

DÉVELOPPEMENT ET CARACTÉRISATION DE PANNEAUX RIGIDES D'ISOLATION À BASE DE COPRODUITS DU SCIAGE DE THUYA OCCIDENTALIS (CÈDRE BLANC DU NORD)

TOM MORTELMANS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023

CO-PROMOTEURS : TOM DE MIL (ULIÈGE) & PAPA NIOKHOR DIOUF (SEREX)

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

© Any reproduction of this document, by any means whatsoever, may only be made with the authorization of the author and the academic authority² of Gembloux Agro-Bio Tech.

This document is the sole responsibility of its author.

¹ L'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT (Tom De Mil)

² The academic authority is represented by the thesis supervisors, members of the GxABT teaching staff (Tom De Mil)

DÉVELOPPEMENT ET CARACTÉRISATION DE PANNEAUX RIGIDES D'ISOLATION À BASE DE COPRODUITS DU SCIAGE DE THUYA OCCIDENTALIS (CÈDRE BLANC DU NORD)

TOM MORTELMANS

**TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER BIOINGÉNIEUR EN CHIMIE ET BIOINDUSTRIES**

ANNÉE ACADÉMIQUE 2022-2023

CO-PROMOTEURS : TOM DE MIL (ULIÈGE) & PAPA NIOKHOR DIOUF (SEREX)

Remerciements

Ce travail est dédié aux fragments de polystyrènes échoués sur les plages.

Ce travail a été réalisé au sein du centre collégial de transfert technique le SEREX (Amqui, Canada) dans le cadre d'un projet de recherche pour l'entreprise Multicèdre (Esprit-Saint, Canada). La réalisation du mémoire a été permise par la bourse Erasmus.

Avant tout témoigner de la reconnaissance envers les parents pour m'avoir développé le cortex préfrontal et permis d'explorer là où la curiosité mène, sans eux rien n'est possible. Reconnaissance inépuisable pour les Boyzer's à qui je dois la réussite des sessions d'examens, sans leur présence ce système d'évaluation d'acquisition d'apprentissage délétère et aliénant m'aurait ankylosé vite et net. Je ne penserais pas ce que je ne pense ni n'agirais comme j'agis sans eux. En particulier de la reconnaissance en format heavy duty pour mi hermano, el Don Diego, fidèle partenaire, que dis-je, Muchacho avec qui tout a commencé et tout se termine. De l'amour et de la reconnaissance envers mes chères Aubergines au fil des années.

Merci à Pierre-Louis Bombeck pour avoir instillé l'idée de crisser l'camp au pays des originaux et m'avoir épaulé dans ce choix. Merci Tom De Mil de m'avoir pris sous son aile et mentoré tout du long, avec un réel support et d'avisés conseils. Merci Papa Niokhor Diouf pour l'accueil, la guidance et la vision scientifique pleine de sagesse. Merci Patrick de m'avoir reçu et encouragé avec autant d'entrain.

Parmi la chaleureuse équipe du SEREX, Stéphanie et Francis ont été d'une aide essentielle. Les coups de génie de Stéphanie ont grandement contribué à affiner l'analyse et stimuler l'innovation. Sans la patience de Francis on serait encore bloqué devant ce caliss de tambour rotatif comme des osti d'moté. Bien sûr je n'oublie pas les petites mains de Marie-ève qui s'ostinent encore avec mes échantillons alors que j'écris ces lignes.

Pour leur expertise propre dont j'ai bénéficié, je remercie Bruno, Tommy, Suzhou, Siefertou, Claire, Pierre, Franz, Mounir et Aziz. Pour leur rencontre inoubliable, Gérald et Marc. Pour nos sorties à la molle et nos réunions matinales pré-caféteria, Jenny et Barbara. Pour le délicieux sirop et l'accueil, Julie.

L'équipe de presbytère de la fabrique a rendu cet esseulement monastique des plus appréciable : Charles, Daniel, Mamadou et Virginie c'était un réel plaisir de vivre ensemble. Sans toutes ces rencontres le séjour au Québec n'aurait pas eu la même saveur.

Merci à Jacques Hébert pour sa relecture et son expertise forestière grandement appréciable. Merci à Hugues Frère pour les échanges enrichissants qui ont guidé mon analyse et la pertinence de ses commentaires. Merci à Giorgia Purcaro, Marie-Laure Fauconnier et Aurore Richel, trois professeures tout à fait inspirantes et dont les enseignements m'ont formé.

Résumé

Introduction. Le besoin de limiter le réchauffement climatique implique d'amoindrir la consommation énergétique des bâtiments tout en trouvant des matériaux de construction alternatifs davantage biosourcés. Le confort thermique face aux épisodes de chaleurs et de froideurs entraîne à isoler davantage l'enveloppe des bâtiments. Dans un mur conventionnel Québécois, l'isolant principal, souvent une laine ou un matelas flexible, apporte la majorité du pouvoir isolant. L'isolant secondaire, souvent un panneau rigide, permet notamment d'enlever les ponts thermiques. C'est sur ce dernier que se focalise ce travail. Le manque d'offre sur le marché Canadien des produits isolants dérivés du bois couplé au surplus de connexes dans l'industrie du bardeau de cèdre blanc du Nord (*Thuja occidentalis L.*) ont mené à l'élaboration d'une voie de revalorisation sous la forme de panneau rigide isolant.

Objectifs. L'élaboration d'un produit biosourcé, issu d'une exploitation durable et apte à remplacer un isolant conventionnel s'articule comme suit : une formulation de panneau d'isolation rigide composé de résidus de sciage est développée. Ensuite ses caractéristiques et performances sont évaluées au travers d'une batterie de tests propre à la norme Canadienne relative aux panneaux d'isolation en fibre de cellulose. Pour s'assurer que le produit maintienne sa durabilité à la suite de sa transformation des tests microbiologiques sont conduits. Une piste d'obtention de fibres à partir des résidus de sciage dans l'optique de faire un matelas flexible est poursuivie.

Méthodologie. Pour fixer les paramètres de la formulation (densité, épaisseur, taux d'encollage), des tests de performance thermique et de résistance mécanique sont conduits. La relation entre la conductivité thermique et la densité est construite et l'évaluation de l'impact de la transformation du résidu est explorée. Des essais de traction perpendiculaire à la surface permettent de sélectionner un taux d'adhésif. Ensuite des panneaux de grande dimension, auxquels de la paraffine est ajoutée, sont pressés. Les aspects suivants en sont évalués : performance hydrique (absorption d'eau et perméabilité de la vapeur), résistance mécanique (flexion statique, compression et cohésion interne), isolation acoustique et combustion superficielle. Les résultats sont comparés avec les exigences de la norme. Enfin, un panneau est intégré à une maquette pour être testée dans une chambre biclimatique. Pour évaluer la durabilité, un inoculum de moisissures est incubé et le développement des spores est qualifié visuellement. Concernant le défibrage, différents traitements et différents broyages sont tamisés puis des profils granulométriques sont établis.

Résultats. La conductivité thermique est linéairement proportionnelle à la densité, n'est pas impactée par les taux d'encollages évalués et diminue pour le matériau broyé. La résistance thermique est comparable aux isolants similaires usuels. La résistance à la compression est importante. La résistance en flexion statique s'avère partiellement adéquate. Le matériau résiste particulièrement peu à la traction perpendiculaire à la surface. La perméabilité de vapeur d'eau est faible et l'absorption d'eau est très importante. Le matériau est sujet à la combustion superficielle. Les traitements n'influencent pas la durabilité du matériau. Le défibrage par eau ambiante s'avère efficient à l'obtention de fibres.

Conclusion. Le matériau formulé est un réseau d'enchevêtrement de copeaux filiformes aplatis en couches. L'application d'adhésif et de paraffine est insuffisamment homogène et le matériau a tendance à délaminer lorsqu'il est contraint. L'ajout d'agent ignifuge et de davantage de paraffine s'avère nécessaire pour atteindre les exigences. Moyennant certaines améliorations des faiblesses de la formulation, l'élaboration d'un produit apte à être utilisé comme matériau de construction s'avère atteignable.

Mots-clés : panneau isolant, dérivés du bois, panneau rigide, isolation thermique

Abstract

Introduction. The need to limit global warming implies reducing the energy consumption of buildings while finding alternative, more bio-sourced construction materials. Thermal comfort in the face of hot and cold episodes calls for greater insulation of building envelopes. In a conventional Quebec wall, the primary insulation, often wool or flexible mat, provides most of the insulating power. The secondary insulation, often a rigid panel, removes thermal bridges. It's on the latter that this work focuses. The lack of supply on the Canadian market for wood-derived insulating products, coupled with the surplus of coproducts in the northern white cedar (*Thuja occidentalis L.*) shingle industry, led to the development of a recycling route in the form of rigid insulating board.

Objectives. The development of a biosourced, sustainably-sourced product able of replacing conventional insulation is structured as follows: a rigid insulation board formulation made from sawmill residues is developed. Its characteristics and performance are then assessed through a battery of tests specific to the Canadian standard for cellulose fiber insulation boards. To ensure that the product maintains its durability after processing, microbiological tests are carried out. A path for obtaining fibers from sawing residues with a view to making a flexible mattress is being pursued.

Methodology. To set formulation parameters (density, thickness, adhesive content), thermal performance and mechanical strength tests are carried out. The relationship between thermal conductivity and density is established, and the impact of residue transformation is assessed. Tensile tests perpendicular to the surface are used to select an adhesive content. Large panels, to which parafin is added, are then pressed. The following aspects are evaluated: water performance (water absorption and vapor permeability), mechanical strength (static bending, compression and internal cohesion), acoustic insulation and surface combustion. Results are then compared with standard requirements. Finally, a panel is integrated into a prototype to be tested in a bi climatic chamber. To assess durability, a mold inoculum is incubated and spore development is qualified visually. Regarding defibration, different treatments and grindings are sieved and granulometric profiles are constructed.

Results. Thermal conductivity is linearly proportional to density, unaffected by the adhesive content evaluated, and decreases for shredded material. Thermal resistance is comparable to that of similar insulating materials. Compressive strength is high. Static flexural strength is partially adequate. Tensile strength perpendicular to the surface is particularly low. Water vapor permeability is low, and water absorption is very high. The material is subject to surface combustion. Treatments have no effect on the material's durability. Ambient water defibration is efficient in obtaining fibers.

Conclusion. The formulated material is an entangled network of filiform shavings flattened into layers. The application of adhesive and parafin is insufficiently homogeneous, and the material tends to delaminate when stressed. The addition of flame retardant and more parafin will be necessary to meet requirements. With some improvements to the formulation's limitations, the development of a product suitable for use as a building material is within reach.

Keywords : insulation panel, wood coproduct, rigid panel, thermal insulation

Table des matières

Remerciements	iv
Résumé	v
Abstract	vi
Table des matières	vii
Liste des abréviations	ix
1. Contexte général – État de l’art.....	10
1. Introduction.....	10
1. L’isolation thermique.....	10
2. Le thuya occidental.....	16
3. Qualité constructive.....	20
2. Contexte.....	21
2. Objectifs.....	24
3. Méthodologie.....	25
1. Plan expérimental.....	25
2. Matières premières et matériau de référence.....	28
1. Les copeaux de <i>Thuja occidentalis</i> , appelées « cheveux de cèdre ».....	28
2. Isolant de référence : l’ECO4.....	29
3. OP1 : Développement de panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction.....	29
Phase 1 : Formulation	
1. Caractérisation des performances thermiques.....	29
2. Optimisation du taux d’encollage.....	30
3. Pressage des panneaux de grande dimension.....	32
Phase 2 : Évaluation	
4. Résistance mécanique.....	33
5. Performances hydriques.....	34
6. Performance au sein d’une maquette.....	35
7. Isolation acoustique.....	36
8. Combustion superficielle.....	36
4. OP2 : Détermination de la résistance fongique.....	36
5. OP3 : Procédé de défibrage à faible coût énergétique.....	37
4. Résultats.....	38
1. Caractérisation de la matière première.....	38

2.	OP1 : Développement de panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction	39
Phase 1 : Formulation		
1.	Caractérisation des performances thermiques.....	39
2.	Optimisation du taux d'encollage.....	42
3.	Pressage des panneaux de grande dimension.....	43
Phase 2 : Évaluation		
4.	Résistance mécanique	44
5.	Performances hydriques.....	46
6.	Performance au sein d'une maquette.....	47
7.	Isolation acoustique	48
8.	Combustion superficielle.....	48
3.	OP2 : Détermination de la résistance fongique	48
4.	OP3 : Procédé de défibrage à faible coût énergétique.....	49
5.	Discussion	51
1.	Développement et caractérisation de panneaux rigides.....	51
1.	Phase 1 : Développement d'une formulation	51
2.	Phase 2 : Évaluation des caractéristiques et performances	52
3.	Rapport relatif aux exigences de la norme canadienne.....	55
4.	Applications du panneau	56
2.	Détermination de la résistance antifongique	58
3.	Procédé de défibrage à faible coût énergétique	58
6.	Recommandation et perspectives.....	59
7.	Conclusion	61
8.	Références bibliographiques	62
9.	Annexe.....	68

Liste des abréviations

ACV	—	Analyse de cycle de vie
CI	—	Cohésion interne
CT	—	Conductivité thermique
e.g.	—	Exempli gratia soit « par exemple »
eqCO ₂	—	Équivalent CO ₂
GES	—	Gaz à effet de serre
i.e.	—	Id est soit « c'est-à-dire »
MDF	—	Medium density fiberboard soit panneau en fibres de densité moyenne
OSB	—	Oriented strain board soit panneau de lamelles minces orientées
PIB	—	Produit intérieur brut
PIFB	—	Panneau isolant en fibre de bois
PIR	—	Polyisocyanurate
pMDI	—	Polymère de diphénylméthane diisocyanate
PMP	—	Pied-mesure-planche soit 0.00235974 m ³
PSE	—	Polystyrène expansé
PU	—	Polyuréthane
R	—	Résistance thermique en système impérial
RSI	—	Résistance thermique en système métrique international
XPS	—	Polystyrène extrudé

1. CONTEXTE GÉNÉRAL – ÉTAT DE L'ART

1. Introduction

1. L'isolation thermique

Aspect socio-techno-économique de l'isolant

Durant des siècles, la lueur des foyers les plus primitifs éclaira terre, fourrure, cuir, et mousse, autant de parures contre le froid hivernal[1,2]. S'ensuit l'usage de matériaux plus adéquats telle la pierre, le bois, la laine ou la paille[3]. Dès la sédentarisation de l'homme, s'isoler des variations environnementales est une affaire de survie. L'émergence des mousses plastiques au cours du 20^e siècle a causé une révolution dans les systèmes d'isolations[2]. Aujourd'hui plus accessibles que jamais, les matériaux isolants conventionnels permettent à chacun de s'armer face au froid selon les moyens et le confort recherché[4]. Seulement les épisodes climatiques extrême que nous réserve l'avenir dans un monde où la température moyenne globale est croissante implique une nouvelle course à l'isolation pour la survie[5]. S'isoler pour amoindrir la déperdition énergétique en hiver et atténuer l'échauffement caniculaire en été deviendra de plus en plus nécessaire avec les épisodes climatiques extrêmes à venir[6]. L'émission actuelle de gaz à effet de serre (GES) est telle qu'un réchauffement inévitable de la température moyenne terrestre de 1.5°C est prédit[7]. Cela signifie que l'habitabilité d'une partie des territoires s'atténuera progressivement[8]. S'isoler est non seulement une question de survie mais aussi de durabilité, en réduisant les besoins énergétiques pour chauffer et refroidir les maisons non isolées. La consommation énergétique d'un bâtiment dépend majoritairement des caractéristiques de son enveloppe[4]. En isolant adéquatement les bâtiments, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) liées au mur et à son isolation peuvent être atténués jusqu'à 72.2%[9].

Le secteur de la construction est le principal consommateur d'énergie en Europe, responsable de 40% de l'énergie totale finale[10]. Avec 6% des émissions net globale de GES soit 3.3 Gt d'équivalent CO₂ (eqCO₂) en 2019[7], l'impact environnemental de ce secteur représente un défi majeur pour l'industrie. Articuler une réponse face à cet enjeu exige de considérer la durabilité de la conception jusqu'au démantèlement du bâtiment[11]. Le développement d'enveloppes de bâtiment mieux isolées et plus étanches est encouragé par des normes de plus en plus strictes en demande énergétique et un accent est mit sur l'efficacité énergétique[12]. La visée de ces démarches est de se rapprocher de bâtiments à consommation d'énergie quasi nulle et haute performance énergétique. Parvenir à cela nécessite l'usage concurrent de solutions standards éprouvées et de matériaux novateurs respectueux de l'environnement[13].

La consommation excessive de carburants fossiles a incité à privilégier autant que possible le développement de produits industriels à partir de sources renouvelables. Cette tendance est observable dans l'industrie de la construction où elle se manifeste principalement sur le marché des matériaux d'isolation thermique[14].

Qu'est-ce qu'un isolant

L'isolant est le composant principal de l'enveloppe d'un bâtiment chargé d'empêcher les transferts de chaleurs c'est-à-dire de conduire au minimum les calories[4]. Cette limitation de la transmission de chaleur à travers les parois du bâtiment joue un rôle double ; en limitant le transfert de l'intérieur vers l'extérieur, les pertes de chaleur en hiver sont minimisées et en limitant le transfert de l'extérieur vers l'intérieur ce sont les gains de chaleur en été qui sont réduits. Ainsi une isolation adéquate permet de minimiser les déperditions énergétiques et d'améliorer le confort au long des saisons froides et chaudes[5].

En physique du bâtiment, l'isolation s'exprime en résistance thermique surfacique R ($K \cdot m^2/W$) soit le rapport entre l'épaisseur e (m) et la conductivité thermique λ ($W/m \cdot K$) (CT) d'un matériau. En général, un matériau est considéré comme isolant à partir d'une CT en dessous de 0.07 et comme un bon isolant à partir de 0.04[4]. Ces deux grandeurs physiques sont les premières caractéristiques renseignées sur un isolant trouvable sur le marché. Le confort qu'offre l'isolation est aussi attribué à divers facteurs tels que le déphasage et l'inertie thermique. L'inertie thermique dépend de la capacité calorifique massique du matériau, soit son aptitude à stocker de l'énergie thermique. Une chaleur spécifique importante signifie un certain délai avant que la chaleur soit transmise de part-et-d'autre du matériau. Ce délai se traduit par un déphasage entre le climat intérieur et extérieur. Enfin, la diffusivité thermique, définie par le rapport entre la chaleur spécifique et la résistance thermique, représente la capacité d'un matériau à conduire la chaleur. L'utilisation de matériaux ayant une faible diffusivité thermique permet de réduire le taux de transfert de chaleur à travers les parois du bâtiment, assurant un climat intérieur plus stable et confortable tout en optimisant les économies d'énergie. La CT exprime la performance thermique en condition statique tandis que la diffusivité l'exprime en condition dynamique.

Les isolants typiques

Il existe deux types de panneaux d'isolations répondant à des besoins spécifiques : les rigides et les flexibles. Le choix du type d'isolant dépend des exigences spécifiques de chaque projet d'isolation. Ce choix répond au jeu de contrainte suivant : selon l'application, l'espace disponible, les performances thermiques requises, les contraintes structurelles et les réglementations en vigueur.

Les isolants flexibles sont malléables et peuvent s'adapter aux surfaces irrégulières, aux espaces restreints et aux configurations complexes et sont souvent utilisés pour isoler les combles, les murs intérieurs ou les conduits, applications dans lesquelles flexibilité et facilité d'installation priment. Ils sont fabriqués à partir de matériaux souples tels que la laine minérale (de verre ou de roche), la fibre de cellulose, la laine de mouton ou encore les mousses souples. La laine de verre est de consistance laineuse et s'obtient par fusion du sable et du verre recyclé. Elle est abondamment utilisée, notamment pour sa faible CT ($0.030-0.045 W/m \cdot K$)[15], son imputrescibilité et sa nature hydrophobe et sa bonne résistance au feu. La laine de roche est fabriquée à partir de fibres obtenues par la fusion à $1600^\circ C$ de différentes roches qui sont liées par des résines, huiles ou amidons[4]. Communément utilisée pour sa faible CT ($0.033-0.040 W/m \cdot K$), son faible coût et sa versatilité d'applicabilité. En revanche il apparaît que ses performances thermiques sont négativement impactées par la condensation de vapeur[16]. L'ouate de cellulose est composée de journaux recyclés broyés et traités avec des agents ignifuges. Elle est utilisée pour ses excellentes propriétés d'isolation, sa capacité à réguler l'humidité et son caractère écologique[17].

Les isolants rigides offrent une résistance structurelle élevée et s'utilisent souvent dans des applications nécessitant de la rigidité et de la durabilité comme l'isolation des murs extérieurs, des toitures ou des sols. Ils sont généralement fabriqués à partir de matériaux solides et compacts tels que le polystyrène extrudé et expansé (XPS & PSE), le polyuréthane (PUR) ou le polyisocyanurate (PIR). Ces derniers ont les avantages d'être imputrescible, léger, très isolant et structurellement rigide. Le PU est une mousse fabriquée à partir de polyols (pouvant être biosourcés mais étant majoritairement pétrosourcés) largement utilisée pour ses excellentes propriétés d'isolation, son étanchéité à l'air et sa durabilité. Le PIR est dérivé du PU avec addition d'agents de réticulation, diminuant la CT et améliorant les performances d'isolation et la résistance au feu[18].

Le panneau rigide phare au Québec est le polystyrène expansé. Le polystyrène est obtenu à partir de naphtha, un mélange d'hydrocarbures légers issu du raffinage du pétrole. Des monomères de styrènes sont polymérisés peuvent être transformés en PSE par expansion sous vapeur ou en XPS par extrusion sous pression[19]. Le PSE, composé d'air à 98%, est d'une légèreté et d'une isolation extrême et est adapté à l'isolation des murs et toitures. Le XPS offre une résistance mécanique en compression importante et est adapté à l'isolation des sols et soubassements[20]. Ces matériaux sont théoriquement recyclables et en général les chutes en usines sont réintégrées dans la ligne de production. En revanche la récupération de polystyrène dans les maisons démantelées est certes en augmentation mais demeure marginale. De surcroît ces deux isolants sont aujourd'hui parmi les types de déchets marins les plus présents le long des côtes européennes[21]. Ce travail se focalise sur les panneaux rigides dont le rôle est de couper les ponts thermiques.

Isolants à partir du bois

Les isolants à base de bois suscitent un engouement croissant, seulement l'adoption de ces matériaux novateurs est freinée par des craintes des acteurs de la construction qui favoriseront les isolants traditionnels. Or, le bois présente des atouts attrayants, particulièrement pour la rénovation et les constructions à haute performance énergétique. Les avancées en recherche, développement et enseignement des techniques de construction permettent désormais de maîtriser plus efficacement l'usage du bois et de ses dérivés et de les préconiser en toute confiance[22].

La norme ISO 17064 définit les matériaux d'isolation en fibre de bois comme suit : panneau de fibre de bois manufacturé à partir de fibres lignocellulosiques par application de pression et de chaleur, avec les liaisons dérivées du feutrage des fibres ou de propriétés adhésives inhérentes ou d'un adhésif synthétique ajouté aux fibres.

En Europe, les premiers systèmes de production continu de panneaux rigides (avec l'ajout d'un adhésif synthétique thermodurcissable) et de matelas flexibles (avec l'ajout de fibres liantes thermoplastiques à une ou deux composantes) dimensionnellement stable ont commencé en 2008 par le processus de presses à vapeur. Avec une capacité de production installée en 2018 de 5.8 Mm³ d'isolants en fibre de bois, les panneaux rigides sont majoritairement produits (62%)[23].

Les avantages des panneaux isolants en fibre de bois (PIFB) sur les isolants conventionnels sont multiples. L'isolation acoustique est souvent supérieure et c'est un aspect de plus en plus apprécié. Environ 65% des citoyens Européennes sont exposés à des niveaux de bruit ayant un impact négatif sur la santé[24]. Un enjeu actuel dans les milieux urbanisés est de réduire l'impact du bruit urbain[25].

Le dioxyde de carbone et l'industrie du bois

Le concept de bilan carbone, créé par l'ingénieur Jean-Marc Jancovici est l'arbre qui cache la forêt. Il est réducteur de se limiter aux émissions de GES lors de la comparaison d'un produit pétrosourcé avec une alternative biosourcé. Lors d'analyses de cycle de vie, il est nécessaire d'intégrer entre autres la dégradation du produit en nutriments biologiques ou techniques, le reconditionnement du produit usagé, ou encore le temps de survie dans l'environnement, parmi d'autres facteurs clés relatifs à l'écologie[26]. La mise en perspective est nécessaire pour sortir de cette vision en tunnel du dioxyde de carbone en tant que seul indicateur de pollution[27].

Au sein de la part d'émission globale de CO₂ relatives à l'énergie, il a été estimé qu'en 2020 10% de ces émissions sont dues à l'industrie de construction de bâtiments et 10% sont dues aux autres industries de construction[28]. Au Québec, le secteur du bâtiment représente 10%

des émissions de gaz à effet de serre[29]. Une des mesures du plan pour l'économie verte en 2030 du Québec est de favoriser l'usage de matériaux de construction à faible empreinte carbone dont le bois[29]. La contribution du matériau bois à la réduction de l'impact environnemental des bâtiments est double : substituer des matériaux émetteurs de gaz à effet de serre et séquestration à moyen terme du carbone. Une analyse de cycle de vie réalisée par Cecobo[30] sur le carbone séquestré et émis par une poutre type révèle au niveau des émissions que, comparativement à l'acier qui émet 537 kg équivalents CO₂ (eqCO₂), le béton armé émet environ 17% moins tandis que la poutre en bois lamellé-collé émet jusqu'à 86% moins. Non seulement la poutre à base de bois a une émission sensiblement plus basse, elle séquestre environ exactement ce que la poutre d'acier émet (cf. Annexe figure 9-1 graph. de gauche).

Impact des isolants sur les émissions GES

Concernant les isolants, Cecobo a quantifié l'émission de GES propre à l'isolation dans un mur type en comparant la laine de roche, la laine de verre et la laine de bois[30]. Au niveau de l'émission, la laine de roche émet 4.48 kg eqCO₂ par mètre linéaire. La laine de verre en émet 59% moins tandis que le taux d'émission de laine de bois s'élève à un dixième de ce que la laine de roche émet. De manière analogue au cas de la poutre cité plus haut, il y a une séquestration de 32 kg eqCO₂ par mètre linéaire du mur, soit un peu plus de 7x l'émission de la laine de roche (cf. Annexe figure 9-1 graph. de droite). Ce type de cas illustre la force de la substitution et de la séquestration.

Le bois est une ressource essentielle au développement durable et un matériau de choix dans les écobilans et ACV[22]. C'est un matériau de construction à faible intensité carbone et son usage est un moyen concret de réduire l'empreinte carbone d'un bâtiment par substitution. Ce phénomène couplé à la séquestration du carbone à moyen terme font du bois un outil pour atteindre la carboneutralité. Concernant l'effet attendu sur le potentiel d'atténuation d'émission de dioxyde de carbone par l'exploitation de la forêt, ce dernier a été considéré dans une étude comme très bénéfique à court terme pour l'effet de substitution et très bénéfique à long terme pour l'innovation de produits[31]. Il est de ce fait judicieux pour décroître l'impact humain sur le changement climatique d'innover des produits à partir de bois en alternatives aux produits conventionnels e.g. dans la construction remplacer les panneaux isolants pétrosourcés par des panneaux biosourcés.

Vers une circularisation de l'économie linéaire

Depuis la révolution industrielle, le paradigme de l'industrie est un schéma de production linéaire. De la matière première est transformée à l'aide de machine et d'énergie en produits. Ces produits sont consommés puis deviennent des déchets. Le système occidental capitaliste s'est axé majoritairement sur le consumérisme romantique, poussant les individus à acheter un maximum de biens selon leurs désirs[32]. Les industriels, dans une volonté avare d'accélérer leur profit et de pérenniser leur entreprise, ont mis en place l'obsolescence programmée, garantissant une durée de vie limitée et un roulement dans le rythme de consommation des biens courants[33]. La conjonction de ces phénomènes non-exhaustifs ont conduit le monde occidental à produire de façon excessive des déchets, que le système gère de la façon suivante : combustion dans des incinérateurs, accumulation sous forme de colline dans des décharges, enfouissement dans les sols ou réintégration dans de nouveaux cycles de production[34]. Il a été estimé que le monde a produit 9.1 mdT de plastique et que plus de la moitié de ce volume a fini dans l'environnement[35]. Ce constat met en exergue l'urgence de sortir de la dépendance au pétrole et de freiner l'utilisation massive de ses produits dérivés. Concernant les isolants, XPS et PSE sont parmi les types de déchets marins les plus présents le long des côtes

européennes[21]. En réponse à cela la commission européenne a notamment endossé un plan d'action pour une économie circulaire[36].

