cette approche permet également de limiter la dépendance à une main-d'œuvre spécialisée sur le chantier, un avantage déterminant dans un territoire éloigné comme la Gaspésie. Par ailleurs, le DfMA facilite la mise en place d'un système de traçabilité des composants et des performances, notamment thermiques et environnementales, en assurant un contrôle rigoureux de chaque étape, de la modélisation à la production. Enfin, en instaurant une plateforme de travail unifiée entre la conception et la fabrication, le DfMA contribue à réduire les erreurs de coordination, les pertes de matériaux et les ajustements de dernière minute, assurant ainsi une meilleure qualité d'exécution et un rendement plus prévisible de la chaîne de production.

Défis et recommandations

Malgré ses bénéfices, le DfMA reste peu adopté dans le secteur de la construction, en raison de plusieurs freins :

- Résistance au changement dans la culture de projet.
- Manque de formations et de standards adaptés.
- Faible intégration entre les acteurs de la conception et ceux de la production.
- Absence de cadre normatif ou incitatif au Québec.

Pour l'usine HMC, il est donc recommandé de :

1. Impliquer les manufacturiers dès la phase de design architectural.
2. Standardiser certaines interfaces et modules, sans compromettre la flexibilité.
3. Investir dans des outils BIM paramétriques pour lier géométrie et production.
4. Documenter les retours d'expérience pour affiner les modèles DfMA à chaque cycle.

Le DfMA offre un cadre stratégique pour structurer une production hybride, flexible et performante en construction bois préfabriquée. Dans le contexte du Québec et du projet des Habitations Mont Carleton, cette approche permettrait de faire évoluer la préfabrication au-delà de la simple protection contre les intempéries, vers un véritable modèle industriel intégré, cohérent avec les objectifs de durabilité, de qualité et d'efficacité.

Matrice d'évaluation des systèmes de panneaux préfabriqués

Le tableau d'évaluation des systèmes de panneaux préfabriqués a été inspiré du travail de Richard Trempe, architecte et consultant en science du bâtiment. Il fait également partie des collaborateurs de la chaire de recherche Fayolle-Magil. Cette matrice permet de comparer les trois propositions retenues lors de la phase 1 : le panneau en ossature légère, le panneau en bois d'ingénierie et le panneau hybride.

Les définitions détaillées aux pages suivantes.*

Une version Excel évolutive est disponible.*

Critères	définition	Panneau ossature légère	Panneau bois d'ingénierie	Panneau hybride
A - Conception				
1. Conception DfMA	Capacité à être conçu pour la fabrication industrielle et un assemblage rapide et précis avec un minimum de ressources.			
2. Développement de détails simples et rapides d'exécution	Simplicité et répétabilité des détails constructifs pour un montage efficace en usine et sur chantier.			
3. Possibilité de déconstruction et de réutilisation (DfD)	Aptitude à démonter les panneaux en fin de vie pour réemploi ou recyclage des composants.			
4. Facilité d'accès et d'entretien	Accessibilité aux composants internes pour inspection, réparation ou remplacement.			
B - Environmental				
5. Volume de bois utilisé	Quantité totale de bois employée, influençant l'impact environnemental et la logistique.			
6. Matériaux biosourcés	Proportion de matériaux d'origine renouvelable, peu transformés et à faible impact environnemental.			
7. Accessibilité des matériaux	Disponibilité des matériaux et fiabilité des chaînes d'approvisionnement.			
8. Utilisation de matériaux faibles en COV	Usage limité ou nul de matériaux émettant des composés organiques volatils.			
9. Empreinte carbone minimisée (ACV)	Réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie.			
C - Performance à valeur ajoutée				
10. Ensoleillement et ventilation naturelle	Capacité à favoriser les apports solaires passifs et la ventilation naturelle.			
11. Résilience de l'enveloppe	Capacité à maintenir ses performances malgré des conditions climatiques changeantes.			
12. Continuité des barrières	Maintien de la continuité des couches fonctionnelles et compatibilité des matériaux.			
13. Système perspirant	Transfert contrôlé de vapeur d'eau sans accumulation d'humidité interne.			
Total Conception (60%)				
Total Environnemental (30%)				
Total Performance à valeur ajoutée (10%)				

Définition des indicateurs d'évaluation

A - Conception

1. Conception DfMA

Capacité du panneau à être conçu en fonction des contraintes et opportunités de la fabrication industrielle et de l'assemblage sur site. Ce critère évalue dans quelle mesure la conception permet une production optimisée, une standardisation des composants, et un assemblage rapide et précis avec un minimum de ressources.

Indicateurs d'évaluation :

- Nombre de pièces distinctes (simplicité de la structure)
- Standardisation des composantes (formats usuels, connecteurs récurrents)
- Modularité (répétitivité, interchangeabilité des éléments)
- Séquençage clair de montage et limiter les manipulations
- Compatibilité avec les outils de production numérique ou automatisée

2. Développement de détails simples et rapides d'exécution

Degré de simplicité, de répétabilité et de clarté des détails architecturaux et constructifs, en particulier aux points singuliers comme les coins, les ouvertures, les jonctions mur-toit et mur-plancher. Ce critère évalue la capacité des solutions techniques à être produites efficacement en usine et assemblées rapidement sur chantier, avec un risque minimal d'erreur ou de correction. Un système est jugé performant sur ce critère lorsqu'il permet une exécution rapide, sans interprétation, avec un minimum de main-d'œuvre spécialisée, tout en assurant les performances techniques requises.

Caractéristiques d'évaluation :

- Nombre de pièces nécessaires à chaque type de jonction : moins il y a d'éléments à assembler, plus le détail est optimisé
- Répétabilité des détails dans l'ensemble du projet ou d'un système modulaire : un bon système repose sur des principes standardisés applicables à différents cas
- Absence de coupes complexes ou d'ajustements manuels en chantier (ex. angles non standards, éléments non pré-percés)
- Précision de la documentation technique : présence de guides ou gabarits de pose clairs et complets
- Séquence d'assemblage logique et intuitive : réduction du temps de formation requis pour les poseurs
- Intégration des fonctions multiples dans un même détail (ex. étanchéité à l'eau, à l'air, appui structurel et continuité thermique assurés simultanément)
- Retour d'expérience : évaluation basée sur des essais ou des montages réels en usine ou en chantier (prototype, maquette, mur témoin)

3. Possibilité de déconstruction et de réutilisation des matériaux (économie circulaire) DfD

Capacité du panneau à être démonté en fin de vie ou lors d'un réaménagement, sans endommager de manière significative ses composants, permettant leur réemploi, leur recyclage ou leur valorisation. Ce critère favorise une conception réversible, compatible avec les principes d'économie circulaire, visant à prolonger la durée de vie des matériaux et à réduire les déchets de démolition. Un panneau est jugé favorable à l'économie circulaire s'il est conçu pour être démonté sans perte majeure de matière, si ses composants sont compatibles avec une boucle de réemploi, et si leur séparation est techniquement et économiquement réalisable.

Caractéristiques d'évaluation :

- Présence d'assemblages mécaniques démontables (ex. vis, boulons, chevilles bois) plutôt que collages permanents ou fixations destructives (clous, agrafes, colles synthétiques) ou encore adhésion permanente d'isolants (ex : polyurethane)
- Utilisation de matériaux monocomposants ou aisément séparables (éviter les stratifiés ou composites difficiles à démanteler)
- Capacité à trier les composants par flux homogène (bois massif, isolant, membrane, parement)
- Compatibilité des matériaux avec un second usage (ex. bois non traité chimiquement, isolant réutilisable sans dégradation)
- Documentation claire sur la déconstruction (plans de démontage, identification des fixations, marquage des éléments)
- Retours d'expérience ou simulations sur la réutilisation possible des composants (analyse en coût de cycle de vie ou essais de réemploi)

4. Facilité d'accès et d'entretien

Degré d'accessibilité aux composantes internes ou techniques du panneau (membranes, isolants, pare-air, câblage, ancrages, composantes mécaniques ou modulaires) pour des inspections, réparations ou remplacements futurs. Ce critère vise à minimiser les interventions destructives et à faciliter la maintenance préventive tout au long du cycle de vie du bâtiment. Un panneau est jugé accessible lorsqu'il permet des interventions ciblées sans avoir à démolir ni compromettre la performance globale, et lorsqu'il favorise une gestion durable du bâtiment en permettant des inspections ou remplacements simples.

