

---

# Optimisation des propriétés thermiques d'isolants à base de fibres de bois

Pierre Vignon<sup>1,3</sup>, Jérôme Moreau<sup>2,3</sup>, Christine Delisée<sup>3,4</sup>, Mickael Lecourt<sup>5</sup>, Huyen Tran<sup>3</sup>, Thierry Sanguina<sup>1</sup>

<sup>1</sup>FINSA France, F-40110 Morcenx, France

mail : [pierre.vignon@u-bordeaux.fr](mailto:pierre.vignon@u-bordeaux.fr)

<sup>2</sup>ESB, F-44000 Nantes, France

<sup>3</sup>I2M CNRS UMR 5295, F-33400 Talence, France

<sup>4</sup>Bordeaux Sciences Agro, F-33175 Gradignan, France

<sup>5</sup>FCBA Intech, F-38044 Grenoble, France

---

*RÉSUMÉ. Les matériaux à base de fibres de bois sont obtenus à partir de différents procédés qui déterminent la densité des produits et leurs applications. L'un d'entre eux, issu de l'industrie textile et adapté aux fibres de bois, permet la conception de réseaux 3D enchevêtrés de forte épaisseur et de faible densité. Dans le cadre d'un projet, financé par l'ADEME, l'optimisation de ce procédé et des matériaux ainsi fabriqués est actuellement en cours. L'accent est mis, ici, principalement sur l'impact de la morphologie des matières premières, en particulier celles des fibres de bois et des réglages du procédé de fabrication sur la structure interne et les propriétés thermiques apparentes des panneaux. Les premiers résultats d'un plan d'expérience complet basé sur des morphologies différentes de fibres de pin maritime mettent en évidence le rôle primordial de la densité apparente au travers des relations procédés d'élaboration / morphologie des réseaux fibreux / propriétés thermiques.*

*ABSTRACT. Wood fibre-based materials are obtained from very different manufacturing processes which govern the final density of products and their applications. Among them, a nonwoven process allows to produce a 3D entangled structure of great thickness with very weak density. In the framework of an industrial project, sponsored by ADEME, the optimization of the manufacturing process and manufactured materials is ongoing. The focus is here basically put on the influence of raw materials morphologies and process settings on the internal structure and apparent thermal properties of the fibrous panels. First results of an experimental design based on different maritime pine morphologies highlight the overriding impact of apparent density through manufacturing process settings / fibre network structure and thermal properties relationships*

*MOTS-CLÉS : Isolant fibreux, bois, composite non-tissé*

*KEY WORDS: fibrous insulant, wood, nonwoven composite*

---

## 1. Introduction

Le marché français de l'isolation thermique, évalué à 1,3 milliard d'euros en 2012, est dominé par les laines minérales (50%) et les plastiques alvéolaires (40%). Les isolants fibreux à base végétale sont encore peu utilisés (2,3% à base de fibres de bois). Cependant, ils se différencient à plus d'un titre : faible impact environnemental, plus grande inertie thermique à masse égale et capacité de régulation hygrométrique. Ils pourraient ainsi occuper 10% du marché français à l'horizon 2020 en fonction du degré d'actions de développement entrepris par les industriels comme c'est le cas actuellement pour les pays nordiques [ALC 12].

Les matériaux à base de fibres de bois sont obtenus à partir de différents procédés qui façonnent la densité des produits et leurs applications [TRA 12a]. L'un d'entre eux, issu de l'industrie textile et adapté aux fibres de bois, permet la conception de réseaux 3D enchevêtrés volumineux et de faible densité dont la cohésion interne est assurée par l'ajout de fibres thermoplastiques.

Dans le cadre d'un projet industriel, financé par l'ADEME <sup>(1)</sup>, l'optimisation de ce procédé et des matériaux ainsi fabriqués est actuellement en cours. L'objectif est d'orienter la conception de ces isolants fibreux à base de bois au niveau des techniques d'élaboration, de caractérisation de ces structures complexes mais aussi et surtout au niveau des méthodes d'optimisation multi-objectifs des procédés et des propriétés des matériaux pour qu'ils ne soient plus considérés seulement comme des matériaux verts mais présentant de plus un bon rapport performances / prix. Les performances visées sont à la fois techniques, économiques et environnementales.

