

## **Sujet de stage/thèse : Maîtrise des transferts et effets induits lors du séchage du bois**

### **PROBLEMATIQUE ET CONTEXTE**

Le bois présente des atouts en termes de structures innovantes et d'enjeux environnementaux, mais il est hygroscopique et ses propriétés peuvent être modifiées, voire altérées en conditions d'usage. En effet, les variations climatiques (humidité relative), ou la présence d'eau liquide (infiltration), peuvent conduire à des pertes de performances mécaniques du bois, des désordres au niveau de la structure et même à une destruction du bois, via des attaques fongiques, quand l'essence utilisée ne présente pas de durabilité naturelle suffisante ou si les conditions de transfert de l'eau (humidification-imbibition ou séchage) sont mal contrôlées. Cette sensibilité à l'humidité peut constituer un frein à l'utilisation du bois dans la construction si les interactions eau-bois sont mal maîtrisées et ceci même si les dispositions constructives (normes) sont prises en compte. Par ailleurs, lors de la première transformation du bois (sciage), la réduction des dépenses énergétiques associées au séchage artificiel du bois vert (jamais séché) nécessite d'optimiser celui-ci par rapport à l'essence considérée et à ses propriétés de transfert.

De manière générale, les transferts d'eau (humidification-imbibition et séchage) et les interactions eau-bois sont encore mal appréhendés, soit parce qu'ils sont reproduits par des modèles qui ne permettent pas de prendre en compte correctement la physique des phénomènes en jeu, soit parce que la description des mécanismes aux différentes échelles est incomplète.

Depuis quelques années, le laboratoire Navier réalise des recherches originales sur le matériau bois en étudiant en particulier : (i) les interactions eau-bois, notamment avec l'eau dite liée, eau absorbée par les polymères du bois [1-2], (ii) les transferts d'eau dans le domaine hygroscopique [3] ou en présence d'eau liquide [4-7]. L'ensemble de ces travaux s'appuie sur les outils d'imagerie et de  $^1\text{H}$  RMN de laboratoire Navier et a permis de mieux comprendre et préciser les mécanismes physiques en jeu. En particulier, nous avons montré (pour le cas de la direction longitudinale, selon l'axe des cellules, axe principal de l'arbre) que l'imbibition spontanée dans le bois de feuillus (peuplier) est environ mille fois plus lente que celle prévue par le modèle standard de l'absorption par capillarité (modèle de Washburn) qui est habituellement utilisé pour décrire ces phénomènes [4]. À partir d'observations par IRM (Imagerie par Résonance Magnétique) et par microtomographie-X (réalisées au Synchrotron Soleil), nous avons prouvé que ce phénomène est lié à des variations de la mouillabilité de la paroi interne des vaisseaux dans lesquels circule l'eau [5]. Ces travaux ont permis de conclure que l'eau liée « contrôlait » la cinétique d'imbibition. Ce mécanisme s'est avéré également essentiel dans le fonctionnement de l'imbibition des résineux [6].

Dans le cas du séchage du bois, notamment en présence d'eau liquide dite libre (à l'état vert ou réimbibé par la pluie ou des infiltrations), la physique est aussi encore très mal comprise. Une meilleure compréhension des phénomènes physiques associés au séchage (mécanismes gouvernant le processus, vitesse de séchage, distribution interne d'humidité, etc) permettra de mettre en place des modèles prédictifs pertinents des conditions optimales de séchage du bois avant utilisation en considérant les évolutions internes des caractéristiques du bois durant ce processus, et en condition de service dans les structures.

### **OBJECTIFS**

Nous avons récemment amorcé une approche originale du séchage du bois (peuplier) consistant à suivre (par IRM et RMN) à la fois la distribution d'eau libre et d'eau liée le long de la direction de séchage, et les évolutions de l'eau libre à l'échelle des vaisseaux et des fibres au sein de l'échantillon (Microtomographie par rayons X). Cette étude concernant le séchage dans la direction longitudinale, a abouti à la conclusion que le séchage du bois peut être aussi contrôlé par le transport de l'eau liée vers la surface libre de l'échantillon, et l'absorption de l'eau libre sous forme d'eau liée en profondeur [7].

L'objectif de cette thèse est donc de développer complètement l'approche initiée sur le séchage du bois en présence d'eau liquide, en l'appliquant aux autres directions d'anisotropie du bois (radiale, tangentielle) qui sont en pratique les principales directions de séchage, et à d'autres types de bois (autres feuillus, et résineux), et de proposer une description générale des mécanismes physiques du séchage du bois dans les différentes directions, permettant de prédire la vitesse de séchage en fonction des conditions externes et les évolutions de la distribution d'humidité au cours du temps, ainsi que les déformations résultantes. Par analogie avec ce qu'il a été possible de faire pour le séchage de matériaux poreux modèles [8] (régimes de séchage gouvernés successivement par les effets capillaires puis la diffusion de vapeur), un tel objectif de modélisation physique simplifié semble atteignable dans la mesure où le séchage du bois s'avèrera effectivement bien régi par quelques mécanismes fondamentaux, tels