Au fil des années une tendance à circulariser progressivement l'industrie s'est marquée[21]. Il arrive que les déchets soient recyclés en nutriments techniques ou produit tierce, reconditionnés voir sur-cyclés (i.e. recyclé en produit à valeur ajouté)[37]. L'économie circulaire est un concept naissant et en perpétuelle évolution. Une analyse de la littérature en propose la méta-définition suivante : « L'économie circulaire est un système économique régénératif qui nécessite un changement de paradigme afin de remplacer le concept de "fin de vie" par la réduction, la réutilisation alternative, le recyclage et la récupération des matériaux tout au long de la chaîne d'approvisionnement, visant à promouvoir le maintien de la valeur et un développement soutenable, la création de qualité environnementale, un développement économique et l'équité sociale, au bénéfice des générations actuelles et futures. Ceci est activé par l'alliance des parties prenantes (industriels, consommateurs, décideurs politiques, académies) et leurs innovations et capacités technologiques. »[38]. Ce vaste et complexe concept se traduit pragmatiquement par deux actions clés : un usage efficace des ressources et une réduction des déchets et un cadre de travail de 9R : Refuser, Repenser, Réduire, Réutiliser, Réparer, Remettre à neuf, Remanufacturer, Reconvertir, Recycler et Récupérer[39].

En lien avec ce travail, les 9R seraient : refuser et réduire l'usage d'isolations conventionnelles, repenser l'isolation dans le système constructif, remanufacturer et reconvertir les chevrons en panneaux plutôt qu'en paillis, recycler les chutes et connexes en panneaux et récupérer l'énergie des chutes et autres dans des unités de cogénération.

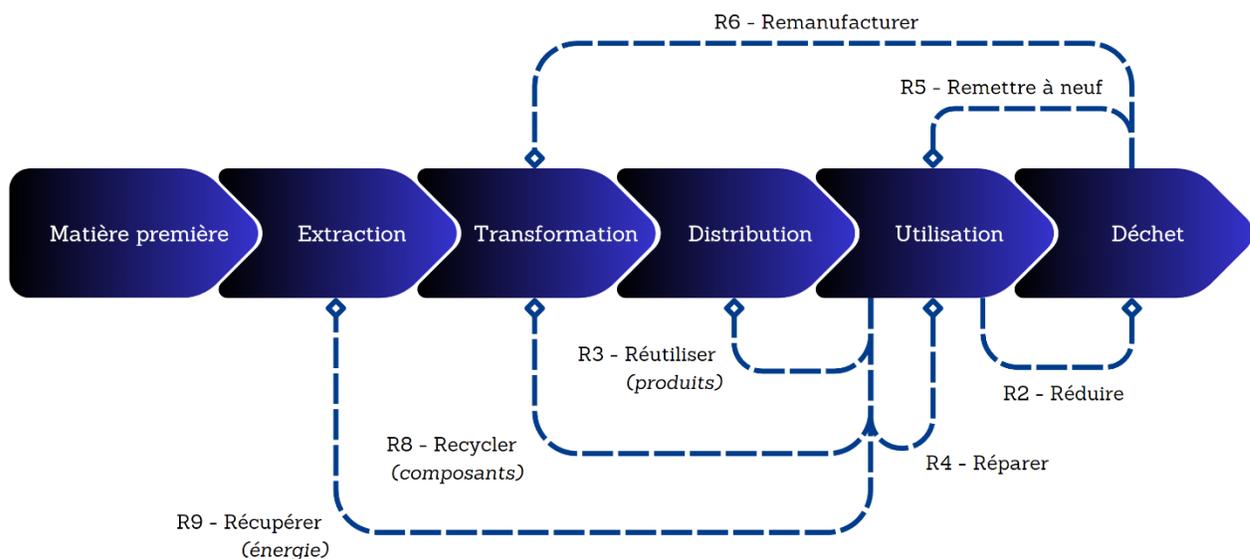


Figure 1-1. Circularisation partielle du modèle économique linéaire par application d'une partie des 9R de l'économie circulaire[39]. Adapté et modifié de [40].

En lien avec le contexte de ce travail, l'usage efficace des ressources implique une transformation des connexes sous-valorisés en produit valorisant leurs qualités intrinsèques. La réduction des déchets représente le besoin même de l'initiateur du projet, les chevrons étant accumulés en monticules de dizaines de mètres de hauteur. Le concept de déchet est davantage flou dans le secteur bois étant donné que la biomasse lignocellulosique s'inclut dans des cycles

bio-géo-chimique et se réutilise toujours d'une façon ou d'une autre. Pour ces raisons, ce travail s'inclut par défaut dans un contexte d'économie circulaire.

Une analyse reportée qu'en 2011, le marché des matériaux d'isolations était dominé par la laine minérale (52% des parts du marché) et les plastiques (41%)[41]. En proposant un produit biobasé (i.e. fabriqué à partir de biomasse) ce travail s'inclut dans un contexte de bioéconomie et de développement durable. La transition du système économique actuel vers une bioéconomie circulaire est nécessaire, notamment vis-à-vis du dioxyde de carbone. Davantage de forêts sont requises pour séquestrer davantage de CO₂ et l'usage de produits de bois et dérivés du bois permet progressivement de se déprendre des produits pétrosourcés émetteurs tout en stockant à long-moyen terme du carbone.

Marché du bois québécois et canadien

Le Canada est un pays dont le bois est une ressource clé, en témoigne le drapeau arborant une feuille d'érable. Le Canada produit 56 Mm³/an (millions de mètres cube par an) soit 24 milliards de PMP (pied mesure planche) dont 40% sont produits par la Colombie-Britannique[42]. Le Québec récolte 29 Mm³/an, majoritairement du bois de petite dimension et exporte la majorité vers les É.-U.. Une volonté de verdir l'économie et d'augmenter l'exploitation de la forêt amène le Québec à viser 33 Mm³/an en 2025 et 53 Mm³/an en 2080 soit presque doubler la récolte forestière[43]. La nouvelle politique vise à augmenter l'usage du bois au Québec en doublant les chantiers bois et en triplant la demande de bois. Plus de 80% des bâtiments résidentiels pourraient être en bois avec les codes actuels du bâtiment ce qui représente un potentiel de 0.94 Mm³ soit 400 millions de PMP[30]. Sur le plan économique, le secteur forestier représente 5.9 Md \$_{CAD} (4.08 Md €) soit 1.6% du PIB du Québec et génère environ 23 Md \$_{CAD} en livraisons manufacturières[44]. Le secteur emploie 57 000 personnes parmi 2000 établissements. L'usage du bois en construction va en grandissant au Canada, notamment par le développement de bois d'ingénierie toujours plus performant, la crise du logement et la tendance écologique visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES).

Il a été estimé que 37% des GES anthropogène sont dus au secteur de la construction et du bâtiment, parmi lesquels 10% sont dus à l'industrie de la construction d'immeubles[30]. L'usage du bois permet la diminution de GES par effet de substitution d'autres matériaux émetteurs et par stockage du carbone.

Le sous-développement du secteur des produits dérivés du bois au Québec

Les co-produits du sciage ont servi de matériau isolant au cours de l'histoire du Québec. Des anciens rapportent l'utilisation des rabotures, sciures et copeaux (« brin de scie ») pressés dans les murs de maisons avec du journal. Ces coffrages primitifs sont encore utilisés rarement, notamment pour des isolations de plancher. Le bois étant une composante principale de l'économie du Québec, l'industrie de ses produits dérivés est paradoxalement peu développée et a quelques décennies de retard sur le vieux continent¹.

Des panneaux composites sont produits par des entreprises comme Maibec (Québec, Canada), MSL (Louiseville, Canada), Uniboard (Montréal, Canada), Naturefibre (Val-Des-Sources,

¹ Marc Pomerleau, communication personnelle.

Canada) et Damabois (Saint-Damase, Canada). Pour ce qui est des PIFB, MSL fabrique l'ECO4 et l'Isolint, Naturefibre fabrique Natur-chanv et TimberHP ouvre prochainement une importante usine produisant notamment le TimberBoard, un PIFB proche de l'Agepan THD. Seulement l'usage d'isolants biosourcé demeure marginale et onéreuse. Les avantages ne sont pas connus du public et l'offre est peu fournie.

2. Le thuya occidental

Attention : les termes « cèdre », « thuja » et « thuya » sont employés de manières équivoques et font tous deux références au Thuja occidentalis. Les termes « cheveux » et « mousses » font tous deux références aux copeaux filiformes générées par le sciage de bardeau¹.

Le terme « cèdre » faisant référence à de nombreuses espèces selon le territoire (e.g. Cedrela odorata en Amérique Latine, Cedrus atlantica en Proche-Orient) une distinction est nécessaire et le terme « thuya » est préféré dans le texte pour se référer au Thuja occidentalis.

Foresterie du Thuja occidentalis

L'espèce *Thuja occidentalis* L. appartient au genre *Thuja*, de la famille des cupressacées. Ses noms communs sont « cèdre blanc du nord », « thuya d'Occident » ou « thuya du Canada »[45]. C'est une essence originaire du Nord-Est de l'Amérique. C'est un arbre indigène au feuillage persistant et à la cime étroite[46]. L'écorce est fibreuse et formée d'un réseau de lanières et de sillons (cf. Figure 1-3).

L'aire de répartition, reprise en figure 1-2, de cette essence s'étend sur toute la région forestière des Grands Lacs (Ontario) et du Saint-Laurent (Québec), la majeure partie de la région forestière Acadienne (Nouveau-Brunswick) et le centre de la région forestière boréale[45]. Le thuya occidental pousse en milieu sec et humide, tel que les terres stériles, les falaises calcaires, marécages et rives des cours d'eau (Johnston, 1990 dans [47])². En comparaison avec les arbres qu'on lui associe dans les marécages, cette essence est généralement plus petite et de croissance plus lente.

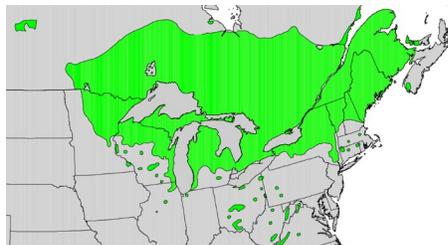


Figure 1-2. Aire de répartition du Thuja occidentalis

¹ Petit élément de revêtement en forme de tuile en bois servant à barder toitures et façades.

² L'ensemble des citations de cette section du format (Auteur, année) sont issues de l'ouvrage « Les résineux de l'Est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages » de S.Y. Tony Zhang et Ahmed Koubaa, éditions FPInnovations, Mars 2009.

Le thuya occidental croît d'une lenteur extrême et atteint à l'âge adulte 12 à 15 m de hauteur et 30 à 60 cm de diamètre à hauteur de poitrine (dhp). La croissance en hauteur peut atteindre 15 cm/an en pleine lumière lorsque le système racinaire est bien établi et la croissance diamétrale dhp est de 1.5 mm/an avant éclaircie et double après éclaircie[46]. Il vit en moyenne plus de 800 ans (Johnston, 1990 dans [47]). C'est un arbre longévif et stable sans perturbation majeure. L'arbre présente généralement une base courbée et une forme irrégulière.

L'âge d'exploitabilité varie de façon considérable selon les objectifs d'aménagement et la productivité des stations. Les révolutions qui visent à maximiser le volume de bois de sciage vont de 110 à 140 ans pour une hauteur de 12 m. Les cèdres représentent 5.2% de l'inventaire conifère total du Canada (Gray, 1995 dans [47]).

Le thuya occidental est trouvé autant en peuplement équienne qu'inéquienne[47]. Les peuplements d'allure équiennes naissent dans les clairières marécageuses à la suite de feu de forêts ou de mises à blancs, lorsque la concurrence est faible. Les peuplements d'allure inéquiennes se situent en général dans les marécages et terrains humides, en succédant généralement à ses associés tolérant moins l'ombre.

Concernant la régénération, le thuya occidental opère par reproduction sexuée et multiplication des plants. Par voie sexuée, la production des cônes commence à 6 ans, abonde autour de 30 ans et atteint son apogée à 75 ans. Les graines sont dispersées par anémochorie jusqu'à 60 m de l'arbre hôte. La germination exige une température de 29°C et a lieu sur des substrats variés tant que l'apport en humidité est constant (Johnston, 1990 dans [47]). En conditions propices, le thuya occidental se reproduit par marcottage dès l'âge de 5 ans et de façon courante dans les forêts marécageuses, l'arbre ayant tendance à tomber et s'incliner lentement.

L'essence est d'une bonne résistance face aux pathogènes. L'attaque des quelques pourritures du pied et des racines se limite aux arbres vieux et abîmés. Il est rare qu'un carpophore apparaisse sur un arbre en vie. Les dégâts et maladies causées par les insectes sont rares et l'espèce compte deux ravageurs : la mineuse du thuya (*Argyresthia thuiella*) et les fourmis charpentières noires et rouges (*Camponotus pennsylvanicus* et *C. ferrugineus*) (Fowells, 1965 dans [47]). En revanche, le thuya occidental résiste aux termites (Hepting, 1971 ; Behr, 1977 dans [47]).

Au point de vue de la durabilité, le thuya occidental est l'un des bois les plus durable du Canada. Son utilisation convient dans des conditions propices au développement de pourritures. Pour exemple la durée moyenne du temps de vie de poteaux non traités de 27 ans, comparativement à 5 ans pour ceux en épinette noire (Krzyzewski, 1980 dans [47]). Le bois est très résistant à la biodégradation grâce à un arsenal de molécules bioactives antifongiques, parmi lesquelles les tropolones dont les thujaplicines[45,48]. Une modélisation d'un de ces composés est disponible en annexe (Figure 9-4).

Une cause de mortalité de peuplements entiers est la crue anormale des cours d'eaux. Une autre cause est l'incendie, l'essence étant très vulnérable aux dégâts causés par le feu étant donné sa fine écorce et sa haute teneur en huile. La neige et la glace causent souvent des dégâts aux branches maîtresses et forcent l'arbre à s'incliner de façon permanente (Caulkins, 1967 dans [47]).

Il est attendu du réchauffement climatique un allongement théorique de la saison végétative dans les saisons froide, ayant comme conséquence sur les arbres une croissance accrue et une migration vers le nord. Concernant le thuya occidental, sa distribution nordique aux limites froides de la zone boréale se caractérise par une distribution de populations marginales isolées et éloignées de la distribution continue de l'espèce. Une étude[49] investiguant l'impact du

réchauffement climatique, des conditions édaphiques et des précipitations sur la croissance des populations de cette essence a fait plusieurs observations. Les analyses dendroclimatiques (i.e. étude des variations climatiques passées par l'analyse des cernes de croissance des arbres) révèlent que la croissance radiale est limitée par les courtes saisons de croissances et les sécheresses estivales et que la croissance est impactée négativement par les précipitations automnales et printanières, en particulier dans les peuplements en zone humide. Cet impact négatif au printemps est expliqué en partie par le système racinaire peu profond en condition édaphique hydrique et par l'effet bimodal de l'eau sur la croissance du thuya occidental en contraignant cette dernière par manque ou excès. Une seconde étude[25] porte sur la pérennité de l'exploitabilité de cette essence. Elle suggère que pour maintenir ou restaurer les forêts de thuya occidental en plaine il serait judicieux d'appliquer un traitement sylvicole multi-âges comprenant la protection de débris ligneux, la préservation d'arbres ou de zones résiduelles et des récoltes périodiques d'intensité faible à modérée.

Au sujet de l'anatomie du bois du thuya occidental, l'aubier est presque blanc et le bois de cœur d'un brun paille comporte de nombreux petits nœuds. Le bois est généralement droit, d'un grain régulier et léger. Cette essence est reconnue pour sa haute stabilité dimensionnelle et une fois en service le bois sec ne bouge que peu. D'une humidité par rapport à la masse anhydre du bois vert établie à 94%, le bois sèche très bien. Comprenant une teneur importante en huile, il est facilement inflammable.



Figure 1-3. *Arbre, écorce, aiguilles et cônes et cernes internes du Thuja occidentalis.*

Les propriétés mécaniques du thuya occidental sont faibles. Les résistances en flexion et en compression parallèle au fil ne sont pas élevées. L'USDA (United States Department of Agriculture ; Département de l'Agriculture des États-Unis) a obtenu en 1999[47] les résultats suivants sur du bois sec : pour la flexion statique un module de rupture de 44.8 MPa et d'élasticité de 5.52 GPa. Pour la compression parallèle au fil, la résistance maximale à l'écrasement s'élève à 27.3 MPa. La traction perpendiculaire au fil du bois donne une valeur de contrainte maximale de 1.5 MPa. La masse volumique du bois est de 340 kg/m³ pour un air comportant 12% d'humidité relative[46]. Ce bois compte parmi les plus faibles, cassants et moins résistants de tous les conifères d'Amérique du Nord[46,50].

L'usage le plus courant du thuya occidental est la production de bardeaux sciés (le secteur a représenté 67.3 % des thuyas sciés en 2006[45]). Ces derniers offrent un choix durable et fonctionnel pour barder toitures et façades. La production de bardeaux aboutés et jointés implique un usinage pour l'obtention de bords parallèles et de coins carrés[45]. L'avantage des bardeaux est de ne pas nécessiter de traitements pour prolonger leur durée de vie, si ce n'est avec des agents ignifuges, et ce si la pose est de qualité suffisante en fournissant des cavités de ventilation[45]. Un second usage courant du thuya occidental est la fabrication de piquets pour clôturer les champs, l'essence étant propice à entrer en contact avec le sol et l'eau étant donné

sa résistance aux pourritures. Le bois grise avec le temps via la migration des sels minéraux à la surface pour former une couche protectrice[45]. Tel que montré dans la figure 1-4, le bois d'œuvre sert à des applications extérieures tels des parements, des bardeaux, des bancs ou encore des bateaux et intérieures tels des lambris, des meubles ou encore des armoires et bac à vêtements étant donné ses vertus antimites. La transformation du thuya occidental en produits composites est rare en raison d'une offre limitée et de la grande valeur de ce bois pour d'autres applications sous forme de bois brut. Des panneaux gaufrés, des panneaux à lamelles orientées et des panneaux durs à densité moyenne sont fabriquées à partir du thuya. Le thuya occidental possède naturellement d'excellentes propriétés d'isolations thermique et acoustique. En raison de ces bonnes qualités d'isolation, les billes du thuya occidental sont populaires pour la construction de chalets (Lanasa, 1989 dans [47]). Les billes sont également utilisées en tant que poteaux électriques et poteaux de fondations.

Utilisation historique du cèdre en construction

D'antan la majorité des maisons et hangars agricoles étaient revêtues de bardeaux. Ce matériau ancestral travaille certes avec l'humidité cependant entretenu et suffisamment ventilé il peut durer plus d'une vie humaine. Produits depuis 300 ans, la production s'industrialisa dès la fin des années 1800[45]. Durant les années 70, l'avènement de revêtements pétrosourcés plus moderne amena les habitants à recouvrir les bardeaux de simili-planches en vinyle (« clapboard »). Ce sont majoritairement les nouvelles constructions au bord de l'eau qui préfèrent le bardeau de cèdre pour sa résistance aux embruns. Dans les terres, souvent seule la façade est recouverte de bardeaux pour diminuer le prix du bardage. La toiture est moins courante car il faut nécessairement du bardeau de qualité supérieure. Par sa durabilité, le cèdre fut une essence de choix pour confectionner des barrières dans les champs ou des chalets en bois rond et les billes sont utilisées en fondations et éléments structurels.



Figure 1-4. Illustrations des usages du thuya occidental en bardeaux, planches, bois de chauffage, clôtures de perches, chalet de bois rond ou table de picnic. Diagramme de l'auteur à partir d'images libre de droits.

Il y a une distinction importante à faire entre les bardeaux de cèdre rouge de l'ouest (*Thuja plicata*) et de cèdre blanc de l'est (*Thuja occidentalis*). Les premiers sont plus résistants et épais et certaines maisons centenaires comportent encore un bardage fonctionnel dans ce matériau. Le cèdre rouge de l'ouest ne partage pas la même zone de répartition et son exploitation a lieu à l'ouest du Canada.

3. Qualité constructive

Code de construction du Québec

Le code de construction du Québec distingue deux types d'habillement d'un logement : les revêtements intérieur et extérieur. Le premier sert de finition esthétique et d'isolation acoustique et thermique supplémentaire. Le second remplit la fonction de protection face à l'exposition à l'environnement, en protégeant face aux intempéries grâce à une étanchéité à l'eau et une isolation thermique adéquate. Concernant la résistance thermique effective totale une valeur de R-24 (RSI-4.23) est imposée pour les murs et de R-40 (RSI-7.05) pour les toitures. Cette valeur va en grandissant au fil des années et sera théoriquement augmentée de R-24 à R-30 pour correspondre à celle du programme Novoclimat, visant à offrir une performance énergétique supérieure aux normes en vigueur[51].

Les politiques au Québec souhaitent favoriser l'usage du bois dans les constructions. Concernant les habitations résidentielles, la majorité sont en ossature bois légère. L'enjeu se situe dans les bâtiments multilogements majoritairement constitués de béton et d'acier. La Société Québécoise des Infrastructures vise dans son plan stratégique à diminuer la consommation énergétique et les émissions de GES liées aux bâtiments ainsi qu'à favoriser les constructions à base de bois, notamment par le biais de certification LEED[52]. Cette certification évalue la durabilité des bâtiments et offre un certain gage d'exemplarité.

Concernant les exigences des normes, les manufacturiers doivent déclarer une valeur de CT mesurée dans des conditions spécifiées, mais il n'y a pas de critère au Canada sur la conformité d'un isolant en ce qui concerne sa CT, seulement concernant la R. Seule une exigence sur la résistance thermique est formulée dans la norme propre aux isolants à partir de fibre de bois

Une section de mur conventionnelle comprend deux isolants distincts. L'isolant principal a pour fonction de fournir une résistance thermique adéquate et constitue la majorité de la résistance du mur. Le second isolant sert à couper les ponts thermiques et à apporter une isolation thermique supplémentaire. Entre ces deux isolants, une plaque d'OSB est généralement placée pour contreventer la structure.

Maison passive

Selon l'institut allemand PassivHaus, les maisons passives se distinguent par l'application des critères suivants : une enveloppe de bâtiment fortement isolée réduisant les pertes de chaleur, une étanchéité à l'air soigneusement réalisée pour minimiser les infiltrations non contrôlées, une ventilation contrôlée avec récupération de chaleur pour un renouvellement d'air efficace, des fenêtres et des portes à haute performance avec double ou triple vitrage et cadres isolants, ainsi qu'une élimination des ponts thermiques pour éviter les déperditions thermiques[53]. Ces mesures combinées permettent d'obtenir une performance énergétique élevée tout en améliorant le confort thermique des occupants. Le confort thermique est défini par l'institut par un maximum de 10% d'heures au cours d'une année excédant les 25°C. Concernant l'exigence en isolation, le coefficient de transfert de chaleur U ne doit dépasser $0.15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Cela représente une RSI minimal de $6.66 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$. Le système de ventilation doit transférer au moins 75% de la chaleur de l'air d'échappement à l'air frais entrant. Les vitrages doivent contenir de l'argon ou du krypton pour prévenir le transfert thermique et avoir un coefficient de transfert de chaleur minimum à $0.8 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ avec une transmittance solaire totale G autour de 50%[53]. L'élimination des ponts thermique est assurée par une exécution soignée des bords, coins, connexions et pénétrations et favorisée par une seconde couche d'isolation rigide dans le revêtement intérieur ou un revêtement extérieur d'isolation supplémentaire. Cette couche particulière constitue le cœur de cible du projet.

2. Contexte

Le projet est une collaboration entre le SEREX, centre de recherche et Multicèdre, usine artisanale de bardeaux de cèdre fournissant la matière première. Multicèdre produit en surplus des connexes faiblement valorisés. Les copeaux, sciures et écorces sont transférés à Multifib pour en faire du paillis horticole.

Multicèdre et bardeaux

Multicèdre est une usine de sciage de bardeaux de taille moyenne située dans la région du bas Saint-Laurent comprenant 11 lignes de sciage¹. Ses principaux produits sont les bardeaux de cèdre de toutes qualités, les bardeaux étroits de moindre qualité servant à caller, les paillis horticoles à partir d'écorce et de cheveux et les copeaux pour aire de jeux. D'un niveau d'automatisation bas, le sciage de bardeau exige une main d'œuvre pointue et qualifiée. L'entreprise est décrite par son président comme étant une forme « d'artisanat-industriel » et le directeur rapporte que le bardeau est le produit du bois « employant le plus de mains » au Québec.

La ligne de production est organisée comme suit : les grumes de qualité bardeau, i.e. avec le plus de duramen possible, sont réceptionnées puis stockées durant 1 à 2 mois dans un parc. S'ensuit l'écorçage avec une écorceuse à rouleau et le débitage de la grume. Les billons sont convoyés vers les lignes de sciages où l'aubier est enlevé et les bardeaux sciés automatiquement. Les scies, spécifique au sciage de bardeau, sont limées quotidiennement et ce sont leurs dents particulières qui génèrent des cheveux. Un opérateur réceptionne le bardeau et choisit la qualité en purgeant les impuretés. Un premier contrôle qualité visuel a lieu avant que les bardeaux soient parallélisés pour enfin être emballés manuellement. Les paquets sont ensuite rassemblés par 4 en toises avant d'être montés sur une palette. Le bardeau est séché naturellement ou peut être séché artificiellement dans une chambre de séchage électrique et atteindre jusqu'à 10% d'humidité, limite au-delà de laquelle le bardeau devient fragile. Les bardeaux peuvent être peints mais ne sont en général ni peints ni traités.

Les cheveux sont produits lors du sciage du billon en bardeau et sont stockés en pile à l'extérieur. L'ensemble des connexes (par ordre d'importance : cheveux, écorces, impuretés, chutes) sont récupérés par MultiFib, une société sœur de Multicèdre, pour en faire du paillis horticole par broyage. Ce sous-produit, bien qu'il soit prisé, n'est pas toujours rentable mais sa production en est nécessaire. De fait, avec le prix de l'énergie au Québec, une unité de cogénération alimentée par ces connexes serait moins profitable.

¹ Informations transmises oralement lors d'entretiens par Marc Pomerleau, président de Multicèdre et Multifib et Gérald Mailloux, directeur de l'usine de Multicèdre.

La production de bardeaux s'élève à 24 unités par minutes en moyenne. La production de toises de bardeaux¹ s'élève à 170 unités par jour ce qui représente un volume de sciage quotidien de 62 m³ de bois apparent². Annuellement le volume de sciage s'élève à 16 000 m³ solide de bois.

Le marché du bardeau est mature. Multicèdre estime avoir une demande du double de l'offre et ont la volonté d'augmenter de 70% la production avec une nouvelle ligne de sciage améliorée. L'enjeu actuel des producteurs est d'augmenter le rendement matière (étant très bas) tout en diminuant le nombre d'ouvriers. L'entreprise témoigne n'avoir jamais eu de diminution de demande, et a toujours fonctionné en flux tendus depuis 30 ans. Actuellement environ 80% des bardeaux sont exportés aux États-Unis, avec une légère augmentation de distribution locale.

Le Québec produit 75% des bardeaux à partir de *Thuja occidentalis*[45]. La production québécoise s'élève à 349 585 toises de bardeaux en 2021, avec une diminution de 23% en 5 ans (le marché suit des grands cycles stables)[42]. Le sciage de bardeau a consommé 205 000 m³ de bois rond en 2021 pour une moyenne de 215 000 par an sur dix ans[42]. Un principe de base est un rendement de sciage de 33% pour la production de bardeau. Sur les 67% restant, la moitié est transformée en cheveux et le reste relève des impuretés (croûtes, cœurs, résidus). Cela reviendrait à une première estimation imprécise de 68 333 m³ de cheveux de cèdre produit au Québec en 2021.

Projet d'isolants en coproduits de thuya du SEREX

Ce TFE s'insère dans un projet du SEREX pour Multicèdre de fabrication d'isolants en coproduits de thuya. Dans un contexte de surplus de coproduits du sciage couplé à une offre limitée de panneaux isolant en bois au Québec, Multicèdre cherche à écouler ses connexes en valorisant davantage. Pour cela ils ont fait appel au créneau écoconstruction du SEREX. Le SEREX est un centre collégial de transfert technologique axé sur les produits innovants à partir du bois. Ils offrent une série de services sur la caractérisation, l'élaboration, la vérification de produits biosourcés. L'objectif du projet est de développer des panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction ainsi que de mettre au point d'un procédé de défibrage adapté aux PME. Démarré en 2021, le SEREX a mis au point un procédé de défibrage des écorces de thuya et développé avec succès une formulation de matelas flexibles d'isolation à partir de fibres d'écorces. Il est prévu que le projet s'étende jusqu'en 2026.

Le modèle linéaire du bardeau, schématisé dans la figure 1-5 peut se résumer en ces étapes clés : le thuya est récolté, les billes de « qualité bardeau » sont sciées par Multicèdre, les bardeaux sont alors emballés en toises pour la vente puis sont installés sur les bâtisses. Après une durée de vie de 15 à 100 ans, le matériau est brûlé. Le sciage du bardeau génère des cheveux, et l'écorçage de la bille des écorces. Ces deux co-produits sont sous-valorisés en paillis horticole par l'entreprise-sœur Multifib. Le SEREX, par le biais de son créneau écoconstruction, a formulé un matelas flexible à base de fibre d'écorce performant tant pour l'isolation thermique

¹ Une toise est un paquet de 4 paquets de bardeaux soit un total de 73.15 m linéaire

² Facteur de conversion : 0.4 m³ solide de bois pour une toise

qu'acoustique. Un panneau rigide à base de cheveux de cèdre a été formulé dans le cadre de ce travail. Les flèches en pointillées représentent l'innovation en cours. Une flèche pointillée relie les bardeaux aux cheveux. L'idée serait éventuellement de récupérer les bardeaux en fin de vie pour les rescier et générer davantage de cheveux pour formuler davantage de panneaux.