L'accent est mis, ici, principalement sur une meilleure maîtrise de la structure morphologique du réseau fibreux en évaluant l'impact des matières premières, en particulier celles des fibres de bois et des réglages du procédé de fabrication sur la structure interne et les propriétés thermiques apparentes. Les mécanismes de transfert de chaleur dans une structure fibreuse sont dus aux phénomènes de conduction à travers l'air et les fibres, de convection de l'air dans la structure et de rayonnement. Le rôle du réseau fibreux est d'empêcher tout phénomène convectif à l'intérieur de la structure, de limiter la transmission du rayonnement thermique et de diminuer le transfert conductif dans la fraction solide tout en maintenant des propriétés mécaniques et physiques indispensables.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Matières premières

La ressource utilisée pour cette campagne d'essais est du pin maritime. Il est livré sous forme de copeaux en provenance de l'usine de FINSÀ à Morcenx. Les fibres synthétiques sont des polyoléfinés d'une longueur de 6 mm.

### 2.2. Procédé d'élaboration

Le procédé est constitué de 3 étapes illustrées en figure 2 : le défibrage des copeaux de bois en faisceaux de fibres et fibres individuelles, 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. La première étape est spécifique aux matériaux à base de fibres de bois, les deux suivantes sont caractéristiques d'un procédé nontissé. Les paramètres du défibrage, de l'ouvraison et de la consolidation sont réglables en vue de l'optimisation des matériaux.

#### 2.2.1. Défibrage

Cette opération a été réalisée au FCBA à Grenoble avec un raffineur sous pression *Andritz* de 30 cm de diamètre (figure 1a). L'ensemble de l'équipement est maintenu sous une pression de vapeur sèche de 5 bars (160°C). Les copeaux de bois sont d'abord étuvés en amont de la vis d'alimentation puis convoyés vers la zone de raffinage 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 de fibres, des modifications d'entrefers sont réalisées. Une acquisition continue de la puissance consommée par le moteur d'entraînement du rotor est réalisée. Elle permet le calcul de l'énergie requise pour produire les fibres selon la relation [1] :

$$\text{Energie (kWh/t)} = \text{Puissance moyenne (kW)} / \text{débit massique (t/h)} \quad [1]$$

(1) ADEME BIP 201 : projet ECOMATFIB

### 2.2.2. Formation des nappes fibreuses

Les réseaux fibreux sont formés par une ouvreuse nappeuse *Laroche* <sup>(2)</sup> (figure 1b). 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). L'aspiration de ce dernier entraîne une orientation aléatoire des fibres dans le plan. Les nappes ainsi formées sont ensuite superposées pour former un matelas. 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 épaisseur.

### 2.2.3. Consolidation des matelas

Les réseaux fibreux sont consolidés en passant dans un four à air chaud *Strahm* <sup>(2)</sup> (figure 1c). Cette voie thermique met à profit les propriétés de thermoplasticité des fibres synthétiques précédemment ajoutées qui vont, par échauffement contrôlé, former des liaisons et jouer ainsi le rôle de liant en maintenant l'ensemble après refroidissement. Les principaux réglages sont la température du flux d'air, sa vitesse, le temps de séjour et le facteur de compression appliqué défini comme le rapport entre l'écartement des tapis convoyeurs et l'épaisseur initiale du matelas.



**Figure 1.** Vue de côté a) du raffineur b) de l'ouvreuse nappeuse c) du four à air chaud

### 2.2.4. Variables d'entrée du plan d'expériences présenté pour la fabrication des panneaux

Six différentes populations de fibres de pin maritime, nommées PM1 PM2 PM3 PM4 PM5 et PM6, ont été produites en diminuant progressivement l'entrefer entre les disques du raffineur. Toutes ces populations ont été mélangées avec les fibres synthétiques courtes. Chacun des mélanges a été comprimé à 3 taux de compression dans le four (CR : mise à l'épaisseur). Le plan d'expérience complet incluant morphologie des fibres de bois et facteur compression dans le four est présenté dans le tableau 1 :

