

Compréhension des mécanismes de transfert de liquide dans le bois

ZHOU Meng, COURTIER-MURIAS Denis, FAURE Paméla, RODTS Stéphane, CARE Sabine, COUSSOT Philippe

Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts, IFSTTAR, CNRS, UPE, Champs-sur-Marne, France

Contexte

- **Bois** : matériau de construction de choix grâce à ses propriétés mécaniques et sa faible densité, mais très sensible à l'eau. Sous l'effet de l'humidité : déformations importantes, dégradation complète du matériau (durabilité altérée)
- Mécanismes de transfert dans le bois beaucoup étudiés mais mauvais accord entre les modèles et les expériences : essais appropriés à différentes échelles non réalisés et compréhension incomplète des mécanismes à l'origine de la perméabilité intrinsèque du bois
- Nécessité de réaliser des observations internes permettant de mesurer au cours du temps la distribution spatiale des différents états du liquide imbibé
 - Questions essentielles : **comment** l'eau pénètre dans le bois et **où** va-t-elle ?

Objectifs

- Etude des transferts à l'aide de méthodes non-destructives par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN et IRM) pour appréhender la complexité des phénomènes :
- Paramètres : nature du liquide (eau, huile), direction d'imbibition, état initial (humidité)
 - Matériau : peuplier, feuillu à zone poreuse diffuse
- Le travail est complété par :
- Caractérisation de la structure par microscopie optique
 - Développement d'un modèle pour décrire les mécanismes de transfert de liquide

Etat de l'art

Washburn - gravité

Un fluide s'imbibe dans un milieu poreux :

Loi de Darcy (1856):

Vitesse moyenne du fluide à travers un milieu poreux:

$$v = \frac{k}{\mu} \nabla P \quad (k: \text{perméabilité du milieu})$$

Force motrice (capillaire et gravité mis en jeu)

$$P_c - \rho g h$$

Washburn sous effet de la gravité:

$$v = \frac{dh}{dt} = \frac{k}{\mu} \nabla (P_c - \rho g h)$$

- 1^{er} régime (gravité négligeable) : $h^2 \sim \left(\frac{k}{\mu}\right) \cdot P_c \cdot t$
- 2nd régime (plateau): $h_{eq} \sim \frac{P_c}{\rho g}$

Hypothèse: Front de saturation avance en fonction de la racine carrée du temps.

Imbibition dans le bois

Supposons que le bois est constitué de capillaires :

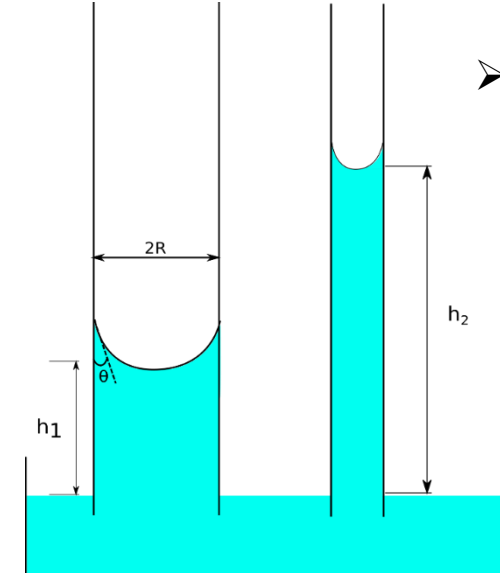
Loi de Laplace:

$$P_c = \frac{\sigma \cos \theta}{2R}$$

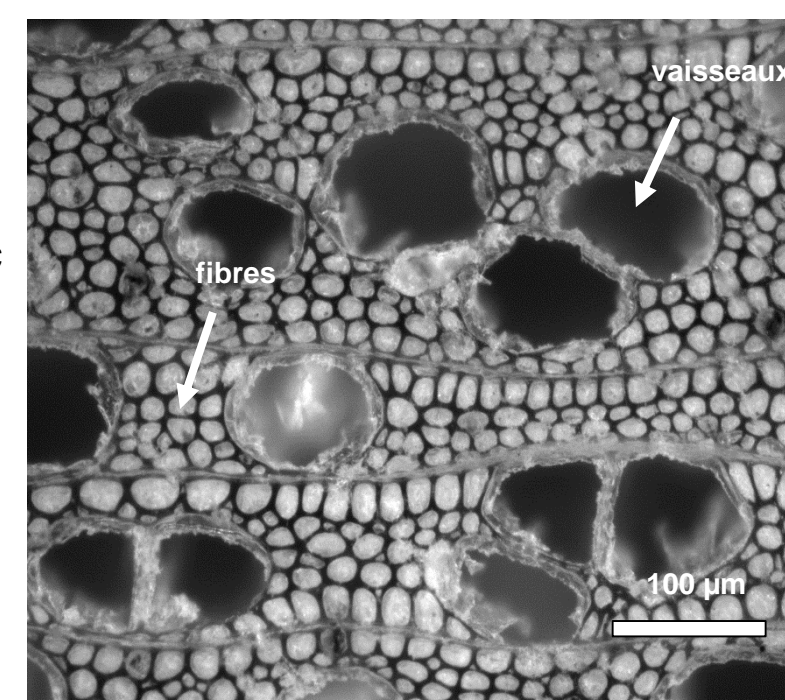
➢ Si le bois est considéré comme un milieu poreux avec des tubes parallèles,