Caractéristiques d'évaluation :

- Présence de points d'accès ou de zones démontables sans détérioration des éléments adjacents
- Assemblages permettant l'ouverture partielle du panneau (vis, capots, modules amovibles)
- Séparation claire des fonctions (ex. : couche pare-air accessible sans devoir retirer toute l'isolation)
- Compatibilité des composants avec une maintenance ponctuelle (produits réparables, éléments remplaçables individuellement)
- Documentation fournie sur l'entretien ou les inspections à prévoir
- Absence de couches multiples collées ou scellées de manière permanente, rendant l'intervention difficile ou impossible

B - Environmental

5. Volume de bois utilisé

Quantité totale de bois nécessaire à la fabrication du panneau, incluant la structure porteuse, les éléments de contreventement, les panneaux secondaires et les renforts. Ce critère reflète l'efficacité matérielle du système constructif, ayant des impacts directs sur l'empreinte environnementale (ressources forestières, ACV), ainsi que sur la logistique de transport (poids) et la facilité d'assemblage sur chantier. Un volume réduit de bois, s'il n'affecte pas les performances structurelles ou l'étanchéité, est préférable dans une logique de conception optimisée, de réduction des coûts, et de préservation des ressources.

Indicateurs d'évaluation :

- Masse volumique totale du panneau (kg/m^2) : plus la masse est élevée, plus les implications en transport et manutention sont contraignantes.
- Taux d'optimisation du bois : proportion de bois utilisé de manière structurellement active par rapport au volume total (ex. : éviter les surépaisseurs, doublons, ou contreventements surdimensionnés).
- Facilité de manutention manuelle ou mécanisée : capacité à soulever ou assembler les panneaux.

6. Matériaux biosourcés

Proportion et nature des matériaux d'origine biologique renouvelable intégrés dans le panneau, incluant les isolants, panneaux de parement, contreplaqués, membranes et revêtements. Ce critère permet d'évaluer la part de matériaux issus de ressources renouvelables à faible impact environnemental, en portant une attention particulière à leur transformation, leur traçabilité et leur degré de pureté écologique. Plus la composition du panneau favorise des matériaux bruts ou faiblement transformés, locaux, certifiés et sans additifs fossiles ou synthétiques, plus la performance biosourcée est élevée.

Caractéristiques d'évaluation :

- Pourcentage en masse et en volume des matériaux biosourcés présents dans le panneau
- Origine géographique des matériaux : priorité à l'approvisionnement local ou régional pour réduire les impacts liés au transport
- Présence de certifications ou écolabels reconnus
- Teneur en colles synthétiques, plastiques ou additifs pétrochimiques dans les produits composites (ex. : OSB, contreplaqué, panneaux isolants biosourcés agglomérés)
- Degré de traitement industriel : matériaux bruts ou faiblement transformés favorisés
- Recyclabilité ou compostabilité en fin de vie

7. Accessibilité des matériaux

Facilité à se procurer les matériaux composant le panneau, en tenant compte de leur disponibilité locale ou régionale, de la stabilité des chaînes d'approvisionnement, de leur usage courant dans l'industrie, des volumes disponibles et du temps d'attente requis. Ce critère vise à limiter les risques liés aux pénuries, aux délais prolongés et à la dépendance aux importations. Un matériau est jugé plus accessible lorsqu'il est disponible à proximité, en grande quantité, dans des délais raisonnables, avec peu de dépendance externe, et lorsqu'il est déjà intégré dans les pratiques industrielles locales.

Caractéristiques d'évaluation :

- Provenance des matériaux : disponibilité sur le marché québécois, canadien ou nord-américain
- Présence actuelle dans les filières de construction ou de préfabrication (usage courant, infrastructures existantes pour leur transformation ou distribution)
- Volumes de production disponibles à l'échelle industrielle : présence de fournisseurs en mesure de livrer des quantités constantes et suffisantes
- Délai moyen d'approvisionnement : temps requis entre la commande et la livraison en usine
- Stabilité de la chaîne d'approvisionnement : exposition aux aléas géopolitiques, à la saisonnalité ou à des fluctuations de marché
- Compatibilité avec les standards du secteur : formats, normes techniques, certifications disponibles localement

8. Utilisation de matériaux faibles en COV

Présence ou absence de composés organiques volatils (COV) émis par les composants du panneau, incluant les panneaux de structure ou de parement, les isolants, les liants, les adhésifs et les finitions. Ce critère vise à assurer une qualité de l'air intérieur saine dans les bâtiments, tout en réduisant l'exposition des travailleurs et des usagers à des substances nocives. Un panneau est jugé performant sur ce critère lorsque les matériaux utilisés présentent une très faible émissivité ou sont certifiés sans COV, assurant un environnement intérieur sain et conforme aux meilleures pratiques en santé environnementale.

Caractéristiques d'évaluation :

- Teneur en COV selon des certifications reconnues (EC1, A+, GREENGUARD, Blue Angel, etc.)
- Étiquetage environnemental ou fiche technique indiquant les émissions (en $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ou $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$) selon des normes (ISO 16000, EN 16516)
- Usage de produits sans colle ou à liants naturels (chaux, plâtre, liants végétaux, assemblages mécaniques)
- Quantité totale de matériaux émissifs présents dans le panneau (surface ou masse)
- Durée d'émission estimée dans le temps (émissions faibles ou nulles à long terme)

9. Empreinte carbone minimisée (ACV)

Niveau d'impact carbone généré par le panneau tout au long de son cycle de vie, incluant l'extraction des matières premières, la fabrication, le transport, l'installation, l'usage et la fin de vie. Ce critère évalue la capacité du système constructif à limiter ses émissions de gaz à effet de serre, en privilégiant des matériaux à faible intensité carbone, un processus de fabrication économe en énergie, et une conception favorisant la durabilité et la réutilisation. Un panneau est jugé performant lorsqu'il réduit significativement son empreinte carbone par rapport aux solutions conventionnelles, tout en intégrant une logique de stockage du carbone biogénique.

Caractéristiques d'évaluation :

- Données issues d'analyses de cycle de vie (ACV) ou de déclarations environnementales de produit (DEP/EPD).
- Quantité de carbone biogénique stocké dans le panneau ($\text{kg CO}_2\text{e}$ stocké/ m^2).
- Intensité carbone des matériaux utilisés ($\text{kg CO}_2\text{e}/\text{m}^2$ ou par unité fonctionnelle).
- Efficacité énergétique du processus de fabrication (sources d'énergie renouvelable, consommation spécifique).
- Durée de vie utile estimée et capacité de prolonger l'usage (réemploi, réutilisation, démontage).
- Comparaison avec des systèmes de référence (béton, acier, autres panneaux).

C - Performance à valeur ajoutée

10. Ensoleillement et ventilation naturelle

Capacité du panneau, par sa conception, ses dimensions, ses percements ou ses propriétés matérielles, à favoriser les gains solaires passifs et la ventilation naturelle d'un bâtiment. Ce critère vise à valoriser les systèmes qui contribuent à réduire les besoins mécaniques en chauffage, éclairage et ventilation, en soutenant une stratégie bioclimatique intégrée. Un panneau est jugé favorable à ce critère lorsqu'il permet ou amplifie les bénéfices d'une conception passive en tirant parti des apports solaires, de l'aération naturelle et de la régulation hygrométrique.

Caractéristiques d'évaluation :

- Intégration d'ouvertures ou de réservations compatibles avec un bon contrôle solaire
- Compatibilité avec l'implantation d'ouvrants permettant une ventilation traversante ou verticale
- Matériaux favorisant la diffusion ou l'accumulation de chaleur
- Contribution à la continuité des flux d'air entre l'intérieur et l'extérieur (absence d'obstacles internes majeurs ou compartimentage excessif)
- Utilisation de matériaux respirants ou perspirants permettant une régulation passive de l'humidité intérieure
- Documentation ou simulation indiquant l'effet du panneau sur le confort thermique et la qualité de l'air en configuration passive

11. Résilience de l'enveloppe aux conditions climatique, en surpassant les normes minimales actuelles

Capacité du panneau à maintenir ses performances dans le temps malgré une exposition répétée ou prolongée à des conditions climatiques sévères, telles que les cycles de gel/dégel, l'humidité élevée, l'ensoleillement, les fortes chaleurs, les pluies battantes ou les vents extrêmes. Ce critère valorise la durabilité réelle au-delà des seuils normatifs, particulièrement en contexte nordique. Un panneau est jugé résilient s'il conserve ses propriétés essentielles malgré une exposition répétée à des conditions extrêmes, sans nécessiter d'entretien excessif ni remplacement prématuré.

