

# Caractérisation mécanique de la paroi cellulaire du bois : une revue [1]

O. ARNOULD

Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, CNRS UMR5508, Université Montpellier 2  
cc 048 Place Eugène Bataillon, 34095 MONTPELLIER

## Résumé :

*Le bois en tant que matériau présente des propriétés effectives exceptionnelles mais son origine biologique entraîne une forte sensibilité aux dégradations biologiques et aux variations climatiques (température, humidité) ainsi que de grandes variations d'organisation de ses éléments constitutifs à plusieurs échelles (cerne annuel, tissus ligneux, cellule/fibre, paroi cellulaire, matière ligno-cellulosique, macromolécules, voir figure 1) qui rendent son utilisation plus complexe. La prédiction et la compréhension fine des comportements du bois à l'échelle macroscopique (i.e., échelle des cernes annuels) sont donc difficiles et il est particulièrement intéressant d'étudier le bois à l'échelle de la paroi cellulaire. En effet, les propriétés du bois, et de tous matériaux à base de bois, dépendent fortement des propriétés des fibres, et donc de leur paroi. Il est donc primordial de pouvoir caractériser mécaniquement les différentes couches de la paroi cellulaire des fibres, en particulier la paroi dite secondaire, si l'on veut comprendre les relations entre (micro)structure et propriétés. Différentes méthodes de caractérisation mécanique développées dans le cadre des recherches effectuées dans le domaine de la mécanique du bois à cette échelle (traction sur fibre isolée, nanoindentation, microscopie à force atomique, etc.) seront présentées et comparées (figure 1). La figure 2 illustre les résultats obtenus par les deux techniques principales, i.e., essais sur fibre isolée et nanoindentation. Les développements futurs et les limitations de ces deux seront présentés en relation avec les propriétés mesurées du bois. L'utilisation possible de ces techniques dans le cadre de recherches en biomécanique de l'arbre sera donnée en guise de conclusion.*

## Abstract :

*Wood as an engineering material has remarkable effective properties but, as a biological material, is very sensitive to biological degradation agents and to climate variation (temperature and relative humidity) and presents a huge variation in the spatial organisation of its constituents at all the relevant scale (annual ring, lignified tissue, cell/fibre, cell wall, ligno-cellulosic material, macromolecules, see figure 1) that make its use more complex. The prediction and the understanding of the behaviour of wood at the macroscopic scale (i.e., annual ring scale) are thus difficult and it's particularly interesting to develop study at the cell wall scale. The properties of wood and wood-based materials are indeed strongly dependent on the properties of the fibres, that is, the cell wall properties. It is thus highly important to be able to mechanically characterise cell walls in order to understand (micro)structure–property relationships. Different mechanical characterization methods developed in the field of wood mechanics research at this scale (single fibre tensile tests, nanoindentation, atomic force microscopy, etc.) will be reviewed and compared (figure 1). Results obtained by the two main techniques, i.e., single fibre tensile testing and nanoindentation, are shown in figure 2. Challenges, opportunities, drawbacks and limitations of these techniques will be discussed with respect to the wood material properties. The possible used of these techniques in the field of research on tree biomechanics will be given as a conclusion.*