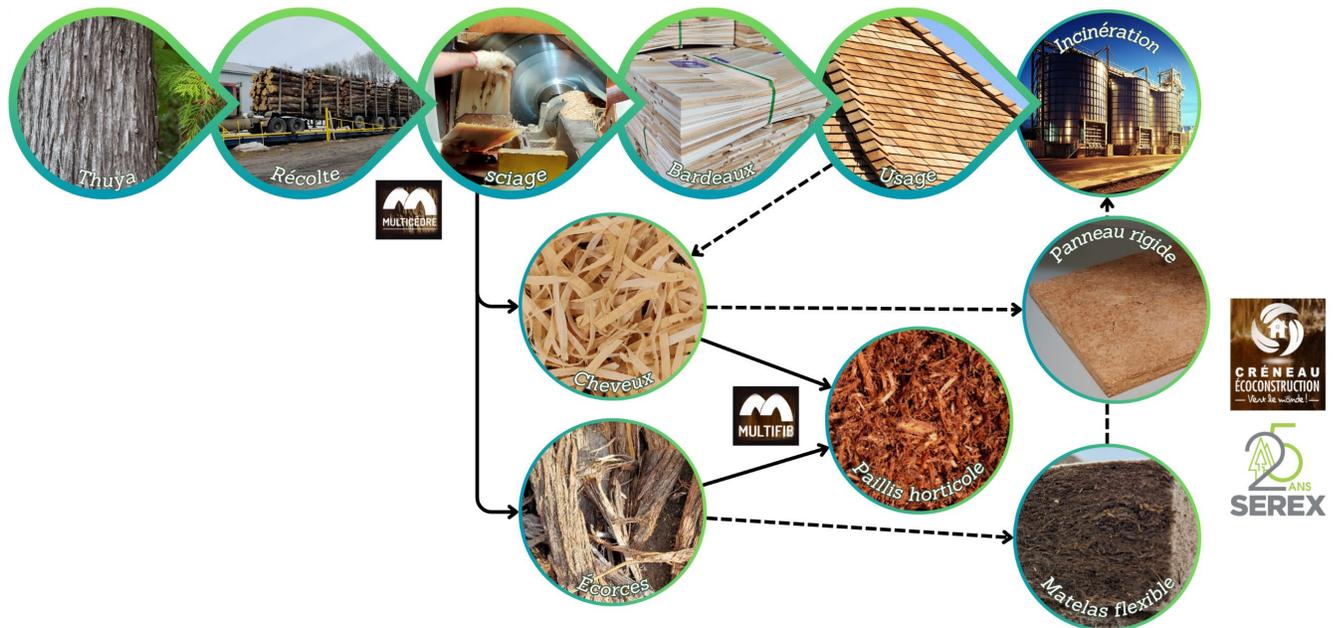


Figure 1-5. Schéma simplifié de la chaîne linéaire du bardeau de cèdre produit par Multicèdre complété avec la sous-valorisation en paillis horticole par Multifib et le développement de produits isolants par le créneau écoconstruction du SEREX. Diagramme de l'auteur.

Le besoin émergent de produits davantage circulaires et biosourcés ainsi que d'alternatives innovantes et performantes en construction sont à l'origine de ce projet. Pour savoir si ces nouveaux produits sont efficaces ils convient d'en évaluer la performance et d'en savoir les caractéristiques thermiques, mécaniques, hydriques, etc.

2. OBJECTIFS

L'ensemble de ce travail s'inscrit dans un plus vaste objectif : Développer un produit biosourcé originaire d'une exploitation durable de la forêt dans une dynamique de bioéconomie circulaire. Dans ce cas un panneau d'isolation à partir de thuya.

Pour y répondre, une série d'objectifs ont été échafaudés. Les objectifs sont présentés sous la forme d'une arborescence partant de quatre objectifs principaux (OP) se ramifiant en objectifs généraux.

L'OP1 constitue le cœur du projet : formuler un panneau d'isolation rigide et l'évaluer par rapport à la norme concernée. L'OP2 est une validation du maintien de la durabilité. L'OP3 est une piste explorée pour diversifier l'applicabilité du connexe étudié, notamment en matelas flexible, en le transformant en fibres.

OP1 : Caractérisation et développement de panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction

Phase 1 : Formulation

O1.1 : Caractérisation des performances thermiques

O1.1.1 : Mesure de l'isolant de référence et des effets de bords de la sonde

O1.1.2 : Relation entre la conductivité thermique et la densité

O1.1.3 : Impact de différents traitements sur la conductivité

O1.2 : Optimisation du taux d'encollage de pMDI

O1.3 : Pressage de panneaux de grande dimension

Phase 2 : Évaluation

O1.3 : Caractérisation des résistances mécaniques

O1.3.1 : Traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne)

O1.3.2 : Compression perpendiculaire à la surface

O1.3.3 : Résistance à la flexion statique (charge transversale de rupture)

O1.4 : Performance hydrique

O1.4.1 : Mesure de la perméabilité à la vapeur d'eau

O1.4.2 : Mesure de l'absorption d'eau

O1.5 : Performance acoustique

O1.5.1 : Mesure du coefficient de réduction du bruit

O1.6 : Intégration du panneau au sein d'une maquette conventionnelle

O1.5.1 : Remplacement du polystyrène expansé

O1.7 : Mesure de la combustion superficielle

O1.5.1 : Mesure de l'indice de propagation de la flamme

OP2 : Impact de la transformation ou de traitement des cheveux sur sa durabilité

O2.1 : Transformation et/ou traitements puis incubation de moisissures de surface

OP3 : Mise au point d'un procédé de défibrage des cheveux alternatif au raffineur

O3.1 : Application de traitements puis broyage de la matière première

O3.2 : Mesure de la conductivité thermique des fibres prometteuses

3. MÉTHODOLOGIE

1. Plan expérimental

La résolution de l'objectif principal de formulation de panneau isolant rigide de faible densité en cheveux de cèdre pouvant faire usage de matériau de construction est divisée en deux phases.

La première phase est la formulation du panneau (première ligne du plan expérimental schématique). Pour presser les panneaux de grande dimension, il convient de fixer les paramètres suivants : densité, épaisseur et taux d'encollage. Afin de déterminer l'épaisseur et la densité, les performances thermiques du matériau sont évaluées, en particulier la résistance et la conductivité thermique. Une relation entre la masse volumique et la conductivité thermique est établie et des mesures de chaleur spécifique volumique sont effectuées simultanément. Une densité est choisie à partir de cette relation. Le second paramètre est l'adhésif ainsi que sa teneur massique. Un adhésif particulièrement efficace a été sélectionné et des essais d'optimisation du taux d'encollage ont visé à en minimiser la quantité. Pour rendre compte de l'encollage, des essais de cohésion interne permettent de mesurer l'efficacité avec laquelle l'adhésif lie les fibres au sein du réseau d'enchevêtrement. Ces résultats ont permis de sélectionner deux taux de colle. Une partie des paramètres de la formulation étant fixés, le pressage de grands panneaux est possible. Les grands panneaux sont pressés avec comme paramètres cibles les caractéristiques suivantes : une masse volumique (160 kg/m^3) pour une conductivité adéquate ($0.05 \text{ W/m} \cdot \text{K}$), une épaisseur pour une résistance thermique adéquate (4.5 cm) et deux taux de colles pour une résistance mécanique suffisante (4 & 6%). Pour compléter la formulation, de la paraffine est ajoutée pour garantir une hydrophobicité au matériau et une stabilité dimensionnelle accrue.

La seconde phase est l'évaluation du panneau formulé (deuxième ligne du plan expérimental schématique). Premièrement la conformité des quatre grands panneaux à la norme canadienne relative aux panneaux isolants en fibre de bois est partiellement vérifiée. Une série d'exigences est explorée, avec des essais de résistance mécanique comprenant la compression perpendiculaire à la surface, la flexion statique en trois points et la traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne). Enfin, la performance hydrique est évaluée sous la forme de perméabilité à la vapeur d'eau et d'absorption d'eau. Secondement le panneau se rapprochant le plus de la densité et des dimensions visées est intégré à une maquette traditionnelle de mur où il remplace le PSE. Cette maquette est testée dans une chambre biclimatique. Simulant une journée hivernale, la performance du panneau en termes de chaleur et d'humidité pourra être comparée avec l'essai précédant de la maquette comportant les isolants conventionnels.

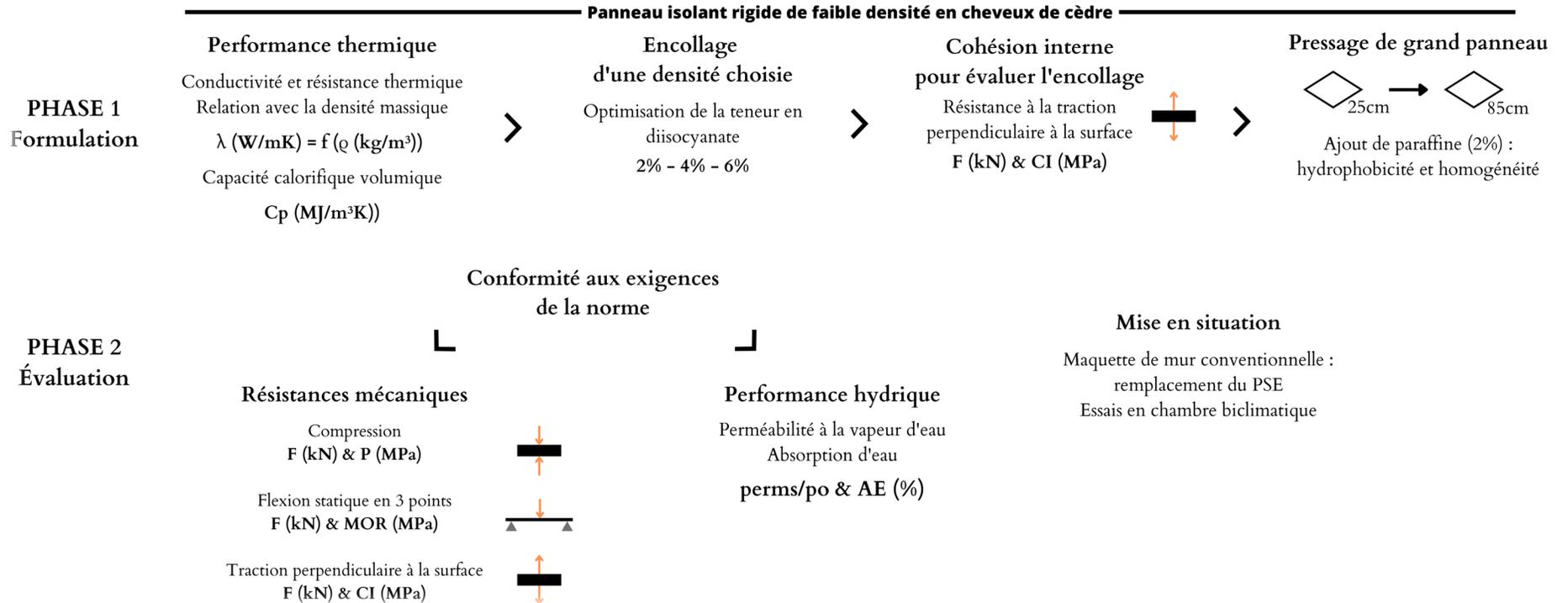
Le deuxième objectif (voir OP2 du plan expérimental schématique) est d'évaluer la variation de durabilité du matériau lorsqu'il subit différents traitements. La résistance antifongique est vérifiée par inoculation de moisissures de surface et incubation durant quatre semaines. Les traitements peuvent extraire ou dégrader des composés bioactifs antifongiques.

Le troisième objectif est d'explorer un processus de défibrage soit d'obtention de fibres celluloseuses à moindre coût énergétique. Pour cela différents traitements visant à ramollir les fibres sont appliqués puis le matériel est broyé et le profil granulométrique est déterminé (voir détails dans OP3 du plan expérimental schématique)

Le quatrième objectif est de conceptualiser un mur structurel et isolant à partir de bois lamellé croisé et de lames croisées décalées, intercalées avec de l'isolant. Étant anecdotique il est repris en annexe Figure 9-8.

Plan expérimental schématique

OP1



OP2

Durabilité

Résistance antifongique

Inoculation de champignons
lignivores

évaluation visuelle

Cheveux

secs

broyés

trempés et broyés

chauffés

chauffés et collés

OP3

Défilage

Obtention de fibres



Traitement avant broyage

Liquide	Ambient	Vapeur
Trempage	Bois vert	Autoclave
Bain-marie	Sec	Réacteur Parr



Défilage par broyeur à marteau
Selon trois mailles de grille

3/4 po 1/2 po 1/4 po



Criblage par tamiseur en colonne
Profil granulométrie

2. Matières premières et matériau de référence

1. Les copeaux de *Thuja occidentalis*, appelées « cheveux de cèdre »

L'appellation « cheveux de cèdre » est définie comme suit : copeaux filiformes résultants du passage axial de la scie dans les billons de *Thuja occidentalis*.

Historiquement les cheveux servent de paillis et d'isolant (les anciens récupéraient les copeaux de raboteuse pour les tasser dans les murs des maisons, entre les planches et sous les toits). Depuis 1992 les co-produits (écorces et cheveux) sont envoyés à Multifib pour faire du paillis horticole et des copeaux. Aujourd'hui il y a de la recherche pour innover avec les cheveux. Il peut aussi servir de rembourrage dans les emballages.

Le procédé spécifique à la production des cheveux est le suivant : La bille préalablement écorcée est segmentée en billons de 50 cm. Les billons sont convoyés aux postes occupés par les opérateurs qui scient les bardeaux. Le billon est positionné sur la tranche dans une presse sur rails afin d'être purgé de son aubier et pourritures éventuelles, avant d'être scié en bardeau par des mouvements d'aller-retour contre une grande scie à bardeaux. La coupe se fait dans le sens du grain selon un débit de type Cantibey (cf. figure 3-1, annexe figure 9-7). Ce qui est dénommé dans ce travail et dans le milieu du bardeau « mousse » ou « cheveux » de bois est le résultat du passage axial de la scie dans les tronçons de thuya. Ce sont les dents triangulaires des scies à bardeaux qui produisent ce connexe. Dans le cas de Multicèdre, les dents utilisées sont les bouts triangulaires « .120 kerf » de la marque Stellite. Ces cheveux s'apparentent à des longues et étroites rabotures ou copeaux d'environ 2.5 mm de large et jusqu'à 30 cm de long. Les bardeaux sont automatiquement sciés par un ordinateur dans le sens du fil, ensuite le scieur de bardeaux le réceptionne et purge les défauts en délinquant le bardeau dans la largeur.

Schéma du processus d'obtention des cheveux

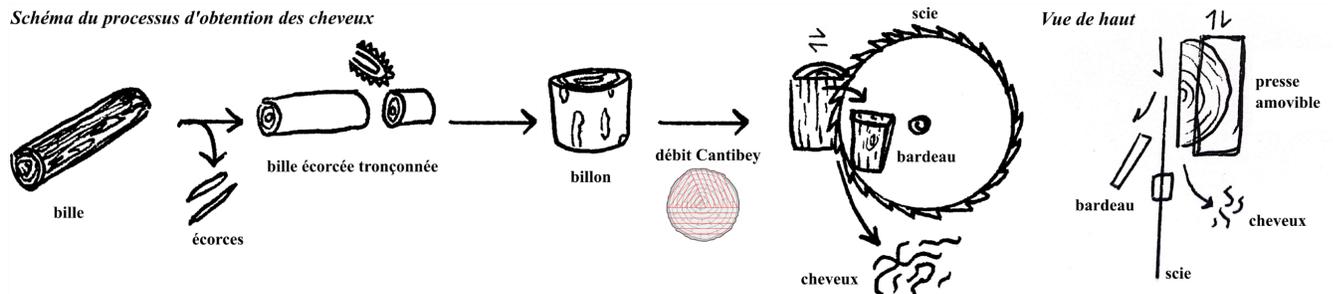


Figure 3-1 : Schéma du procédé de sciage de bardeaux générant les cheveux. Diagramme de l'auteur.

Caractérisation des cheveux de cèdre

Ces cheveux de cèdre sont caractérisés de deux manières. Pour la longueur des cheveux, les longueurs moyenne et maximale des cheveux sont déterminées par la mesure de 48 échantillons. Pour la composition d'un sac de connexes, un sac de 3.92 kg est divisé en une fraction de cheveux utilisables et une fraction de fines particules. La fraction de fonds de sac est criblée sur une colonne à tamis Gilson Testing Screens TS-1 de Gilson Company (Ohio, É.-U.) selon trois mailles de 6.3, 3.18 et 0.71 mm.

Mesure de l'humidité

La mesure de l'humidité est effectuée en trois répétitions de manière suivante : la masse est prise puis le matériel est placé à l'étuve à 103°C jusqu'à atteindre l'état anhydre en 24 ou 48 heures. La masse anhydre est mesurée et l'humidité moyenne est calculée par rapport à la masse anhydre.

2. Isolant de référence : l'ECO4

L'ECO4 est un panneau en fibre de bois recyclé de la gamme SONOclimat fabriqué par l'entreprise québécoise MSL. Performant au niveau thermique, acoustique, structurel et hygrométrique.

D'une masse volumique de 265 kg/m³ et d'une épaisseur de 1.5" (38.1 mm), le panneau a une résistance thermique (RSI) de 0.7 m²·K/W (R4 en système impérial). Au niveau des performances hygrométriques, la perméabilité à la vapeur d'eau est de 26 perms/po. L'absorption d'eau est en dessous des 5%. Concernant les propriétés mécaniques, la charge de rupture transversale dépasse 180 N, les résistances à la traction perpendiculaire et parallèle à la surface sont respectivement au-delà de 24 et 2275 kPa.

Un atout majeur de cet isolant est son contreventement de 5.84 kN/m permettant de remplacer à la fois l'isolant rigide et le panneau de contreventement (généralement de l'OSB) dans un assemblage de mur traditionnel.

3. OP1 : Développement de panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction

Phase 1 : Formulation

1. Caractérisation des performances thermiques

En physique du bâtiment, l'isolation s'exprime en résistance thermique surfacique en mètre carré-Kelvin par watt selon l'équation suivante :

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Équation 1 avec : **R** la résistance thermique surfacique RSI (K · m²/W) , **e** l'épaisseur (m) et **λ** la conductivité thermique CT (W/m · K)

En Amérique du Nord, la résistance thermique s'exprime en système impérial avec les unités suivantes : $R (Ft^2 \cdot ^\circ F \cdot h/B_{tu})$. Soit des pied carré-Fahrenheit-heures par unité thermique British (i.e. quantité d'énergie pour augmenter une livre d'eau de 1°F).

Dans ce travail, RSI désigne la résistance thermique en système métrique et R en système impérial.

Caractérisation de l'isolant de référence et évaluation des effets de bords de la sonde

Les mesures de CT sont effectuées avec un mesureur de flux de chaleur HFM-100 (Heat-Flow meter, Thermtest, Hanwell, Nouveau-Brunswick) conforme aux normes ASTM C518 (American Standards of Technical Material ; standards américains de matériel technique) et ISO 8301 (international standardisation office ; office international de normalisation)[54].

L'appareil est constitué de deux plaques parallèles d'environ 30 cm dont une à hauteur variable, toutes deux munies d'une sonde au milieu de 10.16 cm de côté (4"). Afin d'évaluer les effets de bords de la sonde, des panneaux d'ECO4 de 3 tailles différentes ont été mesurés en trois répétitions dans l'HFM-100. Les trois panneaux mesurent 30 cm (11.81"), 15 cm (5.90") et 10.16 cm (4") de côté. Le deuxième panneau sert à évaluer si les effets de bords sont négligeables à partir d'environ un pouce de dépassement par rapport à la sonde.

L'objectif de cette expérience est de mesurer la conductivité thermique de l'isolant de référence (ECO4) et de caractériser les effets de bords de la sonde. La sonde mesurant la température étant de 4" de côté et la chambre du mesureur de flux de chaleur étant de 12", trois dimensions

de panneaux ont été sélectionnés. Un premier panneau de 30 cm (11.8") est à la dimension maximale de la chambre de mesure. Un second panneau de 10.16 cm (4") permet de maximiser les effets de bords. Un dernier panneau de 15 cm (5.90") offre un dépassement de 0.9" autour de la sonde pour que la chaleur s'y dissipe. L'hypothèse est qu'un bord dépassant d'environ 1" suffit à négliger les effets de bords.

Relation entre conductivité thermique et masse volumique pour les cheveux en vrac

Afin d'établir la relation entre la CT et la masse volumique, les cheveux de cèdre sont densifiés selon une gamme de 35 à 265 kg/m³ et les cheveux broyés selon une gamme de 75 à 225 kg/m³. Un total de 11 densités est testé sur la gamme pour les cheveux et 7 densités pour les cheveux broyés. Conformément à la norme canadienne relative aux panneaux isolants en fibre de bois pour bâtiments CAN/ULC-S706.1:2020 (CAN signifie « Canada » et ULC « underwriters laboratories of Canada » ; laboratoire des assureurs du Canada), la conductivité est mesurée à une température moyenne de 24°C avec une variation de 14°C, s'étendant de 10 à 38 °C[55]. La matière première est conditionnée au minimum 72h dans une chambre à 23°C et 50% d'humidité relative.

De façon à obtenir la densité visée, la masse de cheveux correspondante au volume final est disposée en vrac dans un cadre en bois de 25x25x4.5 cm avant d'être compressée puis introduite dans le mesureur de flux de chaleur. Pour chaque densité, la mesure de conductivité est faite en deux répétitions. La capacité thermique volumique est mesurée en une répétition.

Les régressions linéaires ont été réalisées avec le logiciel GraphPad Prism 8.0.1. Le modèle linéaire générale a été réalisé avec MiniTab 21.4.1.

Pour l'analyse de résultats des tests statistiques, une différence est considérée non-significative (ns) pour une $P_{\text{valeur}} > 0.05$, significative (*) pour une $P_{\text{valeur}} < 0.05$, hautement significative (**) pour une $P_{\text{valeur}} < 0.01$ et très hautement significative (***) pour une $P_{\text{valeur}} < 0.001$.

Impact de différents traitements sur la conductivité

Un des objectifs de ce travail est de défibrer (i.e. enlever les fibres d'un tissu) les cheveux pour en améliorer la performance. Afin de déterminer si le défibrage offre un gain de conductivité et si le pressage à chaud impacte ce paramètre, une série de mesure sont faites.

Deux cadres d'une masse volumique de 100 kg/m³, le premier composé de cheveux défibré après trempage et criblé à ¼" et le second composé de cheveux défibrés après bain-marie et criblé à ¼" sont mesurés en deux répétitions. Deux panneaux de masses volumiques de 100 et 150 kg/m³ sont pressés durant 15 minutes à 220°C puis mesurés en deux répétitions.

La colle est plus conductive que le matériau. Un apport important de colle peut avoir un impact sur la conductivité. L'avantage du pMDI est de minimiser ce taux de colle et éventuellement d'avoir un impact négligeable.

Trois panneaux d'une masse volumique de 100 kg/m³ de taux d'encollages de 2, 4 et 6% sont mesurés en trois répétitions dans le mesureur de flux de chaleur. Deux séries de deux panneaux d'une masse volumique de 160 kg/m³ de taux d'encollage de 4 et 6% sont mesurés en trois répétitions. (voir « optimisation du taux d'encollage » pour le protocole d'encollage)

Les tests statistiques (analyse de la variance à un facteur) ont été réalisés avec le logiciel GraphPad Prism 8.0.1.

2. Optimisation du taux d'encollage

L'adhésion du bois est une composante critique de la formulation car les adhésifs pour le bois totalisent 65% des adhésifs utilisés globalement[56]. Les adhésifs usuels phénolformaldéhyde

du polymère permet de pénétrer le matériau en profondeur, jusqu'à 10 fois plus que des résines à base de phénol formaldéhyde[64]. Une tension superficielle faible comparée à l'eau, l'absence d'eau dans le MDI (qui sert à synthétiser le pMDI) ainsi qu'une faible viscosité confèrent au pMDI une bonne mobilité. L'ensemble de ces qualités permettent de minimiser la quantité d'adhésif à incorporer au panneau pour qu'il soit cohérent. L'évaluation de la cohérence sera basée sur des tests de cohésion interne.

C'est pour l'ensemble de ces raisons que les colles à base de diisocyanate sont utilisées en industrie. Elles ne nécessitent pas de quantité importante pour un encollage satisfaisant. Dans ce cas, un encollage satisfaisant signifie un panneau non friable, rigide et manipulable. L'objectif est de minimiser le taux de colle nécessaire à l'obtention d'un réseau d'enchevêtrement rigide tout en favorisant une réticulation optimale. La colle étant davantage conductrice que le matériau isolant, une importante proportion de colle augmenterait la CT ainsi que le coût de production. L'encollage de fines particules, copeaux et sciures offrent au panneau une friabilité, une fragilité et une propension à se délaminer en couches lors d'un stress longitudinal, soit un ensemble de qualités qu'il est préférable d'amoindrir. Ainsi les fines particules des fonds de sacs sont évitées au maximum.

Des cheveux de cèdre sont pulvérisés de pMDI avec un pistolet à peinture Dewalt DWMT70777 jusqu'à un pourcentage massique de 2, 4 et 6%. L'adhésif utilisé est le 4,4'-diisocyanate de diphénylméthane Lupranate M20 de la marque BASF (Anvers, Belgique). Ensuite les échantillons sont compactés dans un cadre de 4.5 cm d'épaisseur et 25 cm de côté pour des masses volumiques de 100 et 150 kg/m³. Les panneaux sont pressés en deux répétitions. L'échantillon est chauffé dans une presse par deux plaques à 180°C avec une sonde mesurant la température au cœur. Lorsque celle-ci atteint 120°C, le panneau est chauffé pendant 10 minutes.

À la suite des premiers résultats de cohésion interne, une volonté de maximiser l'encollage a mené à une augmentation de la température des plaques de 180 à 200°C et de la température à cœur de 120 à 140 °C. Avec une progression du front thermique d'environ 13 s/mm, le cœur met environ 10 à 15 minutes à atteindre 140°C. Une fois la valeur atteinte, la chauffe est maintenue pendant 10 minutes, ce qui devrait renforcer la réticulation. La masse volumique des nouveaux essais est augmentée de 150 à 160 kg/m³. Cela correspond à la limite inférieure exigée par la norme canadienne propre aux panneaux isolants à partir de fibre de bois. Ces nouveaux panneaux sont encollés à 2, 4 et 6% de colle en deux répétitions.

Phase 2 : Évaluation

3. Pressage des panneaux de grande dimension

Une fois la densité, l'épaisseur et les taux de colles fixés, ces paramètres peuvent être appliqués à des panneaux de dimensions supérieures. Les panneaux étant jusqu'ici de petite taille (25x25 cm), ces nouveaux panneaux de grande taille mesurent la taille maximale de la presse chauffante soit 85x85 cm. Les paramètres principaux de la formulation étant en partie fixés, des essais avec ajout de 2% de paraffine sont réalisés. Le rôle de la paraffine est d'augmenter l'hydrophobicité du matériau et de favoriser la stabilité dimensionnelle. La paraffine utilisée est la Walker Norwax S27 (Burlington, Ontario). La chambre de conditionnement ne pouvant accueillir autant de matière, les cheveux sont séchés en atelier jusqu'à une humidité de 4.87 ± 0.74 % (n=3). De température et d'humidité variable, l'atelier se situe généralement à 24°C et 40 % d'HR.

Deux panneaux de 6% de pMDI sont pressés avec une masse volumique visée de 160 kg/m³. Ensuite un panneau de 4% de pMDI est pressé avec la même densité visée. La dimension du cadre de pressage est de 4.5x85x85 cm.

La masse de cheveux correspondante au volume final selon le taux d'encollage est pesée puis divisée en batch de maximum 2 kg. Chaque batch est inséré dans un tambour rotatif, dont la rotation est pilotée par un Pentadrive DC motor speed control sur 100%. Le tambour est actionné sur sa vitesse maximale et munis de deux buses de pulvérisations. Le pompage de l'adhésif et de la paraffine est assuré par une pompe péristaltique Coleparmer masterflex modèle 77 800 60. La masse d'adhésif et de pMDI est calculée selon la masse de matériau et les deux sont pulvérisées sur les cheveux avec un débit maximal d'air et un débit minimal de liquide. Une fois l'ensemble de la masse pulvérisée, les cheveux sont compactés dans un cadre munis d'un coffrage avant d'être inséré dans une presse chauffante de Dieffenbacher North America inc. Modèle Arc 650 (Windsor, Ontario, 2003). Les plaques sont chauffées à 200°C, abaissées selon un contrôle manuel jusqu'au contact avec le cadre. Le panneau est chauffé pendant 30 minutes afin d'assurer que le cœur atteigne 140°C. Une fois encollé, le panneau est sorti et environ 5 cm des bords sont coupés pour enlever les effets de bords.