Caractéristiques d'évaluation :

- Résistance à l'humidité prolongée : capacité des matériaux à rester performants après des tests de saturation ou de condensation
- Résistance aux cycles de gel/dégel : évaluation selon des protocoles de vieillissement accéléré (ASTM C666, ISO 15148 ou équivalents)
- Préservation des performances isolantes dans le temps, malgré les fluctuations d'humidité ou de température (valeurs R après vieillissement)
- Absence ou faible taux de dégradation biologique
- Présence d'essais techniques validés ou de certifications
- Comportement aux UV

12. Continuité des barrières en tous points avec matériaux compatibles

Qualité de la mise en œuvre des différentes barrières fonctionnelles du panneau (pare-air, pare-vapeur, pare-pluie, étanchéité à l'eau) en assurant leur continuité sur toute la surface, y compris aux jonctions, percements et interfaces avec d'autres composants. Ce critère prend également en compte la compatibilité chimique et physique des matériaux employés, afin d'éviter les dégradations prématurées ou les ruptures de performance. Un panneau est jugé performant lorsqu'il garantit une continuité fonctionnelle sans faiblesse sur l'ensemble de son périmètre, et qu'il utilise des matériaux qui interagissent de manière stable et durable dans le temps.

Caractéristiques d'évaluation :

- Absence de discontinuités dans les couches fonctionnelles (superposition correcte des membranes, chevauchements, raccords étanches aux ouvertures et points singuliers)
- Utilisation de matériaux compatibles entre eux (adhérences entre membranes et supports, absence de réaction chimique ou d'incompatibilité de dilatation)
- Accessibilité ou visibilité partielle des points sensibles pour inspection ou maintenance
- Documentation claire des principes de continuité aux jonctions entre panneaux (plans de détail, nomenclature des matériaux, méthode d'assemblage)

13. Système perspirant

Capacité du panneau à permettre un transfert contrôlé de vapeur d'eau à travers ses couches, sans accumulation d'humidité interne, tout en maintenant une étanchéité à l'eau liquide. Ce critère repose sur le principe du mur ouvert à la diffusion, favorisant un séchage naturel des parois vers l'extérieur ou vers l'intérieur selon les saisons, sans compromettre les performances thermiques ou l'intégrité des matériaux. Un panneau est jugé performant lorsqu'il permet un équilibre entre protection contre les intempéries et régulation hygrométrique interne, assurant durabilité, salubrité et confort sans recourir à des matériaux étanches au transfert de vapeur.

Caractéristiques d'évaluation :

- Présence de matériaux perméables à la vapeur d'eau
- Utilisation d'un pare-vapeur hygrovariable côté intérieur (ex. membrane intelligente) et d'un pare-pluie hautement perméable côté extérieur
- Ordre des couches respectant un gradient de perméabilité croissant de l'intérieur vers l'extérieur (pour un séchage vers l'extérieur)
- Simulations hygrothermiques ou validation par calculs (ex. norme ISO 13788) montrant l'absence de condensation interstitielle
- Composants testés et reconnus dans des systèmes de murs perspirants (produits certifiés ou expérimentés en climat froid)

Comment utiliser la matrice

Pondération de la matrice

Chaque critère a un poids relatif qui reflète son importance dans l'évaluation globale.

- Les poids sont attribués par section (Conception, Environnement, Performance à valeur ajoutée), puis répartis entre les critères.
- Les critères les plus déterminants pour la durabilité, la faisabilité industrielle et l'impact environnemental reçoivent un poids plus élevé.
- Chaque panneau reçoit une note de 1 à 5 par critère.
- La note est multipliée par le poids attribué au critère.
- Le score total est la somme pondérée des critères.

A – Conception (60 % du total)

- Conception DfMA : 30 %
- Développement de détails simples et rapides d'exécution : 10 %
- Déconstruction et réutilisation (DfD) : 10 %
- Facilité d'accès et d'entretien : 10 %

B – Environnement (30 % du total)

- Volume de bois utilisé : 10 %
- Matériaux biosourcés : 5 %
- Accessibilité des matériaux : 5 %
- Faibles émissions de COV : 5 %
- Empreinte carbone (ACV) : 5 %

C – Performance à valeur ajoutée (10 % du total)

- Ensoleillement et ventilation naturelle : 4 %
- Résilience climatique : 2 %
- Continuité des barrières : 2 %
- Système perspirant : 2 %

Attribuer une note sur l'échelle 1 à 5

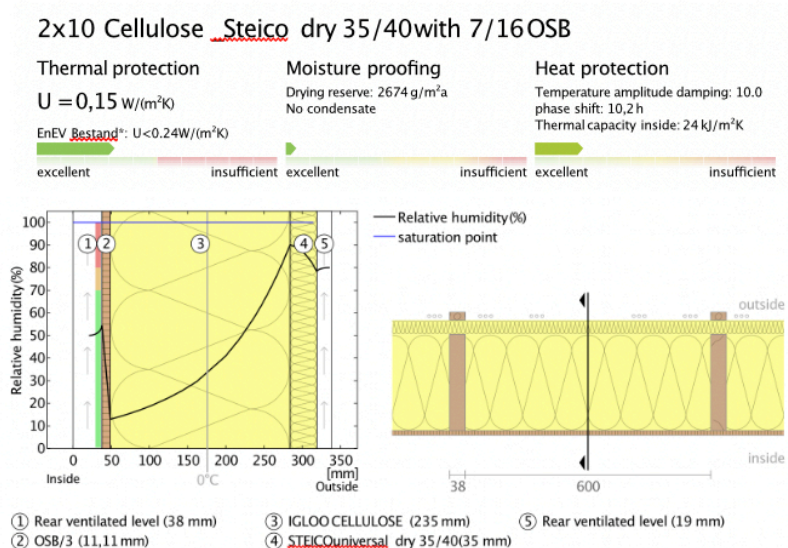
- 4-5 : le panneau répond fortement à l'ensemble des critères – meilleure option globale.
- 3 : compromis, certains critères bien remplis mais d'autres faibles.
- 1-2 : option peu adaptée ou risquée à long terme.

Interprétation et flexibilité

- Le système n'est pas figé : les pondérations peuvent être ajustées selon vos priorités de projet (ex. augmenter le poids de l'ACV pour un projet centré sur l'empreinte carbone, ou du DfMA pour un projet axé sur l'efficacité industrielle).
- Vous pouvez définir un seuil minimal pour certains critères éliminatoires (ex. COV, résilience climatique), même si le score global est bon.

Évaluation de 3 systèmes de panneaux

Panneau en ossature légère



Paradigm

Paradigm Building Solutions Ltd. est une entreprise basée en Colombie-Britannique (Canada). Elle conçoit des solutions de construction durable à travers des panneaux muraux préfabriqués en bois, fabriqués en usine (off-site) pour optimiser la précision, réduire les coûts de main-d'œuvre, le gaspillage et les délais. Leur approche intègre des technologies avancées telles que la robotique, l'automatisation de la production et les principes de l'industrie 4.0.

Panneau fermé (Closed Wall Panel System)

Les panneaux muraux fermés de Paradigm sont des éléments muraux préfabriqués complets, intégrant isolation, parements, revêtement extérieur et fenêtres.

- **Placoplâtre (Drywall)** – couche intérieure finition prête à recevoir.
- **Couche de service** – intégrant les réseaux (électricité, plomberie, etc.).
- **OSB** – panneau de contreventement assurant la rigidité structurale.
- **Ossature bois 2×10 avec isolation** – structure porteuse en ossature légère, isolée.
- **Panneau en fibres de bois (hardwood fibre board)** – isolation complémentaire naturelle.
- **Lame arrière ventilée** – pour assurer la respiration du mur et évacuer l'humidité.
- **Revêtement extérieur (siding)** – finition extérieure et protection climatique

Évaluation dans la matrice

A – Conception (60 %)

Conception DfMA (30 %) – 5/5

Le système est fabriqué entièrement en usine, avec un haut niveau d'automatisation et de précision robotisée. La production est optimisée, les déchets réduits et l'assemblage sur site simplifié.

Détails simples et rapides d'exécution (10 %) – 5/5

Les couches sont intégrées dès l'usine : structure, isolation, parement, fenêtres et finition. Cette préparation limite les ajustements en chantier et accélère la pose.

Déconstruction / réemploi (10 %) – 3/5

La structure bois et la fibre dense sont biosourcées. Toutefois, le panneau fermé reste difficile à démonter. Aucun principe clair de réversibilité n'est indiqué.

Accès et entretien (10 %) – 3/5

Une fois installé, le panneau ne permet pas d'accéder aux couches internes. L'entretien se limite au parement extérieur. La robustesse compense en partie cette limite.

B – Environnement (30 %)

Volume de bois utilisé (10 %) – 3/5

La structure à ossature légère combine bois, fibre et cellulose. L'usage de biomasse est notable, mais inférieur au CLT massif.

Matériaux biosourcés (5 %) – 5/5

Le panneau utilise du bois, de la cellulose recyclée et de la fibre de bois. Aucun plastique. La part biosourcée est très élevée.

Accessibilité des matériaux (5 %) – 4/5

Les composants sont fabriqués au Canada, en Colombie-Britannique. La cellulose est disponible en volume et bien distribuée. L'accessibilité reste toutefois dépendante de la région.

