



**HAL**  
open science

# Caractérisation et optimisation des propriétés d'isolants thermiques non tissés à base de fibres de bois

Pierre Vignon

► **To cite this version:**

Pierre Vignon. Caractérisation et optimisation des propriétés d'isolants thermiques non tissés à base de fibres de bois. Mécanique [physics]. Université de Bordeaux, 2020. Français. NNT : 2020BORD0182 . tel-03149411

**HAL Id: tel-03149411**

**<https://theses.hal.science/tel-03149411>**

Submitted on 23 Feb 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE PRÉSENTÉE  
POUR OBTENIR LE GRADE DE  
**DOCTEUR DE**  
**L'UNIVERSITÉ DE BORDEAUX**

ÉCOLE DOCTORALE : SCIENCES PHYSIQUES DE L'INGENIEUR

SPÉCIALITÉ : MECANIQUE

Par Pierre VIGNON

**CARACTERISATION ET OPTIMISATION DES PROPRIETES  
D'ISOLANTS THERMIQUES NON TISSES A BASE DE  
FIBRES DE BOIS**

Sous la direction de : Christine DELISEE  
(co-encadrant : Jérôme MOREAU)

Soutenue le 10 novembre 2020

Membres du jury :

M. CHARRIER, Bertrand,  
Mme BARDET, Sandrine,  
M. IRLE, Mark,  
M. DOUMALIN, Pascal,  
M. MOREAU, Jérôme  
Mme DELISEE, Christine  
M. SANGUINA, Thierry

PR U Pau et Pays de l'Adour  
MCF HDR U Montpellier  
EC HDR Ecole Supérieure du Bois  
MCF HDR U Poitiers  
EC Ecole Supérieure du Bois  
PR Bordeaux Sciences Agro,  
Directeur FINSA France

Président, Rapporteur  
Rapporteur  
Examinateur  
Examinateur  
Co-encadrant de thèse  
Directrice de thèse  
Invité

# **Titre : Caractérisation et optimisation des propriétés d'isolants thermiques non tissés à base de fibres de bois**

**Résumé :** Les travaux présentés ici s'insèrent dans le contexte actuel du fort potentiel de développement commercial des isolants bio-sourcés. Ils sont menés dans le cadre d'une thèse CIFRE portée par l'entreprise FINSA France et effectuée au laboratoire I2M de Bordeaux, au sein d'un projet industriel, ECOMATFIB (ADEME BIP, 2014-2017) : ECOconception et Optimisation multi-objectif de MATériaux isolants à base de FIBres de bois. L'objectif de cette thèse est de concevoir, fabriquer, caractériser et optimiser les propriétés d'isolants thermiques à base de fibres de bois, réalisés à l'aide d'un procédé textile non tissé. Après une analyse de la ressource bois présente en nouvelle Aquitaine, des isolants ont été fabriqués à partir de nappes de fibres de bois de pin maritime, de pin *taeda*, de peuplier et d'eucalyptus avec adjonction de fibres thermoplastiques puis consolidation par voie thermique dans un four à air chaud. Après identification préliminaire des paramètres de réglage de la chaîne de non tissés disponible au laboratoire, de nombreux matériaux fibreux ont été réalisés, à partir d'une matière première diversifiée et de paramètres machines adaptés. Ceux-ci ont été caractérisés thermiquement principalement par la méthode du plan chaud puis de manière hydrique pour connaître leur faculté d'interaction avec l'humidité relative de l'air ambiant. Enfin, leur caractérisation en compression a permis d'étudier leur propension à conserver leurs propriétés après sollicitation mécanique. Les données recueillies ont permis d'identifier les paramètres de la matière première ainsi que du procédé de fabrication ayant un impact significatif sur les propriétés de ces isolants. Une première approche de modélisation des propriétés a conduit à identifier des pistes permettant l'amélioration des propriétés thermiques et de valider leur très bonne capacité de régulation hydrique.

**Mots clés :** non tissé, fibres de bois, isolant thermique, caractérisation, propriétés, optimisation

---

# **Title : Characterization and optimization of the properties of non-woven thermal insulators based on wood fibers**

**Abstract :** The thesis work presented here fits into the current context of the strong potential for commercial development of bio-sourced insulation material. They are carried out within the framework of a CIFRE thesis carried out by the company FINSA France and carried out at the I2M laboratory in Bordeaux, within an industrial project, ECOMATFIB (ADEME BIP, 2014-2017): ECOconception and multi-objective optimization of Insulating MATerials based on wood FIBres. The objective of this thesis is to design, manufacture, characterize and optimize the properties of thermal insulating material based on wood fibres, using a nonwoven textile process. After an analysis of the wood resource present in Nouvelle-Aquitaine region, insulating materials were made from wood fibres of maritime pine, loblolly pine, poplar and eucalyptus with the addition of thermoplastic fibres and then thermal consolidation in a hot air oven. After an optimization of the parameters of the nonwoven chain available in the laboratory, many fibrous materials were made, with diversified raw material. The thermals, hydrics and mechanicals properties of these materials have been characterized. The data collected made it possible to identify the parameters of the raw material as well as the manufacturing process having a significant impact on the properties of these insulators. A first approach to modelling properties has led to the identification of new ways for improving thermal properties and to validate their very good capacity for water regulation.

**Keywords :** non-woven, wood fibres, thermal insulation, characterisation, properties, optimisation

---

## **Unité de recherche**

Institut de Mécanique et Ingénierie, CNRS UMR 5295

Dépt Génie Civil et Environnemental

Bâtiment A11,351 cours de la libération

33405 TALENCE CEDEX



## Remerciements

J'adresse, en premier lieu, mes vifs et gracieux remerciements aux 2 encadrants de cette thèse, Christine Delisée et Jérôme Moreau, pour leur gratitude, leur bienveillance et leur bonne humeur perpétuelle. Ils m'ont également apporté puis ont contribué à me transmettre leurs connaissances dans ce domaine et la rigueur nécessaire pour mener à bien la mission qui m'a été confiée.

Je suis reconnaissant envers les directeurs d'usine respectifs de FINSA France, m'ayant accompagnés confraternellement, Tanguy Massart puis Thierry Sanguina et également à l'égard de Mohamad Hussein Hobballah et Huyen Tran ayant travaillé dans ce projet en tant que doctorant et post-doctorante.

Je tiens également à saluer l'ensemble des autres membres du projet ECOMATFIB, nommés par ordre alphabétique : Pascal Doumalin (Institut PPRIME), Mark Irle (ESB), Benoit Lambert (STEICO), Michael Lecourt (FCBA), Frank Michaud (ESB), Jérôme Malvestio (I2M, UBX), Amadou Ndiaye (I2M, INRA) et Bernard Solbes (I2M).

Je remercie Jérôme Lux et Philippe Lagièrre pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail ainsi que leurs conseils et les résultats apportés. Je salue l'équipe m'ayant accompagnée, avec en particulier à l'époque, le trépidant Bonifacien, voisin du fantasque peuple belge puis la montoise mauve, voisine de bureau, qui œuvrait dans l'ouvrage maçonné en Pierre secondée par le Jambon, fameuse bétonneuse provençale et enfin par le Serin vent d'est de Loire Atlantique.

Pour finir, j'adresse mes remerciements familiaux pour leur soutien pendant les trois dernières années pour la tonitruante péripétie rencontrée.

## Préambule

Cette thèse a été conduite dans le cadre du projet ECOMATFIB (Eco-Conception et Optimisation multi-objectif de Matériaux isolants à base de Fibres de bois) qui vise à optimiser les propriétés d'isolants thermiques à base de fibres de bois. Celui-ci propose d'améliorer les relations entre les procédés d'élaboration et les performances multi-échelles de ces produits. Ce projet, d'un coût global de 747 627 euros, a été financé à environ 42% par l'ADEME (Agence De l'Environnement et de la Maitrise de l'Énergie) puisque celle-ci y a alloué 320 648 euros.

Les partenaires du projet ECOMATFIB cités ci-après, sont 2 industriels, trois laboratoires ainsi qu'un institut technique. FINSA France, porteur du projet, est un producteur de panneaux de fibres de bois et STEICO, un fabricant de matériaux non tissés isolants à base de bois. Le FCBA est un centre technique, industriel français, chargé des secteurs de la forêt et d'une partie des matériaux pouvant en résulter. Les trois laboratoires sont le département GCE (Génie Civil Environnemental) d'I2M (Institut de Mécanique) de Bordeaux qui est le coordinateur scientifique du projet, l'institut PPrime à Poitiers et celui de l'ESB (École Supérieure du Bois), le LIMBHA à Nantes.

Dans le cadre de ce projet, deux thèses et un post-doctorat ont été réalisés. La première thèse intitulée « Eco-conception et optimisation de matériaux isolants à base de fibres de bois », objet de ce document, portée par l'industriel FINSA, est effectuée au laboratoire I2M. La seconde thèse, portée par l'ESB, a été effectuée par Mohamad Hussein Hobballah et avait pour sujet « Optimisation multi objectif d'un isolant thermique à base de fibres de bois ». Le post-doctorat, effectué par Huyen Tran, a porté sur l'étude du comportement de ce type de matériaux en compression.

# Sommaire

<b>INTRODUCTION</b> .....	<b>1</b>
<b>1 ÉTAT DE L'ART : CONCEPTION, CARACTERISATION MORPHOLOGIQUE ET THERMO-HYDRO-MECANIKES DE MATERIAUX NON TISSES A BASE DE BOIS (MNTB)</b> .....	<b>6</b>
1.1 UTILISATION ACTUELLE DE LA RESSOURCE FORESTIERE SOUS FORME DE FIBRES ET DISPONIBILITE .....	6
1.1.1 Utilisations des fibres de bois dans les panneaux de process.....	6
1.1.2 Situation et disponibilité d'une ressource locale. ....	8
1.2 LES DIFFERENTS PROCES D'ELABORATION DES PANNEAUX A BASE DE FIBRES DE BOIS.....	9
1.3 LA FIBRE DE BOIS COMME MATIERE PREMIERE DES PANNEAUX .....	11
1.3.1 La fibre de bois dans le matériau massif : composition, microstructure et propriétés.....	11
1.3.2 La fibre de bois transformée comme matière première : composition, microstructure et propriétés .....	15
1.4 LES MATERIAUX NON TISSES A BASE DE FIBRES DE BOIS (MNTB) .....	16
1.4.1 Procédés d'élaboration des MNTB .....	16
1.4.2 Les fibres polymères thermoplastiques : composition, microstructure et propriétés.....	17
1.4.3 Physico-chimie des interfaces entre les différents types de fibres du réseau enchevêtré .....	19
1.4.4 Architecture du réseau fibreux .....	20
1.5 PERFORMANCES THERMIQUES ET THERMO HYDRIQUES DES MILIEUX FIBREUX CELLULOSIQUES .....	21
1.5.1 Modes de transfert de chaleur interne au sein d'un matériau fibreux : conduction, convection et rayonnement .....	21
1.5.2 Propriétés d'inertie thermique et de stockage énergie .....	26
1.5.3 Transfert de masse : 4 <sup>ème</sup> phénomène de transfert interne influençant le transfert de chaleur ....	28
1.5.4 Couplage entre humidité relative et température de l'air ambiant .....	30
1.5.5 Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique apparente de matériaux isolants ....	32
1.5.6 Dynamique du transfert d'humidité : inertie hydrique et capacité tampon.....	34
1.6 PERFORMANCES MECANIKES : COMPRESSIBILITE ET REPRISE EN EPAISSEUR.....	38
<b>2 MATERIAUX ET METHODES POUR L'ELABORATION DE MATERIAUX NON TISSES EN BOIS (MNTB)</b> .....	<b>41</b>
2.1 MATIERES PREMIERES UTILISEES POUR LA REALISATION DE MNTB ET METHODES DE CARACTERISATION .....	41
2.1.1 Défrichage des copeaux de bois : choix des tailles des fibres.....	42
2.1.2 Longueur des fibres de bois obtenues par classement Bauer Mac Nett et énergie consommée ....	43
2.1.3 Caractéristiques qualitatives obtenues par observation au MEB Environnemental .....	45
2.1.4 Diamètres des fibres de bois obtenues par Micro-tomographie aux rayons X.....	46
2.1.5 Fibres thermoplastiques utilisées .....	51
2.2 METHODES DE FABRICATION DES MNTB .....	53
2.2.1 Formation des nappes fibreuses.....	53
2.2.2 Consolidation des matelas .....	55
2.3 METHODES POUR LA CARACTERISATION THERMO-HYDRO-MECANIQUE DES MNTB .....	56
2.3.1 Découpe des échantillons.....	56
2.3.2 Mesure de la masse volumique apparente et de la densité locale (profils de densité) .....	56
2.3.3 Mesure des propriétés thermiques : effusivité, capacité et conductivité thermiques .....	57
2.3.4 Mesure des propriétés hydriques .....	63
2.3.5 Mesure de propriétés morphologiques et de transfert hydrique à partir d'imagerie 3D .....	63
2.3.6 Mesure des propriétés mécaniques : compression et reprise en épaisseur.....	66
2.3.7 Synthèse des caractérisations expérimentales.....	69
<b>3 CONCEPTION DES MATERIAUX NON TISSES : INFLUENCE DES PARAMETRES PROCESS ET DE LA MATIERE PREMIERE</b> .....	<b>70</b>
3.1 CHOIX DES PARAMETRES DE FABRICATION.....	70
3.1.1 Elaboration de premiers matériaux pour identification des paramètres de réglage des équipements : mesures préliminaires et éléments de réflexion.....	71
3.1.2 Choix des paramètres de réglage pour la réalisation des nappes à l'aide de l'ouvreuse nappreuse	76
3.1.3 Choix des paramètres de réglage pour la consolidation des MNTB en four thermique .....	78

3.2	RESULTATS SUR LA FABRICATION DES MNTB & DISCUSSION .....	79
3.2.1	Formation des nappes : incidence des différentes essences de bois et pertes matières en sortie d'ouvreuse .....	79
3.2.2	Influence du facteur de compression et de la granulométrie des matières premières sur le temps de consolidation.....	82
3.2.3	Panneaux élaborés et résultats préliminaires : influence des matières premières et paramètres de fabrication sur la masse volumique apparente .....	84
3.2.4	Contrôle de l'homogénéité de la masse volumique des MNTB par mesure de profils de densité ...	89
3.3	OBSERVATIONS DE LA MORPHOLOGIE ET TOPOLOGIE DES MNTB PAR IMAGERIE MEB .....	92
<b>4</b>	<b>CARACTERISATION DES PROPRIETES THERMIQUES ET THERMOHYDRIQUES.....</b>	<b>95</b>
4.1	CARACTERISATION THERMIQUE DES MNTB A 20°C/65%RH.....	95
4.1.1	Mesures de la teneur en eau des échantillons placés en conditions d'ambiance 20°C/65%RH .....	95
4.1.2	Mesures de la Capacité thermique Cp.....	95
4.1.3	Relations entre la conductivité thermique apparente et la masse volumique apparente.....	97
4.2	ELEMENTS DE MODELISATION THERMIQUE SEMI-EMPIRIQUE A 20°C/65%HR.....	102
4.2.1	Identification des paramètres du modèle semi-empirique de conductivité thermique et influence de la finesse des fibres .....	102
4.2.2	Relations entre conductivité thermique, masse volumique apparente, finesse, conductivité thermique et coefficient d'extinction.....	107
4.2.3	Relations entre conductivité thermique et paramètres microstructuraux .....	109
4.2.4	Conclusion partielle .....	111
4.3	LIEN ENTRE HYGROTHERMIE ET PERFORMANCES THERMIQUES DES MNTB .....	111
4.4	CARACTERISATION EXPERIMENTALE HYGROTHERMIQUE .....	113
4.4.1	Mesure de l'isotherme de sorption.....	113
4.4.2	Mesure des capacités de tampon hydrique MBV.....	114
4.4.3	Lien entre humidité relative et paramètres microstructuraux .....	116
4.5	SYNTHESE : ANALOGIES ET COMPARATIFS THERMOHYDRIQUES .....	118
<b>5</b>	<b>CARACTERISATION DES PROPRIETES MECANIQUES ET DE REPRISE EN EPAISSEUR D'ISOLANTS NON TISSES : COMPORTEMENT EN SERVICE .....</b>	<b>120</b>
5.1	CARACTERISATION EXPERIMENTALE 1 : MODULE ELASTIQUE ET REPRISE EN EPAISSEUR.....	120
5.1.1	Essais de compression simple sur échantillons de taille 100 x 100 x E (mm <sup>3</sup> ) .....	120
5.1.2	Essais de compression simple et reprise en épaisseur sur échantillons de tailles 50mm x 50mm x E (mm <sup>3</sup> ) : mise en œuvre d'un plan d'expérience .....	124
5.2	CARACTERISATION EXPERIMENTALE 2 : ETUDE DES INFLUENCES DU TAUX MASSIQUE ET DU TYPE DE FIBRES BICOMPOSANT, AINSI QUE DE LA TENEUR EN EAU, SUR LES DEFORMATIONS RESIDUELLES APRES COMPRESSION .....	131
5.2.1	Influence du taux de bicomposant sur les déformations résiduelles instantanées et à 7 jours.....	131
5.2.2	Influence de la morphologie du bi-composant.....	131
5.2.3	Influence de la teneur en eau sur le comportement en compression .....	133
5.3	MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE EN COMPRESSION DES MNTB.....	133
5.4	DISCUSSION DES RESULTATS OBTENUS SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES MNRB .....	134
	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>135</b>
	<b>PERSPECTIVES.....</b>	<b>137</b>
	<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>138</b>
	<b>LISTE DES FIGURES.....</b>	<b>147</b>
	<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>151</b>
	<b>LISTE DES PUBLICATIONS PERSONNELLES.....</b>	<b>153</b>

## Introduction

Le secteur bâtiment est le plus gros consommateur d'énergie primaire en Europe. Celui-ci concourt actuellement à près de la moitié de la consommation énergétique finale en France. Le chauffage en était responsable à hauteur de 27% en 2012 (Commission Européenne, 2013), (ADEME, 2013). Différentes « ruptures », sont opérées par le Grenelle de l'Environnement au travers des exigences réglementaires Règlementation Thermique (RT), qui cadrent les performances thermiques attendues des bâtiments pour les constructions neuves en France. Elles ont pour but de fixer une limite maximale à la consommation énergétique des bâtiments neufs pour le chauffage, la ventilation, la climatisation, la production d'eau chaude sanitaire et l'éclairage. La RT 2020 (ou Règlementation Environnementale RE2020) succède à plusieurs versions antérieures, aux exigences et aux champs d'application croissants. Les RT imposent une baisse des consommations énergétiques des bâtiments neufs (*Figure 1*) : de 190 kWh/(m<sup>2</sup>.an) en 2000 à moins de 0 kWh/(m<sup>2</sup>.an) en 2020. Si la RT2012, encore en vigueur jusqu'au 1<sup>er</sup> janvier 2021, introduit la notion de Bâtiment Basse Consommation (BBC), la RT2020 va plus loin en introduisant pour la première fois la notion de Bâtiment à Energie POSitive (Delorme, 2013).

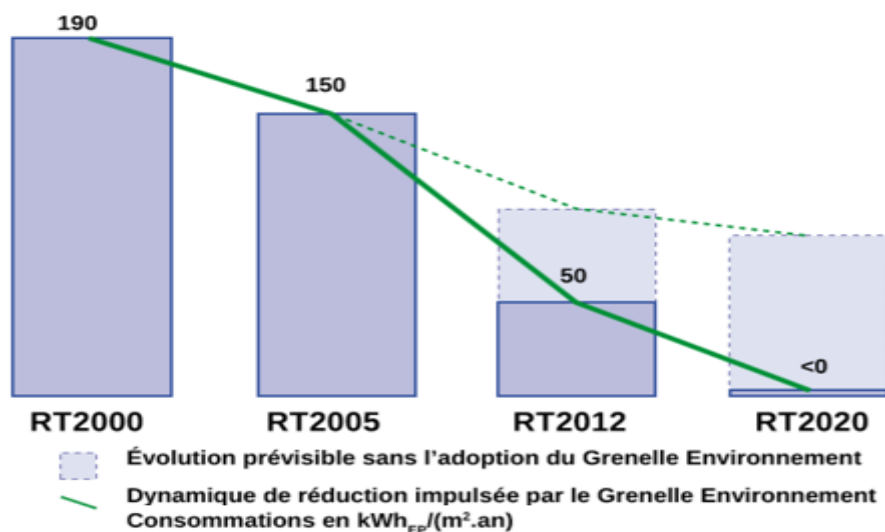


Figure 1 : Évolution française des exigences réglementaires RT des bâtiments neufs (Ministère de l'Écologie, 2011)

Dans la RT2012, qui contraint les logements neufs à une consommation inférieure à 50 kWh/(m<sup>2</sup>.an), ceci se traduit, entre autres, par une isolation renforcée et une inertie adaptée. Dans ce cadre, les émissions en phase de construction ou de rénovation peuvent dépasser les émissions liées à l'énergie consommée pendant la phase d'exploitation. La RT2020 met quant à elle beaucoup plus l'accent sur l'impact environnemental des produits du bâtiment et ne garantit donc plus la validité de cette hyper isolation. Ainsi, avec la RT2020, a lieu la mise en place d'une construction généralisée de bâtiments extrêmement performants. Cette réglementation thermique contraint l'obtention de besoins en chauffage de plus en plus faibles avec comme principal fer de lance : l'isolation des bâtiments. Cette cible potentielle est actuellement in/mal-exploitée et est à forte rentabilité. La RT2020, qui impose aux

bâtiments neufs d'être à énergie positive, sous-tend la recherche d'un compromis entre performance énergétique et empreinte carbone. Le bilan de Consommation d'Énergie Primaire (CEP) devient ainsi à énergie positive et sera le facteur prédominant dans le futur. La méthode de calcul de la RT2020 reprend les coefficients BBIO (Besoin BIOclimatique) CEP et TIC (Température Intérieure Conventiennelle), déjà présents dans la RT2012, mais ajoute 3 nouveaux indicateurs : le BEPOS, la Dies (Durée d'Inconfort d'Été Statistique) et l'Indicateur « Carbone ». Ce dernier met en avant une utilisation préférentielle de matériaux biosourcés, dont font partie les isolants supports de ce travail. Une résistance thermique élevée (R) ne garantira donc plus la validité des performances thermiques dans la nouvelle réglementation.

Le bâtiment est un secteur clé pour une transition énergétique puisqu'il est considéré comme l'un des principaux gisements d'économie d'énergie. En conséquence, le changement de paradigme dans l'évolution des réglementations thermiques françaises promeut une meilleure accoutumance énergétique. Le matériau d'isolation jouera un rôle différent et complémentaire dans celui-ci, mais devra proposer un compromis optimal dans ses caractéristiques technologiques, mais aussi environnementales et économiques. Plusieurs préoccupations économiques et environnementales ont ainsi engendré l'émergence de nouvelles générations d'isolants. Proposée comme une alternative aux isolants conventionnels, une nouvelle génération de produits biosourcés « garantirait » une empreinte « écologique moindre ».

A résistance thermique R égale, l'impact de différents isolants sur le changement climatique, mesuré en  $\text{kg eqCO}_2/\text{m}^2$ , et la consommation d'énergie non renouvelable engendrés à la production est présentée ci-dessous (Figure 2) (Brisset & al, 2015).

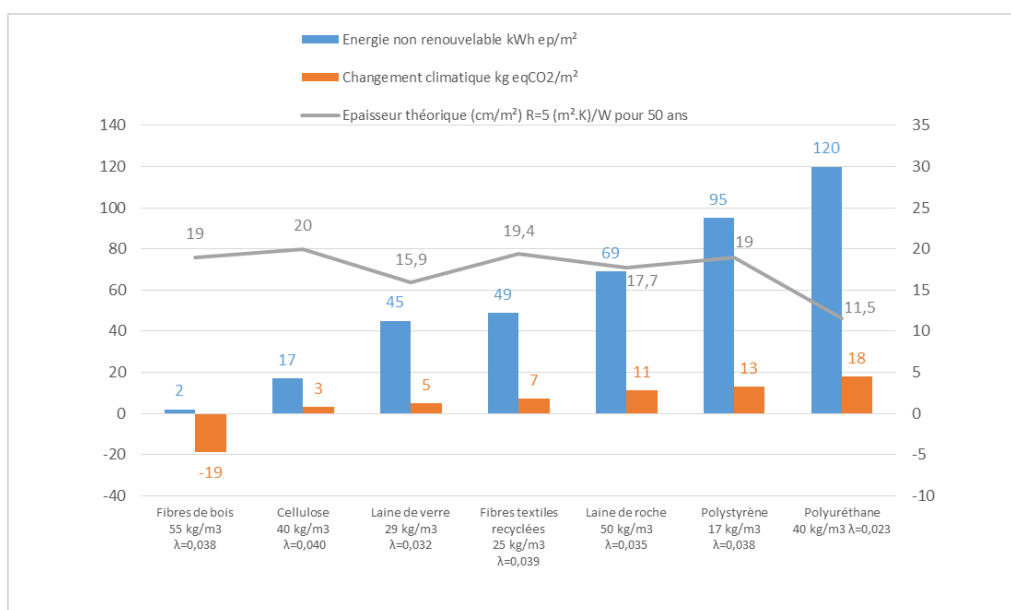


Figure 2 : Présentation des impacts environnementaux de quelques matériaux isolants à R égale (Brisset & al, 2015)

En comparant les indicateurs des performances des laines minérales avec celles des isolants biosourcés, il apparaît que, concernant l'impact sur le changement climatique, les laines de verre sont plutôt émettrices (+5 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>), tandis que les isolants à base de fibres de bois l'atténuent foncièrement (-19 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>). Concernant la consommation d'énergies non renouvelables, les laines biosourcées sont nettement plus performantes que les laines minérales, avec une consommation 20 fois plus faible (45 ou 69 vs 2 kWh<sub>ep</sub>/m<sup>2</sup>). Le marché français de l'isolation thermique rapportée a représenté 1,3 milliard d'euros en 2012. En 2016, 60% de ce marché était dédié à la rénovation, qui constitue, en France, un parc actuel d'environ 25 millions de logements avec un taux de remplacement inférieur à 1% par an. Les 40% restant sont dédiés aux bâtiments neufs qui sont d'environ 450 000 chaque année. La part de marché des isolants bois était de 2,3% en 2012 donc bien loin des parts de marché des laines minérales (50%) et des plastiques alvéolaires (40%) (Figure 3) (PIPAME, 2012).

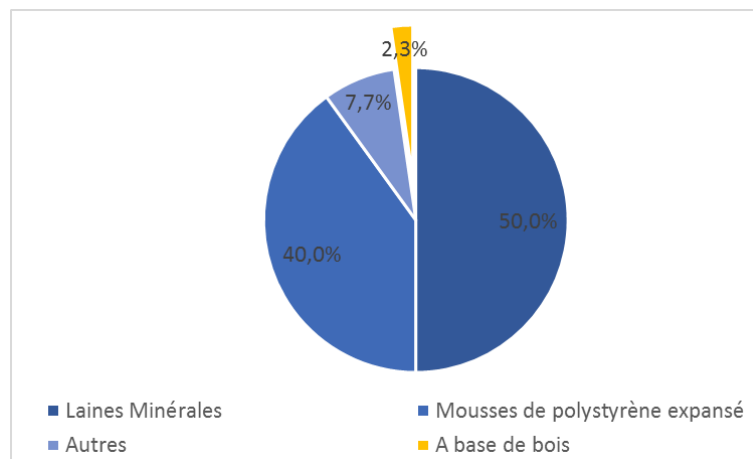


Figure 3 : Répartition des parts de marché par type d'isolants en France en 2012 (PIPAME, 2012)

Le marché des isolants à base de fibre de bois a une prévision de croissance annuelle assez forte sur les marchés européens sous réserve d'une mobilisation de la ressource non concurrente d'autres valorisations (Nomadéis, 2017), (PIPAME, 2012)). Il est donc important, avec la croissance des parts de marché, de sécuriser le client avec une meilleure connaissance et de meilleures performances techniques et environnementales des produits. Il faut aussi assurer le développement de ces matériaux en les rendant plus compétitifs en terme économique, grâce en particulier à l'optimisation des procédés de fabrication. Cependant, le bois jouit d'un atout essentiel comparé aux laines minérales puisqu'il est d'origine végétale, stocke du carbone et le plus souvent, dans le bâtiment, est issu de filières responsables. Ainsi, le bois et plus spécifiquement ici les isolants à base de bois, sont ou se doivent d'être des matériaux de proximité, issus d'une ressource locale et renouvelable.

Les réflexions précédentes nous amènent à nous poser la question suivante : l'isolation thermique intégrée en bois serait-elle une alternative mieux adaptée pour atteindre à la fois une basse consommation énergétique, des performances et un confort thermohydrique adaptés à des contraintes d'ambiance diversifiées et un faible impact environnemental ?

Des éléments de réponse à cette question ont été recherchés et apportés par les travaux du projet ECOMATFIB<sup>1</sup>, et notamment par ceux menés dans le cadre de cette thèse. L'objectif global de ECOMATFIB est l'optimisation multi-objectif des performances techniques, environnementales et économiques de matériaux composites à base de fibres de bois pour l'isolation, dépendant des matières premières / procédés / structure / performances / fin de vie, dans le but de concurrencer et remplacer les isolants traditionnels d'origine pétrochimique. Il s'agit ainsi de mettre en œuvre de nouveaux matériaux à base de fibres de bois aux performances optimisées, destinés à des utilisations en rénovation comme en neuf, isolation par l'intérieur comme par l'extérieur, isolation des murs, toitures, planchers, plafonds, combles, panneaux multifonction.

Les isolants à base de bois et à base végétale présentent un bon bilan environnemental mais leurs propriétés techniques restent encore trop faibles et leur coût trop élevé, par rapport aux isolants conventionnels, pour pouvoir s'imposer sur le marché. Afin de lever ce double verrou, il s'agit de travailler sur l'optimisation de l'utilisation de la matière première et du procédé d'élaboration, ou sur la création de nouveaux produits combinant différentes techniques, pour que ces produits ne soient plus considérés uniquement comme des matériaux verts mais aussi comme des matériaux avec un bon rapport performances/prix.

Dans le cadre des travaux menés et présentés ici, on s'intéresse pour cela à la conception même de ces matériaux, concurrentiels des laines minérales et autres isolants classiques du bâtiment. La compréhension, la reproduction et le contrôle des mécanismes de fabrication, pour mieux les optimiser, sont une étape essentielle du projet. Ainsi, la matière première, l'organisation des structures fibreuses (mono ou multicouches), les techniques d'élaboration puis de caractérisation sont au cœur de ce projet de thèse. On notera que l'étude menée dans ce sens vient par ailleurs alimenter la réflexion et les travaux complémentaires du projet ECOMATBIB, portant sur les méthodes d'optimisation multi-objectif et menés dans le cadre d'une 2<sup>ème</sup> thèse (Hoballah, 2017). Nous nous intéresserons plus précisément à des matériaux élaborés par procédés non tissés, issus de l'industrie textile et adaptés aux fibres de bois. Afin de présenter les travaux de cette thèse, le manuscrit sera organisé comme suit.

Nous présenterons dans un premier chapitre le recueil des connaissances actuelles, aussi bien sur la ressource forestière envisagée, sa disponibilité et sa proximité, que sur les types de matière première et procédés d'élaboration existants dont le procédé non-tissé envisagé pour l'étude, ainsi que sur les différents mécanismes thermiques, hydriques, mécaniques opérant au sein des matériaux, plus spécifiquement à base de fibres et destinés à l'isolation thermique.

---

<sup>1</sup> ECOMATFIB (2014-2017). AAP ADEME BIP. ECO-conception et optimisation multi-objectif de MATériaux isolants à base de FIBres de bois. Partenaires FINSA France, I2M, ESB, PPRIME, FCBA, STEICO



Dans un deuxième chapitre, nous formaliserons une présentation des outils mis en œuvre au travers des différents matériels et équipements utilisés, ainsi que les méthodes mises en place pour concevoir, élaborer puis caractériser les matériaux du projet.

Le troisième chapitre recensera les résultats sur la phase essentielle d'observations préliminaires sur le comportement au cours du procédé de fabrication, des matières premières utilisées (fibres de bois de différentes essences, fibres thermoplastiques), de leur influence sur les caractéristiques des matériaux. L'identification des paramètres de réglage machine, optimisés pour la réalisation des matériaux, dépendant de la matière première utilisée, sera également présentée et discutée. On distinguera les phases de nappage puis de la consolidation des matelas formés.

Dans le quatrième chapitre, nous exposerons l'ensemble des résultats des caractérisations thermiques et hydriques des matériaux non-tissés conçus à partir des réflexions précédentes. Les différentes propriétés des matériaux seront mises en relation : conductivité thermique, masse volumique, finesse des fibres, paramètres microstructuraux, propriétés hydriques.

Puis nous nous intéresserons, dans le cinquième et dernier chapitre, aux propriétés mécaniques des matériaux fibreux non tissés, qui, même si secondaires dans le cas d'isolants thermiques, ont un rôle fondamental au cours de la vie du matériau, depuis la cohésion du réseau fibreux lors de la fabrication, jusqu'au comportement lors du stockage, du transport ou de la mise en service.

Enfin, pour clôturer ce manuscrit, une conclusion nous permettra de relater les contributions acquises, suivie d'une discussion mettant en ouverture les différentes issues au travers d'éventuelles perspectives d'amélioration.

## 1 État de l'art : conception, caractérisation morphologique et thermo-hydro-mécaniques de Matériaux Non Tissés à base de Bois (MNTB)

Les panneaux de fibres de bois sont constitués à partir d'une matière première naturelle et renouvelable, la fibre de bois, que nous présenterons dans un premier temps. Ils peuvent être réalisés par différents procédés qui impactent leur microstructure et donc les propriétés finales recherchées : panneaux structuraux, panneaux isolants phoniques et/ou thermiques. Nous présenterons brièvement ces différents procédés avant de cibler le procédé non tissé qui nous intéresse. Nous verrons ensuite les caractéristiques des matières premières (fibres de bois et fibres thermoplastiques), puis leur nature et leurs degrés d'interaction s'opérant lors de la fabrication de ces matériaux. Les liens entre la microstructure particulière des milieux fibreux, les mécanismes et leurs propriétés thermo-hydro-mécaniques résultantes seront ensuite mis en évidence.

### 1.1 *Utilisation actuelle de la ressource forestière sous forme de fibres et disponibilité*

Dans cette partie, nous proposons tout d'abord une vision globale des utilisations de la fibre de bois comme matière première dans les panneaux, qu'ils soient structuraux ou d'isolation. Dans un deuxième temps, nous ferons un inventaire de la ressource disponible en France et en Nouvelle Aquitaine, en focalisant à la fois sur les essences candidates du projet mais aussi sur la proximité et la disponibilité de cette ressource, dans le cadre spécifique de nos travaux.

#### 1.1.1 *Utilisations des fibres de bois dans les panneaux de process*

Les fibres provenant du bois sont actuellement les matières premières naturelles les plus utilisées dans la conception de matériaux. Celles-ci constituant par exemple plus de 90 % de la masse des papiers et cartons (Voillot, 2004) fabriqués à environ 7,99 millions de tonnes en 2016 en France. Un visuel obtenu par MEB (Microscopie Électronique à Balayage) illustrant cette forte proportion de fibres est donné en Figure 4.

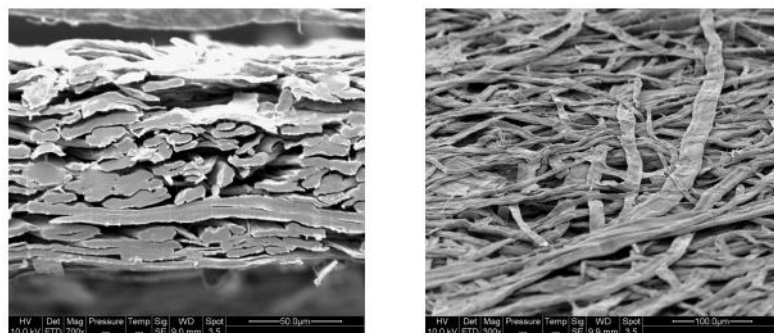


Figure 4 : Image MEB d'une coupe transversale de papier à base de pâte de feuillus ainsi que de la surface du même papier avec un angle d'observation de 60° (Vincent, 2007)

L'industrie papetière française comportait en 2017, 75 sociétés qui employaient environ 12 300 personnes (COPACEL, 2018). La production mondiale en 2017 de pâtes de bois pour papier a été estimée à environ 188 millions de tonnes, soit environ 94 % de la production globale de pâte, puisqu'environ 12 millions de tonnes de pâte furent faites avec d'autres fibres (Forest products statistics, 2019), (Voillot, 2004), (Marulier, 2013).

Les fibres sont également utilisées dans les panneaux à base de fibres de bois. La production française était d'environ 1,29 millions de m<sup>3</sup> en 2017. La production mondiale était quant à elle estimée à 118,8 millions de m<sup>3</sup> en 2017. La France a produit ainsi 1,11% du volume mondial de ces panneaux à base de fibres de bois. Ceux-ci peuvent être divisés en 3 catégories dont chacun des volumes produits en 2017 sont présentés ci-dessous (*Tableau 1*).

*Tableau 1 : Production française et mondiale de panneaux à base de fibres de bois en 2017 (Forest products statistics, 2019)*

Type de panneaux fibreux	Échelle française	Échelle mondiale	Application principale
MDF	1,1.10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (84,5%)	99,9 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (84.1%)	Aménagement intérieur
Panneaux durs	1,2.10 <sup>5</sup> m <sup>3</sup> (9,1%)	9,2 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (7,7%)	Emballage
Autres panneaux	82 000 m <sup>3</sup> (6,4%)	9,7 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (8,1%)	Isolation
Total	1,29 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	118,8 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	Structure & aménagement

Au-delà des panneaux à base de fibres de bois, tels que cités ci-dessus, d'autres sont composés soit de feuilles de déroulage (contreplaqués) ou de particules agglomérées (panneaux de particules) ou de lamelles orientées (OSB). A l'échelle mondiale en 2017, 402 millions de m<sup>3</sup> de panneaux à base de bois furent produits, dont les volumes et proportions respectives de chacun d'entre eux sont présentés ci-dessous (*Tableau 2*).

*Tableau 2 : Production mondiale de chaque type de panneaux à base de bois en 2017 (Forest products statistics, 2019)*

Type de panneaux	Échelle mondiale
Contreplaqués	157 millions de m <sup>3</sup> (39 %)
Avec lamelles ou particules	126,2 millions de m <sup>3</sup> (31.4 %)
Avec fibres	118,8 millions de m <sup>3</sup> (29,6 %)

De récentes statistiques de la Fédération européenne des panneaux (European Panel Federation, 2019) ont statué sur la production européenne de panneaux. Celle-ci a atteint un volume de 57,6 millions de m<sup>3</sup> en 2017, soit environ 14,4 % de la production mondiale.

### 1.1.2 Situation et disponibilité d'une ressource locale.

Pour estimer la ressource en bois disponible pour la fabrication d'isolants, une étude de ressource et de disponibilité en bois a été menée par le FCBA, à partir des données de l'Inventaire Forestier de l'IGN (Institut de l'Information Géographique et Forestière). Quatre essences ont été retenues du fait de leur potentiel de production pour cette étude, à savoir : le pin maritime, le pin *taeda*, le peuplier et l'eucalyptus.

La disponibilité annuelle maximale en **pin maritime** se situe dans la région Nouvelle Aquitaine avec 5,03 millions de m<sup>3</sup>, grâce au massif landais, le plus grand massif d'Europe de forêt artificielle. Les zones de culture du **peuplier** se situent dans le Nord et l'Ouest du pays et dans les grandes plaines alluviales (vallée de la Loire et vallée de la Garonne, vallée de la Saône). Le peuplier est donc bien implanté en France, puisqu'elle est le 1<sup>er</sup> pays producteur européen et le 2<sup>nd</sup> pays au niveau mondial après la Chine, avec une répartition de culture bien répartie à travers l'hexagone, hors zone de montagnes et région méditerranéenne (*Figure 5*).

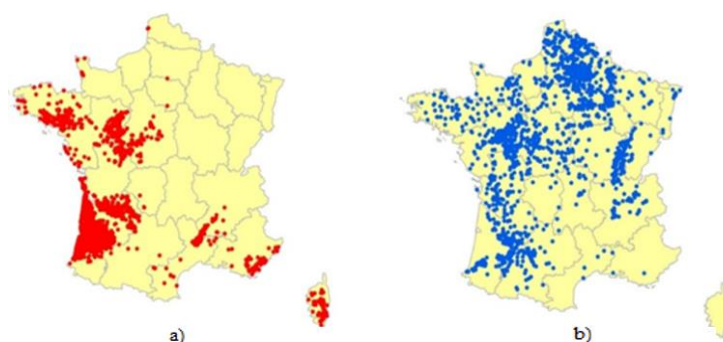


Figure 5 : Répartition des surfaces de peuplement. a) de pin maritime b) de peuplier (1 point représente un point d'inventaire) (IGN, 2019)

Le **pin taeda** ou l'**eucalyptus**, au développement plus récent en France, couvrent des surfaces plus faibles (quelques milliers d'hectares) (*Figure 6*).

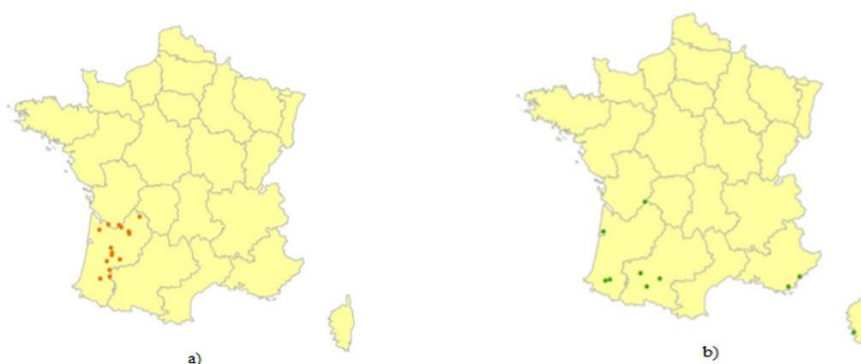


Figure 6 : Carte de la répartition des surfaces de peuplements recensés par l'inventaire forestier national a) de pin taeda b) d'eucalyptus

Le **pin taeda** représente une alternative au pin maritime sur les parcelles les plus riches du massif landais, sur les terrains favorables hors massif ainsi que pour boiser des terres agricoles délaissées, en particulier depuis les tempêtes de 1999 et 2008. Les plantations sont encore peu nombreuses mais les surfaces augmentent régulièrement au rythme de quelques centaines d'hectares chaque année, essentiellement en ex-Aquitaine. Les premières éclaircies devraient être réalisées rapidement, sur cette essence à croissance rapide, dont la coupe finale intervient vers **30 ans**. Les premières éclaircies devraient produire dans le Sud-Ouest, de l'ordre de 30 000 m<sup>3</sup> par an (de Boisseson, 2014).

L'eucalyptus est une essence à croissance rapide originaire d'Australie nécessitant des températures clémentes en hiver et de la bonne pluviométrie en été. La surface des eucalyptus en France ne doit pas excéder 5000 ha selon les avis des experts FCBA. Les eucalyptus en France sont plantés essentiellement en TCR, c'est-à-dire pour la production de bois de trituration. La croissance moyenne est de l'ordre de 8 tonnes de matière sèche (MS) par hectare et par an, soit 27 000 tMS/an ou 50 000 m<sup>3</sup>/an. Du fait de l'ancienneté des plantations et de leur traitement en taillis, ce potentiel est intégralement récoltable.

**En conclusion**, les ressources identifiées présentent des disponibilités différentes. Ainsi, le pin maritime et le peuplier sont des ressources couramment exploitées et dont les volumes disponibles à courts, moyen ou long terme sont importants. Toutefois, les tempêtes successives ont entraîné des tensions sur le marché de l'approvisionnement en détruisant les productions des années à venir. Le pin *taeda* et l'eucalyptus sont des essences en cours de développement dont le potentiel est avéré. La disponibilité pour assurer d'éventuelles applications industrielles existera à moyen et long terme. Avec 2,8 millions d'hectares, la région Nouvelle-Aquitaine dispose du massif forestier le plus étendu de France métropolitaine.

## *1.2 Les différents procédés d'élaboration des panneaux à base de fibres de bois*

Les procédés classiques d'élaboration des matériaux à base de fibres de bois peuvent être classés en 2 catégories : les procédés dits par voie humide, proches des procédés papetiers, et les procédés par voie sèche qui nécessitent l'apport soit d'une résine thermodurcissable ou soit de fibres thermoplastiques pour assurer la liaison entre les fibres. Dans le premier cas, on peut obtenir des panneaux de faible densité (inférieure à 0,3). Ce procédé, réputé comme polluant, est peu à peu abandonné. Dans le cas des procédés secs utilisant de la résine thermodurcissable, les produits obtenus par thermocompression peuvent présenter des densités apparentes classiquement supérieures à 0,6 pouvant être encore diminuées sous réserve d'augmenter la fraction massique de résine. Pour obtenir des densités plus faibles (< 0,1), ces produits nécessitent l'apport de fibres thermoplastiques. Dans le cas de procédés non tissés, développés plus récemment (Delisée & al, 2001), issus de l'industrie textile et adaptés aux fibres de bois, on obtient une structure 3D fortement enchevêtrée. Dans de tels cas, les fibres de bois représentent

jusqu'à plus de 90 % de la masse fibreuse totale et sont emprisonnées dans un réseau de fibres textiles (Tran, 2012). Les panneaux obtenus peuvent atteindre de fortes épaisseurs (jusqu'à 20 cm) et de très faibles densités (jusqu'à 0,04) tout en présentant une bonne cohésion.

Les performances et les domaines d'application des matériaux à base de fibres de bois sont fonction à la fois de la densité des produits mais aussi de leur mode d'élaboration (*Figure 7*). On retrouve ici les différents types de procédés d'élaboration présentés sur l'échelle des densités, avec une densité maximale égale à la densité de la paroi du bois (quasi constante pour toutes les fibres végétales).

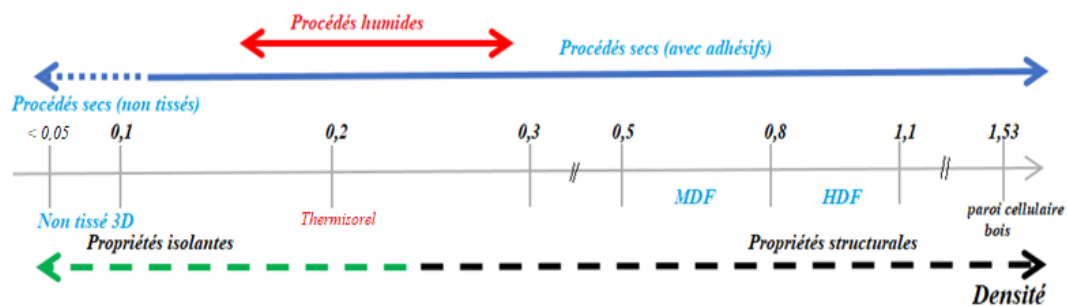


Figure 7 : Procédés utilisés pour la fabrication de panneaux en fibres de bois (Delisée, 2009)

Dans le cas des procédés secs, on trouve tout d'abord, par densité décroissante, les HDF (High Density Fiberboard), qui sont les plus anciens des panneaux de fibres. Réalisés par thermocompression de mats de fibres préencollées en UF (12% de fraction massique), ils sont caractérisés par une masse volumique apparente supérieure à  $900 \text{ kg/m}^3$  (de l'ordre de  $1000 \text{ kg/m}^3$ ). Ensuite les MDF (Medium Density Fiberboard) sont des panneaux rigides de fibres, produits suivant un procédé à sec similaire à celui des HDF et dans lesquels s'incorporent des liants organiques. Leur masse volumique apparente se situe entre  $500$  et  $800 \text{ kg/m}^3$  (habituellement de l'ordre de  $740 \text{ kg/m}^3$ ) (UIPP, 2019). Concernant les panneaux obtenus par procédés non tissés, qui sont au cœur de notre étude et dont nous parlerons plus précisément dans la section qui suit, les masses volumiques peuvent atteindre des valeurs proches de  $40 \text{ kg/m}^3$ . De manière générale, les panneaux sont réalisés à partir de fibres de bois, obtenues par déconstruction du bois selon des procédés variables. Cela permet d'obtenir des populations aux propriétés morphologiques et physiques adaptées à un procédé donné. La variation de la masse volumique dans l'épaisseur de ces matériaux est présentée ci-dessous (*Figure 8*).

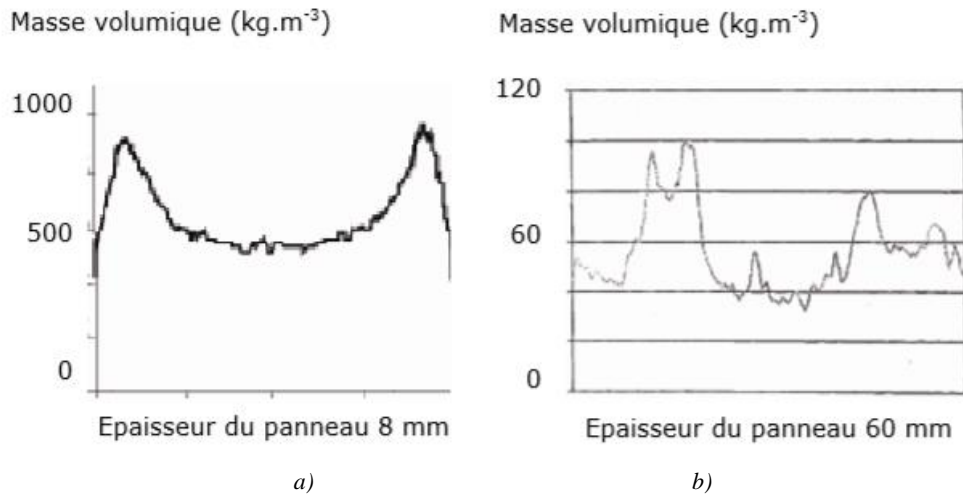


Figure 8 : Profils de densité dans l'épaisseur des panneaux. (Delisée, 2009). a) Procédé par voie sèche de type MDF : les panneaux présentent un profil de densité en U avec des surdensités sur les faces. b) Procédé textile non-tissé : on peut observer la variabilité de la densité dans l'épaisseur

Avant de nous intéresser à ces fibres de bois utilisées dans les panneaux, il est nécessaire de présenter la fibre de bois constitutive du bois massif.

### 1.3 La fibre de bois comme matière première des panneaux

#### 1.3.1 La fibre de bois dans le matériau massif : composition, microstructure et propriétés

Le bois est un ensemble complexe de tissus à parois lignifiées avec une structure hiérarchique à différentes échelles : macroscopique, microscopique, ultra structurale et moléculaire (Figure 9, Figure 10, Tableau 3).

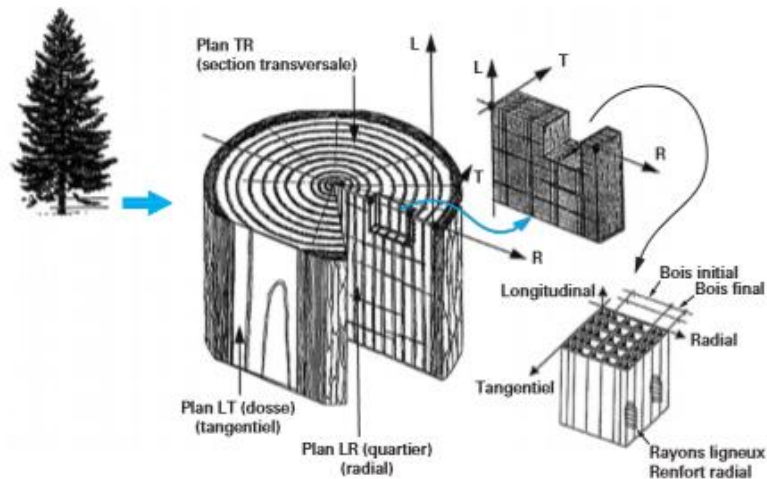


Figure 9 : Visuel de la macrostructure du bois (Triboulot, 2012)



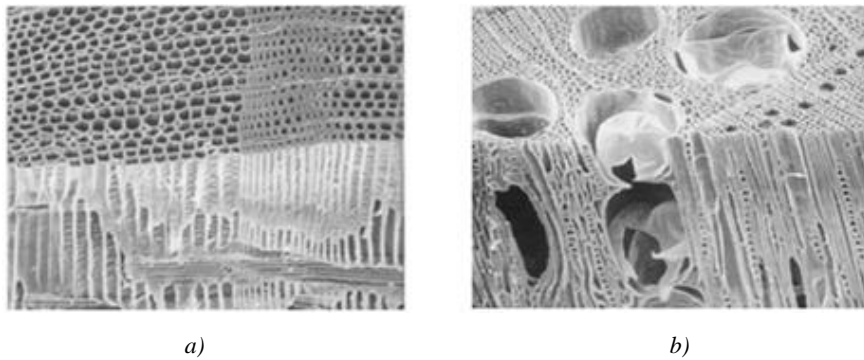


Figure 10 : Visuels de la microstructure (Aitken & al, 1988)  
a) d'un résineux b) d'un feuillu

Ses propriétés sont étudiées suivant trois directions (longitudinale, radiale, tangentielle) perpendiculaires les unes aux autres correspondant aux trois directions d'anisotropie de ce matériau. Il est important de noter la forte variabilité entre essences, des arbres eux-mêmes et des parties de l'arbre (racines, tronc, branches) mais aussi du lieu de croissance, du climat et de la nature des sols. On distingue les fibres, dans le bois massif, des résineux et des feuillus. Le bois des feuillus se caractérise par la présence de vaisseaux (Figure 11 a) qui sont spécialisés dans la conduction de la sève. Dans le cas de résineux (Figure 11 b), la sève circule dans les trachéides et évolue de l'une à l'autre au travers de ponctuations aréolées

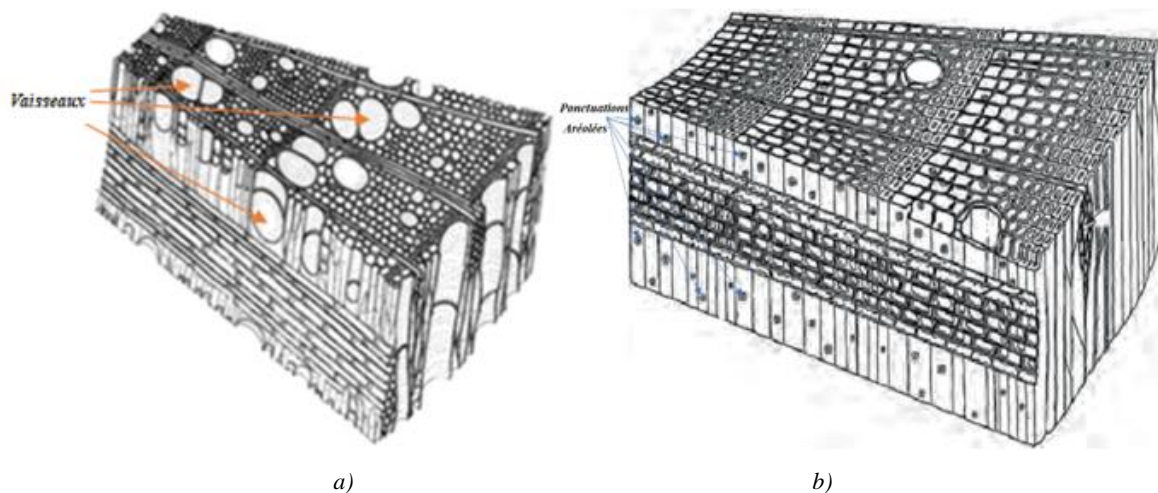


Figure 11 : Plans ligneux. a) de feuillus (frêne) b) de résineux (pin sylvestre) (Triboulot, 2012)

Les fibres unitaires des résineux sont intrinsèquement plus longues et plus flexibles que celles des feuillus. La taille des lumens (espace intérieur des fibres, délimité par les parois) est généralement plus importante chez les feuillus. Il est important de noter que la paroi cellulaire du bois n'est pas une membrane homogène. Sa complexité réside dans la superposition d'une lamelle moyenne, d'une paroi primaire et d'une paroi secondaire divisée en trois sous couches concentriques (Figure 12). La structure, l'épaisseur et la composition de chacune des couches constitutives de la paroi cellulaire sont illustrées en Figure 12, Figure 13 et Tableau 3.



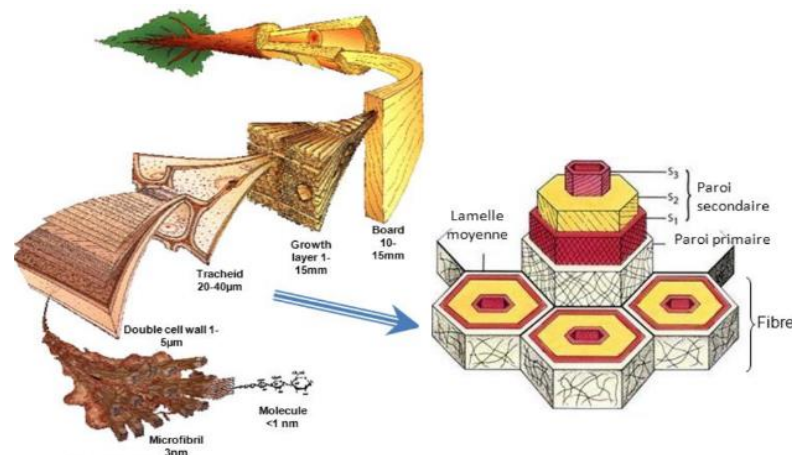


Figure 12 : Structure multi-échelle du bois (Harrington, 2002)

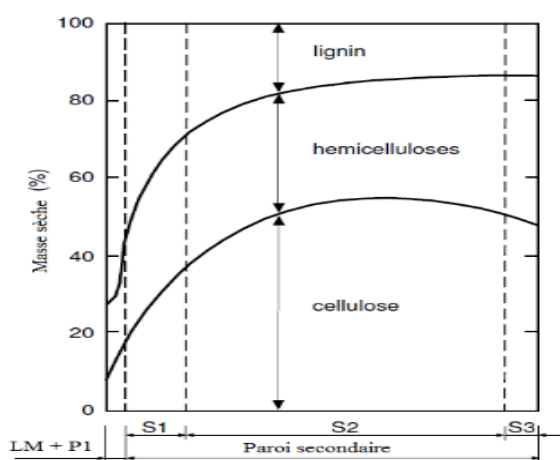


Figure 13 : Évolution de la composition chimique ultra structurale dans la paroi cellulaire (Persson, 2000)

La lamelle mitoyenne est une zone intercellulaire d'épaisseur variant de 0,5 à 2  $\mu\text{m}$  qui enveloppe complètement chaque cellule et assure la cohérence de la structure. La paroi primaire, très mince à hauteur de 0,1 à 0,5  $\mu\text{m}$ , est une paroi rigide qui ne s'hydrate pas facilement. La paroi secondaire, d'une épaisseur variante entre 1 et 10  $\mu\text{m}$ , représente la majeure partie de la paroi cellulaire. L'élément renforçant des fibres de bois est lié à la nature de la cellulose et en particulier à son degré de polymérisation (150 à 26500) et sa cristallinité (67-90%). Sa fraction volumétrique dans les parois cellulaires est de l'ordre de 40 à 45% à l'état sec. A titre indicatif, elle représente 95-99% du volume dans le coton et 70-75% des fibres libériennes. Elle se présente sous forme de très longues molécules groupées en structures caractéristiques appelées fibrilles élémentaires, elles-mêmes associées en entités plus complexes ou microfibrilles. Après les microfibrilles de cellulose, les constituants les plus importants de la paroi cellulaire sont les hémicelluloses et la lignine. Les hémicelluloses présentent un plus faible degré de polymérisation, dans leur état naturel, compris entre 50 et 300. La fraction volumique d'hémicelluloses dans les parois cellulaires du bois est d'environ 30% à l'état sec et joue le rôle d'interface entre cellulose et lignine. Ce sont des composés fortement hydrophiles les rendant en grande partie responsables des variations dimensionnelles. L'interaction entre la cellulose et les

hémicelluloses a fait l'objet de plusieurs investigations (Salmén & al, 1998), (Akerholm & al, 2001). La lignine est une structure complexe tridimensionnelle amorphe avec un degré de polymérisation allant entre 10 et 50 (Parviz & al, 2005). La distribution topo-chimique de la lignine à travers la paroi cellulaire des trachéides a été largement étudiée, en particulier chez les résineux (Donaldson & al, 1995), (Donaldson., 2001), (Donaldson, 2002), (Ruel & al., 2006). Ce composé joue le rôle de matrice, sa fraction volumique dans les parois cellulaires du bois est d'environ 25% à l'état sec. De manière générale, les compositions chimiques moyennes sont différentes entre les bois feuillus et résineux. Les bois feuillus possèdent moins de lignine que les résineux mais plus d'hémicelluloses (Guitard, 1987).

Tableau 3 : Constituants chimiques de la matière ligneuse dans les différentes couches de la paroi. Cas des bois résineux et feuillus (Guitard, 1987)

	Celluloses [%]	Hémicelluloses [%]	Lignines [%]
Lamelle mitoyenne	5	10	85
Paroi primaire	10	15	75
Paroi Secondaire S1	30	30	40
Paroi Secondaire S1	50	30	20
Paroi Secondaire S1	50	35	15
Bois résineux	50	25	25
Bois feuillus	50	30	20

La fibre dans l'arbre, avant transformation, apparaît ainsi comme un matériau composite, à structure complexe, dont les propriétés seront différentes suivant l'axe d'observation (longitudinal ou transverse). On peut noter en particulier que la valeur de la conductivité thermique de la paroi cellulaire dans le sens longitudinal est égale à 0,88 W. m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>. Celle-ci est double de celle dans le sens transverse puisqu'elle est égale à 0,44 W. m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup> (Siau, 1984). Le module d'Young axial de la paroi des fibres est évalué en moyenne à 35 GPa. Le module élastique spécifique varie entre 10 et 130 GPa. La résistance spécifique à la traction varie entre 1,6 et 2,9 GPa (Osso, 1998). Il est donc important de distinguer la structure de la fibre dans un plan longitudinal et transversal.