que la diffusion d'eau liée et la diffusion de vapeur, dont la compétition conduit à distinguer différents régimes. Au niveau de cette thèse l'objectif est, d'une part, la distinction de régimes de séchage en fonction, des conditions extérieures (flux d'air, humidité), de la direction principale de séchage par rapport aux directions d'anisotropie du bois, et de l'épaisseur du bois considéré ; et d'autre part, la description, pour chaque régime, de la vitesse de séchage et de la distribution d'eau au cours du temps. Cette approche permettra une appréciation rapide et pertinente des conditions de séchage, et leur éventuelle optimisation, et pourra ultérieurement être prise en compte dans des modélisations numériques plus complètes.

## **DEROULEMENT**

Le travail s'appuiera sur l'étude d'échantillons de bois à différentes échelles ( $\text{cm}^3$  à  $\text{dm}^3$ ), et notamment par des mesures et observations par IRM (Navier), Microtomographie aux rayons X (Navier, Synchrotron Soleil). L'intérêt de l'IRM est de pouvoir distinguer les distributions d'eau libre et d'eau liée séparément, et donc de pouvoir décrire les mécanismes de diffusion dans les parois des cellules. Ceci peut être complété par des mesures des déformations le long d'un échantillon, qui peuvent être bien corrélées à la quantité d'eau liée absorbée, ou par des mesures de distributions de temps de relaxation RMN au cours du temps, qui permettent de quantifier les évolutions des quantités d'eau dans les différents états, voire même donnent des informations sur l'hétérogénéité spatiale de ces types d'eau [1-2, 9]. Les mesures au synchrotron (notamment images acquises sur du douglas lors d'une campagne récente) permettent quant à elles d'observer la structure interne et en particulier les interfaces liquide-air à l'échelle du micromètre sur des temps suffisamment courts par rapport à la dynamique de transport.

Notons également que l'analyse détaillée de la vitesse de séchage (à partir de mesures macroscopiques) au cours du temps, et selon différentes conditions, bien que pouvant paraître une mesure simpliste à côté des mesures ci-dessus, peut en fait fournir des informations très importantes concernant les évolutions de la distribution du liquide et le type d'eau gouvernant le séchage, car pour des conditions extérieures fixées (flux d'air constant), la vitesse de séchage dépend principalement de ces caractéristiques [5, 8].

En fonction des résultats acquis et de l'avancement du projet de thèse, les effets sur le comportement hydromécanique (déformations hydriques) pourront être étudiés selon une méthodologie développée au Laboratoire Navier. Ces déformations peuvent être corrélées au départ de l'eau liée et ceci à différentes échelles en tenant compte des distributions de l'eau libre et l'eau liée.

## **PROFIL SOUHAITE DU (DE LA) CANDIDAT(E)**

Compétences affirmées en physique ou en sciences des matériaux souhaitées. Connaissances préalables en sciences du bois non nécessaires.

## **ENCADREMENT**

**Contact** : P. Coussot, Equipe RMP, Navier, philippe.coussot@univ-eiffel.fr

S. Caré, Equipe MSA, Navier

B. Maillet, R. Sidi-Boulenouar, Navier, Equipe RMP

## **REFERENCES**

- [1] M. Bonnet, D. Courtier-Murias, P. Faure, S. Rodts, S. Caré, *Holzforshung* 71(6), pp. 481-490 (2017)
- [2] L. Rostom, D. Courtier-Murias, S. Rodts, S. Caré, *Horlzforshung*, 74, 400-411 (2020)
- [3] T.A. N'Guyen, N. Angellier, S. Caré, L. Ulmet, F. Dubois, *Wood Science and Technology* 51(4), 811-830 (2017)
- [4] M. Zhou, S. Caré, D. Courtier-Murias, P. Faure, S. Rodts, P. Coussot, *Wood Science and Technology*, 52, 929-955 (2018)
- [5] M. Zhou, S. Caré, A. King, D. Courtier-Murias, S. Rodts, G. Gerber, P. Aïmedieu, M. Bonnet, M. Bornert, P. Coussot, *Physical Review Research*, 1, 033190 (2019)
- [6] D.M. Nguyen, S. Caré, D. Courtier-Murias, M. Zhou, P. Coussot, *Holzforshung* DOI: <https://doi.org/10.1515/hf-2020-0051>
- [7] H. Penvern, M. Zhou, B. Maillet, D. Courtier-Murias, M. Scheel, J. Perrin, T. Weitkamp, S. Bardet, S. Caré, P. Coussot, in press in *Physical Review Applied* (2020)
- [8] J. Thiery, S. Rodts, D.A. Weitz, P. Coussot, *Phys. Rev. Fluids*, 2, 074201 (2017)
- [9] T. Lerouge, B. Maillet, D. Courtier-Murias, D. Grande, B. Le Droumaguet, O. Pitois, P. Coussot, *Phys. Rev. Applied*, 13, 044061 (2020)