

## Mesure « en routine » des profils d'humidité dans le chêne lors du séchage et confrontation à la simulation numérique

OUERTANI Sahbi<sup>1</sup>, STEPHAN Antoine<sup>1</sup>, RÉMOND Romain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, LERMAB, ENSTIB, 27 rue Philippe Séguin, 88051 Epinal, France, [sahbi.ouertani@univ-lorraine.fr](mailto:sahbi.ouertani@univ-lorraine.fr)

**Mots clefs :** Profil d'humidité, Chêne, séchage, atténuation de rayons-X, perméabilité relative, méthode inverse

### Contextes et objectifs

La mesure du champ d'humidité dans le bois lors du séchage/humidification donne des informations précieuses pour tester la formulation des modèles de transferts couplés masse - chaleur et ainsi valider leurs prédictions. Plusieurs approches ont été utilisées pour cette mesure allant des méthodes simples par double pesée ou électriques aux plus complexes par RMN, MRI, rayons-X. De nombreux travaux ont utilisé dans ce but cette dernière technique avec succès (Baettig et al., 2006; Derome et al., 2005 ; Desmarais et al., 2016; Roels and Carmeliet 2006; Sandberg and Salin 2012) mais très peu ont été appliqués au chêne. Vérifier le potentiel prédictif des modèles sur l'évolution du champ d'humidité dans un avivé est indispensable pour simuler correctement le développement des contraintes mécaniques lorsqu'il est soumis aux conditions hygrothermiques fluctuantes de son environnement.

L'objectif de ce travail consiste à :

- mesurer les profils de teneur en eau dans un échantillon de bois par atténuation de rayons-X avec un appareil adapté à des mesures de routine,
- appliquer cette approche au bois de chêne,
- confronter les profils d'humidité mesurés à ceux prédits par *TransPore*, code numérique permettant de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse en milieu poreux,
- étudier le potentiel de cette mesure de routine pour identifier par méthode inverse des paramètres difficiles à mesurer expérimentalement comme la perméabilité relative liquide.

### Matériel et méthodes

#### *Détermination expérimentale des profils d'humidité et de la cinétique lors du séchage*

Des échantillons de chêne à l'état vert de dimensions 50mm×50mm×20mm respectivement selon les directions radiale (R), longitudinale (L) et tangentielle (T) ont été séchés à l'aide d'une enceinte climatique (HCP 105, Memmert) à 40°C et 65% d'humidité relative. La masse de l'échantillon a été mesurée en continu à l'aide d'une balance avec une précision de  $\pm 0.01$  g. Au cours de séchage, les échantillons de chêne ont été retirés de l'enceinte climatique et scannés à l'aide d'un analyseur de densité à rayons-X (DAX-5000-Grecon). Afin de reproduire le séchage d'une planche large et de grande longueur, les transferts massiques ont été bloqués par un ruban adhésif en aluminium sur les deux extrémités du plan (RT) et les deux faces latérales du plan (LT). Le transfert d'humidité lors du séchage est alors unidirectionnel selon la direction tangentielle. L'adhésion du ruban aluminium a été renforcée sur les deux extrémités (RT) à l'aide d'une résine époxy, contrairement aux deux autres faces (LT) afin de pouvoir le retirer/remettre respectivement avant/après chaque scan (Fig.1).

Des tests préliminaires avec des cales de bois de teneurs en eau différentes (couvrant toute la plage de 8% à 105%) ont permis de vérifier la fiabilité de l'équipement dans la mesure de la

densité du matériau humide. La conversion des profils de densité mesurés en profils de teneur en eau requiert la densité anhydre moyenne et le retrait volumique moyen mesurés. L'approche effectuée est similaire à celle présentée par Hansson and Cherepanova (2013). L'incertitude de mesure du Grecon Dax 5000 est d'environ  $\pm 15 \text{ kg/m}^3$ , soit après conversion pour notre application  $\pm 2.5\%$  d'humidité. La variation de la position de chaque point de mesure avec le retrait du bois n'est pas prise en compte en l'absence de marqueurs de position.

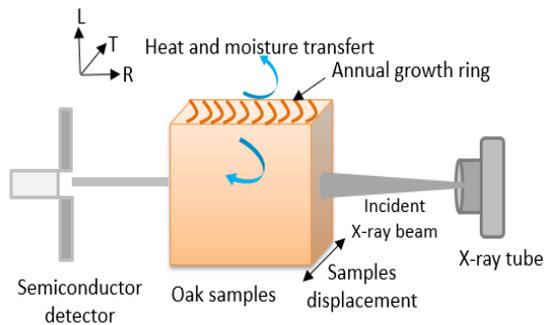


Fig.1 : Mesure du profil de densité dans le chêne à l'aide de DAX-5000-GreCon

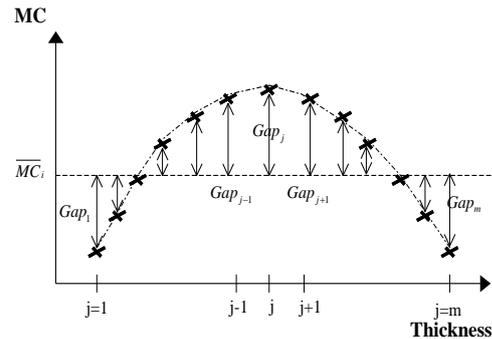


Fig.2 : Ecarts entre les humidités locales du profil selon l'épaisseur et l'humidité moyenne