Les fibres naturelles ont la particularité de présenter une hygroscopicité relativement importante. Comme nous l'évoquerons plus loin (section 2.3.4 ou 2.3.5), on se limitera au cas où la teneur en eau des fibres est inférieure à la teneur en eau de saturation (environ 30% en masse). En deçà de ce point de saturation, l'eau est présente principalement sous forme d'eau liée, très peu mobile. Dans ce cadre, le degré d'interaction du bois et ses constituants avec la vapeur d'eau peut être décrit par des courbes d'équilibre reliant la teneur en eau fixée et l'humidité relative de l'ambiance (HR) (Figure 14) qui s'exprime sous la forme :

$$HR = \frac{p_v}{p_{sat}} \quad (1)$$

Avec

HR couramment notée  $\varphi$ , l'humidité relative de l'air [%]

$p_v$ , la pression de vapeur d'eau dans l'air humide [Pa]

$p_{sat}$ , la pression de vapeur saturante [Pa]

Le bois échangeant constamment avec l'air humide ambiant, chacun des états d'équilibre du matériau représenté dans un isotherme de sorption est atteint après soit un stockage (adsorption) ou une restitution (désorption) des molécules d'eau. Ce comportement hygroscopique des fibres naturelles s'explique par la présence abondante de groupements polaires contenus dans leur paroi cellulaire (inhérent à leur structure chimique), appelés sites de sorption (Simpson, 1980) (Jeffrey & al, 1991), (Berthold & al, 1996), (Engelund & al, 2013). Il est important de noter que les molécules d'eau adsorbées se comportent comme un constituant à part entière en impactant les propriétés des composants polymériques de la paroi cellulaire.

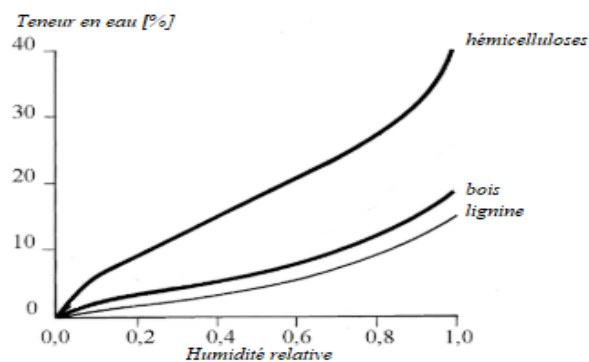


Figure 14 : Isothermes d'adsorption à 25°C des hémicelluloses, du bois et de la lignine (Navi, 2005)

### 1.3.2 La fibre de bois transformée comme matière première : composition, microstructure et propriétés

Les fibres de bois utilisées comme matières premières dans l'industrie du panneau sont obtenues à partir de plaquettes ou copeaux par un procédé de défibrage mécanique accompagné d'un prétraitement à la vapeur ou encore procédé thermomécanique. Ce procédé, contrairement aux procédés chimiques utilisés pour certaines pâtes à papier, permet de peu modifier la composition chimique des fibres d'origine du bois (Tableau 3), et en particulier conserve leur lignine. Le rendement des procédés mécaniques, bien qu'exigeant une plus forte dépense énergétique que ceux chimiques, ont un plus haut rendement matière (Pagora, 2019). L'obtention de fibres de bois par voie thermomécanique est donc, actuellement, plus adaptée dans la conception de matériaux non-tissés biosourcés. Les fibres obtenues par procédés thermomécaniques présentent des parois abîmées et donc une rugosité de surface élevée. Différentes granulométries allant de la fibre isolée aux faisceaux de plusieurs fibres (Figure 15) sont obtenues en réglant les paramètres du défibrage comme la pression, la température, l'écartement entre les garnitures des plaques du raffineur et leur profil. Il convient ici d'insister sur le fait que les fibres de bois transformées comme matière première présentent une grande variabilité tant au niveau de la géométrie que la porosité interne (Lux, 2005) (Tran, 2012) qui est de plus accentuée par le processus de défibrage. Le procédé thermomécanique peut être considérablement amélioré en faisant subir aux copeaux un traitement chimique/enzymatique sélectif approprié (Lecourt & al, 2009) mais ménagé,

avant le défibrage, de façon à accentuer le gonflement des fibres et rendant la lignine plus hydrophile, tout en réduisant les consommations énergétiques. Un degré de fibrillation supérieur est également possible par l'action mécanique d'un raffinage secondaire avec des paramètres adaptés.

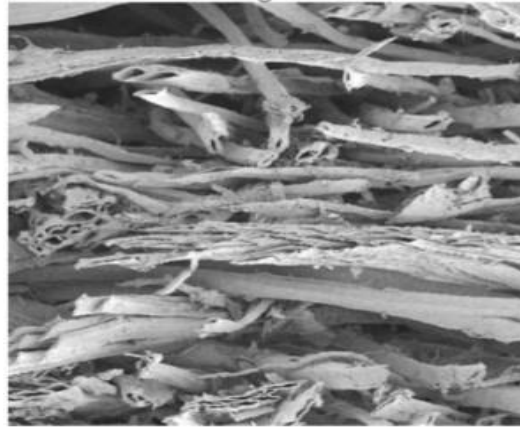


Figure 15 : Faisceaux de fibres de bois et fibres individuelles de pin maritime (Lux, 2005)

#### 1.4 Les matériaux non tissés à base de fibres de bois (MNTB)

L'Europe compte plusieurs dizaines de fabricants d'isolants à base de fibre de bois, la plupart d'entre eux sont des groupes étrangers, en majorité allemands. Parmi eux, des groupes tels que HOMATHERM, PAVATEX (SOPREMA), STEICO ont développé des unités de production en France. Leur chiffre d'affaire global était de l'ordre de 100 millions d'euros en 2012. Celui-ci a été estimé, en France, proche de 40 millions d'euros chaque année (Nomadéis, 2017).

##### 1.4.1 Procédés d'élaboration des MNTB

Un réseau de fibres enchevêtrées peut être créé au travers de 4 procédés de base : voie sèche par cardage (travail des fibres à l'aide de dispositifs à pointes), voie aérodynamique, voie fondue (pour les fibres polymères pouvant être liées à l'état fondu) ou voie humide (similaire aux procédés papetiers, les fibres sont dispersées dans de l'eau, égouttées puis séchées). Ces fibres enchevêtrées, appelées nappes, peuvent être consolidées soit chimiquement (par l'ajout de liants), thermiquement (pour les fibres polymères) ou mécaniquement (par aiguilletage). Contrairement aux procédés secs de type MDF, les procédés textiles non-tissés adaptés aux fibres de bois permettent de réaliser des structures 3D de forte épaisseur et de très faible densité (0,01 à 0,1), tout en donnant la possibilité d'intégrer des éléments intercalaires entre 2 nappes ou au sein même de celles-ci (Edana, 2019). Dans notre cas, le mélange des fibres de bois et thermoplastiques se fait par voie aérodynamique suivie d'une consolidation thermique.

### 1.4.2 Les fibres polymères thermoplastiques : composition, microstructure et propriétés

Les fibres polymères thermoplastiques se présentent sous forme mono ou multi composant. Pour certaines applications, dont celle qui nous intéresse puisqu'elle requiert le plus de liaisons possibles pour une masse de fibres minimale, ce sont des fibres bicomposants constituées de deux polymères distincts répartis sur toute la longueur de la fibre qui sont utilisées. Celles-ci ont la faculté de conserver leur longueur et surface spécifique après que les réseaux fibreux aient été consolidés thermiquement, tout en agissant comme agent de liaison et de cohésion interne du réseau. Chaque composant peut présenter différentes propriétés physiques ou chimiques. Ils peuvent être des variantes d'un même type de polymère ou de deux types de polymères totalement différents. Ces deux polymères sont coextrudés dans une filière pour former une morphologie complexe unique combinant les différentes propriétés de deux polymères. La fibre bicomposant créée par ce procédé acquiert ainsi de nouvelles propriétés dont les possibilités d'application sont gouvernées par le choix et la combinaison des différents polymères et additifs ainsi que de la forme spécifique de la section de la fibre bicomposant (Figure 16).

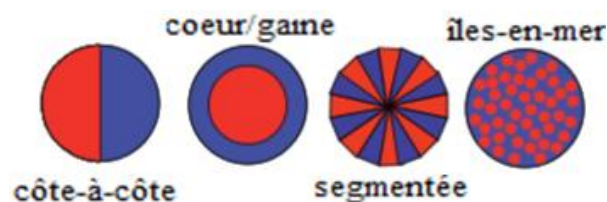


Figure 16 : Morphologie de sections disponibles de fibres bicomposant (Centexbel, 2009)

La morphologie « côte-à-côte » est principalement utilisée dans le domaine de l'habillement pour conférer aux fibres une frisure apportant un effet gonflant accru (Oh, 2006), (Prahsarn & al, 2013). L'association des matériaux polymères suivant la morphologie « cœur/gaine » est celle actuellement utilisée dans les isolants semi-rigides à base de bois. Cette configuration a la particularité d'avoir une gaine polymère à bas point de fusion. Les principaux matériaux utilisés ainsi que l'ordre de grandeur de leurs propriétés sont présentés ci-dessous (Tableau 4) autour d'une âme à point de fusion plus élevé. Sous des conditions de température adaptées, l'échauffement contrôlé de la gaine va lui permettre de se lier aux fibres environnantes en fondant et y adhérant lors d'une consolidation thermique.

Tableau 4 : Ordre de grandeur des propriétés des polymères utilisés dans la production de fibres bicomposants à 20°C d'après (Brinson & al, 2015), (Albrecht, 2006), (Ngo & al, 2016),

Type	Densité [g/cm <sup>3</sup> ]	Module d'élasticité [MPa]	Module de cisaillement [MPa]	Température de fusion [°C]	Lambda [W/m.K]	Cp [J/K.Kg]
Polyéthylène	0,95	250	110	131	0,34	2300
Polyamide 6	1,13	3000	760	220	0,25	1670
Polypropylène	0,089	1450	680	165	0,12	1840
Polyéthylène téréphtalate	1,3	3500	1400	245	0,15	1130

Après le refroidissement du réseau fibreux, ce sont ces liaisons qui, associées à l'enchevêtrement inter-fibres formé par voie aérodynamique, assurent la cohésion du réseau fibreux. Des morphologies plus complexes, telles que « segmentées » et « îles-en-mer », offrent la possibilité d'obtenir une grande surface spécifique après séparation/dissociation/dissolution. Ces types de fibres sont généralement destinés à des applications de filtration. Leurs comportements mécaniques sont fortement dépendants de la température et de l'humidité.

A l'état vitreux, les déformations sont faibles et les modules élevés. Dans cet état, la déformation élastique est contrôlée par le terme enthalpique de l'énergie interne, comme pour les métaux. Au-dessus de la zone de transition vitreuse, l'énergie thermique est suffisante pour que les chaînes macromoléculaires balayent spontanément toutes leurs conformations possibles en un temps très court devant le temps représentatif de la sollicitation. Il existe une relation biunivoque entre la réponse du matériau à l'échelle macroscopique et les temps caractéristiques moléculaires du polymère : la viscosité  $\eta$ . Celle-ci peut se définir par le produit du temps de relaxation  $\tau$  par le module élastique « instantané, au temps court »  $G$  (Lamèthe, 2004) :

$$\eta = G \cdot \tau \quad (2)$$

Avec

$\eta$  [Pa. s], la viscosité

$G$  [Pa], le module élastique instantané

$\tau$  [s], le temps de relaxation

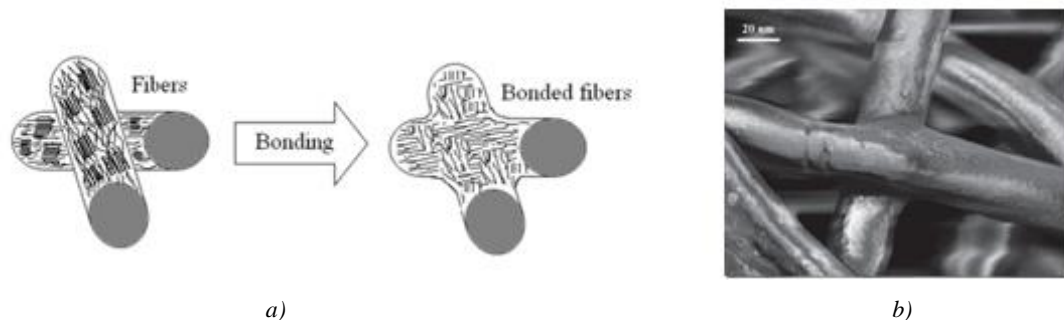
Compte tenu des valeurs élevées des masses molaires, on obtient classiquement pour les polymères fondus des viscosités de l'ordre de  $10^3$  Pa. s, soit  $10^6$  fois plus élevées que celle de l'eau (Billon & al, 2015). Les mécanismes fondamentaux de la dynamique des chaînes ont été décrits selon le concept de reptation (De Gennes, 1971), (De Gennes., 1979), (Doi & al, 1979) (Wool, 2000). Après la fusion des cristallites, les désenchevêtrements deviennent probables et donc les chaînes apparaissent statistiquement indépendantes les unes des autres. Le comportement devient majoritairement visqueux, mais reste viscoélastique (Billon & al, 2015). La taille et la morphologie des cristallites étant variée, cette seconde transition peut s'étendre sur plusieurs dizaines de degré (Lamèthe, 2004). Peu d'études se sont intéressées à l'impact des longueurs des fibres thermoplastiques et de leur taux de frisure sur les propriétés résultantes des matériaux obtenus (Bauer-Kruz, 2000), (Madhuri, 2002) : leur augmentation favoriserait l'enchevêtrement inter-fibres (stabilité dimensionnelle), la résilience (compressibilité) et le volume à masse équivalente tandis qu'elle limiterait la rigidité et réduirait les surfaces de contact des liaisons.

Dans la section qui suit, on s'intéressera aux liaisons entre les différentes fibres du réseau : liaisons bois-bois, liaisons bois-fibres plastiques, liaisons plastique-plastique.

### 1.4.3 Physico-chimie des interfaces entre les différents types de fibres du réseau enchevêtré

Il est admis que, tous matériaux confondus, les propriétés aux interfaces sont largement contrôlées par les natures chimique et morphologique ainsi que par les compatibilités physique/thermodynamique des deux constituants aux interfaces (Zhou & al, 1993), (Kim & al., 1998). Les mécanismes générant l'adhésion doivent donc être dissociés en fonction de la nature des surfaces mises en contact. Durant la consolidation des matelas fibreux à base de bois, quel que soit le procédé, plusieurs phénomènes sont décrits pour expliquer l'adhésion pouvant s'opérer simultanément : l'adsorption/mouillage (tension de surface), l'attraction électrostatique, les déformations viscoélastiques, la diffusion, les liaisons chimiques et l'ancrage mécanique.

**Dans le cas des liaisons entre fibres thermoplastiques**, comme expliqué en section 1.4.2, les mécanismes opérant à l'interface entre deux thermoplastiques miscibles sont essentiellement dus aux phénomènes de diffusion et d'inter-diffusion de leurs macromolécules au travers des effets de mouillage et de tension de surfaces. L'augmentation de l'adhésion entre polymères thermoplastiques est donc vraisemblablement due au renforcement de l'interface par la formation d'enchevêtrements entre les 2 matériaux (*Figure 17*).



*Figure 17 : Illustration de liaisons entre fibres thermoplastiques (cas fibres mono-composant)  
a) avant/après consolidation thermique (Hedge, 2006) b) aperçu MEB entre fibres PE & PP (Hossain, 2014)*

Ainsi, la reptation amenant les enchevêtrements interchaînes provoque l'adhésion. Un polymère moins visqueux adhérerait plus rapidement mais son énergie de cohésion, c'est-à-dire l'énergie d'adhésion maximale du système, est plus faible. Autrement dit, la diminution de la viscosité augmente l'adhérence aux faibles temps de contact mais diminue l'adhérence aux temps longs. Cet effet antagoniste entre vitesse de diffusion et de cohésion du matériau limite l'adhérence et nécessite la recherche d'un compromis entre fluage et résistance mécanique (Schach & al, 2007). En résumé, l'idéal pour un bon adhésif serait donc un polymère fluide au coefficient de diffusion élevé et avec une bonne résistance à la rupture.

**Dans le cas de liaisons entre fibres de bois et polymères thermoplastiques**, il n'existe pas de consensus sur la nature des phénomènes s'exerçant, si ce n'est une forte incompatibilité s'expliquant

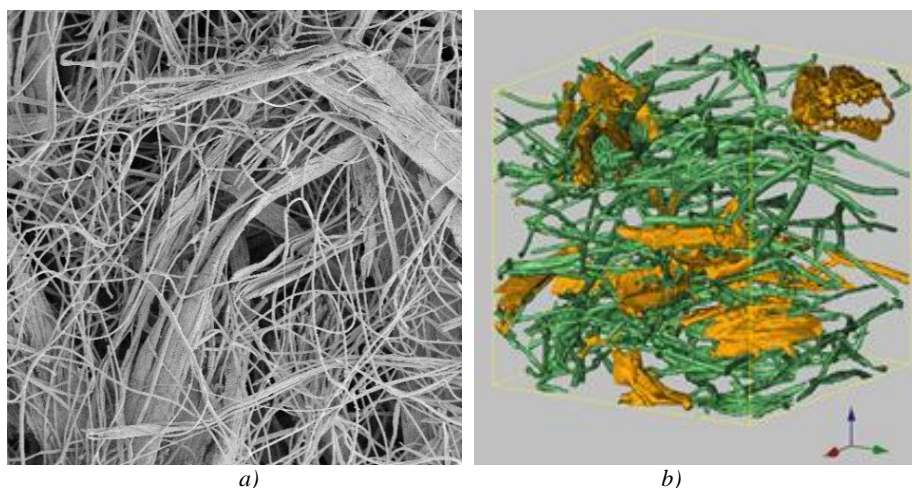


par la nature hydrophile des fibres de bois et au caractère plus hydrophobe des fibres thermoplastiques. En effet, la différence d'énergie libre de surface, également appelée tension superficielle, est à l'origine de la distinction au niveau de l'interface bois/polymère. Il est souvent admis que l'adhésion des fibres de bois aux polymères thermoplastiques se limite à des liaisons secondaires (Frihart, 2005). Ainsi, de manière générale, une matrice thermoplastique entourerait les fibres de bois sans pour autant y adhérer suffisamment. Le manque de transfert de charges au niveau de cette interface donnerait des liaisons moins rigides et plus cassantes qu'entre deux thermoplastiques miscibles. L'adhésion bois/thermoplastique serait donc majoritairement de nature mécanique.

Dans ce cas, la porosité multi-échelle des fibres de bois (ponctuation, lumens, déchirures, aspérités), la viscosité de l'adhésif, la pression appliquée et la durée du procédé joueraient un rôle clé dans l'ancrage mécanique entre les deux constituants. L'efficacité de l'ancrage mécanique dépend alors aussi bien de l'état de surface des fibres de bois que de la facilité du mouvement du polymère visqueux à travers les pores du bois (Hunter, 1993), (Watanabe & al, 1998), (Frihart, 2005).

#### 1.4.4 Architecture du réseau fibreux

Dans le cas de matériaux fibreux non tissés biosourcés, le type de matériau fabriqué est un milieu complexe multiphasique et hétérogène à plusieurs échelles, pouvant se définir comme un réseau unique et connecté de fibres thermoplastiques dans lequel les fibres de bois sont valorisées en tant qu'éléments isolants et/ou structurants (*Figure 18*) (Lux, 2005), (Tran, 2012). L'ensemble est maintenu par l'enchevêtrement inter-fibres des nappes formées par voie aérodynamique et par les liaisons créées par les fibres thermoplastiques lors de la consolidation thermique (section 3.3).



*Figure 18 : Visualisation d'un réseau Bois/PES*  
*a) par MEB (2,7\*2,7 mm<sup>2</sup>) (Tran, 2012)*  
*b) par segmentation 3D (1,8 x 1,8 x 1,8mm<sup>3</sup>) (Delisée & al., 2017)*

Peu d'études sont actuellement disponibles sur la microstructure de ces matériaux, distribués à l'échelle industrielle depuis seulement une vingtaine d'années. Celles-ci ont été faites sur un matériau



isolant prototype réalisé dans le cadre d'un projet industriel ADEME/ISOROY entre 1999 et 2001 dont la masse volumique apparente était d'environ  $45 \text{ kg/m}^3$  (Delisée & al, 2001) (Lux, 2005) (Peyrega & al, 2011) (Tran & al, 2013). Le composite était constitué à 20% massique de fibres thermoplastiques et 80% de fibres de bois (pin maritime). Des mesures morphologiques sur le réseau ont été réalisées à partir d'images 3D acquises par micro-tomographie. La porosité a été évaluée à 94,4%. L'étude granulométrique de l'ensemble des pores (distance minimale entre fibres) révèle une gaussienne de moyenne  $322 \mu\text{m}$  et d'écart type  $154 \mu\text{m}$ . L'anisotropie du matériau a également été mise en évidence puisqu'environ 72% des « voxels » fibres sont orientés dans le plan parallèle aux faces de ce matériau.

Quelle que soit l'échelle, le comportement de ces matériaux non-tissés dépend des propriétés du réseau de fibres, de la nature et du nombre de contact inter-fibres. Les microstructures, et donc in fine leurs propriétés, sont conditionnées par les procédés d'élaboration. L'agencement complexe des fibres dans l'espace et leur degré d'interactions auront donc, à priori, une influence considérable sur les propriétés. Toutefois, la façon dont cet agencement détermine le comportement thermo-hydro-mécanique reste encore mal connue.

## *1.5 Performances thermiques et thermo hydriques des milieux fibreux cellulosiques*

### *1.5.1 Modes de transfert de chaleur interne au sein d'un matériau fibreux : conduction, convection et rayonnement*

Les mécanismes de transfert de chaleur s'effectuent théoriquement suivant les mécanismes de conduction, rayonnement et convection. La stratégie d'optimisation des isolants thermiques est basée sur une meilleure maîtrise de la structure morphologique de la matrice solide et donc de la phase gazeuse, pour qu'ils aient une conductivité thermique effective  $\lambda^*_{\text{eff}}$ , somme des conductivités élémentaires relatives aux phénomènes de conduction, de convection et de rayonnement, la plus faible possible. Ainsi, toute la logique de conception consiste à diminuer la conductivité thermique dans le solide jusqu'à avoir une masse volumique optimale en deçà de laquelle il n'y a plus assez de matières solides pour limiter les transmissions de chaleur par rayonnement (*Figure 19*).

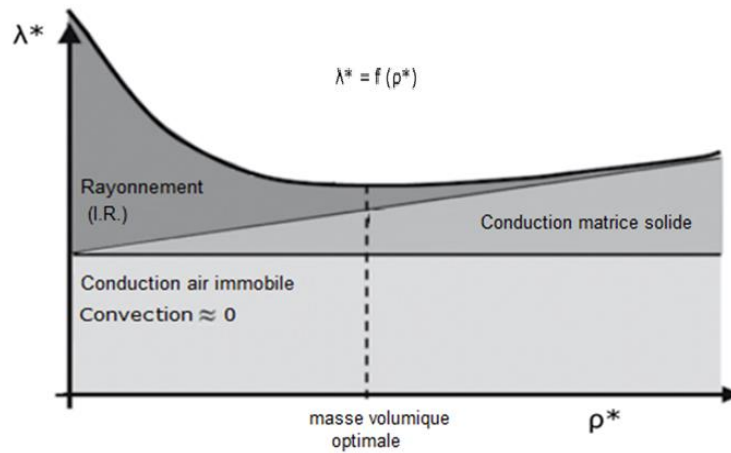


Figure 19 : Évolution de la conductivité thermique effective d'un isolant en fonction de sa masse volumique apparente (Coquard & al, 2012)

On s'oriente donc vers le développement de matériaux poreux ayant une fraction solide massique ou volumique la plus faible possible (< 5%) et intrinsèquement peu conductrice avec des pores de petites dimensions pour empêcher tout phénomène convectif. L'essentiel du transfert thermique se fait alors par conduction thermique à travers l'air sec immobile. La plupart des travaux s'accordent pour dire que la convection naturelle est inexistante dans la gamme de masse volumique apparente, perméabilité et température considérées (Bhattacharrya, 1980), (Adabie, 2002), (Lux, 2005). Ceci s'explique par la relative faible taille caractéristique des pores (+/- 500  $\mu\text{m}$ ) et par la grande surface spécifique des fibres constituant le réseau fibreux. Les phénomènes radiatifs et conductifs, qui seront présentés plus en détail ci-après, sont finalement les deux modes de transfert de chaleur dans les isolants fibreux. Le Tableau 5 ci-dessous présente les valeurs de conductivité thermique relative aux différentes familles de matériaux.

Tableau 5 : Conductivité thermique [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] à 25°C /  $P_{\text{atm}}$  de quelques matériaux d'après (Albrecht, 2006), (FPL, 1999)

Matériau	Cuivre	Silice cristalline	Verre amorphe	Polymères TP	Bois massif (12% HR)	Air sec immobile
$\lambda$ [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	398	11,7 (axe c)	1,4	0,1 – 0,4	0,1 – 0,21	0,026

Ainsi, d'un point de vue macroscopique, **les transferts conductifs** peuvent être abordés par l'application de la loi de Fourier sur des matériaux homogènes :

$$\varphi_c = -\lambda \cdot S \overrightarrow{\text{grad}} T \quad (3)$$

Avec

$\varphi_c$ , le flux de chaleur transmis par conduction [W]

$\lambda$ , la conductivité thermique [ $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]

$S$ , la section [ $\text{m}^2$ ]

$T$ , la température [K]

Nous allons ci-après nous attarder ci-après sur le **rayonnement électromagnétique**, qui désigne la propagation des champs électrique et magnétique. L'influence sur la conductivité thermique apparente du matériau est, à partir d'un certain seuil de densité, inversement proportionnelle à cette densité, comme

illustré en Figure 19. Il peut se caractériser par un flux de particules dépourvues de masse, les photons, associé à une onde : l'onde électromagnétique. Sa puissance par unité de surface est la luminance énergétique  $L$  [ $W/m^2.sr^{-1}$ ]. Le rayonnement électromagnétique dépend de sa longueur d'onde, de sa fréquence, ou de l'énergie de ses photons. Le domaine usuel du rayonnement thermique s'étend du visible au proche infrarouge, c'est-à-dire pour des longueurs d'ondes comprises approximativement entre 0,3 et 50  $\mu m$  (Huetz-Haubert, 1995). L'absorption et la diffusion sont les deux moyens permettant d'atténuer la luminance. Cette atténuation est proportionnelle à l'épaisseur du milieu traversé et au coefficient spectral d'extinction. Les relations sont les suivantes (Kaemmerlen, 2009) :

$$dL_{\lambda}(s, \vec{\Delta}, t) = \beta_{\lambda}(s, \vec{\Delta}) \cdot L_{\lambda}(s, \vec{\Delta}, t) \cdot ds \quad (4)$$

$$\beta_{\lambda} = \kappa_{\lambda} + \sigma_{\lambda} \quad (5)$$

Avec

$L_{\lambda}$ , la luminance spectrale directionnelle [ $W.m^{-2}.sr^{-1}$ ]

$s$ , l'abscisse curviligne [ $m$ ]

$ds$ , l'épaisseur du milieu

$\beta_{\lambda}$ , le coefficient monochromatique d'extinction [ $m^{-1}$ ]

$\kappa_{\lambda}$ , le coefficient monochromatique de diffusion [ $m^{-1}$ ]

$\sigma_{\lambda}$ , le coefficient monochromatique d'absorption [ $m^{-1}$ ]

$\vec{\Delta}$ , la direction de diffusion

Ces relations font apparaître le coefficient monochromatique d'extinction  $\beta_{\lambda}$ , qui correspond à l'inverse de la distance moyenne parcourue par les photons de longueur d'onde  $\lambda$  avant d'être interceptés par le milieu. L'interaction entre la matière et le rayonnement de longueur d'onde  $\lambda$  peut ainsi être caractérisé à partir des indices optiques  $n_{\lambda}$ ,  $k_{\lambda}$  qui définissent l'indice complexe de réfraction  $n_{\lambda}^*$  (Langlais, 1995) :

$$n_{\lambda}^* = n_{\lambda} - i.k_{\lambda} \quad (6)$$

Avec

$n_{\lambda}$ , l'indice de réfraction

$k_{\lambda}$ , l'indice d'extinction

La contribution du transfert radiatif dans un panneau de fibres de bois obtenu par procédé humide (Thermisorel, masse volumique de 170  $kg/m^3$ ) a été estimée à 4% de la conductivité thermique effective (Kaemmerlen, 2009) tandis qu'elle a été évaluée à 5% pour un isolant fibreux obtenu par procédé non tissé (Lux, 2005). Les plus faibles conductivités thermiques observées chez des non tissés contenant des fibres fines peuvent s'expliquer par une plus grande surface spécifique disponible pour interagir avec le rayonnement (Holcombe, 1984). Cette tendance a été confirmée sur des laines de verre (Langlais, 1995). La diminution du diamètre des fibres à masse volumique et température fixées est un moyen efficace pour réduire la composante radiative de laines de verre (Figure 20).

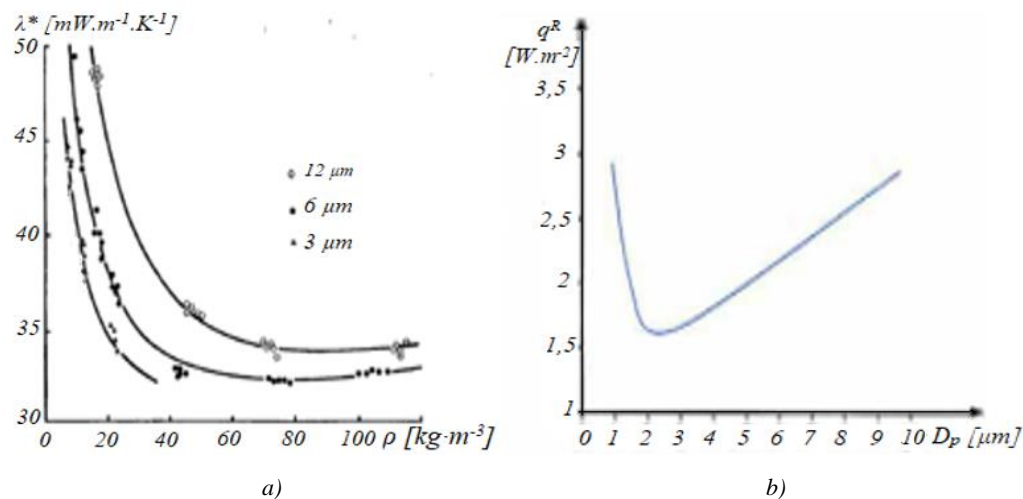


Figure 20 : Relations entre conductivité thermique, masse volumique, diamètre des fibres et flux surfacique de rayonnement des laines de verre. a) Variation de la conductivité thermique de laines de verre fonction de leur masse volumique et du diamètre de leurs fibres (Langlais, 1995). b) Flux surfacique de rayonnement en fonction du diamètre des fibres de laines de verre (Huetz-Haubert, 1995)

En évaluant la composante radiative de non tissés en fonction de la taille moyenne de leurs pores, (Vallabh, 2005) constate qu'elle tend à diminuer progressivement avec une taille de pores plus faible. Il établit également que les tailles de pore plus faibles sont obtenues avec des fibres plus fines. D'autres analyses montrent que l'angle polaire entre fibres et la direction de propagation du flux radiatif jouent un rôle très important sur la distribution du rayonnement diffusé dans le milieu : le transfert thermique radiatif au travers de la couche fibreuse isolante est minimal pour des fibres orientées dans des plans parallèles aux frontières (coefficient de rétrodiffusion maximal) (Lee, 1989).

Ainsi, les propriétés radiatives d'un milieu fibreux sont étroitement liées aux propriétés optiques de ses constituants ainsi qu'à leur forme, leur dimension et leur arrangement topologique dans le réseau poreux. L'absorption du milieu est fixée par la nature des constituants tandis que la diffusion est plus largement influencée par le degré de division de la phase solide. Les effets liés à l'orientation des fibres et aux tailles de pores se font également sentir immédiatement sur les propriétés radiatives puis se répercutent sur le flux de transfert de chaleur.

**En conclusion**, la texture des isolants microporeux conduit à des échanges de chaleur interne par conduction et rayonnement assurés par les transferts simultanés de conduction pure, dans la matrice solide et l'air sec immobile, et de rayonnement à la température ambiante. La démarche à adopter pour l'optimisation de la conductivité thermique équivalente d'isolants fibreux a été synthétisée et est présentée ci-dessous (Tableau 6) (Arambakan, 2013).

Tableau 6 : Recommandations pour l'optimisation de la conductivité thermique équivalente (conduction et rayonnement) d'isolants thermique fibreux, en relation avec les paramètres caractéristiques des réseaux (Arambakan & al, 2013)

<i>Prise en compte de l'augmentation des grandeurs caractéristiques d'un réseau</i>	<i>Effet sur la Conduction</i>	<i>Effet sur le Rayonnement</i>	<i>Recommandations pour chacun des paramètres du réseau</i>
Fraction volumique des fibres	Augmente	Diminue	Trouver optimum
Diamètre des fibres $\phi_f$	Augmente	Existence d'un optimum	Trouver optimum
Angle des fibres dans le plan // aux faces des panneaux	Diminue	Diminue	Réduire
Variabilité du diamètre des fibres $\phi_f$	Augmente	Existence d'un optimum	Trouver optimum
Nombre de contacts inter fibres	Augmente	Pas d'effet	Réduire

Dans le cas d'isolants fibreux, il a été proposé une relation semi-empirique représentant de manière satisfaisante leur courbe expérimentale  $\lambda^* = f(\rho)$ , avec l'hypothèse d'un découplage des transferts, de la forme (Bankvall, 1972) :

$$\lambda^*(\rho) = A + B \cdot \rho + \frac{C}{\rho} \quad (7)$$

Avec

$\lambda^*$ , la conductivité thermique équivalente [W/m.K]

A, la contribution du transfert par conduction dans la phase gazeuse (conduction de l'air)

B· $\rho$ , la contribution de la conduction de la phase solide, sous forme des fibres

C/ $\rho$ , la contribution du transfert par rayonnement, exprimé en termes de conductivité du rayonnement

Cette relation met bien en évidence les différents modes de transfert de chaleur mais représente une relation figée : les coefficients A, B et C doivent être déterminés pour chaque température moyenne et chaque type de matériau (en ce qui concerne son degré de finesse). Une signification physique plus précise de ces coefficients en tenant compte des paramètres dont ils dépendent est ensuite apparue (Langlais & Klarsfeld, 2004) :

$$\lambda^* = f(\rho) = \lambda^*(\rho, \bar{T}) = 0,2572 \bar{T}^{0,81} + 0,0527 \rho^{0,91} \left( 1 + 0,13 \frac{\bar{T}}{100} \right) + \frac{4 \sigma \bar{T}^3 d}{\left( \frac{2}{\epsilon} - 1 \right) + \bar{\beta} \rho d} \quad (8)$$

Avec

$\rho$ , la masse volumique [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

d, le diamètre quadratique moyen des fibres [m]

$\bar{\beta}$ , le coefficient d'extinction [ $\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

Le troisième terme de cette équation, fonction de la température et de la masse volumique, dépend du diamètre des fibres et d'un coefficient d'extinction. Il peut être déterminé expérimentalement à partir des résultats de la mesure de  $\lambda^*(\rho, T)$ . La présence dans cette équation du diamètre quadratique moyen des fibres permet de prévoir une amélioration des performances thermiques avec l'augmentation de la finesse des fibres. La corrélation entre  $\lambda^*$ ,  $\zeta(\rho)$ ,  $S_v$  permettra l'optimisation de l'isolant en agissant sur ses propriétés morphologiques.

### 1.5.2 Propriétés d'inertie thermique et de stockage énergie

D'autres propriétés intrinsèques de l'isolant caractérisent son comportement dynamique. Outre qu'ils freinent le flux de chaleur, les matériaux possèdent une capacité thermique leur permettant d'emmagasiner plus ou moins la chaleur. La capacité thermique des solides est une propriété macroscopique représentant la quantité d'énergie nécessaire pour augmenter la température d'un matériau. Elle résulte de la variation de l'énergie interne en fonction de la température et dépend de la capacité de stockage de l'énergie vibratoire des atomes constituant le solide. La plupart de l'énergie assimilée (absorbée) par les solides engendre une augmentation des énergies de vibration des atomes. La capacité thermique des matériaux solides est souvent mesurée expérimentalement à pression constante ( $C_p$ ). Elle définit l'énergie interne d'un système. Des ordres de grandeurs sont donnés ci-dessous pour quelques matériaux (Tableau 7).

Tableau 7 : Capacités thermiques massiques d'après (Albrecht, 2006), (Zürcher & Frank, 2014)

Matériau	PET	PP	PE	Bois sec	Laine de verre	Air sec	Vapeur d'eau	Eau liquide
$C_p$ [kJ. Kg <sup>-1</sup> . K <sup>-1</sup> ]	1,1 - 1,4	1,6 - 2,0	1,4 - 1,9	1,2	0,8 - 1,0	1,0	1,84	4,2

Dans le cadre de la conduction pure, c'est-à-dire ayant lieu en milieu immobile et en l'absence de toute source d'énergie interne liée à la dissipation, au changement de phase ou à des réactions chimiques, l'énergie interne d'un élément de solide ne varie que par échange sous forme de chaleur avec son voisinage (Daïan, 2013). Pour les solides rigoureusement indéformables (cas idéal), l'énergie interne ne dépend que de la température. On peut définir la chaleur volumique au travers de l'équation suivante :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \text{div } \vec{q} = C \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } \vec{q} = 0 \quad (9)$$

Avec

$C$ , la capacité thermique volumique [J .m<sup>-3</sup>. K<sup>-1</sup>]

$u$ , l'énergie interne spécifique [J.kg<sup>-1</sup>]

$\vec{q}$ , la vitesse de Darcy [m.s<sup>-1</sup>]

Lorsque la conductivité et la capacité thermique volumique sont constantes dans le milieu considéré, la combinaison des équations débouche sur l'équation de la chaleur qui gouverne l'évolution spatio-temporelle de la température :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c} \text{div } \vec{\nabla} T = \alpha \Delta T \quad (10)$$

Avec

$\alpha$ , la diffusivité thermique [m<sup>2</sup>/s]

**La diffusivité thermique  $\alpha$**  caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Considérons un matériau semi-infini porté à une température uniforme  $T_0$ . La face de ce matériau, située en  $x = 0$ , est portée brusquement à une température constante  $T_1$ . La résolution de l'équation de la chaleur permet le calcul de la densité de flux qui traverse le matériau en  $x = 0$ . Il est ainsi obtenu l'équation suivante :

$$\varphi_0 = (T_1 - T_0)(\lambda \cdot \rho \cdot C_p)^{1/2} \quad (11)$$

Ainsi, la densité de flux  $\varphi_0$  est, proportionnelle au produit de la capacité thermique volumique par la conductivité thermique, **appelée effusivité thermique  $b$**  du matériau ( $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2}$ ) :

$$b = (\lambda \cdot \rho \cdot C_p)^{1/2} \quad (12)$$

Cette quantité intervient lors des contacts thermiques entre deux milieux et traduit la variation de température de surface provoquée par une variation de la densité de flux thermique en surface. La densité de flux de chaleur transférée d'un milieu à un autre dépendant de l'effusivité de chacun des milieux. Sa valeur rend compte de l'importance conjointe des deux phénomènes : la variation de température par stockage de chaleur et la variation de température par conduction.

Lorsque l'on s'intéresse à ces processus dynamiques de transfert de chaleur (par conduction), on peut s'apercevoir que la conductivité thermique et la capacité thermique volumique interviennent de façon couplée et que le groupement constitué de leur produit est déterminant dans la relation liant la chaleur apportée au matériau et les variations de température qui en découlent (Krapez, 2006). Le principal bénéfice d'une forte capacité thermique est de lisser les variations de température d'un matériau soumis à une variation de température entre ses faces. Plus la capacité thermique d'un matériau est grande, plus ce matériau sera capable d'emmagasiner et de restituer de la chaleur en hiver ou de la fraîcheur en été.

À la différence de la diffusivité thermique qui décrit la rapidité du déplacement de la chaleur à travers la masse d'un matériau, l'effusivité thermique décrit la rapidité avec laquelle un matériau absorbe la chaleur. Ainsi une effusivité élevée limite les valeurs du gradient de température. La diffusivité et l'effusivité thermique donnent donc des informations importantes sur la transmission de la chaleur à l'échelle d'un matériau. Les sollicitations thermiques que subit une paroi de bâtiment ont le plus souvent un caractère périodique. Le temps de déphasage d'un matériau est le temps qu'il met à atteindre son régime stationnaire lorsqu'on lui applique un gradient de température. C'est donc la capacité du matériau à ralentir les changements de température. **L'inertie thermique** constitue donc un atout essentiel pour stocker l'énergie reçue par le matériau, et au-delà la paroi d'un bâtiment, et la restituer quand cela est nécessaire : elle permet d'emmagasiner les apports gratuits issus du rayonnement solaire pour réduire les consommations énergétiques liées au chauffage en présence d'une isolation performante. En été, son association à la ventilation nocturne contribue à évacuer l'énergie stockée au cours de la journée limitant ainsi les surchauffes à l'intérieur du bâtiment. On peut noter que cette propriété d'inertie thermique est propre aux matériaux issus de la biomasse : isolants naturels dont ceux à base de bois, ouate de cellulose... Elle leur confère des propriétés, complémentaires de la conductivité thermique classique, de plus en plus recherchées en termes de confort d'été notamment.

### 1.5.3 Transfert de masse : 4<sup>ème</sup> phénomène de transfert interne influençant le transfert de chaleur

Un milieu fibreux est constitué d'un squelette solide parcouru par un réseau de pores interconnecté et ouvert. Dans ce cas, le réseau de pores permet des échanges d'humidité et d'air avec son environnement. Au sein d'un fibreux biosourcé, l'eau se présente sous trois états : vapeur, liée ou libre. Le mouvement respectif de chacun d'entre eux est fortement lié à l'humidité relative (HR) de l'air environnant. Pour de faibles HR, la vapeur d'eau se déplace en présence de gradients de pression et/ou de température. Lorsque l'HR est intermédiaire, il s'avère un couplage entre vapeur d'eau et eau adsorbée. Enfin lorsque les HR sont importantes (HR > 80 – 90 %), les molécules d'eau coalescent dans les petits pores (Perré & al, 2006) (Engelund, 2011). L'eau liée et la vapeur d'eau interagissent au travers du processus de sorption.

Lorsque des molécules de vapeur d'eau sont adsorbées sur le bois ou tout autre matériau, une chaleur de sorption est libérée (passage vers un niveau d'énergie plus bas). Par conséquent lorsque des molécules de vapeur d'eau désorbent du bois, de l'énergie ou chaleur est nécessaire. La vapeur d'eau sorbée dans la paroi cellulaire du bois est similaire à l'état solide de l'eau ordinaire dans le sens où celle-ci à un niveau d'énergie inférieur que l'eau liquide (*Figure 21*). Cependant son enthalpie augmente avec la teneur en eau dans le bois, jusqu'au point de saturation, au-delà duquel son niveau d'énergie est égal à celui de l'eau liquide.

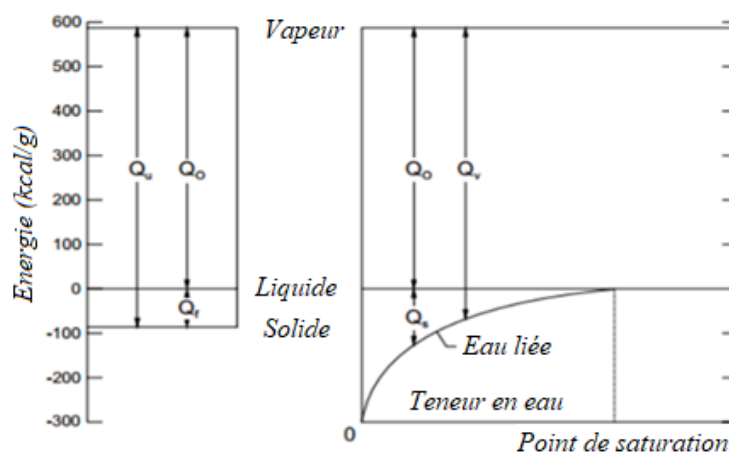


Figure 21 : Niveaux d'énergie relatifs (enthalpie) de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de la glace et de l'eau liée (sorbée) dans le bois en fonction du taux d'humidité (Time, 1998)

En s'attardant sur les niveaux d'énergie relatifs [N.E.R] de l'eau en fonction de son état (*Figure 21*), on distingue 5 états. Un premier nommé  $Q_0$  est le N.E.R de vaporisation de l'eau liquide. Un second nommé  $Q_f$  est le N.E.R de l'eau gelée. Un troisième nommé  $Q_u$  est le N.E.R de la vaporisation de l'eau gelée. Un quatrième nommé  $Q_s$  est le N.E.R de sorption de l'eau liquide dans le bois qui est plus communément appelé la chaleur de sorption. Enfin, un cinquième nommé  $Q_v$  est le N.E.R de l'eau sorbée (liée). A température fixe, l'eau libre s'équilibre toujours avec une pression de vapeur fixe car sa chaleur latente de vaporisation reste constante, contrairement à l'eau liée dont la chaleur de sorption dépend de



l'état hydrique du matériau. À la suite de ce qui vient d'être dit dans cette partie, il apparaît que quatre constats s'imposent. La chaleur de sorption dépend de l'état hydrique du matériau lignocellulosique. Celle-ci est nulle au point de saturation des fibres tandis que la désorption quand l'humidité relative de l'air tend vers 0% requiert niveau énergétique important. **La vapeur d'eau a le plus haut potentiel énergétique.**

Tout changement d'humidité dans le bois est donc inévitablement accompagné d'un échange de chaleur qui est généré pendant la phase d'adsorption/condensation ou consommé pendant la phase de désorption/évaporation. Le flux de chaleur traversant les parois d'un bâtiment diminuerait significativement lorsque d'importantes quantités de vapeur d'eau sont désorbées par un isolant hygroscopique et inversement. L'explication réside dans le flux de chaleur latent de la vapeur d'eau. Le mécanisme de diffusion dans le milieu poreux est identique à celui décrit dans l'air et reste valable au sein du gaz contenu dans les pores ( $> 10^{-6}$  m). Il doit néanmoins tenir compte de la résistance imposée par le squelette solide. Il est alors courant d'introduire un facteur de résistance à la diffusion de vapeur  $f$ , fonction de la porosité du matériau et de la masse d'eau par unité de volume dans le milieu (Mainguy & al, 1999):

$$g_{v, diff} = -D_v \cdot f \cdot \frac{\partial \rho_v}{\partial x} \quad (13)$$

Avec

$g_{v, diff}$ , la densité de flux de vapeur par diffusion [ $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ]

$D_v$ , le coefficient de diffusion de vapeur [ $m^2 \cdot s^{-1}$ ]

$\rho_v$ , la masse volumique vapeur [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

En reprenant l'expression du flux de vapeur, sa densité et la chaleur de changement d'état dans le cas d'un mélange idéal de vapeur d'eau et d'air sec au sein d'un milieu poreux, on obtient une expression développée de la densité du flux de chaleur avec transfert de masse (Duforestrel, 2014).

$$\vec{g}_c = -\lambda^* \cdot \vec{\nabla} T - (L(T) + h^m) \left( \frac{\pi_v^*}{p_t} \right) \vec{\nabla} p_v - (L(T) + h^m) (w_{mv} \cdot K_t - \frac{\pi_v^* \cdot p_v}{p_t^2}) \vec{\nabla} p_t \quad (14)$$

Avec

$\lambda^*$ , la conductivité thermique du milieu humide [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$L(T)$ , la chaleur latente d'évaporation de l'eau [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$h^m$ , la chaleur de sorption de l'eau absorbée [ $J \cdot kg^{-1}$ ]

$\pi_v^*$ , le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau [ $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1}$ ]

$w_{mv}$ , titre massique de vapeur d'eau dans la phase gazeuse [-]

$K_t$ , la perméabilité au gaz [s]

On voit que le flux de chaleur, exprimé avec transfert de masse, intègre une composante directement proportionnelle au flux de vapeur. La conséquence de ce constat est une prise de conscience du fait que des caractéristiques physiques, jusqu'ici considérées comme purement hydriques, possèdent en fait une dimension énergétique comme la perméabilité diffusive à la vapeur pour le transfert latent de matériaux très perméables. Dès lors qu'un système n'est plus à l'équilibre, un supplément du flux de chaleur dû à une partie du transfert de vapeur par diffusion va entraîner avec lui la chaleur latente

d'évaporation de l'eau. On peut ainsi constater que les matériaux les plus isolants sont ceux qui génèrent les flux de chaleur les plus faibles (faible conductivité thermique) mais aussi ceux présentant les perméabilités vapeur les plus élevées (transferts de masse maximum). En résumé, les flux de chaleur induits par les transferts de masse sont des flux enthalpiques, produit du flux de masse par l'enthalpie massique du constituant en mouvement, imputés au gradient de flux de chaleur qui sont proportionnels à la conductivité du matériau et au gradient de température transportés par le flux d'humidité.

La capacité thermique des matériaux hygroscopiques est également fonction de leur teneur massique en eau X, définie comme la masse d'eau contenue dans les matériaux, rapportée à leur masse anhydre. Cette propriété a ainsi été évaluée pour un isolant fibreux à base de bois, fabriqué par voie humide (Steico Therm), par méthode calorimétrique (Figure 22) (Traore, 2011). Il est intéressant de noter que la valeur mesurée, lorsque l'on tend vers la limite du point de saturation des fibres (teneur massique en eau X proche de 0,35), est celle généralement fournie par les fabricants d'isolants à base de fibres de bois.

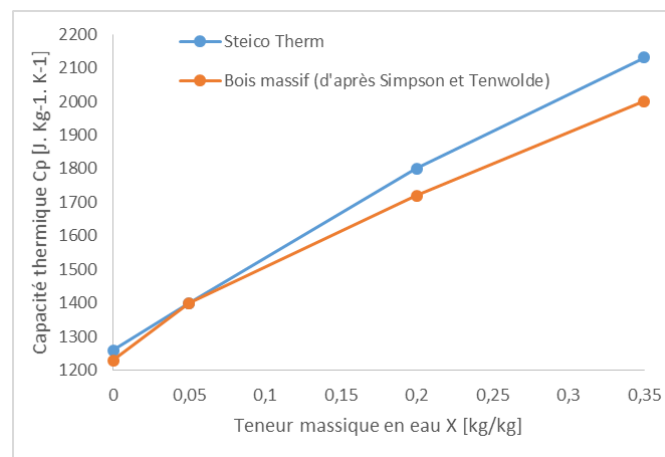


Figure 22 : Capacité thermique du Steico Therm en fonction de sa teneur massique en eau (Traore, 2011)

#### 1.5.4 Couplage entre humidité relative et température de l'air ambiant

L'humidité relative de l'air, HR, se définit comme le rapport entre pression de vapeur partielle et pression de vapeur saturée. Provenant de l'évapotranspiration des végétaux et de l'évaporation des sources d'eau, HR augmente naturellement avec leurs proximités. Celle-ci rend ainsi les régions côtières des continents plus humides que les régions intérieures. La vapeur d'eau étant considérée comme un gaz parfait à pression atmosphérique, l'une des relations entre sa pression et sa température peut s'obtenir au travers de la relation de Clapeyron-Clausius :

$$\frac{P_{vap} \Delta_{vap} H}{RT^2} = \frac{dP_{vap}}{dT} \quad (15)$$

Avec

$\Delta_{vap}, H$ , l'enthalpie de vaporisation [J.mol<sup>-1</sup>]

$P_{vap}$ , la pression de vapeur [Pa]

$R$ , la constante des gaz parfaits [J.mol<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>]

À une température donnée, une pression partielle de vapeur saturée est atteinte lorsque l'eau sous l'état vapeur change d'état en passant à l'état liquide. À cette pression, l'état liquide est en équilibre avec l'état vapeur. Les valeurs de cette pression de vapeur saturante  $p_{vs}$  et la densité de l'air sec, qui dépendent de la température à pression atmosphérique (1 013,25 hPa), sont présentées ci-dessous (Tableau 8). Il en est de même pour l'humidité absolue de l'air, HA, qui représente la quantité en grammes de vapeur d'eau [g vapeur/kg air sec] présente dans un volume d'air sec donné, soit encore la densité de vapeur dans l'air.

Tableau 8 : Évolution des quantités respectives d'air sec et humide en fonction de leurs températures

Température [°C]	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	40°C	45°C
$\rho_{air\ sec} [kg/m^3]$	1,292	1,247	1,225	1,204	1,184	1,164	1,127	1,110
$p_{vs} [Pa]$	611	1228	1705	2339	3169	4246	7383	9493
$H_{absolue} [g/kg]$ à HR 100%		7,6	10,6	14,7	20,1	27,2	48,9	64,3

Il advient de la relation de Clapeyron-Clausius et des valeurs concomitantes présentées ci-dessus, que plus l'air est chaud (température croissante), plus il peut potentiellement contenir de pression de vapeur à hygrométrie égale. Il est intéressant de noter que la température influe sur les valeurs des pressions de vapeur saturante, donc l'ampleur de tels phénomènes ne dépend pas uniquement du changement d'humidité relative, mais de l'importance du changement de pression partielle de vapeur. Ainsi une variation locale de température peut entraîner une redistribution de l'humidité et inversement.

Dans ce cadre, il apparaît que la température moyenne annuelle en France, entre 1981 et 2010, est de 12,5°C. Celle de l'année 2018 a été de 13,9°C, plaçant cette année au 1<sup>er</sup> rang devant celle de 2017, 2014 et 2011 (France, 2019). Cet écart mensuel à la moyenne de température de l'air à l'échelle européenne entre 1979 et 2015 est illustré ci-dessous (Figure 23).

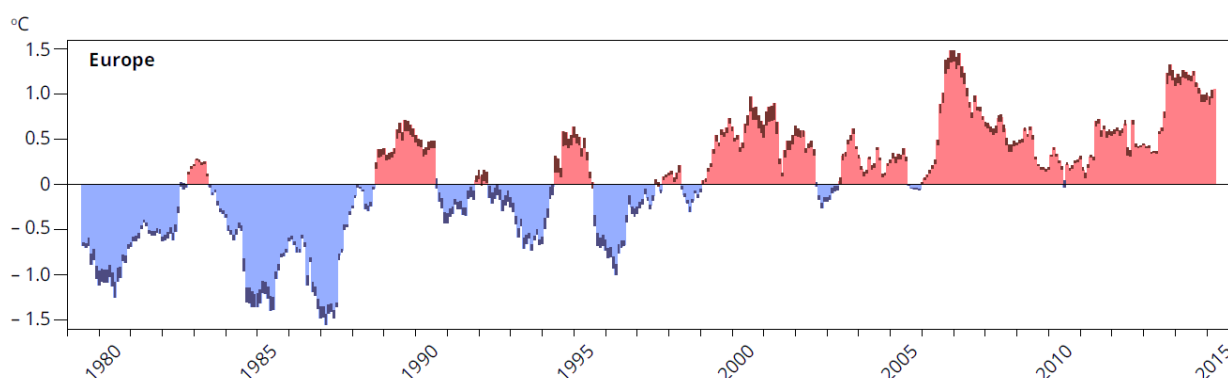


Figure 23 : Évolution des températures de surface de l'air à l'échelle européenne depuis 40 ans (European Environment Agency, 2017)

Ce gradient de montée en température peut également s'illustrer au travers de jours considérés comme chauds. Ces derniers peuvent se définir comme étant au-dessus du 90<sup>e</sup> percentile de la température maximale quotidienne centrée sur une fenêtre de cinq jours pour une période de référence. A partir d'une période dite de référence, comprise entre 1971 et 2000, leur évolution à l'échelle européenne par décennie est représentée ci-dessous de 1960 jusqu'à 2015 (European Environment Agency, 2017). Au travers de ce graphique (*Figure 24*), il apparaît que les températures dans les jours considérés étant chaud en Europe ont une augmentation comprise entre 4 et 9 jours par décennie.

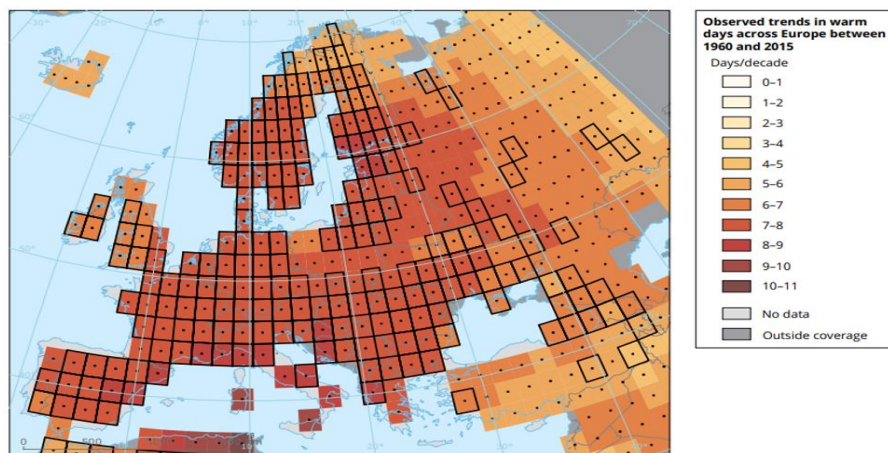


Figure 24 : Tendances de l'évolution des températures annuelles à l'échelle européenne de 1960 jusqu'à 2015 (European Environment Agency, 2017)

Cette prévision scientifique du réchauffement climatique devenant une responsabilité sociétale statuerait que le recours à la ventilation en saison estivale va devenir de plus en plus fréquent tandis qu'en période hivernale, chauffage par manque d'isolation. Dans ce cadre, rentrant dans le contexte actuel, l'étude des propriétés thermohydriques des matériaux isolants thermiques se justifie d'elle-même.

### 1.5.5 Influence de la teneur en eau sur la conductivité thermique apparente de matériaux isolants

Comme évoqué précédemment, le flux d'air humide perturbe notablement le champ hygrothermique dans l'isolant (autour de l'entrée d'air) et le flux latent induit par le flux de vapeur d'eau a un effet significatif sur le champ hygrothermique. Les gradients hydriques produisent un flux de chaleur (effet Dufour) et réciproquement un gradient thermique donne naissance à un flux de masse (effet Soret). D'autres travaux avancent qu'une augmentation de 1% volumique de la teneur en eau massique provoque une augmentation de 3 à 5% du flux de chaleur vers l'extérieur (Derome, 1999). L'évolution de cette conductivité thermique a également été mesurée, en fonction de la teneur massique en eau X, sur d'autres matériaux poreux (*Figure 25*).

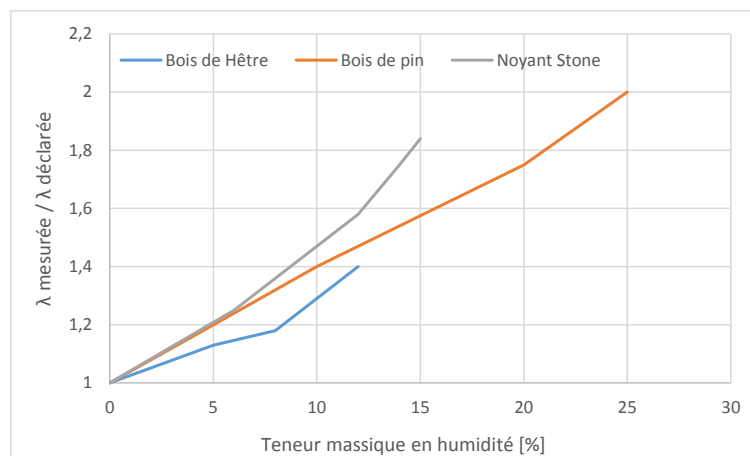


Figure 25 : Évolution de la conductivité thermique apparente pour quelques matériaux poreux en fonction de leur teneur en eau massique, d'après (Chereche & al, 2010), (Kol, 2009), (Derbal, 2014)

D'autres auteurs se sont intéressés à l'impact de la teneur en eau volumique sur différents produits isolants (Tableau 9) (Björn, 2011). La teneur en eau volumique est obtenue par cette relation (Fauchard & al, 2009) :

$$\theta = \frac{m_h - m_d}{m_d} * \frac{\rho_d}{\rho_h} \quad (16)$$

Avec

$\theta$ , la teneur en eau volumique [ $m^3.m^{-3}$ ]

$m_h$ , la masse humide du matériau [kg]

$m_d$ , la masse sèche du matériau [kg]

$\rho_h$ , la masse volumique du matériau humide [ $kg.m^{-3}$ ]

$\rho_d$ , la masse volumique du matériau sec [ $kg.m^{-3}$ ]

Tableau 9 : Impact de la teneur en eau volumique  $\theta$  [%] dans des isolants sur leur conductivité thermique d'après (Björn, 2011)

Type d'isolant	Conductivité thermique en W/m.K, à $\theta = 0\%$	Conductivité thermique en W/m.K, à $\theta = 10\%$	Augmentation de la conductivité thermique
Laine de verre	0,037	0,055	49%
Polystyrène expansé	0,036	0,054	50%
Polystyrène extrudé	0,034	0,044	29%
Polyuréthane	0,025	0,046	84%

Il apparait ainsi que la conductivité thermique varie sous des gradients de température et de densité mais également sous les taux d'humidité présents dans les matériaux. Par exemple, l'augmentation de la teneur en eau volumique dans des laines de verres de 0 à 10%, a pour conséquence une augmentation de la conductivité thermique de presque 50% (Björn, 2011).

### 1.5.6 Dynamique du transfert d'humidité : inertie hydrique et capacité tampon

Le transport d'humidité sous des conditions dynamiques dans des matériaux poreux est le résultat combiné des mécanismes de sorption et de transport, connu sous le terme de diffusion dynamique. Les transferts d'humidité dans les milieux fibreux impliquent une interaction entre les différents mécanismes de transport, leurs forces motrices et les effets des divers gradients capacitifs disponibles. Les variations d'humidité, engendrées par la production d'humidité intérieure et/ou par un gradient quotidien de l'hygrothermie extérieure, entraînent des pics d'humidité de l'air intérieur.

