

1. Contexte et objectifs

Contexte: Les comportements mécaniques du bois présentent une grande variabilité, ils sont étroitement liés à sa structure, du niveau moléculaire au niveau macroscopique.

Objectif: Analyser numériquement et analytiquement les propriétés élastiques linéaires de la paroi cellulaire du bois à travers des modèles de changement d'échelle. Les deux approches proposées sont basées sur une description géométrique de la structure subpariétale qui considère des macrofibrilles incurvées et reliées entre elles dans la paroi S2.

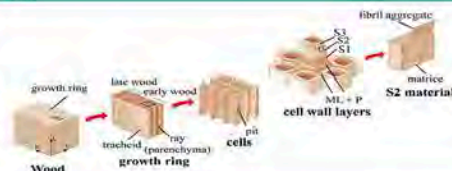


Fig.1: La structure hiérarchique du bois (A.Rafsanjani 2018)

2. Description de la cellule élémentaire

La paroi cellulaire est constituée de couches concentriques, chacune composée de microfibrilles de cellulose entourée par une matrice amorphe composée d'un mélange d'hémicellulose et de lignine (Fig.2a, Salmén 2004).

La cellule unitaire représentant la paroi S2 est constituée par deux macrofibrilles reliées et incurvées dans le plan xy et entourées de matrice selon la géométrie décrite par la Fig. 2b.

Par ailleurs, on suppose de plus la présence d'une couche de matrice d'épaisseur constante dans la direction z séparant dans cette direction les macrofibrilles d'une couche périodique à une autre.

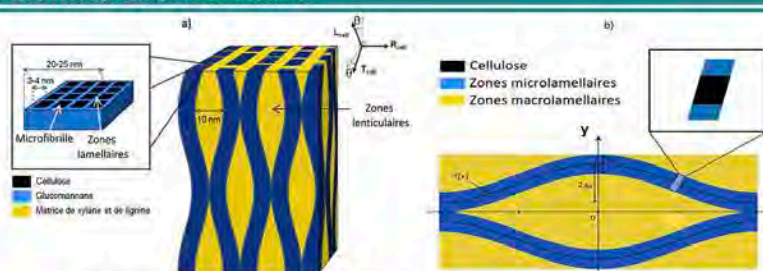


Fig.2: Structure schématique des macrofibrilles connectées et incurvées (Marie 2017)

3. Approche numérique

Description du maillage

Les deux macrofibrilles sont générées à partir d'une courbe sinusoïdale. On suppose qu'elles ont un comportement linéaire élastique isotrope transverse.

La matrice est constituée de deux zones différentes comme décrites par la Fig. 3, son comportement est élastique linéaire isotrope.

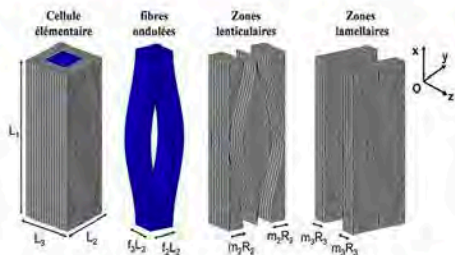


Fig. 3: Maillage d'une cellule élémentaire périodique à deux fibres ondulées

Calcul du comportement effectif

Nous utilisons une approche en déformation et appliquons ainsi des conditions aux limites (CL) périodiques (Bornert et al. 2001) du type :

$$u_i(\underline{x}) = E_{ij}^0 \cdot x_j + u'_i(\underline{x}) \quad (1)$$

où E_{ij}^0 est le tenseur homogène des déformations macroscopique, et où $u'_i(\underline{x})$ représente un champ de déplacement périodique.