#### Simulation des transferts de masse et de chaleur

Le code *TransPore* (Perré et Giovanni 1990; Perré et Turner 1999) a été utilisé pour simuler le séchage des échantillons de bois de chêne. Les conditions réelles vues par les échantillons sont utilisées pour simuler le séchage des échantillons. Le code utilise en entrée les paramètres moyens propres à l'essence et certaines propriétés mesurées dans le cadre de ce travail telles que la perméabilité gazeuse, la masse volumique et l'isotherme de sorption.

#### Fonction objective

Pour mesurer par méthode inverse des paramètres d'entrée du modèle à partir de ces mesures, une fonction objective a été définie comme étant :

$$\delta = A \times \zeta_1 + B \times \zeta_2 \text{ avec } \zeta_1 = \sum_{i=1}^n \left( \overline{MC}_i^{calc} - \overline{MC}_i^{mes} \right)^2 \text{ et } \zeta_2 = \sum_{i=1}^n \left( \sum_{j=1}^m \left( Gap_j^{calc} - Gap_j^{mes} \right) \right)^2$$

$\zeta_1$  est l'erreur sur la cinétique moyenne alors que  $\zeta_2$  est l'erreur sur la forme du profil de teneur en eau (Fig.2). A et B quantifient la proportion de  $\zeta_1$  et  $\zeta_2$  dans la fonction objective en respectant l'égalité A+B=1.  $\overline{MC}_i^{calc}$  et  $\overline{MC}_i^{mes}$  sont respectivement les teneurs en eau moyennes prédites et mesurées. Les indices  $i$  et  $j$  représentent respectivement le temps et la position dans l'épaisseur de l'échantillon.  $n$  est le nombre total de mesures et  $m$  est le nombre total de points scannés par l'analyseur à rayons-X.  $Gap_j^{mes}$  et  $Gap_j^{calc}$  sont respectivement l'écart entre les teneurs en eau locales mesurées et prédites ( $\overline{MC}_i^{mes}$ ,  $\overline{MC}_i^{calc}$ ) (Fig.2).

L'algorithme du *downhill-Simplex method* a été utilisé pour minimiser la fonction objective en faisant varier certains paramètres libres comme la perméabilité relative liquide, utilisée dans la formulation de la migration liquide lorsque deux phases fluides coexistent au sein du milieu poreux (gaz-liquide).

### Résultats et discussion

La figure 3a et 3b présentent respectivement la confrontation des mesures des profils de teneur en eau et de la cinétique moyenne à celles prédites par le code *TransPore* en utilisant les valeurs des grandeurs mesurées sur notre échantillon (voir précédemment) ou venant de la littérature pour le chêne, mais aussi des paramètres et expressions donnés dans Perré et Turner (1999). Cette confrontation montre la bonne capacité du modèle à prédire les profils de teneur en eau ainsi que la cinétique de séchage moyenne malgré l'utilisation des expressions de la pression capillaire (Spolek and Plumb, 981) et de la perméabilité relative liquide plutôt destinées aux résineux.

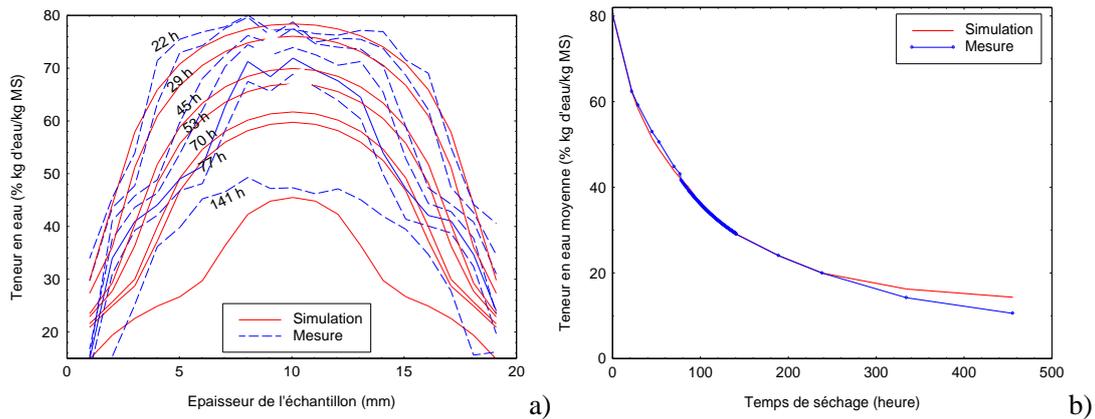


Fig.3 : Courbes de confrontation a) profils de teneur en eau et b) cinétiques de séchage