**Mots clefs :** bois, paroi cellulaire, caractérisation mécanique, essai sur fibre isolée, nanoindentation

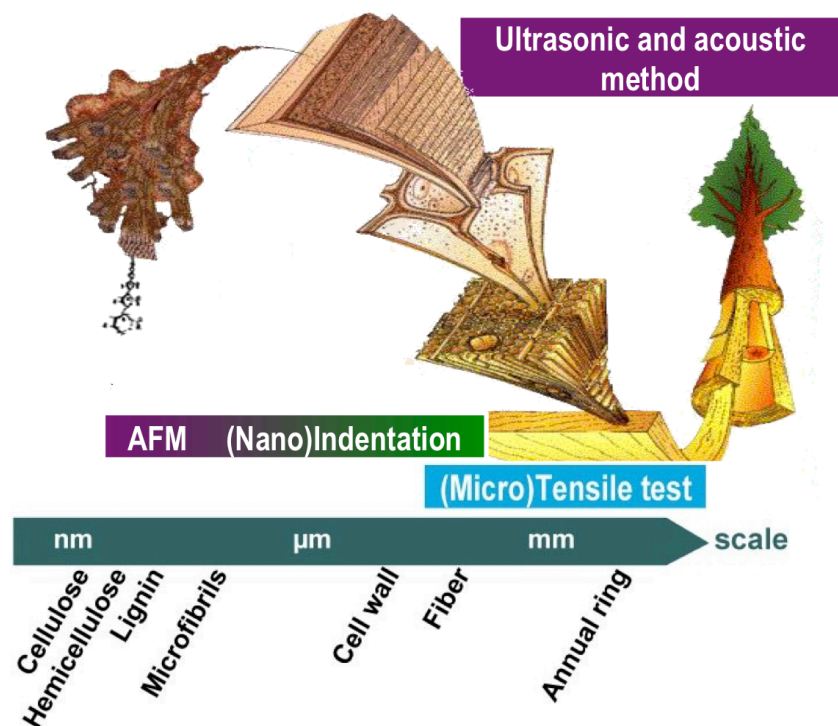


FIG. 1 – Les échelles caractéristiques du bois (d'après J. Harrington, 1998) et les techniques de caractérisation mécanique « classique » en science du bois à l'échelle de la paroi cellulaire et de la fibre.

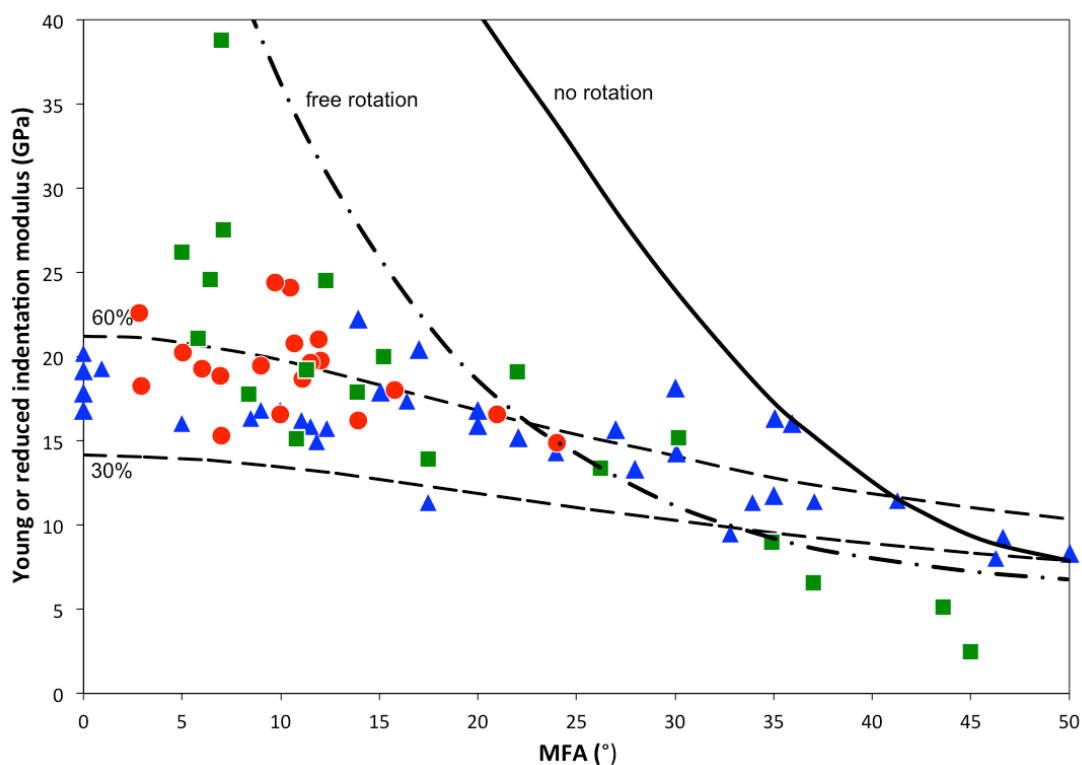


FIG. 2 – Comparaison de l'évolution, en fonction de l'angle des microfibrilles (MFA), du module d'Young longitudinal mesurés sur fibre isolée, sèche à l'air, principalement de résineux par essai de microtraction [2-6] (carré vert) et du module réduit d'indentation longitudinal mesuré par nanoindentation dans la paroi secondaire de fibres de bois, sèche à l'air, de résineux [7-14] (triangle bleu) et de feuillus [15,16] (cercle rouge). Les traits continu et mixte représentent un modèle de traction sur fibre isolée libre en rotation ou non [17] et les traits en pointillés représentent un modèle d'indentation anisotrope dans une paroi secondaire type

contenant 30% et 60% de cellulose [18].

