



34^{es} Rencontres Universitaires du Génie Civil
Liège, 24-27 mai 2016

OPTIMISATION DES PROPRIÉTÉS THERMIQUES D'ISOLANTS À BASE DE FIBRES DE BOIS

OPTIMIZATION OF THE THERMAL PROPERTIES OF WOOD FIBRE-BASED INSULATING MATERIALS

Pierre VIGNON^{1,3}, Jérôme MOREAU^{2,3}, Christine DELISÉE^{3,4}, Mickael LECOURT⁵,
Huyen TRAN⁴, Thierry SANGUINA¹

¹FINSA France, F-40110 Morcenx, France

mail : pierre.vignon@u-bordeaux.fr

²ESB, F-44000 Nantes, France

³I2M CNRS UMR 5295, F-33400 Talence, France

⁴Bordeaux Sciences Agro, F-33175 Gradignan, France

⁵FCBA Intech, F-38044 Grenoble, France

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) [ALC 12]. Pour autant, un mouvement en marche, d'une part depuis l'Europe du Nord, d'autre part depuis l'Amérique du nord, laisse penser que des matériaux élaborés à partir de sous-produits biosourcés vont se développer : plus écologiques, recyclables, vertueux en terme de consommation énergétique. Proposée comme une alternative aux isolants thermiques conventionnels, cette nouvelle génération de matériaux se différencie également des laines minérales par leurs performances techniques intrinsèques : inertie thermique, régulation hygrométrique et qualité de l'air intérieur [SIM 02; PAD 98; ZHA 12; OSA 06].

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 (< 50 kg/m³) dont la cohésion interne est assurée par l'ajout de fibres thermoplastiques. Bien qu'exigeant relativement peu de matières premières, ces panneaux non-tissés, qualifiés d'isolants bois semi-rigides, sont actuellement plus chers que les laines minérales à résistance thermique équivalente (indicateur de performance défini par le rapport entre épaisseur et conductivité thermique).

Partant de ce constat, dans le cadre d'un projet industriel financé par l'ADEME¹, l'optimisation du procédé non-tissé 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

1. ADEME BIP 2013 : projet ECOMATFIB.



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. 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 FINSA à Morcenx. Les fibres synthétiques sont des polyoléfines d'une longueur de 6 mm.

2.2. Procédé d'élaboration

Le procédé est constitué de 3 étapes illustrées de figure 1 à 9: 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

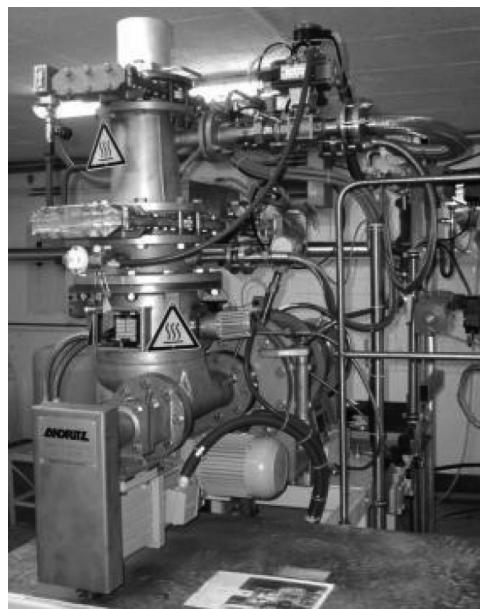


Figure 1 : Vue d'ensemble du raffineur Andritz du FCBA, Grenoble

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 de Grenoble avec un raffineur sous pression Andritz de 30 cm de diamètre, équipé d'un rotor en rotation à 3 000 rpm et un stator (figure 1). L'un des 3 segments constituant une couronne de plaque est présenté en figure 2. L'ensemble de l'équipement est maintenu sous une pression de vapeur sèche de 5 bars (environ 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 à débit constant. La force centrifuge appliquée par le rotor constraint les copeaux à traverser les plaques espacées de l'entrefer.

