



HAL
open science

Microstructure et propriétés mécaniques de matériaux isolants à base de fibres de bois

Christine C. Delisee, Eric Badel, Jérôme J. Lux, Jérôme J. Malvestio

► **To cite this version:**

Christine C. Delisee, Eric Badel, Jérôme J. Lux, Jérôme J. Malvestio. Microstructure et propriétés mécaniques de matériaux isolants à base de fibres de bois. ARBORA Sciences et Industries du Bois, Nov 2008, Bordeaux, France. 6 p. hal-00964779

HAL Id: hal-00964779

<https://hal.science/hal-00964779>

Submitted on 6 Jun 2020

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.

Microstructure et propriétés mécaniques de matériaux isolants à base de fibres de bois.

Christine Delisée* — Eric Badel** — Jérôme Lux*** — Jérôme Malvestio*

*Unité Sciences du Bois et des Biopolymères US2B
UMR5103 - 69 route d'Arcachon, 33612 Cestas cedex
delisee@us2b.pierroton.inra.fr

** INRA. PIAF UMR547 – 234 av du Brezet, 63000 Clermont Ferrand

***Laboratoire d'Etudes des Phénomènes de Transfert Appliqués LEPTIAB
EA2119 - Avenue Michel Crépeau, 17042 La Rochelle cedex 1

RÉSUMÉ. On s'intéresse au comportement mécanique en compression des isolants thermiques à base de fibres de bois utilisés dans le bâtiment, de très forte porosité, élaborés par un procédé textile non tissé. Les états de la structure d'un panneau soumis à une sollicitation de compression transverse (33% et 73%) ont été suivis en 3D par microtomographie X. Le comportement particulier mis en lumière par l'accès à la densification locale est relié à la très faible densité du matériau. En particulier, les fibres de bois ne sont pas individuellement mécaniquement comprimées et la déformation macroscopique du matériau n'engendre que leur réorganisation spatiale. Ces résultats sont mis en relation avec des caractéristiques morphologiques de structures évaluées par analyse d'image 3D.

ABSTRACT. We focus on the mechanical behaviour of a thermal insulating panel made of wood fibres. The making process is a non-woven fabric process that generates a high porosity and a very low-density material. The 3D internal structure of a compressed (33% and 73%) insulating panel was followed by X-ray microtomography. The special behaviour is linked to the low-density structure of the panel. In particular, the fibres are not compressed and the macroscopic deformation of the sample only generates a new organisation of the fibres in the panel. These results are confirmed by morphological measurements that were performed by 3D image analysis.

MOTS-CLÉS : bois – compression – densification locale – fibres – isolation thermique – microstructure – microtomographie rayons X – morphologie.

KEYWORDS: compression – fibres – local densification – microstructure – morphology – thermal insulation – wood – X-ray microtomography

1. Introduction

Dans une démarche de qualité environnementale, la faible consommation d'énergie grise de fabrication et la facilité de recyclage en fin de vie confèrent aux matériaux d'isolation à base de fibres naturelles des caractéristiques de plus en plus recherchées par les industriels. La maîtrise de leur architecture est un point d'entrée essentiel pour l'amélioration de leurs performances, dans la mesure où un grand nombre de propriétés macroscopiques sont contrôlées par la microstructure. Par exemple, la principale limitation technologique reste que les réseaux fibreux classiques ne présentent pas de réelle architecture 3D. La cohésion interne des panneaux demeure alors principalement liée à leur densité apparente et leur épaisseur se trouve limitée. Dans un contexte où l'industrie cherche à diversifier les potentialités d'applications de ces matériaux, l'élaboration de réseaux présentant une réelle architecture 3D se dégage comme l'un des axes de recherche porteurs. Le matériau étudié ici est un prototype d'isolant thermique, de très forte porosité ($> 95\%$). Sa masse est constituée de 75% de fibres de pin maritime et de 25% de fibres textiles bi-composantes PES/Co-PES qui, lors du chauffage, fondent et établissent des liaisons inter fibres. L'objectif est d'étudier la faisabilité d'isolants naturels issus de la ressource locale (fibres de pin maritime), présentant une architecture 3D fortement enchevêtrée et pouvant ainsi atteindre de fortes épaisseurs (> 6 cm). L'architecture complexe et anisotrope du réseau des fibres est créée par un procédé textile non-tissé. Les relations entre cette microstructure et les propriétés thermiques ont été l'objet de précédentes investigations (Lux *et al.*, 2006, Faessel *et al.*, 2005). Après fabrication, lors des phases de stockage, de transport, de mise en œuvre et d'utilisation en service, ces matériaux sont soumis à des sollicitations mécaniques induisant des modifications de structure et donc de propriétés. Nous nous intéressons donc ici aux relations entre la microstructure et le comportement du panneau sollicité en compression.