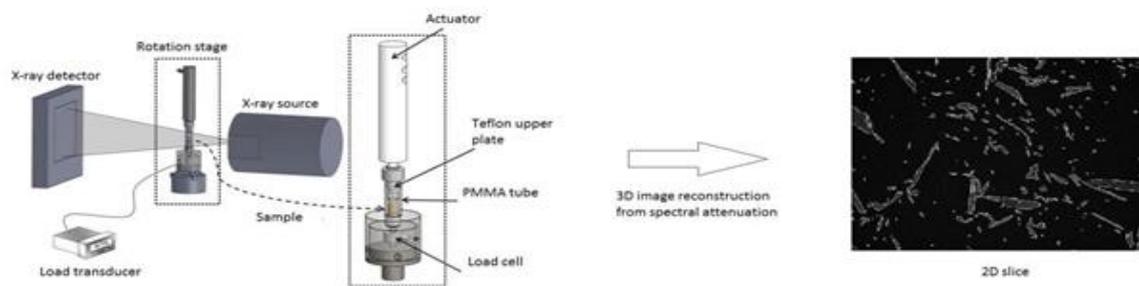
référence	bois	synthétique	taux de compression four (CR)
PM1S20	PM1	court	20%
PM1S50	PM1	court	50%
PM1S80	PM1	court	75%
PM2S20	PM2	court	20%
PM2S50	PM2	court	50%
PM2S80	PM2	court	75%
PM3S20	PM3	court	20%
PM3S50	PM3	court	50%
PM3S80	PM3	court	75%
PM4S20	PM4	court	20%
PM4S50	PM4	court	50%
PM4S80	PM4	court	75%
PM5S20	PM5	court	20%
PM5S50	PM5	court	50%
PM5S80	PM5	court	75%
PM6S20	PM6	court	20%
PM6S50	PM6	court	50%
PM6S80	PM6	court	75%

**Tableau 1.** Plan d'expérience utilisé

## 2.3. Caractérisation des propriétés des fibres et des panneaux

### 2.3.1. Caractérisation de la matière première par microtomographie RX

Cette technique d'imagerie non destructive permet de caractériser la microstructure interne des matériaux. Elle s'appuie sur une reconstruction 3D basée sur une série de projections et de traitements d'images réalisés sur un réseau virtuel (image numérique). Le faisceau de rayons X passe au travers de l'échantillon et le signal transmis après y avoir été partiellement absorbé est enregistré par des caméras CCD (fig. 2). La distribution de la granulométrie d'une population de fibres de bois est ensuite mesurée par des ouvertures successives d'un élément structurant (octaédrique) de taille ou diamètre croissant [SER 82, LUX 06, TRA 12b] sur le volume virtuel obtenu avec un microtomographe RX *SkyScan 1174*<sup>(2)</sup> (résolution spatiale jusqu'à 6 µm).



**Figure 2.** a) Acquisition microtomographique RX in-situ b) Slice 2D [TRA 12]

### 2.3.2. Caractérisation des propriétés thermiques des panneaux

Les propriétés thermiques sont mesurées par la technique du plan chaud avec le dispositif *DESPROTHERM* d'*Epsilon Alcen*. Cette méthode évalue indirectement la conductivité thermique apparente  $\lambda^*_{app}$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ) en mesurant l'effusivité thermique  $b$  ( $\text{W}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{1/2}$ ) et la capacité thermique volumique  $\rho^* \cdot C_p$  ( $\text{J}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{K}^{-1}$ ), avec  $C_p$  la capacité thermique massique.

Le principe utilisé consiste à imposer un flux thermique (grâce à une résistance électrique par effet Joule) sur l'une des faces d'un échantillon parallélépipédique isolé ( $100\cdot 100\text{ mm}^2$ ). L'effusivité et la capacité thermique volumique sont respectivement proportionnelles à l'évolution dans le temps du changement de température induit sur la face chauffée et sur la face opposée à la résistance chauffante (figure 3).

La conductivité thermique apparente est déduite par la relation [2] :

$$\lambda^*_{app} = b^2 / (\rho^* \cdot C_p) \quad [2]$$

Les mesures sont reproduites 3 fois par échantillons. 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% [STA 64].