Un contrôle passif de l'hygrothermie intérieure est alors possible à partir de la variation de masse du matériau fonction du gradient de flux de vapeur circulant en son sein. Cette capacité, appelée tampon hydrique, caractérise l'aptitude d'un matériau à modérer les variations d'humidité ambiante. La **dynamique du transport de masse** peut être décrite par la seconde loi de Fick, en combinant les équations ci-dessous (Peuhkuri, 2003), (Peuhkuri & al, 2004) en négligeant le terme source d'humidité et considérant le transport unidimensionnel :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \frac{\partial p}{\partial x} \right) \quad (17)$$

Avec

$w$ , la masse d'eau par volume [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$\delta_p$ , la perméabilité à la vapeur d'eau du matériau [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ]

$\frac{\partial p}{\partial x}$ , le gradient de pression de vapeur [ $\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$ ]

La relation entre la variable d'état  $w$  et le terme moteur  $\frac{\partial p}{\partial x}$  est traditionnellement donnée par la capacité hydrique  $\frac{\partial w}{\partial \varphi}$  du matériau :

$$\frac{\partial w}{\partial HR} = \rho_0 \cdot \xi \quad (18)$$

Avec

$\xi$ , la pente de l'isotherme de sorption

En supposant les conditions isothermes, le terme moteur  $\frac{\partial p}{\partial x}$  dans l'équation précédente peut s'exprimer en fonction de la teneur en eau :

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \delta_p \cdot p_{sat} \cdot \frac{\partial w}{\partial HR} \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left( D_w \cdot \frac{\partial w}{\partial x} \right) \quad (19)$$

Avec

$D_w$ , la diffusivité hydrique [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$p_{sat}$ , la pression de vapeur saturante [ $\text{Pa}$ ]

La diffusivité hydrique contient des informations sur le transport et la rétention d'humidité et correspond à une mesure de la cinétique de changement de la teneur en eau dans un matériau lorsqu'il est soumis en surface à des variations cycliques en humidité relative. Les propriétés de transfert du matériau et ses capacités d'adsorption jouent un rôle très important dans la dynamique du transfert

d'humidité. Par analogie à l'effusivité thermique, l'**effusivité hydrique  $b_m$  d'un matériau** est donnée par l'équation (Hagentoft, 2001) :

$$b_m = \sqrt{\frac{\delta_p \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial HR}}{p_{sat}}} = \frac{\delta_p}{\sqrt{D_w}} = \frac{D_w \cdot \rho_0 \cdot \frac{\partial X}{\partial HR}}{p_{sat} \sqrt{D_w}} \quad (20)$$

Avec

$b_m$ , l'effusivité hydrique [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{s}^{-1/2}$ ]

$\delta_p$ , la perméabilité à la vapeur d'eau [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ]

$\rho_0$ , la densité à l'état sec [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$X$ , le taux d'humidité [ $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

$HR$ , le taux d'humidité relative [%]

$p_{sat}$ , la pression de vapeur saturante [Pa]

A partir de l'évaluation des effusivités hydriques de plusieurs matériaux poreux, utilisés dans l'enveloppe des bâtiments (Figure 26) (Rode, 2003), il a été constaté que les matériaux biosourcés testés ont une capacité d'accumulation d'humidité supérieure aux matériaux poreux minéraux tout en étant moins denses. On constate ainsi que l'isolant cellulosique a une effusivité hydrique 10 fois plus élevée que celle mesurée sur une laine minérale.

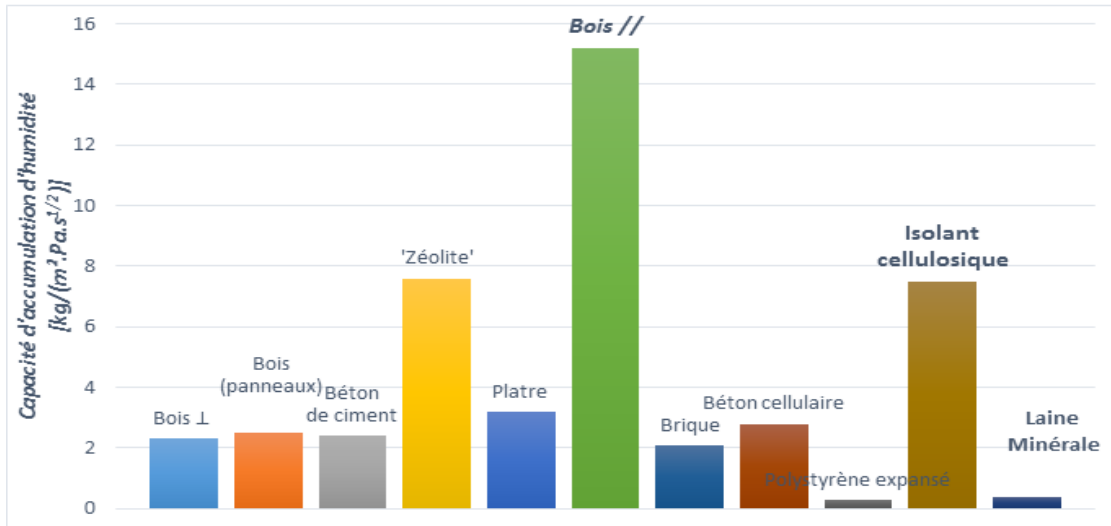


Figure 26 : Effusivités hydriques mesurées de quelques matériaux utilisés dans le bâtiment d'après (Rode, 2003)

Une autre manière de présenter l'effusivité hydrique est de déterminer la quantité disponible d'eau  $\Delta m_w$  [ $\text{kg}/\text{m}^2$ ] au cours d'un changement périodique (sinusoïdale) d'humidité relative. L'eau disponible est donnée par l'équation :

$$\Delta m_w = b_m \cdot p_s \cdot \Delta HR \cdot \sqrt{\frac{t_p}{\pi}} = \rho_0 \cdot \frac{\partial w}{\partial t} \cdot \Delta HR \cdot d_p \quad (21)$$

Avec

$b_m$ , l'effusivité hydrique [ $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{Pa} \cdot \text{s}^{1/2})$ ]

$p_s$ , la pression de vapeur saturante [Pa]

$\Delta HR$ , le changement d'humidité relative surfacique [%]

$t_p$ , la période temporelle [s]

$\rho_0$ , la densité à l'état sec [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$w$ , la masse d'eau par volume [ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ]

$d_p$ , la profondeur de pénétration [m]

La valeur du **tampon hydrique** (MBV : Moisture Buffer Value [ $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\% \text{HR}^{-1}$ ]), caractérisant l'aptitude d'un matériau à modérer les variations d'hygrométrie de l'air avoisinant, se détermine théoriquement par le produit de l'effusivité hydrique, de la pression de vapeur saturante et de la racine carré de la période de temps (Rode, 2003) :

$$MBV_{ideal} \approx \frac{G(t)}{\Delta HR} = 0.00568 \cdot b_m \cdot p_s \cdot \sqrt{t_p} \quad (22)$$

Avec

$G(t)$ , l'absorption d'humidité accumulée [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$ ]

$\Delta HR$ , le changement d'humidité relative surfacique [%]

$b_m$ , l'effusivité hydrique [ $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{Pa}\cdot\text{s}^{1/2})$ ]

$p_s$ , la pression de vapeur saturante [Pa]

$\sqrt{t_p}$ , la période temporelle [ $\text{s}^{1/2}$ ]

Dans les situations réelles, l'adsorption/restitution de vapeur et la teneur en humidité des couches profondes des matériaux varie très lentement par rapport aux changements de l'humidité de l'air ambiant. De plus, généralement surestimée en utilisant des paramètres statiques (comparée aux mesures dynamiques), cette valeur de tampon hydrique idéale définit une limite haute dans le cas hypothétique où il n'existe pas de résistance aux échanges de vapeur entre le matériau et l'air environnant (nombre de Biot). Un protocole d'essai associé, proposé à l'issue du projet NORDEST<sup>2</sup>, permet d'évaluer une valeur de tampon hydrique pratique (Rode., 2005). Les échantillons sont étanchés sur toutes les faces exceptée la surface d'échange. Après stabilisation à 23°C et 50%HR, ces spécimens sont soumis à des variations cycliques journalières d'HR (8h à 75%HR et 16h à 33%HR). La valeur tampon hydrique pratique est définie à partir des variations de masse durant ce cycle :

$$MBV_{pratique} = \frac{\Delta m}{A \cdot (HR_{haut} - HR_{bas})} \quad (23)$$

Avec

$\Delta m$ , l'adsorption/désorption massique d'humidité durant la période [g]

$A$ , surface (externe) accessible [ $\text{m}^2$ ]

$HR$ , le taux d'humidité relative [%]

La classification NORDEST hiérarchise cette régulation hydrique en fonction des gammes de tampon hydrique pratique obtenues selon l'équation 23 (Figure 27).

<sup>2</sup> **NORDEST (2005)**. Project on Moisture Buffer Value of Materials. Partenaires DTU Denmark, VTT Finland, NBI Norway, LTH Sweden



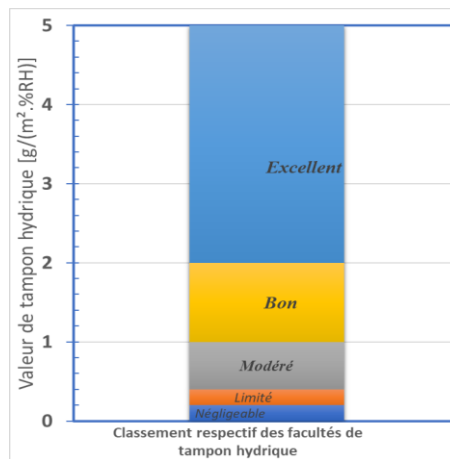


Figure 27 : Évolution de la classe des tampons hydriques (Rode, 2003)

Cette capacité tampon peut à la fois directement et indirectement réduire les consommations énergétiques dans les bâtiments (Osanyintola & al, 2006). A l'échelle du bâtiment, l'effet de tampon hydrique des parois dépend davantage de la perméabilité à l'air des matériaux que des propriétés de sorption (Carmeliet & al, 2005). Ainsi, on constate l'apparition sur le marché de barrières et matériaux plus perméables à la vapeur d'eau, en réponse à une demande croissante de parois permettant un maximum de transferts d'humidité. De même, la conception de systèmes constructifs (d'origine scandinave et allemande) autorisant de forts transferts d'humidité dans les parois (sans pour autant détériorer la structure et l'isolant), est de plus en plus développée. Dans toute paroi du bâtiment se produisent donc à la fois des échanges thermiques et des transferts de vapeur d'eau qui dépendent les uns des autres.

## 1.6 Performances mécaniques : compressibilité et reprise en épaisseur

Nous nous intéresserons dans cette partie aux propriétés mécaniques des isolants, et notamment à leur reprise en épaisseur après sollicitation par compression. Afin de montrer l'importance de la reprise en épaisseur de matériaux isolants, il est intéressant de s'attarder sur la répartition du coût d'achat d'isolants biosourcés. Voici, dans le Tableau 10, les familles d'isolants thermiques se partageant le marché français. Il s'avère que les isolants biosourcés sont 40 à 50% plus chers que les laines minérales et actuellement à des conductivités thermiques déclarées supérieures.

Tableau 10 : Ordre de grandeur des coûts d'isolants thermiques disponibles sur le marché Français fonction des caractéristiques thermiques à la fin 2016 et au début 2019

Marque	Type	Prix €/m <sup>2</sup> (10/2016)	Prix €/m <sup>2</sup> (03/2019)	$\lambda$ déclarée [mW.K <sup>-1</sup> .m <sup>-1</sup> ]	Epaisseur [mm]	R [m <sup>2</sup> .K.W <sup>-1</sup> ]	Vu sur
Isoconfort 35	Fibreux verre	9	9	35	160	4,55	castorama.fr
Isoconfort 32	Fibreux verre	10	11	32	120	3,75	leroymerlin.fr
Isoduo	Fibreux verre & bois	16	16	36	120	3,3	domus.fr
Steicoflex	Fibreux bois	16	15	38	160	4,2	Steico
Steicoflex 36	Fibreux bois	<del>16</del>	19	36	160	4,4	Steico
Pavaflex	Fibreux bois	15	15	38	160	4,2	prixdegros.fr
Knauf	Mousse PUR	20	<del>20</del>	22	<del>160</del>	3,7	leroymerlin.fr

En s'attardant sur les coûts inhérents du Steicoflex, la répartition du coût « livré sur chantier » (sans y inclure les frais fixes : employés, bâtiments...) en avril 2017, est donnée dans le Tableau 11.

Tableau 11 : Répartition des coûts du panneau « Steicoflex » avec le transport hors frais fixes (employés, bâtiment...) d'après (Lambert, 2017)

Éléments	%Prix total	% Prix par famille de coûts
Fibres plastiques	15%	45% matières premières
Ignifugeant	5%	
Fibres bois	25%	
Transport sur site d'emploi	20%	20% transport
Gaz	10%	20% procédé de fabrication
Électricité	10%	
Packaging	15%	15% packaging

Les isolants thermiques à base de fibres de bois étant volumineux et actuellement peu compressibles, le coût du transport a une très forte répercussion sur les prix finaux (20 %). Au-delà de l'analyse de ces matériaux sous les angles « thermohydriques », il est donc pertinent de s'intéresser à leurs propriétés mécaniques afin de déterminer quels peuvent être les leviers permettant de réduire le coût des isolants biosourcés. Ces démarches vont permettre d'actionner une dynamique résolument axée

sur des parties environnementale et sociétale. Dans les travaux de (Tran, 2012), la réponse à l'échelle dite macroscopique de ce type de matériaux fibreux à base de bois, lorsqu'ils sont comprimés, a été étudiée et est présentée ci-dessous (Figure 28). Lors de l'essai à 85% de déformation, il s'avère une complaisance fortement non linéaire. Lors de cycles de compression entre 18 et 32 %, il apparaît également un phénomène hystérétique non linéaire et une déformation résiduelle. Pour être à même de comprendre ce comportement macroscopique mécanique via toutes les relations qui sont cette fois microstructurales, il faut passer par l'étude du développement d'équations constitutives de la microstructure et de modèles phénoménologiques.

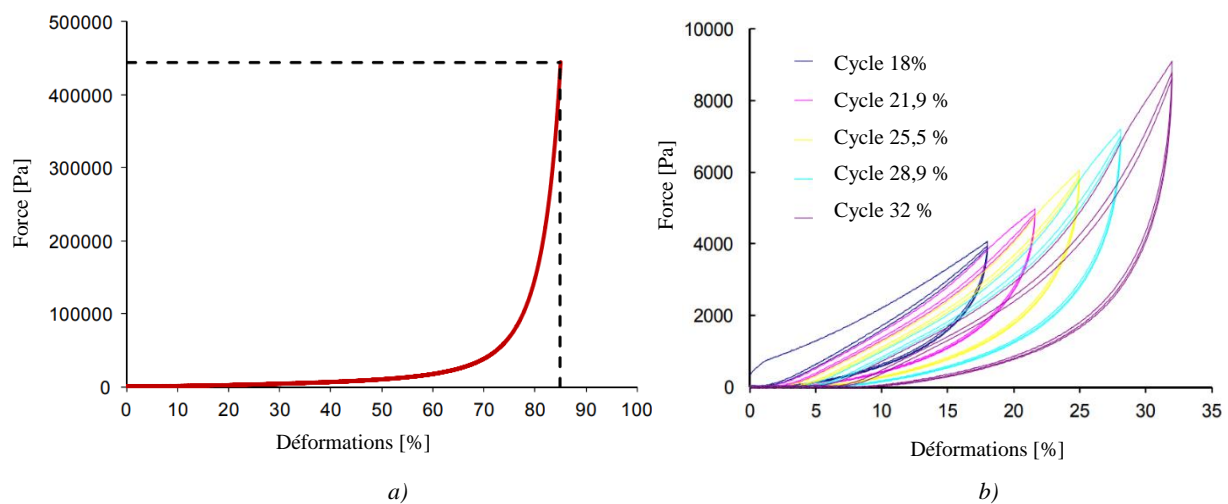


Figure 28 : Essai de compression sur fibreux bois/PES  
a) jusqu'à 85% de déformation b) cyclé à plusieurs taux de déformation (Tran, 2012)

Les matériaux non tissés présentent un comportement mécanique intermédiaire entre ceux des milieux granulaires, mousses et matériaux denses (Poquillon & al, 2007) (Gadot, 2015). D'après (Tran, 2012), ce comportement mécanique en compression de matériaux fibreux est basé, chronologiquement, sur des modèles de type (Wyk, 1946), (Komory & al., 1977), (Carnaby & al., 1989), (Komori & al, 1991), (Komori & al., 1997), (Beil & al, 2002) & plus récemment par (Masoudi., 2012), (Masoudi, 2015) & (Gadot, 2015).

La mécanique des non tissés est dictée par l'interaction de micro-mécanismes incluant la flexion et la réorientation des fibres, la rupture des liaisons, le glissement et la fracture des fibres (Matinez-Hergueta & al, 2015). La séquence d'activation de ces phénomènes et leur interaction à l'échelle microscopique dépend de la configuration initiale du réseau fibreux et de la nature des liaisons inter-fibres. Les non tissés présentent un processus de micro-mécanismes de déformation et de rupture complexes du fait de l'arrangement aléatoire et enchevêtré de leurs fibres et d'une modification de la topologie du réseau due à la rupture progressive de liaisons inter-fibres.

De nombreux modèles mécaniques sont basés sur la réponse des fibres à l'échelle microscopique mais aucun n'est satisfaisant pour étudier la compressibilité de non tissés à l'échelle macroscopique.

Dans (Wyk, 1946), la relation entre pression appliquée et taux de déformation des réseaux fibreux s'appuie sur le comportement en flexion des fibres, qui peut induire le comportement dominant de ces réseaux, en termes de déformation, à l'échelle macroscopique. Dans ces travaux, les forces de friction sont négligées et l'hypothèse d'une augmentation du nombre de contacts, avec la compression, est posée. Les distributions de la longueur et du diamètre des fibres et l'orientation induite par la compression sont des éléments centraux de la théorie proposée.

Dans (Komory & al, 1992), une technique pour estimer le nombre de contacts inter-fibres est présentée. La méthode est basée sur un concept de densité spatiale de l'orientation des fibres et sur des principes probabilistes. Ils ont supposé des fibres cylindriques droites de diamètre identique et ont défini la position des fibres dans l'espace par des angles polaires et azimutal. Ils ont mis en place un modèle géométrique et évalué la probabilité de contacts entre 2 fibres. Cette probabilité a ensuite été étendue au nombre moyen de contacts par fibre. Ils ont également présenté une méthode de probabilité géométrique pour estimer la fonction de densité de l'orientation et de la longueur des fibres dans un réseau. Ils obtiennent une relation contrainte/déformation basée sur une méthode énergétique bien que le nombre de contacts soit surestimé et que le module macroscopique en compression le soit également.

Il a été montré que les forces de compression sont généralement transmises au travers des contacts répartis en 2 familles : contacts glissants et non glissants (Lee & al, 1985), (Carnaby & al, 1989), (Beil & al, 2002). Un modèle hystérétique, inhérent à la proportion des contacts glissant et à l'asymétrie dans la valeur des paramètres structuraux des réseaux, a été introduit (Carnaby, 1987). Ce phénomène d'hystérésis des fibreux en compression a été confirmé par de nombreux auteurs (Stamm & al, 2004), (Tran, 2012), (Gadot, 2015), (Masoudi, 2015), (Chapelle, 2016). Son origine serait due aux phénomènes de friction inter-fibres au cours de la déformation et à la modification des paramètres structuraux (amortissement) engendrée par les micro-mécanismes de déformation.

Les approches micromécaniques développées (Wyk, 1946), (Neckar, 1997), (Komori & al., 1997), (Neckar & al, 2003) ne sont pas concordantes avec leurs résultats expérimentaux (Stamm & al, 2004). L'incohérence entre résultats expérimentaux et modèles micromécaniques peut être imputée aux approches utilisées pour caractériser la structure des réseaux fibreux aléatoires, en particulier dans l'estimation du nombre, de la répartition des contacts inter-fibres et des distances entre eux (Masoudi., 2012). A l'échelle microscopique, le nombre de contacts inter-fibres a un rôle clé dans la construction des modèles micromécaniques. Tandis qu'à l'échelle macroscopique, la flexion des fibres est le mode principal de déformation stockant l'énergie dans le réseau. Le glissement des fibres, considéré par un critère de friction du type Coulomb, est l'une des sources de l'hystérésis non linéaire. Les contacts non glissants absorbent réversiblement l'énergie macroscopiquement appliquée au réseau fibreux.

## 2 Matériaux et méthodes pour l'élaboration de matériaux non tissés en bois (MNTB)

### 2.1 *Matières premières utilisées pour la réalisation de MNTB et méthodes de caractérisation*

Dans le cadre du projet **ECOMATFIB**, une première étape a consisté à identifier les essences pouvant être utilisées, notamment en s'appuyant sur des critères de disponibilité d'une ressource locale, mais aussi de diversification de cette ressource, comme présenté en section 1.1.2. Les essences retenues pour notre étude sont ainsi le pin maritime, le pin *taeda*, le peuplier et l'eucalyptus. Les fibres ont été produites à partir de copeaux de bois approvisionnés par le FCBA de Grenoble, comme précisé ci-après. En parallèle, des fibres industrielles fournies par les entreprises STEICO et FINSA seront utilisées comme références tout au long de ce travail.

Le pin maritime est livré sous forme de copeaux en provenance des usines FINSA à Morcenx et STEICO à Casteljaloux. Le taux de matière sèche est de 45%. Les trois dernières essences (pin *taeda*, eucalyptus, peuplier) sont récoltées sur parcelle. Deux arbres ont été abattus dans le bassin aquitain pour le pin *taeda*, dans la région d'Alès pour le peuplier et dans la région de Toulouse pour l'eucalyptus. Les rondins sont tronçonnés à 1m et centralisés à Grenoble au FCBA. Ils sont alors écorcés et transformés en copeaux. La Figure 29 illustre les fibres de pin maritime de référence fournies par les 2 industriels du projet.



Figure 29 : Fibres de pin maritime de référence venant de STEICO (fibres longues pour l'isolation) et FINSA (fibres courtes pour les MDF)

En parallèle, il s'est déroulé un approvisionnement continu de fibres thermoplastiques. La majorité d'entre elles ont été transmises par l'industriel STEICO.

### 2.1.1 Défibrage des copeaux de bois : choix des tailles des fibres

Cette opération a été réalisée par le FCBA à Grenoble avec un défibreur sous pression Andritz de 30 cm de diamètre (Figure 30). L'ensemble de l'équipement est maintenu sous une pression de vapeur sèche de 5 bars (160°C). Les copeaux de bois, d'un volume individuel moyen d'environ 30\*5\*20 mm<sup>3</sup>, sont d'abord étuvés en amont de la vis d'alimentation puis convoyés vers la zone de défibrage par une vis sans fin dont la vitesse de rotation est adaptée pour avoir un débit constant. La force centrifuge contraint les copeaux à traverser les plaques espacées de l'entrefer. Afin d'obtenir différentes morphologies ou tailles de fibres, des modifications de l'espacement des entrefers ont été réalisées.

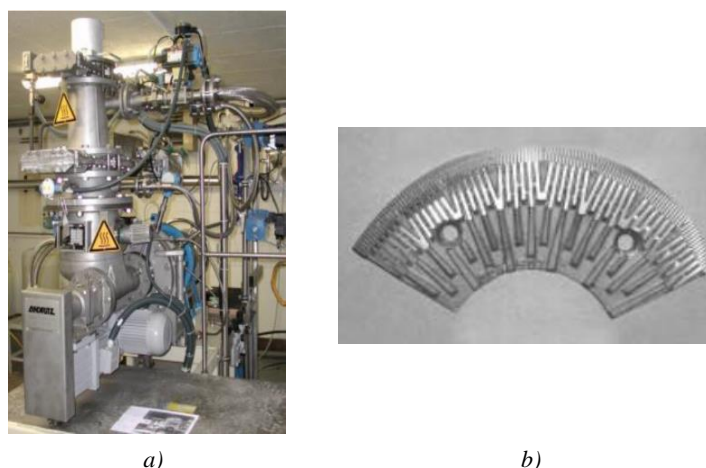


Figure 30 : a) vue d'ensemble du défibreur Andritz b) un des 3 segments utilisés constituant une couronne de plaques (Lecourt, 2004)

Les premiers essais sont réalisés avec du pin maritime afin de déterminer les conditions les plus adaptées. La taille des fibres obtenues est le résultat des modalités de réglages de l'entrefer, plus l'entrefer est resserré, plus la taille des fibres est petite. Pour le pin maritime, 6 lots de fibres de taille différente ont été obtenus à partir de 6 modalités de réglage de l'entrefer (Figure 31). Les tailles 2 et 5 sont calées respectivement sur les tailles des fibres industrielles STEICO (fibres dites « longues ») et FINSa (fibres dites « courtes »).

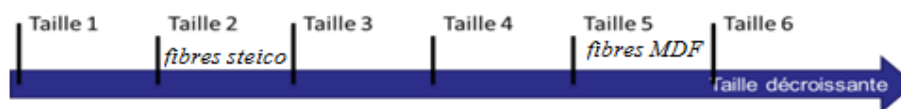


Figure 31 : Tailles attendues des lots de fibres de pin maritime (pour les 6 modalités) dépendant de l'espacement des entrefers

Pour les autres essences testées (pin *taeda*, eucalyptus et peuplier), seules 1 à 2 tailles ont été recherchées, correspondant aux tailles de référence STEICO et FINSa. Le Tableau 12 suivant synthétise les conditions appliquées pour chaque matériel ainsi que les références des échantillons qui seront utilisées par la suite.

Tableau 12 : Modalités (diminution progressive espace entrefer) étudiées pour chaque essence et référencement des échantillons

Modalités d'entrefer Essence	<u>1</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>5</u>	<u>6</u>
<i>Pin Maritime</i>	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6
<i>Pin Taeda</i>		PT2			PT5	
<i>Eucalyptus</i>					EU5	
<i>Peuplier</i>					PR5	

Pour chaque population de fibres produites (cf. exemples de visuels en *Figure 32*), des mesures morphologiques ont été réalisées dans les différents laboratoires du projet ECOMATFIB. Nous présenterons dans les sections qui suivent les techniques de mesure de longueur par tamisage par classeur Bauer Mc Nett des différentes populations de fibres produites, puis les techniques d'imagerie MEB et de micro-tomographie aux rayons X, permettant d'accéder sur les images 3D aux diamètres des fibres.



Figure 32 : Sélection de photographies montrant la gamme de granulométries et de couleurs de fibres produites par le FCBA  
Les 6 premières vont de PM1 à PM6. Les 3 en bas de gauche à droite sont PT5, PR5 et EU5

### 2.1.2 Longueur des fibres de bois obtenues par classement Bauer Mac Nett et énergie consommée

Les longueurs des fibres ont été mesurées par le FCBA à l'aide d'un classeur Bauer Mac Nett (*Figure 33*) qui comprend 4 réservoirs montés en cascade avec des tamis de 335 cm<sup>2</sup> montés sur la face plate. La correspondance entre numéro et tailles des tamis est donnée dans le Tableau 13. Pour chaque essai, 10g de fibres ont été utilisées. La proportion de fibres obtenues pour chacun des tamis a été mesurée et la proportion de chacune des fractions a été calculée (*Figure 34*).





Figure 33 : Vue d'ensemble du Bauer Mac Nett avec ses réservoirs et leurs tailles respectives

Tableau 13 : Correspondance entre numéro et taille des tamis utilisés pour la séparation des fibres

Tamis	Mesh (nombre de mailles par pouce <sup>2</sup> )	Taille des mailles (µm)
1	8	2380
2	14	1410
3	2	840
4	35	500

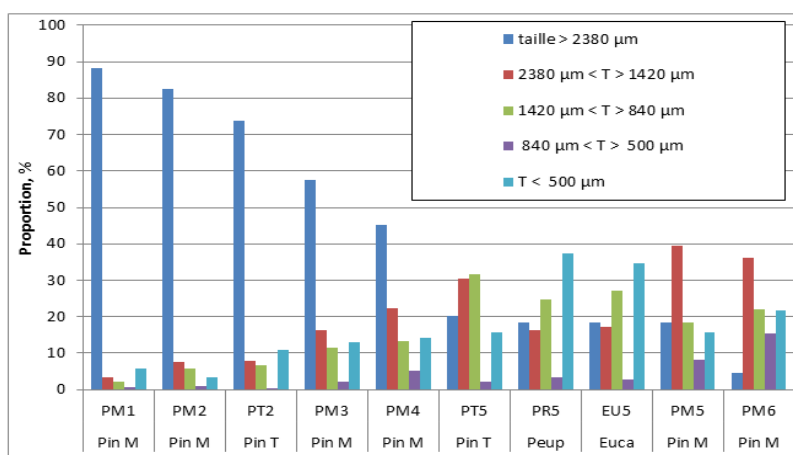


Figure 34 : Résultats de fractionnement obtenus sur les fibres du projet

Les résultats obtenus sur les différentes matières premières produites durant le projet sont présentés ci-dessus. Les résultats sont pertinents par rapport à la bibliographie et à l'expérience de FCBA relative à la production de fibres.

Le premier lot de fibres obtenu référencé PM1 est relativement peu défibré puisque 85% des fibres du lot ont une longueur supérieure à 2,38 mm. L'entrefer est ensuite diminué pour obtenir des fibres mieux séparées qui sont référencées PM2 et PT2. L'entrefer est, à nouveau, diminué pour obtenir successivement 2 niveaux intermédiaires, référencés PM3 et PM4. Les lots de fibres suivants, notés 5 (seules modalités étudiées pour les fibres de bois feuillus eucalyptus et peuplier), présentent peu d'éléments non défibrés. Enfin, le lot PM6 présente des fibres isolées coupées grâce à un entrefer



minimal. Les distributions respectives de morphologie des fibres de bois varient selon l'essence et l'énergie appliquée au raffinage (Delisée & al., 2017). A titre indicatif, l'énergie de défibrage a été enregistrée, afin d'être intégrée comme composante économique dans les travaux sur l'optimisation multi-objectif des isolants non tissés à base de bois, réalisés dans le cadre de la thèse de Mohamad Hussein Hobballah (Hobballah, 2017), (Hobballah & al, 2018). Les résultats de l'énergie imputée au raffinage sont présentés en Figure 35.

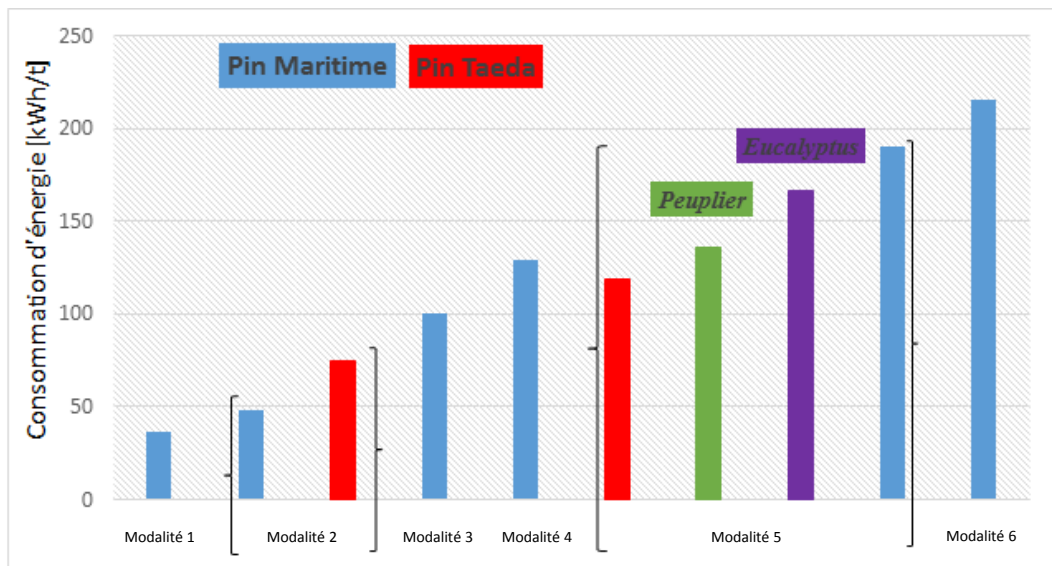


Figure 35 : Consommation énergétique en fonction des essences et de la modalité de défibrage

### 2.1.3 Caractéristiques qualitatives obtenues par observation au MEB Environnemental

La technique de microscopie à balayage électronique (MEB) environnemental, mise en œuvre à l'ESB, nous permet d'observer qualitativement la forme des fibres ainsi que la nature des interactions entre les fibres. Cette méthode ne nécessitant pas de préparation des échantillons et étant très locale (possédant une très bonne résolution), elle permet d'accéder très distinctement à la géométrie de quelques contacts. Les visuels ci-dessous illustrent ainsi la morphologie de fibres de bois utilisés (Figure 36). La technique permet également de donner des informations préliminaires permettant de mieux adapter la résolution utilisée lors de l'acquisition d'images micro-tomographiques.

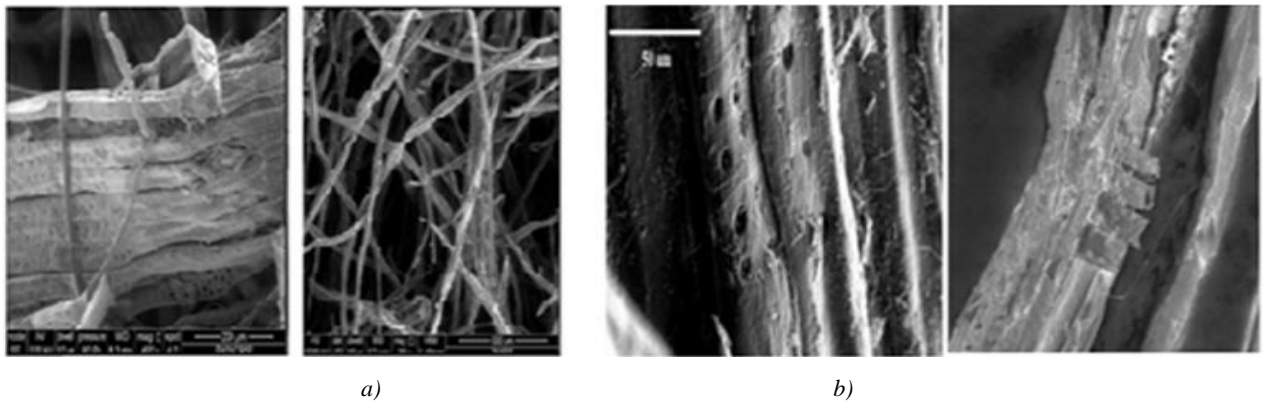


Figure 36 : Visuels des fibres au sein des réseaux enchevêtrés a) fibres de bois après raffinage pouvant être encore regroupées en faisceaux ou être individualisées b) sur lesquels se distinguent les ponctuations aérolées et vaisseaux (Images ESB)

#### 2.1.4 Diamètres des fibres de bois obtenues par Micro-tomographie aux rayons X

##### 2.1.4.1 Méthode d'acquisition des images 3D

La micro-tomographie aux rayons X est l'une des techniques d'imagerie permettant de visualiser et numériser en 3D la disposition spatiale des différentes phases d'un matériau. Cette technique s'est considérablement développée depuis une dizaine d'années en science des matériaux avec en particulier la mise sur le marché d'appareils de laboratoires ultra performants. Comme illustré en Figure 37, le principe consiste à transmettre un faisceau de rayons X sur un échantillon et à enregistrer sur un détecteur CCD (Charge Coupled Device) les projections d'atténuation pour des positions angulaires espacées régulièrement de 0 à 180° (ou 0 à 360°). Après acquisition des scans sous les différentes positions angulaires, le volume 3D est reconstruit par rétroprojection filtrée des données. Les images brutes obtenues après reconstruction sont codées sur 32 bits. Le niveau de gris en chaque voxel est lié aux propriétés physiques d'absorption aux rayons X et de densité en ce point. Les images micro-tomographiques sont ensuite traitées par des outils d'analyse d'images adaptés issus de la morphologie mathématique pour caractériser le réseau fibreux (Tran & al, 2013).

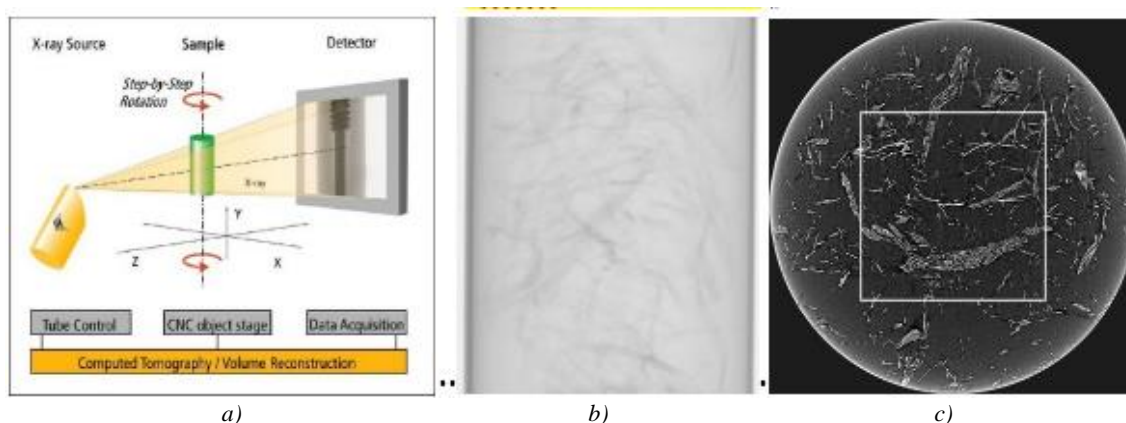


Figure 37 : Principe d'acquisition d'images par micro-tomographie X. Cas d'une source conique  
 (a) [Phoenix 2006]. Image d'une projection de l'atténuation aux rayons X  
 (b). Dimensions 2304×2304 pixels. Image de l'une des 2304 coupes longitudinales (parallèles aux faces) après reconstruction (c). Dimensions 2304×2304 pixels.  
 Une zone d'intérêt est extraite dans l'image initiale (au centre ici) pour réduire la taille mémoire de l'échantillon et s'affranchir des effets de bord dus à la découpe de l'échantillon

Pour le projet ECOMATFIB, plusieurs appareils de laboratoire complémentaires en termes de performance sont mis à disposition (Tableau 14). Ces lignes de micro-tomographie aux rayons X permettent ainsi de couvrir l'ensemble des demandes du projet : caractérisation des matières premières (différents types de fibres de bois), caractérisation de la microstructure des MNTB élaborés/existants à l'état initial ou sous sollicitations.

Tableau 14 : Dispositifs de micro-tomographie mis à disposition du projet

Modèle du dispositif	Ultratom RX solutions	Skyscan	Versa 500 Zeiss	Nanotom GE
Lieu	Institut Pprime	I2M/GCE	Placamat	Placamat
Résolutions utilisées	5,7 $\mu\text{m}/\text{voxel}$	5,7 & 12,3 $\mu\text{m}/\text{voxel}$	0,7 & 1,4 $\mu\text{m}/\text{voxel}$	5,7 $\mu\text{m}/\text{voxel}$

#### 2.1.4.2 Rendus volumiques des images 3D et mesures de la granulométrie des fibres

Dans le cadre de ce travail, nous nous intéressons aux tailles des fibres produites par le FCBA. Nous présentons tout d'abord les rendus volumiques des images 3D acquises par micro-tomographie RX (Figure 38) pour chaque population de fibres de pin maritime en sortie du défibreur. La résolution des images est de 12,3  $\mu\text{m}$  / pixel et le volume analysé de 8,6\*8,6\*12,3  $\text{mm}^3$ .

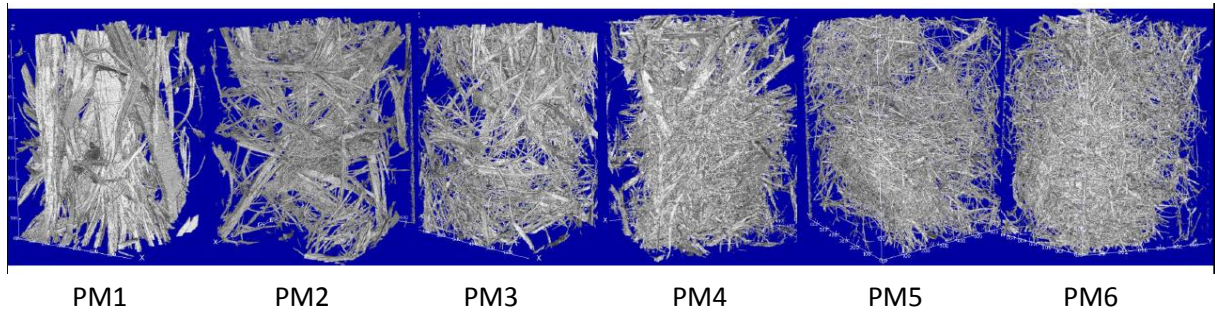


Figure 38 : Rendus volumiques 3D des 6 références de fibres de pin maritime produites par le FCBA

Les images 3D obtenues (Figure 38) sont filtrées puis binarisées. Un rebouchage des fibres de bois, creuses en raison de la présence du lumen (Figure 39), peut s'avérer nécessaire, permettant d'accéder à des ensembles simplifiés de fibres, mais aussi des pores.

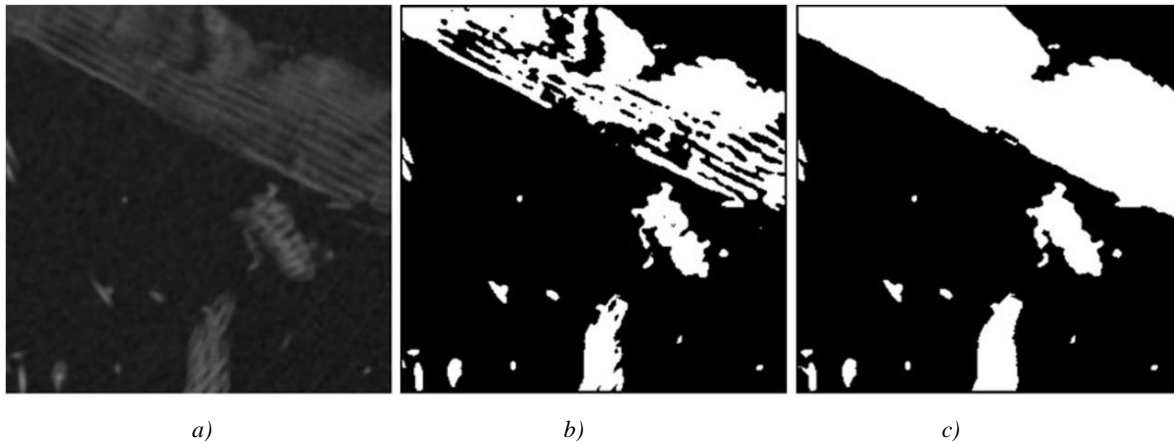


Figure 39 : Traitement préliminaire des images micro-tomographiques avant mesures morphologiques sur les fibres (et sur les pores). Image 2D d'une fibre de bois (a) en niveaux de gris, (b) après seuillage et (c) après rebouchage des lumens (300 x 300 pixels). (Tran & al, 2013)

Les fréquences et distributions granulométriques de chacune des populations de pin maritime associées à celles fournies par les 2 industriels, sont obtenues à partir d'ouvertures par des sphères de taille croissante (outils de morphologie mathématiques) (Delisée & al., 2017) appliquées aux images 3D. On obtient ainsi les courbes de distribution des diamètres des fibres, comme présenté ci-dessous (Figure 40).

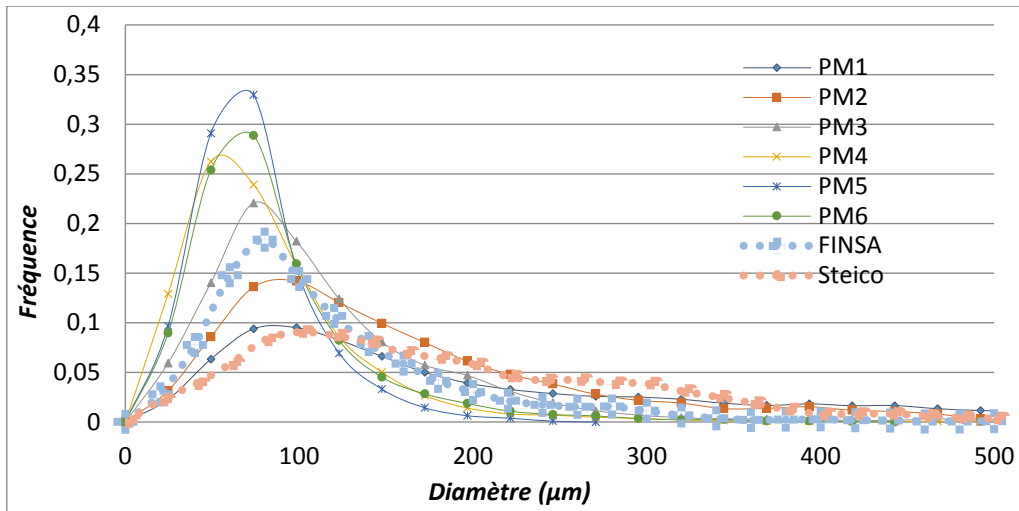


Figure 40 : Fréquences des diamètres des différentes populations de fibres de Pin Maritime

A partir de ces données, des moyennes ont pu être calculées. Les indices exposés, correspondant aux moyennes contre-harmoniques  $M_{ch}$  (pondération en taille), arithmétiques  $M_a$  (pondération en nombre) ainsi qu'à la dispersion de ces distributions  $I_p$  (Di Giuseppe & al, 2016), sont définis, représentés (Figure 41) et évalués (Tableau 15) ci-dessous :

$$\text{Pondération en nombre : } M_a = \frac{\sum_i N_i \cdot D_i}{\sum_i N_i} \quad (24)$$

$$\text{Pondération en taille : } M_{ch} = \frac{\sum_i N_i \cdot D_i^2}{\sum_i N_i \cdot D_i} \quad (25)$$

$$\text{Hétérogénéité de la distribution d'une population : } I_p = M_{ch} / M_a \quad (26)$$

Avec

$D_i$ , le diamètre de fibres [ $\mu\text{m}$ ]

$N_i$ , le nombre d'entités associé à ce diamètre spécifique

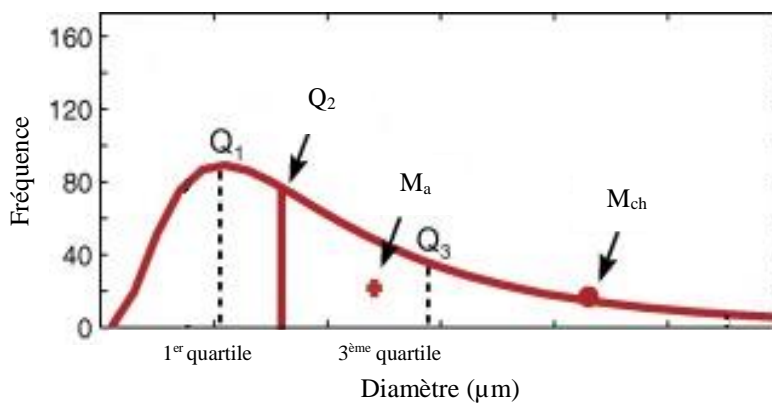


Figure 41 : Représentation schématique des indices  $M_a$  et  $M_{ch}$

Tableau 15 : Paramètres caractéristiques des granulométries des fibres de pin maritime conçues par le FCBA ainsi que celles fournies par les partenaires du projet.

Référence	$M_{c h}$ ( $\mu m$ )	$M_a$ ( $\mu m$ )	$I_p$	Fournisseur
PM1	709	354	2	FCBA
PM2	235	162	1,4	FCBA
PM3	157	114	1,4	FCBA
PM4	112	86	1,3	FCBA
PM5	90	74	1,2	FCBA
PM6	99	86	1,1	FCBA
Steico	263	192	1,37	Steico
Finsa	162	117	1,38	Finsa

La réduction de l'entrefer entraîne un degré de déstructuration progressif de la matière ( $M_a$  et  $M_{c h}$ ) et une homogénéisation de sa distribution ( $I_p = M_a / M_{c h}$ ) lorsque le rapport  $I_p$  se rapproche de 1. Comme présenté dans le Tableau 15, il est intéressant de noter que la population PM2 correspond à une granulométrie proche de celle utilisée dans les isolants semi-rigides à base de fibres de bois tandis que la population PM3 se rapproche d'une granulométrie utilisée dans les MDF, ce qui était attendu. Pour étendre ces propos, un comparatif entre les diamètres moyen et maximal de toutes les fibres produites par le FCBA par rapport aux fibres correspondantes à la modalité 1 est visible dans le Tableau 16.

Tableau 16 : Diamètres moyen et maximal de l'ensemble des fibres de bois produites par le FCBA

Référence	Diamètre moyen ( $\mu m$ )	Variation / PM1	Ecart type ( $\mu m$ )	Variation / PM1	Diamètre maximal ( $\mu m$ )	Variation / PM1
PM1	354		353		1540	
PM2	162	-54%	108	-69%	590	-62%
PM3	114	-68%	70	-80%	517	-66%
PM4	86	-76%	62	-82%	665	-57%
PM5	75	-79%	35	-90%	245	-84%
PM6	86	-76%	52	-85%	418	-73%
PT2	176	-50%	137	-61%	760	-51%
PT5	90	-75%	68	-81%	540	-65%
PR5	98	-72%	46	-87%	300	-81%
EU5	101	-71%	52	-85%	360	-77%

On constate que l'écart type est d'autant plus grand quand le diamètre est grand (modalités de défibrage 1 par exemple). L'écart type devient très faible pour les petits diamètres (modalités de défibrage 5). Ces diamètres moyens peuvent également être mis en relation avec l'énergie consommée durant le défibrage (Figure 42).

### 2.1.4.3 Influence du défibrage sur la consommation d'énergie

On note avec la diminution de l'entrefer au défibrage, une augmentation de l'énergie consommée et une diminution de la taille des fibres produites.

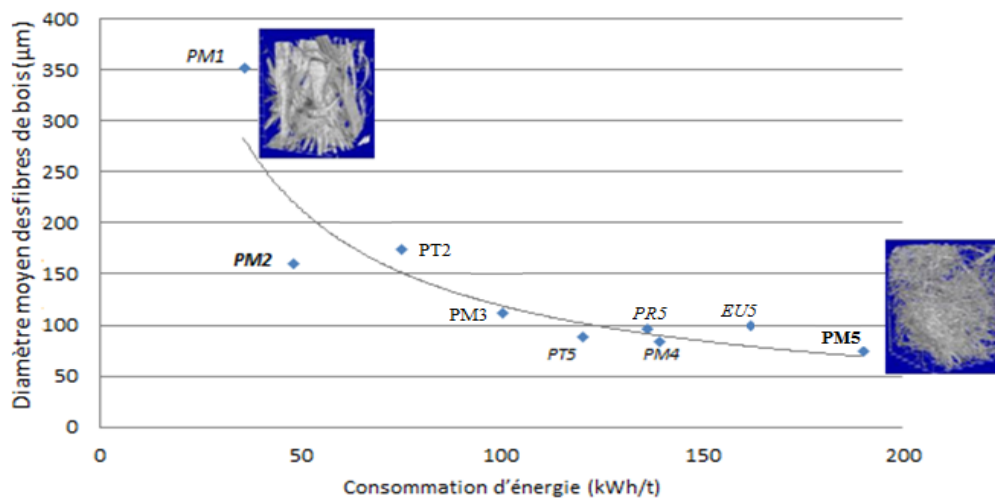


Figure 42 : Relation entre la consommation d'énergie au défibrage et les diamètres moyens des populations de fibres

### 2.1.5 Fibres thermoplastiques utilisées

Les fibres polymères thermoplastiques utilisées dans le projet ont été choisies sur la base de leur disponibilité, de leur longueur et diamètre, de la température de fusion de leur gaine pour assurer une cohésion interne, ainsi que de leur taux de frisure. Ce sont des fibres thermoplastiques bicomposant constituées de deux polymères distincts répartis sur toute la longueur de la fibre (Tableau 17 & Figure 43). Pour les principaux essais thermiques, elles sont de type Cœur/Gaine (Figure 16), un noyau de polymère centré et une gaine autour, avec une âme en polypropylène (PP) et une gaine en polyéthylène basse densité (LDPE). Elles sont d'une longueur de 6 mm de la marque FiberVisions et fournies par le partenaire STEICO. D'autres fibres ont été testées ponctuellement pour améliorer les propriétés mécaniques des matériaux. Il s'agit d'une fibre bicomposant PP/LDPE mais de longueur plus importante (24 mm), d'une fibre bicomposant toujours mais avec un cœur excentré. Enfin une fibre, mono-composant, à base d'acide polylactique (PLA) a été testée. Le Tableau 17 ci-dessous récapitule l'ensemble des fibres thermoplastique testées dans ce projet.

Tableau 17 : Fibres polymères thermoplastiques utilisées dans le projet

Référence	Morphologie	Microstructure	Longueur [mm]	Intérêt recherché
S		PP/LDPE	6	Fibre de référence fournie par STEICO
L		PP/LDPE	45	Fibre longue fournie par LAROCHE
S2		PP/LDPE	24	Augmentation du nombre de contact par une longueur accrue
EC		X	40	Taux de frisure supérieure augmentant le nombre de contact
PLA		PLA	24	Faciliter le recyclage



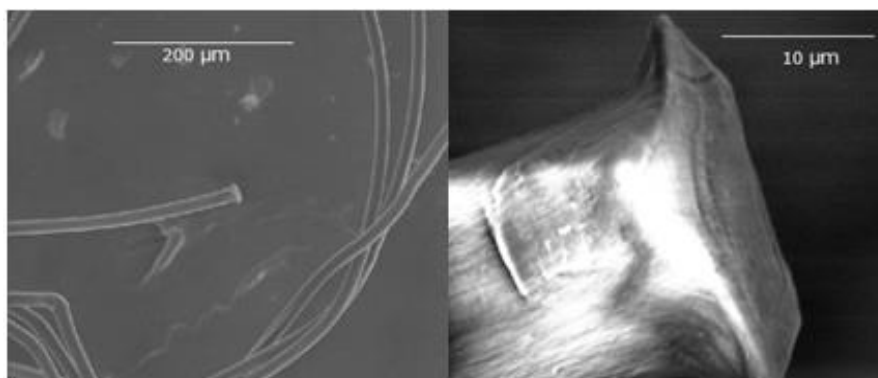


Figure 43 : Images MEB des fibres thermoplastiques de référence fournie par STEICO (ESB Nantes)

Le principal bicomposant utilisé dans la fabrication des matelas fibreux est celui fourni par STEICO dans sa production. Celui-ci a été analysé en spectrométrie infrarouge indiquant une similarité à du LDPE & en calorimétrie différentielle à balayage (DSC) au Laboratoire de Chimie des Polymères Organiques (LCPO) dont voici ci-dessous les principaux résultats (Figure 44). La DSC est l'une des méthodes permettant de déterminer la quantité de chaleur latente et la température de fusion de polymères. Pour celui analysé, il est obtenu une enthalpie de fusion de 99 J/g avec un taux de cristallinité de 34% conforme à du LDPE. A partir de ces résultats (Figure 44), la température imposée pour la fusion de la gaine des fibres thermoplastiques doit être égale à 130°C (section 3.2.2). Ce résultat confirme les données fournies par le producteur de ces fibres thermoplastiques.

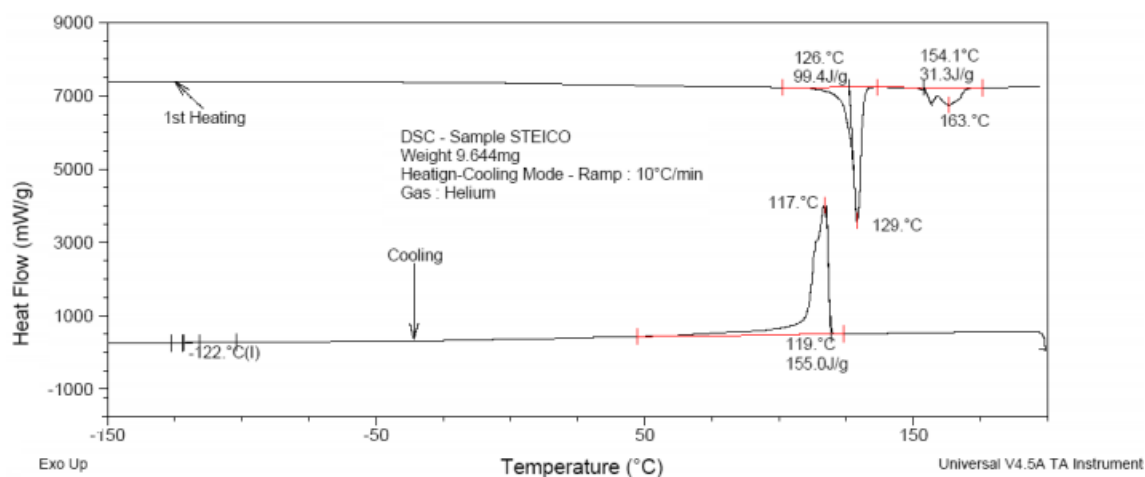


Figure 44 : Analyse DSC du principal bicomposant utilisé dans le projet



## 2.2 Méthodes de fabrication des MNTB

Le procédé est constitué de 2 étapes : la formation d'un réseau fibreux par voie aérodynamique et sa consolidation thermique dans un four à air chaud grâce aux fibres thermoplastiques ajoutées lors de la formation du réseau fibreux. Celles-ci sont caractéristiques d'un procédé non tissés. Les paramètres de l'ouvraison et de la consolidation sont réglables en vue de l'optimisation des matériaux.

### 2.2.1 Formation des nappes fibreuses

Les réseaux fibreux sont formés par une ouvreuse nappeuse Cadette Laroche à I2M<sup>3</sup> (Figure 45, Figure 46, Figure 47). Cette voie sèche aérodynamique permet la réalisation de structures très poreuses, homogènes, plus ou moins volumineuses avec une orientation privilégiée des fibres par rapport aux faces. Les matières premières sont d'abord ouvertes par un cylindre rotatif à pointe (carde). Cette première étape a pour objectif de désagglomérer les fibres au maximum. Elles sont ensuite mises en suspension dans un flux d'air généré par un cylindre perforé en rotation (condenseur) (Figure 46). L'aspiration de ce dernier entraîne un dépôt aléatoire des fibres les unes sur les autres. Deux rouleaux délivrent ensuite la nappe venant d'être formée sur un tapis de dimension 900\*700 mm<sup>2</sup>. Le rapport des vitesses entre tapis alimentaire et rouleaux délivreurs, appelé taux d'étirage, permet de moduler les épaisseurs de la nappe en sortie. Les nappes sont enfin superposées pour former un matelas. À ce stade, la cohésion est assurée par l'enchevêtrement inter-fibres. La vitesse de la carde et du flux d'air sont adaptées aux matières premières pour avoir une bonne séparation des fibres ainsi qu'un mélange homogène en masse et en épaisseur. Ainsi les paramètres (Figure 47) qui seront réglés pour l'optimisation de la formation des nappes sont listés dans le Tableau 18 suivant.

Tableau 18 : Paramètres de l'ouvreuse Cadette, réglables lors de la formation des nappes de fibres

Principaux Outils	Gamme de réglage	Impact
Cylindre à pointe (carde)	1100 à 2300 rotations par minute	Ouvraison des matières premières
Tambour perforé (Condenseur)	Puissance d'aspiration de 10 à 100%	Pertes & Homogénéité de la répartition des matières
Vitesse du tapis alimentaire	0,5 à 2 m/min	Epaisseur & masse volumique des nappes formées
Facteur d'étirement (Taux d'étirage)	$\frac{\text{vitesse des rouleaux délivreurs}}{\text{vitesse du rouleau presseur}} = 0,5 \text{ à } 2$	Modulation de la consistance des nappes

<sup>3</sup> Financement Equipex Xyloforest, 10-EQPX-0016, 2011-2019



Figure 45 : Vue d'ensemble de l'ouvreuse nappeuse d'I2M à Talence [Equipex Xyloforest]

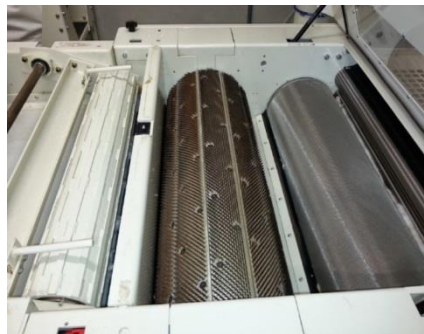
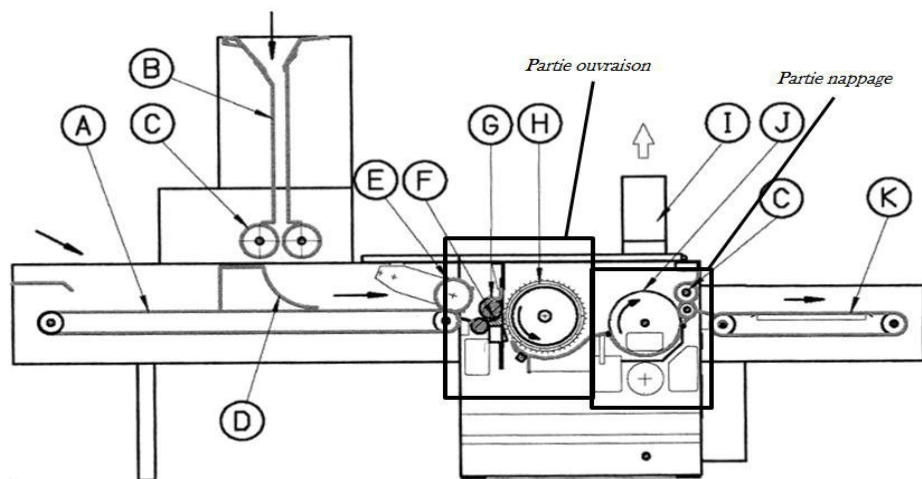


Figure 46 : Visuels de la carte et du condenseur (tambour perforé)



- |                                 |                                 |                              |                            |
|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|----------------------------|
| <b>A</b> Tablier d'alimentation | <b>D</b> Couloir d'alimentation | <b>G</b> Rouleau alimentaire | <b>J</b> Tambour perforé   |
| <b>B</b> Cheminée               | <b>E</b> Rouleau presseur       | <b>H</b> Cylindre à pointes  | <b>K</b> Tablier de sortie |
| <b>C</b> Rouleaux délivreurs    | <b>F</b> Auge d'alimentation    | <b>I</b> Ventilation         |                            |

Figure 47 : Schéma de côté de l'ouvreuse nappeuse (Laroche, 2013)

### 2.2.2 Consolidation des matelas

Les matelas fibreux sont consolidés en passant dans un four à air chaud *Strahm*<sup>4</sup> (Figure 48). Cette voie thermique met à profit les propriétés de thermoplasticité des fibres synthétiques précédemment ajoutées qui vont, par échauffement contrôlé, former des liaisons (au sens adhésif/cohésif) et jouer ainsi le rôle de liant en maintenant l'ensemble après refroidissement. Les principaux réglages sont : le facteur de compression des matelas entre les tapis convoyeurs du four, la température du flux d'air et sa vitesse et le temps de séjour des matelas dans les zones de chauffage et de refroidissement.