Pour le quatrième grand panneau (soit le deuxième à 4%), une tentative d'optimisation des étapes de fabrication eut lieu. La pompe péristaltique est remplacée par une cuve à pression de pulvérisation Spraying Systems Co. (Wheaton, Illinois), la vitesse du tambour et la pression de pulvérisation sont maximisés tandis que le débit d'adhésif est minimisé. Une fois les cheveux pulvérisés de paraffine et de pMDI, ils sont pré-pressés dans une presse à froid afin d'obtenir un matelas. Après 2h de pré-pressage le matelas est retiré et introduit dans la presse chauffante. Cette dernière est programmée pour descendre à 4.5 cm d'épaisseur sur une durée de 30 minutes, avec des plaques à 200°C.

Une fois pressés, les panneaux 4-144, 4-208 et 6-250 sont découpés selon un plan de découpe en échantillons pour la batterie de tests d'évaluation. Le panneau 6-175 reste intègre et est ajouté à une maquette (voir « performance au sein d'une maquette »).

4. Résistance mécanique

Traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne)

Le test de cohésion interne a été appliqué pour évaluer l'efficacité du taux d'encollage. Ces essais de traction perpendiculaire à la surface sont conformes sont réalisés sur un banc d'essai Instron 5969 (Norwood, MA) équipé d'un capteur de force de 1 kN. La méthode appliquée est celle de la norme ASTM D1037-12 :2020 sur l'évaluation des propriétés de panneaux à base de fibre de bois et de particules[65].

Les échantillons mesurent 50x50x45 mm. Ils sont mesurés et pesés avant essais afin de s'assurer que la densité soit équivalente à la densité finale du panneau. Les échantillons sont testés minimum 48h après encollage au pMDI pour assurer une prise totale. Ils sont ensuite collés avec une colle thermofusible aux deux extrémités à des blocs de chargement en aluminium. L'adhésif choisit excède la force cohésive du matériel afin que la rupture s'opère au sein du matériau. Le bloc est ensuite engagé dans le banc d'essai et stressé de façon perpendiculaire à une vitesse de 0.08 cm/cm d'épaisseur par minute jusqu'à la rupture.

La valeur de force de cohésion interne, exprimée en MPa, est calculée de la façon suivante :

$$CI = \frac{P_{max}}{ab}$$

Équation 2 avec : **CI** la cohésion interne (MPa), **P_{max}** la charge maximale (N), **a** la largeur (mm) et **b** la longueur (mm).

Les échantillons testés et le nombre de répétitions par panneau sont affichés en table 5 & 6.

Résistance à la compression

Les essais de résistance à la compression sont appliqués selon le protocole de la norme ASTM C165, mode opératoire A[66]. Le banc d'essai est équipé d'un capteur de force de 50 kN.

Quatre échantillons carrés de 15 cm de côté sont découpés à partir du même panneau. Trois panneaux sont évalués : 4-144, 4-208 et 6-250. Les échantillons sont placés entre les surfaces de chargement du banc d'essai. La traverse est réglée à une vitesse de 1.27 mm/min. Le matériau est comprimé et la charge ainsi que la déformation sont enregistrés. La compression prend fin lorsque la limite du capteur de force est atteinte s'il n'y a pas rupture du matériau. Le résultat du test est une déformation en compression prédéfinie de 10%, exprimée en kPa.

Flexion statique en 3 points (charge transversale de rupture)

Les essais de flexion statique sont appliqués selon le protocole ASTM C209[67]. L'appareil est équipé d'un capteur de force de 50 kN et d'un banc d'essai à trois points en têtes rondes.

Trois échantillons de 7.62x8.1 cm (3"x15") sont découpés à partir du même panneau. Trois panneaux sont évalués : 4-144, 4-208 et 6-250. L'échantillon est placé sur les deux points d'appuis rond d'une portée de 30.48 cm (12") ensuite une force est appliquée à la mi-portée par une tête ronde à une vitesse de 152 mm/min jusqu'à la rupture.

Le module de rupture est calculé avec l'équation simplifiée suivante :

$$MOR = \frac{6F}{e^2}$$

Équation 3 avec : **MOR** le module de rupture (MPa), **F** la force maximale appliquée (N) et **e** l'épaisseur (mm)

5. Performances hydriques

Mesure de la perméance à la vapeur d'eau

Le protocole de cet essai est conforme à la norme ASTM E96 relative à la transmission de vapeur d'eau des matériaux[68]. Le plateau d'essai est d'une ouverture de 29.21 cm (11.5") et muni en son centre d'un renforcement de 2cm de profondeur et 20.32 cm (8") de côté. L'ouverture est comblée par le matériau à évaluer et le renforcement accueille le sel dessiccant. Le sel dessiccant utilisé est le chlorure de calcium CaCl₂ anhydre en grains Sigma-Aldrich (Mexique). Le plateau d'essai est rempli de sel jusqu'à 6 mm de l'échantillon. Un échantillon de 28.70 cm de côté dont les bords sont couverts par du ruban adhésif étanche est attaché à l'ouverture par des joints de silicone. De cette façon la vapeur d'eau migre exclusivement au travers du matériau sans chemin préférentiel ni effets de bords. Le plateau est alors placé en chambre de conditionnement à 23°C & 50% HR. Le poids est mesuré toutes les 24h pendant une dizaine de jours et le test prend fin lorsque le taux de variation de prise de masse est constant. Les échantillons sont mesurés en trois répétitions (n=3).

Pour les calculs, la valeur absolue de la pente de la variation de masse (g) sur le temps (h) est divisée par la surface pour obtenir la transmission de la vapeur d'eau (g/h · m²). La perméance (g/Pa · s · m²) est calculée selon le produit de la transmission de vapeur d'eau et un coefficient calculé à partir de la pression de vapeur saturante à la température du test (21 mmHg soit 2799.77 Pa pour 23°C) et les humidités relatives de la barquette (HR=1) et de la chambre de conditionnement (HR=0.5) et le temps (3600s pour 1h) selon l'équation suivante :

$$\delta = \frac{TVE \cdot 10^9}{P \cdot \Delta HR \cdot 3600}$$

Équation 4 avec : δ la perméance ($ng/Pa \cdot s \cdot m^2$), **TVE** la transmission de la vapeur d'eau ($\frac{g}{h} \cdot m^2$), **P** la pression de vapeur saturante (Pa) et ΔHR la variation d'humidité relative

La perméance en système métrique est convertie en perméance en système impériale selon le coefficient suivant : $1 ng/Pa \cdot s \cdot m^2 \approx 0.0174784$ US perms.

Le coefficient de résistance à la diffusion de la vapeur d'eau μ est calculé en faisant le rapport entre la perméabilité de l'air et la perméabilité du matériau. La perméabilité de l'air à 23°C et pour la surface de l'échantillon ($0.0824 m^2$) vaut $303.25 ng/m^2 \cdot s \cdot Pa$.

Mesure de l'absorption d'eau

La mesure de la stabilité dimensionnelle lors d'absorption d'eau est effectuée conformément à la norme ASTM C209 par la méthode de retrait-gonflement[67]. Trois échantillons de 29.21 cm (11.5") de côté sont découpés à partir du même panneau et conditionnés à 23°C & 50% HR. La masse est pesée et l'épaisseur est mesurée avec un palpeur Absolute ID-51015E de Mitutoyo (Ontario, Canada). Le volume est calculé à l'aide des mesures. Ensuite l'échantillon est submergé horizontalement sous 2.54 cm (1") d'eau à 23°C pendant deux heures. L'échantillon est alors sorti de l'eau et pesé avant d'être submergé à nouveau durant 24h. La quantité d'eau absorbée est calculée par l'augmentation de la masse de l'échantillon durant la submersion. La sorption d'eau est exprimée en tant que pourcentage du volume par rapport au volume après conditionnement.

6. Performance au sein d'une maquette

Caractérisation des performances au sein d'une chambre biclimatique

La maquette de mur passive comporte deux isolants pour atteindre une R-40. L'isolant principal est la laine de verre et offre une R-38. L'isolant secondaire, servant à couper les ponts thermiques dus aux montants en bois, est le polystyrène expansé et offre une R-4. Le schéma 3D et la vue en coupe de la maquette (figure 3-3) ont été réalisés préalablement dans le cadre de recherches du SEREX avec le logiciel Ubakus.

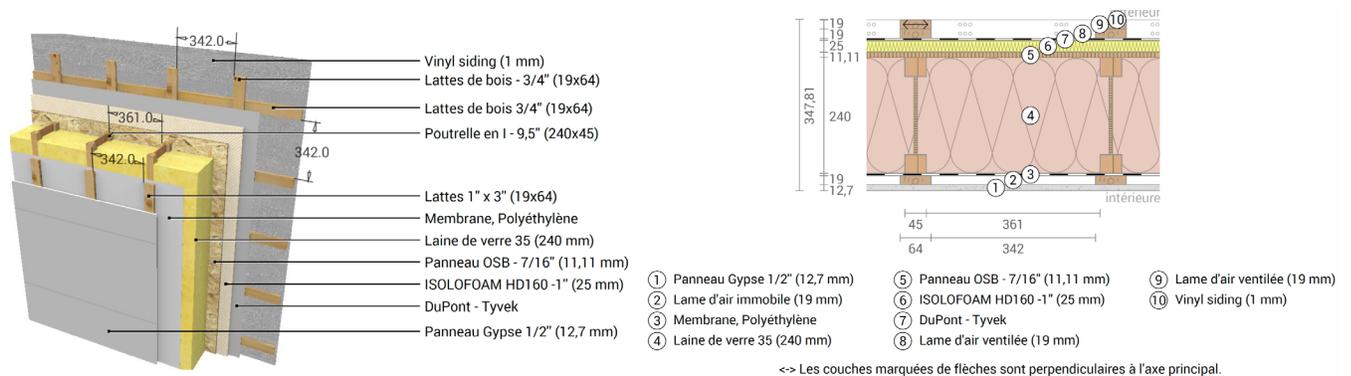


Figure 3-3. Schéma 3D et coupe de mur de la maquette de mur conventionnel passive (R-40) réalisés avec le logiciel Ubakus par le SEREX.

L'objectif est de reprendre cette maquette et d'y remplacer le PSE (Isofoam HD160-1") par le panneau formulé 6-175 (cf. table 4) afin d'en évaluer la performance en situation simulée. La maquette a été testée conformément à la norme ASTM C1363 dans une chambre biclimatique avec des conditions statiques (21°C et 50% d'HR d'un côté du mur et -18°C de l'autre côté)[69]. Des sondes mesurant les flux de chaleur, l'hygrométrie et la température sont placées à différents endroits du mur et l'essai prend fin lorsque les conditions sont stabilisées.

7. Isolation acoustique

La mesure de l'absorption de l'énergie acoustique a été effectuée par une cabine de test acoustique Mecanum (Sherbrooke, Québec). L'échantillon est le 4-208, mesuré en cinq répétitions (n=5). Chaque mesure consiste en 12 signaux de 5 secondes de 110 dB captés par des micros de haute précision. Le résultat obtenu est un coefficient de réduction du bruit allant de 0 à 1, 0 étant un matériau réfléchissant et 1 un matériau absorbant toute l'énergie acoustique.

8. Combustion superficielle

La norme ULC/CAN-S706 préconise d'évaluer la combustion superficielle selon la norme ULC/CAN-S702, semblable à la norme américaine ASTM E84[70]. Le SEREX ne disposant pas de l'appareil adéquat, une première approche est possible avec un tunnel de flamme de deux pieds conforme à la norme D-3806[71].

Des échantillons de 10x60 cm (4x24") sont extraits des panneaux 4-144 et 4-208 puis conditionnées au minimum 5 jours à 23°C & 50% HR. Les échantillons sont ensuite introduits dans le porte échantillon incliné à 45°. Le brûleur disposé à la base du tunnel est allumé et la propagation de la flamme est mesurée toutes les 15 secondes durant 4 minutes. Les deux faces sont évaluées. Une moyenne des trois valeurs les plus élevées de longueur de flamme permet de calculer l'indice de propagation de la flamme (IPF) selon la combustion superficielle de MDF ignifuge servant de référence.

4. OP2 : Détermination de la résistance fongique

La durabilité du thuya est évaluée selon la méthode de test standard de la norme ASTM C1338 relative à la détermination de la résistance fongique de matériaux d'isolants et parements[72]. L'objectif est de favoriser la croissance de champignons lignivores durant une période d'incubation suffisante et d'observer si le développement de moisissures fut plus ou moins importante sur le matériau testé comparativement à un bois de référence. L'évaluation du test est visuelle et le test est qualitatif. L'hypothèse explorée est qu'une extraction (ou dégradation) des molécules bioactives antifongiques a pu avoir lieu lors de la transformation, impactant la durabilité. Le trempage, soit une macération à froid dans un solvant polaire – l'eau – extrait une fraction des extractibles polaires. Le chauffage évapore une fraction volatile des extractibles ou dégrade les composés thermolabiles. Le broyage, par échauffement des fibres, peut également évaporer une fraction volatile des molécules bioactives. Ainsi les échantillons sont les suivants : des cheveux en vrac (aucun traitement), des cheveux broyés (à ¼"), des cheveux défibrés par trempage puis broyage (72h minimum dans de l'eau tempérée, broyage ¼"), des cheveux chauffés (220°C durant 15 minutes) et des cheveux collés (6% pMDI, pressé à 200°C pendant 25 minutes).

Les matériaux testés sont disposés dans des boîtes de pétri en trois répétitions. Dans un laboratoire de biosécurité de niveau deux, 0.50 ml d'une solution de 50 ml comprenant 10 ml de 5 cultures (*Aspergillus niger*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium funiculosom* & *Chaetomium globosum*) est atomisée sur chaque échantillon. Une fois inoculés, les échantillons sont incubés à 30 ± 2 °C pour une période de 28 jours ± 8 h. Après 7 jours une inspection de contrôle a permis de vérifier si l'inoculation est effective en regardant si les

champignons se développent sur le matériel comparatif de référence, dans ce cas le pin jaune¹. Au terme de la période d'incubation les échantillons sont inspectés à un grossissement de 40x. Les échantillons ayant une croissance supérieure au matériel comparatif sont considérés comme ayant échoué le test. À l'inverse, ceux présentant une croissance inférieure à la référence sont considérés comme ayant passé le test.

5. OP3 : Procédé de défibrage à faible coût énergétique

Actuellement l'obtention de fibre de haute qualité en industrie se fait par raffinage. Un raffineur à disques est alimenté par des moteurs d'une puissance de 10-30 MW[73]. La consommation moyenne d'électricité des usines de pâtes à papier est de 2850 kWh/T au Canada[74]. Une majeure partie de cette énergie est due au raffinage. Cette haute consommation énergétique se traduit par un coût d'utilisation élevé et les petites et moyennes entreprises sont en recherche d'alternatives plus économes en ressources. Il semblerait qu'en ramollissant le bois avec de la vapeur d'eau il soit possible d'obtenir des fibres par broyage. La vapeur peut théoriquement être issue des chambres de séchage dont les scieries disposent. Ainsi avec un broyeur à marteau ou à couteaux il serait possible d'obtenir à moindre coût des fibres. L'objectif de cette expérience est d'appliquer différents traitements aux cheveux puis de les broyer afin de les transformer en fibres (i.e. défibrer).

Les cheveux sont conditionnés de plusieurs manières avant d'être broyé dans un broyeur à marteau MacKissic, Inc. Modèle 12 P/PT/PE (Pennsylvanie, États-Unis). Les différents conditionnements comprennent dans la voie sans traitement des cheveux séchés (conditionnés à 23°C & 50%HR) et des cheveux fraîchement sciés dit « bois verts » (moins de 4h entre le sciage et le broyage). Pour le traitement liquide les cheveux sont trempés dans de l'eau à température ambiante pendant minimum 72h et un premier batch est broyé tel quel. Un autre batch est trempé dans les mêmes modalités avant d'être trempé dans un bain marie dans de l'eau frémissante (T~90°C) pendant 30 minutes. Pour le traitement humide par vapeur, la première modalité est un traitement à l'autoclave (Modèle STEM-L de Market Forge, Massachusetts, É.-U.) 2h à 121°C. La seconde modalité est un traitement par vapeur à haute pression à l'aide d'un réacteur Parr 4554 (Illinois, É.-U.) à 150°C et 150 Psi durant 30 minutes sur des cheveux préalablement trempés dans de l'eau minimum 1h.

Le rôle du traitement à l'eau liquide est de ramollir les cheveux pour permettre leur défibrage dans le sens axial. Autrement le cheveu est défibré transversalement et simplement raccourci, comme c'est le cas avec les cheveux secs. Le traitement par vapeur a pour rôle de décomposer la lignine qui sert de « liant » aux polymères de cellulose et d'hémicellulose et ce jusqu'aux fibres au cœur du bois[75]. Une fois le matériau sorti de la chambre de vapeur (autoclave ou réacteur Parr), il s'agit de le broyer avant que la lignine ne resolidifie et ne rende à nouveau cassante les fibres. Lors des essais à l'autoclave et au réacteur Parr, les fibres passent moins d'une minute entre le traitement humide et le broyage.

¹ L'espèce, difficilement différenciable, est comprise parmi : *Pinus elliottii*, *Pinus taeda* et *Pinus echinata*

4. RÉSULTATS

1. Caractérisation de la matière première

Les cheveux de cèdre, ces longs copeaux, mesurent en moyenne 2.41 ± 0.11 mm de largeur et 15.77 ± 5.21 cm de long ($n = 48$). Sur le batch mesuré, la longueur maximale est de 31.1 cm. Ce matériau s'apparente à de la laine de bois.

Le sac de 3.92 kg de connexe est composé de 3.40 kg de cheveux utilisables et de 523.89 g de fines particules (moins de 6.3 mm). Ces dernières sont composées majoritairement de particules entre 3.18 mm et 710 microns. Le détail de cette composition est disponible en figure 4-1.

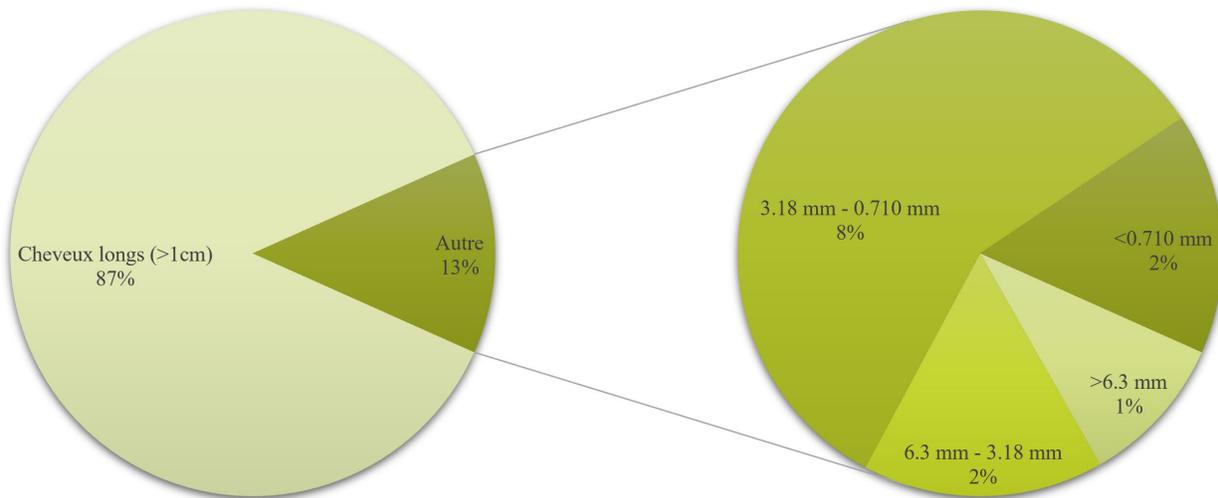


Figure 4-1. Composition d'un sac de 3.92 kg en cheveux longs et en fines particules. La fraction de fines particules est subdivisée en fractions granulométriques selon la maille de criblage.

Le taux d'humidité du matériau 4h après sciage est de 34.71% de la masse anhydre (cf. Table 1). Cette teneur diminue relativement lentement modulant les conditions de stockage. Après 45 jours dans un sac ouvert l'humidité a diminué de plus de la moitié. Une fois conditionnés, la valeur stable de 10.26% est obtenue. Ce sont les cheveux conditionnés qui ont servi à réaliser toutes les expérimentations à l'exception des 4 grands panneaux.

Table 1. Taux d'humidités moyen des échantillons de cheveux de cèdre

Échantillon	Taux d'humidité moyen (%)
Cheveux de cèdre secs	6.03 ± 0.5
Cheveux de cèdre conditionnés à 23°C & 50% HR	10.26 ± 0.74
Cheveux de cèdre verts après 4 heures	34.71 ± 1.14
Cheveux de cèdre verts après 45 jours	15.7 ± 3.39
Moyenne \pm écart-type (n=3)	

2. OP1 : Développement de panneaux de faible densité à base de coproduits du sciage du cèdre pouvant être utilisés comme matériau isolant de construction

Phase 1 : Formulation

1. Caractérisation des performances thermiques

Caractérisation de l'isolant de référence et évaluation des effets de bords de la sonde

Une CT de 0.0482 W/m · K a été mesurée pour l'ECO4 mesurant la taille de la chambre du mesureur de flux de chaleur (cf. Table 2). La différence entre la conductivité pour les panneaux de 30 et 15 cm est de 1.0 % pour un coefficient de variation de 0.5 % sur les mesures en trois répétitions. Il y a un gain net (près de 14 %) en conductivité entre le panneau de la taille de la sonde et les autres. Des épaisseurs moyennes de 36.56, 36.13 et 35.7 sont obtenus pour les panneaux de 30, 15 et 10.16 cm respectivement. Il est possible qu'avec la diminution de la dimension du panneau, la force de la presse permet de comprimer davantage l'échantillon. Ces variations d'épaisseurs liées au pressage expliquent les variations en résistance thermique mesurée.

Table 2. valeurs de conductivité et de résistance thermique pour différentes tailles de côté de panneaux carrés d'isolant de référence ECO4.

Taille (cm – po)	Conductivité thermique (W/m · K)	Résistance thermique (m ² K/W)
30 – 11.81	0.0482 ± 2.65E-04	0.758 ± 3.68E-03
15 – 5.9	0.0487 ± 1.00E-04	0.741 ± 8.96E-04
10.16 – 4	0.0554 ± 2.89E-04	0.643 ± 1.19E-03
Fiche technique	0.0544	0.7
Moyenne ± écart-type (n=3)		

Relation entre masse volumique et conductivité thermique

Avec l'ensemble des mesures de CT sur les cheveux en vrac, une relation linéaire a pu être établie entre la CT et la masse volumique avec un coefficient de détermination (R²) de 0.9288 et suit l'équation suivante :

$$\lambda = \rho * 7.419 * 10^{-5} + 0.03894$$

Équation 5 avec : λ la conductivité thermique CT (W/m · K) et ρ la masse volumique (kg/m³)

Un graphique en figure 4-2 permet de visuellement rendre compte de la différence apparente de conductivité entre cheveux en vrac et cheveux broyé. Pour une gamme de masse volumique de 35 kg/m³ à 265 kg/m³ pour les cheveux en vrac et de 75 kg/m³ à 225 kg/m³ pour les cheveux broyés, une relation linéaire est observée. Pour une masse volumique équivalente à l'ECO4, la CT des cheveux est supérieure (0.0589 contre 0.0482 W/m · K).

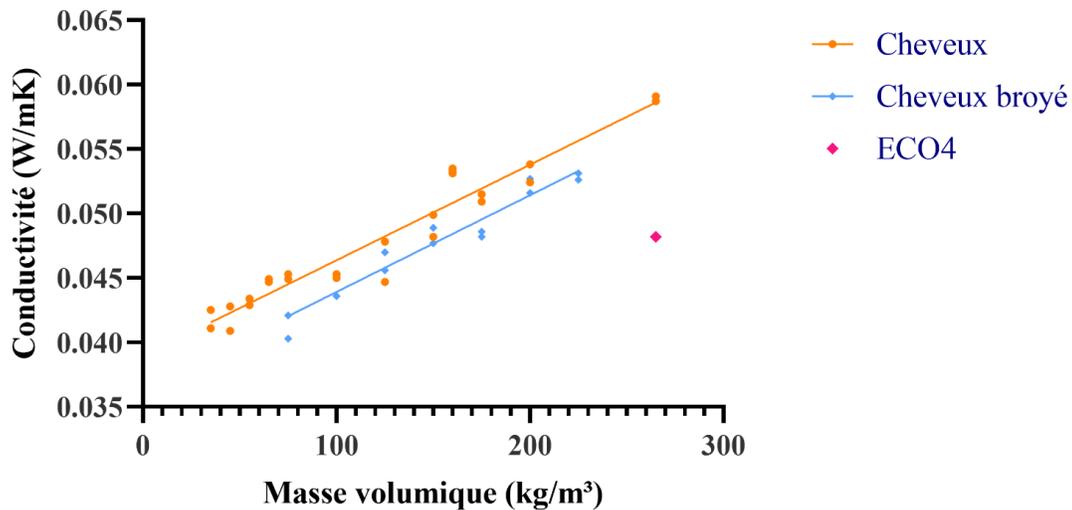


Figure 4-2 : Conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour des cheveux en vrac ($R^2 = 0.9288$) et des cheveux broyés ($R^2 = 0.9396$) avec comme valeur comparative la conductivité de l'ECO4. Chaque point correspond à une mesure.

Le modèle linéaire général avec comme facteur le type de cheveux et comme variable la masse volumique indique qu'il existe une différence très hautement significative entre les types de cheveux. Pour les cheveux en vrac et les cheveux broyés, le coefficient de régression est le même (pente de la droite) ce qui indique que l'effet de la masse volumique sur la CT est identique. La CT des cheveux broyé est inférieure à celle des cheveux en vrac d'une différence constante de 0.0024.

Impact de l'encollage sur la conductivité thermique

Pour la masse volumique de 100 kg/m^3 , l'analyse graphique des valeurs laisse supposer un gain en CT avec l'ajout de 4 et 6% d'adhésif (cf. Figure 4-3, graph. de gauche). L'analyse de variance à un facteur rapporte qu'il n'y a pas de différence significative ($P_{\text{valeur}} = 0.0652$) de CT due à l'encollage. La masse volumique à 160 kg/m^3 rapporte une CT plus importante pour 6% que la référence (cheveux vrac) et moins importante pour 4% (cf. Figure 4-3, graph. de droite). L'analyse de variance à un facteur indique une différence très hautement significative ($P_{\text{valeur}} = 0.001$) de CT entre les modalités.

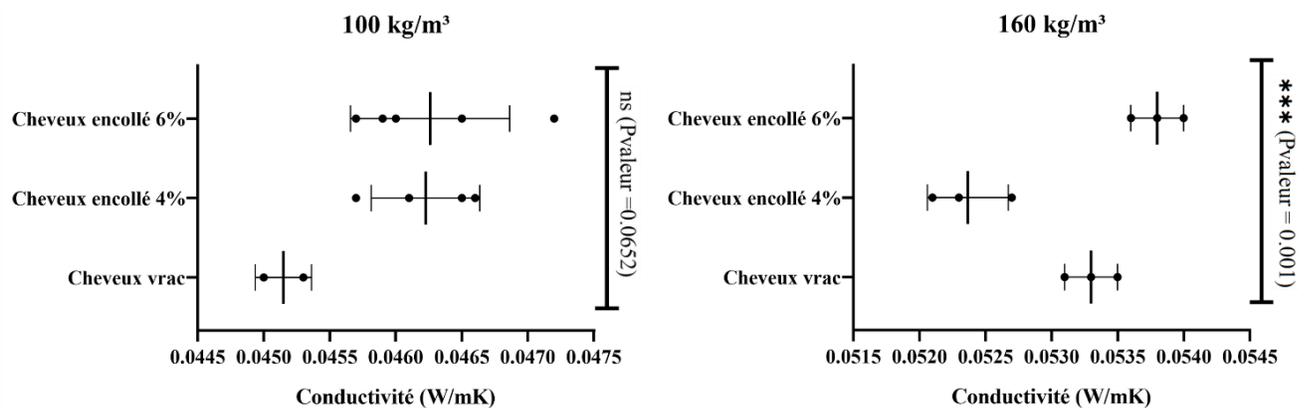


Figure 4-3. Conductivité thermique pour deux masses volumiques (100 et 160 kg/m^3) et deux taux d'encollages (4 et 6%) comparés aux cheveux en vrac. P valeur résultante de l'analyse de la variance à un facteur.

Un diagramme d'Ashby récupéré dans la littérature et complété avec les données précédentes permet de comparer les cheveux de thuya aux isolants usuels (cf. Figure 4-4). Pour une densité comprise entre le polyuréthane (PU) et l'argile expansé, le cheveu offre une CT proche au PU

pour une densité extrêmement faible et tendant vers le liège, comparable sur toute la gamme de densité étudiée à la fibre de bois. À l'échelle globale il se situe dans le ventre mou de la tendance générale de l'ensemble des matériaux présentés. Comparativement aux isolants biosourcés les cheveux de cèdre se situe dans le bas de la tendance (faible densité et faible CT).