**Figure 3.** Dispositif de mesure a) de l'effusivité b) capacité thermique volumique

<sup>(2)</sup>Equipex Xyloforest, ANR-10-EQPX-16

### 3. Résultats

#### 3.1. Energie consommée par le défilage et granulométrie des fibres de pin maritime

L'énergie de défilage enregistrée est mise en relation avec les tailles de fibres obtenues selon la méthode présentée en 2.3.1. La figure 4 présente les rendus volumiques des images 3D acquises par microtomographies RX pour chaque population de fibres de pin maritime (avant leur passage dans l'ouvreuse nappeuse). La résolution des images est de 12,3  $\mu\text{m}$  / pixel et le volume analysé de 8,6\*8,6\*12,3  $\text{mm}^3$ .

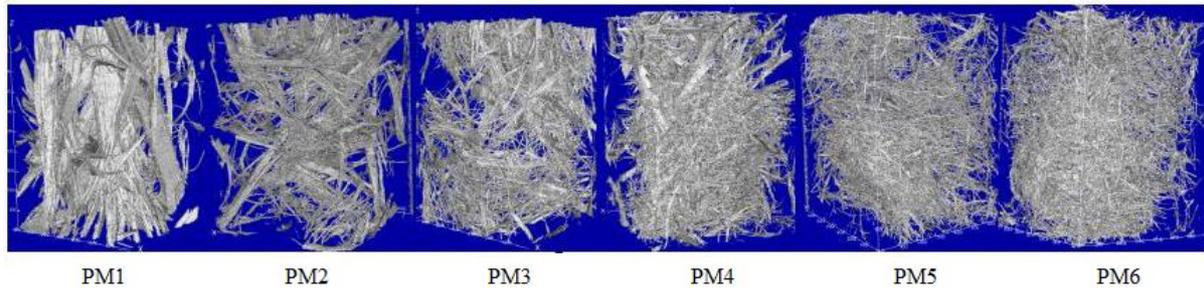


Figure 4. Rendus volumiques 3D des 6 références de fibres de pin maritime

Comme attendu, la consommation d'énergie du raffineur augmente avec la réduction de l'entrefer des disques (figure 5a). La distribution des tailles de fibres (diamètres) correspondants est illustrée en figure 5b.

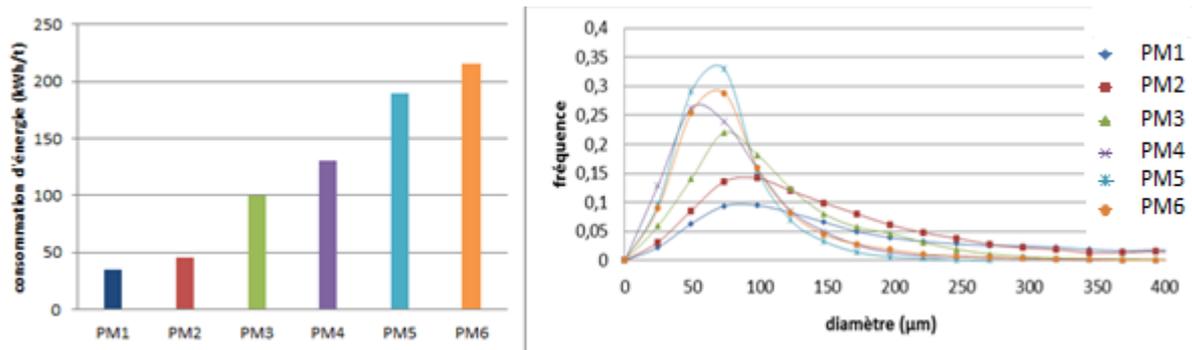


Figure 5. a) consommation d'énergie requise à la production b) distribution des granulométries correspondantes estimée à partir des rendus volumiques présentés en figure 5

Le tableau 2 présente les moyennes contre-harmonique  $D_w$  et arithmétique  $D_n$  de la granulométrie des populations.  $D_n$  est influencé par les faibles granulométries tandis que  $D_w$  dépend de la quantité relative des fortes granulométries. Classiquement utilisé pour caractériser la largeur de la distribution en poids moléculaire des polymères, le rapport  $D_w / D_n$  évalue la dispersion d'une distribution.