Figure 48 : Vue d'ensemble du four à air chaud *Strahm* d'I2M à Talence [Equipex Xyloforest]

La température durant la consolidation des matelas, résultant de la superposition de nappes, est suivie par un thermocouple positionné au cœur du matériau et quelques fois, par le positionnement de 3 thermocouples. Les paramètres qui seront ajustés pour l'optimisation de la consolidation thermique des matelas sont listés ci-dessous (Tableau 19).

Tableau 19 : Paramètres du four *Strahm* réglables lors de la consolidation thermique des matelas

<i>Paramètres</i>	<i>Unités</i>	<i>Valeurs potentielles</i>
Vitesse d'entraînement du tapis	m/min	1,5 - 15
Ventilation d'air	%	10 - 100
Température du flux d'air	°C	Température Air ambiant - 230
Ecartement des tapis convoyeurs	mm	0 - 200

<sup>4</sup> Financement **Equipex Xyloforest**, 10-EQPX-0016, 2011-2019

Le four Strahm utilisé comporte 3 zones. Deux zones de chauffe (zone 1 et zone 2) et une zone de refroidissement (zone 3). Le flux d'air chaud est dirigé du haut vers le bas dans la zone 1 puis du bas vers le haut dans la zone 2 (*Figure 49*), pour éviter une répartition hétérogène des fibres dans l'épaisseur des matériaux consolidés. La température du flux d'air de la zone de refroidissement (zone 3) est celle de l'air ambiant.

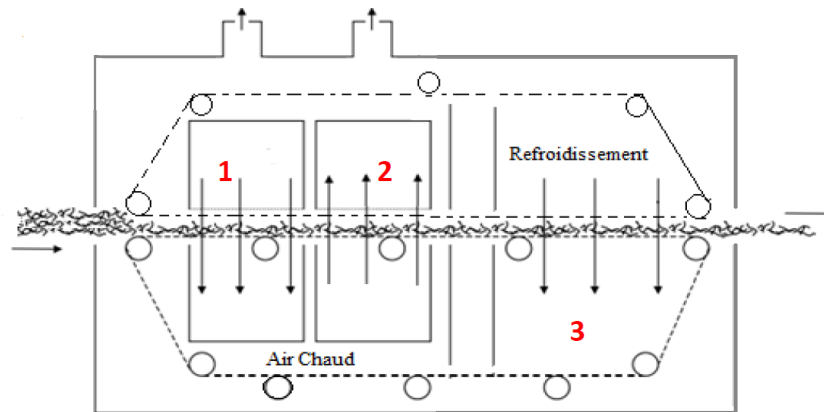


Figure 49 : Représentation schématique du four Strahm avec identification des différentes zones (chiffres en rouge)

Avant leur consolidation thermique, les matelas composés d'un mélange de fibres de bois et de thermoplastiques sont divisés en trois dans leur largeur. Chacune des sous-parties est ensuite respectivement comprimée d'un facteur d'environ 20%, 50% et 75% pour générer des échantillons de composition identique mais de densité différente. Après caractérisation thermique des panneaux, certains mélanges d'intérêt sont à nouveau fabriqués aux masses volumiques souhaitées.

## 2.3 Méthodes pour la caractérisation thermo-hydro-mécanique des MNTB

### 2.3.1 Découpe des échantillons

Lors de la seconde phase de fabrication, après consolidation en sortie du four, la surface des matelas est d'environ 450\*320 mm<sup>2</sup>. Les épaisseurs (notées E), fonction des matières premières, du nombre de nappes et du taux de compression sont comprises entre 35 et 95 mm. Une première découpe, à la scie, a pour objectif d'enlever les parties extérieures non homogènes des matelas. Il advient, après une seconde découpe à la scie à ruban, 4 à 6 spécimens de surface égale à 100\*100 mm<sup>2</sup> et 4 à 8 spécimens de surface égale à 50\*50 mm<sup>2</sup>.

### 2.3.2 Mesure de la masse volumique apparente et de la densité locale (profils de densité)

#### 2.3.2.1 Masse volumique apparente

Après découpe, l'ensemble des spécimens a été stabilisé dans une salle conditionnée à 20°C/65%HR. Leur masse volumique apparente a ensuite été évaluée par une pesée à la balance associée à une évaluation de leurs dimensions au pied à coulisse avec les précisions respectives au centigramme

et au millimètre. Cette étape, précédant les caractérisations thermiques puis mécaniques, est considérée atteinte lorsque l'équilibre massique est atteint (écart de masse inférieur à 0,1 % entre 2 pesées espacées de 24h).

### 2.3.2.2 *Mesure du profil de densité dans l'épaisseur*

Le profil de densité a été mesuré avec un analyseur de densité par rayons X de type GreCon DAX 5000 au FCBA pôle InTechFibres, implanté à Grenoble (*Figure 50*). La longueur, la largeur et l'épaisseur de l'échantillon ont été mesurées de façon précise à l'aide d'un pied à coulisse connecté directement au DAX 5000. Les largeurs et longueurs moyennes des échantillons étaient de 50 mm, l'épaisseur était variable. De même, la masse de l'échantillon a été mesurée avec une balance connectée au DAX 5000. Le DAX mesure le profil de densité brut des échantillons de panneau transversalement par rapport à l'épaisseur de l'échantillon par pas de 20  $\mu\text{m}$  sans contact. L'échantillon est soumis à des rayons X qui traversent l'échantillon de panneau et sont absorbés partiellement en fonction de la densité du matériau. L'énergie du rayonnement non absorbé est enregistrée et convertie en énergie électrique par une chambre de mesure d'ionisation. Le rayonnement résiduel qui traverse l'échantillon donne la mesure de densité.



*Figure 50 : Analyseur DAX5000*

### 2.3.3 *Mesure des propriétés thermiques : effusivité, capacité et conductivité thermiques*

Les techniques de métrologie qui permettent d'estimer les propriétés thermiques des matériaux peuvent être classées en deux catégories : les méthodes en régime permanent et celles en régime transitoire. Les méthodes en régime permanent évaluent directement la conductivité thermique du matériau. Le principe repose sur la mesure, après l'établissement du régime permanent, de la densité de flux thermique à travers l'échantillon suite à l'application d'un gradient thermique monodimensionnel. Les méthodes en régime transitoire, à l'inverse de celles en régime permanent où seule la conductivité thermique est estimée, permettent de retrouver plusieurs paramètres : conductivité, diffusivité et effusivité. Ces méthodes sont plus rapides mais moins précises qu'en régime permanent. Elles se caractérisent par la mesure simultanée d'un flux de chaleur (en général constant) et d'une température (variable avec le temps). Elles permettent d'atteindre un ou plusieurs paramètres thermo-physiques

suivant la complexité du modèle et de la méthode d'identification. Elles diffèrent selon la géométrie de l'échantillon.

Dans cette étude deux méthodes de métrologie thermique sont utilisées. La 1<sup>ère</sup>, en régime transitoire est adaptée à la géométrie des nombreux matériaux fabriqués et a été utilisée dans plus de 95% des cas. Elle est appliquée sur des échantillons de dimension surfacique égale à 100\*100 mm<sup>2</sup> et permet l'obtention de plusieurs résultats au cours d'une journée puisque celle-ci est rapide (de l'ordre de l'heure). Quant à la seconde en régime permanent, qui par ailleurs est une méthode normée, elle nécessite d'avoir des échantillons d'un volume nettement plus conséquent ainsi qu'un temps de mesure bien plus important que la première (plusieurs heures).

### 2.3.3.1 Par la méthode en régime transitoire (variable quasi-établi) : Dispositif DESPROTHERM

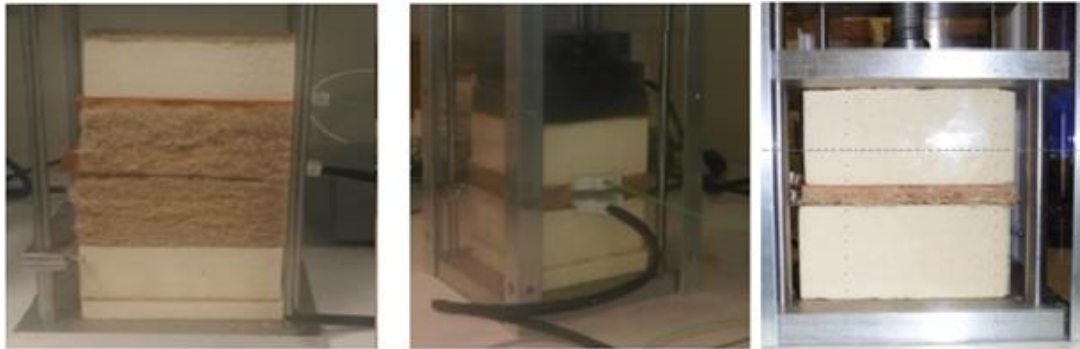
Les propriétés thermiques, de l'ensemble des matériaux fabriqués, sont mesurées par la technique du plan chaud avec le dispositif DESPROTHERM d'Epsilon Alcen. Cette méthode, spécifique au projet, évalue indirectement une conductivité thermique apparente  $\lambda^*_{app}$  (W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>) en mesurant l'effusivité thermique  $b$  (W·K<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>·s<sup>1/2</sup>) et la capacité thermique volumique  $\rho^* \cdot C_p$  (J·m<sup>-3</sup>·K<sup>-1</sup>), avec  $C_p$  la capacité thermique massique. Les montages respectifs de chacun d'entre eux sont illustrés en Figure 51. Le principe utilisé consiste à appliquer un échelon de flux thermique constant perpendiculairement à la section de l'élément chauffant, grâce à une résistance électrique par effet Joule, sur l'une des faces d'un échantillon parallélépipédique isolé (100\*100 mm<sup>2</sup>) et à observer la réponse thermique au cours du temps. Afin de maîtriser le flux injecté dans l'échantillon, il est essentiel que l'échantillon, la sonde et si possible l'environnement soient stables en température au moment de la mesure. Un équilibrage est donc fait avant chaque mesure pour obtenir une température uniforme de l'ensemble du dispositif (salle / sonde / spécimens) égale à la température ambiante. L'essai démarre dès que le différentiel en température est inférieur ou égal à 10<sup>-4</sup> °C/s. La sonde a une résistance de 100,7 Ω. Elle est parcourue par un courant d'intensité  $I = 78-82$  mA et est alimentée par un générateur de tension  $U = 9-10$  V. Ces paramètres permettent de calculer la puissance électrique  $\Phi_0$  dissipée par la sonde 0,7 W. Le rapport puissance/surface est nommé densité de flux thermique en W/m<sup>2</sup>.

Après chaque mesure, les échantillons sont repesés. Les mesures sont reproduites 3 fois par matériau. Il est important de noter que toutes les mesures sont réalisées sur des échantillons stabilisés à 65%HR / 20°C. D'après les courbes d'humidité d'équilibre, dans ces conditions, la teneur en eau du bois massif est de +/- 12% (Stamm, 1964). Les résidus qui sont définis comme la différence entre les points expérimentaux et le modèle permettent d'avoir une idée sur la qualité de l'estimation. Dans le cas de l'estimation de l'effusivité, le montage à réaliser doit être symétrique (Figure 51a).

La partie comprenant le circuit chauffant et le thermocouple face-avant est placée entre deux échantillons similaires du matériau à caractériser. La partie comprenant le thermocouple face arrière est



positionnée au-dessus de l'échantillon. L'ensemble est maintenu entre deux blocs de mousse de polyuréthane et isolé de l'extérieur par un pavé droit en plexiglass (*Figure 51*). Les spécimens ont une épaisseur suffisante pour être considérés comme des milieux semi-infinis dès lors que la perturbation thermique n'affecte pas la température de la face arrière pendant ces mesures. L'élévation de température entre 60 et 120 secondes est de 2 à 8°C.



a) *Figure 51 : Dispositif de mesures du dispositif DESPROTHERM*  
 a) symétrique pour l'effusivité b) asymétrique pour la capacité thermique volumique

Dans le cas d'un milieu supposé semi-infini et en négligeant la capacitance thermique de la sonde et sa résistance de contact, l'évolution de la température sur la face chauffée est proportionnelle à l'effusivité et à la racine carrée du temps (27).

$$T(x, t) = 2 \cdot \Phi \cdot \frac{\sqrt{t}}{\sqrt{\pi} \cdot b} \quad (27)$$

Avec

$T$ , la température [K]

$\Phi$ , le flux thermique [ $J \cdot s^{-1}$ ]

$t$ , le temps [s]

$b$ , l'effusivité [ $J K^{-1} m^{-2} s^{-0.5}$ ]

Dans le cas d'une sonde réelle, l'évolution de la température peut être divisée en deux phases (*Figure 52*) :

- Une première phase, correspondant aux temps courts, qui présente un aspect transitoire et qui dépend de l'inertie thermique de la sonde et de sa résistance de contact avec le matériau.
- Une seconde phase, présentant un comportement asymptotique proportionnel à l'effusivité thermique.

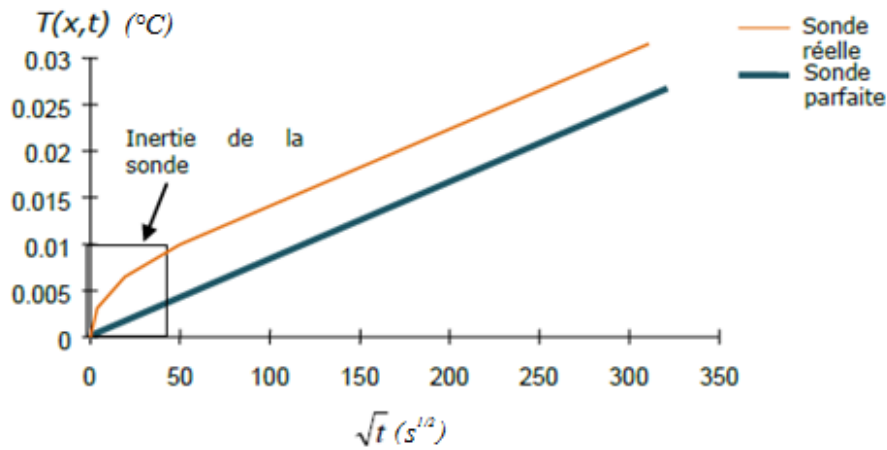


Figure 52 : Réponse en température, sur la face avant, à une excitation de type « plan chaud » (Desprotherm, 2014)

### \_ Mesure de l'effusivité thermique: dispositif symétrique (Figure 51a)

Ainsi, dans le cas d'une sonde réelle de surface  $S$ , l'expression de la température en fonction du temps sera donnée par la relation suivante, où  $R$  représente la résistance globale due à l'inertie de la sonde et au contact avec l'échantillon (forme simplifiée) :

$$T(x, t) = Q \cdot \left[ R + \frac{2 \cdot \sqrt{t}}{S \cdot \sqrt{\pi \cdot \lambda \cdot \rho \cdot C_p}} \right] \quad (28)$$

Avec

$T$ , la température [K]

$Q$ , le flux de chaleur [W]

$R$ , la résistance globale due à l'inertie de la sonde et au contact avec l'échantillon [K.W<sup>-1</sup>]

$t$ , le temps [s] &  $S$ , la surface d'échange de la sonde [m<sup>2</sup>]

$\lambda$ , la conductivité thermique [W.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

$\rho$ , la masse volumique [kg.m<sup>-3</sup>]

$C_p$ , la chaleur massique [J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

Cette expression sert à estimer une valeur initiale de l'effusivité, en mesurant la pente de la partie linéaire, qui est ensuite utilisée pour la minimisation de l'écart quadratique entre une courbe théorique, issue d'un modèle plus complexe (Degiovanni & al, 1993), (Zhang & al, 1993), représentatif du problème considéré et la courbe expérimentale (Figure 53), relevée à l'aide du thermocouple.

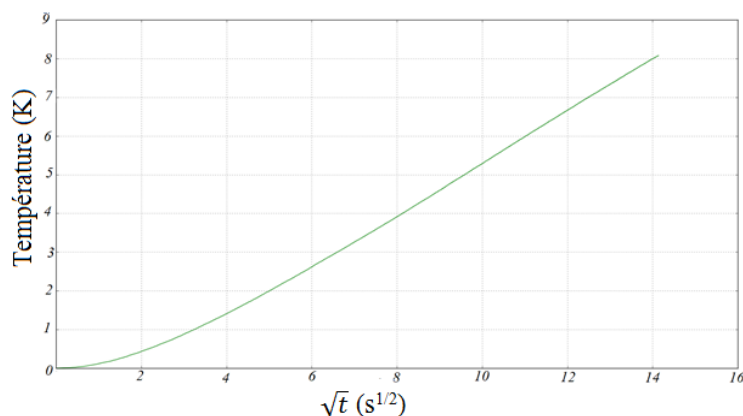


Figure 53 : Réponse en température, sur la face avant, à une excitation de type « plan chaud »



### – Mesure de la capacité thermique : dispositif asymétrique (Figure 51b)

La méthode du plan chaud asymétrique est utilisée dans le dispositif DESPROTHERM pour estimer la capacité thermique volumique. Comme dans le cas de la mesure de l'effusivité, le matériau à caractériser est placé entre deux échantillons d'un matériau isolant dont les caractéristiques thermo-physiques sont connues. La mesure de température se fait sur la face opposée au chauffage (arrière). L'estimation est valable pour des matériaux d'effusivité et de capacité thermique comprises respectivement entre 80 et 10 000  $W \cdot K^{-1} \cdot m^{-2} \cdot s^{1/2}$  et entre 40 000 et 3 000 000  $J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$ . Pour satisfaire le domaine de validité de la mesure, les échantillons sont comprimés avant l'essai et un taux de compression est maintenu pendant l'essai de telle sorte à ce qu'ils aient une épaisseur de l'ordre de 10 mm et une montée en température de l'ordre de 2°C en face arrière. Le maintien à ce taux de compression pendant l'essai a nécessité soit l'ajout d'une masse ou soit l'utilisation d'un vérin à manivelle sur leur face supérieure (Figure 51b). La température sur cette face arrière suit une évolution en fonction du temps qui est d'abord exponentielle sur les temps courts, puis devient linéaire aux temps longs, dès que le flux de chaleur a traversé l'épaisseur du matériau.

L'évolution de la température en face arrière dans la partie linéaire est fonction de la capacité calorifique du matériau et de son épaisseur (Figure 54) :

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot E} \cdot t \quad (29)$$

Avec

$T$ , la température [K]

$Q$  le flux de chaleur [W]

$\rho$ , la masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$C_p$ , la chaleur massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$E$ , l'épaisseur [m]

$t$ , le temps [s]

Ainsi, pour une durée définie de chauffage, connaissant le flux de chaleur appliqué, la masse volumique et l'épaisseur du matériau, il est possible d'estimer sa chaleur massique à pression constante à partir de la mesure de l'évolution de sa température en face arrière. En pratique, comme le chauffage se fait entre le matériau à caractériser et le matériau isolant de caractéristiques connues (mousse de polyuréthane), l'échantillon n'est plus totalement isolé, et la résolution de l'équation de la chaleur doit tenir compte de la présence du matériau isolant. On montre que, dans ce cas et en négligeant l'influence de la sonde, l'expression de l'évolution de la température en face arrière est donnée par la relation suivante.

$$T(x, t) = \frac{Q}{\rho \cdot C_p \cdot e + (\rho \cdot C_p \cdot E)_{isolant}} \cdot t \quad (30)$$

Avec

$T$ , la température [K]

$Q$ , le flux de chaleur [W]

$\rho$ , la masse volumique [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$C_p$ , la chaleur massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$E$ , l'épaisseur [m]

$t$ , le temps [s]

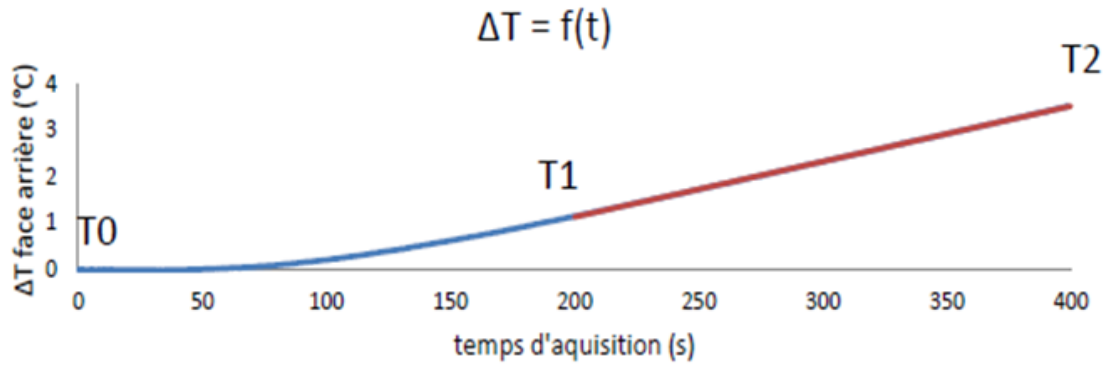


Figure 54 : Réponse en température, sur la face arrière, à une excitation de type plan chaud

La conductivité thermique apparente représentative du matériau analysé est déduite par la relation 31 ci-dessous.

$$\lambda_{app}^* = \frac{b^2}{\rho^* \cdot C_p} \quad (31)$$

Avec

$\lambda_{app}^*$ , la conductivité thermique apparente [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$b$ , l'effusivité [ $J K^{-1} m^2 s^{-0,5}$ ]

$\rho^*$ , la masse volumique apparente [ $kg \cdot m^{-3}$ ]

$C_p$ , la chaleur massique [ $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

### 2.3.3.2 Par la méthode en régime permanent flux métrique : plaque chaude gardée

De façon générale, les méthodes en régime permanent se basent sur un modèle 1D (géométries particulières) et stationnaire : on s'affranchit de la dépendance temporelle présente dans l'équation de la chaleur en partant du principe que le système a atteint une situation d'équilibre. La densité de flux thermique  $Q$  constante et uniforme sur l'une des deux faces de l'échantillon ainsi que la différence de température  $\Delta T$  engendrée traversant l'échantillon de surface  $A$  et d'épaisseur  $E$  sont mesurées afin de calculer la résistance thermique de l'échantillon. L'expression analytique pour arriver à la conductivité thermique  $\lambda$  de l'échantillon est :

$$\lambda = \frac{Q \cdot E}{\Delta T \cdot A} \text{ avec } R = \frac{E}{\lambda \cdot A} \quad (32)$$

Avec

$\lambda$ , la conductivité thermique [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]

$Q$ , la densité de flux thermique [ $W \cdot m^{-2}$ ]

$\Delta T$ , différentiel de température [ $K$ ]

$E$ , épaisseur du matériau analysé [ $m$ ]

$A$ , surface du matériau analysé [ $m^2$ ]

$R$ , la résistance thermique [ $K \cdot W^{-1}$ ]

La technique de la plaque fluxmétrique, ou lambdamètre, est identique sur le principe à la méthode de la plaque chaude gardée, norme à partir de laquelle les fabricants d'isolants évaluent la conductivité thermique (équivalente) des matériaux en mesurant la puissance thermique traversant le matériau pour une épaisseur donnée, par unité de surface et par degré. Les mesures ont été réalisées chez

STEICO dans une salle climatisée régulée à 15°C. La plaque chaude est maintenue à 15°C et la plaque froide à 5°C. Avant la mesure, les échantillons de volume 250\*250\*80 mm<sup>3</sup>, sont séchés à 70°C jusqu'à stabilisation de la masse puis sont préalablement conditionnés dans une enveloppe étanche à la vapeur.

### 2.3.4 *Mesure des propriétés hydriques*

#### 2.3.4.1 *Evaluation des isothermes de sorption*

L'équilibre hygroscopique des matériaux fabriqués a été mesuré pour différentes humidités relatives de l'air. Des échantillons de surface 50 x 50 mm<sup>2</sup>, d'épaisseur variable suivant leur densité, ont été utilisés. Ils ont d'abord été séchés à l'étuve à 103°C et leur masse a été mesurée à l'équilibre. Ils ont ensuite été placés dans une enceinte climatique (modèle KBF de Binder). Leur masse a été mesurée régulièrement jusqu'à stabilisation. On a ainsi pu recalculer leur humidité d'équilibre (rapport des masses humide et sèche). Elle a été calculée aux humidités relatives de l'air suivantes : 40%, 65%, 80%, 98% et à une température de 20 °C.

#### 2.3.4.2 *Evaluation des gammes de tampons hydriques*

Le principe du MBV a été présenté en paragraphe 1.5.6. Dans le projet ECOMATFIB, les échantillons sont préalablement découpés à la même épaisseur et sont ensuite étanchés sur toutes les faces, exceptée la surface d'échange. Après stabilisation à 23°C et 50%RH, les échantillons sont soumis à des variations cycliques journalières de l'humidité relative de l'air (8h à 75%HR et 16h à 33%HR) d'une durée de 3 à 5 jours (jusqu'à stabilisation des variations en différentiel massique). La valeur du tampon hydrique pratique est calculée à partir des variations de masse durant le cycle par la relation (23). Les essais sont réalisés dans une enceinte BINDER KBF115. Plusieurs matériaux conçus, comprenant à la fois diverses granulométries de fibres bois et des densités différentes, ont été testées selon cette méthode.

### 2.3.5 *Mesure de propriétés morphologiques et de transfert hydrique à partir d'imagerie 3D*

Telle que décrite dans la section 2.1.4, la technique non destructive de micro-tomographie aux rayons X est pertinente et puissante, à la fois pour la mesure de granulométries des fibres, mais aussi pour réaliser des mesures quantitatives sur les réseaux fibreux constitués après consolidation. Nous décrivons dans les sections qui suivent les méthodes d'acquisition des images 3D de panneaux sélectionnés puis de traitement de celles-ci. Ainsi, nous présentons les méthodes de mesure de l'orientation des fibres dans les différents panneaux testés, puis de la distribution granulométrique de ces fibres, et enfin la méthode de mesure de Résistance hydrique et de Perméabilité développée sur les images 3D au Laboratoire des Sciences de l'Ingénieur pour l'Environnement, LaSIE, de La Rochelle.

### 2.3.5.1 Acquisition à I2M des images 3D de matériaux MNTB puis traitement préliminaire des images

Bien que la technique de caractérisation micro-tomographique soit coûteuse en temps, elle permet une analyse plus aiguisée puisque celle-ci, fonction de la résolution dédiée aux échelles méso et/ou microstructurale, est mieux adaptée à certaines caractérisations des matériaux. Celle-ci autorise, in fine, les conjonctions entre les morphologies des matières premières, les procédés de fabrication et les propriétés résultantes. Dans ce cadre, peu de MNTB ont été analysés de la sorte. Ceux-ci l'ont été, avec le système Skyscan décrit dans la section 2.1.4, à une résolution de 5,7  $\mu\text{m}$  par pixel. L'ensemble des acquisitions ont été réalisés par Huyen Tran (post-doctorante) sur des échantillons cylindriques de 1 cm. Cette taille est pertinente pour une observation à l'échelle mésoscopique, adaptée à la taille des fibres du réseau. Il a fallu également adapter la découpe de chacun d'entre-eux pour ne pas endommager les matériaux. Les images sont filtrées puis binarisées avant de procéder aux analyses de l'ensemble par la technique de traitement d'images 3D.

### 2.3.5.2 Mesures de l'orientation des fibres

Afin de déterminer en tout point des fibres un vecteur d'orientation locale, un algorithme similaire à celui décrit dans (Altendorf & al., 2011), développé par J. Lux (El-Sawalhi & al., 2015), a été utilisé au LaSIE dans le cadre du projet ECOMATFIB. L'algorithme intègre 49 directions uniformément discrétisées afin d'atteindre une précision satisfaisante, tout en conservant un temps de calcul raisonnable. La discrétisation des segments est réalisée avec un algorithme de type Bresenham (Bresenham, 1985).

Le principe de cette méthode est de calculer en chaque point les distances orientées dans l'ensemble des directions choisies. La distance orientée  $d(\vec{v}_i)$  est tout simplement la distance minimale du point au bord le plus proche suivant le vecteur  $\vec{v}_i$ . En chaque voxel, on calcule ensuite la distance centralisée, notée  $d_c$ , comme la moyenne des distances pour deux directions opposées  $d_c(v_i) = \frac{1}{2}(d(\vec{v}_i) + d(-\vec{v}_i))$ . Cette valeur est plus généralement appelée half-chord length. On calcule ensuite les positions  $P_i$  des extrémités des vecteurs des distances centralisées (Equation 33)

$$P_i = d_c(v_i)\vec{v}_i \quad (33)$$

Les vecteurs propres et valeurs propres du tenseur d'inertie sont calculés sur le nuage de points constitués des points  $P_i$  (98 dans notre cas), ce qui permet de déterminer les directions principales en chaque voxel. Du fait de la nature discrète des images ainsi que des segments, le champ d'orientation locale est parfois bruité sur les voxels de la surface extérieure des fibres. Un lissage tenant compte des intensités des vecteurs d'orientation locales (*i.e.* des valeurs propres associées) est réalisé sur un voisinage proche (3x3x3 voxels).

Les résultats de la mesure des orientations locales au sein d'un panneau seront présentés dans la section 3.1.1, qui permettront de différencier les réseaux fibreux élaborés, dépendant de la matière première utilisée.

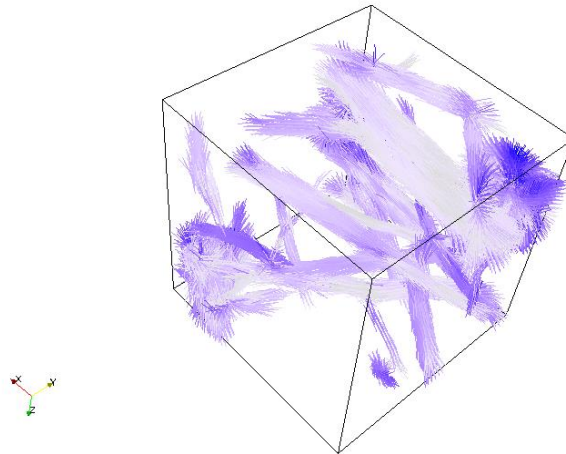


Figure 55 : Champ d'orientation locale calculée sur une image de l'échantillon PM5S (100x100x100 voxels). Les orientations sont représentées sous forme de segments de droite normalisés et colorés selon la composante  $z$  : les orientations dans le plan transverse sont beiges tandis que les orientations selon  $Oz$  apparaissent bleues.

#### 2.3.5.3 Mesures de la granulométrie des fibres et des pores dans le panneau

Les mesures de la granulométrie des fibres et des pores sont réalisées à partir d'images tridimensionnelles acquises au laboratoire I2M à l'aide du Skyscan 1074, avec une résolution de 5,7  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du Post doctorat de Huyen Tran. Les échantillons cylindriques sont découpés dans les panneaux à l'aide d'un emporte-pièce rotatif, avec un diamètre et une hauteur respectivement égaux à 10mm. Un soin particulier est nécessaire pour la découpe, qui s'avère délicate en raison de la forte porosité des matériaux, pour ne pas en modifier la microstructure.

Comme indiqué au préalable, les images 3D en niveaux de gris ont été successivement filtrées puis binarisées, pour distinguer les 2 ensembles de fibres et de pores. Après l'opération de rebouchage, nécessaire pour obtenir des réseaux de fibres et de pores simplifiés, des *ouvertures* par un *élément structurant* de taille croissante, une sphère ici, sont appliquées successivement aux 2 réseaux étudiés. Les résultats correspondants seront présentés en section 4.2.3 (Tableau 33, Figure 102).

#### 2.3.5.4 Mesures du Facteur de résistance hydrique et de la Perméabilité des matériaux testés

Les images tomographiques peuvent être également utilisées comme support pour la réalisation de simulations numériques de différents phénomènes de transfert (Lux & al., 2006), (Delisée C. & al., 2010), (El-Sawalhi et al., 2015), (Lux & al, 2018), ce qui permet d'estimer numériquement des propriétés comme la conductivité thermique, la diffusivité ou encore la perméabilité des matériaux étudiés.

Le transfert de vapeur sous l'action d'un gradient de pression de vapeur peut être modélisé par une loi de type Fick à l'échelle macroscopique. Afin de calculer la perméabilité à la vapeur  $k_v$  en régime permanent, il suffit de simuler la diffusion de vapeur au sein d'une image et de mesurer la densité de flux de vapeur  $g_v$  ( $kg.m^{-2}.s^{-1}$ ) entre deux faces opposées soumis à une différence de pression de vapeur constante  $\Delta P_v$ . On a alors :

$$k_v = \frac{g_v L}{\Delta P_v} \vec{v}_l \quad (34)$$

Avec

$L$ , la distance entre les deux faces du panneau

La simulation s'effectuant en régime permanent, on peut négliger les phénomènes de sorption/désorption dans les fibres. On négligera également la diffusion de vapeur au sein des fibres par rapport à la diffusion dans la porosité inter fibres. Numériquement, les fibres seront considérées comme imperméables.

Avec une approche similaire, il est également possible de déterminer la perméabilité à l'air de nos matériaux. L'écoulement à l'échelle macroscopique est ici modélisé par la loi de Darcy, lorsque le Reynolds est suffisamment faible. Afin de calculer la perméabilité, on détermine le flux d'air par convection au sein de laine soumise à un gradient de pression constant  $\Delta P$  entre deux faces du matériau. L'écoulement stationnaire à petite échelle est décrit par l'équation de Stokes (dans le cas de faible Reynolds) et la perméabilité mesurée  $K$  est alors la perméabilité intrinsèque, qui ne dépend que de la microstructure :

$$K = \mu v_s \frac{L}{\Delta P} \quad (35)$$

Avec

$v_s$ , la vitesse superficielle (ou vitesse de Darcy) [ $m.s^{-1}$ ]

$\mu$ , la viscosité dynamique [ $Pa.s$ ]

$L$ , la distance entre deux faces

Les simulations numériques des phénomènes de diffusion et de convection sont réalisées avec un code aux volumes finis développé au LaSIE par J. Lux (Lux., 2010), (Lux & al, 2018). Les résultats associés seront présentés en section 4.4.3 (Tableau 35 & Tableau 36).

### 2.3.6 Mesure des propriétés mécaniques : compression et reprise en épaisseur

Deux types d'essais ont été réalisés. Le premier (compression simple) consiste à comprimer ces matériaux pour étudier leur comportement mécanique global et leur faculté à se déformer sous de fortes contraintes ainsi que les déformations résiduelles engendrées. Le second (reprise en épaisseur) a pour principal objectif d'étudier l'influence de facteurs constitutifs de leur microstructure, sur les propriétés mécaniques au travers des taux de déformations résiduelles engendrées après décompression. Les spécimens testés font  $100*100*E$  mm<sup>3</sup> pour l'essai de compression et ont une taille réduite de  $50*50*E$

mm<sup>3</sup> pour multiplier les essais de reprise en épaisseur. Les essais sont pour la plupart menés sous imagerie 2D à l'aide d'une caméra CCD. Ces caméras sont de type Marlin fournies par le groupe Allied. Les paramètres d'acquisition sont 1 image prise toutes les 3 secondes et 1500 images enregistrées pour l'analyse. La résolution des images est de 2100\*1920 pixels. Dans ce cas, les évolutions des déformations seront traitées par la technique de corrélation d'image développée au laboratoire de l'institut PPRIME (logiciel Correla<sup>®</sup>) (Germaneau & al, 2007) (Barranger & al., 2012). Des essais simples préliminaires doivent être réalisés avec l'objectif de construire le protocole d'essais et de justifier la performance de la technique de mesure de champ de déformation par corrélation d'images numériques sur les panneaux élaborés du projet ECOMATFIB (H. Tran & al, 2016).

#### **\_ Essais de compression simple :**

La vitesse de déplacement du piston est de 3 mm/min pour l'essai compression à la charge comme à la décharge (*Figure 56*). Les essais de compression simple sur les MNTB ont été réalisés avec un taux de compression maximal fixé à 85% de déformation relative à l'épaisseur initiale (Tran, 2012) (Delisée C. & al, 2017). Ce taux permet notamment de réduire le matériau à une épaisseur inférieure ou égale à 1 cm, qui est la limite nécessaire pour les mesures de la capacité thermique à l'aide du Desprotherm (cf. section 2.3.3). Ce taux de compression est par ailleurs proche de la porosité totale du matériau, de l'ordre de 90%. Il permettra de plus, de mesurer les capacités de reprise en épaisseur après décharge, dans des conditions similaires à celles de la laine de verre, après stockage/transport (épaisseurs de l'ordre du cm) puis utilisation en service.

Les grandeurs mesurées sont :

- le module tangent entre 5 et 10% de déformation,
- la déformation résiduelle instantanée à la décharge lorsque la force appliquée devient nulle,
- une modélisation semi-empirique du type Van Wyk.

#### **\_ Essais de reprise en épaisseur :**

Afin d'étudier la compressibilité du matériau et plus précisément la capacité de reprise en épaisseur du matériau après être comprimé à un certain taux de compression, les essais cycliques de reprise en épaisseur sont effectués. Cette étude a pour but d'observer le comportement du matériau après charge et décharge en vue d'étudier la possibilité de réduire le coût de transport et de stockage par une réduction du volume du panneau. La vitesse de déplacement du piston est de 3 mm/s pour les essais de reprise en épaisseur. Les essais sont réalisés comme suit :

- Essais de reprise en épaisseur à taux de compression donné égal à 30% de déformation relative à l'épaisseur initiale, à différents temps de maintien (instantané, 1 min, 10 min, 100 min) (*Figure 57a*),

- Essais de reprise en épaisseur à différents taux de compression 10%, 30%, 50% (Figure 57b), maintenus pendant 100 min, 15 jours et 1 mois

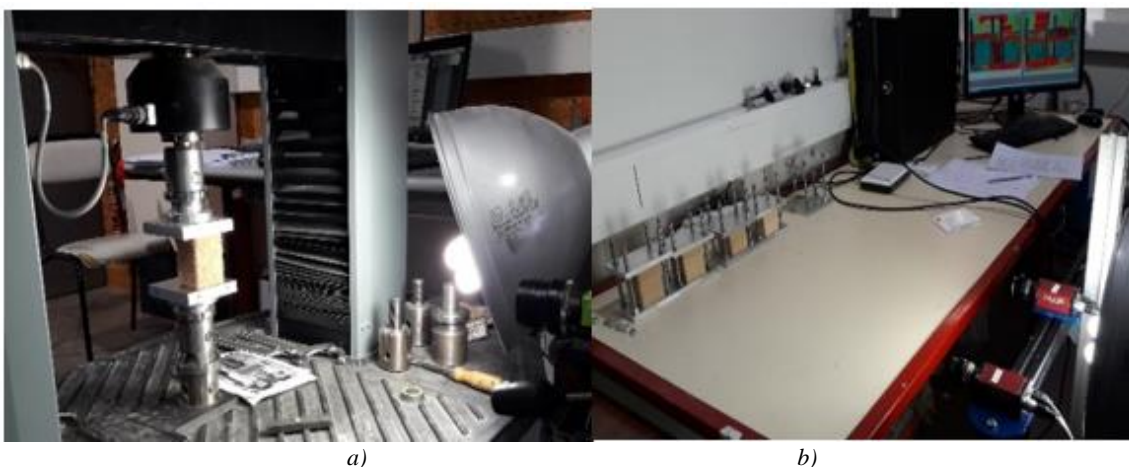
Les grandeurs mesurées sont :

- le module tangent entre 5 et 10% de déformation pour des temps de maintien  $\leq$  à 100 min,
- la relaxation du matériau pour des temps de maintien  $\leq$  à 100 min,
- la déformation résiduelle instantanée par corrélation d'images,
- les déformations résiduelles à 1 h, 24 h et 1 semaine.

Comme évoqué ci-dessus, les déformations résiduelles instantanées sont estimées par corrélation d'images 2D. Les déformations résiduelles après la décharge sont ensuite respectivement mesurées au pied à coulisse à 1 h, 24 h et 1 semaine. Les essais mécaniques réalisés sont synthétisés dans le Tableau 20.



a) b)  
Figure 56 : Montage d'un essai de compression sur des échantillons (100x100xEpaisseur)  
a) vue de côté b) vue de face arrière



a) b)  
Figure 57 : Montage d'essai de reprise en épaisseur sur des échantillons cubiques (50x50xEpaisseur)  
a) influence de temps de maintien  $\leq 100$  min (b) influence de temps de maintien de 15 et 30 jours



### 2.3.7 Synthèse des caractérisations expérimentales

L'ensemble des mesures expérimentales réalisées est synthétisé ci-dessous (Tableau 20). Comme décrit dans celui-ci, les caractérisations des MNTB ont fait appel à des mesures morphologiques, thermiques, hydriques et mécaniques.

Tableau 20 : Référencement du nombre d'essais réalisés associé au nombre de matériaux distincts évalués

Type de caractérisation	Nb. total d'essais réalisés	Nb. de références analysées	Nb. d'échantillons analysés par référence	Nb. d'essais par échantillon	Taille des spécimens selon $L \times l \times E$ (mm <sup>3</sup> )
Profilométrie	18	18	1	1	50 x 50 x E
Effusivité	275	68	2 à 3	2 à 5	100 x 100 x E
Capacité thermique	133	26	2 à 3	1 à 3	100 x 100 x 10
Conductivité thermique déclarée	3	3	1	1	250 x 250 x 80
Isotherme de sorption	20	5	4	1	50 x 50 x E
Tampon Hydrique	10	4	1 à 3	1	100 x 100 x E
Compression à 85%	14	11	1 à 2	1	100 x 100 x E
Essais de reprise en ép. après compression de 30%, Temps maintien $\leq$ 100 min	58	17	2 à 5	1	50 x 50 x E
Essais de reprise en ép. après compression de 10%, 30%, 50% Temps maintien $\geq$ 100min	19	9	2 à 3	1	50 x 50 x E

### 3 Conception des matériaux non tissés : influence des paramètres process et de la matière première

Dans cette partie, nous nous intéressons aux étapes de conception et de fabrication des matériaux, à partir d'une matière première aux propriétés différenciées, en termes de taille des fibres, d'essence forestière, de type de fibres thermoplastiques. Il s'agit donc de maîtriser au mieux ces étapes, pour concevoir des MNTB à partir des différentes essences de bois disponibles localement en Nouvelle Aquitaine. On cherche à optimiser les propriétés thermiques et la reprise en épaisseur après compression de ces matériaux. On vise une gamme de masse volumique entre 30 et 150 kg.m<sup>-3</sup>. La conductivité thermique doit s'approcher des 30 mW.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>. Cette valeur est un prérequis pour atteindre les mêmes performances que les laines de verre disponibles sur le marché. Il faut également optimiser la reprise en épaisseur afin d'amoindrir le coût de transport, important du fait de la non compression des matériaux. Ces deux lignes directrices seront suivies, lors de l'identification et la modulation des paramètres de fabrication, qui feront l'objet de l'étude présentée dans la première section de ce chapitre. Dans un deuxième temps, nous présenterons les résultats obtenus sur la fabrication des matériaux, les commenterons et pourrons en tirer des premières conclusions.

#### 3.1 *Choix des paramètres de fabrication*

Dans un premier temps, la prise en main des équipements de fabrication des matériaux non-tissés (ouvreuse et four) a été menée en réalisant des nappes puis des panneaux à partir des fibres de bois témoins des partenaires STEICO et FINSA (références respectives Steico et Finsa) mélangées à des fibres synthétiques fournies par le partenaire STEICO (référence S) (*Tableau 17*) et par l'industriel LAROCHE (référence L). Cette série d'essais préliminaires, essentielle pour la compréhension des fonctionnements des machines et du comportement de la matière première, nous a permis d'identifier les paramètres adéquats de réglage et les valeurs correspondantes.

Dans un second temps, les essais ont été menés avec 6 populations de fibres de pin maritime (PM1 à PM6) (*Tableau 12*) associées à la même fibre synthétique (référence S). Puis, les essais ont été complétés par la réalisation de nappes à partir de fibres de bois d'essences de peuplier (PR), Pin *taeda* (PT) et eucalyptus (EU) ainsi que d'autres types de fibres bicomposants, de longueur et section différentes (*Tableau 17*). Après que les essences de bois aient été défibrées au FCBA Grenoble, elles ont été dans un premier temps séchées à air ambiant sur place au laboratoire I2M, puis ensuite conditionnées à (20°C, 65% HR).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présenterons successivement les réflexions menées pour le choix des paramètres de réglage des équipements de fabrication : essais préliminaires, réalisation des nappes puis consolidation en four thermique.

### 3.1.1 *Elaboration de premiers matériaux pour identification des paramètres de réglage des équipements : mesures préliminaires et éléments de réflexion*

Comme évoqué ci-dessus, la prise en main des équipements de fabrication a été réalisée avec l'utilisation des fibres de bois Steico et Finsa (*Figure 29*) et de fibres thermoplastiques bicomposants (S) et (L), provenant de STEICO et LAROCHE, de longueurs respectives 6 et 45 mm pour un diamètre équivalent de 20  $\mu\text{m}$  (*Figure 59*). L'objectif de cette phase du travail est d'identifier les réglages adéquats, sur des équipements nouvellement arrivés au laboratoire, permettant la conception de nappes homogènes, et ce avant de réaliser les matériaux contenant les fibres du projet. Plusieurs paramètres sont ici gardés constants, notés les « Paramètres base » : Fractions massiques des Fibres Bois / Fibres thermoplastiques 94% / 6% - Vitesse du Flux air chaud = 50 % Vitesse maximale.

Ainsi, 8 panneaux tests ont été conçus avec les fibres susmentionnées, à partir de 4 nappes, constituées des fibres de bois Finsa vs Steico et des fibres synthétiques (S) vs (L), et de 2 facteurs de compression sensiblement différents, égaux à 10 % et 50%, appliqués lors de la consolidation thermique tel que décrit en section 2.2.2. Ce facteur de compression, noté CR (Compression Ratio), est défini par :

$$CR(\%) = \frac{\text{Épaisseur initiale du matelas} - \text{Écartement entre les tapis du four}}{\text{Épaisseur initiale du matelas}} \quad (36)$$

Les nappes seront notées par la suite : **Réf Fibre Bois – Réf Fibre plastique.**

Les panneaux, recensés dans le Tableau 21 et présentés en Figure 60, sont référencés comme suit :

- **Réf Fibre Bois – Réf Fibre plastique – CR(%) -**



Figure 58 : Visuels des fibres de bois fournies par les 2 industriels du projet

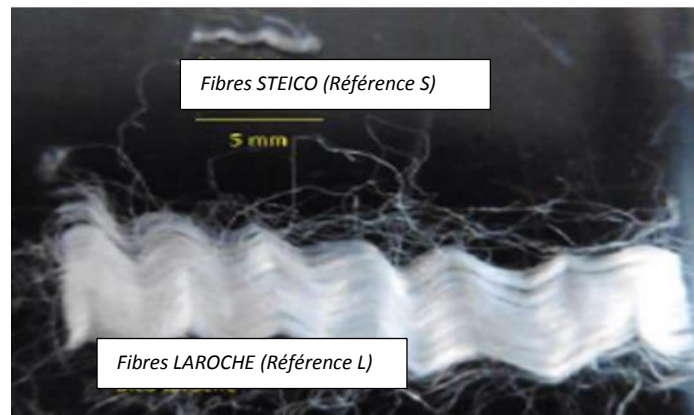


Figure 59 : Visuel des 2 premières fibres thermoplastiques utilisées



Figure 60 : Visuel des 8 premiers matériaux produits

En fonction des réglages des paramètres machines et du type de matière première utilisée, on s'intéressera ici au comportement des panneaux lors de la fabrication (reprise en épaisseur en sortie du four) et à leurs propriétés thermiques intrinsèques (*Tableau 21*) ainsi qu'à la morphologie des panneaux conçus, caractérisée ici par l'orientation des fibres dans le plan (*Tableau 22*).

### 3.1.1.1 Quelques réflexions sur les paramètres influençant la reprise en épaisseur des panneaux

Lors de ces essais préliminaires, on observe ainsi une faculté de ces matelas à reprendre en épaisseur, ou rebondir, à la sortie du four (augmentation de l'épaisseur par rapport à celle imposée entre ses tapis). La prise en compte de la reprise en épaisseur en sortie de four, dépendant des matières premières et du taux de compression appliqué lors de la consolidation, permettra d'anticiper et de caler plus précisément la valeur attendue de la masse volumique des panneaux Cette capacité de reprise en épaisseur en sortie du four est définie par :

$$\Delta \% = \frac{E_{\text{panneau obtenue}} - \text{écartement entre les tapis du four}}{\text{écartement entre les tapis du four}} \quad (37)$$

On présente dans le Tableau 21 les mesures préliminaires des masses volumiques apparentes  $\rho^*$ , des capacités thermiques  $C_p$  et des taux de reprise en épaisseur  $\Delta\%$ , telles que décrites dans le chapitre précédent, réalisées sur les 8 panneaux tests, présentant 2 taux de compression  $CR = 10$  et  $50\%$  et constitués de différents types de fibres de bois (Steico et Finsa) et fibres thermoplastiques (S et L).

**\_ Réflexion 1 :** Il est constaté que le taux  $\Delta\%$  de reprise en épaisseur des matelas, pour des fibres de bois identiques, pour une même fraction massique, pour un même taux de compression en four, est plus du double en sortie du four pour les panneaux composés de fibres thermoplastiques Steico (S) que pour ceux composés de fibres thermoplastiques Laroche (L) (Tableau 21).

**\_ Réflexion 2 :** On constate donc une différence de comportement liée au type de fibre thermoplastique S ou L, qui peut induire une orientation différenciée des fibres au sein des panneaux et une reprise en épaisseur différenciée. Pour en savoir plus, une étude plus poussée de l'orientation des fibres a été réalisée sur des images micro-tomographiques des panneaux Finsa-S-50 et Finsa-L-50, afin de mettre en évidence l'effet de la nature des fibres thermoplastiques F et L. Cette étude est présentée dans la section qui suit.

**\_ Réflexion 3 :** Les mesures de  $C_p$  ont été réalisées sur des échantillons placés en ambiance non contrôlée, ce qui peut expliquer, dans un premier temps, la variabilité des valeurs présentées.

Tableau 21 : Propriétés physiques des 8 matelas tests :  $CR$  (%) taux de compression appliqué,  $\rho^*$  [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ] masse volumique apparente,  $\sigma$  écart type,  $\Delta$  (%) reprise en épaisseur,  $C_p$  [ $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ] capacité thermique

Référence panneau	Fibres bois	Fibres synthétiques	CR (%)	$\rho^*$ ( $\sigma$ ) [ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]	$\Delta$ (%)	$C_p$ ( $\sigma$ ) [ $\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ]
SteicoS10	Steico	S (Steico)	10	33,6 (2,7)	+9	1851(31)
SteicoS50	Steico	S (Steico)	50	60,7 (0,6)	+12	1693 (30)
SteicoL10	Steico	L (Laroche)	10	35,9 (0,2)	+2	1795 (13)
SteicoL50	Steico	L (Laroche)	50	54,5 (0,6)	+6	1708 (14)
FinsaS10	Finsa	S (Steico)	10	33,6 (2,5)	+14	1616 (28)
FinsaS50	Finsa	S (Steico)	50	54,5 (1,1)	+23	1679 (29)
FinsaL10	Finsa	L (Laroche)	10	33,1 (1,1)	+1	1877 (37)
FinsaL50	Finsa	L (Laroche)	50	44,1 (2,3)	+10	1650 (21)

### 3.1.1.2 Relations entre la reprise en épaisseur en sortie du four et les distributions des orientations des fibres dans les panneaux FinsaS et FinsaL

La distribution des orientations des fibres (méthode présentée en section 2.3.5), mesurée par analyse d'images microtomographiques sur les 2 panneaux FinsaS50 et FinsaL50 (Tableau 22), montre une orientation privilégiée dans le plan des panneaux pour les fibres FinsaS alors que celles des fibres FinsaL sont orientées plus aléatoirement dans le volume. Cette orientation différenciée des fibres peut ainsi entre-autres expliquer la proportion respective de chacun des types de panneaux à plus ou moins

reprendre en épaisseur à leur sortie du four (*Tableau 21*). Ce résultat est confirmé par les mesures des orientations obtenues sur le panneau industriel Flex 38, produit par le partenaire STEICO à partir des mêmes fibres S. Par la suite, puisque les panneaux seront essentiellement réalisés à partir des fibres thermoplastiques S, fournies par l'industriel STEICO partenaire du projet ECOMATFIB, il s'agira de bien anticiper la reprise en épaisseur des panneaux pour viser les masses volumiques souhaitées.

*Tableau 22 : Taux de répartition des fibres par classe d'orientation par rapport au plan des panneaux*

<i>Orientation par rapport au plan du panneau (°)</i>	<i>FinsaS50 (%)</i>	<i>FinsaL50 (%)</i>	<i>Flex 38 (%)</i>
< 10	44,5	28,8	42,4
10 < 20	28,4	24,7	28,7
20 < 30	13,8	17,6	14,6
30 < 40	6,7	12,2	7,2
40 < 50	3,4	7,5	3,4
50 < 60	1,8	4,6	1,9
60 < 90	1,5	4,5	1,7

On notera qu'une orientation privilégiée dans le plan des panneaux a pour conséquence de minimiser la conductivité thermique apparente de ces panneaux (Faessel & al, 2005). Ces résultats seront confirmés par des mesures de conductivité thermique des 8 panneaux tests (Vignon & al, 2015), comme décrit ci-après.

### 3.1.1.3 *Mesures préliminaires de conductivité thermique sur 8 panneaux tests*

A cette étape du projet, des premières mesures de conductivité thermique ont été réalisées à l'aide du Desprotherm (méthode en section 2.3.3) sur ces 8 panneaux, comme indiqué en partie dans le tableau 23 et illustré en Figure 61. Pour cela, 3 mesures d'effusivité thermique  $b$  ont été réalisées pour chaque référence d'échantillons, en plus des 3 mesures de capacité thermique  $C_p$  présentées ci-dessus.

La Figure 61 ci-dessous illustre l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique apparente, pour les 8 panneaux testés. Les mesures sont regroupées par taux de compression 10% et 50%. Les échantillons sont systématiquement pesés avant chacune des mesures réalisées. On observe ainsi, pour certains d'entre eux, d'un jour à l'autre et d'une mesure à l'autre, une variation de cette masse de quelques décigrammes et donc de leur masse volumique apparente, qui induit une forte variabilité sur la mesure des propriétés thermiques. Nous avons donc été amenés, pour les essais futurs qui suivront, à déplacer toutes les analyses thermiques ayant été menées par la suite dans une salle conditionnée à 20°C/65%HR.

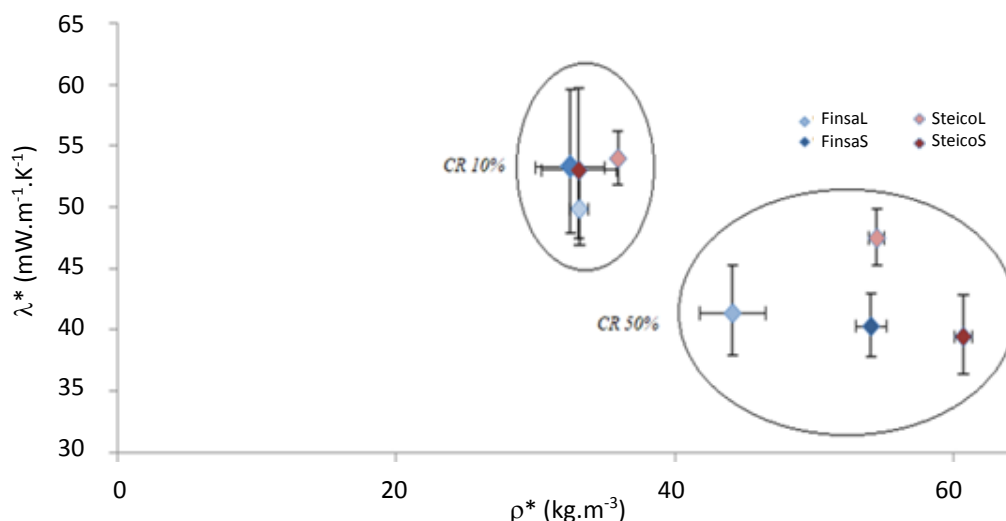


Figure 61 : Quantification des conductivités thermiques mesurées en fonction de la masse volumique apparente des MNTB référencés dans le Tableau 21

### 3.1.1.4 Réalisation d'autres matériaux MNTB à partir des fibres industrielles pour calage des paramètres machine en vue d'une optimisation technico-économique des performances

D'autres matériaux, fabriqués avec les fibres de bois industrielles Steico, vont permettre d'estimer la propension de réglages dans le four et de leur incidence sur les panneaux réalisés, en jouant sur les : Vitesses du flux d'air chaud - Temps de séjour pour consolidation - Conditions de refroidissement des panneaux. Les objectifs visés sont dans un premier temps de comprendre l'incidence de certains paramètres appliqués dans le four (essais sur Nappe N1) et d'atteindre une masse volumique apparente attendue supérieure à celle du MNTB Steicoflex de référence, disponible sur le marché (essais sur nappe N2, de masse volumique  $\rho_{nappe}$  sensiblement différente de celle de Nappe N1 (resp  $\approx 30$  et  $40$  kg/m<sup>3</sup>). Les résultats sont recensés dans le *Tableau 23*. Le panneau SteicoS50\_1, réalisé à partir des « Paramètres base » définis précédemment, présente des propriétés physiques similaires à celles du Steicoflex.

Tableau 23 : MNTB conçus avec des réglages différents dans le four ou plus forte masse volumique attendue

Réf. Panneau	Objectifs	Propriétés de la nappe			Paramètres four		Propriétés du panneau		
		Réf. Nappe	$\rho_{nappe}$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$e_{nappe}$ (mm)	CR (%)	Temps de Séjour (s)	$\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$e_{final}$ (mm)	$\Delta$ (%)
SteicoS50_1	« Paramètres base »	N1	24	<b>90</b>	50	219	<b>48,5 +/- 6</b>	48	7
SteicoS50_2	Quelle Incidence de la vitesse Flux air chaud réduit à 20% ?		28	<b>90</b>	50	477	<b>48 +/- 4,2</b>	49	9
SteicoS50_3	Quelle incidence du Refroidissement à l'air Ambiant ?		30	<b>80</b>	50	1207	<b>55 +/- 5,4</b>	46	15
SteicoS68	Forte densité	N2	40	<b>170</b>	68	1245	<b>91 +/- 6,5</b>	64	18
SteicoS78	Forte densité		37	<b>175</b>	78	1360	<b>103 +/- 7,5</b>	53	38

Les résultats présentés dans le tableau ci-dessus nous amènent à la :

**\_Réflexion 4 :** La réduction de la vitesse du flux d'air chaud de 50% (SteicoS50\_1) à 20% (SteicoS50\_2), double le temps de séjour des MNTB dans le four. Par ailleurs, le refroidissement à l'air ambiant (SteicoS50\_3) multiplie par 5 le temps nécessaire pour obtenir le MNTB de même masse volumique apparente. La réalisation de panneaux de relatives fortes masses volumiques (SteicoS68 et SteicoS78) nécessite l'empilement initial de plus de nappes mais également l'allongement des temps de séjour dans le four d'un facteur 6 par rapport aux caractéristiques du panneau SteicoS50\_1.

Dans un deuxième temps, des taux massiques plus importants de fibres thermoplastiques sont mis en œuvre (Tableau 24).

Tableau 24 : MNTB conçus en faisant varier significativement le taux massique de fibres thermoplastiques les constituant

Réf. Panneau	Objectifs	Propriétés de la nappe			Paramètres four		Propriétés du panneau		
		Réf. Nappe	$\rho_{nappe}$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$e_{nappe}$ (mm)	CR (%)	Temps de Séjour (s)	$\rho_f$ (kg.m <sup>-3</sup> )	$e_{final}$ (mm)	$\Delta$ %
SteicoS40	20 % de fibres bico	N3	31	135	40	750	<b>40</b>	90	11%
SteicoS70	20 % de fibres bico		34	150	70	1080	<b>60</b>	55	22%
SteicoS21	50 % de fibres bico	N4	23	180	21	1150	<b>30</b>	135	-5%
SteicoS35	50 % de fibres bico		24	170	35	1350	<b>35</b>	110	0%

**\_Réflexion 5 :** la proportion massique plus élevée de fibres thermoplastiques tend à diminuer les taux de reprise en épaisseur constatées à la sortie du four. Par ailleurs, l'augmentation du taux massique de fibres thermoplastiques a pour conséquence d'allonger nettement la durée de consolidation des matelas dans le four. Eu égard à la carte causale globale de l'optimisation multi-objectif réalisée par Mohamad Hussein Hobballah (Hobballah, 2017) (Hobballah & al, 2018), le coût inhérent à la production de ces MNTB étant fonction en grande partie de leur constitution et de l'énergie consommée à leur conception, il advient qu'intégrer autant de fibres thermoplastiques n'est ni envisageable ni opportun.

A partir des résultats obtenus lors de ces essais préliminaires, nous avons pu adapter et appréhender les paramètres de la fabrication des matelas et des panneaux, comme présenté ci-après.

### 3.1.2 Choix des paramètres de réglage pour la réalisation des nappes à l'aide de l'ouvreuse nappeuse

Comme exposé dans le chapitre précédent, les réseaux fibreux sont formés par voie sèche aérodynamique, permettant la réalisation de structures très poreuses, homogènes, plus ou moins épaisses et avec une orientation privilégiée des fibres dans des plans parallèles aux faces. Les étapes d'ouverture de la matière première, puis de sortie des nappes, respectivement à l'entrée et à la sortie de l'ouvreuse nappeuse, sont illustrées ci-dessous (Figure 62).





Figure 62 : Dépôt de la matière première sur tapis alimentaire puis vues de face d'une nappe formée

Lors de cette étape de fabrication, on distingue l'ouvrison des matières premières fibres de bois d'une part et fibres thermoplastiques d'autre part, séparément, puis l'ouvrison pour le mélange des 2 populations de fibres, lors de deux passages successifs dans l'ouvreuse nappreuse (passage 1 et passage 2), et enfin la réalisation de la nappe finale lors du second passage. Les paramètres décrits dans le Tableau 18 doivent ici être adaptés aux matières premières pour avoir une bonne séparation des fibres ainsi qu'un mélange homogène en masse et épaisseur.