Les valeurs présentées dans ce diagramme valent pour une température inconnue. Les valeurs rajoutées valent pour une température de 24°C. Pour une température plus faible les valeurs de CT varient. Dans le cas des mousses tels le PU ou le PSE, la CT chute aux basses températures.

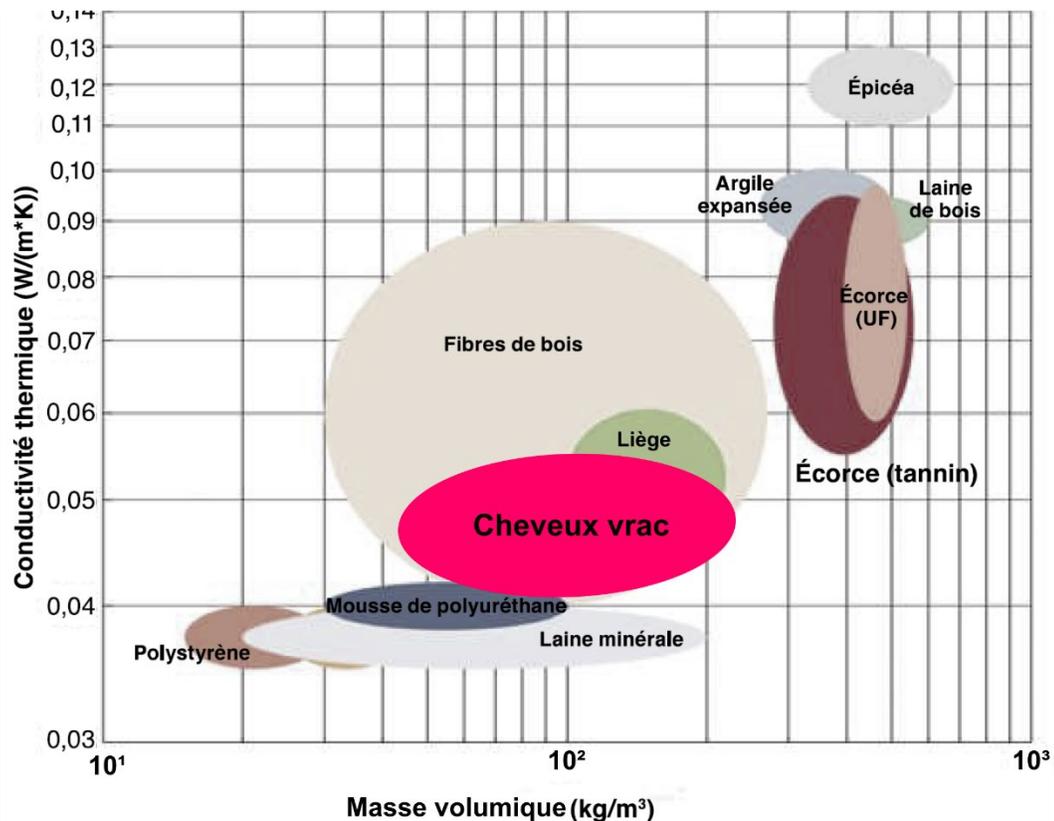


Figure 4-4 : Diagramme d'Asbhy de la conductivité thermique de divers matériaux isolants comparés aux cheveux en vrac (tache rose). Les données correspondent à celles de Pfundstein et al. (2007)[76] et de Kain (2016)[77] pour l'écorce.

Résistance thermique

Pour chaque CT mesurée, le mesureur de flux de chaleur donne une valeur de R. Celle-ci est comparée graphiquement en figure 4-5 avec le R calculé à partir de la CT mesurée si l'épaisseur est maintenue à 4.5 cm. Pour la masse volumique de 265 kg/m³, la résistance thermique calculée pour les cheveux en vrac se rapproche de la R annoncée de l'ECO4.

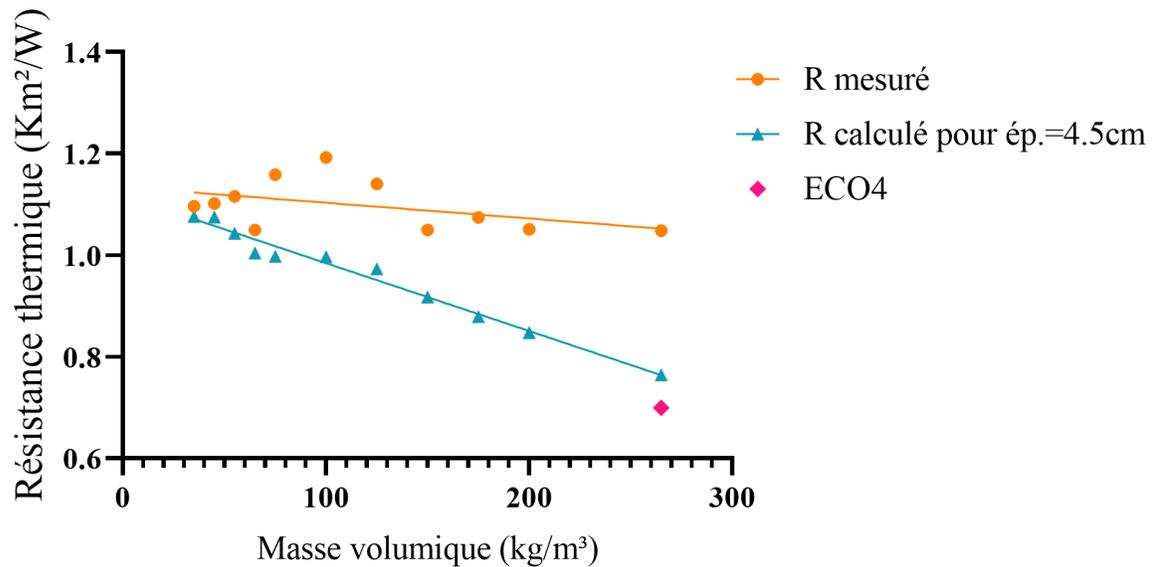


Figure 4-5 : Résistance thermique des cheveux en vrac mesurée selon l'épaisseur variable du cadre (rond orange) et calculée pour une épaisseur constante de 4.5 cm (triangle bleu) avec comme valeur comparative la résistance thermique de l'ECO4 (losange rose)

Chaleur spécifique

Une capacité calorifique volumique de $167.4 \text{ kJ/m}^3 \cdot \text{K}$ a été obtenue pour le panneau de 160 kg/m^3 et 4% de pMDI. Cette valeur est supérieure à la laine de bois qui est à $120 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ et inférieure à la fibre de bois densifié qui peut atteindre $350 \text{ kJ/m}^3\text{K}$.

Comparativement aux isolants conventionnels, la laine de verre est à $17 \text{ kJ/m}^3\text{K}$ et le polystyrène à $21 \text{ kJ/m}^3\text{K}$. Les cheveux de cèdre offrent une inertie thermique plus importante que ces isolants mais moindre que la fibre de bois, selon les densités considérées.

Comparaison avec ECO4

La table 3 reprend la CT, la R et RSI, la densité et l'épaisseur du petit panneau collé à 6% comparé avec l'ECO4. La CT mesurée sur le panneau collé à 6% est plus importante que celle de l'ECO4. En revanche, d'une épaisseur plus importante, le panneau collé offre une R-4.6. Cela signifie qu'une R-4 est garanti avec un coefficient de sécurité de 15%.

Table 3. Comparaison entre l'ECO4 et les cheveux encollés pour une conductivité proche.

	Conductivité (W/m·K)	Résistance thermique RSI (K·m²/W) Résistance impériale R (hr·pi²·F/B _{tu})	masse volumique (kg/m³)	Épaisseur
ECO4	0.0482	RSI-0.75 R-4.27 ($\gamma_{\text{sécurité}} = 6.75\%$)	265	38.1 mm 1.5"
Cheveux collé (6% pMDI)	0.0521	RSI-0.81 R-4.60 ($\gamma_{\text{sécurité}} = 15\%$)	160	45 mm 1.7"

$\gamma_{\text{sécurité}} = \text{coefficient de sécurité}$

2. Optimisation du taux d'encollage

Le taux d'encollage est évalué par les essais de cohésion interne (sous-chapitre 4 – résistance mécanique, section traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne)). Les essais de 2% ont été abandonnés à cause du taux insuffisant d'échantillons arrivant jusqu'au banc d'essai.

3. Pressage des panneaux de grande dimension

Les quatre grands panneaux qui ont été pressés sont munis d'identifiants, listés en table 4, pour en faciliter la référence dans le texte. Des photographies de trois des panneaux sont disponibles en figure 4-6.

Pour une masse volumique visée de 160 kg/m³ deux panneaux s'en rapproche de presque 10% (4-144 et 6-175) et deux panneaux ont une masse volumique au dessus de 200 kg/m³. L'épaisseur visée est de 4.5 cm et trois des panneaux en sont proche à l'exception du 6-250 qui a été trop pressé et sur-densifié.

Le 4-144 a été pressé en dernier avec une tentative d'optimisation de chaque étape de l'encollage. La masse volumique est inférieure à la masse volumique visée et l'épaisseur correspond à l'épaisseur visée.

Table 4. Identifiants et caractéristiques physique des quatre panneaux de grande dimension

Identifiant	Teneur pMDI (%)	masse volumique (kg/m ³)	Épaisseur (cm – po)
4-144	4	144.73	4.43 – 1.73
4-208	4	208.39	4.74 – 1.86
6-175	6	175.86	4.84 – 1.90
6-250	6	249.68	3.87 – 1.52
Valeur cible	4 & 6	160.00	4.50 – 1.77



6-175



6-250



4-144

Figure 4-6. Photographies des grands panneaux formulés (excepté 4-208). L'identifiant tient compte de la teneur en adhésif (4 ou 6%) et de la masse volumique du panneau.

Phase 2 : Évaluation

4. Résistance mécanique

Traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne)

Les valeurs de cohésions internes sont reprises graphiquement dans la figure 4-7 et sont détaillées dans la table 5 pour les petits panneaux et la table 6 pour les grands panneaux. Celle-ci sont particulièrement faibles. Les échantillons des panneaux de petites dimensions sont repris sur le graphique (a) de la figure 4-5 et ceux des grands panneaux sur le graphique (b). Les nombre de répétitions variables s'expliquent par le taux de survie assez faible des échantillons entre leur découpe et leur installation dans le banc d'essai (cf. Table 5 & 6). Pour le panneau 6-250, un échantillon a donné la valeur maximale de CI de 15.28 kPa.

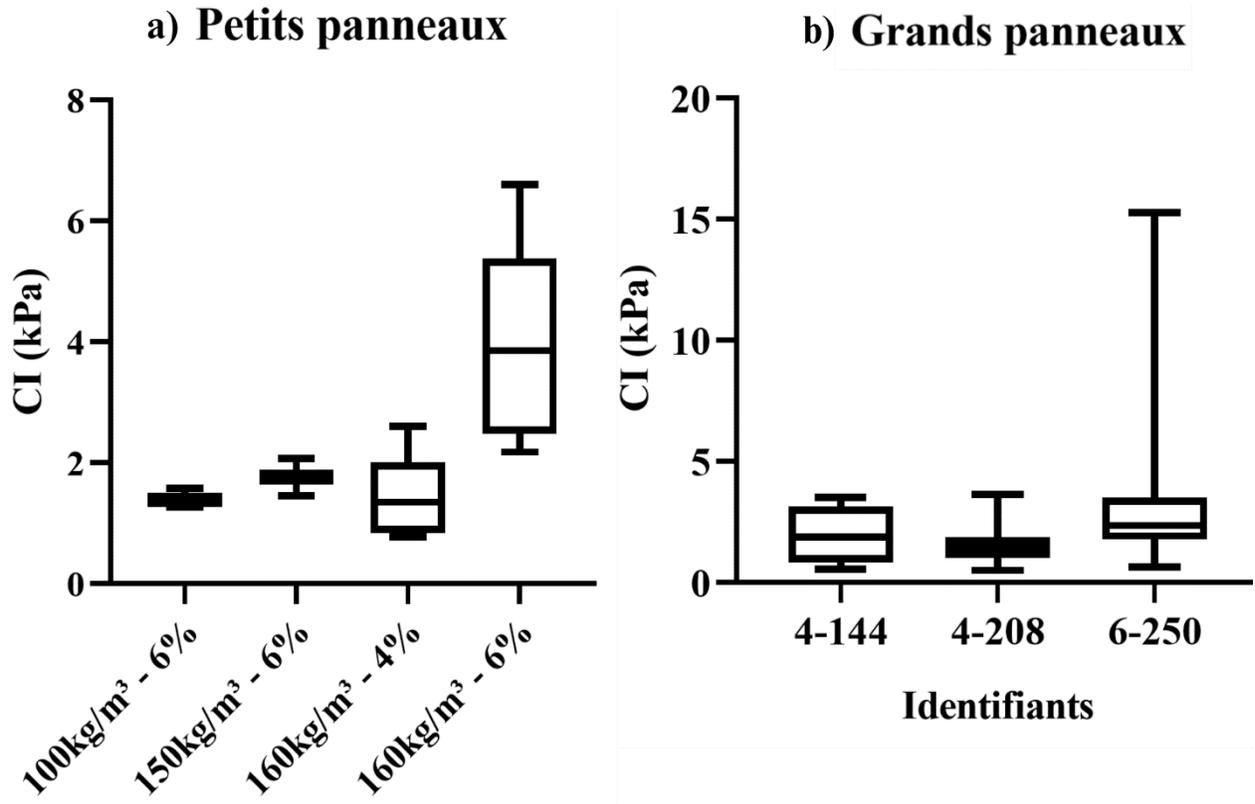


Figure 4-7 : Cohésion interne pour des petits panneaux (densité – taux de pMDI) (a) et des grands panneaux (taux de pMDI – densité) (b)

Table 5. Valeurs de force de rupture et de cohésion interne pour les petits panneaux

masse volumique (kg/m³)	Taux d'encollage (% pMDI)	Nombre de répétitions (n)	Force à charge maximale (N)	Cohésion interne (kPa)
100	4	3	3.52 ± 0.39	1.41 ± 0.15
150	6	2	4.41 ± 1.08	1.17 ± 1.06
160	4	6	3.64 ± 1.72	1.45 ± 0.68
160	6	6	10.02 ± 4.28	4.00 ± 1.71
Exigence norme				30
				Moyenne ± écart-type

Table 6. Valeurs de force de rupture et de cohésion interne pour les grands panneaux

Identifiant	Nombre de répétitions (n)	Force à charge maximale (N)	Cohésion interne (kPa)
4-144	4	4.88 ± 3.04	1.95 ± 1.21
4-208	10	3.87 ± 1.24	1.54 ± 0.49
6-250	9	9.27 ± 11.07	3.71 ± 4.43
Exigence norme			30

Moyenne ± écart-type

Pour mieux contextualiser les données obtenues, un diagramme d'Ashby de la CI en MPa en fonction de la masse volumique (kg/m^3) reprenant une série de matériaux isolants est complété (cf. figure 4-8). La CI est faible par rapport aux autres matériaux et à masse volumique similaire, les cheveux collés sont moins résistants que le liège.

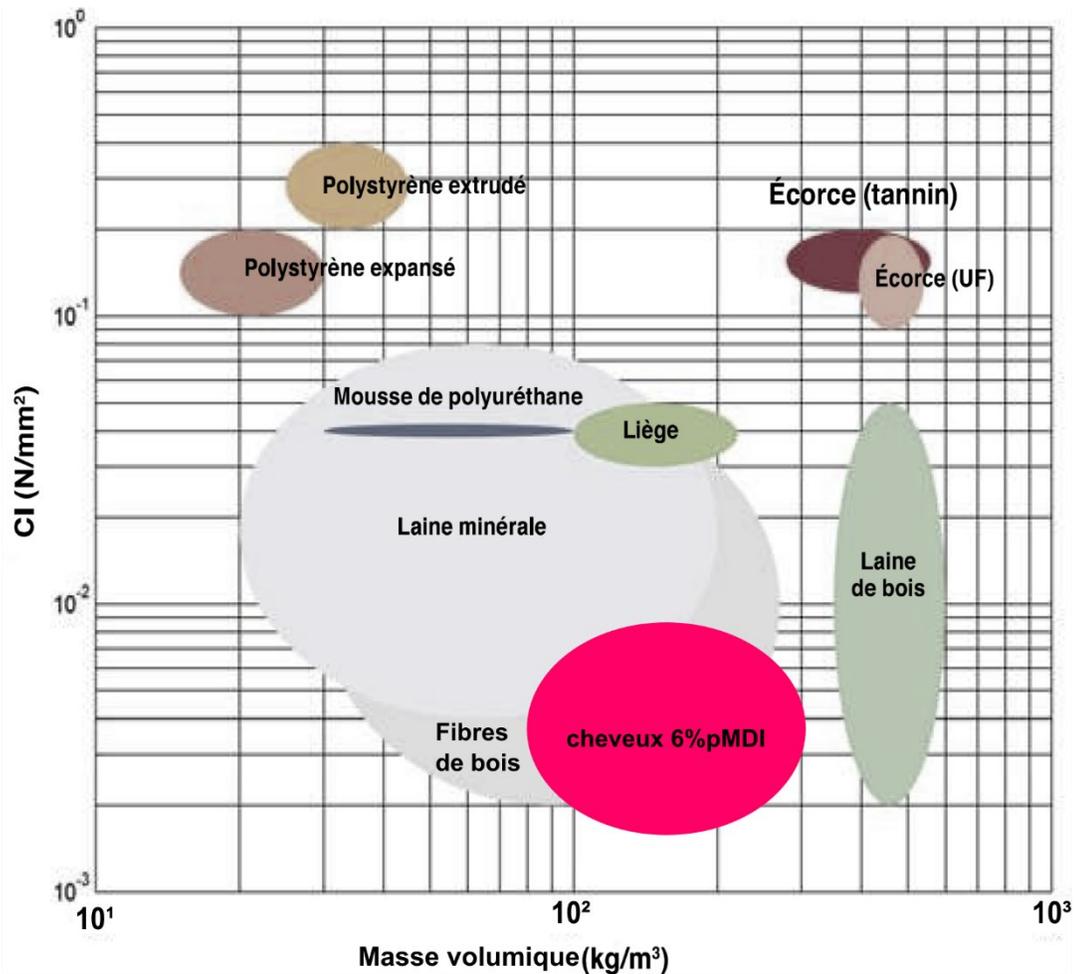


Figure 4-8 : Diagramme d'Ashby de la cohésion interne de divers matériaux isolants comparés aux cheveux encollés. Les données correspondent à celles de Pfundstein et al. (2007)[76] et de Kain (2016)[77] pour l'écorce.

Résistance à la flexion statique

Les résultats de flexion statique, listés en table 7, indiquent un module de rupture variable entre les panneaux. Le 6-250 étant le moins épais, le module de rupture est le plus important.

Table 7. Résultats des essais de flexion statique

Identifiant	Force (N)	Épaisseur (mm)	Module de rupture (MPa)
4-144	133.32 ± 60.32	43.96 ± 0.10	0.41 ± 0.18
4-208	233.00 ± 33.77	47.33 ± 0.14	0.62 ± 0.08
6-250	177.20 ± 39.30	37.38 ± 0.40	0.76 ± 0.16
Exigence norme	160	25	
			Moyenne ± écart-type (n=3)

Résistance à la compression

La résistance à la compression est notablement élevée. Le panneau le plus dense (6-250) a particulièrement résisté, avec un effort de 1.57 MPa pour une déformation de 10% de l'épaisseur (cf. table 8).

Table 8. Résultats des essais de résistance à la compression

Identifiant	Force (kN)	Déformation de compression 10 % (kPa)
4-144	13 100 ± 4115	504 ± 137
4-208	36 400 ± 8585	693 ± 166
6-250	52 490 ± 5.04	1571 ± 381
Exigence norme		100
		Moyenne ± écart-type (n=4)

5. Performances hydriques

Caractérisation de la perméabilité : diffusivité de la vapeur d'eau

Conformément à la norme E96 la perméance en US perms est calculée. L'unité est le grain de vapeur d'eau par heure par pied carré par pouce de mercure ($\text{gr/h} \cdot \text{pi}^2 \cdot \text{''Hg}$). Cette perméance est calculée à partir de la perm métrique dont l'unité est le nanogramme de vapeur d'eau par seconde par mètre carré par pascal ($\text{ng/s} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{Pa}$). Cette grandeur rend compte de la différence de pression de vapeur entre un environnement contrôlé extérieur et une enceinte en saturation. La table 9 reprend les perméances pour trois des grands panneaux.

Table 9. Transmissions de vapeur d'eau, perméance en système métrique et impérial et facteur de résistance à la diffusion à la diffusion de vapeur pour trois des grands panneaux.

	Identifiant panneau		
	4-144	4-208	6-250
Transmission de la vapeur d'eau ($\text{g/h} \cdot \text{m}^2$)	2.9 ± 0.24	1.49 ± 0.21	1.75 ± 0.27
Perméance ($\text{ng/Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2$)	575.72 ± 49.06	297.41 ± 42.48	348.64 ± 55.21
Perméance (US perms)	10.06 ± 0.85	5.19 ± 0.74	6.09 ± 0.96
Facteur de résistance à la diffusion de vapeur (μ)	0.529 ± 0.044	1.034 ± 0.154	0.884 ± 0.143
			Moyenne ± écart-type (n=3)

Mesure de l'absorption d'eau

L'absorption de l'eau est importante sur l'ensemble des échantillons et nul ne passe l'exigence de la norme. Le panneau 4-208 a gonflé en moyenne de 28% de l'épaisseur initiale et a absorbé plus de 3x son poids en eau (cf. Table 10). Le panneau le plus dense (6-250) eut le gonflement le plus important et l'absorption fut moindre par rapport aux autres. Quand au 4-144, l'expansion volumique a été le plus faible (15%) et la masse a quadruplé.

Table 10. Absorption d'eau et gonflement pour trois grands panneaux en trois répétitions

Identifiant	Répétition	Gonflement (%)	Absorption (%)
4-144	1	15.98	397.68
	2	17.19	401.28
	3	13.90	389.71
	Moyenne ± écart-type	15.69 ± 1.66	396.22 ± 5.92
4-208	1	24.63	357.20
	2	26.30	348.42
	3	34.89	305.41
	Moyenne ± écart-type	28.61 ± 5.05	337.01 ± 27.71
6-250	1	38.68	247.89
	2	36.17	227.95
	3	40.09	233.51
	Moyenne ± écart-type	38.31 ± 1.98	236.45 ± 10.28
Exigence norme		Maximum 10.0% du volume	

6. Performance au sein d'une maquette

L'expérimentation est en cours et les résultats devraient être disponible pour la présentation. Actuellement la maquette à dimension de la chambre biclimatique est en conditionnement. La figure 4-8 en détaille la composition, à l'exception de la finition extérieure manquante (pare-vapeur, lattes et contre-lattes et enfin parement extérieur).

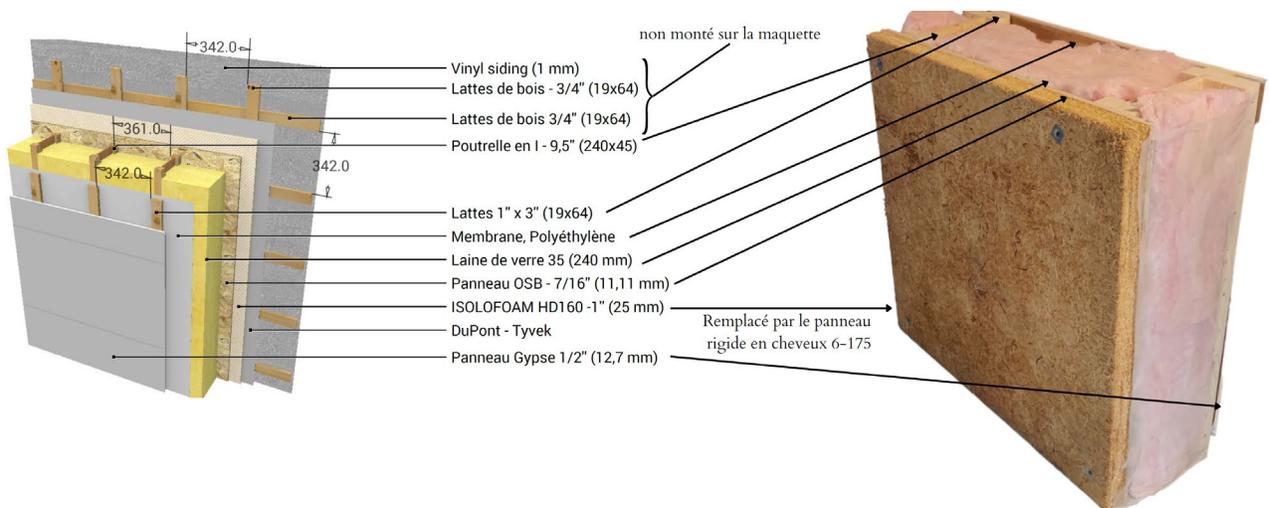


Figure 4-9. Maquette de mur comportant le panneau 6-175 avec indication des éléments correspondants dans le schéma 3D (Logiciel Ubakus).

7. Isolation acoustique

Le panneau 4-208 a un coefficient de réduction du bruit de 0.85 ± 0.072 en moyenne (n=5).

8. Combustion superficielle

Les flammes se sont propagées au-delà de la limite sur les deux faces du panneau de 6% de pMDI et 250 kg/m³. La limite du banc d'essai de 2 pieds est de 22". Ces résultats, supérieurs à 22", sont comparés au MDF ignifuge dont les flammes se sont propagées jusqu'à 6". Le MDF donnant un indice de propagation de flamme (IPF) de 15, un IPF calculé par règle de trois de 55 est obtenu pour le panneau 4-208.

Concernant le panneau 4-144, les flammes se sont propagées sur 16.5" sur la face comportant les fines particules (cf. figure 5-1). Sur la face comportant les cheveux les flammes se sont propagées sur 18". Vis-à-vis du MDF s'étant propagé sur 6.5", cela en revient à des IPF de 38 et de 41 respectivement.

3. OP2 : Détermination de la résistance fongique

Le résultat du test est négatif. La moisissure s'est développée avec succès sur le pin jaune, ce qui signifie que l'inoculum est vivant et que l'incubation a été effective. Des spores en grande quantité et du mycélium en surface du pin jaune sont montrés en figure 4-10. En revanche elle ne s'est pas développée sur les échantillons testés. Des spores en faible quantité ont pu être identifiés. Le test n'étant pas quantitatif car ce ne sont pas des pathogènes détruisant le bois, il n'est pas possible de classer les échantillons.

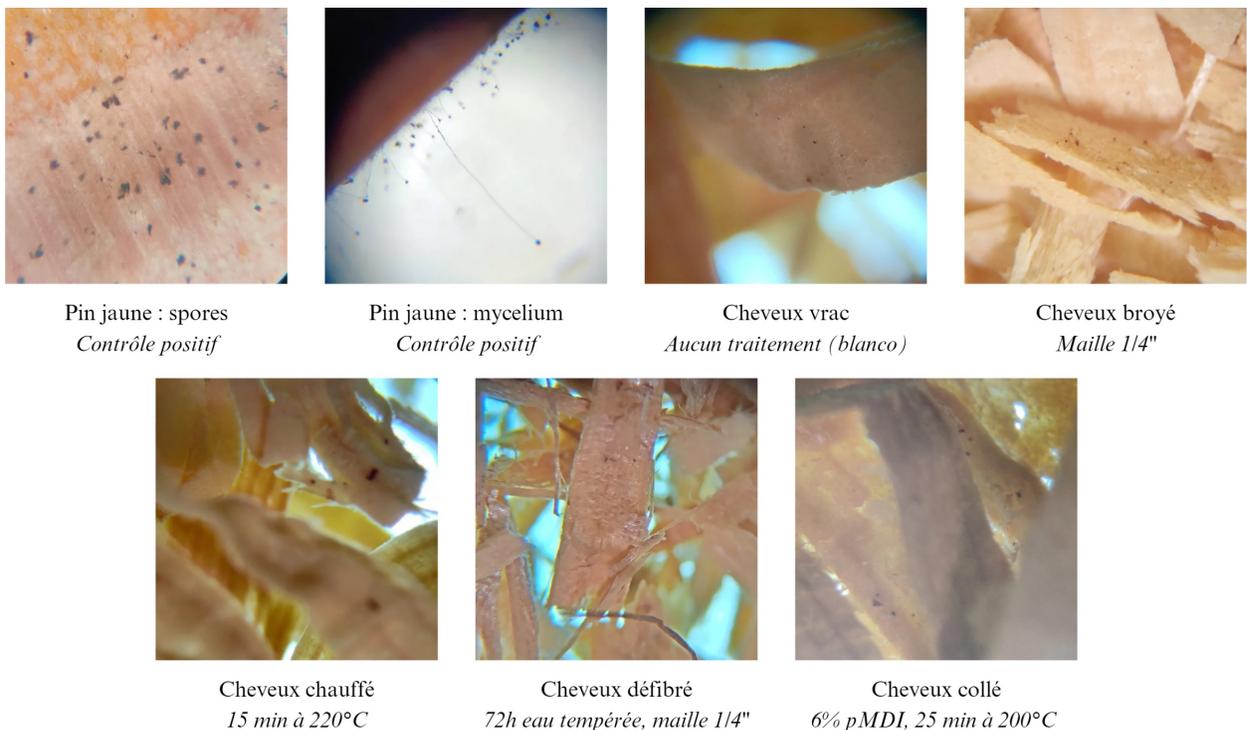


Figure 4-10. Photographies au microscope (x40) des échantillons après incubation de moisissures.