Afin d'obtenir différentes morphologies de fibres, l'entrefer est ajusté. 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] :

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

2.2.2. Formation des nappes fibreuses

Les réseaux fibreux sont formés par une ouvreuse nappeuse *Laroche*⁽²⁾ à I2M, Talence (figure 3). 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 déposées sur un tapis alimentaire (figure 4) puis ouvertes par un cylindre rotatif à pointe (visuel de la carte en figure 5).

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 (visuel du condenseur en figure 5). 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 (vue de face en figure 6). Les différentes nappes sont enfin superposées pour former un matelas. La vitesse de la carte 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.



Figure 2 : Un des 3 segments utilisé constituant une couronne de plaque



Figure 3 : Vue d'ensemble de l'ouvreuse nappeuse Laroche d'I2M, Talence



Figure 4 : Dépôt de la matière première sur le tapis alimentaire

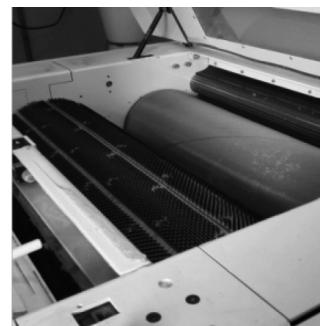


Figure 5 : Vue de côté de la carte et du condenseur



Figure 6 : Vue de face d'une nappe formée

2.2.3. Consolidation des matelas

Les réseaux fibreux sont consolidés en passant dans un four à air chaud *Strahm*² à I2M, Talence (figure 7). Cette voie thermique met à profit les propriétés de thermoplastique des fibres synthétiques précédemment mélangées aux fibres de bois 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 le facteur de compression appliquée, défini comme le rapport entre l'écartement des tapis convoyeurs et l'épaisseur initiale du matelas ainsi que la température du flux d'air, sa vitesse et le temps de séjour des matelas dans les zones de chauffage et de refroidissement. Un matelas à l'entrée du four ainsi qu'une vue de côté dans la zone de refroidissement après sa consolidation sont respectivement présentés en figure 8 et 9.

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, nommées *S*. 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.

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 (figure 10). 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*² (résolution spatiale jusqu'à 6 µm).

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 une conductivité thermique apparente $\lambda^{*}_{app} = b^2 / (\rho^* \cdot C_p)$ en mesurant l'effusivité thermique *b* (W·K⁻¹·m⁻²·s^{1/2}) et la capacité thermique



Figure 7 : Vue d'ensemble du four à air chaud Strahm d'I2M à Talence



Figure 8 : Matelas à l'entrée du four Strahm

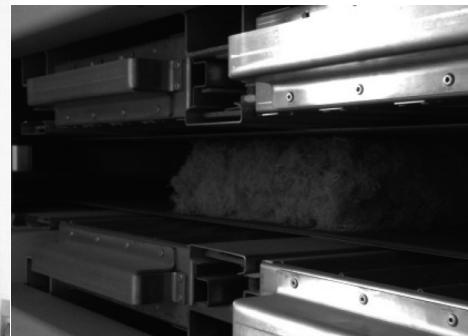


Figure 9 : Vue de côté du matelas dans la zone de refroidissement

2. Equipex Xyloforest, ANR-10-EQPX-16.



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

Tableau 1. Plan d'expérience utilisé

volumique ρ^* . C_p (J·m⁻³·K⁻¹), avec C_p la capacité thermique massique.

Le principe consiste à imposer 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 mm²) et à observer la réponse thermique au cours du temps. 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 électrique (figure 11). La conductivité thermique apparente est déduite par la relation [2] :

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

Les matériaux sont supposés homogènes, le flux thermique uniforme sur la totalité de la surface au contact et le transfert unidirectionnel. L'ensemble est maintenu entre deux blocs de mousse polyuréthane et isolé de l'extérieur par un boîte rectangulaire en plexiglass.