Ainsi, lors de l'étape d'ouvrison, la quantité de matières introduites (**débit par unité de volume/temps**) et la **Puissance d'aspiration** sont réduites pour favoriser la séparation des fibres de bois puis celle des fibres thermoplastiques. La **Vitesse de la carte** est fixée à 70% de la vitesse maximale pour les fibres thermoplastiques et diminue progressivement avec la finesse des fibres de bois, limitant endommagement / échauffement (Tableau 25). Une fois ouvertes séparément, les matières premières seront mélangées par défaut dans les proportions massiques 94% fibres bois / 6% fibres synthétiques (paramètres base), hors essais spécifiques.

Pour le **Passage 1** en vue du mélange initial, les fibres de bois sont réparties progressivement au-dessus des fibres thermoplastiques sur le tapis d'alimentation. L'opération est renouvelée une deuxième fois. La **Vitesse du tapis alimentaire** est également réduite, afin de limiter l'enchevêtrement des fibres dans le flux d'air, lors du nappage et de l'aspiration. La quantité de matière introduite, ou débit par unité de volume/temps, est ensuite modulée lors du **Passage 2** pour le mélange final de manière à obtenir des nappes relativement épaisses. Il s'agit en effet de limiter le nombre de strates dans le matelas constitué à partir de ces nappes, tout en garantissant une uniformité dans la répartition des fibres sur le condenseur et dans ses dimensions en sortie d'ouvreuse.

Cette régulation de la **Vitesse du tapis alimentaire** est fonction du degré de déstructuration de la population des fibres de bois constituant le mélange. Les populations composées d'éléments grossiers (peu déstructurés, référencés PM1, PM2 par exemple) foisonnant davantage, la quantité de matières premières arrivant sur le condenseur doit être réduite pour éviter tout bourrage inhérent à l'incapacité des rouleaux délivreurs à entraîner correctement la nappe. A l'inverse, les populations défibrées formant

des réseaux plus compacts, le risque de bourrage s'en voit réduit et la Vitesse du tapis alimentaire peut être plus importante, qui permet de former des nappes plus épaisses.

En fin du process, les pertes de masse, liées à l'aspiration des fibres de faibles dimensions par le cylindre perforé ou condenseur, sont quantifiées après chaque passage dans l'ouvreuse-nappeuse. Les nappes finales sont scindées en 2 dans leur largeur et superposées. A ce stade, la cohésion est assurée uniquement par l'enchevêtrement inter-fibres. Parmi les réglages possibles (*Tableau 18*), la gamme de réglages utilisés pour la formation des nappes est présentée ci-dessous (*Tableau 25*).

*Tableau 25 : Principaux réglages lors de la formation des nappes*

	<i>Quantité (gr)</i>	<i>Carde</i>	<i>Aspiration</i>	<i>Etirage</i>
Fibres de Bois	800 à 980	40 à 55 %	25 à 50 %	0,5 à 2
Fibres Thermoplastiques	80 à 140	70%	45% à 60%	0,5 à 2
Passage 1 (en 2 fois)	400 (* 2)	45 à 60%	25 à 60%	0,5 à 2
Passage 2	700 à 900	45 à 60 %	25 à 60%	0,5

### 3.1.3 *Choix des paramètres de réglage pour la consolidation des MNTB en four thermique*

Une fois le matelas formé comme décrit ci-dessus, il est divisé en trois parties dans sa largeur. Il est déposé à l'entrée du four (*Figure 63*) puis entraîné et mis en épaisseur entre deux tapis métalliques, pour une consolidation thermique dans deux zones de chauffe. Le facteur de compression CR% est approximativement fixé à 20%, 50% et 75% (*Figure 63*), permettant d'obtenir des matériaux de densité variable.

Le cycle de consolidation des MNTB est le suivant :

1. Passage en zone de chauffe 1 (*Figure 49*) jusqu'à ce que la température atteigne en son centre la température requise de 130°C (*Figure 44*) puisqu'elle conditionne le début de la fusion de la gaine en polyéthylène basse densité des fibres thermoplastiques fournies par STEICO. Le flux d'air chaud est ici dirigé du haut vers le bas, avec une vitesse fixée arbitrairement à 50%.
2. Passage en zone de chauffe 2, où le flux d'air chaud est dirigé cette fois du bas vers le haut, avec une vitesse de 50% également, afin de bien répartir et homogénéiser la cuisson du matelas dans son volume,
3. Maintien 2 min à 130°C dans chaque zone de chauffe pour s'assurer de la diffusion/adhésion des gaines des fibres thermoplastiques avec leur environnement,
4. Passage en zone de refroidissement (zone 3), avec une vitesse de l'air ambiant fixée à 90% (*Figure 63*).

5. Sortie du four dès que T (thermocouple) < 40°C



Figure 63 : Visuel d'un matelas à l'entrée du four Strahm puis dans sa phase de refroidissement

### 3.2 Résultats sur la fabrication des MNTB & discussion

Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus sur la formation des nappes puis sur leur consolidation thermique dans le four et les matériaux obtenus, à partir de divers taux de compression. Nous focaliserons dans un premier temps sur les pertes matières engendrées par le process de nappage puis présenterons les facteurs influençant le temps de consolidation. Dans un troisième temps, les résultats préliminaires obtenus sur les matériaux, réalisés à partir des différentes essences et des nappes formées, seront présentés.

#### 3.2.1 Formation des nappes : incidence des différentes essences de bois et pertes matières en sortie d'ouvreuse

Nous nous intéresserons ici au comportement des différentes essences étudiées lors du process de nappage, dépendant notamment de la taille des fibres de bois. Les pertes matières seront quantifiées, en quantité (masse relative) et en qualité (type de fibres fine vs longue). Les références des nappes réalisées à l'aide des paramètres évoqués précédemment sont présentées ci-dessous (*Tableau 26*), ainsi que 2 illustrations des mélanges obtenus, après que les matières premières aient été au préalable ouvertes (*Figure 64*). On peut observer également un matelas positionné à l'entrée du four, avant sa consolidation (*Figure 65*).

Tableau 26 : Référencement des nappes formées

<i>Référence fibres de bois</i>	<i>Référence fibres synthétiques</i>	<i>Référence nappe</i>
Steico	S	SteicoS
Finsa	S	FinsaS
PM1	S	PM1S
PM2	S	PM2S
PM3	S	PM3S
PM4	S	PM4S
PM5	S	PM5S
PM6	S	PM6S
PT2	S	PT2S
PT5	S	PT5S
EU5	S	EU5S
PR5	S	PR5S
PT5	S2	PT5S2
PT5	EC	PT5EC
PT5	PLA	PT5PLA



Figure 64 : a) mélange avec fibres de bois de type 1, b) mélange avec fibres de bois de type 5



Figure 65 : Vue d'entrée du four Strahm et dépôt d'un matelas à son entrée avant sa consolidation thermique

### **\_ Quelques observations :**

Lors de l'étape d'ouvrison de la matière première, les fibres doivent être plus étalées sur le tapis alimentaire, pour des populations de fibres issues de résineux que pour les fibres issues de feuillus, à modalité identique de taille (type 5). Egalement, lors des Passages 1 et 2 pour le mélange, les modalités

d'alimentation du tapis alimentaire doivent être adaptées en fonction de la granulométrie des fibres de bois. Ainsi, les mélanges contenant des populations de fibres de bois peu déstructurées (types 1 et 2) doivent occuper la totalité du tapis alimentaire (*Figure 47*) tandis qu'avec celles de type 5, ce dernier n'est rempli qu'à moitié lors du Passage 2.

A modalité identique de taille, le comportement des fibres de pin *taeda* (PT) est similaire à celui de celles provenant de pin maritime (PM), excepté lors du passage 1 pour le mélange entre fibres de bois et fibres bicomposant. En effet, on constate que, dans ce cas, la vitesse de la carde doit être réduite pour le pin *taeda* de 60 à 45%. Concernant les fibres de feuillus, le comportement des fibres de peuplier (PR5) est similaire à celui des fibres d'eucalyptus (EU5). La **Puissance d'aspiration** diminue avec le taux de déstructuration des populations de fibres de bois. La **Vitesse de la carde** utilisée est moins élevée avec les populations provenant de feuillus et avec les mélanges associés. **Les Facteurs d'étirement** sont d'autant plus importants que les fibres sont moins déstructurées (type 1 et 2) et in fine, sont minimisés pour des populations plus déstructurées.

**Mesures des pertes matières en masse et finesse** : Les pertes matières totales sont mesurées, par rapport aux masses initiales introduites, après l'étape d'ouvrison de la matière première seule, puis dans un deuxième temps, après l'ouvrison du mélange. Ces valeurs sont reportées ci-dessous (*Tableau 27*).

Tableau 27 : Pertes massiques relatives lors des étapes d'ouvrison

Référence Fibres de bois	Pertes après ouvrison de la matière première seule (%)	Pertes après ouvrison du mélange (%)	Pertes totales (%)
PM2	7	4	11
PT2	9	4	13
PM3	8	5	12
PM4	10	5	15
PT5	14	5	19
PR5	19	6	25
EU5	23	5	28
PM5	12	4	16

On peut noter que ces pertes matières varient entre 7 et 23 % lors de l'ouvrison de la matière première seule (fibres de bois) passage et de 4 à 6% lors de l'ouvrison du mélange. Ces pertes sont importantes et le maximum est atteint pour la granulométrie des fibres les plus fines (type 5), dépendant du diamètre des perforations du cylindre condenseur. Elles ne peuvent être évitées dès lors que le diamètre des perforations ne peut être adapté, sauf remplacement du cylindre condenseur. Ce résultat est en adéquation avec le classement préliminaire des fibres réalisé avec le Bauer Mc Nett (*Figure 33*), qui montre une proportion des diamètres de fibres de bois de dimensions inférieures à 500 µm plus importante pour les populations de fibres de type 5 et 6.

Ainsi, l'ouvrison augmente la proportion de fibres de tailles élevées en favorisant l'aspiration des fibres fines. Afin d'essayer de quantifier la modification de la fraction des fibres fines après aspiration dans l'ouvreuse, des mesures de la distribution granulométrique des fibres ont été réalisées dans le cadre du Post doctorat de Huyen Tran à partir de l'acquisition et du traitement d'images 3D (section 2.1.4) des fibres avant et après ouvrison. Des images 3D avant/après ont ainsi été réalisées pour les populations PM2, PM5 et PR5. Les résultats des distributions granulométriques et des moyennes des diamètres sont présentés ci-dessous (*Figure 66, Tableau 28*). Les diamètres moyens après ouvrison augmentent respectivement de 80%, 29% et 34% pour les fibres PM2, PM5 et PR5.

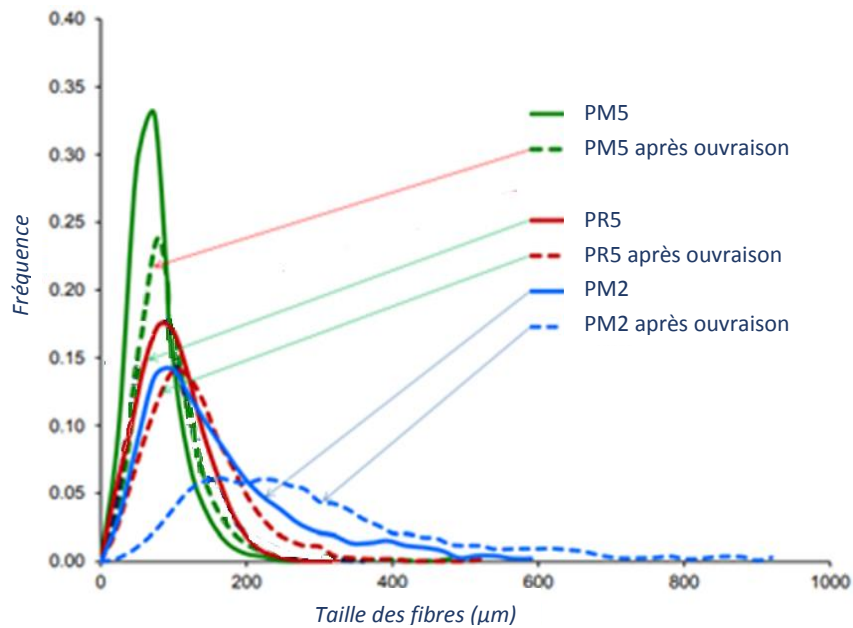


Figure 66 : Distributions des diamètres des fibres avant et après ouvrison : cas des fibres Pin maritime PM5, PM2 et Peuplier PR5

Tableau 28 : Granulométrie des populations PM2, PM5 et PR5 avant et après leur ouverture

Référence des Fibres de bois	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	Ecart-type ( $\mu\text{m}$ )
PM2 avant ouverture	162	108
PM2 après ouverture	291	171
PM5 avant ouverture	75	35
PM5 après ouverture	97	56
PR5 avant ouverture	98	46
PR5 après ouverture	131	51

### 3.2.2 Influence du facteur de compression et de la granulométrie des matières premières sur le temps de consolidation

On s'intéresse ici aux temps nécessaires pour atteindre, au cœur des matelas fibreux, la température de fusion des gaines des fibres thermoplastiques, soit 130°C. Ces temps, notés temps de consolidation, ont été relevés pour différentes constitutions de nappes (essences et granulométrie des



fibres), et ont été pondérés par l'écartement entre les tapis du four  $E_{\text{tapis}}$ , dépendant de la masse volumique attendue (Figure 67).

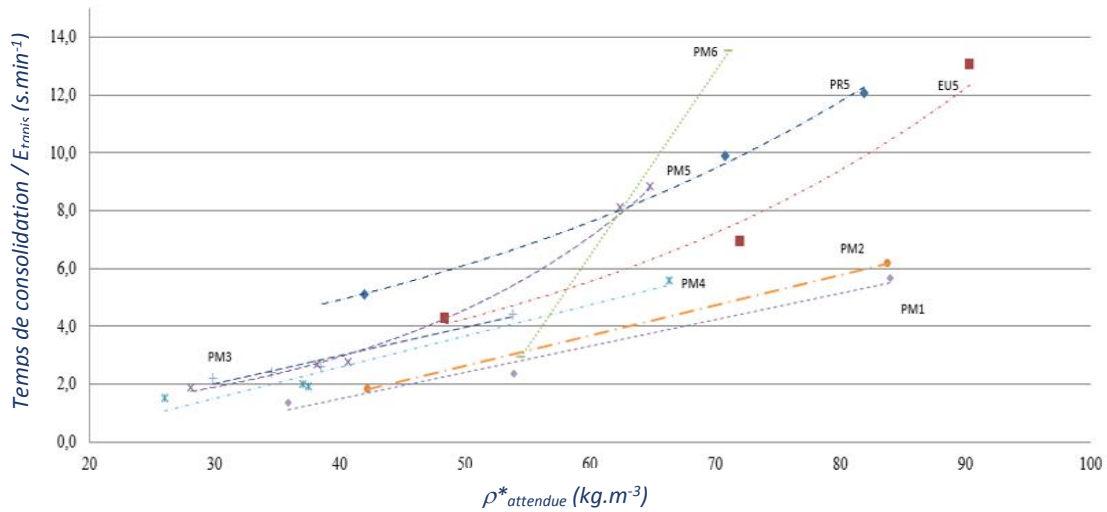


Figure 67 : Relation entre le temps de consolidation, ramené à l'épaisseur des matelas dans le four, et la masse volumique attendue de matériaux à base de fibres PM, PR et EU

On constate que, plus la finesse des fibres de bois constituant le matériau augmente, plus le temps nécessaire à la consolidation dans le four augmente. De même, plus le matelas est comprimé, donc dense, plus la montée en température est lente et donc plus le temps de séjour dans le four est long. A l'aide du thermocouple placé au cœur des matelas, on peut analyser plus finement l'évolution de la température au cours de la consolidation. Une courbe caractéristique de l'évolution de la température à cœur en fonction du temps est présentée ci-après (Figure 68).

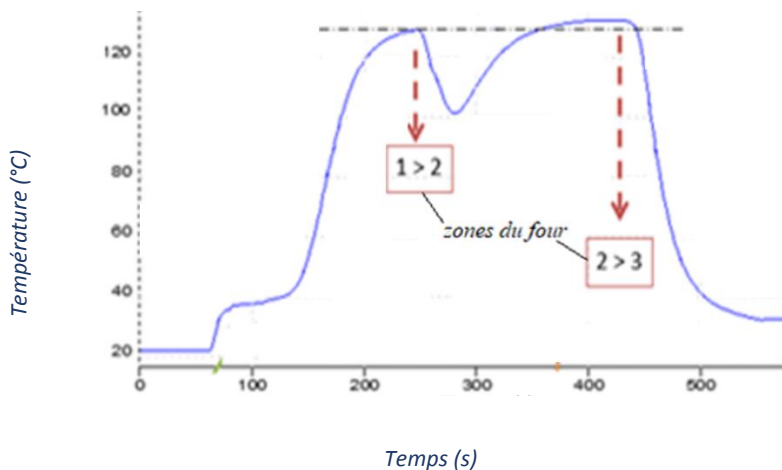


Figure 68 : Cycle caractéristique de consolidation thermique des MNTB dans le four

De manière générale, on relève dans la première minute une pré-stabilisation de la température à cœur entre 35 et 41°C. On peut constater également, pour les matelas composés de fibres relativement fines et suffisamment comprimés ( $CR \geq 50\%$ ), un échauffement dans le passage dans la zone 2 du four. La température indiquée par le thermocouple est dans ce cas supérieure à la température de consigne de l'air chaud dans le four dans cette zone (135 +/- 2°C).

### 3.2.3 Panneaux élaborés et résultats préliminaires : influence des matières premières et paramètres de fabrication sur la masse volumique apparente

A partir des nappes présentées précédemment, différents types de panneaux ont été élaborés, à l'aide des paramètres évoqués précédemment et par application de divers taux de compression, permettant d'obtenir des panneaux de masse volumique apparente et épaisseur différenciées. On présente ainsi dans le Tableau 29 les principaux panneaux réalisés, à partir de différentes essences, différentes granulométries et divers taux de compression, représentant une population de 48 spécimens. Les taux de compression réels sont ajustés par rapport aux taux visés de 20, 50 et 75 %, pour tenir compte du tassement surfacique (variations des longueurs et largeurs des MNTB, lors de la compression dans le four) durant chaque consolidation thermique. Ce taux de compression est ensuite modulé pour atteindre les masses volumiques respectives souhaitées. La masse volumique moyenne des nappes formées par l'ouvreuse nappeuse est de  $26 \text{ kg.m}^3 \pm 6,2 \text{ kg.m}^3$ . La gamme de masses volumiques apparentes des matériaux fabriqués, en fonction des taux de compression appliqués durant leur consolidation thermique, s'étend entre 25 et  $103 \text{ kg.m}^3$  pour des facteurs de compression lors de la consolidation allant respectivement de 10 à 85%. Ce résultat illustre la maîtrise du procédé, quelle que soit l'essence utilisée et la granulométrie des fibres employées. Dans l'industrie, la masse volumique de tels MNTB est en moyenne de  $50 \text{ kg.m}^3$ . Il a donc fallu travailler sur le réglage fin des paramètres de l'ouvreuse et du four pour arriver aux résultats recensés dans le Tableau 29.

Tableau 29 : Principaux panneaux élaborés, associés à la fibre bicomposant de référence S fournie par STEICO

Référence panneau	CR (%)	$\rho^*_{finale}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$E_{finale}$ (mm)
SteicoS10	10	34	98
FinsaS10	10	34	54
PM1S20	20	37	68
PM1S54	54	49	44
PM1S70	70	70	36
PM2S12	12	31	105
PM2S20	20	41	68
PM2S50	50	46	36
PM2S80	80	71	35
PM3S20	20	29	82
PM3S50	50	35	66
PM3S75	75	60	39
PM3S17	17	32	94
PM3S58	58	46	64
PM3S85	85	84,9	59

Référence panneau	CR (%)	$\rho^*_{finale}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$E_{finale}$ (mm)
SteicoS50	50	61	67
FinsaS50	50	54	43
PM4S20	20	25	70
PM4S50	50	34	60
PM4S70	70	51	39
PM4S38	38	34,7	67
PM4S50	60	45,5	45
PM4S84	84	87	51
PM5S20	20	27	82
PM5S50	50	36	53
PM5S70	70	51	38
PM5S18	18	36	87
PM5S51	51	52	55
PM5S76	76	80,2	53
PM6S50	50	47	58
PM6S70	70	56	38
PM6S15	15	31,5	78

Référence panneau	CR (%)	$\rho^*_{finale}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	$E_{finale}$ (mm)
SteicoS78	78	103	53
FinsaS70	70	66	40
PR5S8	8	38	65
PR5S21	21	40	58
PR5S43	43	54	58
PR5S50	50	59	42
PR5S69	69	64	32
PT5S22	22	33	70
PT5S50	50	47	54
PT5S70	70	58	35
PT2S16	16	38	70
PT2S50	50	50	50
PT2S80	80	69	33
EU5S20	20	47	57
EU5S50	50	60	42
EU5S70	70	69	33



On présente ci-dessous différents visuels des matériaux fabriqués, faisant apparaître les différences sur les essences et/ou encore la granulométrie des fibres de bois :

- Après découpe des extrémités des panneaux en sortie du four (*Figure 69*)
- Après découpe du panneau en échantillons de dimensions 10 x 10 cm<sup>2</sup>, pour caractérisation thermo-hydro-mécanique (*Figure 70, Figure 71, Figure 72*).

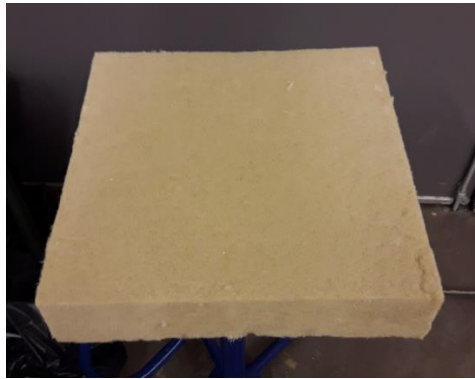


Figure 69 : Aperçu global d'un panneau, après découpe sur ses extrémités en sortie du four

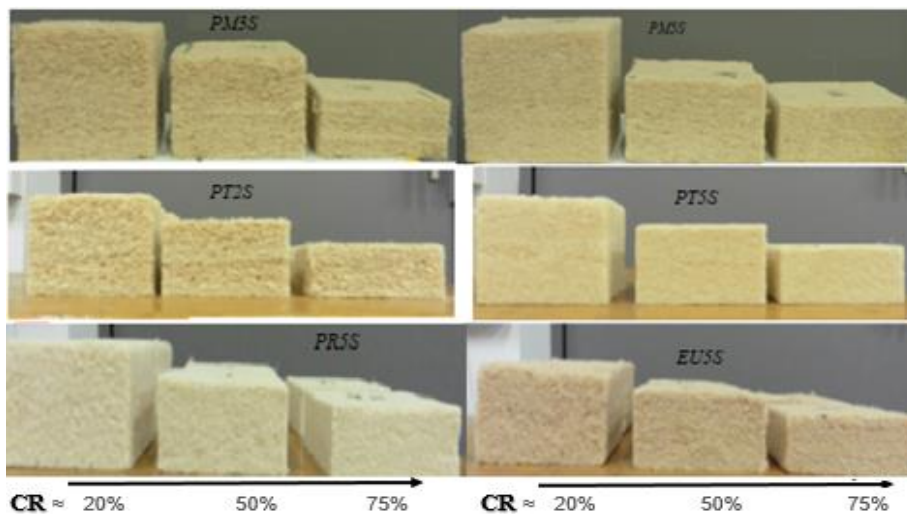


Figure 70 : Illustration d'un panel de spécimens de MNTB réalisés à partir de fibres thermoplastiques (réf S) et de fibres de pin maritime (en haut), pin taeda (au centre), peuplier et eucalyptus (en bas, de gauche à droite)



Figure 71 : Stockage d'un panel de spécimens référencés PM3S dans la salle régulée à 20°C/65%RH



Figure 72 : Vue des sections droites de MNTB réalisés à partir de fibres de pin maritime de granulométries différenciées : PM2S (à gauche) et PM5S (à droite)

Les MNTB ainsi conçus présentent des masses volumiques apparentes  $\rho^*_{finale}$  comprises entre 25 et 87 kg/m<sup>3</sup>, pour des taux de compression, appliqués lors de la consolidation thermique dans le four, variant respectivement de 20% à 85%. La Figure 73 ci-dessous illustre les variations de la masse volumique apparente des panneaux en fonction du taux de compression appliqué, pour chacune des essences impliquées.

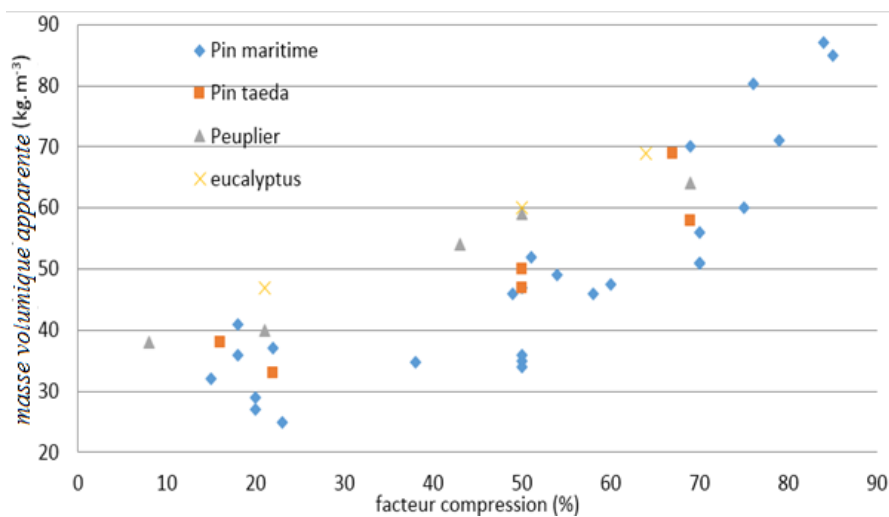


Figure 73 : Masse volumique apparente des matériaux fabriqués en fonction du taux de compression, pour chaque essence

Il est intéressant de regarder l'influence respective des épaisseurs  $E_{matelas}$  et masses volumiques apparentes  $\rho^*_{matelas}$  des matelas, à l'entrée du four, avant consolidation, vis-à-vis de celles des panneaux  $E_{panneau}$  et  $\rho^*_{panneau}$ , en sortie du four, après consolidation, pour différents taux de compression. Pour cela, nous avons calculé pour chaque échantillon le rapport  $\rho^*_{panneau} \times E_{matelas} / \rho^*_{matelas} \times E_{panneau}$  et avons regardé son évolution en fonction du taux de compression (Figure 74).

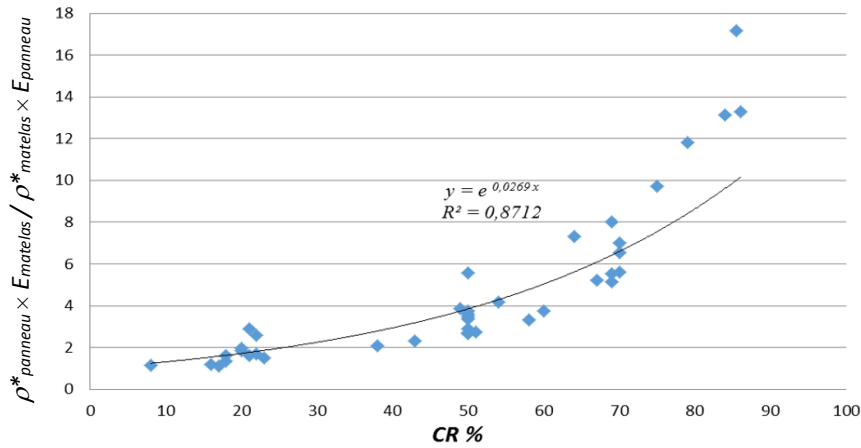


Figure 74 : Évolution du rapport  $\rho^*_{panneau} \times E_{matelas} / \rho^*_{matelas} \times E_{panneau}$  en fonction du taux de compression appliqué sur les matelas lors de leur consolidation thermique

Lors de la consolidation thermique des mats de fibres, on constate également, comme nous l'avions prévu, une différence entre masse volumique attendue (mesurée à partir de l'écartement entre les tapis du four Strahm) et masse volumique obtenue. Comme évoqué en section 3.1.1, cette variation est caractérisée et notée taux de reprise en épaisseur  $\Delta$  (%). Les taux de reprise en épaisseur constatés en sortie four, dépendant des matières premières constitutives des MNTB fabriqués, sont illustrés ci-dessous (Figure 75). Ainsi, plus le facteur de compression des matelas dans le four (CR %) augmente, plus le taux de reprise en épaisseur en sortie four est important. Il est de l'ordre de 5% pour des taux de compression d'environ 20% et est compris entre 25 à 40% pour des taux de compression supérieurs à 70%. On peut également noter un effet de la finesse des fibres sur  $\Delta$ . Plus les fibres de bois utilisées sont fines, plus les  $\Delta$  sont importants. Cet effet est d'autant plus marqué quand le taux de compression appliqué est élevé puisque pour un CR de 70%,  $\Delta$  est de l'ordre de 20% pour des fibres de modalités 1 et 2 tandis qu'il tend vers 30% pour les fibres plus fines. Cela illustre les limites du procédé pour des taux massiques de fibres synthétiques, introduits initialement, proches de 5%. Les liaisons formées ne semblent pas assez fortes pour contenir les efforts générés par la compression imposée lors de la cuisson.

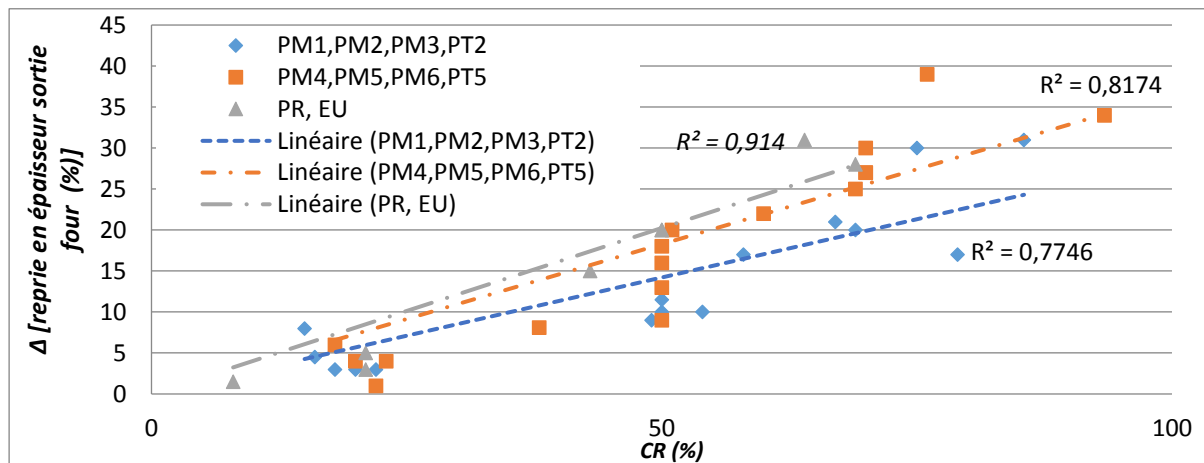


Figure 75 : Relation entre taux de reprise en épaisseur et taux de compression durant la consolidation thermique des matériaux comportant les fibres de bois fabriquées par le FCBA associées à la fibre thermoplastique intitulée S

Une relation entre l'épaisseur finale des matériaux et l'épaisseur initiale (épaisseur du mat), pondérée par le facteur de compression CR pour l'ensemble des MNTB fabriqués avec les fibres produites par le FCBA, est illustrée ci-dessous (Figure 76). L'équation de la régression présente dans le graphique inclut donc les taux de reprise en épaisseur,  $\Delta$  (%), constatés et illustrés ci-dessus (Figure 75).

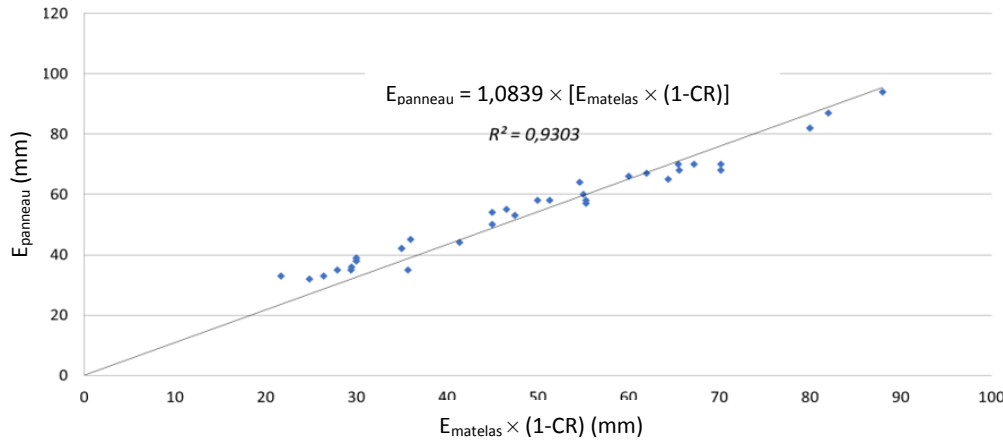


Figure 76 : Relation entre l'épaisseur obtenue des MNTB en fonction de celle initiale avant leur passage au four pondérée par le taux de compression appliqué

Pour compléter et afin d'essayer de comprendre le rôle potentiel de différents paramètres, nous présentons ci-après les influences respectives de la finesse des fibres de bois, du taux de compression, de la masse volumique apparente des MNTB ainsi que du temps nécessaire à leur consolidation thermique. Ces relations ont été mises en évidence à partir des résultats obtenus sur les 5 granulométries de pin maritime croissantes (PM1 à PM5) associées à la fibre synthétique (S) (Figure 77 & Figure 78).

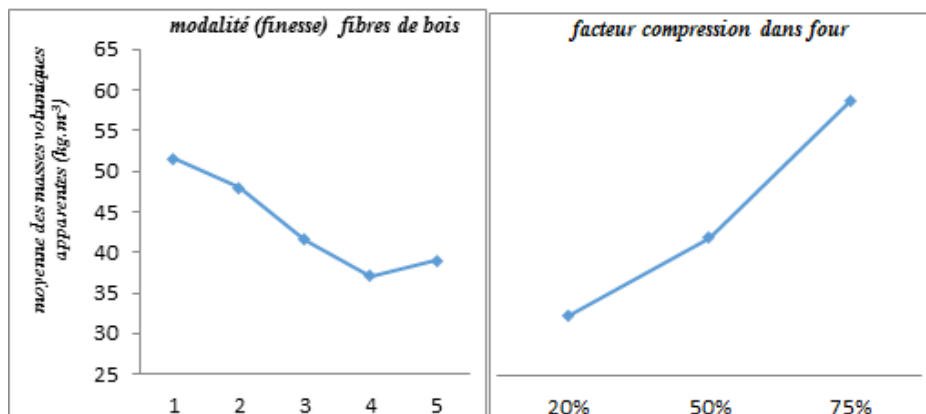


Figure 77 : Graphique des effets principaux résultant de la finesse des fibres de pin maritime constituant le matelas et du taux de compression durant leur consolidation thermique en fonction des masses volumiques apparentes obtenues

On notera que les moyennes des masses volumiques apparentes des matériaux obtenus tendent à décroître avec l'augmentation de la finesse des fibres et qu'elles augmentent avec le taux de compression.

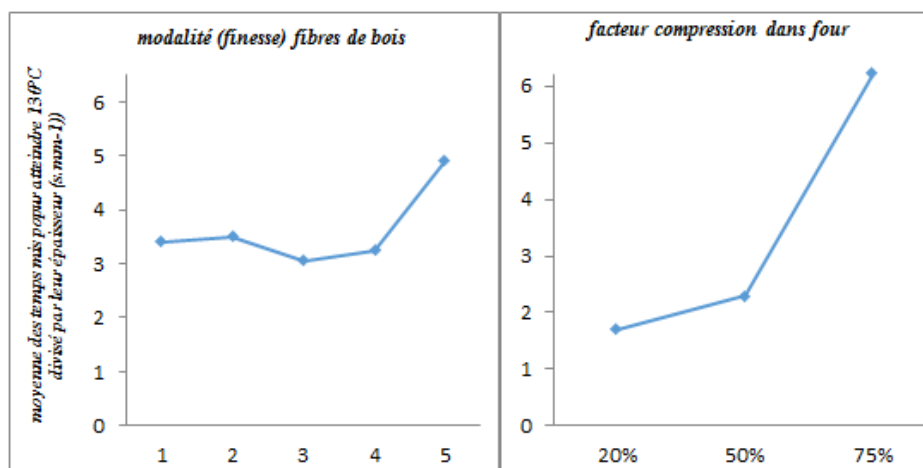


Figure 78 : Graphique des effets principaux résultant de la finesse des fibres de pin maritime constituant le matelas et du taux de compression durant leur consolidation thermique en fonction des temps nécessaires pour que la température au sein de ces matériaux atteigne la température demandée

Le temps nécessaire pour atteindre la température de consigne, fixée à 130°C (Figure 44), est assez stable en fonction de la finesse sauf pour les fibres très fines de type 5 et il augmente en fonction du taux de compression.

### 3.2.4 Contrôle de l'homogénéité de la masse volumique des MNTB par mesure de profils de densité

#### 3.2.4.1 Contrôle de l'homogénéité dans l'épaisseur des différents MNTB fabriqués

La technique de fabrication, utilisée pour obtenir les matériaux, passe par l'empilement de plusieurs nappes de fibres pour constituer un matelas. L'un des points faibles de cette méthode est le risque d'obtention de matériaux non homogènes avec des masses volumiques stratifiées dans l'épaisseur. Toutefois, la compression à l'entrée du four, durant la consolidation thermique, doit permettre de fabriquer des matériaux relativement homogènes. Pour contrôler ce paramètre, on s'est intéressé à l'homogénéité de la masse volumique apparente d'un sous échantillon de 16 matériaux parmi la population totale. Ils ont été mesurés à l'aide de l'analyseur de densité Grecon DAX 5000, disponible au FCBA à Grenoble. Le Tableau 30 ci-dessous donne, pour l'ensemble des échantillons mesurés, leur masse volumique apparente, puis la masse volumique calculée à partir du profil de densité RX. On précise également les valeurs du rapport entre les masses volumiques minimale et maximale mesurées lors du profil de densité (méthode Grecon). Ce rapport traduit l'homogénéité du matériau. Les valeurs mesurées pour le matériau industriel Steicoflex sont également présentées.

Tableau 30 : Paramètres de masse volumique pour l'ensemble des échantillons mesurés avec dispositif Grecon

Référence	Essence	Granulométrie fibres bois	Taux de fibres synthétiques (%)	$\rho^*$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho^*$ RX (kg/m <sup>3</sup> )	Rapport $\rho$ RX min/max (%)
Steicoflex (témoin industriel)	Pin Maritime	2	5	42	40	83
EU5S50	Eucalyptus	5	6,5	60	58	91
PM1S20	Pin maritime	1	6,5	37	32	68
PM1S54	Pin maritime	1	6,5	49	50	88
PM3S20	Pin maritime	3	6,5	29	32	81
PM3S58	Pin maritime	3	6,5	47	46	85
PM3S85	Pin maritime	3	6,5	85	84	91
PM4S50	Pin maritime	4	6,5	34	33	90
PM4S70	Pin maritime	4	6,5	48	48	90
PM5S50	Pin maritime	5	6,5	36	31	86
PM5S70	Pin maritime	5	6,5	52	49	92
PM5S76	Pin maritime	5	6,5	87	80	88
PM6S15	Pin maritime	6	6,5	31,5	30	92
PR5S8	Peuplier	5	6,5	37	36	91
PR5S43	Peuplier	5	6,5	54	53	90
PT2S16	Pin taeda	2	6,5	33	33	80
PT2S50	Pin taeda	2	6,5	47	46	86

On note que la masse volumique moyenne mesurée dans l'épaisseur avec le dispositif Grecon est cohérente avec la mesure de la masse volumique apparente mesurée au laboratoire (par pesée et mesure des dimensions). La Figure 79 ci-dessous illustre la très bonne corrélation obtenue entre les deux mesures.

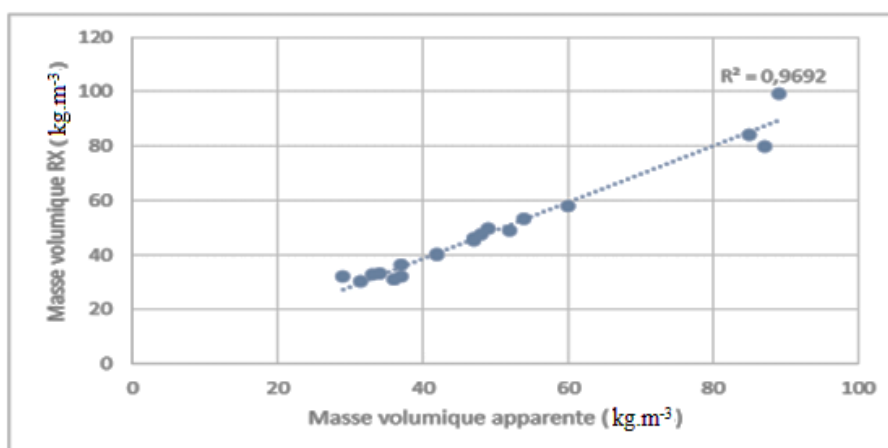


Figure 79 : Masse volumique moyenne mesurée avec le dispositif Grecon, en fonction de la masse volumique apparente des matériaux

Les profils de densité pour les 16 matériaux analysés sont illustrés ci-dessous (Figure 80). On constate que les échantillons fabriqués ne présentent pas de stratification notable (pas de « saut » dans le profil). C'était un des risques les plus importants liés à la technique de fabrication employée (création

des mats par empilement de nappes). Toutefois, même si les matériaux fabriqués sont peu stratifiés, on note néanmoins une meilleure homogénéité pour les matériaux constitués de fibres de faibles dimensions. Cela est illustré par les Figure 81 et Figure 82, en s'attardant uniquement sur des matériaux du type PM1S et PM5, qui présentent des granulométries de fibres de bois différenciées (longues pour PM1S et fines pour PM5S).

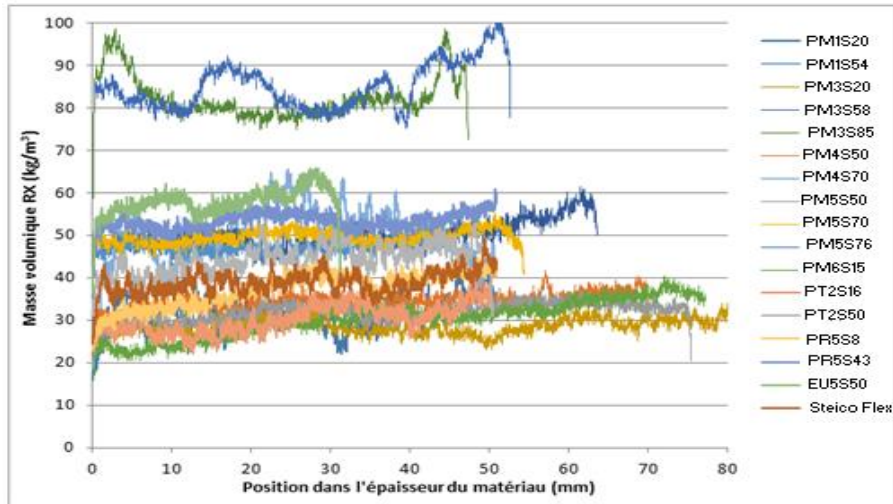


Figure 80 : Variation de la masse volumique ( $\text{kg/m}^3$ ) dans l'épaisseur des MNTB analysés

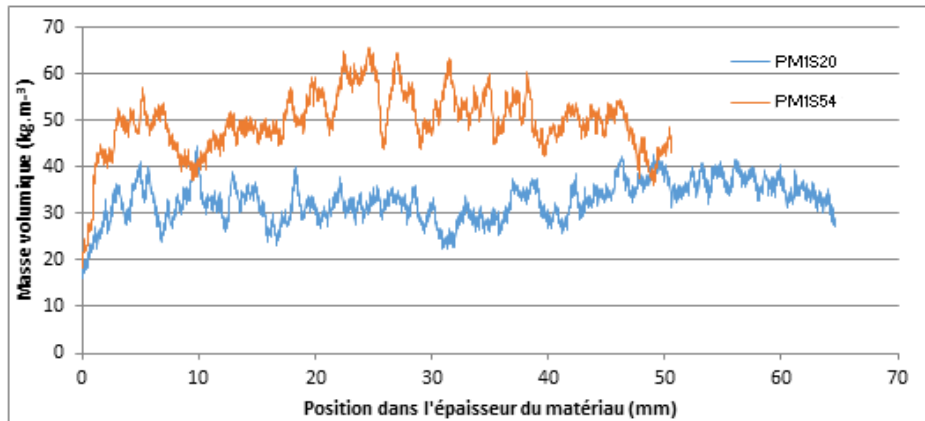


Figure 81 : Profil de masse volumique pour les matériaux référencés PM1S20 et PM1S54

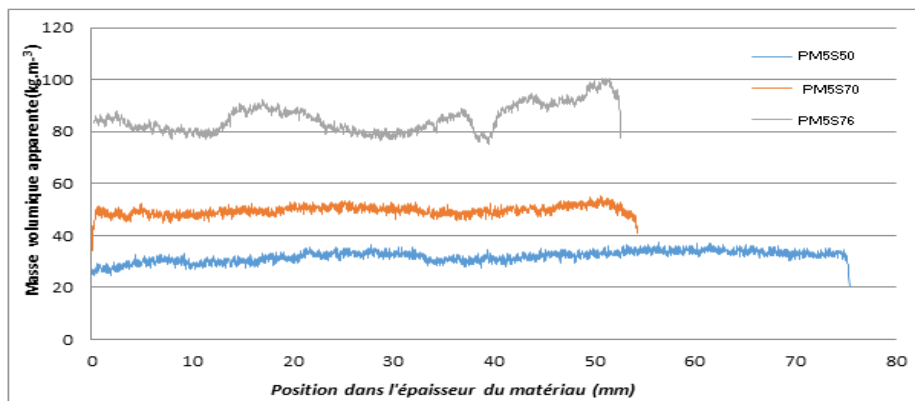


Figure 82 : Profil de masse volumique pour les matériaux référencés PM5S50, PM5S70 & PM5S76



### 3.2.4.2 Contrôle de l'homogénéité au sein d'un même panneau

L'homogénéité surfacique des masses volumiques a été contrôlée pour les différents MNTB conçus en évaluant, pour l'ensemble des échantillons découpés dans un même panneau, les masses volumiques de chacun d'entre eux dès lors que l'équilibre massique à 20°C/65%HR est atteint. La Figure 83 présente la moyenne pour chaque panneau et son écart type. Il semble apparaître une moins bonne homogénéité lorsqu'on tend vers de fortes masses volumiques. Ainsi, il apparaît que le procédé est tout simplement adéquat pour fabriquer des matériaux très poreux (>95% en les comparant à la densité de la paroi cellulaire du bois égale à 1,53) et avec des éléments plus fins (modalité 1) que ceux utilisés actuellement pour la fabrication de matériaux semi-rigides (type MDF, correspondant à la modalité 2 en termes de granulométrie).

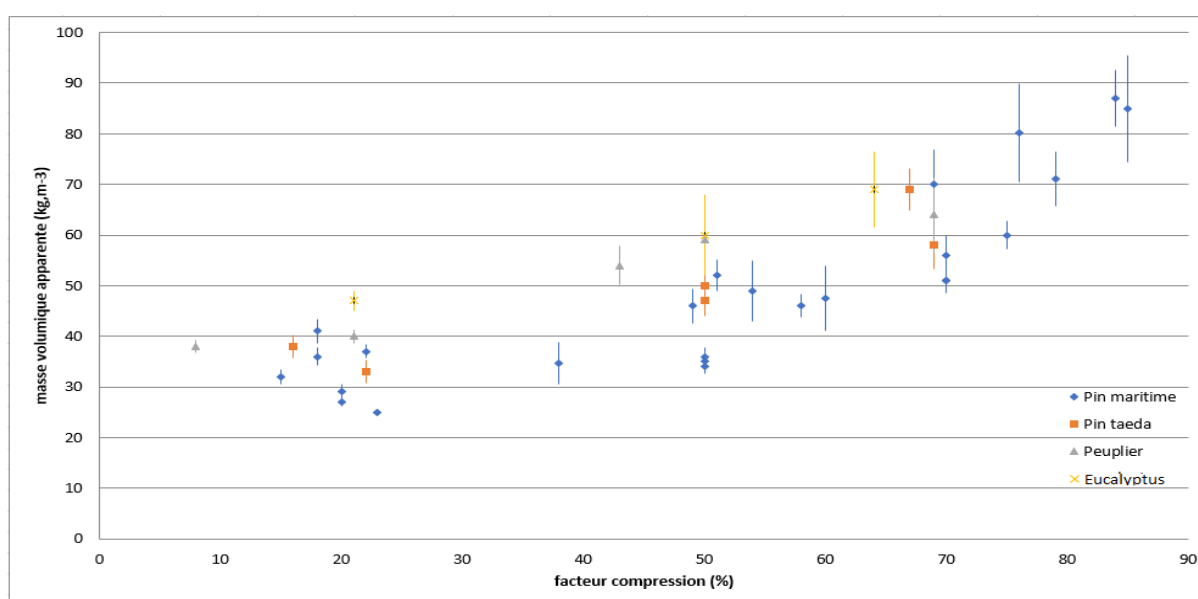


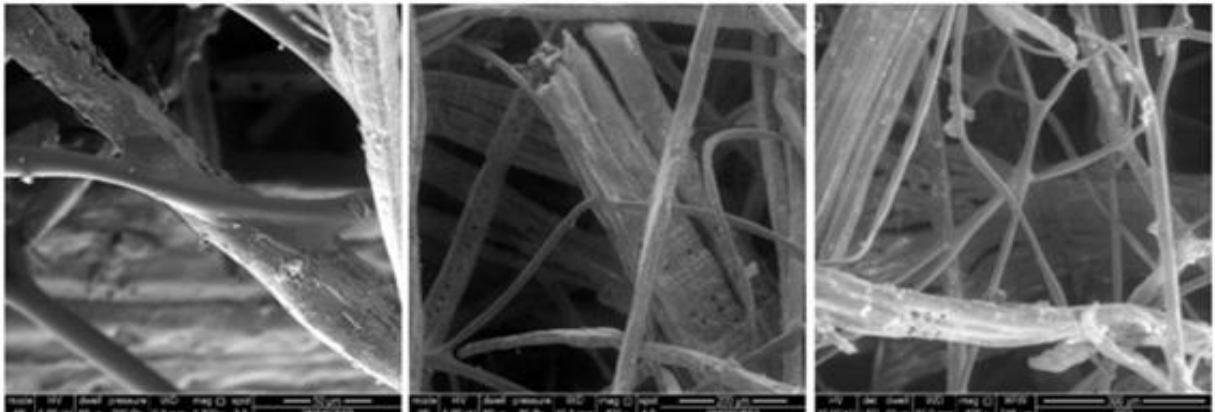
Figure 83 : Homogénéité de la masse volumique des matériaux fabriqués en fonction du facteur de compression CR(%) appliqué durant la consolidation (barre verticale représentant l'intervalle de confiance moyen)

### 3.3 Observations de la morphologie et topologie des MNTB par imagerie MEB

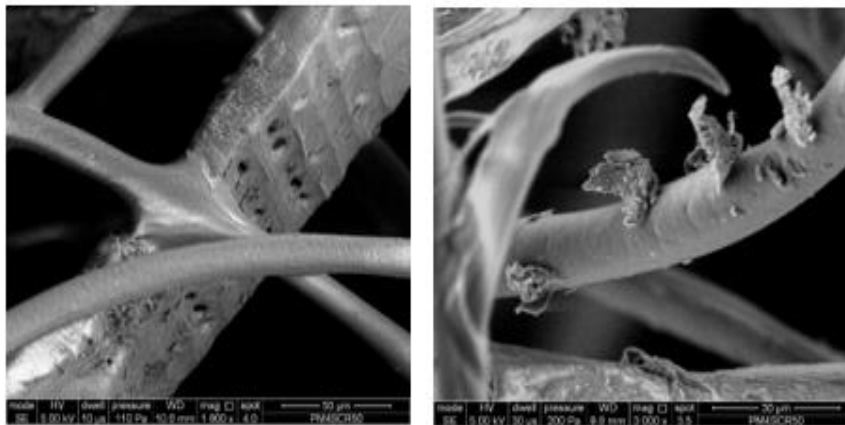
Les images présentées ci-dessous, obtenues à l'aide du Microscope Électronique à Balayage Environnemental disponible à l'École Supérieure du Bois, Nantes, permettent de réaliser des observations importantes sur la morphologie et la topologie des réseaux créés lors de la fabrication (Figure 84, Figure 85, Figure 86). Après consolidation, les fibres de bois se présentent sous la forme de fibres individuelles et de bâchettes, aux surfaces latérales rugueuses voire déchiquetées. Les fibres thermoplastiques ont quant à elles une section droite quasi-circulaire. On observe également la fusion de la gaine des fibres bicomposant qui crée des contacts rigides non seulement entre les fibres textiles (Figure 84c) mais aussi avec les fibres de bois (Figure 84 a et b). On peut remarquer que les contacts



fibres bois - fibres thermoplastiques peuvent être plus ou moins consolidés avec quelquefois un enrobage partiel des fibres de bois par la gaine du bicomposant (*Figure 85*).

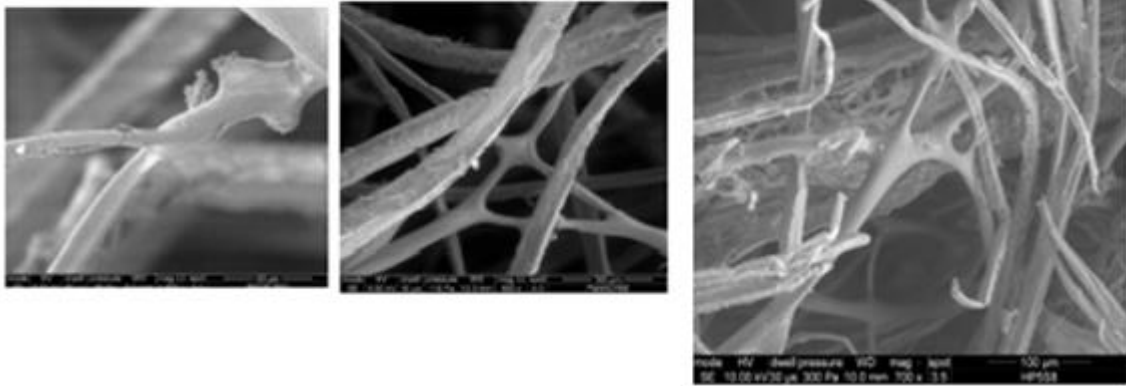


*Figure 84 : Visuels des contacts entre fibres a) contact bois PM5 / thermoplastique, b) contact bois PM3 / thermoplastique, c) contact rigide et frottant thermoplastique / thermoplastique*



*Figure 85 : Zoom sur les contacts fibres de bois – fibres thermoplastiques*

L'interconnexion entre éléments fibreux est visible où la fibre synthétique au premier plan a un diamètre uniforme alors que la fibre synthétique en arrière-plan a formé une liaison avec une fibre de bois par un écoulement polymérique de sa couche externe (*Figure 84c*). Un autre exemple d'écoulement de matière synthétique, mais cette fois entre fibres synthétiques, peut également être mis en évidence (*Figure 86b*). La température aux interfaces a ainsi un rôle important dans la qualité du liage thermique pour fibres synthétiques (Andreassen & al, 1995), (Kim. & al, 2001), (Kim & al, 2002), (Bhat & al, 2004), (Wang & al, 2002), (Michielsen & al, 2006). Cette viscosité des thermoplastiques, fonction des températures, est à même de diffuser dans les parois cellulaires des fibres de bois (Frihart, 2005). Néanmoins, cet écoulement s'oppose aux forces de frottements/enchevêtrement inter-chaines induites en conséquence par la forte viscosité. Les éléments physiques sous-jacents se déclinent en 3 étapes : fusion (partiellement) des régions cristallines puis diffusion des segments macromoléculaires libérés le long de cette interface et enfin resolidification des zones fondues.



a)

b)

c)

Figure 86 : a) fibre synthétique dont une partie de sa gaine ne recouvre plus l'âme

b) adhésion entre 2 fibres thermoplastiques

c) fibres thermoplastiques avec aspects d'écoulement de leurs gaines montrant liaisons inter-fibres ainsi que potentiel d'adhérence de ces gaines.

## 4 Caractérisation des propriétés thermiques et thermohydrauliques

### 4.1 Caractérisation thermique des MNTB à 20°C/65%RH

#### 4.1.1 Mesures de la teneur en eau des échantillons placés en conditions d'ambiance 20°C/65%RH

En fonction de la température et de l'humidité de l'air ambiant, le bois se stabilise à une humidité d'équilibre, dite équilibre hygroscopique, qui est pratiquement indépendante de l'essence du bois. Ainsi, des échantillons de bois, placés dans une ambiance à 20°C avec une humidité de l'air de 65%, se stabilisent à une humidité massique de 12% (Stamm, 1964). Dans notre cas, les matériaux fabriqués sont initialement composés en masse d'environ 94% de fibres de bois et d'environ 6% de fibres synthétiques. Les teneurs massiques d'humidité de neuf des matériaux testés, dont cinq sont composés de fibres de pin maritime, deux de pin *taeda*, un de peuplier et un d'eucalyptus, à 20°C et 65% d'humidité relative sont quantifiés ci-dessous (Figure 87). Ainsi, quelle que soit l'essence, ces échantillons se stabilisent à des valeurs d'humidité massique comprises entre 10 et 11%. Cela est donc conforme avec la constitution des matériaux.

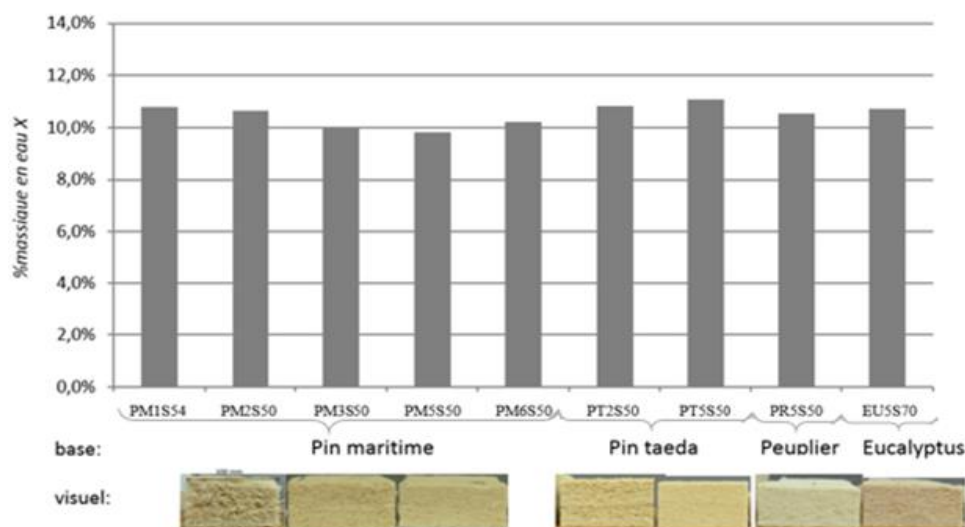


Figure 87 : Teneur massique en eau en % de différents panneaux à 65%/20°C

#### 4.1.2 Mesures de la Capacité thermique $C_p$

Comme évoqué en section 2.3.3, les spécimens sont comprimés pour les amener à une épaisseur de l'ordre des 10 mm ( $E_{comp}$ ) nécessaire pour évaluer leur capacité thermique volumique par la méthode du plan chaud. Les mesures sont répétées trois fois par référence sur des spécimens, préalablement stabilisés à 20°C/65%RH. Une pesée de l'échantillon, réalisée entre chacune des 3 répétitions, est suivie d'un délai d'attente d'environ 2 heures après mise en place du dispositif.

Le Tableau 31 suivant résume les capacités thermiques mesurées sur des MNTB et leurs écarts-types respectifs ainsi que les caractéristiques physiques relevées lors de la mesure : masses volumiques et taux de compression des spécimens,  $(E_{\text{matériau}} - E_{\text{comp}}) / E_{\text{matériau}}$ .

Tableau 31 : Facteurs de compression appliqués pour mise en épaisseur de 10mm environ et Capacités thermiques mesurées en fonction de la masse volumique apparente  $\rho^*_{\text{comp}}$

Référence panneau	Référence de l'échantillon au sein du panneau	Épaisseur du matériau comprimé pour mesure $C_p$ $E_{\text{comp}}$ (mm)	$(E_{\text{matériau}} - E_{\text{comp}}) / E_{\text{matériau}}$	$\rho^*_{\text{comp}}$ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$C_p$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	Ecart type $C_p$ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )
Steicoflex (témoin industriel)		10,5	86%	298	1740	27
SteicoS10	_2	11	78%	246	1780	24
PM1S54	_9	10		239	1801	17
PM2S50	_8	10,2	71%	165	1856	94
PM3S50	_2	10,3	84%	248	1770	19
PM4S50	_4	10	83%	159	1820	24
PM5S50	_6	10	81%	195	1800	15
PM6S50	_3	10,2	82%	179	1820	11
PM2S80	_3	10,2	73%	232	1805	23
PM3S80	_1	11,5	71%	203	1750	10
PM4S84	_5	10,5	73%	191	1837	22
PM5S70	_2	10,2	74%	187	1793	12
PM6S70	_6	11,5	69%	180	1833	17
PT2S80	_1	12,5	64%	161	1846	13
PT5S70	_3	12,5	68%	161	1904	23
PR5S69	_3	10,5	67%	166	1733	9
EU5S70	_4	11	68%	224	1837	21

Les masses volumiques apparentes des spécimens, pendant les mesures, se situent entre 160 et 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  pour des taux de compression allant de 64 à 86%. Les variations des capacités thermiques et leur écart-type, fonction du type de fibres de bois constituant le réseau fibreux et de la masse volumique apparente à l'état comprimé  $\rho^*_{\text{comp}}$  pendant la mesure, sont représentées ci-dessous (Figure 88).