#### Utilisation de ces données pour la mesure par méthode inverse

Une analyse de sensibilité a été menée pour apprécier comment l'incertitude des entrées du modèle se propage sur les sorties du code au niveau de la cinétique et de la forme du profil d'humidité (Fig.4). En utilisant conjointement ces deux sorties il est possible de séparer les influences du coefficient de diffusion ( $D_b$ ) et du coefficient de transfert externe ( $h$ ) du triptyque (pression capillaire ( $P_C$ ) - perméabilité liquide ( $K_L$ ) - perméabilité relative liquide ( $k_{rl}$ )). Il est en revanche difficile d'isoler les effets respectifs des paramètres de ce triptyque sur les sorties. La figure 5 montre un exemple de compensation donnant pratiquement les mêmes profils et cinétiques pour deux couples différents de  $P_C$  et  $k_{rl}$ . Ces deux courbes obtenues par minimisation de la fonction objective affectent peu la qualité des prédictions. L'identification de l'expression de  $k_{rl}$  par méthode inverse nécessite donc de connaître les deux autres. Ceci reste donc une limite de notre approche lorsque ces données sont manquantes comme c'est le cas pour le chêne.

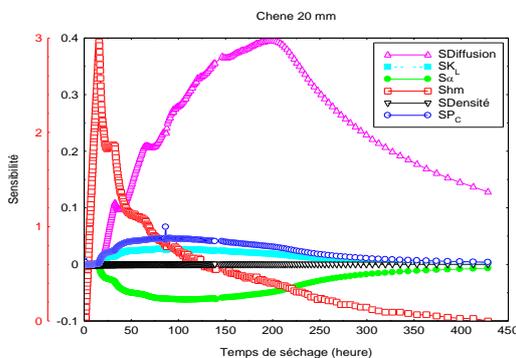


Fig. 4 : Sensibilité des paramètres du modèle de séchage sur la cinétique

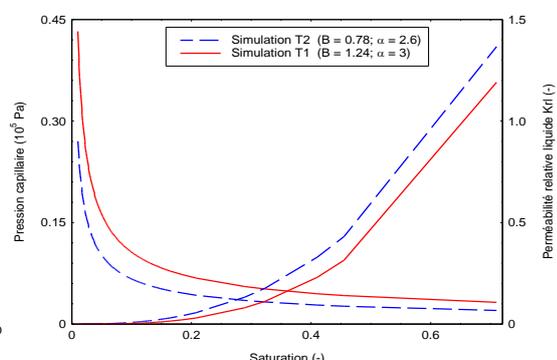


Fig.5 : Pression capillaire et perméabilité relative liquide en fonction de la saturation

### Conclusion et perspectives

Ce travail a permis de mettre en place une mesure du profil d'humidité selon l'épaisseur d'un échantillon de bois à l'aide d'un analyseur de densité « bon marché » Grecon. La cinétique moyenne et les profils de teneur en eau mesurés lors du séchage d'un échantillon de chêne ont été confrontés aux simulations numériques du code *TansPore*. Le potentiel prédictif du modèle s'est avéré relativement bon malgré des expressions de migration liquide développées pour les résineux. D'autres travaux sont en cours pour étudier l'effet de l'épaisseur et de l'essence sur la qualité des prédictions. L'idée serait d'utiliser cette approche pour mesurer l'expression de  $k_{rl}$  par méthode inverse.

### Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet SMARTRENO financé par EDF (<https://smart-reno.univ-lr.fr/>).

### Références

- Baettig R., Rémond R., Perré P. (2006) Measuring moisture content profiles in a board during drying: a polychromatic x-ray system interfaced with a vacuum/pressure laboratory kiln, *Wood Science and Technology*, 40, 261–274.
- Derome D., Roels S., Carmeliet J. (2005) Qualitative work to study water movement in wood, 7<sup>th</sup> Symposium on Building Physics in the Nordic Countries, Reykjavik, pp. 173–180
- Desmarais G., Gilani M.S., Vontobel P., Carmeliet J., Derome D. (2016) Transport of Polar and Nonpolar Liquids in Softwood Imaged by Neutron Radiography, *Transp Porous Med*, 113:383-404.
- Hansson L., Cherepanova E. (2013) Determination of wood moisture properties using a CT-scanner in a controlled low-temperature environment, *Wood Material Science & Engineering*, 7:2, 87-92.
- Perré P., Turner I.W. (1999) A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media, *International journal of Heat Mass Transfer*, 42, 4501-4521.
- Perré P., Degiovanni A. (1990) Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes : séchage du bois à basse et à haute température, *Journal of Heat and Mass Transfer*, 33, 2463-2478.
- Roels S., Carmeliet J. (2006) Analysis of moisture flow in porous materials using microfocus X-ray radiography, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 49 (25-26):4762-4772.
- Sandberg K., Salin J.G. (2012) Liquid water absorption in dried Norway spruce timber measured with CT scanning and viewed as a percolation process, *Wood Science and Technology* (2012) 46:207–219.
- Spolek G.A., Plumb O.A. (1981) Capillary Pressure in Softwoods, *Wood Science and Technology* 15,189-199.