## References

- [1] Eder M., Arnould O., Dunlop J.W.C., Hornatowska J., Salmén L., Experimental micromechanical characterization of wood cell walls, *Wood Science and Technology*, 47, 163–182, 2013 (open access).
- [2] Mott L., Groom L., Shaler S., Mechanical properties of individual southern pine fibers. Part II. Comparison of earlywood and latewood fibers with respect to tree height and juvenility, *Wood and Fiber Science*, 34(2), 221–237, 2002.
- [3] Burgert I., Frühmann K., Keckes J., Fratzl P., Stanzl-Tschegg S., Structure-function-relationships of four compression wood types: micromechanical properties at the tissue and fibre level, *Trees*, 18, 480–485, 2004.
- [4] Eder M., Jungnikl K., Burgert I., A close-up view of wood structure and properties across a growth ring of Norway spruce (*Picea abies* [L] Karst.), *Trees*, 23, 79–84, 2009.
- [5] Wang G., Yu Y., Shi S.Q., Wang J.W., Cao S.P., Cheng H.T., Microtension test method for measuring tensile properties of individual cellulosic fibers, *Wood and Fiber Science*, 43(3), 251–261, 2011.
- [6] Keunecke D., Eder M., Burgert I., Niemz P., Micromechanical properties of common yew (*Taxus baccata*) and Norway spruce (*Picea abies*) transition wood fibers subjected to longitudinal tension, *Journal of Wood Science*, 54, 420–422, 2008.
- [7] Wimmer R., Lucas B.N., Comparing mechanical properties of secondary wall and cell corner middle lamella in spruce wood, *IAWA Journal*, 18(1), 77–88, 1997.
- [8] Gindl W., Gupta H.S., Schöberl T., Lichtenegger H.C., Fratzl P., Mechanical properties of spruce wood cell walls by nanoindentation, *Applied Physics A*, 79, 2069–2073, 2004.
- [9] Zickler G.A., Schöberl T., Paris O., Mechanical properties of pyrolysed wood: a nanoindentation study, *Philosophical Magazine*, 86(10), 1373–1386, 2006.
- [10] Tze W.T.Y., Wang S., Rials T.G., Pharr G.M., Kelley S.S., Nanoindentation of wood cell walls: continuous stiffness and hardness measurements, *Composites Part A*, 38, 945–953, 2007.
- [11] Konnerth J., Gierlinger N., Keckes J., Gindl W., Actual versus apparent within cell wall variability of nanoindentation results from wood cell walls related to cellulose microfibril angle, *Journal of Materials Science*, 44(16), 4399–4406, 2009.
- [12] Brandt B., Zollfrank C., Franke O., Fromm J., Goken M., Durst K., Micromechanics and ultrastructure of pyrolysed softwood cell walls. *Acta Biomaterialia*, 6(11), 4345–4351, 2010.
- [13] Yin Y.F., Berglund L., Salmén L., Effect of steam treatment on the properties of wood cell walls, *Biomacromolecules*, 12(1), 194–202, 2011.
- [14] Jäger A., Hofstetter K., Buksnowitz C., Gindl-Altmatter W., Konnerth J., Identification of stiffness tensor components of wood cell walls by means of nanoindentation, *Composites Part A*, 42(12), 2101–2109, 2011.
- [15] Wu Y., Wang S.Q., Zhou D.G., Xing C., Zhang Y., Use of nanoindentation and Silviscan to determine the mechanical properties of 10 hardwood species, *Wood and Fiber Science*, 41(1), 64–73, 2009.
- [16] De Borst K., Bader T.K., Wikete C., Microstructure–stiffness relationships of ten European and tropical hardwood species, *Journal of Structural Biology*, 177, 532–542, 2012.
- [17] Neagu R.C., Gamstedt E.K., Modelling of effects of ultrastructural morphology on the hygroelastic of wood fibres, *Journal of Materials Science*, 42, 10254–10274, 2007.
- [18] Jäger A., Bader T., Hofstetter K., Eberhardsteiner J., The relation between indentation modulus, microfibril angle, and elastic properties of wood cell walls, *Composites Part A*, 42(6), 677–685, 2011.