Il est important de noter que les mesures sont réalisées sur des spécimens stabilisés à 65%HR/20°C et reproduites 3 fois. D'après les courbes d'humidité d'équilibre, dans ces conditions, la teneur massique en eau du bois massif est de +/- 12% [STA 64]. De plus, l'ensemble des pores interconnectés d'isolants fibreux les rendant très perméables à la vapeur d'eau (facteur de résistance à la diffusion de vapeur proche de 1), il est également important de noter que la conductivité thermique apparente est particulièrement sensible au mouvement de la phase gazeuse et aux changements de phase induits par ces transferts [DEG 87; DUF 14].

3. RÉSULTATS

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

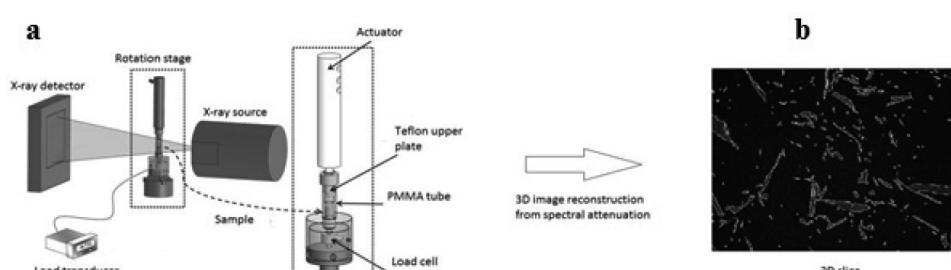


Figure 10 : a) Acquisition microtomographique RX in-situ ; b) Slice 2D [TRA 12b]

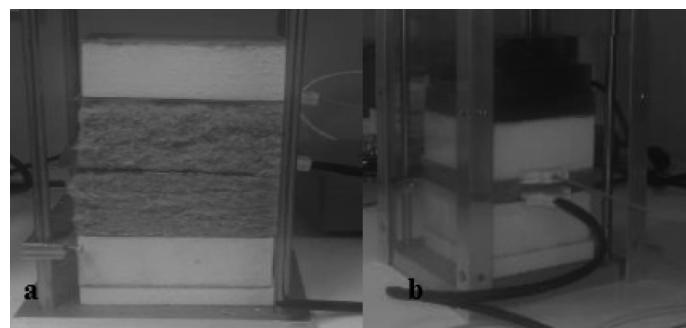


Figure 11 : Dispositif de mesure : a) de l'effusivité ; b) capacité thermique volumique

L'énergie de défibrage enregistrée est mise en relation avec les tailles de fibres obtenues selon la méthode présentée en 2.3.1. La figure 12 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 $12,3\text{ }\mu\text{m/pixel}$ et le volume analysé de $8,6*8,6*12,3\text{ mm}^3$.

Comme attendu, la consommation d'énergie du raffineur augmente avec la réduction de l'entrefer des disques (figure 13). La distribution de la granulométrie des populations de fibres de bois (diamètres) correspondante est illustrée en figure 14. 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.

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). Il est intéressant de noter que la population PM2 a une granulométrie proche de celle actuellement utilisée dans les isolants semi-rigides à base de fibres de bois tandis que la population PM5 se rapproche d'une granulométrie utilisée dans les MDF.

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 appliquée lors de la

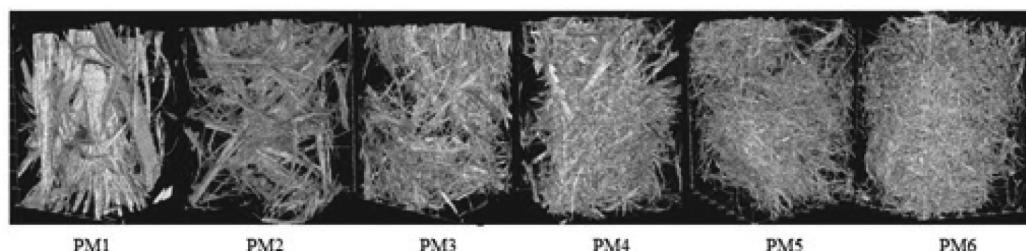


Figure 12 : Rendus volumiques 3D des 6 références de fibres de pin maritime

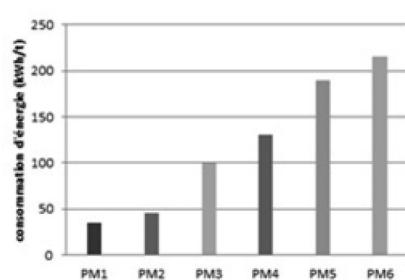


Figure 13 : Consommation d'énergie requise à la production de chacune des populations de fibres de pin maritime