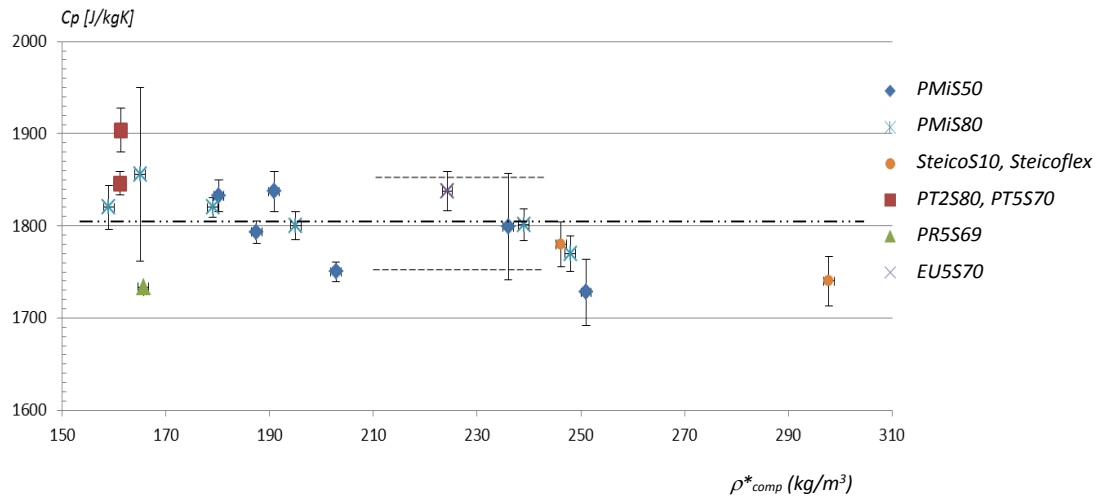


Figure 88 : Évolution des capacités thermiques en fonction du type de bois associé aux bicomposants fournis par STEICO constituant le réseau fibreux et de sa masse volumique lors de la mesure

Il est constaté ici la relative faible variabilité des mesures de  $C_p$ , d'environ 2,6% soit environ 46 J/(kg. K). Les différences, d'un matériau à l'autre, peuvent être imputées aux variations des proportions en fibres bicomposant, dépendant des pertes en fibres bois durant les étapes d'ouvraison, mais aussi aux précisions des mesures et à la variabilité intrinsèque au sein des populations de fibres de bois. Nous avons défini, pour la suite de ce travail, une capacité thermique moyenne de 1800 J/(kg. K) pour l'ensemble des spécimens fabriqués dans le projet.

#### 4.1.3 Relations entre la conductivité thermique apparente et la masse volumique apparente

##### 4.1.3.1 Mesures comparatives entre MNTB fabriqués en laboratoire et MNTB industriels disponibles sur le marché français

Le dispositif Desprotherm utilisé permet de mesurer l'effusivité thermique, puis d'estimer indirectement par la suite la conductivité thermique. Cette propriété, caractérisant l'aptitude d'un matériau à échanger de l'énergie thermique avec son environnement, est essentielle dans la quantification de l'inertie thermique. Pour rappel, l'effusivité thermique est donnée par :

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot C_p} \quad (38)$$

Avec

$\rho$ , la masse volumique [ $\text{kg.m}^3$ ]

$C_p$  la capacité thermique [ $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

$\lambda$ , la conductivité thermique [ $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ ]

A partir des mesures d'effusivité  $b$  et de la valeur de la capacité thermique  $C_p$ , prise égale à 1800 J/(kg.K), il découle une estimation de la conductivité thermique apparente  $\lambda^*$ . Les dispositifs de mesures ont été présentés en Figure 51. La Figure 89 représente l'évolution des conductivités thermiques apparentes en fonction de la masse volumique apparente, pour les matériaux suivants :

- MNTB réalisés à partir de matelas PM1S à PM6S (fibres de pin maritime de différentes granulométries et fibres thermoplastiques (S)),
- MNTB disponibles sur le marché français (industrie) : Steicoflex et Sylvactis
- MNTB réalisés à partir de matelas SteicoS (fibres de bois Steico et fibres thermoplastiques (S))

Dans un premier temps (*Figure 89a*), on compare les performances des matériaux issus des matelas PM1S à PM6S. Dans un deuxième temps (*Figure 89b*), on compare les performances du matériau PM5S, qui présente les plus faibles conductivités thermiques, à celles des matériaux industriels et matériaux réalisés à bases de fibres industrielles SteicoS.

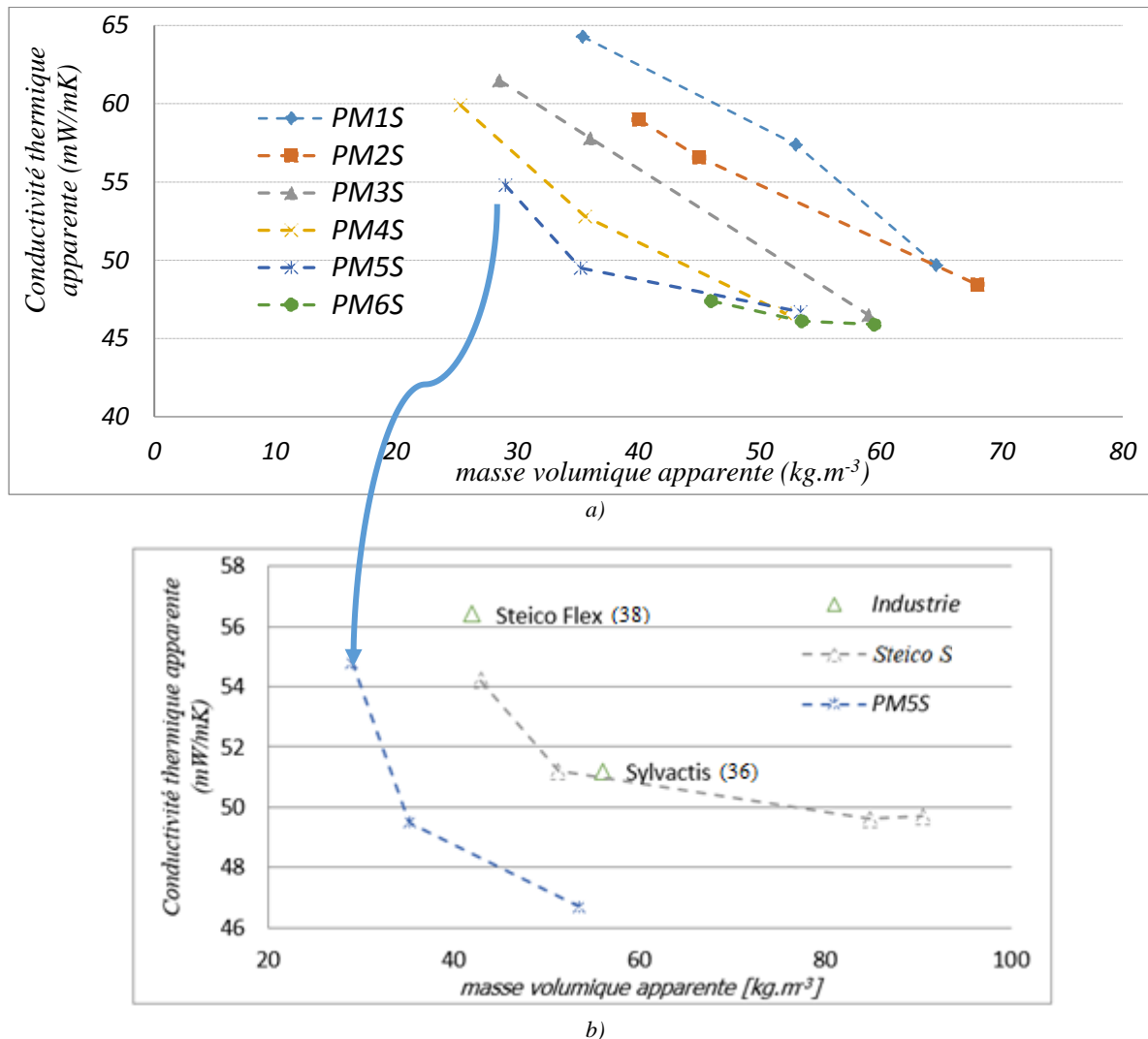


Figure 89 : Évolution des conductivités thermiques apparentes en fonction des masses volumiques apparentes de matériaux analysés : a) matériaux issus de matelas PM1S à PM6S), b) comparaison avec les matériaux industriels Steicoflex et Sylvactis et avec les matériaux issus de matelas SteicoS

Concernant les matériaux contenant les fibres de pin maritime produites par le FCBA (PM1 à PM6), les conductivités thermiques sont comprises entre 46 et 64  $mW.m^{-1}.K^{-1}$  pour des masses

volumiques apparentes allant de 25 à 69 kg/m<sup>3</sup>. On remarque que les MNTB fabriqués à partir des matelas SteicoS, contenant des fibres de bois produites par Steico, ont une moins bonne conductivité thermique, mesurée à 20°C/65%HR, avec une gamme de masse volumique apparente obtenue allant de 42 à 92 kg.m<sup>-3</sup>. On constate également qu'il en va de même pour les deux matériaux industriels disponibles, Steicoflex et Sylvactis, qui par ailleurs affichent des conductivités thermiques respectivement de 38 et 36 mW/m.K, inférieures à celles obtenues dans ce travail, mais mesurées dans des conditions de test différentes.

Il est intéressant également de noter que les conductivités thermiques obtenues sur 4 des matériaux composés de fibres de pin maritime, de granulométrie différente mais de masses volumiques équivalentes sensiblement égales (35 et 36 kg/m<sup>3</sup>), varient entre 64 et 50 mW. m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup> (Figure 90).

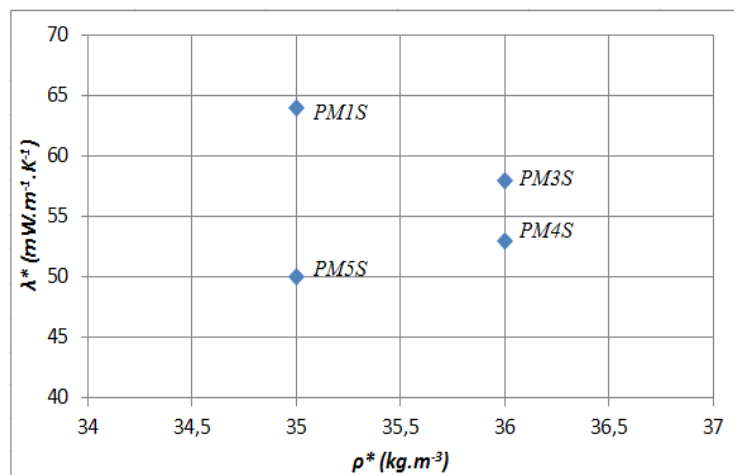


Figure 90 : Conductivités thermiques apparentes mesurées pour des matériaux composés de fibres de pin maritime, de granulométrie variable mais de masse volumique proche

De plus, avec ces réglages machines et les caractéristiques des matières premières utilisées, les conductivités thermiques apparentes correspondant aux masses volumiques apparentes des panneaux fabriqués semblent être en deçà d'une conductivité thermique apparente minimale correspondant à une masse volumique apparente optimale. Pour conforter cette hypothèse et observer le comportement des matériaux au-delà des masses volumiques précédemment testées, une campagne de mesure d'effusivité à des masses volumiques plus importantes a été réalisée. Les échantillons les moins denses, qui sont par ailleurs les plus épais, ont ainsi été progressivement comprimés pour atteindre des masses volumiques de l'ordre de 80 à 150 kg/m<sup>3</sup>. Les résultats sont présentés en Figure 91 pour les mélanges PM1S et PM5S.



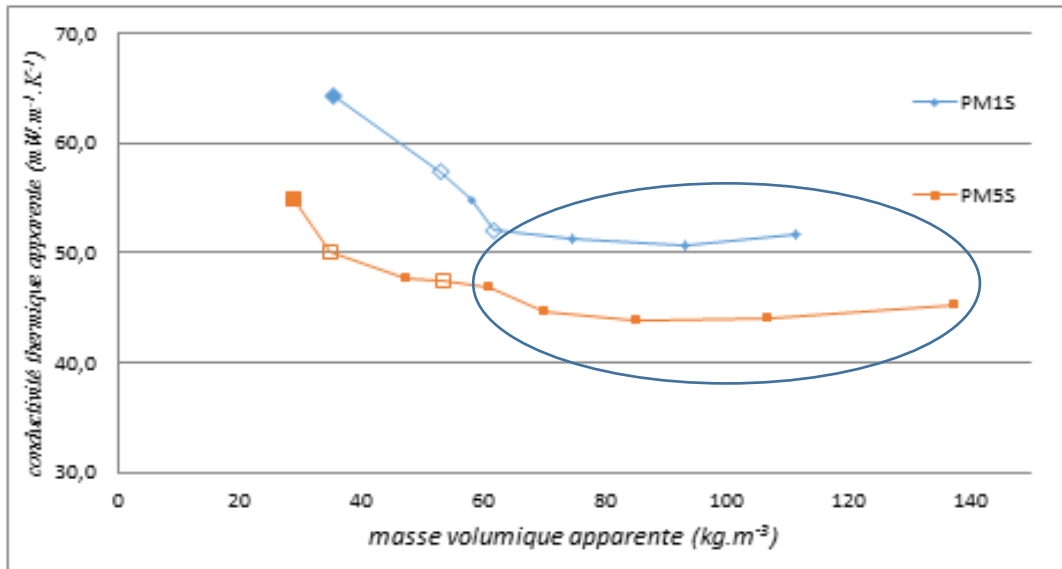


Figure 91 : Évolution des conductivités thermiques apparentes en fonction des masses volumiques apparentes de MNTB, pour des valeurs supérieures à 80 kg.m<sup>-3</sup>.

A partir des courbes des conductivités thermiques apparentes obtenues, il est possible d'estimer une masse volumique apparente optimale se situant respectivement vers 80 et 95 kg/m<sup>3</sup> pour les mélanges PM5S et PM1S, correspondant à un minimum atteint par la conductivité thermique. Conformément à l'allure de ces courbes expérimentales et de celle illustrant la relation  $\lambda^* = f(\rho)$  visible en Figure 19, l'augmentation des conductivités thermiques apparentes vers les faibles masses volumiques apparentes se justifie par une contribution de plus en plus importante du rayonnement et donc par le manque de matières nécessaire à la diffusion/absorption. Dans ce cas, le degré de division de la matrice solide, représenté par la finesse des fibres de pin maritime (croissante de PM1 à PM6), permet de diminuer la composante radiative aux mêmes températures, teneur en eau et masse volumique apparente. Autrement dit, en augmentant les interactions entre le réseau fibreux et le rayonnement, le degré de déstructuration du bois permet de limiter la propagation du rayonnement dès lors qu'il n'est plus négligeable en deçà de la masse volumique optimale. On remarque que cette influence est d'autant plus importante quand les masses volumiques deviennent de plus en plus faibles.

#### 4.1.3.2 Mesures comparatives des conductivités thermiques de MNTB composés de fibres d'essences différentes : Pin Maritime, Pin taeda, Peuplier et Eucalyptus

Compte tenu des matériaux fabriqués pour ces 4 essences, la comparaison sera effectuée pour des tailles de fibres similaires, soit de type 2 et 5 uniquement. Les conductivités thermiques varient dans ce cas entre 46 et 62 mW.m<sup>-1</sup>. K<sup>-1</sup>, pour des masses volumiques apparentes comprises entre 32 et 71 kg.m<sup>-3</sup> (Figure 92). Leurs valeurs diminuent avec le taux de déstructuration de la matière (degré de finesse) à masse volumique apparente équivalente.

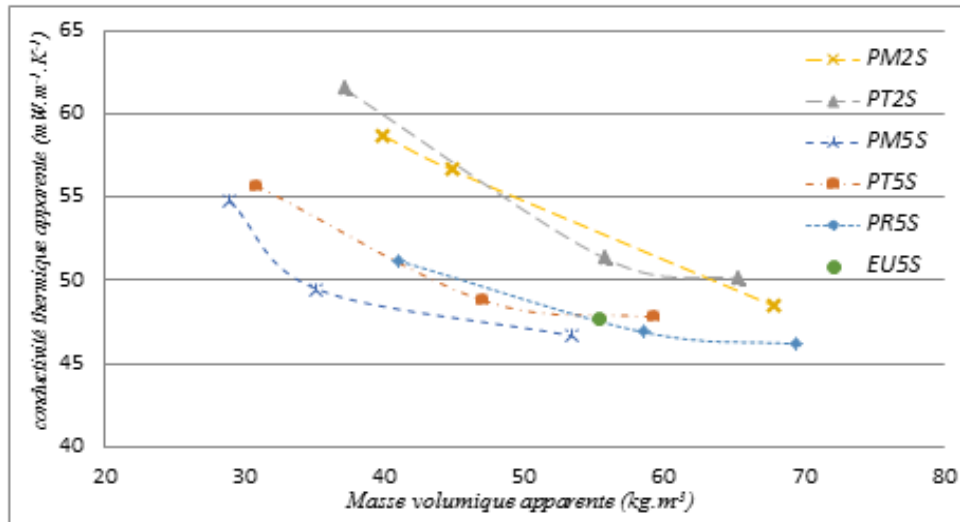


Figure 92 : Évolution des conductivités apparentes mesurées à 20°C/65%RH fonction de la masse volumique des MNTB composés de fibres de bois d'essences différentes, de modalités de taille 2 ou 5

#### 4.1.3.3 Relation entre conductivité thermique mesurée des MNTB et temps nécessaires à leur consolidation dans le four

A partir d'observations réalisées durant les essais, on constate que, plus le matériau fibreux présente une conductivité thermique faible, plus il faut du temps pour que la température atteigne 130°C en son cœur. On constate également que ce temps de consolidation est influencé par la finesse des fibres de bois et la masse volumique attendue des MNTB conçus. La Figure 93 illustre les variations du temps de séjour, ramené à l'épaisseur du matériau, en fonction de sa conductivité thermique.

Afin de proposer des modèles pour la démarche d'optimisation multi-objectif menée en parallèle (Hobballah, 2017), on illustre cette variation par la relation (39) ci-dessous, dont la courbe représentative est tracée en Figure 93.

$$T_r = \frac{15,53}{\lambda - 39,69} \quad (39)$$

Avec

$T_r$  : Temps de séjour / épaisseur [s.mm<sup>-1</sup>]

$\lambda$  : Conductivité thermique mesurée à 20°C/65%HR [mW.m<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>]

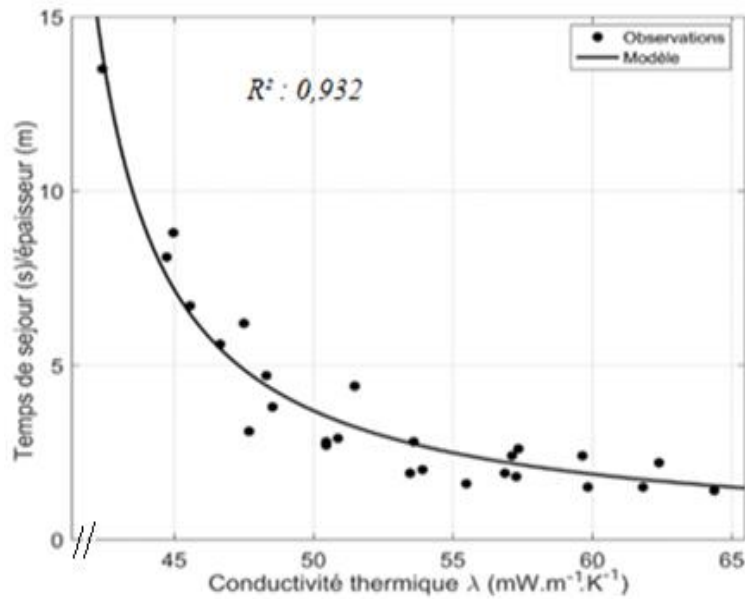


Figure 93 : Temps de séjour dans le four divisé par l'épaisseur de matelas en fonction de la conductivité thermique mesurée avec le dispositif DESPROTHERM

## 4.2 Éléments de modélisation thermique semi-empirique à 20°C/65%HR

Dans cette section, on s'attachera à proposer des modèles de comportement des matériaux, en se calant en partie sur des données expérimentales. Au-delà de la représentation théorique permettant de mieux comprendre ce comportement, et dans la continuité des éléments présentés dans la section précédente, il s'agit d'alimenter les outils de modélisation multi-objectif utilisés dans le cadre de la thèse de Mohamad Hobballah (Hobballah, 2017).

### 4.2.1 Identification des paramètres du modèle semi-empirique de conductivité thermique et influence de la finesse des fibres

Pour rappel et comme précédemment présenté en section 1.5.1, les relations entre conductivité thermique apparente et masse volumique apparente peuvent être modélisées par un modèle semi-empirique de la forme (Langlais & Klarsfeld, 2004):

$$\lambda^*(\rho) = A + B \cdot \rho + \frac{C}{\rho} \quad (40)$$

Avec

$A$ , la contribution de la conduction de l'air, ou conductivité thermique de l'air sec immobile

$B \cdot \rho$ , la contribution de la conduction de la matrice solide

$C/\rho$ , la contribution du rayonnement

Le paramètre  $A$ , représentant la conductivité thermique de l'air sec immobile, est fixé égal à  $26 \text{ mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  à  $25^\circ\text{C}$ . Les paramètres  $B$  et  $C$  peuvent être estimés à partir des données expérimentales de la conductivité thermique apparente,  $\lambda^*_{app_{exp_i}}$ , déduites des mesures de  $C_p$  et de  $b$ , en procédant à une minimisation des écarts quadratiques définis par :

$$S = \sum_{i=1}^m (\lambda^*_{app_{calc_i}} - \lambda^*_{app_{exp_i}}) \quad (41)$$

Avec

$\lambda^*_{app_{exp_i}}$ , les valeurs expérimentales

$\lambda^*_{app_{calc_i}}$ , les valeurs calculées

Ainsi, cette technique itérative, basée sur l'algorithme de Levenberg-Marquardt (LMA), est utilisée pour résoudre ce problème d'estimation des paramètres (Marquardt, 1963). A partir des valeurs des paramètres B et C calculées, il est possible d'estimer, à partir de la dérivée de la relation (40) susmentionnée, la masse volumique apparente optimale  $\rho^*_{opt}$  de chacun des mélanges de fibres bois/thermoplastique pour laquelle la conductivité thermique apparente est minimale (Hobballah, 2017).

Le Tableau 32 ci-dessous recense les diamètres moyens initiaux des fibres de bois produites par le FCBA, obtenus par micro-tomographie RX avant ouvrason (Tableau 16), les valeurs obtenues pour les paramètres B et C, ainsi que les masses volumiques optimales  $\rho^*_{opt}$  correspondant aux conductivités thermiques minimales  $\lambda^*_{min}$  des principaux mélanges de MNTB fabriqués.

Tableau 32 : Valeurs obtenues pour les paramètres B et C, les masses volumiques optimales  $\rho^*_{opt}$  ainsi que les conductivités thermiques minimales  $\lambda^*_{min}$

Référence du Mélange	Diamètre moyen ( $\mu\text{m}$ )	B ( $\text{mW.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}.\text{m}^{-2}$ )	C ( $\text{mW.kg.K}^{-1}.\text{m}^{-4}$ )	$\rho^*_{opt}$ ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	$\lambda^*_{min}$ ( $\text{mW.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )
PM1S	354	0,1	1274,7	112,9	48,6
PM2S	162	0,1	1074,3	103,6	46,7
PM3S	114	0,093	960,3	101,6	44,9
PM4S	86	0,107	796,8	86,3	44,5
PM5S	75	0.136	698,8	71,7	45,4
PT2S	176	0,1	1210	110,0	47,7
PT5S	90	0,145	783,3	73,5	47,0
PR5S	98	0,116	836,1	84,9	45,7

Les différents modes de transfert de chaleur repris par ce modèle ont été mis en évidence à 20°C/65%HR. Les coefficients A, B et C doivent être déterminés pour chaque température moyenne de l'air ambiant et chaque type de matériau, en lien avec son degré de finesse et donc de sa topologie. Ces résultats sont dépendants également de la teneur en eau, qu'elle soit constitutive de l'air et/ou des matières premières. Toutefois, la méthode peut être validée, pour d'autres conditions d'ambiance, avec des tendances similaires sur les résultats.

Si on s'intéresse tout d'abord à la contribution du rayonnement à la conductivité thermique apparente, la Figure 94 ci-dessous permet de suivre l'évolution de la masse volumique apparente optimale  $\rho^*_{opt}$  en fonction de la valeur du paramètre C, pour les mélanges à base de fibres de Pin Maritime. Ce résultat met en évidence l'importance de la finesse des fibres et confirme une contribution

du rayonnement d'autant plus faible que les matériaux sont constitués d'éléments plus fins. En conséquence, on constate une meilleure résistance thermique, dès lors que le rayonnement n'est plus négligeable, c'est à dire pour des masses volumiques en deçà de  $\rho^*_{opt}$ , avec l'utilisation de fibres fines.

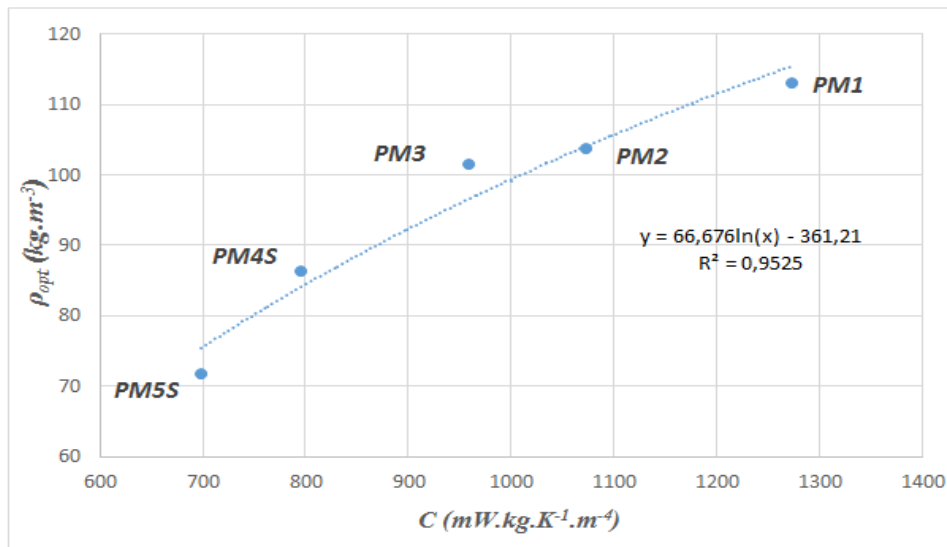


Figure 94 : Masse volumique apparente optimale en fonction des valeurs du paramètre C, pour les mélanges de type PMi, i=1 à 5

On s'intéresse maintenant à l'influence des granulométries de fibres de bois, toutes essences confondues (PM, PT, PR), sur le paramètre C, caractéristique de la contribution radiative au transfert thermique. La Figure 95 ci-dessous présente l'évolution des valeurs du paramètre C en fonction du diamètre moyen des populations de fibres, mesuré avant l'étape d'ouvrison.

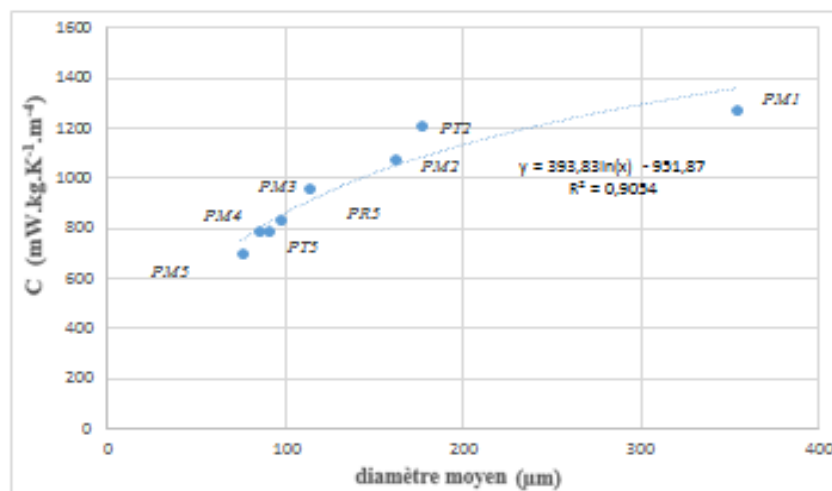


Figure 95 : Valeurs du paramètre C en fonction du diamètre moyen des populations de fibres de bois de type PM, PT et PR

Afin d'alimenter la démarche d'optimisation multi-objectif menée en parallèle de ces travaux, on s'intéresse à la représentation des phénomènes radiatifs, sous la forme  $C / \rho^*$ , à partir du modèle suivant, proposé par (Langlais & Klarsfeld, 2004) :

$$\frac{C}{\rho^*} = \frac{4 \sigma \bar{T}^3 d}{\left(\frac{2}{\varepsilon} - 1\right) + \beta \rho^* d} \quad (42)$$

Avec

$\beta$ : le coefficient d'extinction massique moyen ( $m^2.kg^{-1}$ )

$\varepsilon$ : l'émissivité

$d$ : le diamètre quadratique (m)

$\sigma$ , la constante de Boltzmann ( $J.K^{-1}$ )

$\rho^*$ , la masse volumique ( $kg/m^3$ )

$T$ : la température (K)

Le coefficient d'extinction, noté  $\beta$  dans cette étude, caractérise la facilité avec laquelle un matériau quelconque peut être pénétré par un faisceau de lumière, de particules ou d'une autre énergie ou matière (Hubbel & al, 1995), (Singh & al, 2004). On le calcule ici à partir de la Relation (42) et des valeurs présentées dans le Tableau 32. Voici ci-dessous (Figure 96), les valeurs du coefficient d'extinction massique moyen pour les milieux fibreux étudiés, composés de pin maritime, dont on fait varier la masse volumique de 5 à 60  $kg/m^3$ .

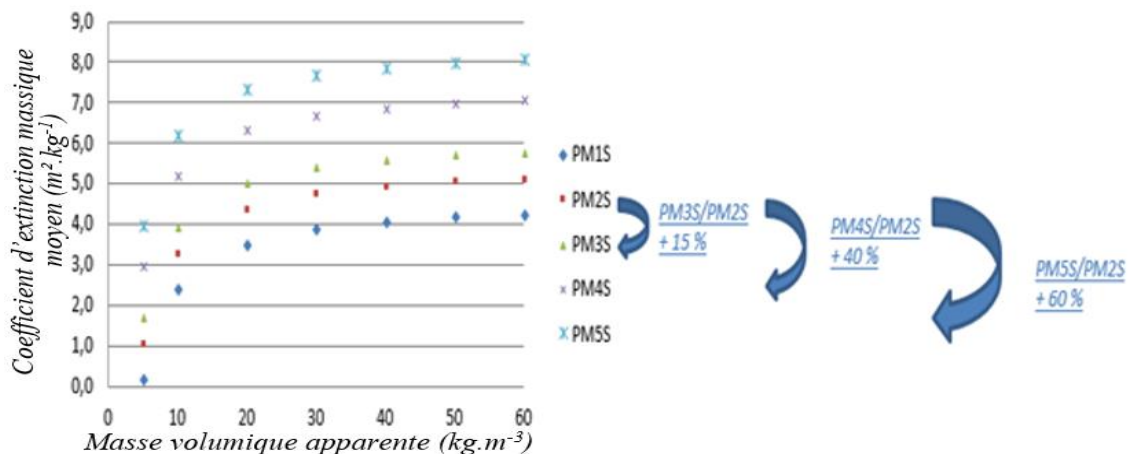


Figure 96 : Valeurs de ce coefficient d'extinction massique moyen en fonction des masses volumiques apparentes de MNTB composés de fibres de pin maritime et des fibres thermoplastiques fournies par STEICO

Comme indiqué sur la figure ci-dessus, on constate une diminution du coefficient d'extinction avec la diminution de la taille des fibres (PM1S à PM5S), respectivement de 15%, 40% et 60% lorsqu'on passe de PM2S à PM3S, PM4S et PM5S. On relève à nouveau une modification des propriétés spectrales de ces matériaux fibreux, qui s'amoindrissent progressivement avec la diminution de leur fraction solide. Cette modification se traduit par une augmentation progressive de la contribution radiative dans les transferts de nature thermique. Tous ces propos sont illustrés par l'évolution des valeurs des coefficients d'extinction massique en fonction des masses volumiques apparentes optimales respectives pour chacun des MNTB à base de fibres de pin maritime (Figure 97).

Egalement, l'influence du diamètre moyen des fibres de bois, toutes essences confondues (PM, PR et PT), sur la masse volumique apparente optimale, est illustrée en Figure 98.

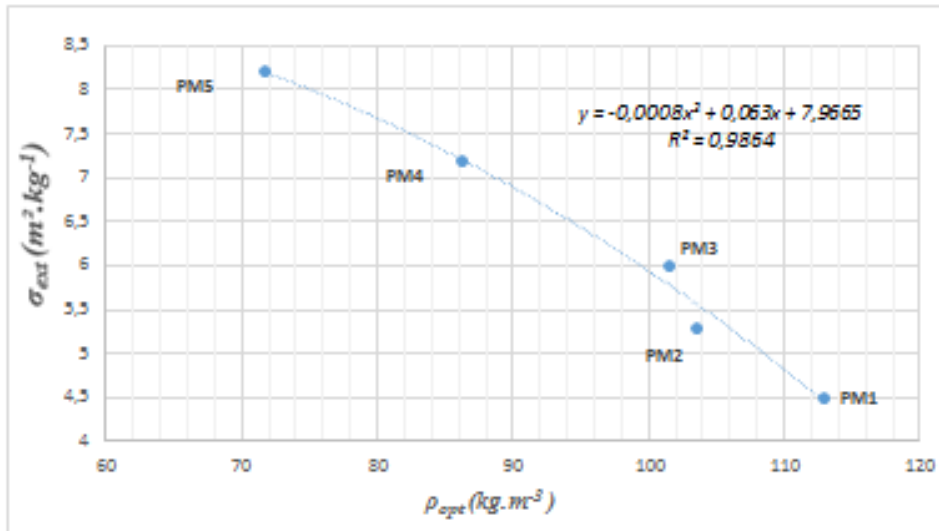


Figure 97 : Evolution du coefficient d'extinction massique  $\sigma_{ext}$  en fonction des masses volumiques apparentes optimales des mélanges PMiS,  $i = 1$  à  $5$

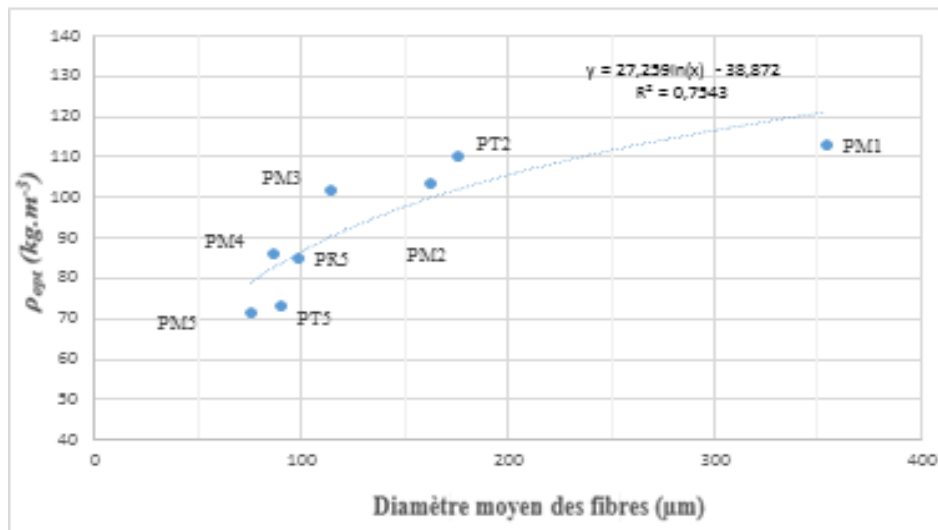


Figure 98 : Influence du diamètre moyen des fibres de bois sur la masse volumique apparente optimale de ces MNTB comportant également la fibre thermoplastique fournie par STEICO

On peut ainsi relever que les matériaux constitués de fibres de bois fines ont une plus faible masse volumique apparente optimale. D'un point de vue technique, le recours aux fibres de bois fines dans l'isolation thermique semble justifié pour des masses volumiques apparentes inférieures à  $100 \text{ kg/m}^3$  (optimum du PM2). Par la modélisation de l'évolution de la conductivité thermique apparente en fonction de la masse volumique apparente à  $20^\circ\text{C}/65\%RH$  pour différentes granulométries de fibres de bois, il est constaté que l'influence de la finesse des fibres tend à devenir particulièrement importante quand les masses volumiques apparentes deviennent faibles. Ces résultats sont illustrés par les Figure 99 et Figure 100 ci-dessous.



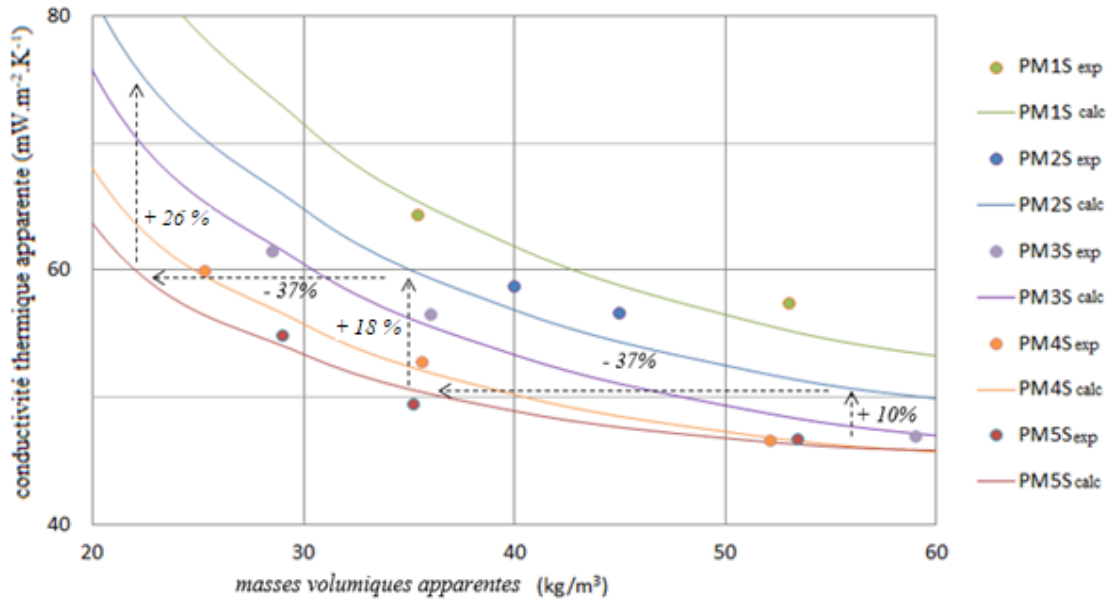


Figure 99 : Évolution des conductivités thermiques apparentes des mélanges  $PM_i, i = 1 \text{ à } 5$ , vers les faibles masses volumiques apparentes ( $< 60 \text{ kg.m}^{-3}$ ). Comparatif entre valeurs mesurées et modélisées

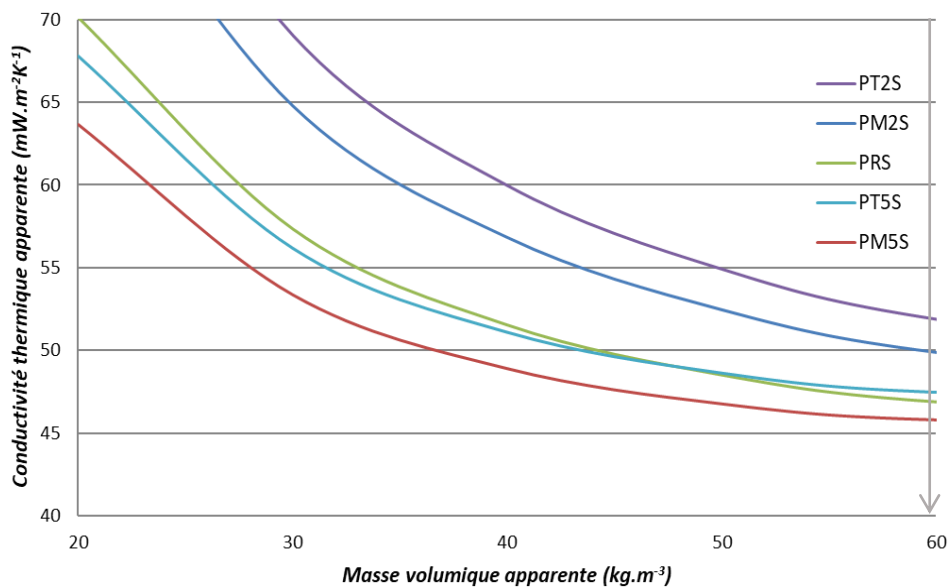


Figure 100 : Évolution des conductivités thermiques apparentes des MNTB composés de fibres PM, PR et PT de modalités 2 & 5, vers les faibles masses volumiques apparentes ( $< 60 \text{ kg.m}^{-3}$ )

#### 4.2.2 Relations entre conductivité thermique, masse volumique apparente, finesse, conductivité thermique et coefficient d'extinction

On cherche ici à inclure l'influence de la finesse des fibres de bois, observée précédemment, dans le modèle semi-empirique décrit en Section 1.5.1. L'évolution de la conductivité thermique apparente en fonction de la masse volumique apparente est donnée par la relation (43) ci-dessous (Langlais & Klarsfeld, 2004). Dans cette relation, l'opérateur  $d$  représente le diamètre quadratique moyen des fibres.

$$\lambda^* = f(\rho) = \lambda^*(\rho, \bar{T}) = 0,2572 \bar{T}^{0,81} + 0,0527 \rho^{0,91} \left( 1 + 0,13 \frac{\bar{T}}{100} \right) + \frac{4 \sigma \bar{T}^3 d}{\left( \frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) + \beta \rho d} \quad (43)$$

Avec

$T$ , la température (K)

$\sigma$ , la constante de Boltzmann (J.K-1)

$d$ , le diamètre quadratique moyen (m)

$\varepsilon$ , l'émissivité

$\rho$ , la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>),

$\beta$ , le coefficient extinction (m<sup>2</sup>/kg)

On conserve maintenant la forme de cette relation, en l'ajustant sur les données expérimentales, pour obtenir la relation (44) suivante.

$$\lambda(\rho, \beta) = 0,2572 \cdot T^{0,77} + 0,17 \rho^{0,24} \cdot (1 + 0,1883 \cdot T) + \frac{4 \sigma T^3 d}{\left( \frac{2}{\varepsilon} - 1 \right) + \beta \rho d} \quad (44)$$

Avec

$d$ , l'épaisseur moyenne des MNTB conçus (m)

$\varepsilon$ , l'émissivité du bois (0,85)

$\rho$ , la masse volumique (kg/m<sup>3</sup>),

$\beta$ , le coefficient extinction (m<sup>2</sup>/kg)

Dans cette relation, l'opérateur  $d$  de l'équation (43), ou diamètre moyen des fibres, est inclus directement dans le coefficient d'extinction, d'après la relation (45) ci-dessous, établie à partir d'un ajustement sur les données expérimentales (Hobballah, 2017). Cette association permet de mieux réguler les valeurs de  $\lambda^*$ , au travers des surfaces spécifiques attribuées, in fine, au diamètre moyen des fibres.

$$\beta = 1827 \cdot t^{-1,549} + 3,086 \quad (45)$$

Avec

$\beta$ , le coefficient extinction (m<sup>2</sup>/kg)

$t$ , diamètre moyen des fibres de bois ( $\mu\text{m}$ )

Ainsi, dans la relation (44), l'opérateur  $d$  est finalement imputé à l'épaisseur moyenne de l'ensemble des MNTB conçus dans le projet dès lors que ces derniers sont constitués des fibres de bois fournies par le FCBA. La valeur de  $d$  est ainsi fixée à 55 mm. L'influence de la finesse des fibres de bois sur la conductivité thermique apparente des MNTB à 20°C/65%RH, calculée à partir de cette relation, est donnée en Figure 101.

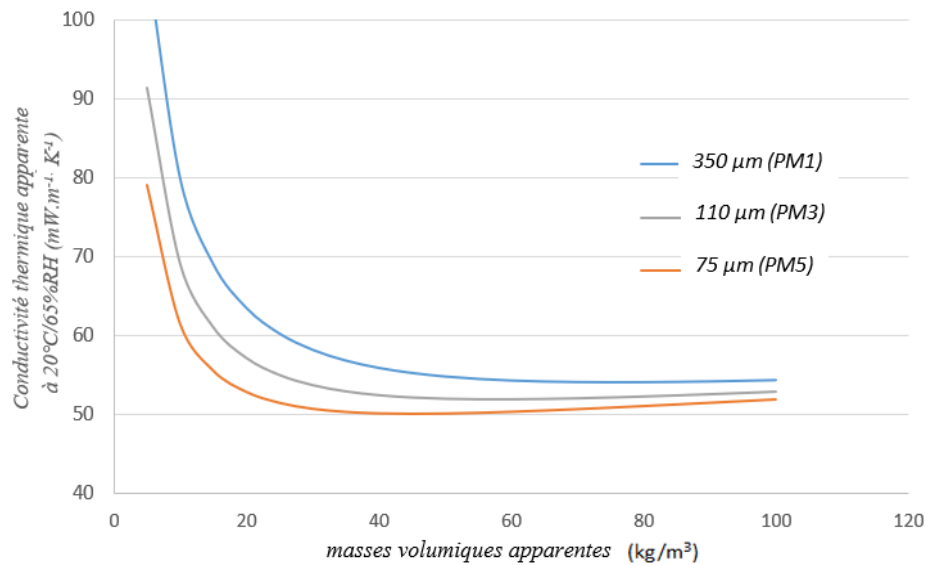


Figure 101 : Influence de la finesse des fibres de bois constitutives des MNTB sur la conductivité thermique apparente à 20°C/65%RH, pour trois diamètres de fibres de bois, modélisée à partir des relations (44) et (45)

#### 4.2.3 Relations entre conductivité thermique et paramètres microstructuraux

Comme explicité dans la section 2.1.4, nous nous sommes intéressés à la microstructure de quelques-uns des matériaux conçus, après les avoir observés à l'aide du micro-tomographe Skyscan 1074. La résolution est de 5,72  $\mu\text{m}/\text{pixel}$ . Des mesures ont été réalisées au laboratoire I2M sur trois échantillons composés de fibres de pin maritime PM3, PM4 et PM5, pour une masse volumique identique ( $35 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) des panneaux. Des distributions granulométriques de la taille des pores, correspondant à une distance entre les fibres (Figure 102) ont ainsi été obtenues. Une synthèse des résultats, présentant les diamètres moyens des pores et des fibres, mais aussi la surface spécifique d'interface entre les fibres et les pores est proposée ci-après (Tableau 33). Ces résultats sont mis en correspondance avec ceux obtenus sur le panneau industriel, Steicoflex.

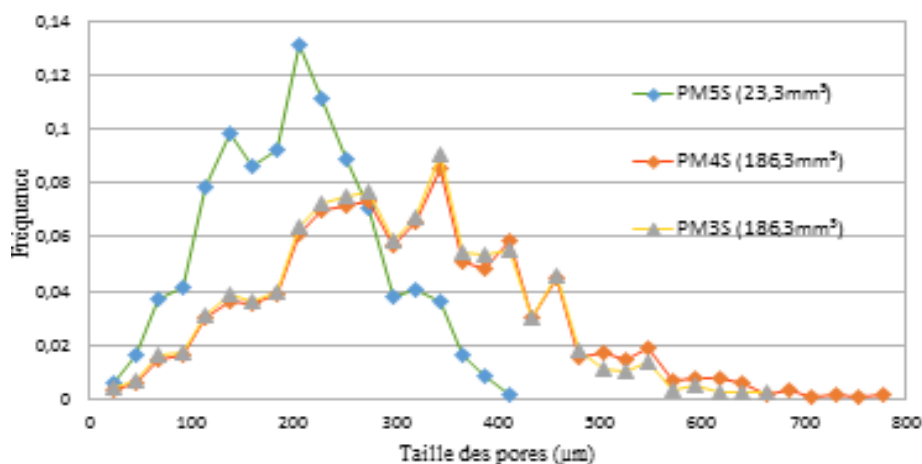


Figure 102 : Fréquence de la taille des pores des MNTB analysés par traitement d'image 3D

Tableau 33 : Distribution granulométrique des fibres pour les matériaux PM3S50, PM4S50, PM5S50 et Steicoflex (témoin)

Propriétés mesurées, dont sur les images 3D	PM3S50	PM4S50	PM5S50	Steicoflex
Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	34	35	35	45
Taux de porosité (Image 3D)	95,4%	94,60%	93,15%	94,4%
Taille moyenne des pores ( $\mu\text{m}$ ) (Image 3D)	298 (76)	257	193 (118)	322 (153)
Diamètre moyen des fibres ( $\mu\text{m}$ ) (Image 3D)	54 (35)	47 (25)	39 (21)	65 (37)
Volume de l'échantillon observé ( $\text{mm}^3$ )	186	186	23	
Surface spécifique ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ ) (Image 3D)	6471	7605 (+17,5%)	9562 (+47,7%)	
Conductivité thermique mesurée à $20^\circ\text{C}/65\%HR$ ( $\text{mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	58	53	50	55

Il est ainsi constaté (Tableau 33 & Figure 102) que, pour des MNTB à masse volumique apparente équivalente d'environ  $35 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , l'augmentation progressive de la finesse des fibres de bois constitutives des matériaux (PM3, PM4 & PM5) correspond à un décroissement des diamètres moyens et une augmentation de la surface spécifique des volumes analysés : on note respectivement 17,5% et 47,7% d'augmentation pour les panneaux PM4S50 et PM5S50 par rapport à PM3S50. Il est également constaté que l'augmentation de la finesse des fibres a pour incidence une diminution sensible de la taille des pores, quand on passe respectivement de 298 à 193  $\mu\text{m}$  pour les panneaux PM3S50 et PM5S50.

Il découle de ces résultats qu'à masse volumique équivalente, la diminution progressive du diamètre moyen, représentatif des populations de fibres de bois dans les MNTB permet, in fine, d'augmenter le degré d'interaction avec les phénomènes radiatifs. Il en résulte que l'accroissement des surfaces spécifiques des matières solides permet d'accentuer les échanges avec les longueurs d'ondes assujetties au rayonnement thermique. Cette corroboration, mesurée dans les valeurs des conductivités thermiques respectives, impacte les valeurs des coefficients d'extinction massique évaluées dans cette gamme de masse volumiques apparentes (Figure 96).

#### 4.2.4 Conclusion partielle

Il ressort de cette partie que le procédé non tissé utilisé dans le projet est adapté pour fabriquer des matériaux à base de fibres de bois de forte porosité (> 95%). La topologie des MNTB et leur homogénéité sont intrinsèquement liés à leur constitution inhérente aux procédés de fabrication. La conductivité thermique apparente peut-être optimisée à partir de la morphologie des matières premières et des masses volumiques apparentes des matériaux conçus. Il s'avère également la possibilité de valoriser les fibres constitutives de pin *taeda*, peuplier (Vignon & al., 2016) et eucalyptus en tant qu'isolants à base de bois semi-rigides.

### 4.3 Lien entre hygrothermie et performances thermiques des MNTB

En complément des mesures thermiques précédentes, trois matériaux du projet ont été caractérisés thermiquement, non plus en régime transitoire quasi-établi, sous conditions dynamiques, mais en régime permanent représentant un cas particulier idéal (méthode du lambda mètre normée). Ces essais ont été menés au sein du laboratoire de caractérisation physico-mécanique de l'entreprise Steico. La notation A utilisée ci-après correspond aux essais réalisés avec le Desprotherm, au laboratoire I2M, en régime transitoire quasi établi. La notation B correspond aux essais menés à l'aide du lambda mètre.

Dans le cas A, les spécimens sont supposés homogènes avec donc un flux thermique uniformément réparti pour qu'il y ait un transfert unidimensionnel dans l'épaisseur. Les matériaux, de dimensions  $100 \times 100 \times E \text{ mm}^3$  ont été stabilisés à l'équilibre hygroscopique dans une salle régulée à  $20^\circ\text{C}/65\% \text{RH}$ . Ces mesures, qui se sont déroulées durant des temps relativement courts, à savoir 120 secondes pour l'effusivité et 400 secondes pour la capacité volumique, engendrent toutefois une montée en température de l'ordre de 4 à  $8^\circ\text{C}$ .

Dans le cas B (méthode normée), en régime permanent stationnaire, la conductivité thermique directement mesurée est estimée quand le système a atteint une situation d'équilibre. Les matériaux testés ont pour dimensions  $250 \times 250 \times 80 \text{ mm}^3$ . Ils sont préalablement stabilisés à  $70^\circ\text{C}$  avec un différentiel en température de  $10^\circ\text{C}$  (plaque chaude  $15^\circ\text{C}$  et plaque froide à  $5^\circ\text{C}$ ). Ces 2 régimes caractérisent la phase temporelle durant laquelle la réponse du système est exploitée. Le système B permet une évaluation à des temps plus long que ceux du système A, pour qu'il ne soit pas à même de tenir compte de la phase transitoire.

Les trois matériaux testés sont composés des populations de fibres PM2, PM4 et PM5. Le matériau industriel Steicoflex a également été testé. Les résultats sont illustrés ci-dessous (*Figure 103*).

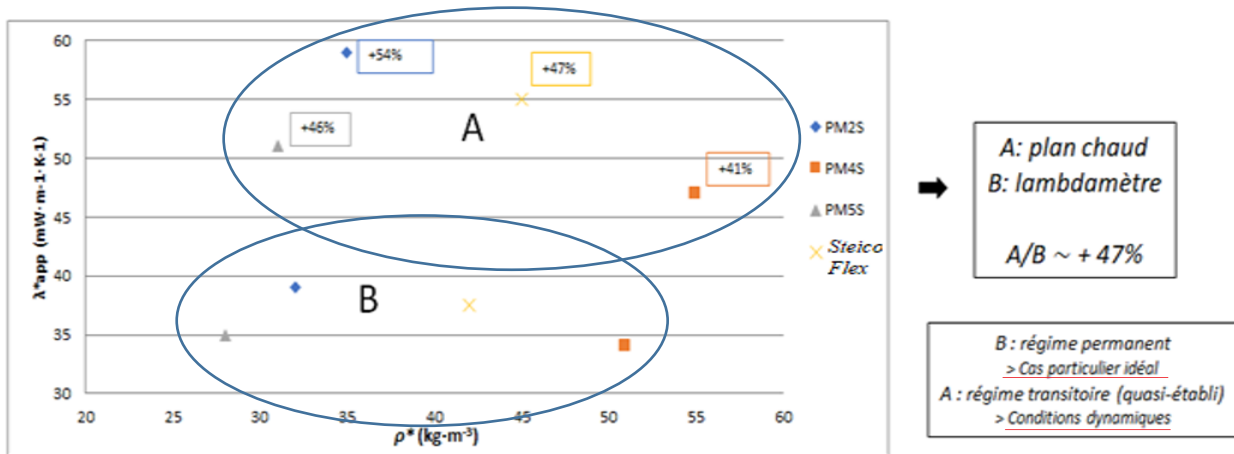


Figure 103 : Comparatif entre conductivités thermiques des matériaux PM2S, PM4S, PM5S, et SteicoFlex, mesurées selon 2 méthodes, A : plan chaud, B : lambdamètre

Il est constaté une augmentation conséquente de la conductivité thermique mesurée sous conditions dynamiques (plan chaud, système A) par rapport au régime permanent (lambdamètre, système B). Cette augmentation varie entre 41 à 54%. On met en évidence l'importance des conditions hydrothermiques lors de la mesure, avec de surcroît celle de la topologie des matériaux analysés.

La conductivité thermique de l'échantillon PM5S (masse volumique 28 kg·m<sup>-3</sup>), mesurée par la méthode du lambdamètre (B), est égale à 34,8 mW·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. Elle est inférieure de 8% à celle du Steicoflex (38 mW·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), pour un matériau dont la densité est 40% plus faible. La conductivité thermique de l'échantillon PM4S (masse volumique 51 kg·m<sup>-3</sup>), est égale à 34 mW·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>. On présente la relation entre conductivités thermiques mesurées par les deux méthodes en Figure 104.

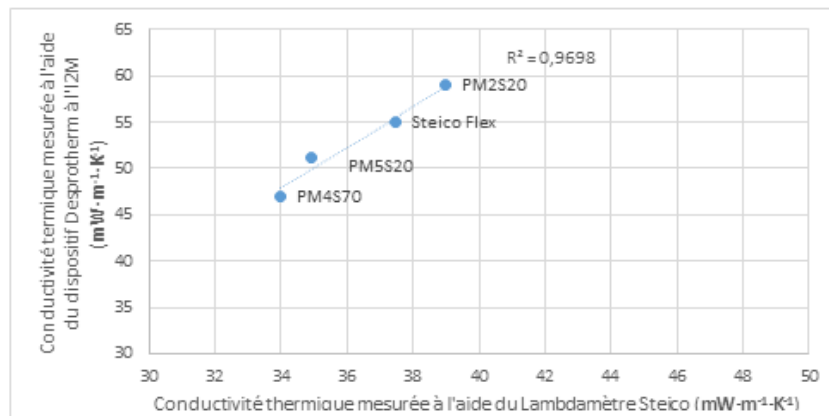


Figure 104 : Conductivité thermique apparente évaluée suivant la méthode normalisée du Lambdamètre en fonction de la conductivité thermique apparente suivant la méthode du plan chaud

La conductivité thermique de l'eau étant 25 fois supérieure à celle de l'air sec, sa présence dans les matériaux modifie inexorablement la conductivité apparente de ces derniers. La (Figure 105) présente l'influence de la teneur en eau sur le rapport entre la conductivité thermique mesurée par lambdamètre et celle mesurée en laboratoire, pour différents matériaux.

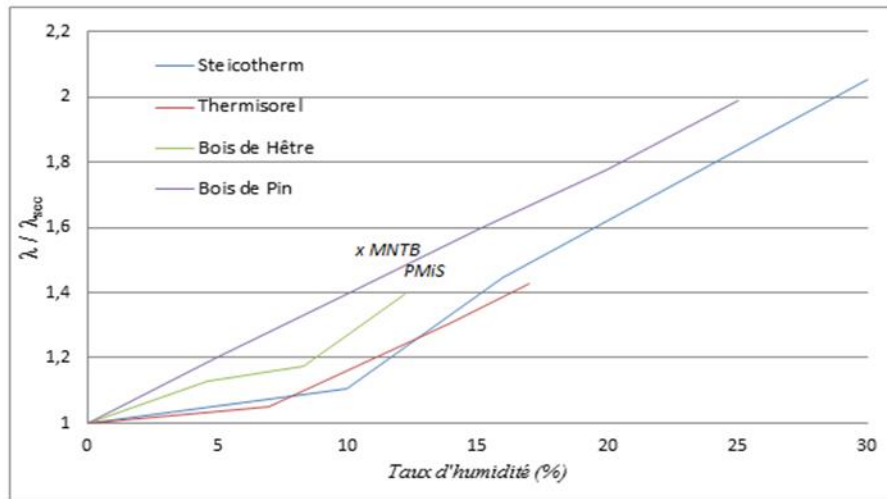


Figure 105 : Rapport entre conductivités thermiques évaluées en fonction de la teneur d'eau et déclarée d'après (Traore, 2011), (Kaemmerlen, 2009), (Cherche & al, 2010), (Kol, 2009)

A titre indicatif, le Thermisorel a une conductivité thermique déclarée égale à  $42 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  à  $15^\circ\text{C}$  lorsqu'il est à l'état sec et égale à  $55 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  à 70%HR (+36%) (Kaemmerlen, 2009). Ceci démontre, à nouveau, la forte sensibilité de la conductivité thermique apparente  $\lambda^*_{\text{app}}$  au mouvement de la phase gazeuse, accentuée elle-même par le taux d'humidité présent.

#### 4.4 Caractérisation expérimentale hygrothermique

##### 4.4.1 Mesure de l'isotherme de sorption

L'état hydrique de matériaux en fonction de l'humidité relative peut être illustré au travers de l'isotherme de sorption. Des mesures ont été effectuées sur 5 références de MNTB (un témoin industriel Steicoflex, quatre essences différentes, PM, PT, PR et EU, la même modalité 5 de taille de fibres). Les résultats présentés en (Figure 106) illustrent la capacité de 5 matériaux fibreux biosourcés à interagir avec l'humidité relative de l'air comprise entre 0 et 98% à  $20^\circ\text{C}$ .

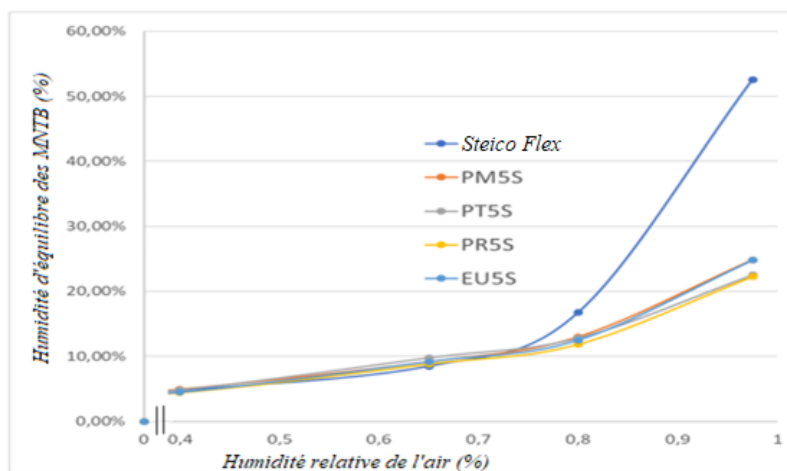


Figure 106 : Phase d'absorption de 4 matériaux fibreux du projet & d'un 5<sup>ème</sup> fourni par l'industriel du projet



Pour une humidité relative de l'air de 40%, tous les matériaux ont une teneur massique d'humidité comprise entre 4,5 et 5% tandis qu'à 80%HR, ces derniers ont une teneur en eau comprise entre 11,9 et 16,8%. Quand l'humidité relative augmente encore pour atteindre 98%, ces matériaux contiennent entre 22,5% de masse d'eau pour les matériaux de laboratoire et 53% pour le matériau témoin industriel. La faculté du Steicoflex à emmagasiner +/- 28% d'humidité supplémentaire par rapport aux autres matériaux, pour de fortes humidités relatives, provient de l'agent ignifugeant qu'il contient (phosphate d'ammonium). Cet additif n'a pas été incorporé aux MNTB fabriqués au laboratoire, ce qui explique cet écart.