Matériaux faibles en COV (5 %) – 4/5

Les matériaux sont naturels et peu transformés, donc faiblement émissifs. Aucune certification explicite n'est mentionnée, mais la performance est jugée très bonne.

Empreinte carbone (ACV) (5 %) – 5/5

Le système est carbone-négatif. La cellulose recyclée stocke du carbone, tout comme la structure bois. L'énergie nécessaire en phase d'opération est très faible.

C – Performance à valeur ajoutée (10 %)

Ensoleillement et ventilation naturelle (4 %) – 3/5

Les panneaux permettent l'intégration de fenêtres performantes. La ventilation dépend cependant du design global du bâtiment.

Résilience climatique (2 %) – 5/5

L'isolation est épaisse, perspirante et résistante à l'humidité. Le panneau offre une excellente stabilité face aux variations climatiques.

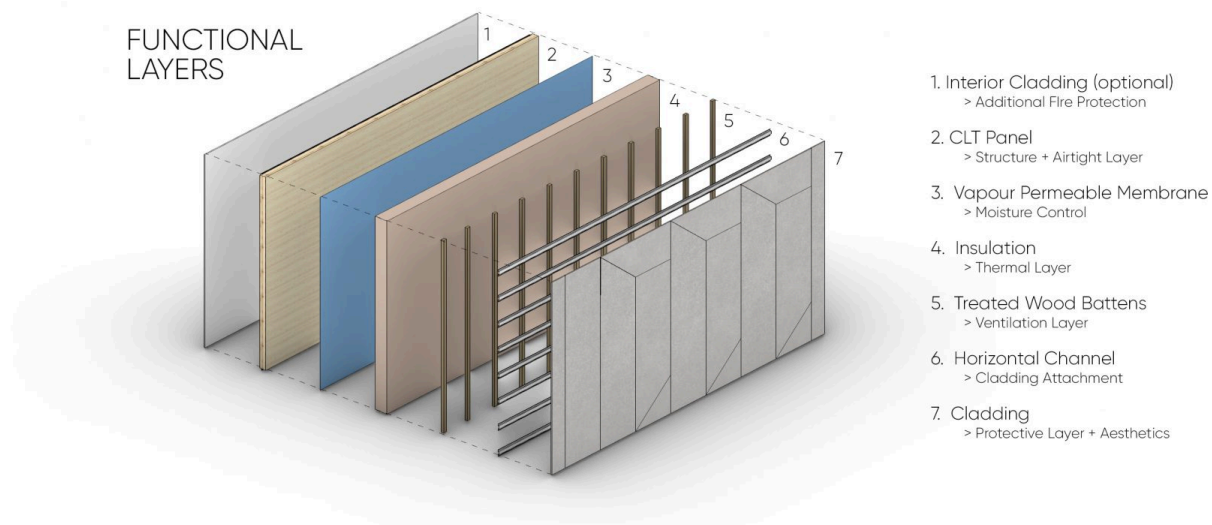
Continuité des barrières (2 %) – 5/5

La préfabrication en usine garantit la continuité des membranes et de l'isolation. La protection contre l'air, l'eau et la vapeur est très fiable.

Système perspirant (2 %) – 5/5

Les matériaux sont respirants. Le transfert d'humidité est contrôlé, limitant les risques de moisissure. Le panneau correspond à un bon système perspirant adapté au climat froid.

Panneau en bois d'ingénierie



Element5

Element5 est un fabricant nord-américain de bois massif, spécialisé dans la conception, la fabrication et l'assemblage de structures en bois. La société est reconnue pour ses produits en bois d'ingénierie — notamment le CLT, le GLulam, le nanoCLT et les CLIPs — ainsi que pour son approche intégrée comme solution clé en main.

CLIPs (Cross-Laminated Insulated Panels)

CLIPs constitue une solution complète et préfabriquée pour l'enveloppe du bâtiment, basée sur des panneaux CLT.

- **Bardage intérieur (optionnel)** + protection additionnelle
- **CLT + couche d'étanchéité à l'air** — structure portante
- **Membrane perméable à la vapeur** — gestion de l'humidité
- **Isolant thermique** (ex. fibre de bois ou EPS ; parfois laine minérale)
- **Lattes de bois traitées** — créent une lame d'air / ventilation
- **Lattes horizontales** — fixation du revêtement extérieur
- **Revêtement extérieur** — élément esthétique et protecteur

Évaluation dans la matrice

A – Conception (60 %)

Conception DfMA (30 %) – Note : 4/5

Les CLIPs sont conçus sur mesure, standardisés en usine et compatibles avec l'automatisation (dimensions optimisées pour le transport, intégration de fenêtres/portes possible). L'assemblage sur chantier est rapide, mais la variété des finitions personnalisées peut réduire légèrement la standardisation.

Développement de détails simples et rapides d'exécution (10 %) – Note : 4/5

Les couches sont intégrées (étanchéité, isolation, ventilation, parement). La préfabrication réduit les erreurs de chantier, mais les jonctions avec d'autres systèmes hybrides (acier, béton) peuvent nécessiter des ajustements.

Possibilité de déconstruction et de réutilisation (10 %) – Note : 2/5

Le CLT peut être démonté, mais l'intégration des isolants (EPS ou fibre minérale) et parements collés/laminés limite la réversibilité. Une meilleure performance avec fibre de bois isolante, mais l'usage courant d'adhésifs réduit la démontabilité.

Facilité d'accès et d'entretien (10 %) – Note : 2/5

Panneaux fermés : difficile d'accéder aux couches internes une fois installés. L'entretien se limite au parement extérieur. Pas conçu pour des interventions internes rapides.

B – Environnement (30 %)

Volume de bois utilisé (10 %) – Note : 3/5

Le CLT nécessite beaucoup de bois massif par panneau, donc forte intensité matérielle. Bon pour la durabilité structurelle, mais lourd et moins optimisé que l'ossature légère.

Matériaux biosourcés (5 %) – Note : 4/5

Structure 100 % bois massif, avec options de fibre de bois pour l'isolation. Toutefois, présence possible de polystyrène ou laine minérale (non biosourcés).

Accessibilité des matériaux (5 %) – Note : 3/5

Le CLT est produit en Amérique du Nord (Element5 Ontario), mais les volumes restent plus limités qu'OSSB/ossature légère. Certains isolants biosourcés peuvent être moins accessibles localement.

Utilisation de matériaux faibles en COV (5 %) – Note : 4/5

CLT a peu d'émissions (colles modernes généralement conformes aux normes). Les isolants fibre de bois et laine minérale sont bas en COV, mais EPS reste un bémol.

Empreinte carbone minimisée (ACV) (5 %) – Note : 4/5

Le bois stocke du carbone, mais la quantité massive de CLT augmente l'impact en production et transport. Bonne performance comparée au béton/acier, mais inférieure à ossature légère avec moins de bois par m².

C – Performance à valeur ajoutée (10 %)

Ensoleillement et ventilation naturelle (4 %) – Note : 3/5

Compatible avec intégration de fenêtres/portes en usine, mais dépend entièrement de la conception architecturale du projet.

Résilience climatique (2 %) – Note : 4/5

Bonne stabilité du CLT, membranes et isolants protégés. Adapté aux grands bâtiments nord-américains, testé pour climats variés.

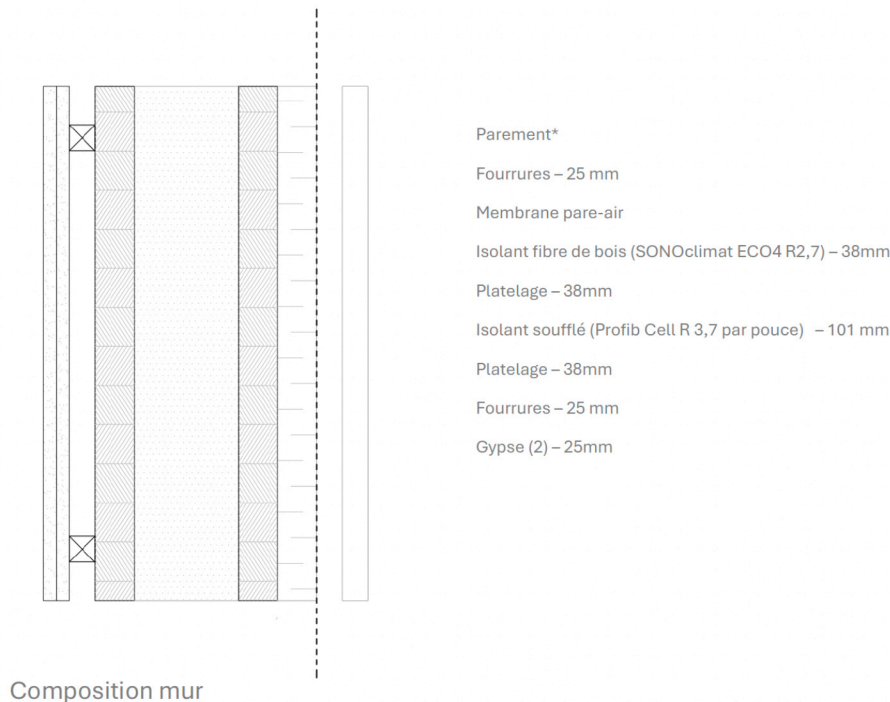
Continuité des barrières (2 %) – Note : 4/5

Système multicouche intégré en usine → bonne continuité air/eau/vapeur. Risque seulement si assemblage mal coordonné avec d'autres systèmes sur chantier.