$$k = \varepsilon R^2 / 8$$

avec ε : la porosité du milieu



Relation eau-bois



❖ Peuplier :

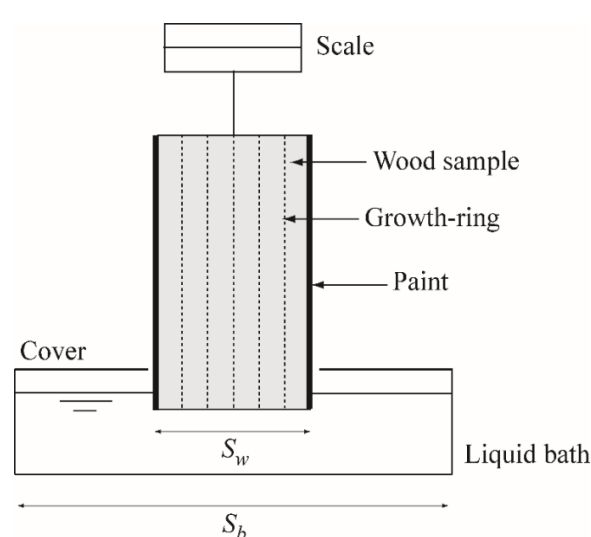
- Feuillu à zone poreuse diffuse
- Vaisseaux: d~ 100 μm
 - Fibres: d~10-20 μm
 - Porosité : 70%

❖ Humidité dans le bois :

- L'eau existe sous trois formes:
- **L'eau libre** : l'eau circule librement dans les vaisseaux et dans les fibres
 - **L'eau liée** : absorbée dans les parois cellulaires, induit le gonflement
 - **L'eau en phase vapeur**

Résultats

Tests d'imbibition

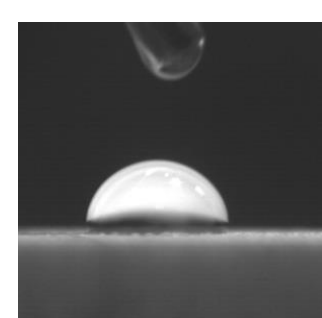


❖ Suivi par pesée

Pavé : 4 cm(R)*1,8 cm(T)*10 cm(L)

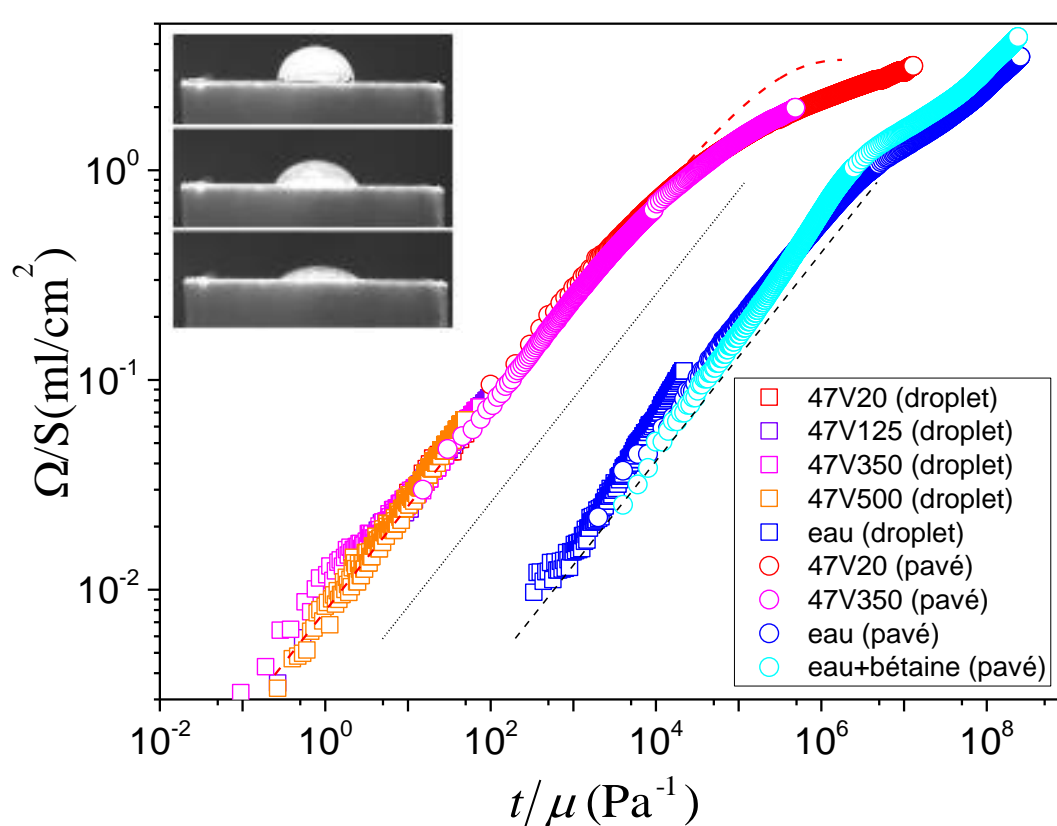
- profondeur immergée ~ 3mm.
- suspendu à une balance
- faces latérales imperméabilisées pour éviter des effets de bord