2. Mesures expérimentales

Les essais mécaniques ont été réalisés sous micro imagerie X sur la ligne ID19 de l'ESRF. L'échantillon cylindrique ($\varnothing=10$ mm, $H=10$ mm) a été découpé sur l'une des faces du panneau (d'épaisseur totale 60 mm) et placé dans un tube de PMMA afin de garantir un déplacement macroscopique 1D. Il est comprimé à l'aide d'un dispositif développé au GEMPPM (Buffière *et al.*, 1999). Les scans tomographiques sont réalisés à une résolution spatiale de $4,91 \mu\text{m}$, à trois états de compression, appelés initial, comprimé 1 (32,8%) et comprimé 2 (72,5%) (Figure 1).

3. Caractérisation morphologique 3D aux différents taux de compression

Pour éviter les effets de bord liés à la découpe du matériau, des volumes de dimensions réduites (section 1024×1024 pixels² soit 5×5 mm²) sont extraits dans le cœur des images. Après segmentation des phases fibreuse et poreuse, des mesures morphologiques 3D sont réalisées aux différents taux de compression à l'aide

d'outils issus de la morphologie mathématique (Matheron, 1967, Serra, 1982) : porosités, granulométries, orientations des fibres.

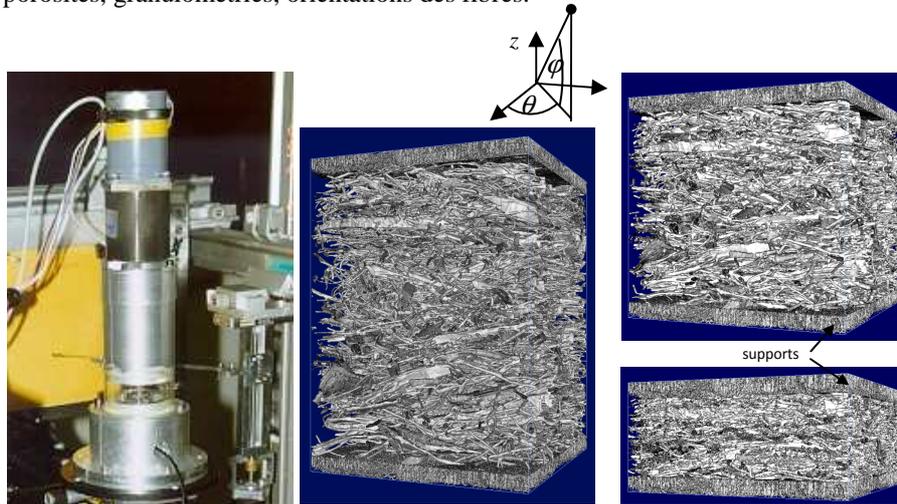


Figure 1. Dispositif de compression et rendus volumiques aux états initial (à gauche), comprimé 33% (en haut à droite) et comprimé 72% (en bas à droite).

Les porosités totale, interne et externe (Figure 2) sont mesurées. La porosité totale du panneau, calculée à partir de l'image binaire nettoyée, est fortement réduite (de 92,4% à 88,6% puis à 73,1%) lors de la compression. La porosité interne des fibres de bois (lumens connectés à l'espace poral inter-fibres), mesurée en rebouchant les fibres tout en préservant leurs contours (Lux *et al.*, 2006), reste constante (37,1%, 37,4%, 40,8%) contrairement à la porosité externe (87,8%, 81,8%, 54,6%) qui seule semble affectée dans un rapport lié directement au taux de compression. Cela indique en particulier que les dimensions des fibres et des bûchettes de bois ne sont pas modifiées par la déformation macroscopique de l'échantillon.

Afin d'accéder aux tailles des pores et des fibres, on réalise sur les ensembles des pores et des fibres après rebouchage des *ouvertures morphologiques 3D* par un octaèdre de taille croissante. Les courbes granulométriques obtenues (Figure 2) confirment que la taille des fibres reste constante et indiquent que les distances inter-fibres sont réduites dans la compression. Toutefois, si l'on considère l'état très fortement comprimé (72,5%), on constate que les diamètres de fibres mesurés sont en moyenne plus importants (166 μm pour l'état comprimé 2, 109 μm et 113 μm dans les états initial et comprimé 1). On se heurte ici aux limitations typiques de ces mesures dans le cas de matériaux denses où il est difficile d'individualiser les fibres.