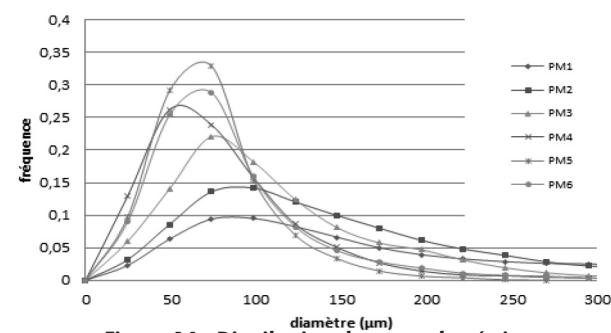


Figure 14 : Distribution des granulométries correspondantes estimée à partir des rendus volumiques présentés en figure 12

| 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 14

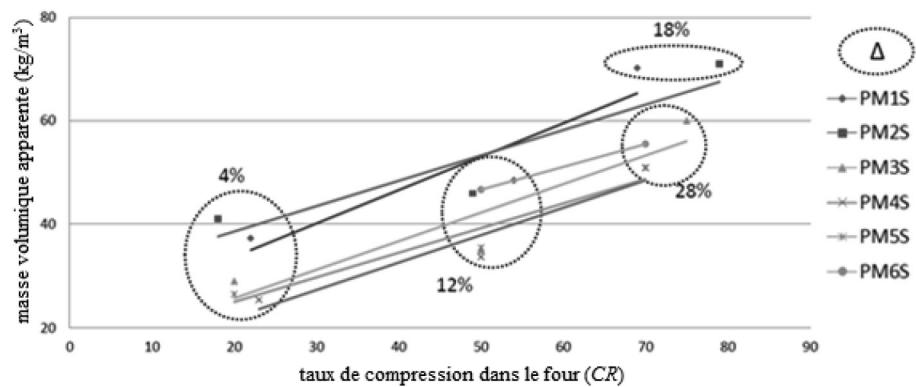


Figure 15 : Evolution des masses volumiques apparentes moyennées pour chacun des mélanges PMiS en fonction de leur taux de compression dans le four

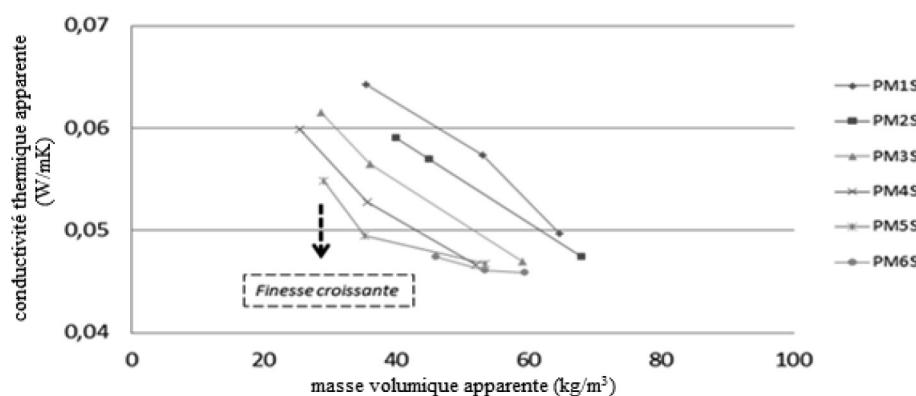


Figure 16 : Evolution des conductivités thermiques apparentes pour chaque mélange PMiS en fonction de leurs masses volumiques apparentes

consolidation au four. Les relations entre les taux de compression appliqués dans le four CR (mise à l'épaisseur), les masses volumiques apparentes moyennées ρ^* et les reprises en épaisseur (rebonds) constatées en sortie four Δ sont présentées à la figure 15. Les reprises en épaisseur en sortie four sont calculées selon la relation [3] :