4. OP3 : Procédé de défibrage à faible coût énergétique

L'ensemble des profils granulométriques obtenus par tamisage pour tous les traitements et les mailles de broyage est disponible en annexe figure 9-3. Les traitements par bain-marie ont conduit à un profil de l'histogramme croissant, avec le grain majoritaire étant les fines particules de moins de 1.6 mm (cf. Figure 4-12). Le profil de l'autoclave durant 30 minutes est proche de celui du bois vert, indiquant que la vapeur s'est dissipé des cheveux avant d'être broyés (cf. annexe figure 9-3). Le seul traitement ayant obtenu une tendance en cloche des fibres est le trempage dans de l'eau tempérée (cf. Figure 4-11). Pour ce traitement, autour de la moitié des fibres sont de 1.6 à 3.15 mm. Ces fibres en question ont été conditionnées à 23°C & 50% HR et des taux d'humidités ont été obtenus (cf. Table 11).

Table 11. Taux d'humidités moyen des échantillons de cheveux défibrés

Échantillon	Taux d'humidité moyen (%)
Cheveux de cèdre verts après 4 heures	34.71 ± 1.14
Cheveux trempé broyé à ¼ po	12.13 ± 0.11
Cheveux trempé broyé à ¾ po	9.6 ± 0.12
Moyenne ± écart-type (n=3)	

Trempage

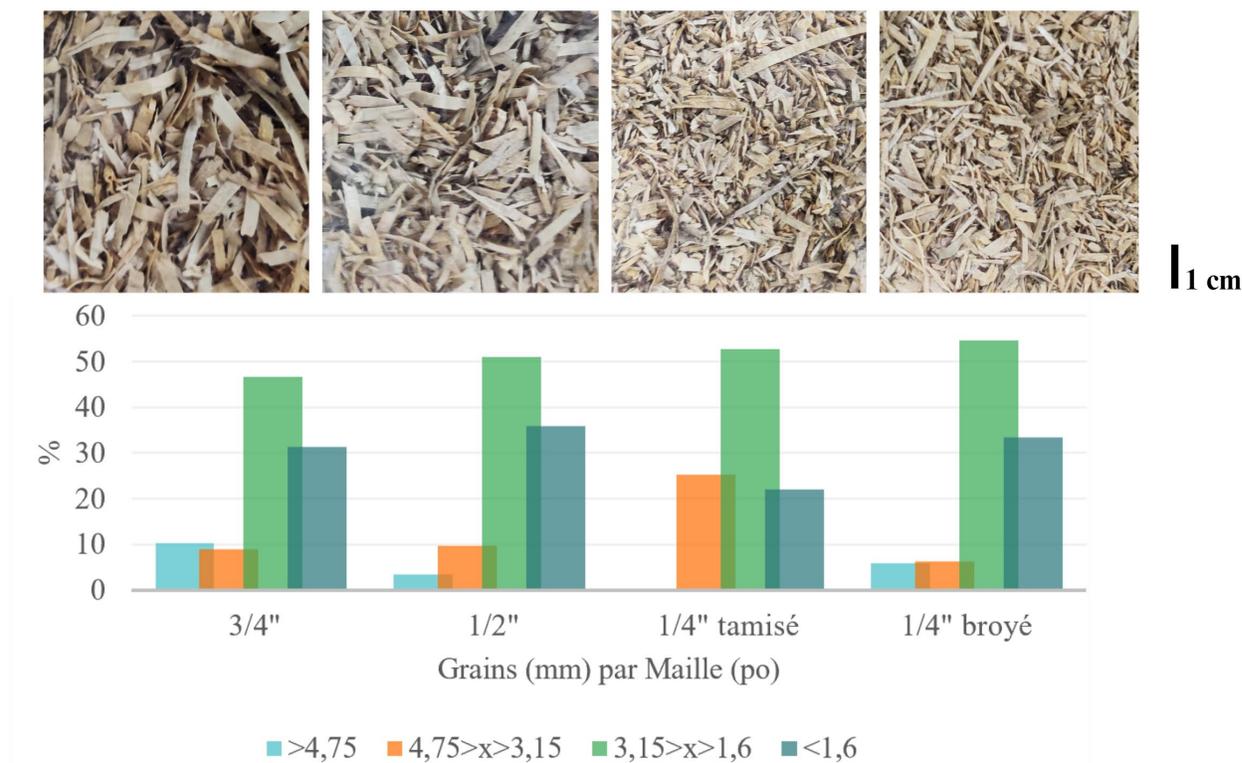


Figure 4-11. Profils granulométriques en histogramme et photos correspondantes regroupés par maille de criblage lors du broyage et classés par taille des grains. Fibres obtenues après trempage au minimum 72h.

Bain marie

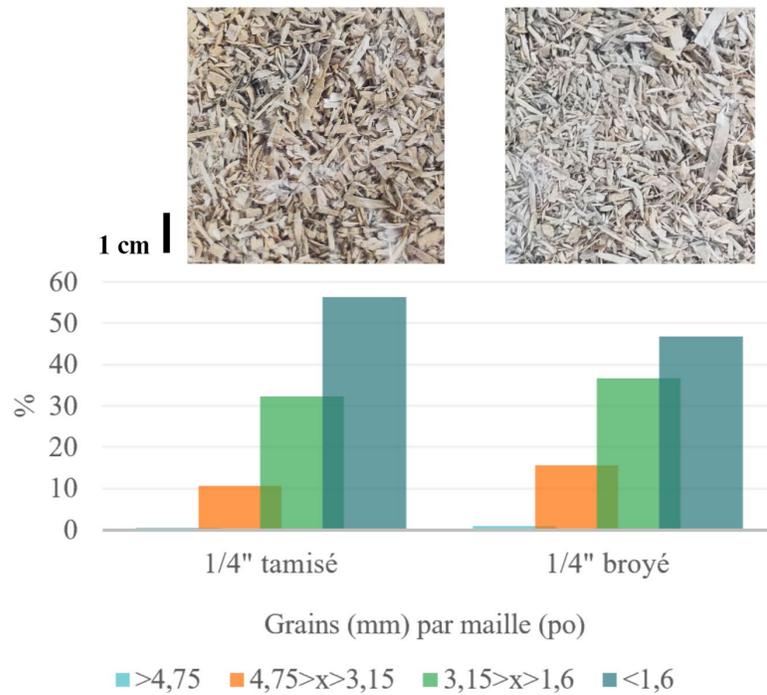


Figure 4-12 Profils granulométriques en histogramme et photos correspondantes regroupés par maille de criblage lors du broyage et classés par taille des grains. Fibres obtenues trempage puis bain-marie 30min.

Impact de la transformation et de la formulation sur la conductivité

Parmi l'ensemble de fibres ayant été obtenues, seules celles issues de la voie humide ont été évaluée thermiquement. Les fibres obtenues par bain-marie obtiennent un CT très similaire aux cheveux broyés malgré une texture granulométrique très différente (cf. Figure 4-13). Les fibres obtenues par trempage se rapprochent des cheveux pressés à chaud. Le test statistique d'analyse de variance à un facteur indique qu'il n'a pas de différence significative entre les 5 traitements ($P_{\text{valeur}} = 0.2728$).

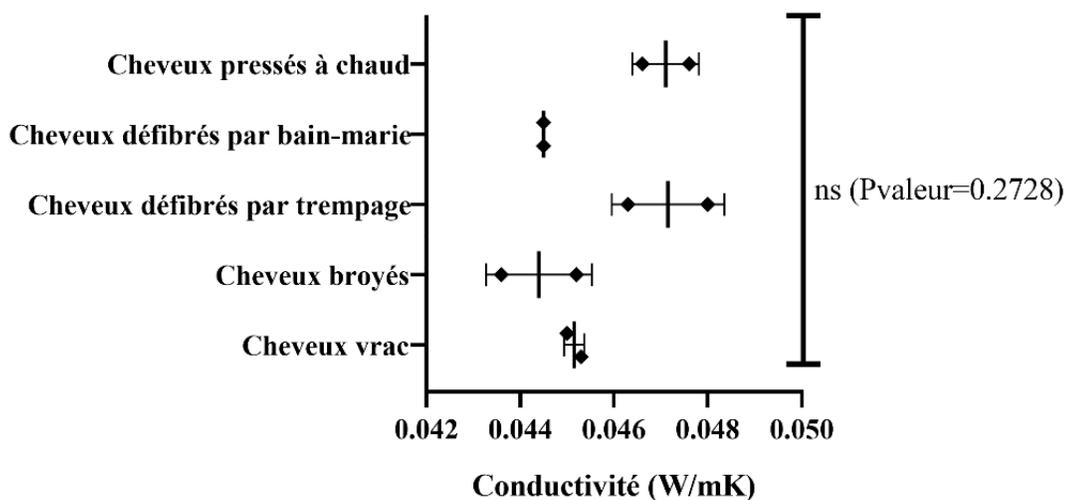


Figure 4-13 : Graphique de la conductivité thermique en fonction du traitement pour une masse volumique de 100 kg/m^3 . Les cheveux pressés à chaud ont été chauffés à 220°C 7.5min, pour les deux types de cheveux défibrés la maille de $1/4''$ a été sélectionnée. Moyenne et écart-type pour deux mesures.

5. DISCUSSION

1. Développement et caractérisation de panneaux rigides

1. Phase 1 : Développement d'une formulation

Choix de la densité

La densité cible a été établie en fonction de la CT correspondante. En projetant la CT de l'ECO4 sur la courbe relative aux cheveux sur la figure 4-2, la masse volumique tombe aux alentours de 130-150. C'est pourquoi des premiers essais de panneaux encollés à 150 kg/m³ ont été conduits. Durant ces essais la norme explorée était la ULC/CAN-S706 :2016. Or la norme a été actualisée en 2020 et une exigence sur la densité a été rajoutée. Le choix d'une masse volumique de 160 kg/m³ est un compromis entre la norme Canadienne ULC/CAN-S706 :2020 et l'isolant en fibre de bois de référence. La norme Canadienne propre aux isolants à partir de fibre de bois exige une masse volumique minimale de 160 kg/m³ tandis que l'isolant de référence ECO4 a une conductivité de 0.047. Cette conductivité est atteinte par les cheveux dès une masse volumique de 150 kg/m³. Or, le panneau à partir de cheveux n'a pas de fonction mécanique dans le mur contrairement à l'ECO4, utile pour son contreventement. N'assumant pas de rôle structurel, la densité du panneau peut être diminuée au possible tout en maintenant un minimum de résistance mécanique. De plus un panneau allégé sera préféré des installateurs d'isolation. Comparativement aux PIFB trouvables sur le marché, cette densité est plus élevée que le ThermoRoom et le Pavatherm et inférieure à l'Agepan THD (cf. Table 13).

Choix de l'épaisseur finale

Le panneau de référence, l'ECO4, est à R-4 (RSI-0.7) pour 3.81 cm (1.5"). En comparaison le XPS garanti une R-5 (RSI-0.88) pour 2.54 cm (1"). Jusqu'ici l'épaisseur des panneaux pressés et collés découle de l'épaisseur du cadre de mesure de 4.5 cm (1.77"). Cette épaisseur a été maintenue pour avoir une comparaison pratique. Il est à présent temps de déterminer l'épaisseur finale du panneau avant ses dernières étapes de formulation, c'est-à-dire l'ajout de paraffine et le pressage à grande échelle.

Pour une masse volumique de 100 kg/m³ la CT du panneau collé de 4.5 cm d'épaisseur est de 0.0460 W/m · K et d'une résistance thermique de 0.896 K · m²/W ce qui correspond à légèrement plus que R-5. Ces valeurs valent pour 2 répétitions sur l'échantillon et 3 répétitions sur la mesure. Pour une masse volumique de 160 kg/m³ la CT des cheveux en vrac obtenue par extrapolation linéaire est de 0.0503 W/m · K. Ce résultat obtenu par application de l'équation 5 est légèrement éloigné de la mesure expérimentale de 0.0533 ± 2.00E-04 W/m · K (n=3). Concernant la résistance thermique (RSI) du panneau de 160 kg/m³ encollé à 6% et mesurant 4.5 cm (1.77") d'épaisseur, la mesure expérimentale est de 0.8195 ± 2.96E-03 K · m²/W (n=3) ce qui correspond à R-4.6.

En comparaison, l'ECO4 vaut R-4 pour 3.81 cm d'épaisseur tandis que le cheveu vaut R-4.6 pour 4.5 cm ce qui est assez proche. En considérant une marge d'erreur (i.e. un coefficient de sécurité γ) de 15%, le panneau est garanti d'une R supérieur à 4. A la lumière de ces mesures et de la prise en compte du facteur de sécurité il convient de maintenir l'épaisseur de 4.5 cm.

Choix du taux d'encollage

Le taux de 6% a été sélectionné pour presser les premiers grands panneaux car les essais de cohésion interne affichaient de très faibles résistances pour 4%. Ce taux a été sélectionné à tort car la faible CI est entre autres due au réseau en couches qui délaminait facilement à cause

d'un encollage hétérogène. Dans une volonté de minimiser la quantité d'adhésif, les deux grands panneaux suivants ont été encollés à hauteur de 4%.

Pressage de grands panneaux

Les grands panneaux se divisent en deux : les trois premiers ont été pressés de la même façon tandis que le dernier (4-144) a été pressé différemment.

Le 6-250 est plus dense car il est moins épais (3.87 cm au lieu de 4.5 cm). Le pressage ayant été contrôlé manuellement pour les trois premiers panneaux, ce panneau (qui fut le premier pressé) est sur-densifié parce que le contrôle a un certain délai de réponse et le cadre a été détruit lors du pressage. Le 6-175, se rapprochant le plus des valeurs cibles, est intégré à la maquette pour éprouver la simulation de conditions réelles.

Pour le dernier panneau 4-144 « optimisé », une densité plus faible que la densité cible a été mesurée. Cela est expliqué par l'absence de fines particules, qui étaient prises en compte dans le calcul de la masse de cheveux à encoller. Une épaisseur quasi égale à l'épaisseur cible est obtenue grâce au programme (cf. table 4). L'application d'un pré-pressage permet de limiter le temps de séjour du panneau dans la presse chauffante à l'étape de pressage.

2. Phase 2 : Évaluation des caractéristiques et performances

Performances thermiques

Concernant les effets de bords de la sonde, le gain en CT de l'échantillon de la taille de la sonde est éventuellement dû à l'absence de matière au-delà des bords de la sonde où s'emmagasine l'énergie thermique. Le gain énergétique dû à la plaque chauffante n'étant pas dissipé, le front thermique progresse directement à la sonde de l'autre côté du matériau. La très faible différence de CT entre l'échantillon occupant toute la chambre de mesure et l'échantillon ne dépassant que d'un pouce démontre qu'un bord d'environ un pouce suffit à négliger les effets de bords. Ce dépassement suffit à accueillir la dissipation du front thermique (cf. Table 2).

L'évolution de la CT en fonction de la densité est établie. Une relation linéaire a pu être obtenue avec un coefficient de détermination assez important compte tenu de l'hétérogénéité intrinsèque du matériau et de l'échantillonnage (cf. équation 5 & Figure 4-2). Le cheveu de cèdre pressé est un réseau d'enchevêtrement de long fils plats dans lequel s'intercalent des alvéoles d'air. Ces poches d'air plus ou moins statique participent au pouvoir isolant. Lorsque le matériau est densifié, la CT augmente car il y a moins d'alvéoles et plus de matière continue où le front thermique se propage plus aisément.

Les facteurs de variabilités dans la mesure de CT comprennent : les hétérogénéités dues à la matière première tel la taille des cheveux, la proportion de fines particules variable ou l'orientation des brins. Les hétérogénéités dues au remplissage des cadres et à la répartition des cheveux lors du pressage. Les hétérogénéités dues aux taux d'humidité sont diminuées par un conditionnement dans une chambre de stockage. La variation de l'épaisseur du panneau due au pressage des plaques comportant les sondes et à la résistance élastique du panneau lors de la compression (effet ressort).

L'apport éventuel en performance thermique due au broyage a été évalué sur une gamme de densité étendue. Dans le cadre de ces recherches, le broyage a un impact significatif sur la CT. Cela s'avère donc une étape supplémentaire augmentant légèrement le pouvoir isolant (cf. Figure 4-2).

Concernant l'impact du taux d'encollage sur la CT, les résultats à 160 kg/m³ ne permettent pas de conclure étant donné qu'avec 4% d'adhésif la CT est moins importante et à 6% plus

importante. Le taux de colle devrait augmenter progressivement la CT et non donner des valeurs de part-et-d'autre de la référence sans adhésif. Les mesures à 100 kg/m^3 étant plus nombreuses, les intervalles de confiance sont élargis et se recouvrent (cf. Figure 4-3). Il ressort de cette expérience qu'avec suffisamment d'échantillons et de mesures, il n'y a pas de gain significatif en CT du à l'apport de 6% de pMDI. Ce taux de colle, relativement minime, n'impacte donc pas notablement la CT. Dans la perspective d'ajouter un autre adhésif moins efficace en plus grande quantité (e.g. 10% de PVA ou 15% de résine de tanins), il est probable que la CT sera significativement impactée.

L'impact des différents traitements (défibrage, broyage, encollage, pressage) s'avère variable. Certains résultats indiquent qu'il n'est pas négligeable (cf. Figure 4-13). Or s'il y eut plus de répétitions sur l'échantillon et sur la mesure, comme c'est le cas pour l'impact d'encollage à 100 kg/m^3 , les CT se recouvreraient peut-être davantage. Une première extrapolation de ces résultats est l'absence d'impact significatif des traitements explorés sur la CT. L'acceptation de cette extrapolation permet de mettre en perspective les valeurs obtenues par rapport aux autres isolants (cf. Diagramme d'Ashby Figure 4-4) en partant du principe que ces valeurs sont valables pour les panneaux formulés.

Au niveau de la résistance thermique, les valeurs mesurées sont plus stables que les valeurs calculées (cf. Figure 4-5). La raison derrière cette lente descente ne dépassant pas 1.0 même pour une masse volumique de 265 kg/m^3 s'explique par l'augmentation continue de l'épaisseur du cadre lors des mesures. Pour préparer le cadre de cheveux en vrac, la matière première est compressée dans le cadre au maximum avant le conditionnement, où les cheveux allaient « rebondir » c'est-à-dire reprendre en volume par force élastique. Le cadre était donc de plus en plus épais et malgré la compression en mâchoire due à la presse du mesureur de flux, l'épaisseur de 4.5 cm n'a plus été atteinte à partir de 55 kg/m^3 pour arriver jusqu'à 6.2 cm à 265 kg/m^3 . Par conséquent l'utilité de présenter une courbe calculée pour un panneau compressé et maintenu à une épaisseur constante de 4.5 cm, afin de rendre compte de la résistance qu'obtiendrait théoriquement un panneau de densité croissante.

Performances mécaniques

Concernant la cohésion interne, le produit formulé étant un réseau d'enchevêtrement de fils plats, lors d'un effort perpendiculaire à la surface seul l'adhésif sert à lier les différentes couches. Il semble que l'adhésif n'ayant pas été uniformément appliqué, il y ait des poches correctement collées réparties dans le matériau et des zones où il n'y a qu'une quantité minime d'adhésif. Ces zones fragiles rompent avec peu d'effort lors des tests. Pour le panneau 6-250 bien que le taux d'encollage soit élevé et la densité importante, une série des échantillons ont rompu dans la même zone. Cette zone, proche de la surface supérieure, était fragilisée par un encollage inadéquat ou une réticulation incomplète et semblait d'une densité faible. L'analyse plus approfondie du profil de densité permettrait d'apporter des éléments de réponses. Il ressort de ce résultat que l'encollage et le pressage ne sont pas optimaux. Un seul échantillon a résisté à 15 kPa, soit la moitié des 30 kPa exigés par la norme (cf. Figure 4-7).

Pour la flexion statique, Les zones de ruptures se distinguent en deux types. Le premier type est une rupture à la flexion classique où l'effort normal appliqué a rompu le matériau selon un axe. Ce profil a notamment été obtenu pour une répétition du 4-208, visible en annexe à la figure 9-6 en haut à droite. Le second type est une rupture due à la délamination. Le matériau étant un réseau d'enchevêtrement de fils plats sous forme de couches successives, celles-ci peuvent se délaminer sous l'effort. Lors d'une rupture par délamination (totale ou partielle) l'effort normal a été converti en cisaillement. Le matériau rompant selon ce profil a donc cédé avant d'emmagasiner tout l'effort qu'il pourrait emmagasiner en effort normal. La délamination

induit des faiblesses et précipite la rupture à l'effort en flexion. La norme exige de résister à 160 N ce qui est atteint par les panneaux 4-208 et 6-250 (cf. Table 7).

Concernant la compression, le matériau résiste fortement avant d'être déformés d'un dixième de l'épaisseur, allant jusqu'à atteindre 1.5 MPa. (cf. Table 8). Cela est compréhensible car les cheveux plats étant comprimés les uns sur les autres, ils sont disposés à accueillir de la charge.

Performance hydrique

Le contrôle de la vapeur vise à limiter le flux d'humidité par diffusion de vapeur afin d'empêcher la condensation à l'intérieur du mur. Dans un assemblage traditionnel de mur à ossature cela est assuré par le pare-vapeur sur la face intérieure du mur correspondant au côté chauffé où l'humidité est générée. Ce pare-vapeur empêche la diffusion d'air chaud et humide. À l'extérieur, les composants doivent permettre suffisamment le passage de la vapeur pour empêcher que l'humidité ne soit emprisonnée à l'intérieur du mur. L'application d'un isolant à base de bois nécessite généralement la pose d'un pare-vapeur[22,78].

Pour ce qui est des tests de perméabilité, l'air humide s'infiltré au travers du matériau par les mailles du réseau d'enchevêtrement. Des valeurs très faibles ont été obtenues (cf. Table 9). Un μ de 1.034, obtenu pour le 4-208, indique que la vapeur d'eau peut s'évacuer rapidement du matériau. Pour les 4-144 et 6-250 des μ inférieurs à 1 sont calculés. Ce sont des valeurs aberrantes. Comparativement aux autres matériaux, la fibre de bois insufflée obtient un μ de 2 et la laine de roche un μ de 1-1.3[41].

Il semblerait qu'il y ait un phénomène de feutrage des fines particules sur la face basse des panneaux 6-175, 6-250 et 4-208 lors du pressage (voir Figure 5-1). Les fines particules du fond des sacs formant une couche plus dense aux mailles plus serrées, la vapeur a moins de « pores » pour passer et le matériau est moins perméable. Ceci est supporté par les résultats du 4-144, panneau pour lequel il y eut une attention particulière à éviter les fonds de sacs. Ne comportant presque pas cette couche de fines particules, les mailles sont plus grandes et davantage de vapeur peut infiltrer le réseau. Un aspect qui ne pourra être résolu ici mais qu'il serait judicieux d'élucider est l'influence des paramètres, telle la densité ou le taux de paraffine, sur la perméabilité.

6-175

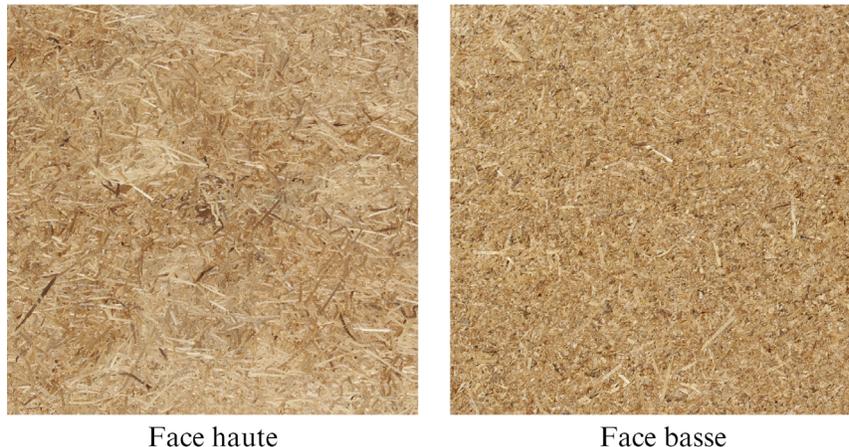


Figure 5-1. Face haute et basse (lors du pressage) du panneau 6-175. Sur la face haute seuls les cheveux sont visibles. sur la face basse des fines particules et débris forment une couche « feutrée ».

Concernant l'absorption, le matériau se comporte telle une éponge et peut quadrupler de masse et prendre plus d'un tiers d'épaisseur supplémentaire (cf. Table 10). Une tendance s'observe :

au plus le panneau est dense au plus il gonfle et à l'inverse au moins il est dense au plus il prend en masse. Hypothétiquement, moins de matière signifie plus de place pour l'eau tandis qu'une matière plus densifiée signifie que la matière reprend son volume initial. Certaines répétitions étaient d'apparence « marbrée » avec des taches fortement humide et gonflées et des zones restées assez sèche, témoignant d'une hydrophobicité minimale. Ces zones sèche peuvent correspondre à des poches où la paraffine a été pulvérisée sans être uniformément répartie. La figure 9-1 en annexe montre ce phénomène ainsi que l'importante sorption du matériau. Le test s'avère destructeur pour le panneau et semble indiquer que 2% de paraffine s'avère insuffisant pour garantir une hydrophobicité adéquate. Pour une application en isolation secondaire, une certaine résistance à l'eau liquide est requise. La pulvérisation plus homogène de davantage de paraffine peut éventuellement contrer cette faiblesse.

3. Rapport relatif aux exigences de la norme canadienne

La norme canadienne relative aux panneaux isolants en fibre de bois pour bâtiments CAN/ULC-S706.1:2020 exige que les exigences soient rapportées dans un tableau de type propriété, résultat, réussite/échec. Pour faciliter la lecture une colonne « référence » est ajoutée reprenant les valeurs minimales exigées pour les classifications suivantes : isolant de toiture naturel (type 1 classe 1 et 2), isolant naturel de revêtement intérieur (type 1 classe 3) et isolant naturel ayant un agent ignifuge de revêtement extérieur (type 3 classe 1).

Pour chaque caractéristique, la valeur de référence maximale entre ces trois classifications a été sélectionnée. De ce fait, si le panneau répond à l'ensemble des exigences, il est conforme à l'ensemble des applications.

Il est attendu d'un produit conforme à ce qu'il répondre à l'ensemble des exigences. Le cadre de ce travail étant limité, un nombre restreint d'exigences a été exploré. La table 12 reprend les exigences évaluées.

Table 12. exigences non-exhaustives extraites de la norme CAN/ULC-S706 :2020[55]

Propriété	Référence	Résultat	Réussite/échec
Adhésion	Colle résistant à l'humidité	pMDI	Réussite
Résistance à la compression	Max 10 % de déformation pour 100 kPa	693 kPa en moyenne pour 10% de déformation	Réussite
Charge transversale de rupture (flexion statique)	160 N pour 25 mm	133 N pour 43 mm 177 N pour 47 mm 233 N pour 37 mm	Réussite (sauf pour 4.144)
Traction perpendiculaire à la surface (cohésion interne)	30 kPa	15.28 kPa (une répétition de 6-250)	Échec
Résistance thermique	0.41 m ² K/W pour 25 mm 0.73 m ² K/W pour 45 mm	0.81 m ² K/W pour 45mm	Réussite
Absorption de l'eau	Maximum 10.0% du volume	28.61% moyenne minimale	Échec
Perméance à la vapeur d'eau	Sans objet	297.41 ng/Pa·s·m ² (4-208)	Réussite
Combustion superficielle	220 maximum	IPF > 50 sans agent ignifuge	Non concluant

Les valeurs pour les résistances mécaniques sont des moyennes minimales.

4. Applications du panneau

En répondant aux exigences de la norme ULC/CAN-S706 :2020 pour les classifications suivantes : isolant de toiture naturel (type 1 classe 1 et 2), isolant naturel de revêtement intérieur (type 1 classe 3) et isolant naturel ayant un agent ignifuge de revêtement extérieur (type 3 classe 1), le panneau est garanti d'une versatilité dans l'usage.