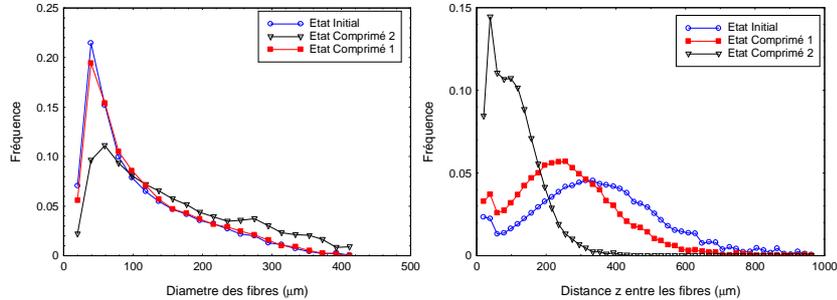


Figure 2 : Distributions des tailles des fibres (G) et des distances inter-fibres (D).

Par ailleurs, des covariogrammes, mesurés sur l'ensemble des fibres dans les 13 directions de l'espace définies par la 26-connectivité, permettent de caractériser l'anisotropie du matériau morphologique. Les courbes obtenues dans les directions parallèles aux faces sont confondues alors que celle correspondant à la direction parallèle à l'axe de compression est située très en dessous (Figure 3). Les fibres ont donc une orientation privilégiée dans des plans perpendiculaires à l'axe de compression et sont orientées de manière aléatoire au sein de ces plans. Cette anisotropie se retrouve dans tous les états de compression ; toutefois moins marquée à l'état le plus dense. Ceci résulte de la densification et de la mise en contact de fibres dans la direction de compression. Afin de quantifier l'anisotropie mise en évidence par les covariogrammes, les champs d'orientation locale des fibres ont été mesurés aux 3 états à partir d'érosions par des segments de longueur croissante (Lux *et al*, 2006). L'orientation d'un voxel x est ainsi définie égale à celle du plus grand segment inclus dans l'objet, qui passe par ce point et est centré sur ce point. Dans le cas des états initial et comprimé 1, environ 70% des voxels sont orientés dans des plans parallèles aux faces du matériau (plan xOy) tandis que moins de 1% sont orientés dans la direction de compression (Figure 3).

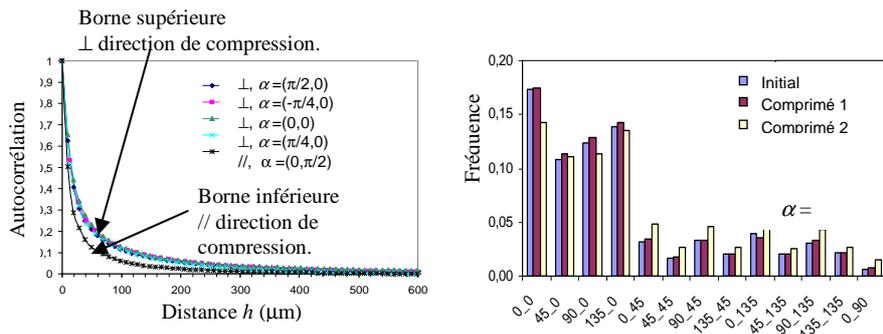


Figure 3. Fonctions d'autocorrélation mesurées pour l'état initial (G). Distributions des orientations locales dans les 13 directions de la trame cubique (D).

Concernant l'état de compression à 72,5%, on constate une diminution du nombre de voxels orientés dans le plan xOy (63%), résultat évidemment sans signification physique mais qui montre les limites de ces mesures basées sur une analyse globale de la phase fibreuse dans le cas où la densité du matériau, trop importante, ne permet pas d'identifier individuellement les fibres. La segmentation individuelle des fibres constituera donc une étape incontournable pour affiner la description de l'évolution du réseau fibreux.

4. Taux de compression locaux

Le suivi de densification locale repose sur l'hypothèse, soutenue par les mesures morphologiques précédentes, de conservation du nombre de particules de fibres (Badel *et al*, 2008). La densité est donc une densité de points matériels, correspondant, pour un sous-volume donné, au nombre de voxels identifiés comme phase solide. Le processus de calcul de la densification repose sur la conservation de ce nombre de point matériels. A partir de la première tranche située contre le plateau de compression, pour chaque tranche (i) de l'état initial d'épaisseur 1 voxel, l'épaisseur de la tranche correspondante dans l'état comprimé ayant le même nombre de points matériels est calculé. La déformation en compression de la tranche (i) est simplement donnée par $\varepsilon(i) = [e_{new}(i) - e_{init}(i)] / e_{init}(i)$, où e_{new} est la nouvelle épaisseur calculée dans l'échantillon comprimé et e_{init} l'épaisseur de la tranche dans l'état initial. Le processus est réitéré le long de l'axe de compression jusqu'au balayage complet de l'échantillon et permet de tracer les profils de densification locale selon la direction de compression (Figure 4). Les taux de compression macroscopiques calculés correspondent aux valeurs expérimentales estimées (32,7% et 72,4%,). Le taux de compression local est inversement proportionnel à la densité initiale locale (Figure 7), indiquant que les particules se déplacent, préférentiellement vers les zones de faible densité. La corrélation devient très forte dans le cas d'une importante compression (72.5%) ; ce qui s'explique en partie par l'homogénéisation du milieu. Le processus de densification ne se fait ici que par déplacement solide des fibres, sans déformation intrinsèque de celles-ci.