référence	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5	PM6
$D_w$ ( $\mu\text{m}$ )	709	234,7	157,2	112,4	90,5	99,2
$D_n$ ( $\mu\text{m}$ )	353,8	162,1	113,6	85,6	74,4	86,2
$D_w / D_n$	2	1,45	1,38	1,31	1,22	1,15

Tableau 2. Variables représentatives de la distribution des granulométries illustrées en figure 6b

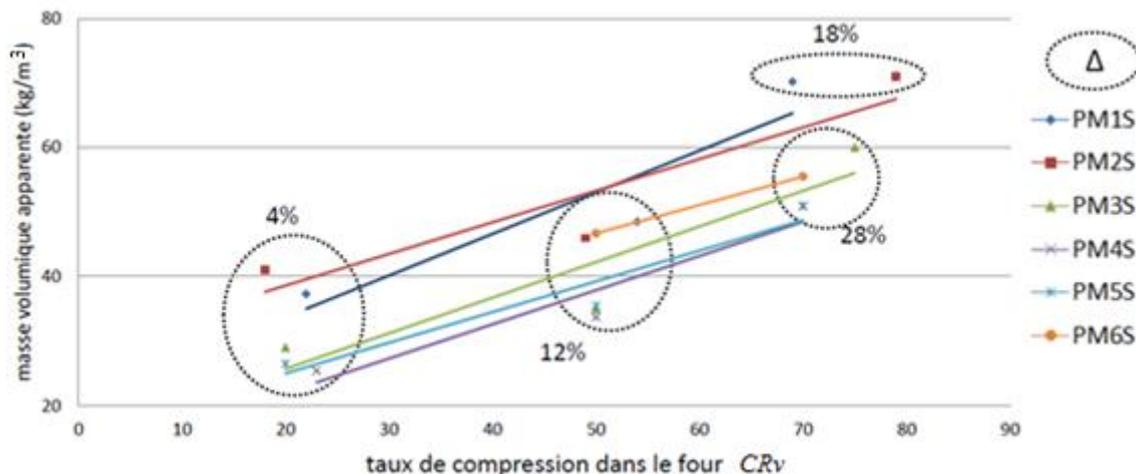
La réduction de l'entrefer entraîne un degré de déstructuration progressif de la matière ( $D_w$  et  $D_n$ ) et une homogénéisation de sa distribution ( $D_w / D_n$ ).

#### 3.2. Variabilité des densités apparentes

Toutes les mesures sont réalisées sur des spécimens aux dimensions 100\*100  $\text{mm}^2$  (4 spécimens par référence). Leurs épaisseurs sont comprises entre 40 et 85 mm fonction du mélange et du taux de compression appliqué lors de la consolidation au four.

Les relations entre les taux réels de compression dans le four  $CR_v$  (mise à l'épaisseur), les masses volumiques apparentes moyennées  $\rho^*$  et les reprises en épaisseur (rebonds) en sortie four  $\Delta$  sont présentées à la figure 6. Les reprises en épaisseur en sortie four sont calculées selon la relation [3] :

avec  $IT$ , l'épaisseur imposée correspondant à l'écartement entre les tapis convoyeurs du four et  $OT$ , l'épaisseur obtenue en sortie du four.



