

Influence de la réticulation du réseau fibrillaire cellulosique sur le comportement élastique effectif de la paroi cellulaire du bois

PHAN Nhat-Tung¹, AUSLENDER François¹, GRIL Joseph¹, MOUTOU PITTI Rostand^{1,2}

¹ Université Clermont Auvergne, Clermont Auvergne INP, CNRS, Institut Pascal, F-63000, Clermont-Ferrand, FRANCE

² CENAREST, IRT, BP 14070, Libreville, GABON

nhat_tung.phan@uca.fr

Mots clefs : comportement élastique effectif ; paroi cellulaire ; homogénéisation numérique ; éléments finis ; fibrilles ondulées et interconnectées

Contexte et objectif général

Ces dernières années, l'utilisation du bois s'est de plus en plus intensifiée permettant d'offrir une ressource verte alternative pour l'industrie. Les avantages de ce matériau sont principalement sa disponibilité et ses excellentes performances mécaniques par rapport à la densité, expliquées par l'organisation structurale de ce matériau. Toutefois, l'étude du bois en tant que matériau a mis en évidence une grande variabilité des propriétés mécaniques et diverses échelles d'hétérogénéité (Fig. 1). Afin d'améliorer notre efficacité à concevoir des produits à base de bois, une meilleure compréhension des relations structure-propriétés est nécessaire. Dans cet article, l'influence de la réticulation du réseau fibrillaire cellulosique sur le comportement élastique effectif de la paroi cellulaire du bois est étudiée en appliquant des techniques d'homogénéisation numérique. Classiquement, les fibrilles sont supposées être droites et parallèles les unes par rapport aux autres. L'apport de ce travail consiste à décrire de manière plus réaliste la morphologie de la paroi cellulaire en prenant en compte des fibrilles incurvées et interconnectées entre elles.

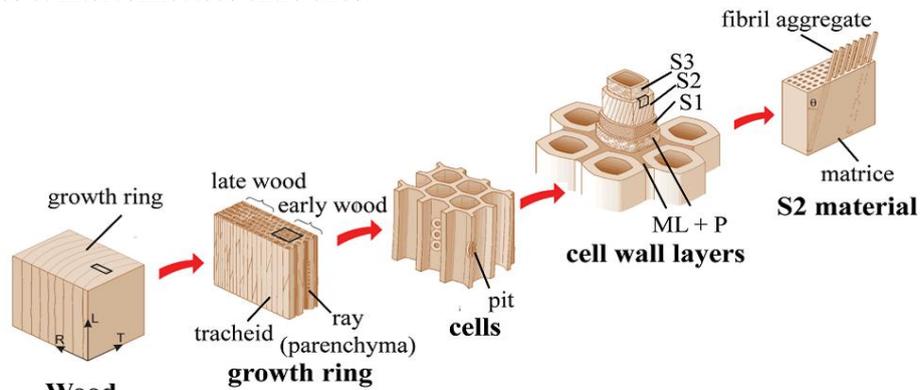


Fig. 1 : La structure hiérarchique du bois (Rafsanjani, 2013).

La cellule élémentaire périodique, sur laquelle s'appuie le schéma d'homogénéisation, est issue de la description de la paroi secondaire qui contribue principalement aux propriétés mécaniques et physiques du tissu cellulaire. Les parois du bois sont composées typiquement de 3% de paroi primaire, 13% de couche S1, 80% de couche S2, 4% de couche S3 (Fengel et Stoll, 1973), la couche S2 dominante étant constituée principalement de fibrilles de cellulose inclinées de 0° à environ 30°. Aussi, du fait de cette prédominance de la couche pariétale S2, le comportement effectif de la paroi cellulaire sera évalué au cours de cette étude par la détermination du comportement effectif de la couche S2.