#### 4.4.2 Mesure des capacités de tampon hydrique MBV

La valeur de tampon hydrique est une grandeur caractérisant l'aptitude du matériau à modérer les variations hydrométriques de l'air avoisinant. Cette propriété, fonction de la perméabilité et de la capacité de sorption du matériau, est évaluée sur les matériaux composés de fibres de bois fournies par STEICO et de ceux composés de fibres PM3 et PM5. Cette grandeur est d'intérêt lors de la régulation d'un climat intérieur passif. Les valeurs de tampon hydrique mesurées sur ces matériaux sont présentées dans le Tableau 34 ci-dessous.

Tableau 34 : Valeurs du Tampon hydrique ou MBV sur les matériaux composés de mélanges PMiS et des fibres (bois et thermoplastiques) fournies par STEICO

Référence panneau	MBV (g / m <sup>2</sup> % RH)	Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	Ref.	Masse volumique moyenne (kg.m <sup>-3</sup> )	MBV (%m / m <sup>2</sup> %RH)
PM3S50	1,56	34,5	PM3S50	34,5 (0,8)	3,91 (%0,15%)
PM3S50	1,6	34,1	PM5S50	34,8 (2,6)	3,78% (0,13%)
PM3S50	1,62	35,4	PM5S70	46,8 (1,1)	3,33% (0,04%)
PM5S50	1,61	36,9	SteicoS78	94	2,57 %
PM5S50	1,47	31,8			
PM5S50	1,62	35,8			
PM5S70	1,9	47			
PM5S70	1,97	47,8			
PM5S70	1,97	45,6			
SteicoS78	3,07	94			

Il apparaît que ces MNTB sont tous de bons régulateurs hydriques et que ceux composés de fibres de bois provenant de chez STEICO sont d'excellents régulateurs hydriques. L'effet masse volumique de ces MNTB augmente leur faculté à contenir de l'eau. Quant à l'effet finesse de ces matériaux, il est nuancé par la capacité hydrique des fibres de bois STEICO. Si on compare une partie de ces matériaux avec d'autres communément trouvés dans les bâtiments, en fonction de leur masse volumique, on trouvera les résultats ci-dessous (Figure 107, Figure 108).

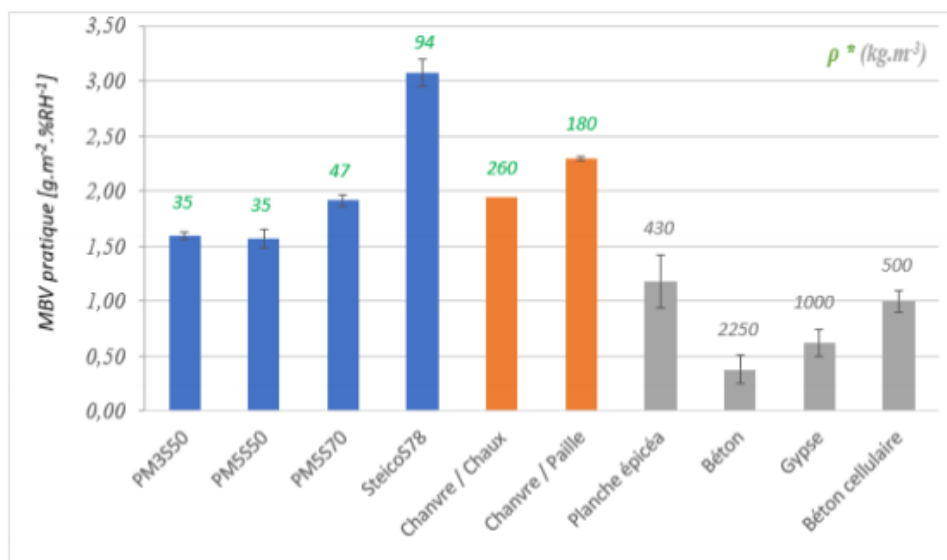


Figure 107 : Valeurs de tampon hydrique obtenues selon le protocole NORDEST, pour des échantillons du projet et des références issues de la bibliographie d'après (Collet, 2017), (Rode & al, 2007)

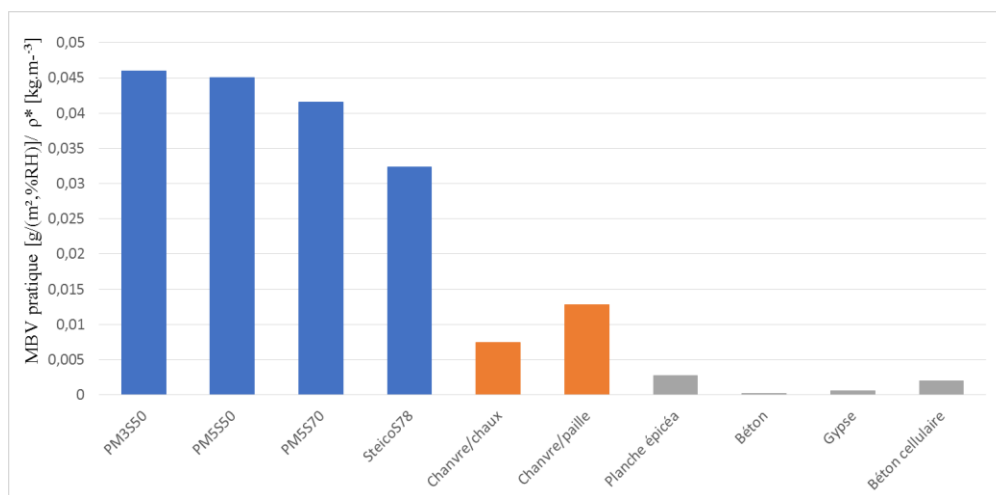


Figure 108 : Valeurs de tampon hydrique de 5 matériaux du projet confrontées à d'autres matériaux (références issues de la bibliographie d'après (Collet, 2017), (Rode & al, 2007)) obtenus selon le protocole NORDEST pondérées par leur masse volumique

Il est constaté sur l'ensemble des matériaux, présentés ci-dessus, que les isolants thermiques biosourcés sont ceux présentant les plus hautes capacités tampon et que celles-ci sont encore meilleures quand ces capacités sont pondérées vis-à-vis de la masse volumique de ces matériaux. Le bilan en vapeur d'eau souligne que l'évolution de l'humidité de l'air intérieur est fortement influencée par l'effet de tampon hygroscopique des parements intérieurs et donc des matériaux le composant (Labat, 2012). La dynamique du transfert d'humidité peut ainsi se résumer en termes d'inertie hydrique et de capacité tampon. Cet effet dans les parois dépendrait davantage de la perméabilité à l'air que des propriétés de sorption des matériaux (Carmeliet & al, 2005). Il pourrait y avoir un intérêt croissant à valoriser les capacités d'absorption des isolants pour créer un contrôle passif des variations d'humidité de l'air intérieur des bâtiments. Si tel était le cas, les matériaux biosourcés feraient preuve de multifonctionnalité.

#### 4.4.3 Lien entre humidité relative et paramètres microstructuraux

Quelques matériaux fabriqués ont été analysés par micro-tomographie. Ces analyses ont été réalisées sur des échantillons de PM5S à 35 kg/m<sup>3</sup> ainsi qu'à 2 autres niveaux de compression (18 & 30%) et sur les PM4S et PM3S également à 35 kg/m<sup>3</sup>. Les volumes scannés sont de 3,8 mm<sup>3</sup> à une résolution de 5,7 μm / pixel (*Figure 109*).

Ces images ont été utilisées pour calculer numériquement les perméabilités à la vapeur et intrinsèque, à l'aide des méthodes présentées au paragraphe 3.3.5.4., ci-dessous (*Tableau 35 & Tableau 36*).

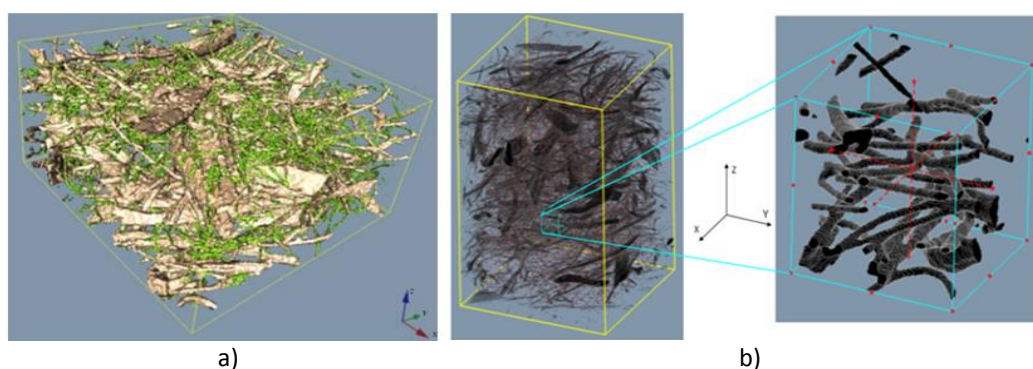


Figure 109 : a) Visualisation d'une image binaire 3D de MNTB b) Volume initial (5,9\*5,9\*7,6 mm<sup>3</sup>) analysé par corrélation d'images volumique puis sous volume (720\*720\*720 μm<sup>3</sup>) de ce MNTB (Tran, 2012)

Tableau 35 : Perméabilité à la vapeur des échantillons de PM5S, PM4S et PM3S.

Référence panneau	PM5S50 (30% def)	PM5S50 (18% def)	PM5S50	PM4S50	PM3S50
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	51	43	35	35	34
$k_{xx}$ ( $\times 10^{-7} \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )	1.67	1.70	1.81	1.83	1.83
$k_{yy}$ ( $\times 10^{-7} \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )	1.65	1.69	1.79	1.82	1.83
$k_{zz}$ ( $\times 10^{-7} \text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}$ )	1.58	1.62	1.71	1.75	1.76

Les résultats de perméabilité à la vapeur dans les 3 axes des images sont présentés dans le Tableau 35 pour les 3 échantillons imagés et les différents taux de compression du PM5S. On constate dans tous les cas une anisotropie de la perméabilité à la vapeur ; celle-ci étant moins importante selon l'épaisseur (axe Oz) du matériau. Cette anisotropie est liée, comme pour la conductivité thermique, à l'orientation privilégiée des fibres dans les plans transverses, induite par le process de fabrication. D'autre part, on constate logiquement que la perméabilité est d'autant plus importante que la densité est faible. Les écarts restent ceci dit relativement modestes entre les différents échantillons testés et toutes les valeurs calculées sont du même ordre de grandeur.

Il est par ailleurs possible de comparer ces résultats aux données utilisés dans les codes de calcul de simulation thermique du bâtiment et dans la réglementation thermique. On utilise pour cela plutôt le facteur de résistance à la diffusion de vapeur, noté  $\mu$ , qui est défini comme le rapport entre la perméabilité à la vapeur de l'air (prise ici égale à  $1,91 \times 10^{-10} \text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$ ) avec la perméabilité à la vapeur du matériau calculée précédemment. Les isolants de faible densité sont généralement affectés d'un facteur de résistance de 1 (*i.e.* la résistance de l'air). On peut constater dans le Tableau 36 que, pour les 3 isolants à  $35 \text{kg/m}^3$ , les valeurs de résistance à la diffusion sont très proches de 1. Un écart maximum de +12% est observé pour les matériaux non compressés, tandis qu'on note des écarts jusqu'à 21% dans le cas du PM5S dans un état de compression de 30%.

Tableau 36 : Facteurs de résistance à la diffusion de vapeur pour les 3 échantillons testés, dans les 3 directions principales des images

Masse volumique et Facteurs de résistance à la diffusion de vapeur, $\mu$ , pour les 3 échantillons testés	PM5S50 (30%def)	PM5S50 (18%def)	PM5S50	PM4S50	PM3S50
Masse volumique ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	51	43	35	35	34
$\mu_{xx}$	1,14	1,12	1,06	1,05	1,04
$\mu_{yy}$	1,16	1,13	1,07	1,05	1,04
$\mu_{zz}$	1,21	1,18	1,12	1,09	1,09

Afin de limiter ou d'empêcher les transferts hydriques dans les isolants, on utilise des films freine ou pare vapeur qui permettent également de limiter les transferts convectifs. Il apparaît, à l'heure actuelle, que la migration de vapeur dans l'isolant n'est à fortiori pas recherchée (usage fréquent de pare vapeur). **Néanmoins, un tel phénomène se développerait presque inévitablement dans les parois.** Ainsi, le flux de chaleur exprimé avec transfert de masse intègre une composante directement proportionnelle au flux de vapeur. Il émerge néanmoins que la substitution des laines de verre par des isolants hygroscopiques permettrait d'augmenter l'inertie thermique de la paroi puisque ceux-ci sont à même d'adsorber une partie du flux de vapeur.

Afin de compléter cette étude des transferts de masse, la perméabilité à la vapeur est calculée sur l'échantillon de PM5S. Les autres échantillons n'ont pas pu être caractérisés pour des raisons de temps. Les résultats sont présentés dans le Tableau 37. On retrouve toujours une perméabilité plus faible selon l'épaisseur, mais il est également intéressant de constater une direction privilégiée d'écoulement dans la direction Ox, par rapport à Oy. L'ordre de grandeur de ces perméabilités est cohérent avec d'autres résultats obtenus sur des matériaux similaires (El-Sawalhi, 2015) (El-Sawalhi & al., 2015). On notera également que des valeurs plus faibles, de l'ordre de  $10^{-11} \text{m}^2$ , ont été obtenues sur des isolants à base de fibres de bois plus denses ( $260 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) (Delisée C. & al., 2010).

Tableau 37 : Perméabilité à la vapeur du PM5S50, dans les 3 directions principales des images

Masse volumique et Perméabilité à la vapeur	PM5S (non comprimé)
Masse volumique ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	35
$K_{xx} \times 10^{-10} \text{m}^2$	9,4
$K_{yy} \times 10^{-10} \text{m}^2$	8,1
$K_{zz} \times 10^{-10} \text{m}^2$	7,5

#### 4.5 Synthèse : analogies et comparatifs thermohydriques

Par leur impact sur le flux de chaleur, la perméabilité vapeur et la chaleur d'évaporation de l'eau adsorbée, jouent un rôle important dans les matériaux poreux qui sont proches du rôle joué par la conductivité thermique sous conditions dynamiques. Associé au pouvoir isolant, ces caractéristiques complémentaires contribuent indéniablement à l'amélioration des performances énergétiques à l'échelle matériau et permettent de réguler de façon passive l'humidité relative intérieure d'un bâtiment. **Dans toutes parois d'un bâtiment se produisent donc à la fois des échanges thermiques et des transferts de vapeur d'eau dépendant les uns des autres.**

Le remplacement des laines minérales par des isolants hygroscopiques permettrait d'augmenter l'inertie thermique de la paroi. La capacité effective d'isolants biosourcés à interagir avec l'humidité, clairement le cas au travers des MBV, contribue à contrôler la qualité de l'air intérieur en réduisant le gradient de pression de vapeur au travers des processus de sorption et en limitant la condensation. Celle-ci jouerait un rôle actif dans la réduction des niveaux d'humidité.

Pour résumer ces propos, comme évoqué en section 1.5.3, on voit que le flux de chaleur exprimé avec transfert de masse intègre une composante directement proportionnelle au flux de vapeur accompagnant inévitablement et en permanence le flux de chaleur et entraînant avec lui la chaleur latente d'évaporation de l'eau. La conséquence de ce constat est une prise de conscience du fait que des caractéristiques physiques, comme la perméabilité diffusive à la vapeur pour le transfert latent dans les isolants très perméables, jusqu'ici considérées principalement comme purement hydriques possèdent en fait une dimension énergétique.

Cette sensibilité des performances thermiques est inhérente à l'acuité du mouvement de la phase gazeuse dans les matériaux. Celle-ci est d'autant plus conséquente dans des matériaux très poreux puisque ce sont ceux présentant une plus grande perméabilité vapeur. **Le socle des réglementations thermiques de l'hyper-isolation des parois se base sur une résistance thermique déclarée évaluée pendant des conditions dites idéales or les conditions hygrothermiques sont dynamiques en réalité.** En d'autres termes, il apparaît que les flux de chaleur mis en jeu dans les isolants sont faibles, il faudrait

que la prise en compte des transferts de masse soit prise en compte puisque les notions d'inertie thermique et de régulation hydrique prennent leur sens dans des phénomènes hygrothermiques périodiques. La considération de l'ensemble des flux thermohydriques ne serait, à l'heure actuelle, pas suffisamment pragmatique des dégradations fonctionnelles et des éventuelles déperditions temporelles des couches isolantes dans l'habitat. Celui-ci ne serait donc pas à même de définir un consensus cohérent entre hygrométrie (hydro-régulation) et isolation sur le long terme.

## 5 Caractérisation des propriétés mécaniques et de reprise en épaisseur d'isolants non tissés : comportement en service

Le comportement mécanique des MNTB, s'il n'est pas la priorité principale de ce travail, est un facteur important à prendre en compte pour des questions de transport, de stockage, de tenue en service. Notamment, pour ce qui concerne le transport, nous avons précédemment vu que le coût de celui-ci concourt actuellement à environ 20% du prix d'achat de ce type de matériau commercialisé (*Tableau 11*). Aussi, dans cette partie, nous nous intéresserons d'une part aux propriétés mécaniques en compression (module d'élasticité, cycle de charge-décharge...) et d'autre part au comportement de reprise en épaisseur après décharge (déformation résiduelle). Également, nous étudierons l'influence des paramètres pertinents (taux de bicomposant, morphologie du bicomposant, conditions hydriques d'ambiance).

### 5.1 *Caractérisation expérimentale 1 : module élastique et reprise en épaisseur*

Différentes échelles d'observations, complémentaires, ont été mise en œuvre dans le projet ECOMATFIB : macroscopique (matériau), mésoscopique (réseau) et microscopique (fibres et contacts). Nous présenterons par la suite les résultats obtenus à l'échelle macroscopique, sur des échantillons de taille décimétrique : essais de compression simple à 85% de déformation, essais de reprise en épaisseur, comme décrits dans la partie 2.3.6. Les résultats obtenus à l'échelle mésoscopique et microscopique, menés en parallèle de cette étude et complémentaires, ne seront pas présentés ici (H. Tran & al, 2016), (Delisée & al., 2017).

#### 5.1.1 *Essais de compression simple sur échantillons de taille 100 x 100 x E (mm<sup>3</sup>)*

##### 5.1.1.1 *Mise en place d'un protocole d'essais*

Le protocole d'essais mis en place sur les grands échantillons met l'accent sur deux points importants à maîtriser : l'épaisseur initiale et la précharge de chaque essai. Ces deux paramètres peuvent varier d'un échantillon à l'autre car la surface des échantillons n'est pas parfaitement plane et la raideur du matériau très faible. On peut le voir sur les résultats de l'essai préliminaire pour l'échantillon de référence PM3S20, présentés ci-dessous (*Figure 110*). Les déformations calculées par corrélation et celles à partir du déplacement de la traverse sur les faces avant et arrière peuvent être différentes avec des écarts malgré tout faibles. Ces fluctuations peuvent être réduites en adaptant le protocole : une précharge est imposée pour que le support haut de la traverse soit en contact avec la totalité de la surface de l'échantillon. L'épaisseur correspondante à cette précharge sera l'épaisseur initiale de l'échantillon.

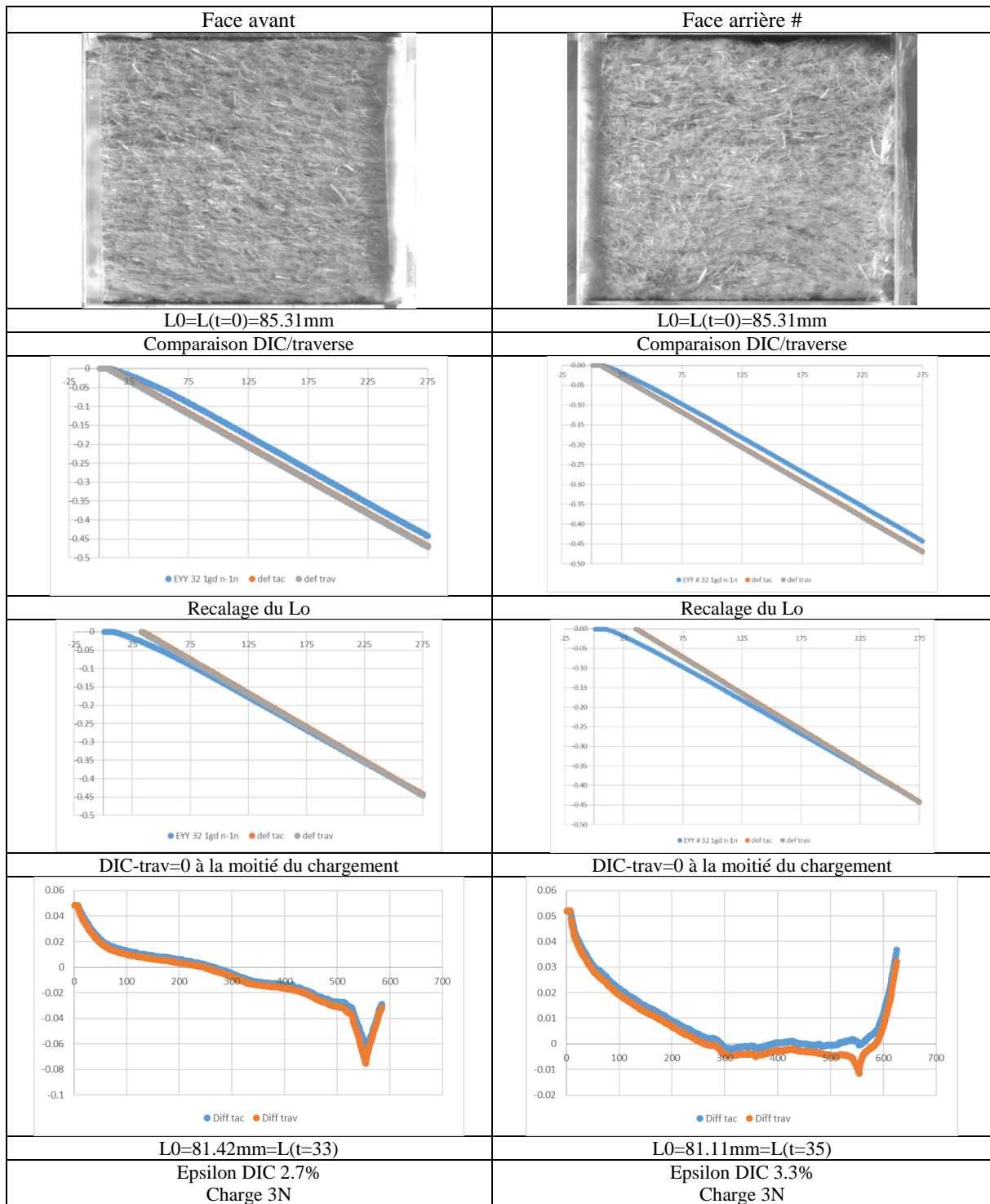


Figure 110 : Protocole des essais de compression simple suivis par imagerie 2D.  
Règlage de l'épaisseur initiale et de l'épaisseur de l'échantillon



### 5.1.1.2 Module élastique fonction des matières premières et des masses volumiques de MNTB

La dimension des échantillons doit être parallélépipédique pour évaluer, selon NF EN 826, leur module élastique (Figure 111).  $X_{10}$  est une déformation de 10% tandis que  $X_e$  est la déformation correspondante à la limite inférieure de la zone élastique.  $F_{10}$  est la charge appliquée à 10% de déformation et  $F_e$  est la charge correspondante à la limite inférieure de déformation élastique. On propose de déterminer la valeur du module élastique par une régression de la zone élastique entre 5 et 10% de déformation.

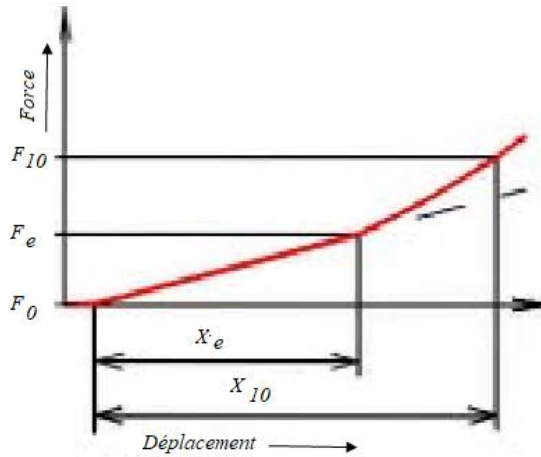


Figure 111 : Zone élastique pour la détermination du module élastique (Tran, 2012)

Les premiers essais de compression ont été réalisés sur des matériaux constitués de fibres de pin maritime et de fibres synthétiques utilisées par STEICO (S). Le module élastique de ces matériaux en fonction de leur masse volumique, est présenté ci-dessous (Figure 112).

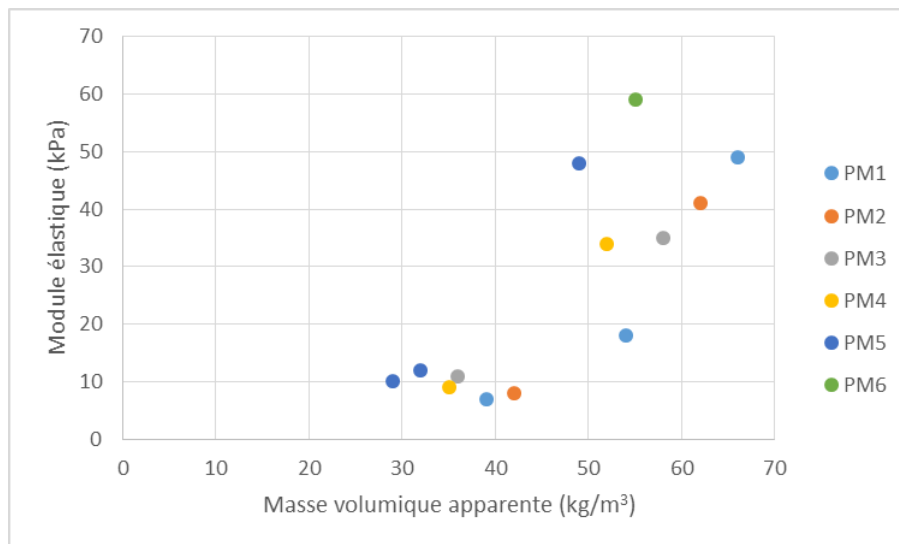


Figure 112 : Module élastique en fonction des masses volumiques apparentes de matériaux référencés PMiS

On note une forte influence de la finesse des fibres et de la masse volumique apparente (liée au taux de compression appliqué dans le four lors de la consolidation thermique) des matériaux fabriqués sur leur module élastique. Il est important de noter qu'à masse volumique apparente équivalente, une finesse croissante des fibres de bois (diamètre décroissant) semble rigidifier progressivement ces matériaux. Les modules élastiques des matériaux contenant des populations de fibres de bois de plus grande taille (PM1, PM2) sont inférieurs à ceux des populations les plus fines (PM5, PM6) à masse volumique équivalente. Ainsi, on obtient par exemple, pour un module élastique donné de 10 kPa, une variation de 44% de masse volumique apparente entre PM2S et PM5S ou pour un module élastique de 45 kPa, une variation de 38% entre PM2S et PM5S. La résistance et la rigidité de ces matériaux sont ainsi principalement déterminées par la distribution de l'orientation des fibres durant la formation de la nappe, **les caractéristiques des fibres** associées au mode et au degré de consolidation.

Avant de rentrer dans l'analyse des plans d'expérience, il convient d'insister sur les taux de reprise en épaisseur à de relatifs forts taux de déformations appliqués sur 11 des MNTB comprenant des fibres de pin maritime (*Figure 113*).

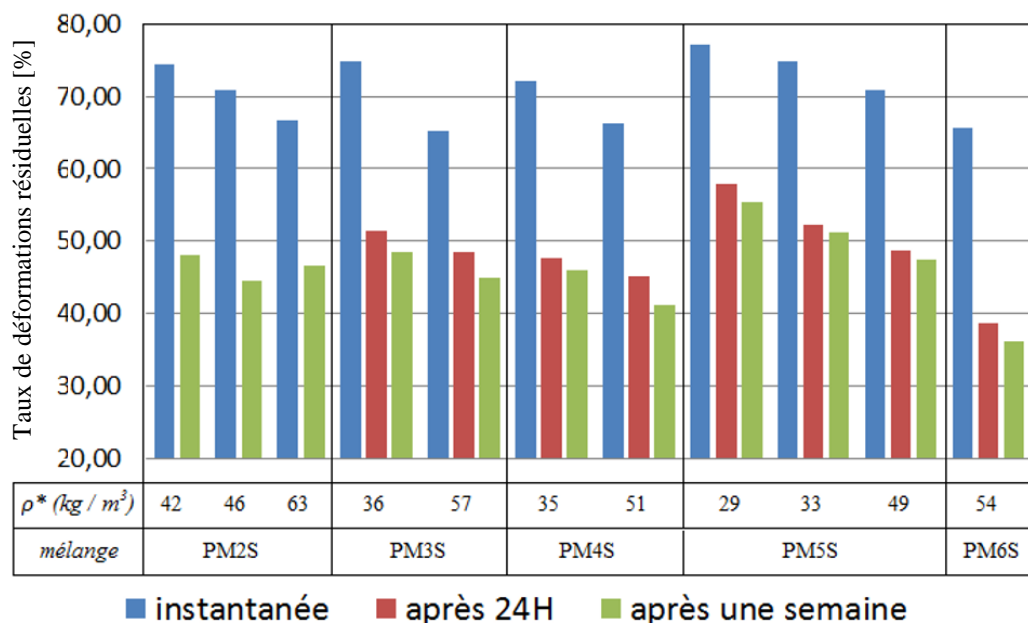


Figure 113 : Taux de déformations résiduelles après décompression de mélanges PMiS en fonction du temps et de leur masse volumique après compression à 85%

Après une compression de 85%, les déformations résiduelles instantanées oscillent entre 80 et 65%. Il est intéressant de noter que celles-ci diminuent par deux après 24h tandis que cette diminution stagne entre 24H et à 1 semaine. Il est utile de noter une tendance à la baisse avec l'augmentation des masses volumiques apparentes initialement (*Figure 113*).

### 5.1.2 Essais de compression simple et reprise en épaisseur sur échantillons de tailles 50mm x 50mm x E (mm<sup>3</sup>) : mise en œuvre d'un plan d'expérience

Les essais sont menés sous imagerie 2D afin de contrôler avec précision, par corrélation d'images 2D, la courbe Force-Déplacement. On peut en déduire notamment la déformation résiduelle après décharge. Une courbe type du cycle, donnant la déformation à partir des mesures réalisées par corrélation d'images 2D, est donnée en Figure 114a. Comme prévu, par le plan d'expérience explicité ci-après (5.1.2.2), différents cycles correspondant à des temps de maintien à la compression maximale retenue sont enregistrés (Figure 114b). On observe, en Figure 115, l'évolution de la déformation en fonction du temps, à partir du relâchement de la charge, et ce pour différents temps de maintien au taux de compression maximale.

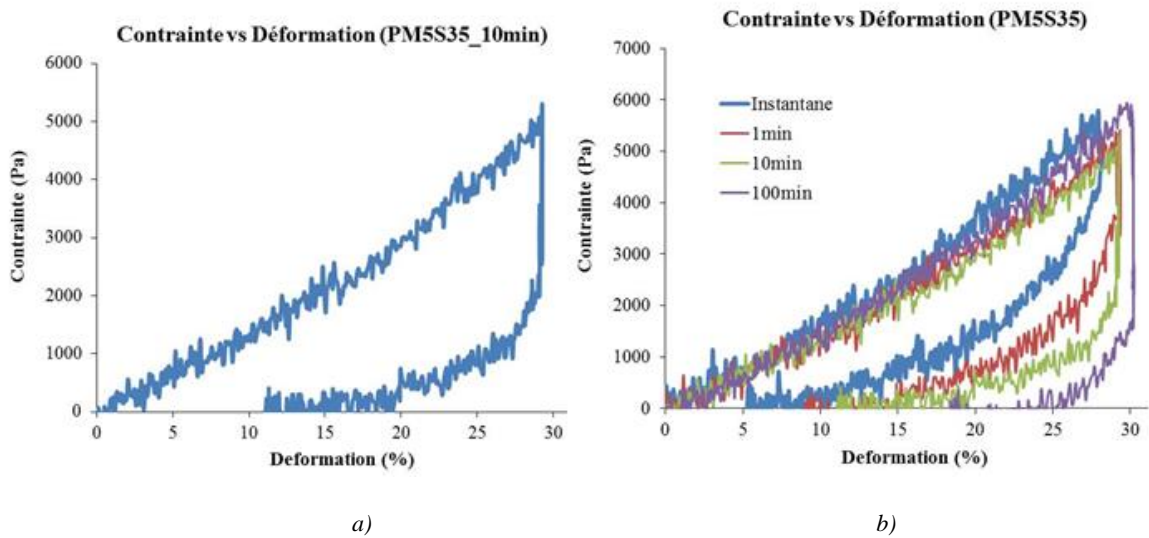


Figure 114 : Courbes Contrainte-Déformation relevées lors de cycles Charge-Décharge sur un matériau du projet.  
 a) Courbe type d'un cycle. b) Courbes de différents cycles correspondant à des temps de maintien croissants.

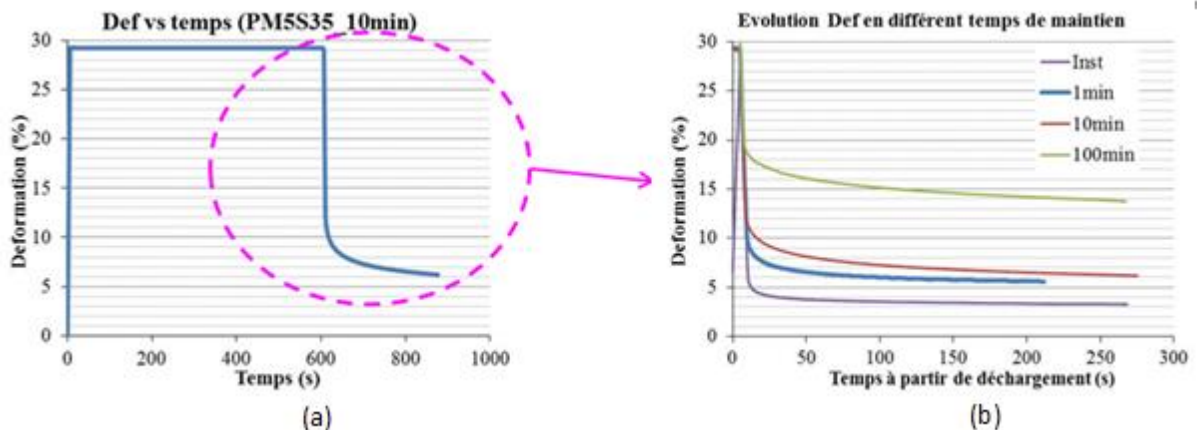


Figure 115 : Evolution de la déformation en fonction du temps lors du relâchement de la charge.  
 a) Courbe type. b) Courbes correspondant à des temps de maintien croissants.

### 5.1.2.1 Mise en œuvre d'une première série d'essais préliminaires

Dans un premier temps, une première série d'essais s'est déroulée en comprimant des échantillons à 30% durant des temps de maintien inférieur ou égal à 100 minutes dont une partie d'entre eux est présentée (Figure 116 & Figure 117).

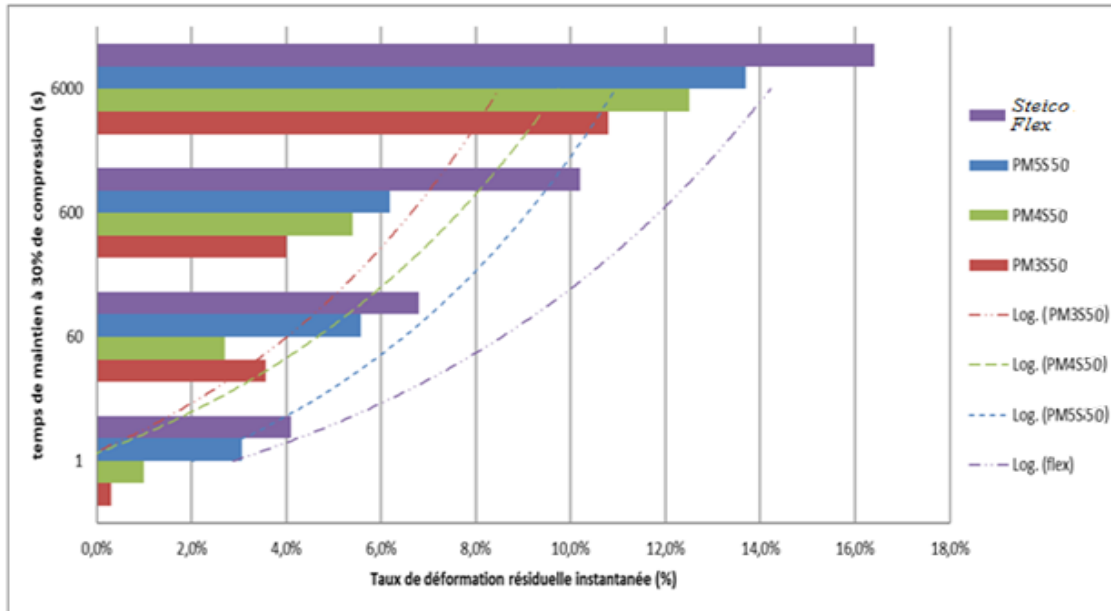


Figure 116 : Evolution des taux de déformations résiduelles instantanées en fonction du temps de maintien à 30% de compression

Au travers des résultats présentés ci-dessus (Figure 116), il apparaît que les déformations résiduelles semblent tributaires du temps de maintien à ce taux de compression de 30%. Comme évoqué précédemment (Figure 113) et à nouveau constaté ci-dessous (Figure 117), les taux de déformations résiduelles continuent d'évoluer temporellement après décompression. Pour être à même d'appréhender correctement cette tendance sur des MNTB, il s'est mis en place la nécessité de plans d'expérience pour les essais qui suivent tels que décrits ci-dessous.

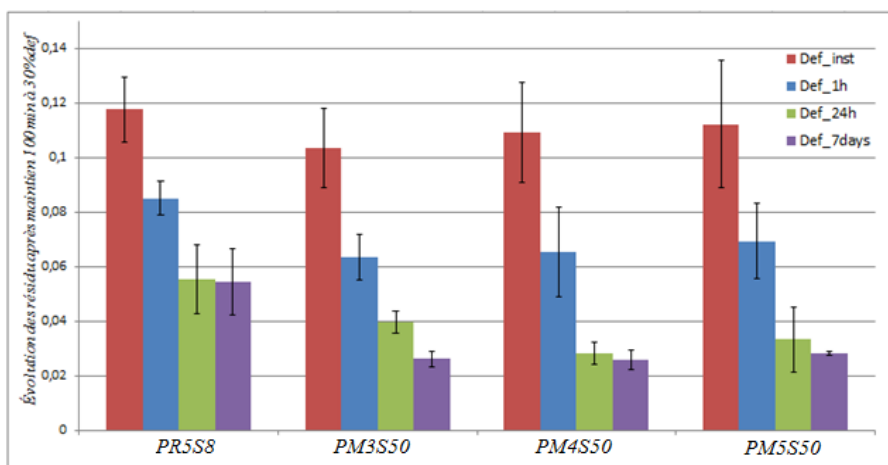


Figure 117 : Evolution temporelle des résidus après décompression

### 5.1.2.2 Mise en œuvre de plans d'expérience

Afin de mesurer l'influence de paramètres pertinents sur la Déformation Résiduelle Instantanée des panneaux, un premier plan d'expérience de type Box-Behnken (DOE1), à 3 facteurs (granulométrie, masse volumique, temps de maintien) et 3 modalités, a été mis en œuvre (Figure 118). Il a été ensuite complété dans un deuxième temps en introduisant un quatrième facteur (taux de compression) (DOE2), comme décrit ci-dessous (Figure 119) :

*DOE1 : Objectif 'Déformation résiduelle minimale à taux de compression constant de 30%'*

- **3 facteurs à 3 modalités** : granulométrie ( finesse) des fibres – masse volumique du panneau - temps de maintien à la compression maximale
- **15 essais**
- **3 répétitions** pour le temps de maintien à 100 min

<i>Modalité</i>	-1	0	1
<i>Granulométrie</i>	PM5	PM3	PM2
<i>Masse volumique</i>	≈ 35 kg/m <sup>3</sup>	≈ 55 kg/m <sup>3</sup>	≈ 80 kg/m <sup>3</sup>
<i>Temps de maintien</i>	100 min	15 jours	1 mois

Figure 118 : Description du plan d'expérience DOE1 à 3 facteurs et 3 modalités

*DOE2 : Objectif 'Déformation résiduelle minimale à taux de compression variable'*

- **4 facteurs à 3 modalités** : granulométrie ( finesse) - masse volumique (densité) - temps de maintien - taux de compression maximale
- **28 essais**
- **3 répétitions** pour le temps de maintien 100 min

<i>Modalité</i>	-1	0	1
<i>Granulométrie</i>	PM5	PM3	PM2
<i>Masse volumique</i>	≈ 35 kg/m <sup>3</sup>	≈ 55 kg/m <sup>3</sup>	≈ 80kg/m <sup>3</sup>
<i>Temps de maintien</i>	100 min	15 jours	1 mois
<i>Taux de compression</i>	15%	30%	50%

Figure 119 : Description du plan d'expérience DOE2 à 4 facteurs et 3 modalités

On peut tout d'abord observer en Figure 120 des résultats du plan d'expérience DOE1 décrit ci-dessus, avec notamment l'influence des paramètres finesse (granulométrie), densité (masse volumique), temps de maintien et taux de compression sur la déformation résiduelle instantanée.

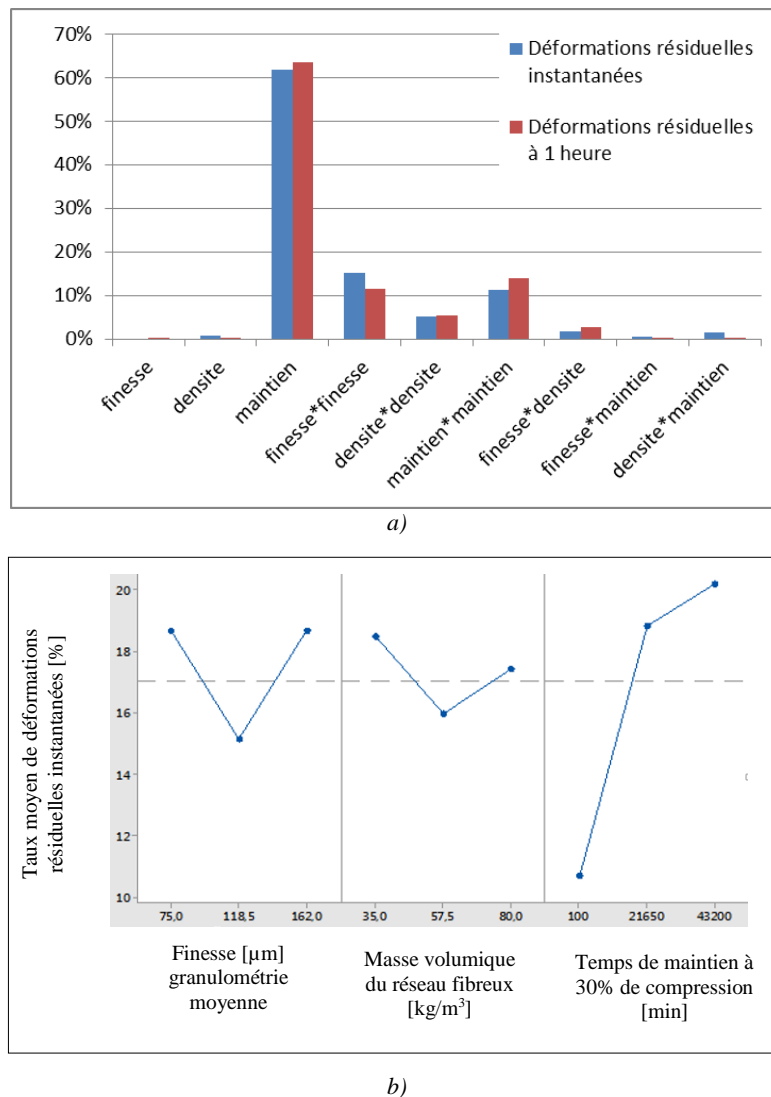


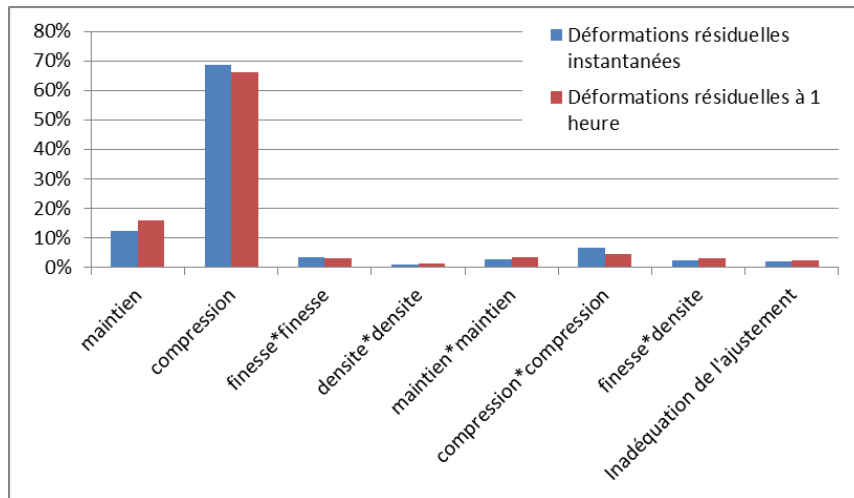
Figure 120 : Résultats du DOE1. a) Analyse de variance : Diagramme de Pareto, b) Graphique des effets principaux pour la Déformation Résiduelle Instantanée (Res. Inst) du DOE1

Le temps de maintien apparaît être le facteur prépondérant du DOE1 puisqu'il contribue à plus de 60% tandis que la non-linéarité entre modalités concoure à hauteur de 35%. Les déformations résiduelles instantanées des MNTB étudiés, après compression à 30% de déformation relative, oscillent entre 11 et 21% correspondant respectivement à des temps de maintien de 100 minutes et d'un mois. Lorsque les déformations résiduelles sont évaluées à 1h, elles diminuent respectivement à 7 et 18%. En suivant l'évolution des déformations résiduelles moyennes jusqu'à 45 jours, après un maintien d'un mois à 30% de compression, il s'avère que cette diminution continue. Celles-ci sont présentées ci-dessous (Tableau 38).

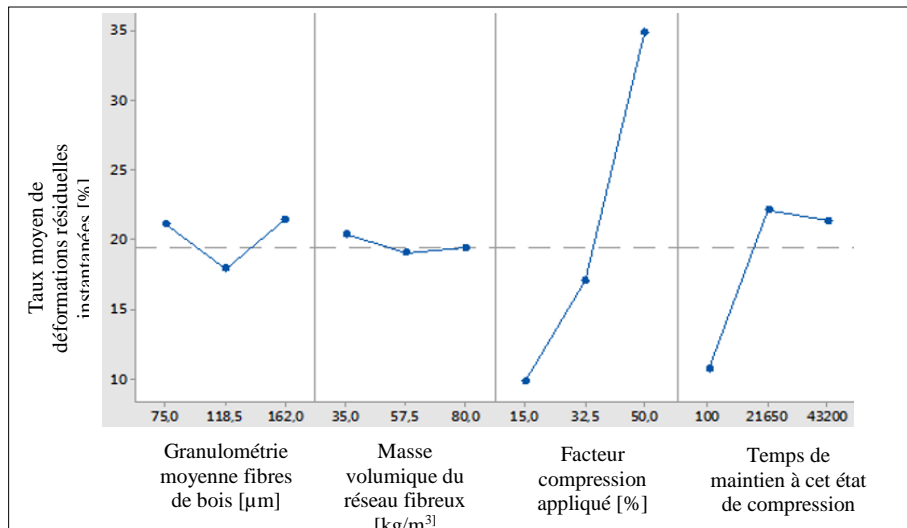
Tableau 38 : Évolution des taux de déformations résiduelles après décompression suite à compression d'un mois à 30%

Temps après arrêt compression	Instantané	1h	24h	7 jours	45 jours
Déformations Résiduelles (%)	+/- 21	+/- 18	+/- 15	+/- 12	+/- 10
Diminution vis-à-vis de Déf. Rés. Inst. (%)		-14%	-29%	-43%	-52%

Concernant les résultats du plan d'expérience DOE2, les graphiques des effets principaux pour les résidus instantanés et de l'analyse de variance sont présentés ci-dessous (Figure 121).



a)



b)

Figure 121 : Résultats du DOE2. a) Analyse de variance (Diagramme de Pareto). b) Graphique des effets principaux pour la Déformation Résiduelle Instantanée (Res. Inst) du DOE2

Cette fois, le taux de compression est le facteur prépondérant puisqu'il concourt à 65% tandis que la non linéarité entre modalités contribue à hauteur de 15%. Dans ce cadre, les taux de déformations résiduelles des MNTB après un maintien d'un mois à des compressions de 15, 30 & 50% s'atténuent en tendant respectivement vers 4, 10 et 25% après 14 jours de décompression (Tableau 39).

Tableau 39 : Évolution des taux de déformations résiduelles après décompression en fonction des taux de compression exercés sur les MNTB pendant 1 mois

Taux de compression	15%	30%	50%
Résidu inst.	13% (-13%)	21% (-30%)	39% (-22%)
Résidu à 1h	8% (-47%)	18% (-40%)	34% (-32%)
Résidu à 14 jours	4% (-73%)	10% (-67%)	25% (-50%)

En synthèse de ces résultats, le temps de maintien apparaît être un facteur prépondérant de la déformation résiduelle dans le cas du DOE1 (taux de compression constant = 30%), mais si l'on rajoute le facteur Taux de compression, dans le cas du DOE2, celui-ci devient à son tour le facteur prépondérant. L'étude de la reprise en épaisseur des MNTB, menée au travers des deux plans d'expérience successifs DOE1 et DOE2, montre des comportements similaires des matériaux ainsi qu'une dépendance forte au taux de compression maximale et au temps de maintien. Ces résultats indiquent que la capacité de reprise en épaisseur des matériaux du projet n'est pas un facteur discriminant de leur comportement, ce qui nous amènera à ne pas prendre en compte ce facteur lors de la démarche finale d'optimisation multi-objectif.

Afin d'étendre ces essais et comparer les performances, ils ont été complétés sur des matériaux du commerce et réalisés sur une laine de verre référencée LM30 et un MNTB référencé Steicoflex dont l'analogie est présentée (Figure 122 et Tableau 40).

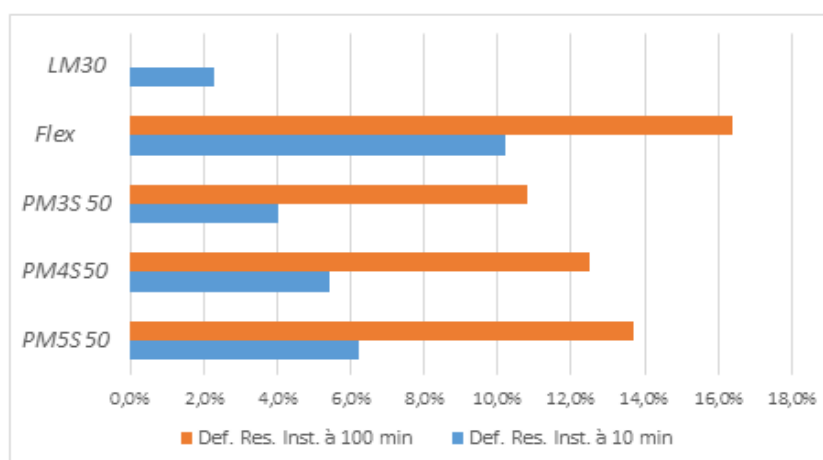


Figure 122 : Déformation résiduelle instantanée des matériaux sélectionnés après déformation de 30%

Cette laine de verre référencée LM30, après un taux de déformation de 30% appliqué durant 10 minutes, présente un taux de déformation résiduelle instantanée de 2,3%. On peut aussi comparer les performances du PM5S50, d'un point de vue microstructural, à celle d'une laine de verre et d'une laine de roche, au travers de données de la littérature (Tableau 40).



Tableau 40 : Appréhension microstructurale d'après (Chapelle, 2016) puis d'un MNTB du projet

Matériau	Masse volumique [kg.m <sup>-3</sup> ]	Granulométrie des fibres [μm]	Granulométrie des pores [μm]
Laine de verre	15	4,4 +/- 4	174 +/- 77
Laine de roche	34	4,5 +/- 4,4	174 +/- 101
PM5S50	35	39 +/- 21	193 +/- 118

Au travers des données figurant ci-dessus (Figure 122, Tableau 40), il apparaît une plus forte résilience des laines minérales que dans celle des laines biosourcées évaluées. Par leur constitution chimique couplée à leur procédé d'élaboration, le comportement mécanique des fibres minérales constitutives des laines de verre est assurément considéré comme étant isotrope (Doutres, 2007). Par ailleurs, si leur formulation n'a pas évolué depuis 10 ans, ces laines minérales contiendraient en masse plus de 90% de fibres et 3 à 5% de liants thermdurcissables du type phénoplaste (phénol-formaldéhyde) (AFFSET, 2008). En complément, leur procédé d'élaboration autorise une répartition quasi uniforme de ces résines thermdurcissables le long du pourtour surfacique des fibres minérales avant que celles-ci se consolident thermiquement.

En s'attardant sur la granulométrie de ces matériaux, il apparaît une plus grande disparité dans celles des réseaux fibreux biosourcés. La description du comportement élasto-viscoplastique constaté dans ces matériaux biosourcés est non linéaire et hystérétique. Leur élasticité est de nature entropique et dès lors qu'ils sont sous contrainte, les réseaux se réorganisent engendrant des mécanismes dissipatifs qui sont fonction de leur état de déformation. Ainsi, si ce type de matériau était parfaitement élastique, on s'attendrait à obtenir une résilience totale proche des 100%. Inversement s'il était parfaitement plastique, la résilience serait nulle. Eu égard aux résultats, on pourrait tout de même statuer sur la nature de ces matériaux fibreux biosourcés qui serait en grande partie poro-élastique.

## 5.2 Caractérisation expérimentale 2 : étude des influences du taux massique et du type de fibres bicomposant, ainsi que de la teneur en eau, sur les déformations résiduelles après compression

### 5.2.1 Influence du taux de bicomposant sur les déformations résiduelles instantanées et à 7 jours

L'influence du taux de bicomposant dans ces MNTB, après les avoir comprimés à 30% durant 100 minutes, donne les résultats présentés en Tableau 41. Les panneaux sont de type SteicoS. Les taux massiques de bicomposant sont pris égaux à 5, 20 et 50%.

Tableau 41 : Principaux résultats sur l'influence du taux massique de fibres bicomposant sur les déformations résiduelles, après compression à 30%

Référence	Steicoflex	SteicoS50	SteicoS50
Taux de fibres bicomposant (% massique)	5	20	50
Masse volumique (kg.m <sup>-3</sup> )	40,1	41	42
Temps de maintien à 30% compression (s)	6000	6000	6000
E (5-10%) (kPa)	8,2	20,8	22,5
Déf. Rés. Inst. (%)	16,4	14,2	10,0
Déf. Rés. J+7 (%)	6,5	3,1	0,2

Il s'avère que les déformations résiduelles diminuent sensiblement avec la proportion de fibres thermoplastiques introduites dans le réseau fibreux. Cette baisse est d'autant plus marquée avec le temps, pour une déformation résiduelle à (J+7). On constate également que le module élastique augmente d'un facteur 3 lorsque le taux massique de bicomposant varie de 5 à 20% et que la relaxation de ces matériaux, illustrée en Figure 123, est d'autant plus marquée lorsque le taux de fibres bicomposant augmente.

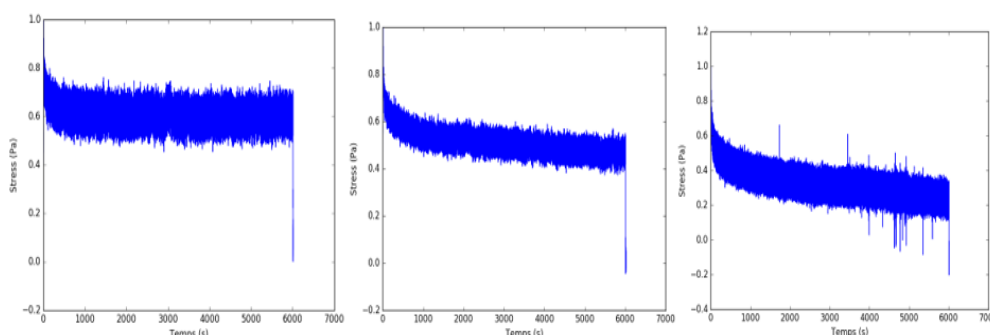


Figure 123 : Relaxation des matériaux composés d'un taux massique de fibres thermoplastiques allant de 5 à 50%

### 5.2.2 Influence de la morphologie du bi-composant

Au regard des résultats présentés (Figure 124), on ne constate pas d'impact particulier de l'utilisation d'autres liants (PLA, EC et S2) ou d'une population de bois plus fibrillée dans ces matériaux. La friction entre fibres constitutives de ces matériaux ne serait donc pas un facteur limitant des MNTB conçus. Ceci n'est pas concordant avec d'autres résultats, extraits de la littérature, présentés sur des laines minérales dans le sens où une plus grande friction limite le réarrangement entre fibres de verre et

qu'un état de surface plus lisse permet d'accroître la reprise en épaisseur sur ces matériaux (Chapelle, 2016).

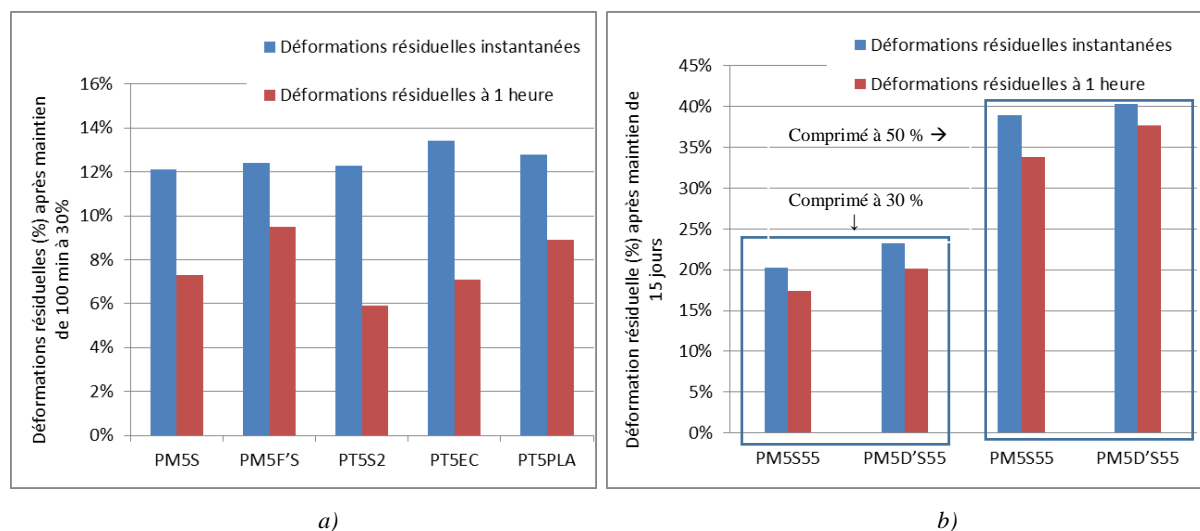


Figure 124 : a) Influence du type de liants thermoplastiques sur les déformations résiduelles après compression  
 b) Influence du degré de fibrillation de la population bois sur les déformations résiduelles après compression

Confrontés avec les résultats sur l'influence du taux de bi-composants, ceci nous amène à l'hypothèse suivante : leur incapacité à résilier, comme le font les laines minérales, est un facteur limitant accentué par **l'insuffisance du nombre et le type de points liants par rapport aux longueurs de phénomènes interfaciaux**. Quelle que soit la variable morphologique étudiée, ces réseaux fibreux ont une réorganisation qui est instantanée et importante pendant la compression couplée à une forte hystérésis et le réseau thermoplastique semble prédominer dans le comportement macroscopique. Ceci peut donc être corroboré avec un taux de liant jugé insuffisant et/ou un temps de consolidation trop court. La plus forte des corrélations se produit entre temps de maintien et taux de déformation résiduelle. Tout matériau a des propriétés viscoélastiques, cependant les matériaux polymères font partis de ceux qui ont le comportement viscoélastique le plus marqué.

L'adhésion bois / thermoplastique serait, effectivement comme évoqué en section 1.4.3, majoritairement de nature mécanique. Dans ce cas, la porosité multi-échelle des fibres de bois (ponctuation, lumens, déchirures, aspérités), la viscosité de l'adhésif, la pression appliquée et la durée du procédé joueraient un rôle clé dans cet ancrage entre les 2 constituants. Ainsi, la matrice thermoplastique entourerait les fibres de bois sans pour autant y adhérer suffisamment. La résultante est un manque de transfert de charge, au niveau des interfaces, donnant des liaisons résolument cassantes (i.e. ordre grandeur force liaisons bois/TP inférieur à TP/TP). L'endommagement de la structure serait donc imputé à des glissements interfaciaux (incompatibilité entre bois et TP). Ceci est corroboré, aux échelles inférieures, puisqu'en effet des hétérogénéités de déformation sont constatées en étudiant l'évolution des orientations des fibres et du nombre de contacts au début et après compression (Delisée & al., 2017).

### 5.2.3 Influence de la teneur en eau sur le comportement en compression

L'influence sur le comportement en compression de la teneur en eau des MNTB a été également évaluée. Les essais ont été réalisés sur des matériaux FinsaS, de masse volumique de l'ordre de 70 kg/m<sup>3</sup>, constitués de fibres bois Finsa et de fibres bicomposant Steico (S), stabilisé à différentes teneurs en eau : 10%, 14%, 20%. Les déformations résiduelles instantanées et à 3h ont été relevées après une compression à 30% appliquée durant 100 minutes (*Tableau 42*).