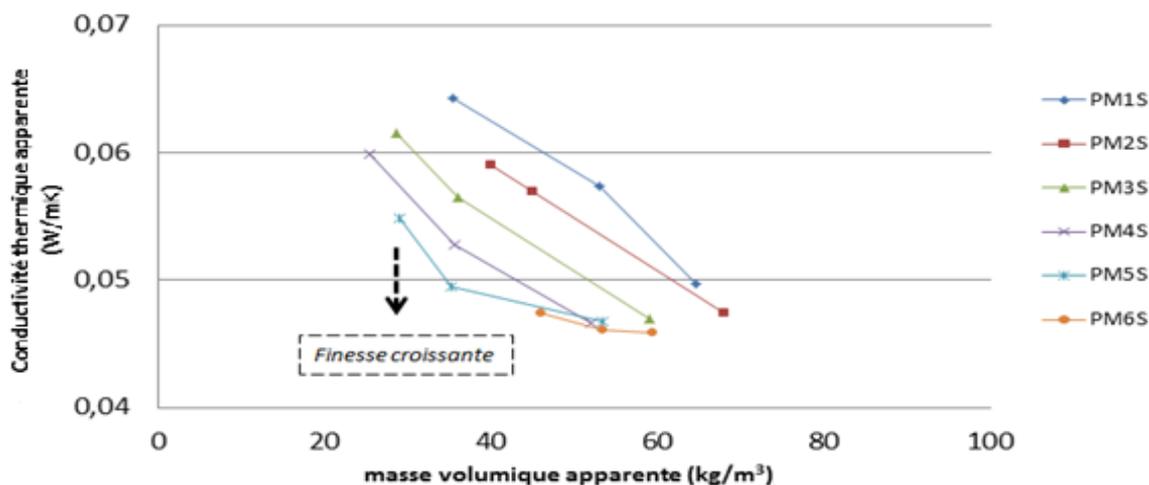
**Figure 6.** évolution des masses volumiques apparentes moyennées pour chacun des mélanges PMiS en fonction de leur taux de compression dans le four

Les panneaux fabriqués ont une faible masse volumique apparente (25 à 70 kg/m<sup>3</sup>). Comparés à la densité de la paroi cellulaire du bois égale à 1,53 [JOD, 94], les panneaux fibreux ont une fraction solide inférieure à 5% et sont donc fortement poreux. Les panneaux constitués des fibres de bois les plus grossières (PM1, PM2) sont plus denses. Les reprises en épaisseur augmentent progressivement avec les taux de compression appliqués ( $\Delta = 4$  à 28%). A des forts taux de compression dans le four, les mélanges constitués de fibres de bois peu déstructurées (PM1S, PM2S) semblent moins sensibles aux reprises en épaisseur que les autres mélanges (PM3S, PM4S, PM5S, PM6S).

### 3.3. Propriétés thermiques apparentes : masse volumique et conductivité thermique

Les conductivités thermiques sont calculées, comme décrit dans la section 2.2.2, à partir des mesures d'effusivité et d'une valeur de capacité thermique considérée comme étant égale à 1800 J/kgK. Les teneurs en eau à l'équilibre (20°C / 65%HR) de ces matériaux sont comprises entre 10 et 11% massique.

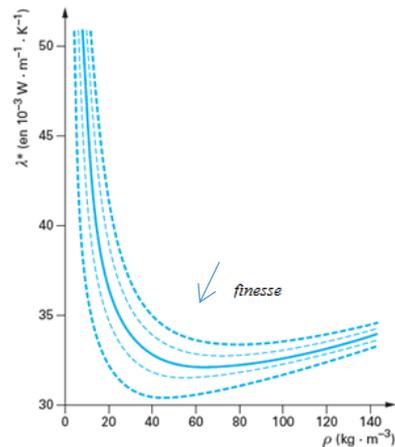
La figure 7 compare l'évolution des conductivités thermiques apparentes pour chaque mélange PMiS en fonction de leurs masses volumiques apparentes.



**Figure 7.** évolution des conductivités thermiques apparentes pour chaque mélange PMiS en fonction de leurs masses volumiques apparentes

Avec ces réglages machines et les caractéristiques des matières premières utilisées, les conductivités thermiques apparentes (correspondantes aux masses volumiques apparentes des panneaux fabriqués) semblent être en deçà d'une conductivité thermique apparente minimale (à une masse volumique apparente optimum). L'augmentation des conductivités thermiques apparentes vers les faibles masses volumiques apparentes se justifie par une contribution de plus en plus importante du rayonnement.

La figure 8 présente les variations de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour différentes finesses de fibres de laines de verre [LAN 04].



**Figure 8.** évolution des conductivités thermiques de laines de verre en fonction de leur masse volumique et de la finesse de leurs fibres

Conformément à l'allure de ces courbes expérimentales  $\lambda^* = f(\rho^*)$ , 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 à même température, 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 optimum). On remarque en figure 8 que cette influence est d'autant plus importante quand les densités deviennent de plus en plus faibles.