Description de la microstructure réelle de la paroi cellulaire

Dans cette étude, afin de décrire la microstructure de la paroi S2, la représentation proposée par Salmén (2015) est utilisée. La couche S2 peut être considérée comme un composite renforcé dont la matrice est constituée par un mélange d'hémicelluloses de type xylane et de lignine et où les renforts sont les fibrilles. Ces dernières sont constituées d'un agglomérat de microfibrilles de cellulose cristalline jointes par de l'hémicellulose de type glucomannane, la liaison entre fibrilles et matrice étant également assurée par des glucomannanes (Fig. 2a). Par ailleurs, les dimensions latérales des fibrilles du bois sont typiquement de l'ordre de 20 nm et celles des microfibrilles de 3 nm (Fig. 2b). De plus, en ce qui concerne la direction axiale des fibrilles, bien qu'il n'existe pas de données directes dans la littérature, on peut néanmoins estimer, au vu de photographies au microscope électronique à balayage (MEB) de Ruel (1984), réalisées sur le bois délignifié par des champignons, à 0.3 μm l'ordre de grandeur de la distance entre les points de contact entre fibrilles.

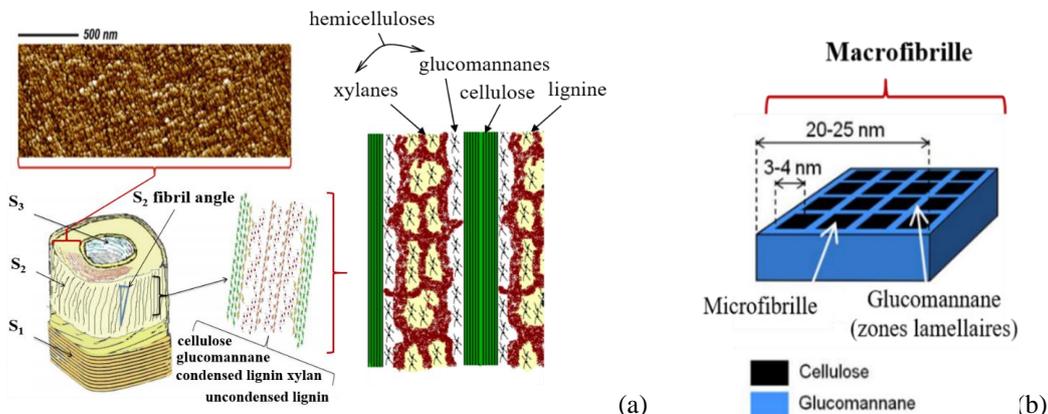


Fig. 2 : (a) Structure de la paroi cellulaire indiquant la disposition des différents polymères du bois dans la paroi S2; (b) Structure schématique des fibrilles (Salmén et Burgert, 2009).

Au cours de cette étude, on considèrera le comportement des fibrilles comme connu et évalué en première approximation par les valeurs expérimentales de Sakurada (1962) qui correspondent à de la cellulose réelle (et non parfaite comme c'est de cristal de cellulose dont sont a priori constituées les microfibrilles).

Méthodologie

Description de la cellule élémentaire

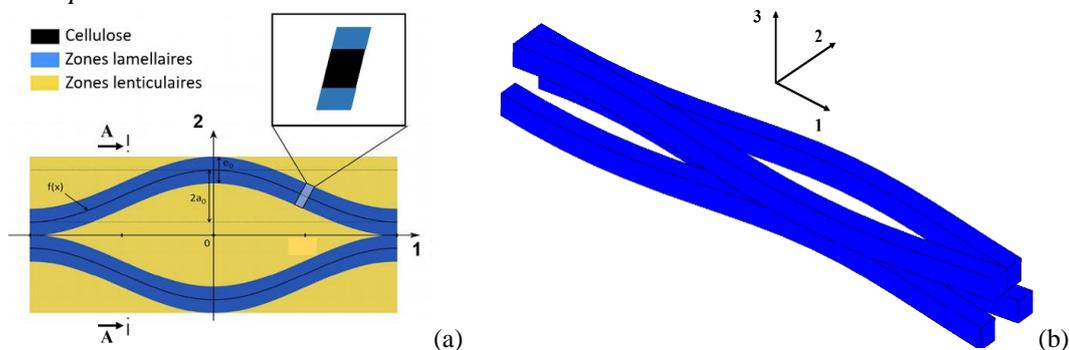


Fig.3 : Description géométrique de la microstructure : (a) à 1 sens d'ondulation (1S); (b) à 2 sens d'ondulations (2S)

Dans cette étude, nous allons proposer 3 descriptions de la cellule élémentaire :

- modèle 0S (à des fins de comparaison) : les fibrilles sont rectilignes et parallèles entre elles;
- modèle 1S (Fig.3a) : chaque fibrille ondule dans le plan (1 2) et est en contact linéique périodique avec deux voisines ;
- modèle 2S (Fig.3b) : chaque fibrille oscille dans les deux plans (1 2) et (1 3), son centre suivant une hélice, et entre en contact linéique périodique avec 4 voisines.