En appliquant 6 chargements élémentaires différents et en résolvant le problème local d'élasticité associé à la cellule élémentaire soumise à ces CL, on calcule la contrainte macroscopique $\bar{\sigma}_{ij}$ à l'aide de la relation :

$$\bar{\sigma}_{ij} = \langle \sigma_{ij} \rangle = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij} dV \quad (2)$$

Les propriétés élastiques effectives \bar{C}_{ijkl} de la paroi cellulaire sont alors déterminées par la relation suivante:

$$\bar{\sigma}_{ij} = \bar{C}_{ijkl} \cdot \bar{E}_{kl} \quad (3)$$

4. Approche analytique

Une approche analytique en contraintes planes basée sur la description géométrique de la cellule unitaire définie précédemment a été proposée par J. Gril (1988). Cette approche permet la détermination de la rigidité du réseau de macrofibrilles en l'absence de matrice (Fig. 4).

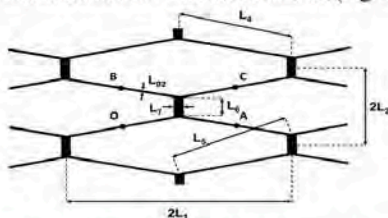


Fig. 4: Schématisation d'une lamelle du réseau macrofibrillaire à l'aide d'un assemblage périodique de poutres et de poutrelles

5. Résultats et discussions

Les résultats obtenus analytiquement par l'approche de Gril (1988) sont confrontés à ceux issus de l'approche numérique dans le cas d'une matrice infiniment souple (Fig. 5).

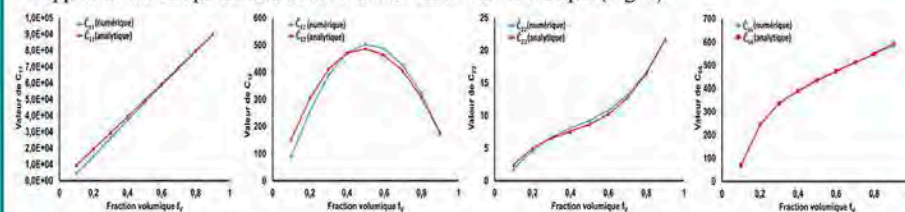


Fig. 5: Comparaisons des \bar{C}_{ij} entre les deux approches en faisant varier la fraction volumique des fibres

Cette comparaison est basée sur les composantes de la matrice de rigidité obtenues en faisant varier la fraction volumique des fibres. Pour obtenir cet accord, il a fallu procéder à un ajustement du niveau d'interpénétration des fibres (paramètre L6 de la figure 4).

Conclusions et perspective

- Le modèle analytique décrit convenablement le comportement effectif du réseau de macrofibrilles évalué par homogénéisation numérique.
- Il est ensuite prévu d'analyser l'influence de l'ondulation des fibres en comparant les résultats obtenus par homogénéisation numérique sur deux 2 cellules élémentaires de morphologies distinctes: la 1^{ère} (décrite par la figure 2b) incluant des fibres ondulées et reliées et la seconde constituée de fibres parallèles entourées de matrice.
- Enfin, dans le but de prendre en compte l'ondulation des macrofibrilles dans les trois directions spatiales, une nouvelle description morphologique 3D de la cellule élémentaire est en cours d'élaboration.

Bibliographie

- Bornert M., Bretheau T., Gilormini P. (2001) Homogénéisation en mécanique des matériaux 1: matériaux aléatoires élastiques et milieux périodiques. Tome 1 Composites à microstructure périodique.
- Bonnet M. (2017) Analyse multi-échelle du comportement hygro-mécanique du bois: Mise en évidence par relaxométrie du proton et mesures de champs volumiques de l'influence de l'hétérogénéité au sein du cerne. Thèse de doctorat, Spécialité Structures et Matériaux, Université Paris-Est, page 125-129.
- Ahmad R.A. (2013) Multiscale Poroeleastic Model - Bridging the Gap from Cellular to Macroscopic Scale. Doctor of Sciences, ETH Zurich, page 8-10.
- Gril J. (1988) Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Thèse de doctorat, Université Paris 6, partie 3.
- Salmén L. (2004) Micromechanical Understanding of the Cell-Wall Structure. Comptes Rendus Biologies Volume 327, Issues 9-10 (octobre), Pages 873-880.