$$\Delta = (OT - IT) / IT \quad [3]$$

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

Le procédé non-tissé est adapté pour l'élaboration de matériaux constitués d'éléments fins (granulométrie des fibres de bois type PM5, PM6). Les panneaux fabriqués ont une faible masse volumique apparente (25 à 70 kg/m³). 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 2.3.2, 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 16 compare l'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 optimale). L'augmentation des conductivités thermiques apparentes vers les faibles masses volumiques apparentes se justifie par une contribution de plus en plus importante du rayonnement.

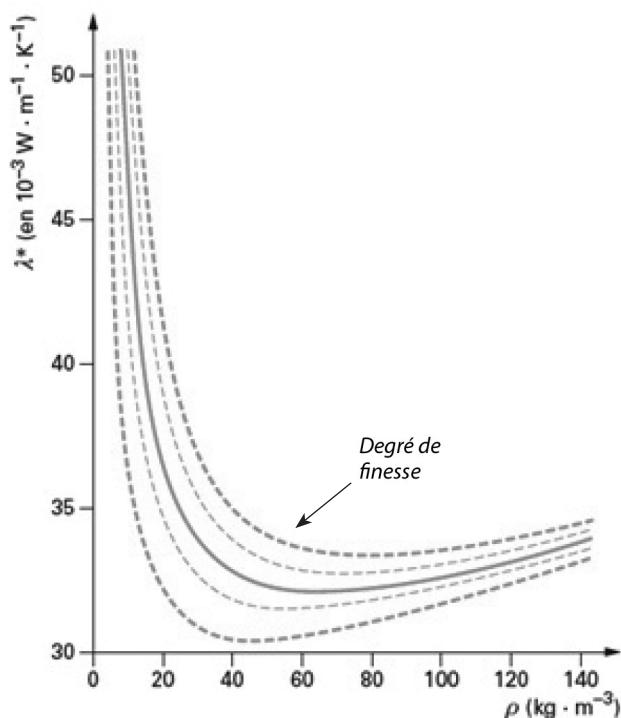


Figure 17 : Evolution des conductivités thermique de laines de verre en fonction de leur masse volumique et de la finesse de leurs fibres

La figure 17 présente les variations de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique pour différentes finesse de fibres de laines de verre [LAN 04].

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 optimale). On remarque en figure 17 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
- [DUF 15] DUFORESTREL T., (2015) Des transferts couplés de masse et de chaleur à la conception bioclimatique : recherches sur l'efficacité énergétique des bâtiments. HDR Université Lyon 1
- [DEG 87] DEGIOVANNIA., MOYNE C., (1987) Conductivité thermique de matériaux poreux humides : évaluation théorique et possibilité de mesure. International Journal of Heat and Mass Transfer 30, N°11, pp. 225-2245



- [HOB 16] HOBALLAH 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 macroskopique 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
- [OSA 06] OSANYINTOLA O.F., TALUKDAR P., SIMONSON C. J., (2006) Effect of initial conditions, boundary conditions and thickness on the moisture buffering capacity of spruce plywood, Energy and Buildings 38, pp : 1283-1292.
- [PAD 98] PADFIELD T., (1998) The role of absorbent building materials in moderating changes of relative humidity, Ph.D. thesis Technical University of Denmark Department of Structural Engineering and Materials
- [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
- [SER 82] SERRA J., (1982) Image analysis and mathematical morphology. Academic Press, New York
- [SIM 02] SIMONSON C.J., SALONVAARA M., OJANEN T., (2002) The effect of structures on indoor humidity – possibility to improve comfort and perceived air quality. Indoor Air 12, pp 243-251
- [STA 64] STRAMM A. J., (1964) Wood and cellulose science. Ronald Press, New York : 549
- [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
- [ZHA 12] ZHANG H., YOSHINO H., HASEGAWA K. (2012), Assessing the moisture buffering performance of hygroscopic material by using experimental method. Building and Environment 48, pp : 27-34