Système perspirant (2 %) – Note : 3/5

Possible avec isolation en fibre de bois + membranes perspirantes. Mais si EPS utilisé, la paroi devient moins ouverte à la diffusion.

Panneau hybride



Panneau A – Mur simple

Le panneau A – Mur simple est un système d'enveloppe préfabriqué en bois hybride, conçu par des Étudiants en Architecture de l'Université de Montréal dans le cadre de la recherche Lab Interfaces bois. Il s'inscrit dans une logique de production en usine, avec un assemblage stratifié de couches complémentaires visant à maximiser la performance environnementale, tout en restant compatible avec les méthodes de construction industrialisées.

Ce mur fermé met de l'avant une combinaison d'isolants biosourcés insérés dans une structure doublement contreventée avec deux platelages de bois, permettant une performance thermique évaluée à environ R-27 à R-30 selon l'épaisseur totale. La composition intègre également un pare-air, des fourrures de service, un parement extérieur en bois, ainsi qu'un parement intérieur en gypse double.

L'approche adoptée ici démontre une volonté claire d'intégrer les principes de DfMA (Design for Manufacture and Assembly) dans un système reproductible, adaptable et compatible avec les réalités de la construction hors site (off-site). Les couches sont organisées de manière séquentielle, optimisant la pose industrielle tout en permettant un certain degré de modularité. Toutefois, la présence de plusieurs couches peut complexifier la déconstruction, limitant la réversibilité du système à long terme.

Évaluation dans la matrice

A – Conception (60 %)

Conception DfMA (30 %) – 4/5

Panneau préfabriqué simple, couches claires et répétitives. Compatible avec production en usine et montage rapide. Moins industrialisé qu'un système CLT, mais bien adapté.

Détails simples et rapides d'exécution (10 %) – 4/5

Détails constructifs faciles à répéter. Isolants soufflés et panneaux de fibre posés en couches droites. Ajustements en chantier réduits, mais plusieurs couches à gérer.

Déconstruction et réemploi (10 %) – 3/5

Les isolants fibre et cellulose sont biosourcés et recyclables. Mais les couches multiples (gypse, platelage, membranes) limitent la réversibilité.

Accès et entretien (10 %) – 3/5

Une fois fermé, le mur ne permet pas d'accès interne. Seuls les parements peuvent être entretenus ou remplacés.

B – Environnement (30 %)

Volume de bois utilisé (10 %) – 3/5

Structure légère, mais présence de deux platelages de 38 mm chacun. Volume plus élevé qu'une ossature simple, mais inférieur au CLT massif.

Matériaux biosourcés (5 %) – 5/5

Isolation en fibre de bois (SONOclimat) et cellulose soufflée (Profib Cell). Parements en bois et gypse. Très fort taux biosourcé.

Accessibilité des matériaux (5 %) – 4/5

Produits courants au Québec. Fibre de bois et cellulose fabriquées localement. Bonne accessibilité, mais dépend de certains distributeurs spécialisés.

Matériaux faibles en COV (5 %) – 4/5

Gypse, fibre de bois et cellulose ont peu d'émissions. Les membranes et colles éventuelles peuvent ajouter un faible impact.

Empreinte carbone (ACV) (5 %) – 4/5

Cellulose recyclée et fibre de bois réduisent l'empreinte carbone. Volume de bois plus élevé qu'un panneau léger standard, mais toujours favorable.

C – Performance à valeur ajoutée (10 %)

Ensoleillement et ventilation naturelle (4 %) – 3/5

La composition murale n'intègre pas de stratégie bioclimatique particulière. Compatible avec ouvertures, mais dépend du projet architectural.

Résilience climatique (2 %) – 4/5

Isolation performante (épaisseur totale > R-20). Bonne résistance au froid et aux variations d'humidité.

Continuité des barrières (2 %) – 4/5

Membrane pare-air et couches superposées assurent une bonne continuité. Les multiples couches exigent toutefois une bonne coordination en usine.

Système perspirant (2 %) – 5/5

Isolants biosourcés ouverts à la diffusion. Séchage naturel possible vers l'extérieur. Mur bien adapté au climat froid et humide du Québec.

Résultats dans la matrice Excel

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
Section	Critère	(%)	Définition	ossature légère (1-5)	bois d'ingénierie (1-5)	hybride (1-5)	Score pondéré oss. légère	Score pondéré bois d'ing.	Score pondéré hybride
1	Conception	30	Capacité à être conçu pour la fabrication industrielle et un assemblage rapide et précis.	5	4	4	1,5	1,2	1,2
2	Conception	10	Simplicité et répétabilité des détails constructifs pour un montage efficace en usine et sur chantier.	5	4	4	0,5	0,4	0,4
3	Conception	10	Possibilité de déconstruction et de réutilisation (DfD)	3	2	3	0,3	0,2	0,3
4	Conception	10	Facilité d'accès et d'entretien	3	2	3	0,3	0,2	0,3
5	Conception	10	Accessibilité aux composants internes pour inspection, réparation ou remplacement.	3	2	3	0,3	0,2	0,3
6	Environnement	10	Quantité totale de bois employée, influençant l'impact environnemental et la logistique.	3	3	3	0,3	0,3	0,5
7	Environnement	5	Proportion de matériaux d'origine renouvelable, peu transformés et à faible impact environnemental.	5	4	5	0,25	0,15	0,15
8	Environnement	5	Disponibilité des matériaux et fiabilité des chaînes d'approvisionnement.	4	3	4	0,2	0,15	0,2
9	Environnement	5	Usage limité ou nul de matériaux émettant des composés organiques volatils.	4	4	4	0,2	0,2	0,2
10	Environnement	5	Réduction des émissions de gaz à effet de serre sur l'ensemble du cycle de vie.	5	4	4	0,25	0,2	0,2
11	Performance	4	Capacité à favoriser les apports solaires passifs et la ventilation naturelle.	3	3	3	0,12	0,12	0,12
12	Performance	5	Capacité à maintenir ses performances malgré des conditions climatiques changeantes.	5	4	4	0,1	0,08	0,08
13	Performance	2	Maintien de la continuité des couches fonctionnelles et compatibilité des matériaux.	5	4	4	0,1	0,06	0,06
14	Performance	2	Transfert contrôlé de vapeur d'eau sans accumulation d'humidité interne.	5	3	5	0,1	0,06	0,1
15			TOTAL				4,22	3,34	3,83
16									
17	Sous-totaux par section								
18	Conception (60%)						2,6	2	2,2
19	Environnement (30%)						1,2	1	1,25
20	Performance (10%)						0,42	0,34	0,38
21									
22	Total (100%)						4,22	3,34	3,83

Résumé comparatif des trois panneaux

L'évaluation révèle que le panneau en ossature légère (Paradigm) se distingue par sa forte industrialisation et sa performance hygrothermique, tandis que le panneau hybride (UdeM) se démarque par sa haute teneur en matériaux biosourcés et un bon équilibre global. Le panneau CLT (Element5 CLIPs) est robuste, stable et bien adapté aux grands projets, mais sa déconstruction et sa flexibilité environnementale sont plus limitées. Aucun système ne l'emporte totalement : le choix dépend des priorités spécifiques du projet.

Rôle de la matrice pour les futures évaluations

La matrice constitue un outil structurant et adaptable permettant de comparer de façon cohérente d'autres panneaux préfabriqués à venir. Elle pourra être ajustée selon les critères prioritaires (DfMA, ACV, déconstruction, etc.) et servir à intégrer des retours de terrain, tout en favorisant un dialogue interdisciplinaire dans une logique de conception intégrée.

Analyse du questionnaire

À la suite de l'évaluation des trois systèmes de panneaux préfabriqués à l'aide de la matrice multicritère, il devient pertinent d'élargir l'analyse à l'échelle de l'industrie. Le questionnaire réalisé par FPInnovations en 2019 auprès de fabricants et d'acteurs de la construction industrialisée au Canada offre un état de référence précieux sur les pratiques, les matériaux employés, les préférences de conception et les contraintes rencontrées en usine.