Description du maillage

Le maillage volumique des modèles 0S, 1S et 2S est généré en utilisant des éléments cubiques à 8 nœuds dans le code de calcul Cast3M (Fig.4).

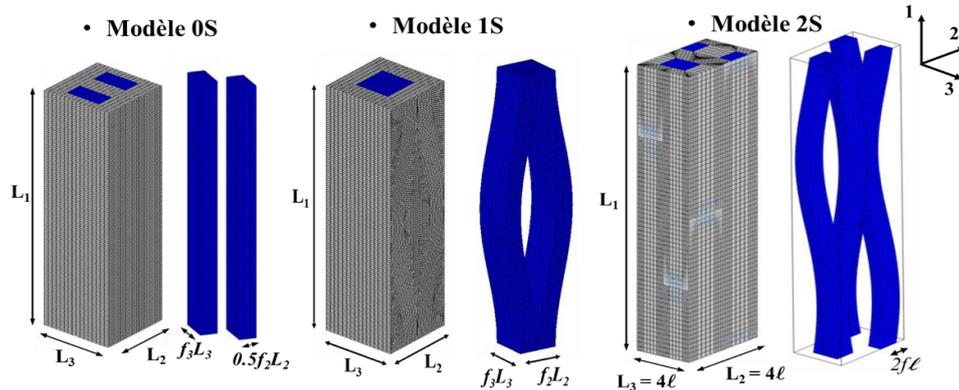


Fig.4 : Maillage des trois microstructures de la cellule élémentaire périodique

Il est noté que $f_i + m_i = 1$, où f_i et m_i représentent respectivement la proportion linéique de fibrille et de matrice dans la direction i .

Calcul du comportement effectif

Pour calculer le comportement effectif de la cellule élémentaire périodique, nous utilisons une approche en déformation et appliquons des conditions aux limites périodiques (CLP) (Bornert et al. 2001). Pour cela, on considèrera que les fibrilles ont un comportement élastique isotrope transverse et que la matrice est élastique linéaire. On supposera de plus une interface parfaite entre la matrice et les fibrilles. Classiquement, les propriétés élastiques effectives de la paroi S2 sont obtenues en appliquant 6 différents chargements élémentaires tout en résolvant le problème local d'élasticité associé à la cellule élémentaire soumise à ces CLP. Par ailleurs, par des arguments de symétrie liés à la géométrie de la cellule élémentaire et au comportement des phases, on montre que le comportement effectif est nécessairement orthotrope.

Résultats et discussions

Afin de déterminer l'influence des ondulations sur le comportement de la paroi, nous avons réalisé une étude paramétrique au cours de laquelle nous avons fait varier différents paramètres géométriques (rapport de forme $r_\phi = L_1/L_2$, concentration volumique des fibrilles $c = f_2 f_3$, proportion de matrice lamellaire sur lenticulaire $r_\lambda = \frac{V_{lamellaire}}{V_{lenticulaire}} = \frac{1-f_3}{f_3(1-f_2)}$) et matériaux (contraste entre phases : ratio E_L^F/E^M où E_L^F est le module d'Young longitudinal des fibrilles et E^M est le module d'Young de la matrice). A cette intention, nous avons évalué pour différentes valeurs de ces paramètres les composantes \check{C}_{ij} de la rigidité effective associées aux modèles de microstructure 1S et 2S et l'avons comparé au modèle 0S pour lequel les fibrilles n'ont pas d'ondulation. A titre d'exemple, nous avons reporté sur la Fig. 5, l'évolution en fonction de la concentration c des composantes les plus fortement influencés

par l'effet des ondulations, à savoir $\tilde{C}_{66} = \tilde{G}_{12}$ et $\tilde{C}_{55} = \tilde{G}_{13}$ (les 2 modules de cisailment effectifs).