❖ Mesures de vitesse de pénétration des gouttes



$V_0 \sim 10 \mu\text{l}$

Caméra: 30 fps



Courbes d'imbibition: volume imbibé par unité de surface (Ω/S) en fonction du temps normalisé par la viscosité du fluide

• Propriétés des liquides testés:

- Eau (σ : 72 mN/m, η : 1 mPa.s)
- Surfactant: bétaine (1g/L, σ : 30 mN/m)
- huiles de silicone (σ : 21 mN/m) avec 4 viscosités différentes: 20, 125, 350, et 500 mPa.s

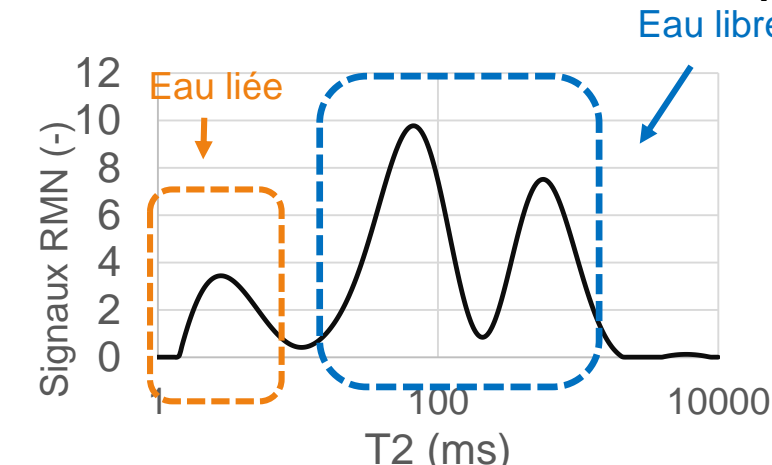
• Simulation Washburn sous effet de gravité:

(Seuls les vaisseaux sont pris en compte comme passages actifs pour la pénétration du liquide).

$$R = 55 \mu\text{m}, \text{ porosité} = 40\%$$

Résonance Magnétique Nucléaire

❖ Relaxométrie RMN : Identification et quantification de différents états d'eau



$T_2 \propto$ "Taille" des pores \times Mobilité des protons

Fit bi-exponentiel:

$$M(t) = A e^{-\frac{t}{T_{2,A}}} + B e^{-\frac{t}{T_{2,B}}} \quad \text{Erreur : } \pm 6\%$$