Bien que les technologies et les approches aient évolué depuis, les données issues de ce sondage demeurent structurantes pour comprendre les tendances dominantes de la préfabrication au Québec et en Amérique du Nord. Elles permettent notamment de situer les systèmes évalués dans un contexte sectoriel réel, d'identifier les écarts entre les pratiques souhaitées et les pratiques courantes, et de nourrir la réflexion sur les pistes d'innovation future, en particulier en ce qui concerne l'intégration de matériaux biosourcés et les formats adaptés à la robotisation.

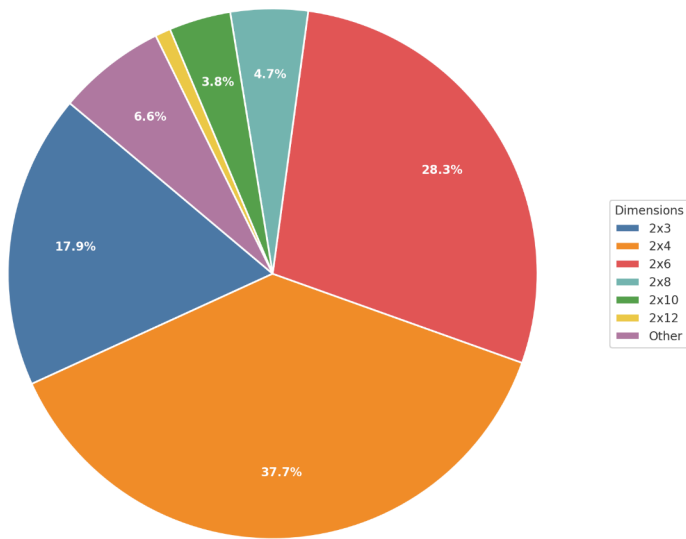
Cette analyse sert donc d'interface entre la comparaison technique des panneaux et une lecture plus large des dynamiques industrielles, appuyant ainsi les orientations proposées pour une préfabrication durable, évolutive et ancrée dans les réalités de production locales

Méthodologie employée

Le questionnaire a été diffusé à un échantillon représentatif d'acteurs de l'industrie, incluant fabricants de panneaux, constructeurs et fournisseurs de matériaux. Sa structure comprenait :

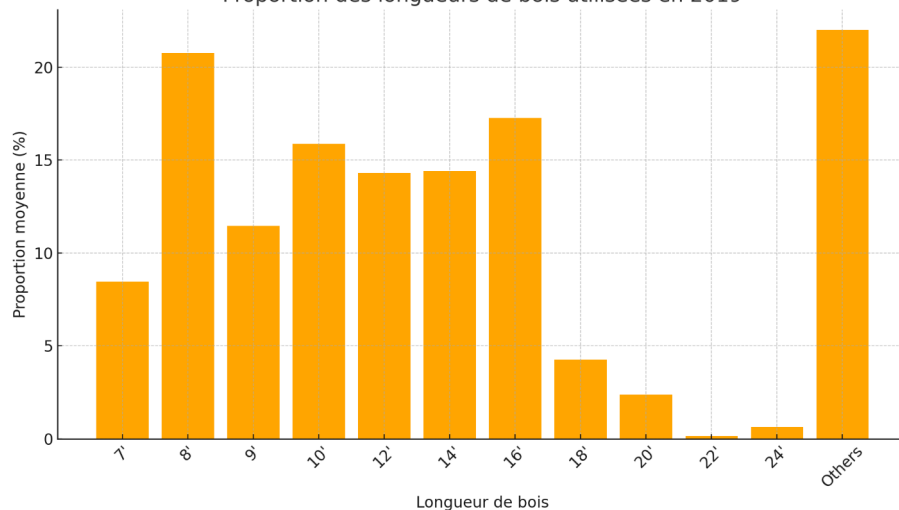
- Des questions fermées avec plages de valeurs (minimum, maximum, moyenne, médiane) pour quantifier la proportion de chaque type de matériau ou d'assemblage utilisé.
- Des questions à choix multiples et ouvertes pour identifier les matériaux et procédés que les répondants aimeraient voir davantage intégrés à leur production.
- Une segmentation par type d'assemblage et par composant structurel, facilitant la comparaison entre procédés traditionnels, hybrides et innovants.

Proportion des grandeurs de bois utilisées en 2019



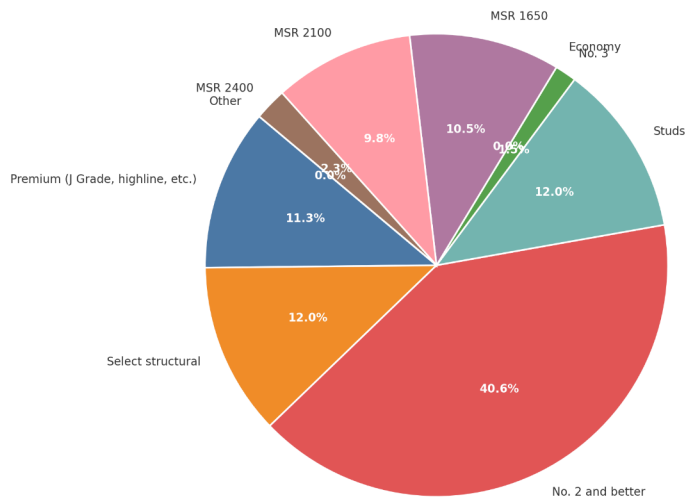
Le 2x4 et le 2x6 dominent largement, représentant les formats standards et les plus courants dans la construction. Cela reflète la normalisation de l'industrie nord-américaine, où ces matériaux sont faciles à approvisionner et bien adaptées aux normes actuelles. La standardisation simplifie la conception, l'automatisation et la logistique en usine.

Proportion des longueurs de bois utilisées en 2019



Les longueurs de 8' à 16' sont majoritaires, mais on remarque aussi une part importante de « others ». Les dimensions standards correspondent aux besoins d'assemblage de murs modulaires (faciles à couper et adapter). La catégorie « other » révèle probablement un besoin d'adaptabilité et de coupes personnalisées. La préfabrication bénéficie des longueurs standardisées pour limiter les pertes et faciliter la robotisation, mais les besoins hors-standard augmentent la complexité et génèrent des retailles.

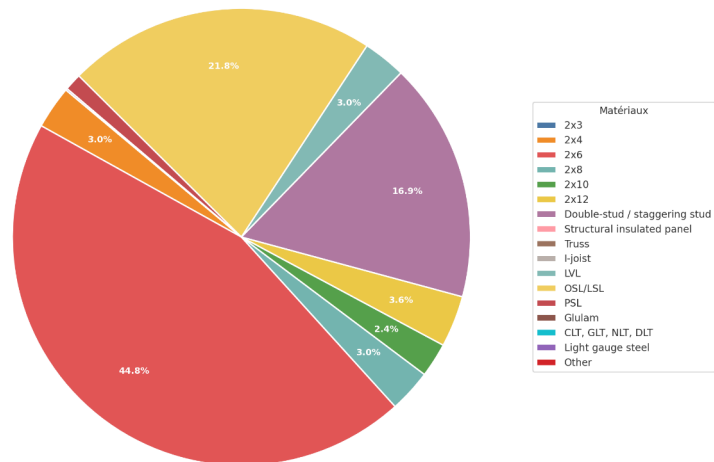
Proportion des grades de bois utilisés en 2019