En tant que toiture, le code du bâtiment québécois exige une R-40 (RSI-7) ce qui correspond pour le panneau à 160 kg/m³ à 38.6 cm (15.2") d'épaisseur[79]. En Belgique, l'exigence pour le mur et la toiture est la même : une RSI-4.16 minimum[80]. Si l'on se base sur les connaissances générales de l'architecture résidentielle, la surface moyenne d'un logement au Québec revient à 200 m² pour les murs et 200 m² pour la toiture. Si l'on applique le minimum du code du bâtiment en termes d'isolation thermique, l'obtention d'une R-24 pour l'isolation des murs demande une couche de 23.2 cm d'épaisseur de panneau à 160 kg/m³. Cela représente pour 200 m² de surface un volume de 46.4 m³. L'obtention d'une R-40 pour isoler les toitures revient à une couche de 38.6 cm d'épaisseur du même panneau. Pour 200 m² cela représente un volume de 77.2 m³. Pour l'ensemble du logis, une isolation thermique minimale est assurée avec un volume total de 123.6 m³ de cheveux. Avec une production annuelle autour des 60 000 m³ pour le Québec, jusqu'à 485 maisons peuvent être isoler strictement avec ce connexe. Bien sûr ce scénario est décalé de la réalité car l'application visée de ce panneau rigide est de remplacer la couche d'isolant rigide servant à couper les ponts thermiques. Cette dernière est généralement d'une R-4. Pour obtenir cette résistance, une couche de 4.5 cm d'épaisseur du panneau à 160 kg/m³ suffit. Cela représente 9 m³ de cheveux pour 200 m² de murs. Ramené à la production moyenne annuelle de cheveux au Québec, ce sont plus de 6600 maisons qui peuvent être isolées.

La norme couvre le revêtement intérieur et extérieur ainsi que la toiture, or il reste l'isolation du sol. Etant donné que l'air chaud a tendance à monter isoler le plafond s'avère critique et isoler les planchers entre les étages ou le plancher avec le sol a son importance également. Les planchers bas sont responsables de 7 à 10% des déperditions énergétiques[81].

Un concept novateur de panneau structurel isolant « CLT x Panobloc » pouvant représenter une potentielle application du panneau est reprise en annexe figure 9-8. Une application du matelas flexible en fibre d'écorce et du panneau rigide en cheveux en remplacement des isolants conventionnels est montrée en annexe figure 9-9.

Isolation acoustique

Le coefficient de réduction du bruit obtenu pour le panneau formulé (0.85) équivaut à l'absorption d'un panneau d'isolation acoustique de studio d'enregistrement.

Un avantage majeur des isolants à partir du bois par rapport aux isolants conventionnels est le confort acoustique. Les isolants à base de mousse ont de faibles propriétés acoustiques tandis que leurs alternatives biosourcés comportent davantage de masse et absorbent mieux les ondes sonores[41]. Il serait envisageable d'appliquer ce panneau dans un revêtement intérieur en tant qu'isolant acoustique apte à couper les ponts phoniques.

Le panneau formulé est d'apparence similaire au panneau d'isolation acoustique muraux CELENIT AB composé de laine de bois fine d'épicéa minéralisée liée au ciment Portland blanc. Ce produit est à la limite de ce qui est considéré isolant thermique avec une CT de 0.070 W/m · K et remplit excellentement sa fonction d'isolant acoustique avec une absorption de 95% de l'énergie acoustique et un coefficient de réduction du bruit de 0.9[82]. Le panneau formulé est légèrement moins absorbant acoustiquement mais demeure excellentement performant.

Une application du produit serait sur les sols d'ateliers en béton lissé. Les machines émettent du bruit nécessitant des protections pour les oreilles et les ouvriers, à force de marcher sur un sol dur, se fatiguent plus rapidement les jambes. Ces deux facteurs ergonomiques peuvent être atténués par l'ajout d'un plancher isolé. Un sol de béton lissé recouvert d'une couche de panneau rigide en cheveux et d'un plancher pourraient augmenter l'isolation acoustique et thermique de la pièce tout en atténuant la fatigue physique des jambes des ouvriers. Il conviendrait naturellement de densifier le panneau rigide pour correspondre aux exigences en compression d'un sol d'atelier comportant de la machinerie lourde.

Combustion superficielle

Concernant le test de combustion superficielle, des IPF de 38, 41 et supérieur à 55 classent, conformément au code du bâtiment canadien, le matériau en classe B (IPF entre 30 et 75)[83]. Pour être en classe A, l'IPF doit être compris entre 0 et 25. Tel quel, il ne peut être utilisé dans les cages d'escaliers et les sorties de secours. Comparativement aux autres matériaux, le thuya en planche a un IPF de 50 et le MDF non traité un IPF de 100[83]. Il résulte de cet essai qu'il est nécessaire d'ajouter un agent ignifuge tel que le borax ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) ou le sulfate d'ammonium ($(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$).

Comparaison avec d'autres panneaux isolant en fibre de bois

Vis-à-vis de l'ECO4, le panneau formulé ne pourra pas remplacer sa fonction structurelle. En revanche, d'une densité moins importante pour une CT similaire, le panneau est plus aisément manipulable par les installateurs. Le panneau de cheveux de cèdre est comparé avec des PIFB. Or il n'est pas composé de fibre mais de longs copeaux. Le matériau est plus comparable à de la laine de bois, seulement cette dernière, appliquée souvent en vrac, est d'une densité extrêmement basse et d'une CT très faible (cf. ThermoFibre table 13).

Table 13. Comparaison des performances thermiques du panneau formulé avec le panneau en fibre d'écorces de thuya formulé précédemment par le SEREX, le PIFB de référence, un PIFB produit prochainement et un PIFB déjà installé dans le marché.

Produit	Performance thermique λ (W/m·K) R (Km ² /W)	Caractéristiques physiques Épaisseur (cm – po) masse volumique ρ (kg/m ³)	Commentaire
Cheveux de cèdre (SEREX)	$\lambda = 0.052$ R = 0.81	e = 4.50 – 1.77 $\rho = 160$	Résultat de la phase actuelle du projet d'isolant en coproduit
Fibre d'écorce de cèdre (SEREX)	$\lambda = 0.036$ R = 1.03	e = 3.81 – 1.5 $\rho = 75$	Résultat de la phase antérieure du projet d'isolant en coproduit
SONOClimat ECO4 (MSL)[84]	$\lambda = 0.048$ R = 0.75	e = 3.81 – 1.5 $\rho = 265$	PIFB de référence distribuée au Québec
TimberBoard (Timber HP)[85]	$\lambda = 0.038$ R = 0.97	e = 3.81 – 1.5 $\rho = s.o.$	Bientôt manufacturé en Amérique du Nord (Maine)
Agepan THD[86]	$\lambda = 0.047$ R = 0.85	e = 4 – 1.57 $\rho = 230$	PIFB répandu et reconnu
ThermoRoom (Gutex)[87]	$\lambda = 0.039$ R = 1.02	e = 4 – 1.57 $\rho = 130$	PIFB semi-rigide
Pavatherm (Pavatex)[88]	$\lambda = 0.038$ R = 1.02	e = 4 – 1.57 $\rho = 110$	PIFB semi-rigide
ThermoFibre (Gutex)[89]	$\lambda = 0.039$ R = 1.02	e = 4 – 1.57 $\rho = 25$	Laine de bois en vrac pour isoler les combles perdus

2. Détermination de la résistance antifongique

La classe de durabilité du *thuja occidentalis* est de 1/5 tandis que le pin jaune est classé à 3/5. La durabilité du thuya, conférée par des molécules antifongiques apte à inhiber la germination et inactiver les spores fongiques, ne paraît pas impacté par l'ensemble des traitements appliqués. Parmi les composés antifongiques, les tropolones tel le β -thujaplicine étant semi-polaires, n'ont probablement pas été extraits par l'eau lors du trempage.

Le test appliqué est conçu pour évaluer la moisissure superficielle sur les isolants et les revêtements ce qui explique l'appréciation visuelle qualitative. Or les champignons saprotrophes lignicoles sont nombreux et certains consomment le matériau et sont utilisés dans des essais quantitatifs (e.g. *Coniophora puteana*, *Serpula lacrymans*, *Trametes versicolor*[90]). Dans ces essais la variation de masse consommée par la pourriture est mesurée ou la couverture de surface par la colonie est quantifiée. Ces tests s'avèrent pertinent pour ce produit car ces champignons, dégradant le matériau en profondeur, présentent un risque dans le bâtiment.

Concernant la norme ASTM C1338, les souches fongiques de l'inoculum comprennent : *Aspergillus niger*, *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus flavus*, *Penicillium funiculosom* et *Chaetomium globosum*. En comparaison avec la norme ISO 846 sur l'évaluation de l'action des micro-organismes sur le plastique, les souches fongiques pour du plastique sans usage électronique comprennent : *Aspergillus niger*, *Penicillium pinophilum*, *Paecilomyces variotii*, *Trichoderma virens* et *Chaetomium globosum*[91]. Deux souches sont communes aux deux normes : *Aspergillus niger* & *Chaetomium globosum*. Cette dernière est lignivore et dégrade la cellulose[92]. Le fait que les échantillons survivent à l'inoculum de la norme américaine ne se traduira peut-être pas avec des normes relatives à d'autres territoires, inoculant d'autres moisissures.

3. Procédé de défibrage à faible coût énergétique

Les traitements ambiants et par vapeur ont eu pour effet de sectionner les cheveux transversalement et de les casser plutôt que de les défibrer (cf. annexe Figure 9-3). Les traitements à l'eau liquide ont permis d'obtenir des petites fibres (1.6 – 3.15 mm), semblant plutôt être issues d'un défibrage dans le sens axial. Le défibrage a pour effet de diminuer la taille des fibres ce qui compacte le matériau à densité égale. Avec moins d'interstices contenant de l'air, dont la conductivité est faible, et plus de matière continue, la CT augmente et le matériau isole théoriquement moins.

Ces petites fibres ont été évaluées thermiquement et semblent avoir une CT plus importante que les cheveux en vrac (cf. Figure 4-13). Seulement ce test ne s'avère pas concluant et ces valeurs se recouvreraient probablement s'il y eut plus de répétitions sur l'échantillon et sur la mesure. Le fait que certaines transformations amènent à une CT plus ou moins importante que les cheveux en vrac serait compris dans les marges d'erreurs liés aux facteurs aléatoires lors de l'élaboration des échantillons.

L'apparente absence de gain en performance thermique a conduit à abrégé cet objectif pour concentrer les ressources sur les panneaux en cheveux. De plus cela s'avère judicieux qu'il ne faille pas dépenser de l'énergie supplémentaire dans une étape additionnelle pour transformer la matière première avant d'en formuler un panneau rigide.

6. RECOMMANDATION ET PERSPECTIVES

« Art, just like science, cannot be rushed » - Sergei Konenkov

La limitation principale de ce travail est son aspect expérimental, quasi artisanal. La formulation de panneau a eu lieu de plusieurs façons distinctes fortement variables avec des équipements parfois inadéquats. Une ligne de production industrielle munie pour chaque étape d'équipements désignés pour ce matériau n'existe pas encore, seulement l'aspect critique de la formulation étant l'encollage, un tambour encolleur industriel adapté par exemple à la laine de bois permettrait de grandement améliorer le produit et sa répétabilité. Un encollage plus homogène amènera notamment à des performances mécaniques accrues.

Une seconde limitation d'ordre matérielle est le nombre limité de répétitions sur les mesures et les échantillons. Un matériau d'une hétérogénéité telle couplé à une formulation dont le processus est variable comporte un bruit important lors de la mesure d'une de ses caractéristiques. Un nombre suffisant de répétitions permet de dégager un signal de ce bruit amenant des réponses robustes aux hypothèses explorées.

« Il est possible que l'erreur la plus courante d'un ingénieur intelligent soit d'optimiser quelque chose qui ne devrait pas exister. » - Elon Musk

Une poignée de courts tests ne sont pas présentés dans ce travail. Notamment le pressage de petits cubes pour tester l'auto-encollage via les lignines et tanins ou encore un dispositif bricolé avec un vortex à flacons pour quantifier les résidus friables s'effritant du panneau. De même pour le défibrage, la pertinence n'était peut-être pas fondée d'explorer certains traitements et certaines mailles de broyage. Concernant les relations entre conductivité et densité ou conductivité et taux de colle, les hypothèses associées aux tests auraient pu se vérifier avec un plan expérimental plus direct. Par exemple pour la conductivité en fonction de la densité, la différence entre cheveux en vrac et cheveux broyé aurait pu être mesurée pour moins de valeurs et selon davantage de répétitions. Pour la variation de conductivité en fonction du taux d'adhésif : il suffit de comparer le matériau sans colle avec le matériau encollé avec un taux maximal, vérifier les taux intermédiaires est futile si le taux maximal n'apporte pas de variation significative. Concernant l'optimisation de l'encollage, si les liaisons uréthanes se forment directement à 140°C il n'est pas nécessaire de maintenir la température durant 10 minutes. En industrie ce temps est minimisé. Ce sont là des façons d'optimiser le plan expérimental qui apparaîtraient sans doute évidentes pour un chercheur aguerri et l'art de vérifier son hypothèse avec la quantité minimale d'énergie, de temps et de moyens demande une grande expérience sur de nombreuses expériences.

« Science sans conscience n'est que ruine de l'âme » - Rabelais

Dans la mesure où l'adhésif est remplacé par une alternative biosourcée comme les tanins, si la résine de tanins est faite à partir de quebracho (*Schinopsis quebracho*) qui est une essence tropicale endémique peu disponible, est-ce qu'encoller avec une grande quantité de ce composé compense la petite quantité de colle pétrosourcé ? Cela se discute, notamment par le biais d'ACV. En fin de vie, il est évident qu'une résine de tanins s'avèrera plus rapidement réintégrée aux cycles bio-géo-chimiques que le pMDI. D'autres résines et adhésifs biosourcés, notamment avec des résidus agricoles, existent et l'objectif est de formuler un panneau comportant 0% de composants fossiles. Un autre adhésif qui n'a pas été discuté est le ciment. Lors de l'imprégnation de laine de bois avec du ciment, le matériau devient ignifuge et durable vis-à-vis des pathogènes. Cela serait une piste plausible pour faire office d'adhésion.

Les essais de résistance antifongique qualitatifs sont limités et bien que la durabilité du thuya soit reconnue, il serait judicieux de faire éprouver au produit des essais quantitatifs avec des champignons plus dommageable et propres à d'autres régions.

Le défibrage ne s'est pas avéré concluant et il eut été judicieux de passer les cheveux dans un raffineur pour avoir une cible.

Le matériau est sensible à la combustion. L'ajout d'agents ignifuges et l'essai dans un tunnel de combustion conforme à la norme ULC/CAN-S706 permettrait est une voie d'amélioration du produit.

Pour évaluer l'impact environnemental du produit, par rapport à d'autres produits et par rapport au parcours actuel du connexe le composant, une analyse de cycle de vie serait appropriée.

Mettre à l'épreuve le produit aux batteries de tests propres aux autres normes (Européenne, Allemandes, ..) permettrait de relever la qualité du produit et d'étendre son éventuelle distribution sur des marchés globaux. A ce titre il serait opportun de réaliser une étude de marché du produit.

La faible perméabilité indique que le panneau convient à être utilisé à l'extérieur d'une paroi, car l'humidité peut être évacuée du mur. Il est important que dans ces applications, le matériau soit résistant vis-à-vis de l'eau liquide ce qui n'est pas le cas. Une grande faiblesse du panneau est son importante absorption d'eau. Une piste pour y remédier est l'ajout de davantage de paraffine.

Le thuya du fait de sa croissance d'une extrême lenteur peine à être régénéré pleinement avant la récolte. Des témoignages rapportent que les bardeaux sont sciés avec des arbres de plus en plus jeunes ce qui détériore leur qualité et durée de vie. Du fait des études dendroclimatiques, des feux de forêts et du rythme de croissance de ces arbres, la question légitime en vient à être posée : travailler avec cette essence s'avère-t-il durable ?

Ce travail ne couvre que les bardeaux de cèdre blanc de l'est. Dans l'ouest Canadien, les bardeaux sont sciés à partir de cèdre rouge de l'ouest (*Thuja plicata*). Il serait judicieux de vérifier si le sciage de ces derniers produit des cheveux. Dans l'affirmative, une extension du projet peut s'envisager dans d'autres provinces de l'ouest Canadien. De plus, en 2006, 90% des bardeaux étaient produits à partir de cèdre rouge en Colombie-Britannique[45]. Cela représente un grand potentiel. Cette méthode pourrait se développer ailleurs, notamment dans l'Ouest Canadien, ou encore avec des essences à croissance rapide dont les cycles sont plus courts. Les arbres à croissance lente comme le thuya sont sensibles à la durabilité de leur exploitation. Cela représente une limitation éventuelle.

7. CONCLUSION

Parvenir à des constructions à haute performance énergétique et à impact environnemental amoindri demande d'isoler plus et avec des matériaux davantage biosourcés. La tendance de développement de nouveaux matériaux de construction issus de sources renouvelables s'exprime notamment au travers des isolants thermiques. Cette tendance, encore naissante au Canada, mène au projet dans lequel s'insère ce travail. L'industrie du bardeau de cèdre blanc du Nord générant un surplus de résidus de sciage, une valorisation potentielle est l'élaboration de panneaux isolants.

Le développement d'une formulation de panneau d'isolation rigide a mené aux paramètres suivants : une densité de 160 kg/m^3 , un taux d'adhésif de 6% de pMDI et une épaisseur de 4.5 cm. La performance thermique obtenue est une CT de $0.0521 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ soit une RSI de 0.81. La résistance mécanique des panneaux formulés est variable. D'un point de vue physique, le matériau est un réseau d'enchevêtrement de copeaux plats ce qui explique sa très faible résistance à la traction perpendiculaire à la surface (15 kPa dans le meilleur cas) et son excellente aptitude à résister à la compression (504 kPa pour 10% de déformation dans le pire des cas). Les résultats de flexion statique sont assez faibles et deux des panneaux passent l'exigence de la norme canadienne relative aux panneaux isolants en fibre de bois pour bâtiments CAN/ULC-S706.1:2020. Le pressage des panneaux de grande dimension étant expérimental, il y a de nombreuses limitations. La première étant l'hétérogénéité en adhésif et paraffine. Ces deux aspects limitent les performances mécaniques et hydriques. L'absorption a été particulièrement importante et c'est un aspect sur lequel un point d'attention devra être mis pour améliorer la formulation, car en application dans un mur le panneau ne doit être vulnérable à l'eau liquide. Étant donné sa porosité importante, le panneau est assez perméable à la vapeur d'eau et absorbe grandement l'énergie acoustique. En revanche sans agent ignifuge il est sujet à l'inflammation.

La durabilité face aux moisissures de surface n'a pas été impactée par les traitements appliqués. Il semblerait que les molécules bioactives antifongiques n'aient pas été dégradées par la chaleur ou extraites par trempage ou évaporation. Le défibrage n'a obtenu une majorité de fibres de petites tailles (1.6 – 3.15 mm) qu'avec le trempage dans l'eau tempérée. La mesure de la CT des fibres par rapport aux cheveux a mené à ne pas les transformer pour la formulation de panneaux, épargnant une étape supplémentaire.

Vis-à-vis des exigences de la norme (cf. table 12) une partie des propriétés sont satisfaisantes. L'ajout d'agent ignifuge et de davantage de paraffine, et la mise en place d'un procédé de formulation à l'aide d'équipement adéquat permettrait de changer favorablement les aspects limitants. Concernant les applications potentielles du panneau, en isolant secondaire apte à couper les ponts thermiques le panneau serait performant, tant en toiture que dans les murs pour sa perméabilité à la vapeur et sa faible CT. Sa résistance à la compression en fait un candidat pour l'isolation des sols. Son excellente isolation acoustique en ferait un produit de choix en usage apparent. L'évaluation selon d'autres normes permettrait de potentiellement globaliser la distribution du panneau. Avec un besoin grandissant de produits biosourcés séquestrant du carbone, l'adhésif gagnerait à être remplacé par une alternative plus respectueuse de l'environnement comme une résine de tanins ou de lignines.

La formulation est potentiellement applicable aux résidus du sciage de bardeaux à base de Cèdre rouge, ou basé sur des essences au cycle de vie plus court (i.e. à croissance plus rapide). Moyennant des analyses de cycle de vie et des études de marché, l'impact potentiel de ce produit sur l'environnement et le marché de l'isolant à partir de bois pourra être envisagé. Cela représente autant d'aspects encourageant à poursuivre le développement de ce produit.

8. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. Kośny J, Yarbrough DW. Short History of Thermal Insulation and Radiation Control Technologies Used in Architecture. In: Kośny J, Yarbrough DW, éditeurs. Thermal Insulation and Radiation Control Technologies for Buildings [Internet]. Cham: Springer International Publishing; 2022 [cité 30 juill 2023]. p. 1-35. (Green Energy and Technology). Disponible sur: https://doi.org/10.1007/978-3-030-98693-3_1
2. Bozsaky D. The historical development of thermal insulation materials. *Periodica Polytechnica Architecture*. 1 janv 2010;41:49.
3. Pesez JM. Chapitre 4. La terre et le bois dans la construction médiévale. In: Archéologie du village et de la maison rurale au Moyen Âge [Internet]. Lyon: Presses universitaires de Lyon; 2019 [cité 27 juill 2023]. p. 73-91. (Collection d'histoire et d'archéologie médiévales). Disponible sur: <http://books.openedition.org/pul/18709>
4. Schiavoni S, D'Alessandro F, Bianchi F, Asdrubali F. Insulation materials for the building sector: A review and comparative analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 1 sept 2016;62:988-1011.
5. Verichev K, Zamorano M, Fuentes-Sepúlveda A, Cárdenas N, Carpio M. Adaptation and mitigation to climate change of envelope wall thermal insulation of residential buildings in a temperate oceanic climate. *Energy and Buildings*. 15 mars 2021;235:110719.
6. Sakka A, Santamouris M, Livada I, Nicol F, Wilson M. On the thermal performance of low income housing during heat waves. *Energy and Buildings*. 1 juin 2012;49:69-77.
7. Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.). SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6) - Longer Report. IPCC (GIEC); 2023.
8. McLeman R. Developments in modelling of climate change-related migration. *Climatic Change*. 1 avr 2013;117(3):599-611.
9. Axaopoulos I, Axaopoulos P, Gelegenis J, Fylladitakis ED. Optimum external wall insulation thickness considering the annual CO₂ emissions. *Journal of Building Physics*. janv 2019;42(4):527-44.
10. Asadi E, da Silva MG, Antunes CH, Dias L. Multi-objective optimization for building retrofit strategies: A model and an application. *Energy and Buildings*. 1 janv 2012;44:81-7.
11. Santamouris M. Innovating to zero the building sector in Europe: Minimising the energy consumption, eradication of the energy poverty and mitigating the local climate change. *Solar Energy*. avr 2016;128:61-94.
12. Dobbins A, Nerini F, Deane P, Pye S. Strengthening the EU response to energy poverty. *Nature Energy*. 14 janv 2019;4.
13. Apine I, Birjukovs M, Jakovics A. Comparative Assessment of Mould Growth Risk in Lightweight Insulating Assemblies Via Analysis of Hygrothermal Data and In Situ Evaluation. *Journal of Ecological Engineering*. 12 déc 2019;20.
14. Bozsaky D. Nature-Based Thermal Insulation Materials From Renewable Resources – A State-Of-The-Art Review. *Slovak Journal of Civil Engineering*. 1 mars 2019;27(1):52-9.
15. Bibliothèque des matériaux de construction [Internet]. Maison.com. 2011 [cité 28 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.maison.com/architecture/maison-basse-consommation/bibliotheque-materiaux-construction-4818/>

16. Karamanos A, Hadiarakou S, Papadopoulos AM. The impact of temperature and moisture on the thermal performance of stone wool. *Energy and Buildings*. 1 janv 2008;40(8):1402-11.
17. Bendouma M, Colinart T, Glouannec P. Comparaison du comportement hygrothermique de trois systèmes d'isolation thermique par l'extérieur. 2018.
18. Vatin N, Sultanov S, Krupina A. Comparison of Thermal Insulation Characteristics of PIR, Mineral Wool, Carbon Fiber, and Aerogel. In: Murgul V, Pasetti M, éditeurs. *International Scientific Conference Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018*. Cham: Springer International Publishing; 2019. p. 877-83. (Advances in Intelligent Systems and Computing).
19. Zhao X. Introduction to EPS and XPS Two Exterior Insulation Used. In Atlantis Press; 2017 [cité 28 juill 2023]. p. 72-4. Disponible sur: <https://www.atlantis-press.com/proceedings/ammee-17/25878369>
20. Quelle différence entre isolant polystyrène expansé et extrudé? Comparatif [Internet]. heero.fr. [cité 24 juill 2023]. Disponible sur: <https://heero.fr/guide-travaux/isolation/isolants-synthetiques/quelle-est-la-difference-entre-polystyrene-expanse-et-extrude/>
21. Black JE, Kopke K, O'Mahony C. Towards a Circular Economy: Using Stakeholder Subjectivity to Identify Priorities, Consensus, and Conflict in the Irish EPS/XPS Market. *Sustainability*. janv 2019;11(23):6834.
22. Isoler à base de bois [Internet]. Hout Info Bois. [cité 27 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.houtinfo Bois.be/informations-techniques/mise-en-oeuvre/isoler-a-base-de-boi/>
23. Niemz P, Teischinger A, Sandberg D, éditeurs. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. 2023^e éd. Cham: Springer International Publishing; 2023. 2069 p. (Springer Handbooks).
24. Parliament E. Decision No 1386/2013/EU of the European Parliament and of the Council of 20 November 2013 on a General Union Environment Action Programme to 2020 'Living well, within the limits of our planet'. *Off J Eur Union*. 2013;354:171-200.
25. Fraver S, Kenefic LS, Cutko AR, White AS. Natural disturbance and stand structure of old-growth northern white-cedar (*Thuja occidentalis*) forests, northern Maine, USA. *Forest Ecology and Management*. janv 2020;456:117680.
26. Finnveden G. On the limitations of life cycle assessment and environmental systems analysis tools in general. *Int J LCA*. 1 juill 2000;5(4):229-38.
27. Savasta-Kennedy M. The Dangers of Carbon Reduction Tunnel Vision [Internet]. Rochester, NY; 2014 [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://papers.ssrn.com/abstract=2518613>
28. GABC Building. 2021 GLOBAL STATUS REPORT FOR BUILDINGS AND CONSTRUCTION Towards a zero-emissions, efficient and resilient buildings and construction sector. GSR. 2021; Disponible sur: www.globalabc.org
29. Ministère de l'environnement. Plan de mise en œuvre 2022 2027 du Plan pour une économie verte 2030 [Internet]. 2022. Disponible sur: <https://www.quebec.ca/gouvernement/politiques-orientations/plan-economie-verte>
30. Louis Poliquin, M. Sc Directeur Cecobois. Le bois comme outil de lutte aux changements climatiques. Cecobois; 2022.

31. Moreau L, Thiffault E, Cyr D, Boulanger Y, Beauregard R. How can the forest sector mitigate climate change in a changing climate? Case studies of boreal and northern temperate forests in eastern Canada. *Forest Ecosystems*. 2022;9:100026.
32. Whang YO, Allen J, Sahoury N, Zhang H. Falling in Love With a Product: the Structure of a Romantic Consumer-Product Relationship. *ACR North American Advances* [Internet]. 2004 [cité 1 août 2023];NA-31. Disponible sur: <https://www.acrwebsite.org/volumes/8907/volumes/v31/NA-31>
33. Moysse PE. The Uneasy Case of Programmed Obsolescence Part III: Forum - Legal Issues in the Modern Economy. *UNBLJ*. 2020;71:61-111.
34. Giusti L. A review of waste management practices and their impact on human health. *Waste Management*. 1 août 2009;29(8):2227-39.
35. Zheng J, Suh S. Strategies to reduce the global carbon footprint of plastics. *Nat Clim Chang*. mai 2019;9(5):374-8.
36. Circular economy action plan [Internet]. [cité 28 juill 2023]. Disponible sur: https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en
37. Zhao X, Korey M, Li K, Copenhaver K, Tekinalp H, Celik S, et al. Plastic waste upcycling toward a circular economy. *Chemical Engineering Journal*. 15 janv 2022;428:131928.
38. Kirchherr J, Yang NHN, Schulze-Spüntrup F, Heerink MJ, Hartley K. Conceptualizing the Circular Economy (Revisited): An Analysis of 221 Definitions. *Resources, Conservation and Recycling*. juill 2023;194:107001.
39. Why we need a true circular economy for a waste-free world [Internet]. World Economic Forum. 2022 [cité 26 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.weforum.org/agenda/2022/05/the-circular-economy-how-it-can-be-a-path-to-real-change/>
40. Wautelet T. Exploring the role of independent retailers in the circular economy: a case study approach. 2018.
41. Asdrubali F, D'Alessandro F, Schiavoni S. A review of unconventional sustainable building insulation materials. *Sustainable Materials and Technologies*. 1 juill 2015;4:1-17.
42. MINISTÈRE DES RESSOURCES NATURELLES ET DES FORÊTS. Portrait statistique 2021 RESSOURCES ET INDUSTRIES FORESTIÈRES DU QUÉBEC. 2021.
43. ICI.Radio-Canada.ca ZÉ. Le Québec entend presque doubler sa récolte de bois d'ici 2080 [Internet]. Radio-Canada.ca. Radio-Canada.ca; [cité 2 juill 2023]. Disponible sur: <https://ici.radio-canada.ca/nouvelle/1757723/ministere-forets-industrie-strategie-production>
44. Investir dans les produits forestiers [Internet]. Gouvernement du Québec. [cité 2 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/forets/entreprises-industrie/investir-produits-forestiers>
45. Michel Bouchard, Réjeanne Pouliot et France Brulotte. PROFIL DES PRODUITS FORESTIERS PREMIÈRE TRANSFORMATION Bardeau de cèdre blanc de l'Est, tradition et innovation pour le parement de toit et de murs extérieur. Ministère des Ressources naturelles et de la Faune; 2006.
46. Thuya occidentale (THO) [Internet]. [cité 27 juill 2023]. Disponible sur: <http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/essences/arbre.php?id=15>
47. S.Y. Tony Zhang, Ahmed Koubaa. Les résineux de l'Est du Canada : écologie forestière, caractéristiques, transformation et usages. *FPIInnovations*. 2009.