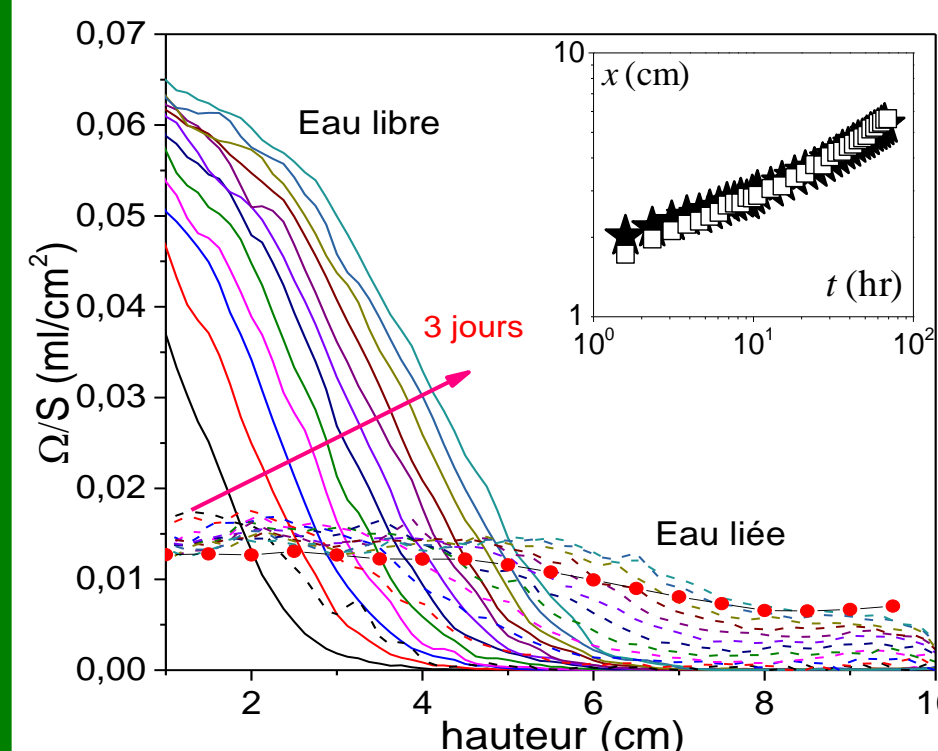
➢ Eau liée (type A) : 1-5 ms

➢ Eau libre (type B) : 20-1000 ms

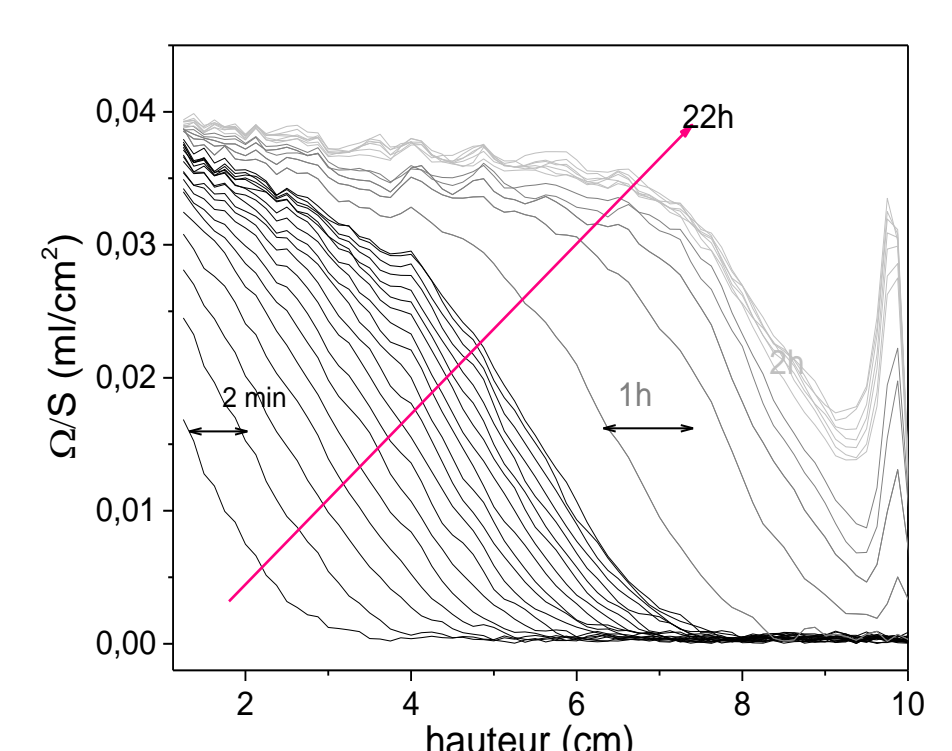
❖ Observations par IRM (profils multi-échos)

Répartition spatiale et temporelle de teneur en liquide imbibé

➢ Imbibition d'eau



➢ Imbibition d'huile de silicone (47V20)



- L'huile avance beaucoup plus vite en hauteur avec un front incliné, mais en teneur plus faible
- L'eau libre pénètre de façon similaire à l'huile, l'eau liée avance plus vite et devant l'eau libre
- L'avancée de l'eau libre et de l'eau liée sont synchronisées (voir la figure insérée)
- Les déformations sont bien associées à la pénétration de l'eau liée

Conclusions et perspectives

- IRM se révèle être un outil excellent pour différencier l'eau en différents états au cours de l'imbibition
- Différentes dynamiques sont observées pour les deux types de liquide qui ont une affinité différente avec le bois
- Dynamique de transferts d'eau est dominée par la diffusion de l'eau liée
- Développement d'un modèle tenant compte de la structure du matériau

Références:

[1] Siau.J.F : Transport Process in Wood. Springer, New York, (1984).

[2] Windt CW, Vergeldt FJ, De Jager PA, Van As H (2006) MRI of long-distance water transport: A comparison of the phloem and xylem flow characteristics and dynamics in poplar, castor bean, tomato and tobacco. Plant, Cell Environ 29:1715–1729.