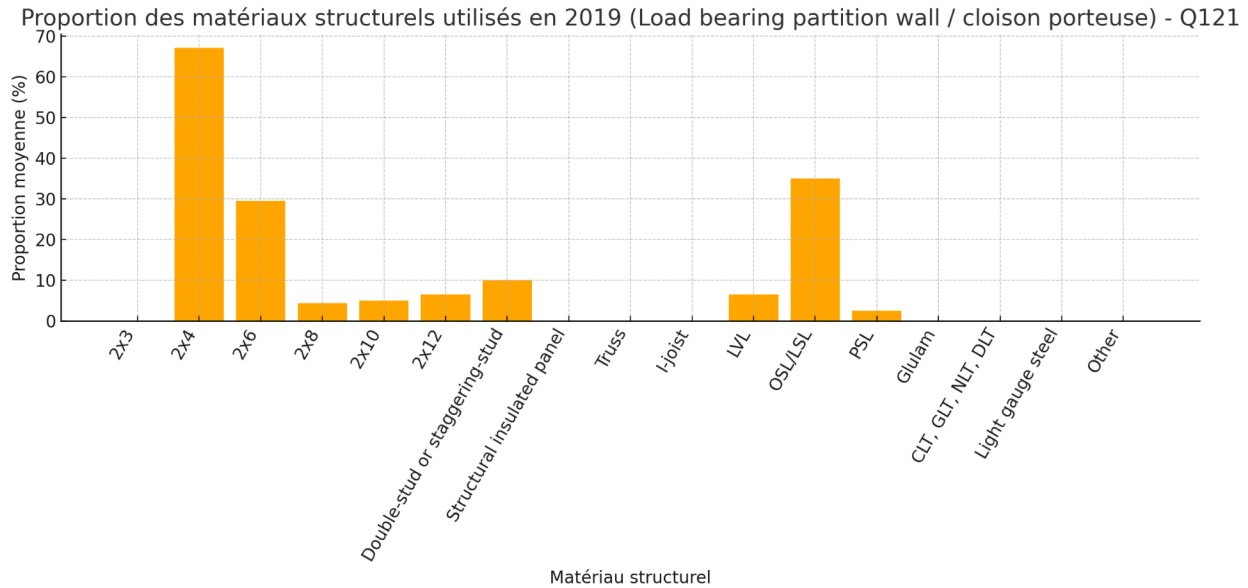


Le grade « No. 2 and better » domine fortement, suivi par des grades structuraux intermédiaires. L'industrie semble privilégiée un équilibre entre coût et performance, avec des pièces suffisantes pour la résistance sans viser les qualités supérieures coûteuses (premium, select structural). Les grades intermédiaires sont suffisants pour un usage courant en murs, et garantissent la disponibilité en volume. Les grades MSR indiquent déjà une tendance vers un bois plus contrôlé et fiable, utile pour la préfabrication robotisée.

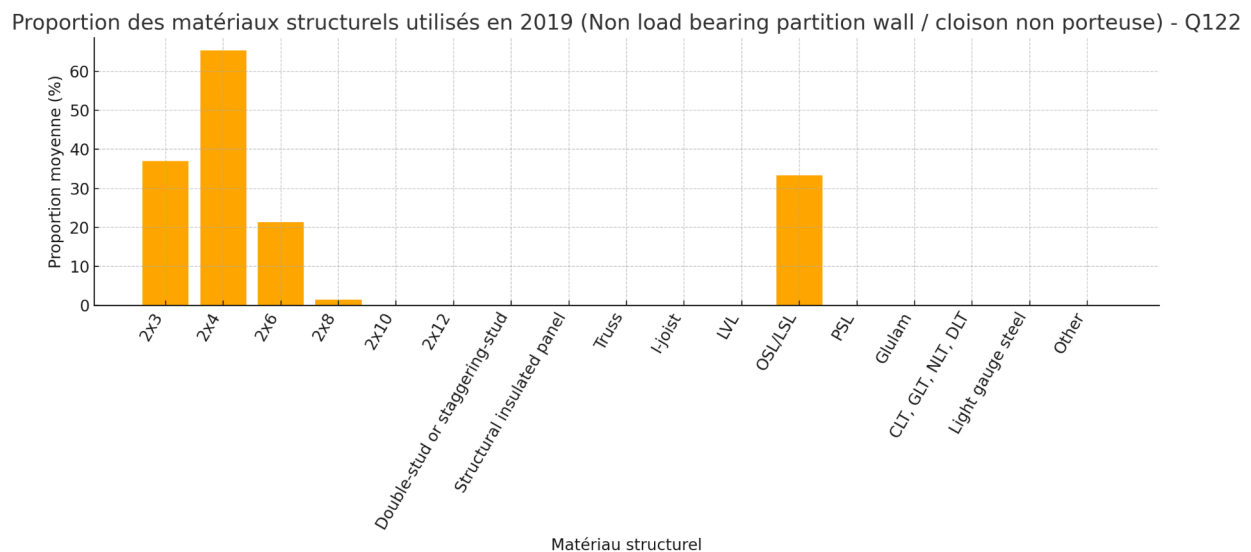
Proportion des matériaux structuraux utilisés en 2019 (mur extérieur) - Q120

Le 2x6 domine massivement, suivi par OSL/LSL (bois reconstitués) et des doubles montants. L'utilisation d'OSL/LSL illustre un recours aux bois d'ingénierie pour renforcer les zones stratégiques. La dominance du 2x6 simplifie la production en série. Les bois d'ingénierie augmentent la précision et la stabilité, bien adaptés à des panneaux fermés ou hybrides.



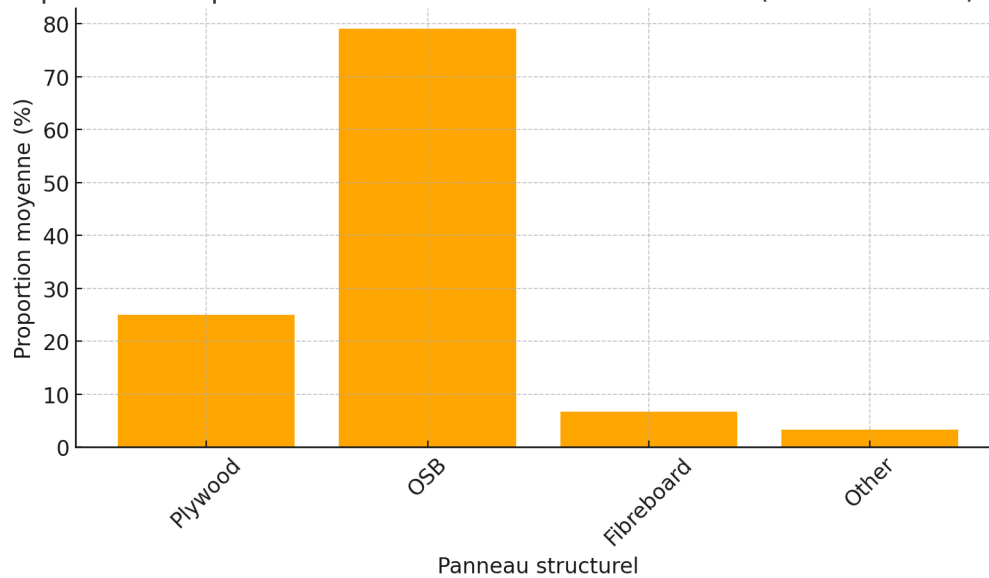


Le format 2x4 domine, suivie par le 2x6 et OSL/LSL. Les cloisons porteuses internes exigent moins de profondeur isolante que les murs extérieurs, d'où l'usage du 2x4. Cela permet une différenciation claire entre lignes de production pour les murs extérieurs et intérieurs, tout en restant dans des sections standardisées.



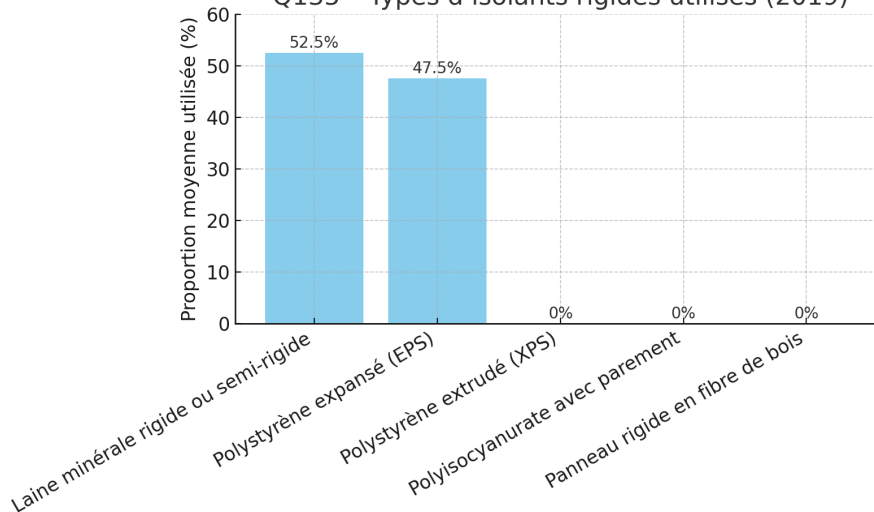
Le 2x4 reste dominant, suivi du 2x3 et de OSL/LSL. Dans les cloisons non porteuses, on réduit les grandeurs pour limiter les coûts et le poids. Ces systèmes légers facilitent la manipulation en usine et sur chantier.

Proportion des panneaux structurels utilisés en 2019 (mur extérieur) - Q125



L'OSB domine très nettement (près de 80 %), suivi par le contreplaqué. L'OSB est devenu la norme pour sa disponibilité, son prix bas et sa capacité à répondre aux besoins structuraux de base. Son homogénéité et son coût en font le choix idéal pour une industrialisation.

Q135 - Types d'isolants rigides utilisés (2019)



La laine minérale rigide et le polystyrène expansé EPS se partagent le marché, tandis que XPS, polyiso et fibre de bois sont absents. On privilégie des isolants éprouvés, disponibles et économiques. L'absence de panneaux en fibre de bois illustre leur faible pénétration en Amérique du Nord en 2019. La laine minérale et l'EPS sont faciles à intégrer dans les cavités et sur les parements, compatibles avec les procédés industrialisés. Le bois fibre, pourtant plus écologique, reste un marché émergent qui pourrait transformer les pratiques.