#### 4. Conclusion et perspectives.

Ces premiers résultats confirment le rôle primordial de la densité apparente au travers des relations procédés d'élaboration / morphologie des réseaux fibreux / propriétés thermiques apparentes. Ils orientent également la conception en privilégiant des matières premières à d'autres. La corrélation entre conductivité thermique apparente / masse volumique apparente / degré de déstructuration du bois permet d'optimiser les propriétés thermiques d'isolant fibreux à base de bois en agissant sur leurs paramètres morphologiques.

Les futurs essais se focaliseront sur la compressibilité de ces matériaux. En effet, les isolants thermiques à base de fibres de bois étant volumineux et peu compressibles (reprise en épaisseur après compression), le coût du transport a une très forte répercussion sur les prix finaux (25 %) [NOM 12]. Des essais mécaniques évalueront ainsi la compressibilité des matériaux en fonction des taux de chargement et des temps de maintien [PET 16].

Ce travail sera suivi par l'introduction de nouvelles essences, d'autres liants et de nouveaux objectifs environnementaux et économiques. Il s'agira ensuite, à l'aide d'une technique d'optimisation multi-objectifs, d'extraire le meilleur compromis pour satisfaire simultanément ces différents objectifs contradictoires [HOB 16].

#### 5. Remerciements.

Les auteurs remercient l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) et la société FINSA France pour leur soutien financier. Les auteurs remercient également l'agence nationale de la recherche (ANR) pour l'équipex XYLOFOREST (ANR-10-EQPX-16). Enfin, les auteurs remercient tous les acteurs du projet ECOMATFIB.

## 6. Bibliographie.

- [ALC 12] ALCIMED, (2012) Marché actuel des nouveaux produits issus du bois et évolutions à échéance 2020, Dgcis prospective. PIPAME
- [HOB 16] HOBBAALLAH M., VIGNON P., TRAN H., (2016) Multi-objective optimization of an insulating product based on wood fibre material. 19th ESAFORM Conference
- [JOD 94] JODIN P., (1994) Le bois : matériau d'ingénierie. Arbolor-Engref
- [LAN 04] LANGLAIS C., KLARSFELD S., (2004) Isolants thermiques à température ambiante, Bases physiques. Techniques de l'ingénieur Extrait de la collection, BE 9 859, 1-17. Service Relations Editions, Paris, France
- [LUX 06] LUX J., (2006) Comportement thermique macroscopique de milieux fibreux réels anisotropes : étude basée sur l'analyse d'images tridimensionnelles. Thèse Université Bordeaux 1
- [NOM 12] NOMADEIS, (2012) Etude sur le secteur et les filières de production des matériaux et produits bio-sourcés utilisés dans la construction (à l'exception du bois) - Partie 1 : Etat des lieux économique du secteur et des filières
- [SER 82] SERRA J., (1982) Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, New York
- [PET 16] PETUREAU L., DOUMALIN P., DUPRE J.C., TRAN H., DELISEE C., (2016) Experimental study of thickness recovery in wood-based fiberboard materials. 17th International conference on experimental mechanics
- [TRA 11] TRAORE I., (2011) Transferts de chaleur et de masse dans les parois des bâtiments à ossatures bois. Thèse Nancy
- [TRA 12a] TRAN H., (2012) Study of compression behavior of wood-based fiberboards : characterization from non-destructive image techniques. Thèse Université Bordeaux 1
- [TRA 12b] TRAN H., DOUMALIN P., DELISEE C., DUPRE J.C., MALVESTIO J., GERMANEAU A., (2012) 3D mechanical analysis of low-density wood-based fiberboards by X-ray microcomputed tomography and Digital Volume Correlation. Journal of Materials Science 48 : 3198-3212
- [STA 64] STRAMM A. J., (1964) Wood and cellulose science. Ronald Press, New York : 549
- [VOL 14] VOLOLONIRINA O., COUTAND M., PERRIN B., (2014) Characterization of hygrothermal properties of wood-based products. Impact of moisture content and temperature. Construction and Building Materials 63 : 223-233