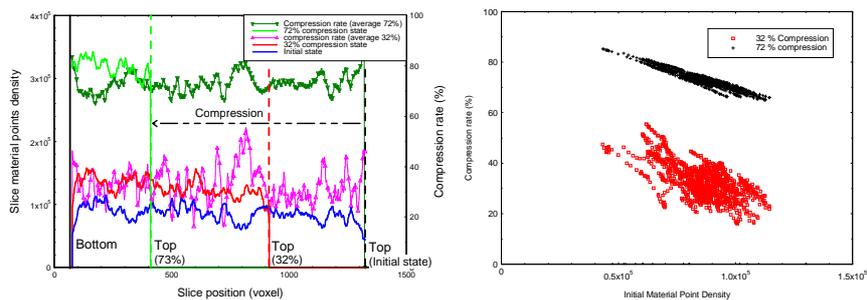


Figure 4. Profils de distribution de la matière selon l'axe de compression et profils de compression locales pour 33% et 72.5% de compression globale de l'échantillon.(G). Relation entre la densité initiale de points matériels (moyenné par tranche transversale) et le taux de compression local (D).

5. Conclusion

Les images microtomographiques de matériaux isolants à base de fibres de bois, de densité très faible, réalisées à différents taux de compression ont permis de mettre en évidence les modifications de structure et les déformations locales induites par la sollicitation. Un processus local de compression du matériau a été identifié. La mise en correspondance de ces résultats avec les analyses de structure réalisées par analyse d'image permet de mettre en évidence que la très forte porosité et le mode de liaison des fibres jouent un rôle primordial dans ce comportement en compression. Dans ce milieu discontinu et essentiellement composé d'air, la déformation macroscopique ne se fait que par le déplacement des points matériels constituant la phase solide du bois, sans densification intrinsèque de la matière fibreuse. Ces hypothèses ont pu être validées par les mesures morphologiques réalisées sur les images 3D de la structure. Les fibres se réorganisent donc au sein du volume, et plus particulièrement dans les zones de faible densité. Les fines liaisons plastiques entre les fibres ne semblent pas avoir de rôle mécanique lors de la compression. Cela peut être interprété par un comportement de type « corde », capable d'exercer des efforts en tension mais pas en compression. Les analyses, basées sur la microstructure particulière du matériau (discontinuité du matériau, très basse densité), les mesures extraites des images et les mesures de déplacement réalisées lors de l'expérimentation semblent tous cohérents et se conforter l'un l'autre. En perspectives, un traitement plus complet, de type corrélation d'images 3D, avec un suivi de point, est envisagé. De plus, des mesures morphologiques complémentaires, réalisées à partir d'une représentation simplifiée du réseau sous forme d'un squelette 3D et permettant de caractériser et suivre l'évolution des contacts entre les fibres (nombre, surface de contact, répartition dans l'espace), sont en cours de réalisation.

6. Bibliographie

- Badel E., Delisée C., Lux J., « 3D structural characterisation, deformation measurements and modelling of low-density wood fibreboard under compression. The use of microtomography ». *Composites Science and Technology*, vol. 68, 2008, p. 1654-1663.
- Buffières J.Y., Maire E., Cloetens P., Lormand G., Fougères R., « Characterization of internal damage in a MMCp using X-ray synchrotron phase contrast microtomography », *Acta Materialia*, vol. 47, n°5, 1999, p. 1613-1625.
- Faessel M., Delisée C., Bos F., Castéra P., « Modelling of random cellulosic fibrous networks based on X-ray tomography and image analysis », *Composites Science and Technology*, vol. 65, 2005, p. 1931-1940.
- Lux J., Ahmadi A., Gobbé C., Delisée C., « Macroscopic thermal properties of real fibrous materials: Volume averaging method and 3D image analysis », *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 49, 2006, p. 1958-1973..
- Matheron G, *Éléments pour une théorie des milieux poreux*, Paris, Masson, 1967.
- Serra, J., *Image analysis and Mathematical Morphology*, New-York, Academic Press, 1982.