Lecture transversale

L'ensemble des graphiques montre une préférence marquée pour les sections standardisées (2x4, 2x6), les grades intermédiaires et les panneaux OSB. Ces choix reflètent une logique d'optimisation des coûts et de disponibilité, parfaitement cohérente avec la préfabrication qui exige régularité et standardisation. Cependant, l'intégration encore limitée de bois d'ingénierie et de matériaux biosourcés indique un potentiel d'évolution pour améliorer la performance et la durabilité des systèmes préfabriqués.

Bibliographie matériaux biosourcés

- 1 Drubali, G., Evangelisti, L., Guattari, C., Roncone, M., & Milone, D. (2023). Experimental Analysis of the Thermal Performance of Wood Fiber Insulating Panels. *Sustainability*, 15(3), 1963. <https://doi.org/10.3390/su15031963>
- 2 Gaujena, B., Agapovs, V., Borodinecs, A., & Strelets, K. (2020). Analysis of thermal parameters of hemp fiber insulation. *Energies*, 13(23), 6385. <https://doi.org/10.3390/en13236385>
- 3 Lavoie, P. (2010). *Analyse de la compétitivité et du positionnement des produits isolants faits à partir de fibres de bois en Amérique du Nord* (Rapport final 2009–2010, Projet No. 201000339). FPIInnovations.
- 4 Nature Fibres. (2024, avril). *Fiche technique : Profib Mat^{MD}, matelas d'isolation thermique en fibres de chanvre* [Fiche technique]. Nature Fibre. https://www.naturefibres.com/images/MAJsite_24042024/Fiche%20technique-Profib%20chanvre_avril2024.pdf
- 5 Nature Fibres. (2024, avril). *Fiche technique environnementale : Profib Mat, matelas d'isolation thermique en fibres de chanvre* [Fiche technique environnementale]. Nature Fibres. https://www.naturefibres.com/images/MAJsite_24042024/Fiche%20technique%20environ%20Profib_avril2024.pdf
- 6 Nature Fibres. (2024, avril). *Manuel d'installation NF-V07-20240327. Profib Mat : matelas d'isolation thermique en fibres de chanvre* [Guide d'installation]. Nature Fibres. https://www.naturefibres.com/images/MAJsite_24042024/Guide%20installation%20Profib%20Mat_avril2024%20-%20VF.pdf
- 7 Nature Fibres. (2024, juillet). *Manuel et guide d'installation : Isolant en fibre de bois cellulosique* [Guide d'installation]. Nature Fibres. https://www.naturefibres.com/images/MAJ%20AUG%202024/Profib_CELL_Manuel_et_Guide_installation_compressed.pdf
- 8 Nature Fibres. (2024, août). *Fiche technique : Profib Cell^{MD}, isolant cellulosique thermique et acoustique naturel* [Fiche technique]. Nature Fibres. https://www.naturefibres.com/images/MAJ%20AUG%202024/NF_Fiche%20Technique_Profib%20cell_FR.pdf
- 9 O'Brien, L., Li, L., Friess, W., Snow, J., Herzog, B., & O'Neill, S. (2025). Review of bio-based wood fiber insulation for building envelopes: Characteristics and performance assessment. *Energy and Buildings*, 328, 115114. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115114>
- 10 TimberHP. (2022, août). *TimberBatt : Product data sheet* (Rév.08-2022) [Fiche technique]. TimberHP. <https://www.timberhp.com/products/timberbatt>
- 11 TimberHP. (2023, août). *Product data sheet: TimberFill by TimberHP* [Fiche technique]. TimberHP. https://timber-hp-webuploads.s3.amazonaws.com/content/2023/09/06120911/TimberHP-Product-Cut-Sheets_23_0831_WEB_Fill.pdf
- 12 TimberHP. (2023, septembre). *Installation guide: General guidelines for TimberFill attic, wall, ceiling, and floor installations* [Guide d'installation]. TimberHP. https://timber-hp-webuploads.s3.amazonaws.com/content/2023/09/15153015/TimberFill-Install-Guide_23_0915.pdf
- 13 TimberHP. (2023, septembre). *TimberFill: Cavity insulation in stud walls and between rafters & joists* [Fiche technique]. TimberHP. https://timber-hp-webuploads.s3.amazonaws.com/content/2023/09/06122457/TimberFill-Install-Guide_23_0906.pdf
- 14 TimberHP. (2024, octobre). *TimberBatt installation guide* [Guide d'installation]. TimberHP. https://timber-hp-webuploads.s3.amazonaws.com/content/2024/10/31110725/TimberBatt-install-guide-24_1031.pdf
- 15 Veitmans, K., & Grinfelds, U. (2016). Wood fiber insulation material. *Research for Rural Development*, 2, 91–98. https://www2.llu.lv/research_conf/proceedings2016_vol_2/docs/LatviaResRuralDev_22nd_vol2-91-98.pdf
- 16 Imken, A. A. P., Plinke, B., & Mai, C. (2021). Characterisation of hardwood fibres used for wood fibre insulation boards. *European Journal of Wood and Wood Products*, 79(4), 915–924. <https://doi.org/10.1007/s00107-021-01698-y>
- 17 STEICO SE. (2022). *STEICOIntegral – Panneau isolant rigide pare-pluie en fibres de bois* [Fiche technique]. https://www.steico.com/fileadmin/user_upload/importer/downloads/4028b6097ab3ac1a017bbf3aac902cab/STEICOIntegral_FRA_fr_i.pdf

Bibliographie pratiques actuelles en usine

Cooper, D. [Dave Cooper LIVE]. (2020, 19 août). *Look inside Lindbäcks – Modular home factory using robotics and automation* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=V9BbcFICnLs>

NS Builders. (2022, 6 septembre). *@RenggliAG has an incredible pre-fab facility* [Vidéo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=hKf7kVyYpHk>

Orlowski, K. (2019). *Assessment of manufacturing processes for automated timber-based panelised prefabrication*. Buildings, 9(5), 125. <https://doi.org/10.3390/buildings9050125>

Randek AB. (2023). *ZeroLabor Robotic System* [Brochure technique]. Randek. <https://www.randek.com/images/pdf/Randek-ZeroLabor-Robotic-System.pdf>

Rankohi, S., Carbone, C., Iordanova, I., & Bourgault, M. (juillet 2022). Design-for- manufacturing and assembly (DfMA) for the construction industry : a review [Communication écrite]. Modular and Offsite Construction Summit, Edmonton, Canada. Publie dans Modular and Offsite Construction (MOC) Summit proceedings. <https://doi.org/10.29173/mocs255>

Soukup, J. [SOUKUP s.r.o.]. (2021, 27 septembre). *The PONTEC in Prefabrication of Wooden Buildings* [Vidéo]. YouTube. <https://youtu.be/NNoyS0ia39s>

WEINMANN. (2019). *Modular constructions in wood – the future way of building*. Dans WEINMANN Performance 2019 – Sweden (pp. 24–29). WEINMANN Holzbausystemtechnik GmbH. <https://www.homag.com/en/company/news/case-studies/detail/modular-constructions-in-wood-the-future-way-of-building>

WEINMANN Holzbausystemtechnik. (2019, 26 mai). *Prefabrication in timber construction at Terhalle Holzbau* [Vidéo]. YouTube. <https://youtu.be/9Nzp-is4hiY>

Bibliographie matrice et panneaux

Ossature légère :

Paradigm Building Solutions Ltd. (2022). *Closed Wall Panel Systems*. Récupéré le 28 août 2025, de <https://paradigmpanels.com/closed-wall/>

Paradigm Panels. (2022, 4 avril). *Paradigm Panels – Off-site manufacturing overview* [Vidéo]. Vimeo. <https://vimeo.com/695897294>

Paradigm Panels. (2021, 15 juillet). *Paradigm Panels – Closed wall panel assembly process* [Vidéo]. Vimeo. <https://vimeo.com/575540139>

Bois d'ingénierie :

Element5. (2025). *CLIPs (Cross-Laminated Insulated Panels)*. Récupéré le 28 août 2025, de <https://elementfive.co/products/clips/>

Element5. (2023, 9 septembre). *CLIPs* [Brochure en ligne]. Récupéré le 28 août 2025, de <https://issuu.com/elementfive/docs/e5-clips>

Hybride :

Kadiri, F., Sarikey, L., Khoury, N., & Hubert, W. (2025, 12 juin). *Système d'enveloppe du bâtiment préfabriqué en bois* [Présentation PowerPoint]. Université de Montréal.