Tableau 42 : Principaux résultats sur les matériaux comportant des teneurs en eau comprises entre 10 et 20%

Teneur en eau [%]	10	14	20
Masse volumique [kg/m <sup>3</sup> ]	71,9	70,4	71,4
E (5-10%) [kPa]	86,5	57,9	48,4
Contrainte à 30% [Pa]	34900	25600	18600
$\Sigma(T) / \Sigma_0$ à 10 min	0,62	0,47	0,39
Déf. Rés. Inst. [%]	11,1	15,9	18,3
Déf. Rés. 3h [%]	4,3	6,1	7,1

Comme on peut le constater ci-dessus (*Tableau 42*), une augmentation de la teneur en eau initiale dans la phase de compression induit une augmentation des déformations résiduelles après décompression et adoucit également les MNTB testés.

### 5.3 Modélisation du comportement mécanique en compression des MNTB

Dans cette phase de modélisation, on se base sur la relation entre contrainte appliquée et taux de déformation des réseaux fibreux proposée par (Wyk, 1946). Dans le cas des MNTB étudiés ici, on obtient la relation (46) ci-dessous. L'opérateur Kp, déduit de la pente des courbes, caractéristique du comportement macroscopique du matériau a été découplé en considérant la finesse des fibres de bois et son graphique correspondant en Figure 125.

La valeur moyenne du paramètre Kp diminue avec la granulométrie moyenne des fibres de bois constituant ces matériaux.

$$P = (-5.3 \cdot 10^7 \cdot t^{-3.49} + 48.17) \cdot (\mu^3 - \mu_0^3) \quad (46)$$

Avec :

*P*, la force appliquée [kN]

*t*, la finesse des fibres [ $\mu\text{m}$ ]

$\mu$ , la fraction fibreuse volumique

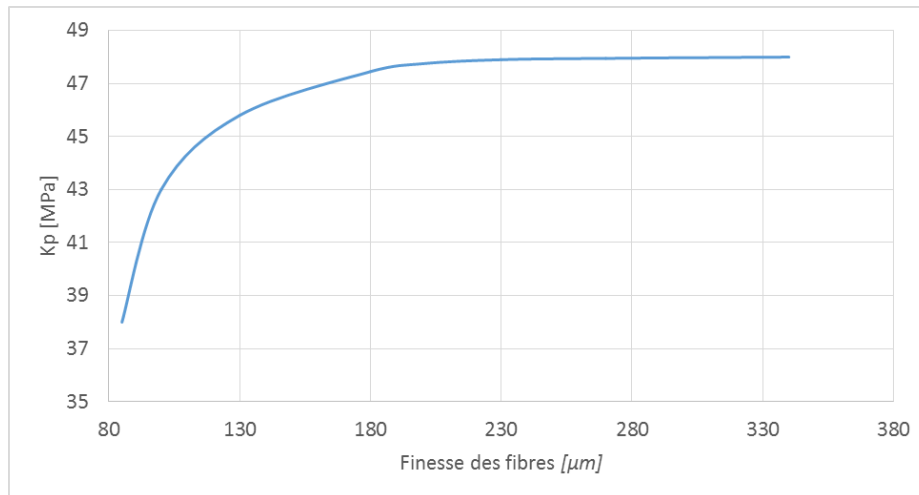


Figure 125 : Résultats de la compressibilité de MNTB conçus dans le projet par la méthode Van Wyk

#### 5.4 Discussion des résultats obtenus sur les propriétés mécaniques des MNRB

Après analyse de l'impact de plusieurs facteurs modifiant la structure de ces matériaux, la plus forte corrélation sur leur comportement et leur déformation résiduelle se produit entre le taux de compression et le temps de maintien. Les déformations résiduelles après décompression tendent à s'atténuer de moitié après deux semaines de déchargement en fonction des déformations appliquées durant 1 mois. Parmi les variables morphologiques étudiées, le réseau thermoplastique est celui prévalant sur les autres. Un comportement viscoélastique marqué expliquerait l'hystérésis et la relaxation de ces matériaux qui sont également modulés par les deux facteurs intrants ayant la plus forte corrélation. Cette étude a donc permis de corréler différentes variables sur l'optimisation du volume pris par ces matériaux durant le transport.

A l'heure actuelle, leur compression permettrait un gain en volume de 50% influant directement sur le coût du transport. Néanmoins ne retrouvant pas leur volume initial après décompression, il y aurait une solution minimisant leur coût d'achat en réduisant le coût du transport sur ces matériaux. Celle-ci statuerait, qu'après les avoir conçu vers  $25\text{-}30\text{ kg/m}^3$  à une épaisseur de 15 à 30 cm puis en les transportant comprimés de moitié, à 50% et donc pour division du volume transporté par 2, qu'il serait envisageable en ayant un résiduel de 30% de les vendre après décompression à une épaisseur apparente de 10 à 20 cm tout en ayant une masse volumique de  $40\text{ kg/m}^3$ . Ceci réduirait notablement les temps passés dans le four durant leur consolidation et avec une meilleure conductivité thermique que celle prévue initialement.

## Conclusion

Ce travail de thèse avait comme objectif l'optimisation des performances d'isolants thermiques fibreux à base de bois. Pour cela, les étapes d'écoconception puis de caractérisation ont été mises en œuvre. Après leur fabrication, grâce à une meilleure compréhension des phénomènes de transferts de chaleur et de masse inhérents aux études théoriques et expérimentales existantes, ainsi que par les travaux réalisés, plusieurs leviers d'actions ont été mis en évidence.

La première étape, qui a représenté une part importante et fondamentale de ce travail, a consisté à identifier les paramètres de réglages adéquats permettant de maîtriser puis contrôler et optimiser la fabrication de ces matériaux. Celle-ci a mise en exergue l'influence de la morphologie des matières premières et des réseaux préalablement formés avant que ceux-ci ne soient consolidés thermiquement. L'énergie imputée à leur conception est effectivement grandement liée à la conception des fibres, à leur quantité et aux temps nécessaires à leur consolidation thermique.

Après conception de nombreux matériaux, la mesure de la conductivité thermique équivalente  $\lambda$  a été réalisée grâce au dispositif disponible au laboratoire, basé sur un régime transitoire quasi-établi, permettant une estimation indirecte de  $\lambda$  à partir des mesure d'effusivité et de capacité thermique. Ces mesures ont été complétées et comparées à des mesures réalisées en industrie, selon la méthode normée, en régime permanent. Les propriétés thermiques des matériaux ont été mises en évidence avec de surcroît l'influence prépondérante de l'humidité relative de l'air ambiant dans tous les matériaux isolants thermiques fibreux dès lors que ces derniers ont un taux de porosité supérieur à 90%.

Dans notre cas, par la modélisation d'une fonction représentative de la conductivité thermique apparente en fonction des masses volumiques apparentes conçues, la diminution progressive du diamètre moyen des fibres de bois produites permet d'obtenir un gain de masse volumique optimal dans la conductivité thermique apparente minimale de ces matériaux.

Ces matériaux étant très poreux, une partie de leur thermicité est liée aux propriétés optiques de leurs constituants. Etroitement liée à leur contribution radiative, celle-ci est d'autant plus importante quand leur constitution solide s'amoindrit dans le volume global les représentant. Cette dernière étant régulée, en partie, par le degré de division de la matrice solide au travers d'indices topologiques et par l'homogénéité de ces matériaux. Il découle également que les propriétés thermiques des matériaux conçus sont étroitement liées aux paramètres de fabrication et à l'hygrométrie.

En effet, les échanges thermiques et de vapeur d'eau sont interdépendants dans les matériaux très poreux. Ces transferts de masse n'étant actuellement pas suffisamment pris en compte dans les simulations à l'échelle d'un Bâtiment, l'ensemble des flux énergétiques ne seraient donc pas totalement représentatifs du caractère dynamique de la totalité de ces transferts mais une approximation pouvant s'accroître en fonction de l'emplacement géographique et également par la constitution des parois aux

abords de ces matériaux isolants. Les principaux facteurs intrinsèques de l'ensemble de ces matériaux seraient ainsi leur topologie et les facteurs environnementaux.

Les matériaux biosourcés développés dans le cadre de cette thèse sont de bons régulateurs hydriques et cette capacité, lorsqu'elle est pondérée vis-à-vis de leur masse volumique, les distinguent de la plupart des matériaux utilisés dans la construction puisqu'elle leur est supérieure. Il ressort de la préconception et des caractérisations thermohydriques réalisées dans le projet ECOMATFIB que le procédé non tissé utilisé au laboratoire I2M est très bien adapté pour fabriquer des matériaux isolants thermiques à base de bois encore plus poreux et comportant des fibres de bois encore plus fines que ceux disponibles sur le marché. Il en résulte également la possibilité de valoriser des matières premières biosourcées, disponibles sur le marché forestier français, amenant le cas échéant à des morphologies de fibres adaptées. Les conductivités thermiques, qu'elles soient mesurées ou déclarées, s'optimisent à partir des paramètres de fabrication et de la morphologie des matières premières.

L'intervention couplée de cette propriété avec la capacité thermique et la masse volumique des matériaux régissent l'inertie thermique. Celle-ci met en évidence que les isolants thermiques à base de fibres de bois se distinguent à nouveau, à l'heure actuelle, de ceux régulant le marché européen puisqu'ils présentent de meilleures facultés à interagir avec le flux d'air y circulant dès lors qu'il est dynamique puisqu'il n'est que très rarement sec. Cette inertie thermique lorsqu'elle s'associe à la régulation hydrique, inhérente à la perméabilité vapeur et aux facultés d'interaction avec l'eau comprise dans celle-ci, contribueraient indéniablement à l'amélioration des performances énergétiques à l'échelle matériau.

Après étude de leur résilience, il a été mis en évidence que la contribution du réseau thermoplastique prédomine dans les critères morphologiques étudiés de ce type de matériaux. Il en ressort également que par leur constitution, leur comportement mécanique est intrinsèquement lié aux phénomènes interfaciaux s'y formant lors de leur conception. Leur nombre et leur orientation sont directement impactés par la proportion massique respective de fibres de bois et thermoplastiques introduits lors de la formation des matelas tandis que les types de contact découlent des matières premières et de leur consolidation thermique.

## Perspectives

Eu égard au coût respectif global des MNTB, il est d'intérêt dans un premier temps de s'intéresser à la géométrie et à la constitution des fibres thermoplastiques disponibles ou réalisables puisque celles-ci ne permettent pas à l'heure actuelle de parvenir à limiter les coûts associés au transport lors de leur phase de mise sur le marché.

Leur coût de vente étant lié à grande hauteur aux masses volumiques, la limitation des fractions solides est, à l'heure actuelle, restreinte puisque la proportion des contributions radiatives devient conséquente dans de tels cas. Il serait intéressant de parvenir à obtenir des fibres de bois dont le diamètre moyen est plus fin qu'il ne l'a été dans le projet puisque ce dernier, conditionnant la surface spécifique disponible dans ces matériaux, permet un accroissement des interactions entre phénomènes radiatifs et le milieu. Pour la restriction de ses phénomènes, il est envisageable de s'y focaliser d'un point de vue optique en s'intéressant aux longueurs d'ondes spécifiques dans lesquelles, le milieu est totalement transparent (extinction nulle) et d'y remédier par l'ajout, fonction de l'échelle, de réflecteurs basse émissivité et/ou d'oxydes métalliques.

Indépendamment de l'aspect financier (concours), il advient qu'importe l'essence utilisée, qu'il est nécessaire d'obtenir des fibres de bois de faible diamètre avec une longueur suffisante pour concevoir des matelas. Plus elles le seront, des réglages commençant par le matériel nécessaire à leur fabrication ainsi que lors de la formation des nappes sont à apporter aux échelles industrielles.

Comme évoqué, l'ensemble des matériaux fibreux isolants thermiques présentent une très faible résistance au flux de vapeur y circulant parmi eux. À l'inverse des laines minérales, le positionnement de MNTB dans l'enveloppe des bâtiments permettrait de le réguler et in fine, d'améliorer le confort thermo hydrique voir, selon l'emplacement géographique et leur environnement immédiat, de façon significative. L'ensemble de ces variations thermohydriques nécessitent une étude de sensibilité qui évaluerait l'évolution des températures et des pressions de vapeur à l'échelle bâtiment. Il serait ainsi opportun de réaliser une étude permettant, à la fois, de l'attester et de le chiffrer. Celle-ci nécessiterait une évaluation de l'incidence de ces MNTB dans les parois d'un bâtiment, elle-même inhérente à sa composition, fonction de l'environnement intérieur et extérieur.



## Références bibliographiques

- Adabie. (2002). Moisture performance of building materials : from material characterization to building simulation using the Moisture Buffer Value Concept. *Building and Environment Vol. 44 Issue 2*, 388-401.
- ADEME. (2013). *Chiffres clés du bâtiment*.
- AFFSET. (2008). *Fibres minérales artificielles siliceuses*. Agence Nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail .
- Aitken & al. (1988). Constituants fibreux des pates papiers et cartons, pratique de l'analyse. *CTP-EPFG*.
- Akerholm & al. (2001). Interaction between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopus. *Polymer 42*, 963-969.
- Albrecht. (2006). *Nonwoven fabrics : Raw materials, Manufacture, Applications, Characteristics, Testing Processes*. W. ALbrecht, H. Fuchs, W. Kittelmann \_ WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim ISBN: 3-527-30406-1.
- Altendorf & al. (2011). 3D directional mathematical morphology for analysis of fiber orientations. *Image Analysis & Stereology*, 28 : 143-53.
- Andreassen & al. (1995). Melting behavior of polypropylene fibers studied by differential scanning calorimetry. *Journal of applied polymer science Vol. 57, Issue 9*, pp 1075-1084.
- Arambakan & al. (2013). A simple simulation method for designing fibrous insulation materials. *Materials and design 44*, 99-106.
- Arambakan. (2013). *Modeling effect of microstructure on the performance of fibrous heat insulation*. PhD, Virginia Commonwealth University.
- Bankvall. (1972). Heat transfert in fibrous materials. *Journal of testing and evaluation*, 99-106.
- Barranger & al. (2012). Strain Measurement by Digital Image Correlation: Influence of Two Types of Speckle Patterns Made from Rigid or Deformable Marks. *Strain 48*, 357–365.
- Bauer-Kruz. (2000). *Fiber Crimp and Crimp Stability in Nonwoven Fabric Processes, PhD thesis*. North Carolina State University.
- Beil & al. (2002). Modeling and Computer Simulation of the Compressional Behavior of Fiber Assemblies : Part I : Comparison to Van Wyk's Theory \_ Part II : Hysteresis, Crimp and Orientation Effects. *Textile research Journal 72(4) \_ Textile research Journal 72(5)*, 341-351 \_ 375-382.
- Berthold & al. (1996). Association of water to polar groups ; estimations by an adsorption model for ligno-cellulosic materials. *Colloids and Surfaces A : Physicochemical and Engineering Aspects 112*, 117-129.
- Bhat & al. (2004). Thermal bonding of polypropylene nonwovens : Effect of bonding variables on the structure and properties of the fabrics. *J. Appl. Polym. Sci. 92*, 3593-3600.
- Bhattacharrya. (1980). Heat transfer model for fibrous insulations, Thermal insulation performance. *ASTM STP 718, McElroy, D.L. and Tye, R.P. (eds) American Society for testing and materials*, pp 272-286.

- Billon & al. (2015, 07 10). Propriétés et comportement mécanique de polymères thermoplastiques. *AM3115 V1 Techniques-Ingénieur*.
- Björn. (2011). *Tradiationnal State of the Art and Future Thermal Building Insulation Materials and Solutions - Properties, Requirements and Possibilities*. Trondheim, Norway: Department of Materials and Structure, SINTEF Building and Infrastructure.
- Bresenham. (1985). *Run Length Slice Algorithm for Incremental Lines*. Earnshaw RA, *Fundamental Algorithms for Computer Graphics*, Springer Berlin Heidelberg.
- Brinson & al. (2015). *Polymer Engineering science and viscoelasticity : an introduction (second edition)*.
- Brisset & al. (2015). *Abibois\_ Environnement Bois : Analyse environnementale bâtiment*. [http://www.fibois-alsace.com/UserFiles/File/Plaquette%20Analyse\\_Environ\\_Batiment\\_ABIBOIS.pdf](http://www.fibois-alsace.com/UserFiles/File/Plaquette%20Analyse_Environ_Batiment_ABIBOIS.pdf).
- Carmeliet & al. (2005). Hysteresis and moisture buffering of wood. *Proceedings of the 7th Symposium on Building Physics in the Nordic Countries*, (pp. 55-62). Reykjavik.
- Carnaby & al. (1989). Theory of fibrous hysteresis of fibrous assemblies. *Textile Research Journal*, Vol. 59.
- Carnaby & al. (1989). Theory of compression hysteresis of fibrous. *Textile Res. Inst.*, vol. 59, pp. 275-284.
- Carnaby. (1987). The Tangent Compliance of Staple-fibre Bundles in Tension. *J. Textile Inst.* 78, 293-305.
- Centexbel. (2009). Récupéré sur <https://docplayer.fr/24317752-nouveaux-materiaux-centexbel-info-le-textile-protège-les%20hommes-et-le%20patrimoine-culturel-contre-les-catastrophes-naturelles.html>
- Chapelle. (2016). *Characterization and modelling of the mechanical properties of mineral wool*. PhD thesis. Technical University of Denmark (DTU).
- Chereche & al. (2010). Experimental and Numerical Approach of the thermal Conductivity of Building Façade Materials. *WSEAS TRANSACTIONS on Heat and Mass Transfer*, issue 3, Vol. 5, 103-112.
- Collet. (2017). Hygric and Thermal Properties of Bio-aggregate Based Building Materials. *State of the Art Report of the RILEM Technical Committee 236-BBM*, pp. 125-147.
- Commission Européenne. (2013). *EU Energy, Transport and GHG emissions, Trends to 2050, reference scenario 2013*. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.
- COPACEL. (2018). *Rapport statistique 2017*. Paris: Union Française des industries des cartons, Papiers et Cellulose.
- Coquard & al. (2012). *Modélisation du transfert thermique dans les matériaux d'isolation du bâtiment : application aux mousses de polystyrène expansé*. Récupéré sur <http://www.knauf-archi.fr/sites/default/files/pdf/knauf-archi-02.pdf>
- Daïan. (2013). *Equilibre et transfert en milieux poreux*. hal-00452876v5: 645p.
- de Boisseson, J.-M. (2014). La sylviculture du pin Taeda en Aquitaine. *FCBA Info*.
- De Gennes. (1971). Reptation of a polymer chain in the presence of fixed obstacles. *The journal of chemical physics* 55.

- De Gennes. (1979). *Scaling Concepts in Polymers Physics*. Cornell University Press, Ithaca and London.
- Degiovanni & al. (1993). Mesure de l'effusivité thermique de matériaux solides et homogènes par une méthode de sonde plane. *Journal de physique III - T3*, n°6, 1243-1265.
- Delisée & al. (2001). *Isolant thermique épais à base bois*. Rapport final, Contrat ADEME.
- Delisée & al. (2017). *Eco-conception et optimisation multi-objectif de matériaux isolants à base de fibres de bois*. Rapport Final ADEME. 89 pages plus annexes.
- Delisée. (2009). *Caractérisation et modélisation de structures fibreuses cellulosiques à architecture complexe. apport de la microtomographie X*. 351 cours de la Libération, Bât A11. 33405 TALENCE Cedex: HDR, UNITÉ SCIENCES DU BOIS ET DES BIOPOLYMÈRES US2B.
- Delisée C. & al. (2010). 3D Morphology and Permeability of Highly Porous Cellulosic Fibrous Material. *Transp Porous Med* 83, 623–636.
- Delorme, M. (2013). Construction bois : la réponse adéquate pour la RT2012/RT2020. *3ème Forum International Bois Construction 2013*, (p. 13). Beaune.
- Derbal. (2014). *Développement méthode inverse de caractérisation thermique : application à l'estimation des propriétés thermophysiques et hydriques des matériaux de construction*. Thèse Faculté des Sciences Appliquées de Béthune.
- Derome. (1999). *Moisture occurence in roof assemblies containing moisture insulation*. Concordia University: PhD thesis.
- Di Giuseppe & al. (2016). Reliability evaluation of automated analysis, 2D scanner, and microtomography methods for measuring fiber dimensions in polymer-lignocellulosic fiber composites. *Composites Part A* 90, 320-329.
- Doi & al. (1979). Dynamics of concentrated polymer systems\_ Part 4 ; Rheological properties. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions 2*. 74.
- Donaldson & al. (1995). Clonal Variation and repeatability of microfibril angle in pinus radiata. *New Zealand Journal of Forestry Science* 25(2), 164-174.
- Donaldson. (2002). Abnormal lignin distribution in wood from severely drought stresses Pinus radiata tress. *IAWA*, 23, 161-178.
- Donaldson. (2001). Lignification and lignin topochemistry : an ultrastructure view. *Phytochemistry* 57, 859-873.
- Doutres. (2007). *Caractérisation mécanique de matériaux fibreux en vibro-acoustique*. Thèse. LAUM - Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Mans.
- Duforestrel. (2014). *Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherche sur l'efficacité énergétique des bâtiments*. Université Claude Bernard Lyon 1: HDR.
- Edana. (2019). *Formation, bonding*. Récupéré sur <https://www.edana.org/discover-nonwovens/how-they're-made>
- El-Sawalhi & al. (2015). Estimation of the thermal conductivity of hemp based insulation material from 3D tomographic images. *Heat and Mass Transfer*.
- El-Sawalhi. (2015). *Caractérisation expérimentale et modélisation multi-échelle des transferts de chaleur et de masse au sein d'un isolant à structure fibreuse*. Thèse La Rochelle.

- Engelund & al. (2013). A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Sci. Technol.* 47, 141-161.
- Engelund. (2011). *Wood-water interactions, Linking molecular level mechanisms with macroscopic performance*. PhD.
- European Environment Agency. (2017). *Climate change, impacts and vulnerability in Europe 2016. An indicator-based report. No 1/2017*.
- European Panel Federation. (2019). *Annual report*.
- Faessel & al. (2005). 3D modelling of random cellulosic fibrous networks based on X-ray tomography and image analysis. *Composites Science and Technology*, 65(13), 131-140.
- Fauchard & al. (2009). Mesures de teneurs en eau volumique et massique sur. *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, pp 109-125.
- Forest products statistics*. (2019, mai). Récupéré sur Food and Agriculture Organization of the United Nations: <http://www.fao.org/forestry/statistics/80938/fr/>
- France, M. (2019). *Bilan climatique de l'année 2018*. Récupéré sur MeteoFrance: <http://www.meteofrance.fr/climat-passe-et-futur/bilans-climatiques/bilan-2018/bilan-climatique-de-l-annee-2018>
- Frihart. (2005). Wood adhesion and adhesives. *Handbook of wood chemistry and wood composites*, pp. 214-278.
- Gadot. (2015). *Mécanique des milieux fibreux auto-enchevêtrés : application à un alliage à mémoire de forme de type*. Université Grenoble: Thèse en Mécanique des structures.
- Germaneau & al. (2007). Full 3D Measurement of Strain Field by Scattered Light for Analysis of Structures. *Experimental Mechanics*, 47, pp 523-532.
- Guitard. (1987). Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annales des sciences forestières, INRAA/EDP Sciences*, 44(3) 335-358.
- H. Tran & al. (2016). Multi-scale characterisation of mechanical compression behaviour of wood-based fibrous composites for optimisation of insulation performances. *Journées Jeunes Chercheurs en Eco-composites et Composites Bio-sourcés*. Clermont-Ferrand: IFMA-SIGMA.
- Hagentoft. (2001). *Introduction to Building Physics*. Studentlitteratur.
- Harrington. (2002). *Hierarchical modeling of softwood hygro-elastic properties*. Christchurch, New Zealand: PhD in Mechanical Engineering, University of Canterbury.
- Hedge. (2006). *Influence of material variables in thermal bonding of nonwovens\_Master Thesis*.
- Hoballah & al. (2018). Formulating preliminary design optimization problems using expert knowledge : Application to wood-based insulating materials. *Expert Systems With Applications*, 95-105.
- Hoballah. (2017). *"Optimisation multiobjectif d'un isolant à base de fibre de bois" Thèse*. Ecole Supérieure du bois: Ecole Doctorale Sciences Pour l'Ingénieur - Centrale Nantes.
- Holcombe. (1984). The Thermal Insulation Performance of Textile Fabrics. *Wool. Sci. Rev.*, 12-22.
- Hossain. (2014). *Extension of the use of cellulose nanowhiskers in composite materials*. Nottingham: PhD Thesis.

- Hubbel & al. (1995). Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients from 1 keV to 20MeV form elements.
- Huetz-Haubert. (1995). Rayonnement thermique des matériaux semi-transparents. *Techniques de l'ingénieur*, p2645.
- Hunter. (1993). On movement of water through wood - The diffusion coeficient. *Wood Science and Technology* 27(6), 401-108.
- IGN. (2019, 05). *Institut national de l'information géographique et forestière*. Récupéré sur inventaire-forestier IGN: <https://inventaire-forestier.ign.fr/>
- Jeffrey & al. (1991). Hydrogen Bonding in Biological Structures. *SpringerVerlag*.
- Kaemmerlen. (2009). *Transfert de chaleur à travers les isolants thermiques du bâtiment*. Nancy 1: Thèse Université Henry-Poincaré en mécanique et énergétique.
- Kim & al. (2002). Effect of Bonding Temperature on Load-Deformation Structural Changes in Point-Bonded Nonwoven fabrics. *Textile Research Journal* 72 (7), 645-653.
- Kim & al. (1998). Enginnering Interfaces in Fibre-Reinforced Composite. Elsevier, Oxford.
- Kim. & al. (2001). Characterizing structural changes in point-bonded nonwoven fabrics during load-deformation experiments. *Textile research journal*, Vol. 71 Issue 2, 157-164.
- Kol. (2009). Thermal and Dielectric properties of pine wood in the transverse direction. *Bioressources\_ Vol. 4*, 1662-1668.
- Komori & al. (1991). Theory of the general deformation of fiber assemblies. *Textile Research Journal*, vol. 61, n. 10,, pp. 588-594.
- Komori & al. (1997). Analyzing the compressibility of a random fiber mass based on the modified theory of fiber contact. *Textile Research Journal* Vol. 64, 204-210.
- Komory & al. (1977). Number of fiber-to-fiber contacts in general fiber assemblies. *Textile Research Journal*, Vol. 47, pp. 13-17.
- Komory &al. (1992). A model analysis of the compressibility of fiber assemblies. *Textile Research Journal* 62, 567-574.
- Krapez. (2006, 10). Mesure de l'effusivité - Introduction. *Technique de l'ingénieur\_ r2957*.
- Labat. (2012). *Chaleur, Humidité, Air dans les maisons à ossature bois : Expérimentation et modélisation*. Thèse de l'Insa Lyon.
- Lambert. (2017). Communication personnelle avec l'entreprise Steico.
- Lamèthe. (2004). *Etude de l'adhésion de composites thermoplastiques semi-cristallins ; application à la mise en oeuvre par soudure*. Thèse. Paris VI: Université Pierre et Marie Curie.
- Langlais. (1995). Influence of the Chemical Composition of Glass on Heat Transfer through Glass Fibre Insulations in relation to Their Morphology and Temperature Use. *J. Thermal Insul. And Bldg. Envs. Vol 18*, 350-375.
- Langlais, C., & Klarsfeld, S. (2004). Isolation thermique à température ambiante, bases physiques. Dans *Techniques de l'ingénieur* (pp. 1-17).
- Laroche. (2013). *Manuel technique d'utilisation Cadette 1000*.

- Lecourt & al. (2009). Laccase-mediator system, an alternative to facilitate the flax fibre properties development during refining. *6th International Conference on Textile and Polymer Biotechnology*, (pp. 23-25). Ghent \_ Belgium.
- Lecourt, M. (2004). La mise en pâte mécanique. *AFOCEL, Informations - Forêt*.
- Lee & al. (1985). Initial compressional behavior of fibre assembly. In objective measurement : application to product design and process control. *Osaka : The Textile Machinery Society of Japan*, pp. 618-622.
- Lee. (1989). Effect of fiber orientation on thermal radiation in fibrous media. *International Journal of Heat and Mass transfer*, vol 32, n°2, p311.
- Lux & al. (2018). Gas permeability of Ti6Al4V foams prepared via gelcasting, experiments and modeling . *Computational Materials Science (152)*, 363-373.
- Lux & al. (2006). Macroscopic thermal properties of real fibrous materials : volume averaging method and 3D image analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49:1958-73.
- Lux. (2005). *Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles*. Bordeaux: Thèse Université Sciences et Technologie.
- Lux. (2010). A Non-periodic Closure Scheme for the Determination of Effective Diffusivity in Real Porous Media. *Transport in Porous Media*, Volume 82, Issue 2, pp 299–315.
- Madhuri. (2002). *The influence of fiber properties and processing conditions on the characteristics of needle fabrics*. PhD Raleigh.
- Mainguy & al. (1999). *Modélisation des transferts hydriques isothermes en milieux poreux : Application au séchage des matériaux à base de ciment*. Thèse. Paris, Laboratoire des ponts et chaussées.
- Marquardt. (1963). An Algorithm for Least-Squares Estimation of Nonlinear Parameters. *SIAM J. Appl. Math* 11, 431-441.
- Marulier. (2013). *Etudes multi-échelles des couplages entre les propriétés hygroélastiques des papiers et leur microstructure*. Grenoble: Thèse de doctorat en Matériaux, mécanique, génie civil, électrochimie.
- Masoudi. (2015). A Novel Micromechanical Model of Nonlinear Compression Hysteresis in Compliant Interfaces of Multibody Systems. *Multibody System Dynamics* 37(3), pp 325–343.
- Masoudi. (2012). *Micromechanics of Fiber Networks Including Nonlinear Hysteresis and its Application to Multibody Dynamic Modeling of Piano Mechanisms*. PhD Thesis, University of Waterloo, Ontario, Canada.
- Matinez-Hergueta & al. (2015). Deformation and energy dissipation mechanisms of needle-punched nonwoven fabrics : A multiscale experimental analysis. *International Journal of solids and structure*, Vol. 64-64, 120-131.
- Michielsen & al. (2006). Review of thermally point-bonded nonwovens : Materials, processes and properties. *Journal Applied Polymer Science*.
- Ministère de l'Écologie, d. D. (2011). *Réglementation thermique 2012 : un saut énergétique pour les bâtiments neufs*. Paris: Citizen Press.
- Navi. (2005). Effects of Thermo-Hygro-Mechanical Treatment on the Structure and Properties of wood.

- Neckar & al. (2003). *A contribution to Van Wyk's theory of contacts between fibers*. Loughborough University, UK: Spring Symposium: The Fiber Society.
- Neckar. (1997). Compression and packing density of fibrous assemblies. *Textile Research Journal*, vol. 67, pp. 123-130.
- Ngo & al. (2016). Thermal conductivity of transparent and flexible polymers containing fillers : A litterature review. *International Journal of Heat an Mass Transfer* 98, 219-226.
- Nomadéis. (2017). *Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits bio-sourcés utilisés dans la construction - Partie 1 : Etat des lieux économique du secteur et des filières*.
- Oh. (2006). Melt spinning and drawing process of PET side-by-side bicomponent fibers. *journal of Applied Polymer Science Vol. 101 (3)*, 1362-1367.
- Osanyintola & al. (2006). Moisture buffering Capacity of Hygroscopic Building Materials : Experimental Facilities and Energy Impact. *Energy and Building* 38, 1270-1282.
- Osso. (1998). *Etat de l'art, physicochimie de l'interface bois-polymère*. Rapport provisoire CST 98/001.
- Pagora. (2019, Avril). Récupéré sur <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr/icg/Dossiers/Papier/chap2-fab.html>
- Parviz & al. (2005). Comportement thermo-hydromécanique du bois - Applications technologiques dans les structures. *PPUR (presses polytechniques et universitaires romandes)*.
- Perré & al. (2006). Mass diffusivity of beech determined in unsteady state using a magnetic suspension balance. *Drying technology*, 1341-1347.
- Persson. (2000). *Micromechanical modelling of wood and fibre properties*. Lund, Sweden: Doctoral thesis, Department of mechanics and materials.
- Peuhkuri & al. (2004). *Moisture Buffer Capacity of Different Insulation Materials*. CONFERENCE PROCEEDING by ASHRAE, 2004.
- Peuhkuri. (2003). *Moisture Dynamics in Building Envelopes, PhD thesis*. Department of Civil Engineering Technical University of Denmark.
- Peyrega & al. (2011). 3D Morphological Characterization of Phonic Insulation Fibrous Media. *Advanced Engineering Materials* 13(3), 156 - 164.
- PIPAME. (2012). *Marchés actuels des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020*. DGCS Prospective.
- Poquillon & al. (2007). *Compression de fibres enchevêtrées calibrées en nylon et aluminium. Expériences et modélisations*. Grenoble: 18ème Congrès Français de Mécanique.
- Prahsarn & al. (2013). Self-crimped bicomponent fibers containing polypropylene/ethylene octene copolymer. *Materials Letters* 91, 232–234.
- Rode & al. (2007). Moisture buffer value of building materials. *Journal of ASTM International* 4(5), pp. 1-12.
- Rode. (2003). Workshop on Moisture Buffer Capacity - Summary Report. *Nordest Workshop on Moisture Buffer Capacity*. Technical University of Denmark: Dept. of Civil Engineering.
- Rode. (2005). *Moisture Buffering of Building Materials*. BYG DTU-126 Report, Department of Civil Engineering, Technical University of Denmark.

- Ruel & al. (2006). The wood cell wall at the ultrastructural scale - formation and topochemical organization. *Madera. Ciencia y tecnologia* 8(2), 107-116.
- Salmén & al. (1998). Interaction between hemicelluloses, lignin and cellulose : structure - property relationships. *J. Pulp Pap Sci* 24, 99-103.
- Schach & al. (2007). Role of chain interpenetration in the adhesion between immiscible polymer melts. *Macromolecules* 40, 6325-6332.
- Siau. (1984). *Transport processes in wood*. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Series in Wood Science.
- Simpson. (1980). Sorption theories applied to wood. *Wood Fiber Sci.* 12(3), 183-195.
- Singh & al. (2004). Energy and chemical composition dependance of mass attenuation coefficients of building materials. *Annals of Nuclear Energy*, 31(10), 1199-1205.
- Stamm & al. (2004). Joining wood by friction welding. *Holz als Roh- und Werkstoff* 63, 313-320.
- Stamm. (1964). *Wood and cellulose science*. Ronald press, New York, 549 pp.
- Time. (1998). *Hygroscopic Moisture Transport in Wood*. PhD of Norwegian University of Science and Technology : Department of Building and Construction Engineering.
- Tran & al. (2013). 3D mechanical analysis of lowdensity wood-based fiberboards by X-ray microcomputed tomography and Digital Volume Correlation. *Journal of Materials Science* 48, 3198-3212.
- Tran. (2012). *Study of compression behavior of wood-based fiberboards : characterization from non-destructive image techniques*. Thèse Uni. Bordeaux 1.
- Traore. (2011). *Transfert de chaleur et de masse dans les parois de bâtiments à ossature bois*. Nancy: Doctorat de l'université Henry-Poincaré.
- Triboulot. (2012, 11). Matériau bois - Structure et caractéristiques. *C925 Techniques de l'ingénieur*.
- UIPP. (2019). Récupéré sur Union des industries des Panneaux de Process: <http://www.uipp.fr/uipp-produits.html>
- Vallabh. (2005). *Thermal Barrier Properties of Flame Resistant Nonwovens*. Raleigh: Master Science.
- Vignon & al. (2015, 09 24-25). Manufacturing process optimisation of wood-based fibrous insulating materials. *4th Forum of wood building Nordic, Växjö Sweden*.
- Vignon & al. (2016, September 8th-10th). Thermal insulating materials made up of poplar wood fibres. *2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/Willow Wood*.
- Vincent. (2007). *Modélisation et simulation en trois dimensions d'un réseau fibreux en vue de prédire ses propriétés physiques*. 2007: Thèse INP Grenoble.
- Voillot. (2004, Février 2). *Le papier, un matériau complexe*. Récupéré sur <http://cerig.pagora.grenoble-inp.fr>.
- Wang & al. (2002). Morphology gradients in thermally point-bonded polyethylene therephtalate nonwovens. *Textile Research Journal*, 72: 394-398.
- Watanabe & al. (1998). Transverse shrinkage of coniferous wood cells examined using replica method and power spectrum analysis. *Holzforshung*, 200-206.



- Wool. (2000). R.P. Polymer Diffusion: reptation and interdigitation. *Packam DE, Handbook of adhesion 2nd Edition*.
- Wyk. (1946). Note of the compressibility of wool. *J. Text. Inst. Trans., vol. 37*, 285-292.
- Zhang & al. (1993). Hot wire measurement of thermal conductivity of solids : a new approach,. *High temperatures, high pressure vol 25.*, pp 577-584.
- Zhou & al. (1993). Micromechanical characterization of fiber-matrix interface. *Compo. Sci. Technol.*, 48:227-236.
- Zürcher, C., & Frank, T. (2014). *Physique du bâtiment, construction et énergie*. VDF.

## Liste des figures

Figure 1 : Évolution française des exigences réglementaires RT des bâtiments neufs (Ministère de l'Écologie, 2011).....	1
Figure 2 : Présentation des impacts environnementaux de quelques matériaux isolants à R égale (Brisset & al, 2015).....	2
Figure 3 : Répartition des parts de marché par type d'isolants en France en 2012 (PIPAME, 2012)....	3
Figure 4 : Image MEB d'une coupe transversale de papier à base de pâte de feuillus .....	6
Figure 5 : Répartition des surfaces de peuplement. a) de pin maritime b) de peuplier .....	8
Figure 6 : Carte de la répartition des surfaces de peuplements recensés par l'inventaire forestier national .....	8
Figure 7 : Procédés utilisés pour la fabrication de panneaux en fibres de bois (Delisée, 2009) .....	10
Figure 8 : Profils de densité dans l'épaisseur des panneaux. (Delisée, 2009). a) Procédé par voie sèche de type MDF : les panneaux présentent un profil de densité en U avec des surdensités sur les faces. b) Procédé textile non-tissé : on peut observer la variabilité de la densité dans l'épaisseur .....	11
Figure 9 : Visuel de la macrostructure du bois (Triboulot, 2012) .....	11
Figure 10 : Visuels de la microstructure (Aitken & al, 1988) .....	12
Figure 11 : Plans ligneux. a) de feuillus (frêne) b) de résineux (pin sylvestre) (Triboulot, 2012).....	12
Figure 12 : Structure multi-échelle du bois (Harrington, 2002) .....	13
Figure 13 : Évolution de la composition chimique ultra structurale dans la paroi cellulaire (Persson, 2000).....	13
Figure 14 : Isothermes d'adsorption à 25°C des hémicelluloses, du bois et de la lignine (Navi, 2005) 15	15
Figure 15 : Faisceaux de fibres de bois et fibres individuelles de pin maritime (Lux, 2005) .....	16
Figure 16 : Morphologie de sections disponibles de fibres bicomposant (Centexbel, 2009).....	17
Figure 17 : Illustration de liaisons entre fibres thermoplastiques (cas fibres mono-composant) .....	19
Figure 18 : Visualisation d'un réseau Bois/PES.....	20
Figure 19 : Évolution de la conductivité thermique effective d'un isolant en fonction de sa masse volumique apparente .....	22
Figure 20 : Relations entre conductivité thermique, masse volumique, diamètre des fibres et flux surfacique de rayonnement des laines de verre. a) Variation de la conductivité thermique de laines de verre fonction de leur masse volumique et du diamètre de leurs fibres (Langlais, 1995). b) Flux surfacique de rayonnement en fonction du diamètre des fibres de laines de verre (Huetz-Haubert, 1995) .....	24
Figure 21 : Niveaux d'énergie relatifs (enthalpie) de la vapeur d'eau, de l'eau liquide, de la glace et de l'eau liée (sorbée) dans le bois en fonction du taux d'humidité (Time, 1998).....	28
Figure 22 : Capacité thermique du Steico Therm en fonction de sa teneur massique en eau (Traore, 2011) .....	30
Figure 23 : Évolution des températures de surface de l'air à l'échelle européenne depuis 40 ans.....	31
Figure 24 : Tendances de l'évolution des températures annuelles à l'échelle européenne de 1960 jusqu'à 2015 (European Environment Agency, 2017).....	32
Figure 25 : Évolution de la conductivité thermique apparente pour quelques matériaux poreux en fonction de leur teneur en eau massique, d'après (Cherche & al, 2010), (Kol, 2009), (Derbal, 2014) 33	33
Figure 26 : Effusivités hydriques mesurées de quelques matériaux utilisés dans le bâtiment d'après (Rode, 2003).....	35
Figure 27 : Évolution de la classe des tampons hydriques (Rode, 2003) .....	37
Figure 28 : Essai de compression sur fibreux bois/PES .....	39
Figure 29 : Fibres de pin maritime de référence venant de .....	41
Figure 30 : a) vue d'ensemble du défibreux Andritz b) un des 3 segments utilisés constituant une couronne de plaques (Lecourt, 2004) .....	42
Figure 31 : Tailles attendues des lots de fibres de pin maritime (pour les 6 modalités) dépendant de l'espacement des entrefers.....	42
Figure 32 : Sélection de photographies montrant la gamme de granulométries et de couleurs de fibres produites par le FCBA.....	43
Figure 33 : Vue d'ensemble du Bauer Mac Nett avec ses réservoirs et leurs tailles respectives .....	44

Figure 34 : Résultats de fractionnement obtenus sur les fibres du projet.....	44
Figure 35 : Consommation énergétique en fonction des essences et de la modalité de défilage .....	45
Figure 36 : Visuels des fibres au sein des réseaux enchevêtrés a) fibres de bois après raffinage pouvant être encore regroupées en faisceaux ou être individualisées b) sur lesquels se distinguent les ponctuations aérolées et vaisseaux (Images ESB).....	46
Figure 37 : Principe d'acquisition d'images par micro-tomographie X. Cas d'une source conique.....	47
Figure 38 : Rendus volumiques 3D des 6 références de fibres de pin maritime produites par le FCBA .....	48
Figure 39 : Traitement préliminaire des images micro-tomographiques avant mesures morphologiques sur les fibres .....	48
Figure 40 : Fréquences des diamètres des différentes populations de fibres de Pin Maritime.....	49
Figure 41 : Représentation schématique des indices $M_a$ et $M_{c_h}$ .....	49
Figure 42 : Relation entre la consommation d'énergie au défilage et les diamètres moyens des populations de fibres .....	51
Figure 43 : Images MEB des fibres thermoplastiques de référence fournie par STEICO (ESB Nantes) .....	52
Figure 44 : Analyse DSC du principal bicomposant utilisé dans le projet.....	52
Figure 45 : Vue d'ensemble de l'ouvreuse nappeuse d'I2M à Talence [Equipex Xyloforest] .....	54
Figure 46 : Visuels de la carte et du condenseur (tambour perforé).....	54
Figure 47 : Schéma de côté de l'ouvreuse nappeuse (Laroche, 2013) .....	54
Figure 48 : Vue d'ensemble du four à air chaud Strahm d'I2M à Talence [Equipex Xyloforest] .....	55
Figure 49 : Représentation schématique du four Strahm avec identification des différentes zones (chiffres en rouge) .....	56
Figure 50 : Analyseur DAX5000 .....	57
Figure 51 : Dispositif de mesures du dispositif DESPROTHERM.....	59
Figure 52 : Réponse en température, sur la face avant, à une excitation de type « plan chaud » (Desprotherm, 2014) .....	60
Figure 53 : Réponse en température, sur la face avant, à une excitation de type « plan chaud ».....	60
Figure 54 : Réponse en température, sur la face arrière, à une excitation de type plan chaud.....	62
Figure 55 : Champ d'orientation locale calculée sur une image de l'échantillon PM5S (100x100x100 voxels). Les orientations sont représentées sous forme de segments de droite normalisés et colorés selon la composante z : les orientations dans le plan transverse sont beiges tandis que les orientations selon Oz apparaissent bleues. ....	65
Figure 56 : Montage d'un essai de compression sur des échantillons (100x100xEpaisseur).....	68
Figure 57 : Montage d'essai de reprise en épaisseur sur des échantillons cubiques (50x50xEpaisseur) .....	68
Figure 58 : Visuels des fibres de bois fournies par les 2 industriels du projet .....	71
Figure 59 : Visuel des 2 premières fibres thermoplastiques utilisées.....	72
Figure 60 : Visuel des 8 premiers matériaux produits.....	72
Figure 61 : Quantification des conductivités thermiques mesurées en fonction de la masse volumique apparente des MNTB référencés dans le Tableau 21 .....	75
Figure 62 : Dépôt de la matière première sur tapis alimentaire puis vues de face d'une nappe formée	77
Figure 63 : Visuel d'un matelas à l'entrée du four Strahm puis dans sa phase de refroidissement.....	79
Figure 64 : a) mélange avec fibres de bois de type 1, b) mélange avec fibres de bois de type 5 .....	80
Figure 65 : Vue d'entrée du four Strahm et dépôt d'un matelas à son entrée avant sa consolidation thermique.....	80
Figure 66 : Distributions des diamètres des fibres avant et après ouvraison : cas des fibres Pin maritime PM5, PM2 et Peuplier PR5 .....	82
Figure 67 : Relation entre le temps de consolidation, ramené à l'épaisseur des matelas dans le four, et la masse volumique attendue de matériaux à base de fibres PM, PR et EU .....	83
Figure 68 : Cycle caractéristique de consolidation thermique des MNTB dans le four.....	83
Figure 69 : Aperçu global d'un panneau, après découpe sur ses extrémités en sortie du four.....	85
Figure 70 : Illustration d'un panel de spécimens de MNTB réalisés à partir de fibres thermoplastiques (réf S) et de fibres de pin maritime (en haut), pin taeda (au centre), peuplier et eucalyptus (en bas, de gauche à droite) .....	85

Figure 71 : Stockage d'un panel de spécimens référencés PM3S dans la salle régulée à 20°C/65%RH .....	85
Figure 72 : Vue des sections droites de MNTB réalisés à partir de fibres de pin maritime de granulométries différenciées : PM2S (à gauche) et PM5S (à droite).....	86
Figure 73 : Masse volumique apparente des matériaux fabriqués en fonction du taux de compression, pour chaque essence .....	86
Figure 74 : Évolution du rapport $\rho^*_{\text{panneau}} \times E_{\text{matelas}} / \rho^*_{\text{matelas}} \times E_{\text{panneau}}$ en fonction du taux de compression appliqué sur les matelas lors de leur consolidation thermique .....	87
Figure 75 : Relation entre taux de reprise en épaisseur et taux de compression durant la consolidation thermique des matériaux comportant les fibres de bois fabriquées par le FCBA associées à la fibre thermoplastique intitulée S .....	87
Figure 76 : Relation entre l'épaisseur obtenue des MNTB en fonction de celle initiale avant leur passage au four pondérée par le taux de compression appliqué .....	88
Figure 77 : Graphique des effets principaux résultant de la finesse des fibres de pin maritime constituant le matelas et du taux de compression durant leur consolidation thermique en fonction des masses volumiques apparentes obtenues .....	88
Figure 78 : Graphique des effets principaux résultant de la finesse des fibres de pin maritime constituant le matelas et du taux de compression durant leur consolidation thermique en fonction des temps nécessaires pour que la température au sein de ces matériaux atteigne la température demandée .....	89
Figure 79 : Masse volumique moyenne mesurée avec le dispositif Grecon, en fonction de la masse volumique apparente des matériaux .....	90
Figure 80 : Variation de la masse volumique ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dans l'épaisseur des MNTB analysés .....	91
Figure 81 : Profil de masse volumique pour les matériaux référencés PM1S20 et PM1S54 .....	91
Figure 82 : Profil de masse volumique pour les matériaux référencés PM5S50, PM5S70 & PM5S76 .....	91
Figure 83 : Homogénéité de la masse volumique des matériaux fabriqués en fonction du facteur de compression CR(%) appliqué durant la consolidation (barre verticale représentant l'intervalle de confiance moyen) .....	92
Figure 84 : Visuels des contacts entre fibres a) contact bois PM5 / thermoplastique, b) contact bois PM3 / thermoplastique, c) contact rigide et frottant thermoplastique / thermoplastique .....	93
Figure 85 : Zoom sur les contacts fibres de bois – fibres thermoplastiques .....	93
Figure 86 : a) fibre synthétique dont une partie de sa gaine ne recouvre plus l'âme .....	94
Figure 87 : Teneur massique en eau en % de différents panneaux à 65%/20°C .....	95
Figure 88 : Évolution des capacités thermiques en fonction du type de bois associé aux bicomposants fournis par STEICO constituant le réseau fibreux et de sa masse volumique lors de la mesure.....	97
Figure 89 : Évolution des conductivités thermiques apparentes en fonction des masses volumiques apparentes de matériaux analysés : a) matériaux issus de matelas PM1S à PM6S), b) comparaison avec les matériaux industriels Steicoflex et Sylvactis et avec les matériaux issus de matelas SteicoS .....	98
Figure 90 : Conductivités thermiques apparentes mesurées pour des matériaux .....	99
Figure 91 : Évolution des conductivités thermiques apparentes en fonction des masses volumiques apparentes de MNTB, pour des valeurs supérieures à $80 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .....	100
Figure 92 : Évolution des conductivités apparentes mesurées à 20°C/65%RH fonction de la masse volumique des MNTB composés de fibres de bois d'essences différentes, de modalités de taille 2 ou 5 .....	101
Figure 93 : Temps de séjour dans le four divisé par l'épaisseur de matelas en fonction de la conductivité thermique mesurée avec le dispositif DESPROTHERM .....	102
Figure 94 : Masse volumique apparente optimale en fonction des valeurs du paramètre C, pour les mélanges de type PM <sub>i</sub> , i=1 à 5 .....	104
Figure 95 : Valeurs du paramètre C en fonction du diamètre moyen des populations de fibres de bois de type PM, PT et PR.....	104
Figure 96 : Valeurs de ce coefficient d'extinction massique moyen en fonction des masses volumiques apparentes de MNTB composés de fibres de pin maritime et des fibres thermoplastiques fournies par STEICO .....	105
Figure 97 : Evolution du coefficient d'extinction massique $\sigma_{\text{ext}}$ en fonction des masses volumiques apparentes optimales des mélanges PM <sub>i</sub> S, i = 1 à 5.....	106

Figure 98 : Influence du diamètre moyen des fibres de bois sur la masse volumique apparente optimale de ces MNTB comportant également la fibre thermoplastique fournie par STEICO .....	106
Figure 99 : Évolution des conductivités thermiques apparentes des mélanges PMiS,i = 1 à 5, vers les faibles masses volumiques apparentes (< 60 kg.m <sup>-3</sup> ). Comparatif entre valeurs mesurées et modélisées .....	107
Figure 100 : Évolution des conductivités thermiques apparentes des MNTB composés de fibres PM, PR et PT de modalités 2 & 5, vers les faibles masses volumiques apparentes (< 60 kg.m <sup>-3</sup> ) .....	107
Figure 101 : Influence de la finesse des fibres de bois constitutives des MNTB sur la conductivité thermique apparente à 20°C/65%RH, pour trois diamètres de fibres de bois, modélisée à partir des relations (44) et (45) .....	109
Figure 102 : Fréquence de la taille des pores des MNTB analysés par traitement d'image 3D.....	110
Figure 103 : Comparatif entre conductivités thermiques des matériaux PM2S, PM4S, PM5S, et SteicoFlex, mesurées selon 2 méthodes, A : plan chaud, B : lambdamètre .....	112
Figure 104 : Conductivité thermique apparente évaluée suivant la méthode normalisée du Lambdamètre en fonction de la conductivité thermique apparente suivant la méthode du plan chaud .....	112
Figure 105 : Rapport entre conductivités thermiques évaluées en fonction de la teneur d'eau et déclarée d'après .....	113
Figure 106 : Phase d'absorption de 4 matériaux fibreux du projet & d'un 5 <sup>ème</sup> fourni par l'industriel du projet.....	113
Figure 107 : Valeurs de tampon hydrique obtenues selon le protocole NORDEST, pour des échantillons du projet et des références issues de la bibliographie d'après (Collet, 2017), (Rode & al, 2007).....	115
Figure 108 : Valeurs de tampon hydrique de 5 matériaux du projet confrontées à d'autres matériaux (références issues de la bibliographie d'après (Collet, 2017), (Rode & al, 2007)) obtenus selon le protocole NORDEST pondérées par leur masse volumique .....	115
Figure 109 : a) Visualisation d'une image binaire 3D de MNTB b) Volume initial (5,9*5,9*7,6 mm <sup>3</sup> ) analysé par corrélation d'images volumique puis sous volume (720* 720* 720 μm <sup>3</sup> ) de ce MNTB (Tran, 2012).....	116
Figure 110 : Protocole des essais de compression simple suivis par imagerie 2D.....	121
Figure 111 : Zone élastique pour la détermination du module élastique (Tran, 2012) .....	122
Figure 112 : Module élastique en fonction des masses volumiques apparentes de matériaux référencés PMiS.....	122
Figure 113 : Taux de déformations résiduelles après décompression de mélanges PMiS en fonction du temps et de leur masse volumique après compression à 85% .....	123
Figure 114 : Courbes Contrainte-Déformation relevées lors de cycles Charge-Décharge sur un matériau du projet.....	124
Figure 115 : Evolution de la déformation en fonction du temps lors du relâchement de la charge. ...	124
Figure 116 : Evolution des taux de déformations résiduelles instantanées en fonction du temps de maintien à 30% de compression.....	125
Figure 117 : Evolution temporelle des résidus après décompression.....	125
Figure 118 : Description du plan d'expérience DOE1 à 3 facteurs et 3 modalités .....	126
Figure 119 : Description du plan d'expérience DOE2 à 4 facteurs et 3 modalités .....	126
Figure 120 : Résultats du DOE1. a) Analyse de variance : Diagramme de Pareto, b) Graphique des effets principaux pour la Déformation Résiduelle Instantanée (Res. Inst) du DOE1 .....	127
Figure 121 : Résultats du DOE2. a) Analyse de variance (Diagramme de Pareto).b) Graphique des effets principaux pour la Déformation Résiduelle Instantanée (Res. Inst) du DOE2 .....	128
Figure 122 : Déformation résiduelle instantanée des matériaux sélectionnés après déformation de 30% .....	129
Figure 123 : Relaxation des matériaux composés d'un taux massique de fibres thermoplastiques allant de 5 à 50% .....	131
Figure 124 : a) Influence du type de liants thermoplastiques sur les déformations résiduelles après compression.....	132
Figure 125 : Résultats de la compressibilité de MNTB conçus dans le projet par la méthode Van Wyk .....	134

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Production française et mondiale de panneaux à base de fibres de bois en 2017 (Forest products statistics, 2019) .....	7
Tableau 2 : Production mondiale de chaque type de panneaux à base de bois en 2017 (Forest products statistics, 2019).....	7
Tableau 3 : Constituants chimiques de la matière ligneuse dans les différentes couches de la paroi. ..	14
Tableau 4 : Ordre de grandeur des propriétés des polymères utilisés dans la production de fibres bicomposants à 20°C .....	17
Tableau 5 : Conductivité thermique [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ] à 25°C / $P_{atm}$ de quelques matériaux d'après (Albrecht, 2006), (FPL, 1999) .....	22
Tableau 6 : Recommandations pour l'optimisation de la conductivité thermique équivalente (conduction et rayonnement) d'isolants thermique fibreux, en relation avec les paramètres caractéristiques des réseaux.....	25
Tableau 7 : Capacités thermiques massiques d'après (Albrecht, 2006), (Zürcher & Frank, 2014) .....	26
Tableau 8 : Évolution des quantités respectives d'air sec et humide en fonction de leurs températures .....	31
Tableau 9 : Impact de la teneur en eau volumique $\theta$ [%] dans des isolants sur leur conductivité thermique .....	33
Tableau 10 : Ordre de grandeur des coûts d'isolants thermiques disponibles sur le marché Français fonction des caractéristiques thermiques à la fin 2016 et au début 2019 .....	38
Tableau 11 : Répartition des coûts du panneau « Steicoflex » .....	38
Tableau 12 : Modalités (diminution progressive espace entrefer) étudiées pour chaque essence et référencement des échantillons .....	43
Tableau 13 : Correspondance entre numéro et taille des tamis utilisés pour la séparation des fibres... ..	44
Tableau 14 : Dispositifs de micro-tomographie mis à disposition du projet.....	47
Tableau 15 : Paramètres caractéristiques des granulométries des fibres de pin maritime conçues par le FCBA ainsi que celles fournies par les partenaires du projet.....	50
Tableau 16 : Diamètres moyen et maximal de l'ensemble des fibres de bois produites par le FCBA ..	50
Tableau 17 : Fibres polymères thermoplastiques utilisées dans le projet.....	51
Tableau 18 : Paramètres de l'ouvreuse Cadette, réglables lors de la formation des nappes de fibres... ..	53
Tableau 19 : Paramètres du four Strahm réglables lors de la consolidation thermique des matelas .....	55
Tableau 20 : Référencement du nombre d'essais réalisés associé au nombre de matériaux distincts évalués.....	69
Tableau 21 : Propriétés physiques des 8 matelas tests : CR (%) taux de compression appliqué, $\rho^*$ [ $kg \cdot m^{-3}$ ] masse volumique apparente, $\sigma$ écart type, $\Delta$ (%) reprise en épaisseur, $C_p$ [ $J \cdot Kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ] capacité thermique.....	73
Tableau 22 : Taux de répartition des fibres par classe d'orientation par rapport au plan des panneaux	74
Tableau 23 : MNTB conçus avec des réglages différents dans le four ou plus forte masse volumique attendue .....	75
Tableau 24 : MNTB conçus en faisant varier significativement le taux massique de fibres thermoplastiques les constituant.....	76
Tableau 25 : Principaux réglages lors de la formation des nappes.....	78
Tableau 26 : Référencement des nappes formées.....	80
Tableau 27 : Pertes massiques relatives lors des étapes d'ouvrison .....	81
Tableau 28 : Granulométrie des populations PM2, PM5 et PR5 avant et après leur ouverture .....	82
Tableau 29 : Principaux panneaux élaborés, associés à la fibre bicomposant de référence S fournie par STEICO.....	84
Tableau 30 : Paramètres de masse volumique pour l'ensemble des échantillons mesurés avec dispositif Grecon .....	90
Tableau 31 : Facteurs de compression appliqués pour mise en épaisseur de 10mm environ et Capacités thermiques mesurées en fonction de la masse volumique apparente $\rho^*_{comp}$ .....	96
Tableau 32 : Valeurs obtenues pour les paramètres B et C, les masses volumiques optimales $\rho^*_{opt}$ ainsi que les conductivités thermiques minimales $\lambda^*_{min}$ .....	103

Tableau 33 : Distribution granulométrique des fibres pour les matériaux PM3S50, PM4S50, PM5S50 et Steicoflex (témoin) .....	110
Tableau 34 : Valeurs du Tampon hydrique ou MBV sur les matériaux composés de mélanges PMiS et des fibres (bois et thermoplastiques) fournies par STEICO .....	114
Tableau 35 : Perméabilité à la vapeur des échantillons de PM5S, PM4S et PM3S. ....	116
Tableau 36 : Facteurs de résistance à la diffusion de vapeur pour les 3 échantillons testés, dans les 3 directions principales des images .....	117
Tableau 37 : Perméabilité à la vapeur du PM5S50, dans les 3 directions principales des images .....	118
Tableau 38 : Évolution des taux de déformations résiduelles après décompression suite à compression d'un mois à 30%.....	127
Tableau 39 : Évolution des taux de déformations résiduelles après décompression en fonction des taux de compression exercés sur les MNTB pendant 1 mois .....	129
Tableau 40 : Appréhension microstructurale d'après (Chapelle, 2016) puis d'un MNTB du projet ..	130
Tableau 41 : Principaux résultats sur l'influence du taux massique de fibres bicomposant sur les déformations résiduelles, après compression à 30% .....	131
Tableau 42 : Principaux résultats sur les matériaux comportant des teneurs en eau comprises entre 10 et 20% .....	133

## Liste des publications personnelles

### Revue internationale à comité de lecture

Michaud, F., Hobballah, M., Moreau, J., Irle, M., Vignon, P., Delisee, C., Ndiaye, A., (2018). Design of a competitive wood-based insulation product with innovation. Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Processing Technologies for the Forest and Bio-based Products Industries (PTF BPI 2018) in "ProLigno" Journal

### Congrès internationaux à comité de sélection avec actes publiés

Hobballah, M., H., Vignon, P., & Tran, H. (2016). Multi-objective optimization of an insulating product based on wood fibre material. AIP Conference Proceedings, 1769(1), 180007. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4963610>

Vignon, P., J. Moreau, C. Delisée, M. Lecourt, H. Tran and T. Sanguina (2016). « Optimisation des propriétés thermiques d'isolants fibreux à base de bois ». 34<sup>e</sup> Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC, 24-27 Mai 2016, Liège, Belgique. Communication orale.

Vignon, P., Hobballah, M. H., Tran, H., Moreau, J., Delisée, C., Lecourt, M., Belalia R. & Sanguina, T. (2016). Thermal insulating materials made up of poplar wood fibres. 2nd Conference on Engineered Wood Products based on Poplar/Willow Wood CEWPPW2, León, Spain.

Vignon, P., M. H. Hobballah, J. Moreau, C. Delisée and M. Irle (2016). « Optimization of the thermal properties of wood fiber-based insulating materials ». Hygrothermal performance of buildings and their materials, Joint Conference: COST Action FP1303 & DURAWOOD Project, 30-31 August 2016, Poznan, Poland.

Vignon, P., Moreau, J., Delisée, C., Lecourt, M., (2015). « Manufacturing process optimisation of wood-based fibrous insulating materials ». 4th Forum of wood building Nordic, Växjö Sweden, 24-25 September 2015. Poster

### Congrès nationaux avec actes publiés ou comité de lecture

P. Vignon, M. Hobballah, H. Tran, J. Moreau, C. Delisée, (2016). Optimisation des propriétés thermiques d'isolants fibreux à base de bois. 5<sup>ème</sup> journée du GDR bois \_ 8-10 novembre 2016 - Bordeaux

Hobballah, M. H., P. Vignon and H. Tran (2016). « Multi-objective optimization of an insulating product based on wood fibre material ». 19th ESAFORM Conference on Material Forming, April 27-29, 2016, Nantes, France. Communication orale

H. Tran, P. Doumalin, C. Delisée, J-C. Dupré, A. Germaneau, J. Malvestio, J-P. Da Costa, P. Vignon, J. Moreau, (2016). "Multi-scale characterisation of mechanical compression behaviour of wood-based fibrous composites for optimisation of insulation performances". Journées Jeunes Chercheurs en Eco-composites et Composites Bio-sourcés. IFMA-SIGMA Clermont-Ferrand, 6-7 Avril 2016.