48. Haluk JP, Roussel C. Caractérisation et origine des tropolones responsables de la durabilité naturelle des Cupressacées. Application potentielle en préservation du bois. *Ann For Sci.* 1 déc 2000;57(8):819-29.
49. Housset JM, Girardin MP, Baconnet M, Carcaillet C, Bergeron Y. Unexpected warming-induced growth decline in *Thuja occidentalis* at its northern limits in North America. *J Biogeogr.* juill 2015;42(7):1233-45.
50. Larson DW. The paradox of great longevity in a short-lived tree species. *Experimental Gerontology.* 1 avr 2001;36(4):651-73.
51. Programme Novoclimat | Innovation et transition énergétiques [Internet]. [cité 27 juill 2023]. Disponible sur: <https://transitionenergetique.gouv.qc.ca/residentiel/programmes/novoclimat>
52. SQI - Découvrez le Plan stratégique 2023-2027 de la SQI [Internet]. [cité 27 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.sqi.gouv.qc.ca/nouvelles/Pages/decouvrez-le-plan-strategique-2023-2027-de-la-sqi.aspx>
53. Passivhaus Institut [Internet]. [cité 3 juill 2023]. Disponible sur: https://passivehouse.com/02_informations/02_passive-house-requirements/02_passive-house-requirements.htm
54. ASTM International. ASTM C518 – 17: Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus [Internet]. 2017. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
55. Normes ULC, Conseil canadien des normes. CAN/ULC-S706.1:2020: NORME SUR LES PANNEAUX ISOLANTS EN FIBRE DE BOIS POUR BÂTIMENTS [Internet]. 2020. Disponible sur: www.ulc.ca/ulcstandards
56. Pizzi A. Wood products and green chemistry. *Annals of Forest Science.* mars 2016;73(1):185-203.
57. J. Pauluhn ME U Mohr, A Popp, M Rosenbruch. TWO-WEEK INHALATION TOXICITY OF POLYMERIC DIPHENYLMETHANE-4,4'-DIISOCYANATE (PMDI) IN RATS: Analysis of Biochemical and Morphological Markers of Early Pulmonary Response. *Inhalation Toxicology.* 1 janv 1999;11(12):1143-63.
58. TIŠLER T, ZAGORC-KONČAN J. COMPARATIVE ASSESSMENT OF TOXICITY OF PHENOL, FORMALDEHYDE, AND INDUSTRIAL WASTEWATER TO AQUATIC ORGANISMS. *Water, Air, & Soil Pollution.* 1 juill 1997;97(3):315-22.
59. Euring M, Kirsch A, Kharazipour A. Hot-Air/Hot-Steam Process for the Production of Laccase-Mediator-System Bound Wood Fiber Insulation Boards. *BioResources.* 2015;10(2).
60. Ostendorf K, Ahrens C, Beulshausen A, Tene Tayo JL, Euring M. On the Feasibility of a pMDI-Reduced Production of Wood Fiber Insulation Boards by Means of Kraft Lignin and Ligneous Canola Hulls. *Polymers.* 30 mars 2021;13(7):1088.
61. Buckley CJ, Phanopoulos C, Khaleque N, Engelen A, Holwill MEJ, Michette AG. Examination of the Penetration of Polymeric Methylene Di-Phenyl-Di-Isocyanate (pMDI) into Wood Structure Using Chemical-State X-Ray Microscopy. *Holzforschung.* 12 mars 2002;56(2):215-22.
62. Bao S, Daunch WA, Sun Y, Rinaldi PL, Marcinko JJ, Phanopoulos C. Solid State NMR Studies of Polymeric Diphenylmethane Diisocyanate (PMDI) Derived Species in Wood. *The Journal of Adhesion.* déc 1999;71(4):377-94.
63. Nuryawan A, Alamsyah EM, Nuryawan A, Alamsyah EM. A Review of Isocyanate Wood Adhesive: A Case Study in Indonesia. In: *Applied Adhesive Bonding in Science and Technology*

- [Internet]. IntechOpen; 2017 [cité 21 juill 2023]. Disponible sur: <https://www.intechopen.com/chapters/58977>
64. Pizzi A, Mittal K. Handbook of Adhesive Technology, Revised and Expanded [Internet]. CRC Press; 2003 [cité 20 juin 2023]. Disponible sur: <http://www.crcnetbase.com/doi/book/10.1201/9780203912225>
 65. ASTM International. ASTM D1037 – 12: Standard Test Methods for Evaluating Properties of Wood-Base Fiber and Particle Panel Materials [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 66. ASTM International. ASTM C165 : Standard Test Method for Measuring Compressive Properties of Thermal Insulations [Internet]. 2000. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 67. ASTM International. ASTM C209-98: Standard Test Methods for Cellulosic Fiber Insulating Board [Internet]. 1998. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 68. ASTM International. ASTM E96 : Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials [Internet]. 2016. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 69. ASTM International. ASTM C1363-19 : Thermal Performance of Building Materials and Envelope Assemblies by Means of a Hot Box Apparatus [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 70. Normes ULC, Conseil canadien des normes. CAN/ULC-S702:2018 : Standard method of test for surface burning characteristics of building materials and assemblies [Internet]. 2018. Disponible sur: www.ulc.ca/ulcstandards
 71. ASTM International. ASTM D3806 – 98: Standard Test Method of Small-Scale Evaluation of Fire-Retardant Paints (2-Foot Tunnel Method) [Internet]. 2011. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 72. ASTM International. ASTM C1338-19 : Standard Test Method for Determining Fungi Resistance of Insulation Materials and Facings [Internet]. 2019. Disponible sur: <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html>
 73. EGE DUNDAR. CARACTÉRISATION DE L'EFFET DES PROPRIÉTÉS DES COPEAUX SUR LA CONSOMMATION D'ÉNERGIE SPÉCIFIQUE DE RAFFINAGE. UNIVERSITÉ DU QUÉBEC; 2008.
 74. Canada R naturelles. CONSOMMATION ÉNERGÉTIQUE DES USINES DE PAPIER JOURNAL EXISTANTES ET DES USINES MODÈLES [Internet]. Ressources naturelles Canada; 2009 [cité 29 juill 2023]. Disponible sur: <https://ressources-naturelles.canada.ca/cartes-outils-et-publications/publications/publications-de-lenergie/consommation-energetique-des-usines-de-papier-journal-existantes-et-des-usines-modele/6042>
 75. Norimoto M, Ota C, Akitsu H, Yamada T. <Original>Permanent Fixation of Bending Deformation in Wood by Heat Treatment. Wood research : bulletin of the Wood Research Institute Kyoto University. 26 févr 1993;79:23-33.
 76. Pfundstein M. Insulation materials: basics, materials, applications. 2007;
 77. Kain, G. Matériaux isolants à partir d'écorces d'arbre. 2016;

78. Laine de bois ou fibre de bois, un isolant performant été comme hiver - Conseils Thermiques [Internet]. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://conseils-thermiques.org/contenu/laine-de-bois.php>
79. Irosoft architecture de gestion de l'information législative-legal information management system. Code de construction du Québec, chapitre Batiments [Internet]. [cité 30 juill 2023]. Disponible sur: https://www.legisquebec.gouv.qc.ca/fr/document/rc/B-1.1,%20r.%202?langCont=fr#ga:l_i_1-h1
80. Les exigences PEB et d'électromobilité [Internet]. Site énergie du Service public de Wallonie. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://energie.wallonie.be/fr/exigences-peb-electromobilite.html?IDC=9136>
81. → Rénovation thermique : déperdition thermique d'une maison mal isolée [Internet]. 2013 [cité 30 juill 2023]. Disponible sur: <https://architecto.com/deperdition-thermique-maison.html>
82. Panneau acoustique mural - CELENIT ACOUSTIC A2 - CELENIT - pour faux-plafond / en bois / en laine de bois [Internet]. [cité 7 août 2023]. Disponible sur: <https://www.archiexpo.fr/prod/celenit/product-55534-1743700.html>
83. Canadian Wood Concl. Surface flammability and flame-spreading ratings [Internet]. 2019. Disponible sur: www.cwc.ca
84. SONOclimat ECO4 | Produits | MSL | MSL [Internet]. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://www.mslfibre.com/Produits/Fiche/13/SONOclimatECO4>
85. Continuous Wood Fiber Board Insulation | TimberHP for Exteriors, Floors & Roof [Internet]. TimberHP. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://www.timberhp.com/products/timberboard>
86. Panneaux isolant murs et toiture par l'extérieur THD Agepan Toulouse, Midi-Pyrénées | ETS DAUSSION [Internet]. 2014 [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://daussion.com/isolation-toulouse-31/isolation-ecologique-agepan/panneaux-isolant-murs-et-toiture-par-lexterieur-thd-agepan>
87. GUTEX: __Produit [Internet]. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://gutex.fr/notre-gamme/produits/produit/prod/gutex-thermoroom/>
88. PAVATHERM | Soprema [Internet]. Soprema Belgique. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://www.soprema.be/fr/product/isolation/fibres-de-bois/panneaux/pavatherm>
89. GUTEX: __Système [Internet]. [cité 1 août 2023]. Disponible sur: <https://gutex.fr/notre-gamme/systemes/systeme/sys/gutex-durio/>
90. Maurice S, Le Floch G, Le Bras-Quééré M, Barbier G. Improved molecular methods to characterise *Serpula lacrymans* and other Basidiomycetes involved in wood decay. *Journal of Microbiological Methods*. 1 févr 2011;84(2):208-15.
91. Norme internationale. ISO 846:2019 - Plastiques — Évaluation de l'action des micro-organismes. 2019.
92. Functional Analysis of the Degradation of Cellulosic Substrates by a *Chaetomium globosum* Endophytic Isolate | Applied and Environmental Microbiology [Internet]. [cité 29 juill 2023]. Disponible sur: <https://journals.asm.org/doi/full/10.1128/AEM.00124-12>
93. Définition de Cantibay (débit) [Internet]. [cité 7 août 2023]. Disponible sur: <https://www.batiproduits.com/batiwiki/cantibay-debit/definition/BB7B1BAE-D304-4EEB-9F5A-AB82389B2B6E/>

9. ANNEXE

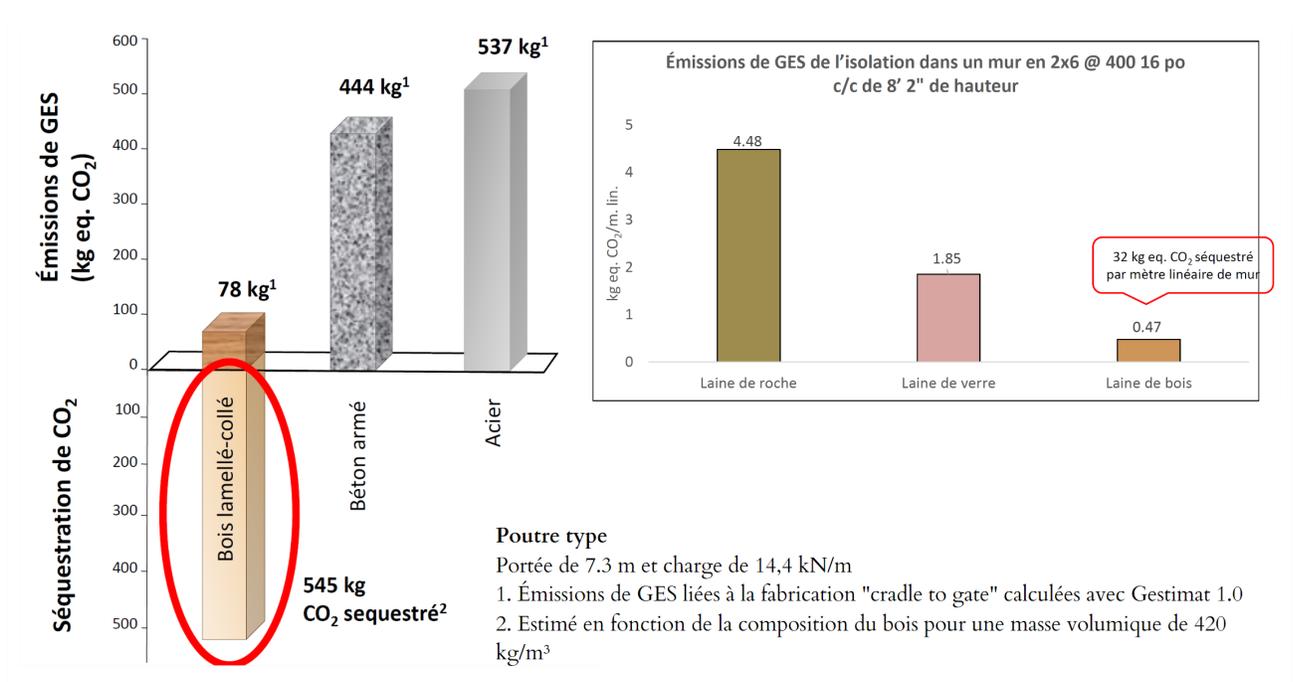


Figure 9-1. Estimations d'émissions de GES en eqCO₂ pour une poutre type et pour trois laines isolantes réalisées par Cecobois[30].



Figure 9-2. Photos des échantillons 4-208 (2^{ème} répétition) et 6-250 (2^{ème} répétition) après le test d'absorption d'eau. Apparence marbrée à gauche et illustration de l'important gonflement à droite.

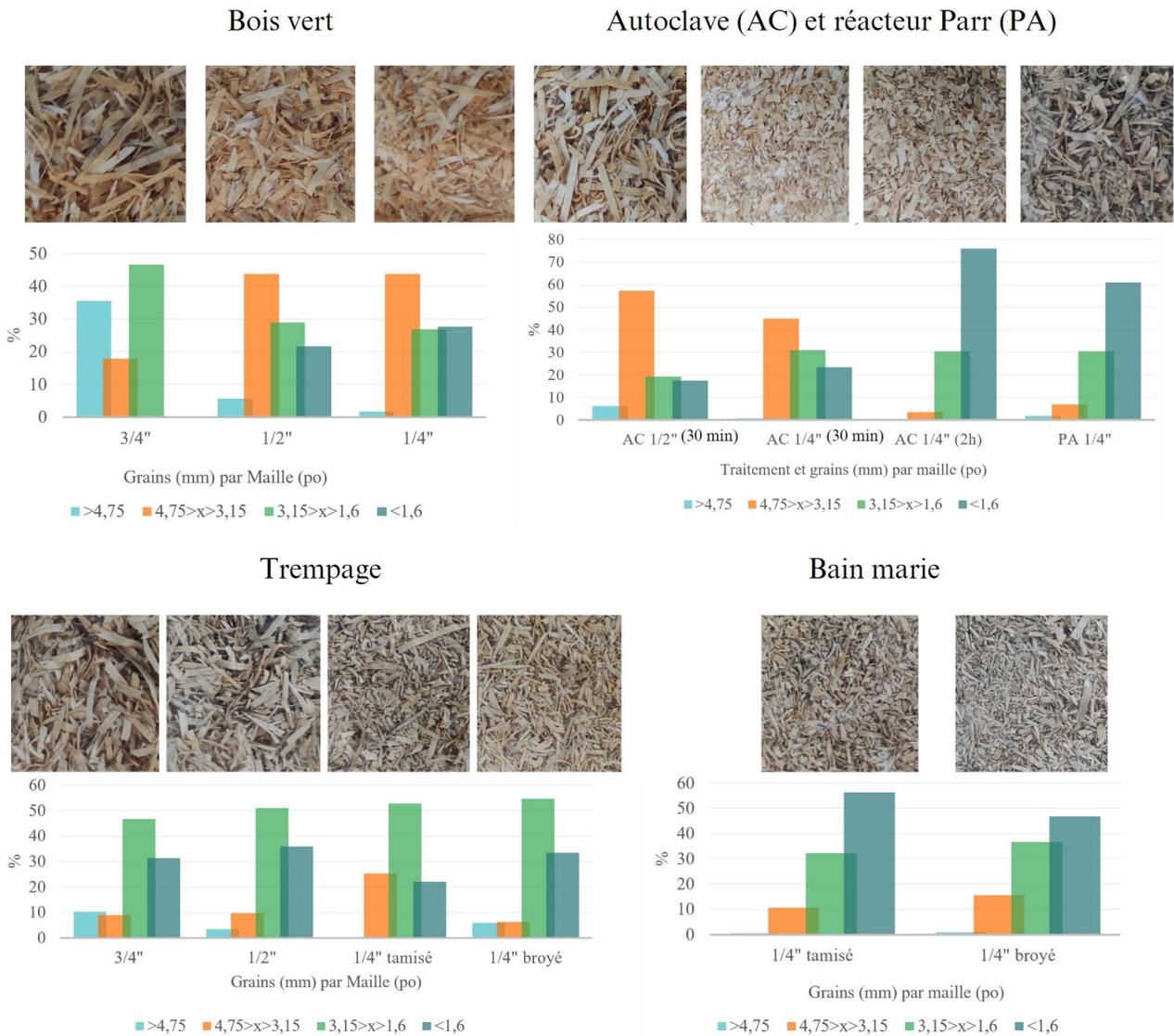


Figure 9-3. Profils granulométriques pour différents traitements regroupés par maille de criblage du broyeur et classés par taille des grains avec la photo correspondante à l'histogramme.

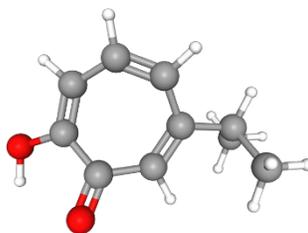


Figure 9-4. Molécule de β -thujaplicine. Blanc = atome d'hydrogène, Gris = atome de carbone et rouge = atome d'oxygène (PubChem)

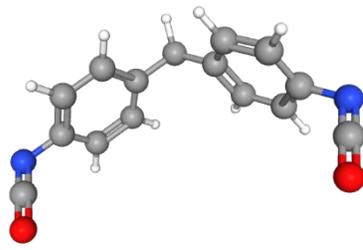


Figure 9-5. Molécule de 4,4'-diisocyanate de diphenylméthane. Blanc = atome d'hydrogène, Gris = atome de carbone, rouge = atome d'oxygène et bleu = atome d'azote. (PubChem)

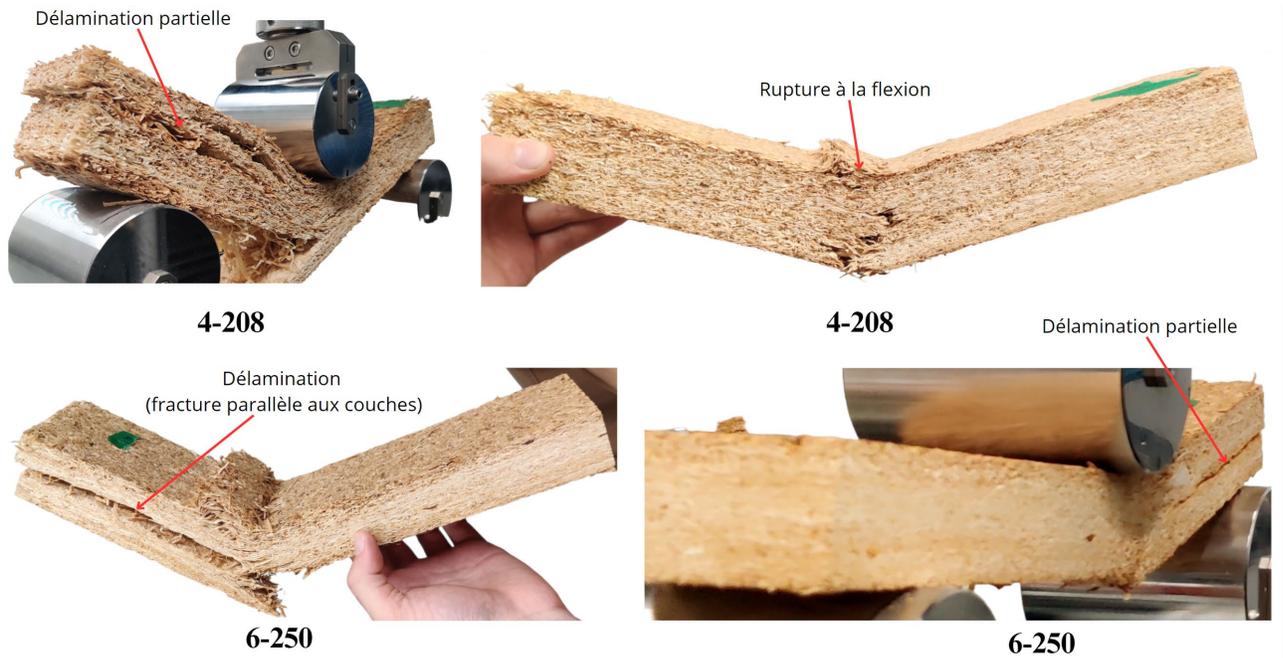


Figure 9-6. Profils de rupture lors des essais de flexion simple en 3 points pour les échantillons 4-208 et 6-250.

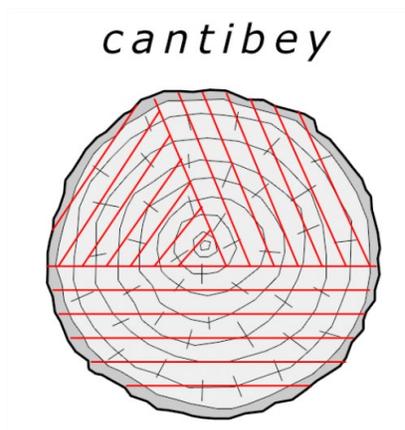


Figure 9-7. Débit de type Cantibey, découpant le tronc en trois parties de façon à éviter le cœur et en conservant trois dosses externes[93].

Concept du CLT x Panobloc

Le concept est une contraction entre le Panobloc et le CLT. Le CLT est un panneau en bois massif lamellé-croisé qui peut être collé ou cloué. Le Panobloc, conçu par Techniwood, est un treillis isolant en lamelles croisées-décalées avec des panneaux d'isolants intercalés entre les lames. L'objectif du treillis est de garantir une résistance mécanique et une stabilité dimensionnelle au mur pour qu'il supporte suffisamment de charge. Couplé au CLT, le mur peut servir de mur porteur. La maquette est dessinée avec le programme de dessin vectoriel InkScape.

D'une épaisseur de 28 cm, ce mur structurel et isolant est composé de quatre éléments (cf. Figure 4-11). Les madriers et lames étant en bois massif, en considérant l'usage du panneau en cheveux de cèdre comme panneau isolant et éventuellement une résine à base de tanins pour l'adhésif, il est imaginable d'avoir un mur composé presque exclusivement de bois et de produit dérivés du bois, à l'exception des parements intérieurs et extérieurs, pare-vapeurs et pare-pluie.

Le côté CLT correspond au côté intérieur et le côté Panbloc au côté extérieur. L'élément inertiel d'un point de vue thermique est situé derrière l'élément isolant pour faire effet de zone tampon. La couche isolante, située à l'extérieure, protège plus activement des variations environnementales.

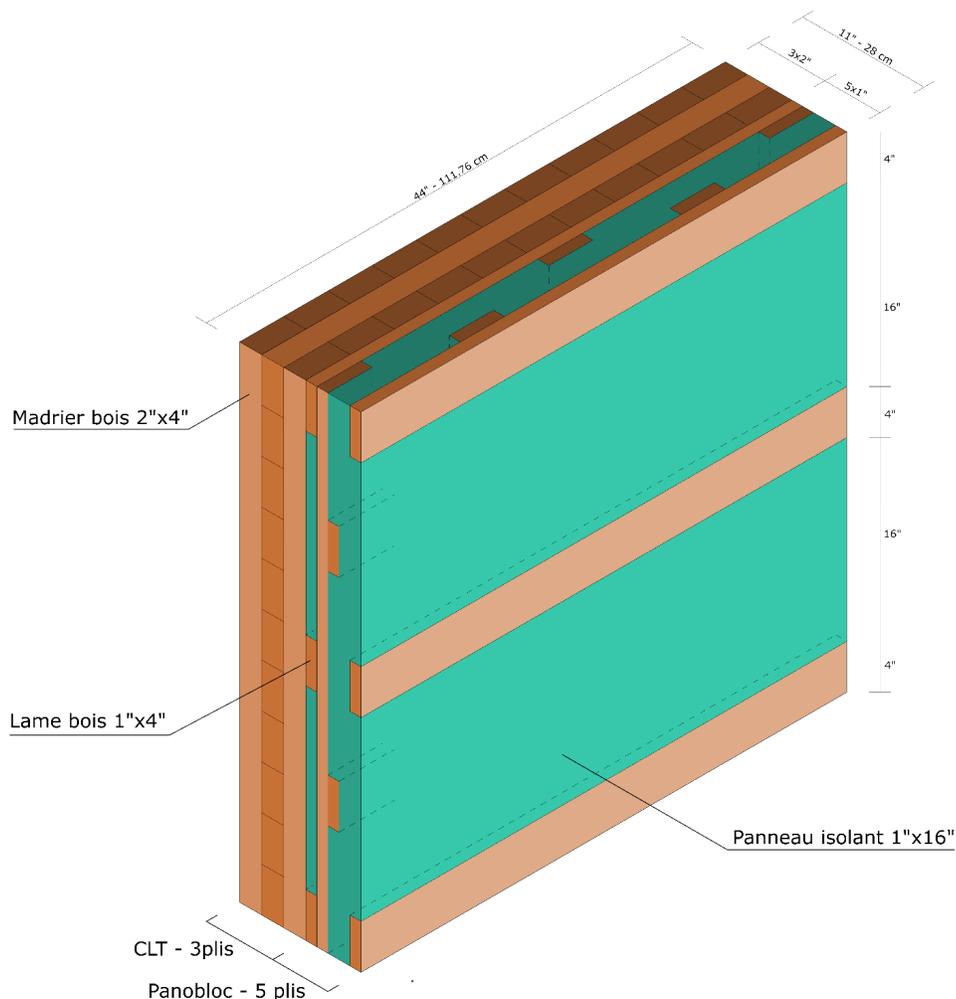


Figure 9-8. Schéma du concept de mur structurel et isolant. Composant en section usuelles au Québec.

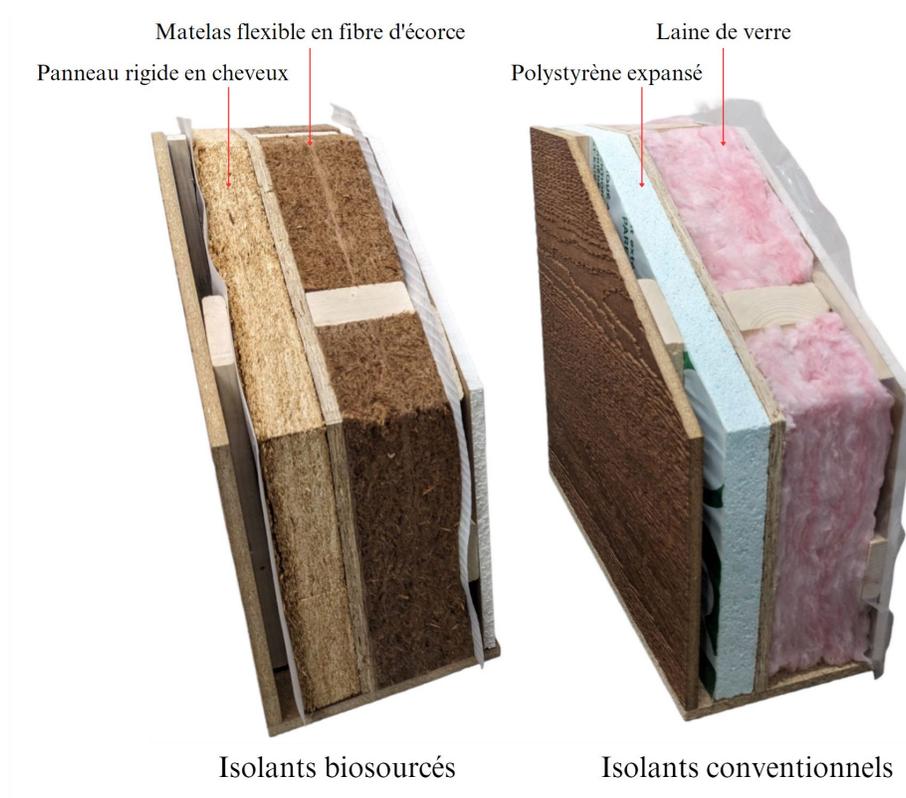


Figure 9-9. Maquette de mur conventionnelle où le PSE et la laine de verre sont remplacés par des isolants à partir de connexes du sciage de bardeaux