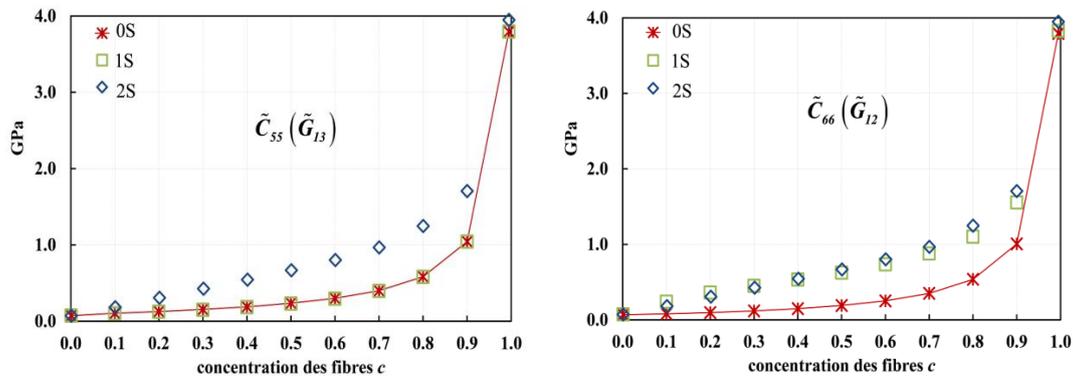


Fig. 5 : Evolution des composantes effectives \tilde{C}_{ij} en fonction de la concentration des fibres pour les 3 modèles ($r_\lambda = 1.0$, $r_\phi = 7.5$, $\log_{10}(E_L^F/E^M) = 3.0$)

Conclusions et perspectives

Les comparaisons effectuées dans cette étude nous ont permis de montrer que les modèles 1S et 2S décrivent de manière similaire les coefficients les plus influencés \tilde{G}_{12} , $\tilde{\nu}_{12}$ (ou de manière équivalente \tilde{C}_{66} et \tilde{C}_{12}) par l'effet d'ondulation dans le plan (1 2). Par ailleurs, le modèle 2S met en évidence l'effet d'ondulation des fibrilles dans le plan (1 3) sur les composantes effectives \tilde{G}_{13} , $\tilde{\nu}_{13}$ - ou \tilde{C}_{55} et \tilde{C}_{13} - de la paroi cellulaire.

Dans le but d'étudier l'influence des ondulations des fibrilles non plus uniquement sur la paroi S2 mais également sur la cellule de bois, un modèle de changement d'échelle permettant de passer de la paroi secondaire au tissu cellulaire du bois est en cours d'élaboration.

Remerciements

Les auteurs remercient l'Université Clermont Auvergne pour son soutien financier.

Références

- Bornert M., Bretheau Th., Gilormini P. (2001) Homogénéisation en mécanique des matériaux 1 : matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques. Tome 1, chapitre 3.
- Fengel D., M. Stoll (1973) Variation in cell cross-sectional area, cell-wall thickness and wall layers of spruce tracheids within an annual ring. *Holzforschung* 27, p. 1–7.
- Rafsanjani A. (2013) Multiscale Poroelastic Model - Bridging the Gap from Cellular to Macroscopic Scale. Doctor of Sciences, ETH Zurich, p. 8-10.
- Ruel K. (1984) Ultrastructural aspects of wood degradation by *Sporotrichum pulverulentum*. *Holzforschung* 38, p. 61-68.
- Sakurada I., Nukushina Y., Ito T. (1962), Experimental determination of the elastic modulus of crystalline regions in oriented polymers, *Journal of Polymer Science* 57, p. 651-660.
- Salmén L. et Burgert I. (2009), Cell wall features with regard to mechanical performance - A review. *Holzforschung*, vol. 63, p. 121-129.
- Salmén L. (2015) Wood morphology and properties from molecular perspectives. *Annals of Forest Science* 72, p. 679-684.