

Évaluation des propriétés de transfert d'humidité par analyse inverse de la cinétique de séchage d'une pile de bois dans un séchoir industriel

SIMO-TAGNE Merlin¹, STÉPHAN Antoine¹, PERRÉ Patrick^{2,3}, L'HOSTIS Clément⁴, RÉMOND Romain¹

¹Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, F-88000 Epinal, France

²Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, France

³Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Université Paris-Saclay, Pomacle, France

⁴FCBA, Bordeaux, France

merlin.simo-tagne@univ-lorraine.fr

Mots clefs : Séchage industriel ; approche déterministe ; perméabilité liquide ; coefficient de diffusion

Contexte et objectifs

Le séchage du bois d'œuvre est une étape indispensable pour amener le bois à son humidité d'utilisation. Durant ce processus, plusieurs paramètres doivent être contrôlés afin d'assurer la rapidité de l'opération, la qualité des produits et la maîtrise du coût du séchage. Selon l'essence de bois et l'épaisseur, des conduites empiriques ont été proposées dans la littérature (Aléon 2012, Joly et More-Chevalier 1980). Réduire l'énergie consommée lors de cette opération est un besoin prégnant tout en conservant les autres attentes de l'opérateur en termes de qualité, coût et durée.

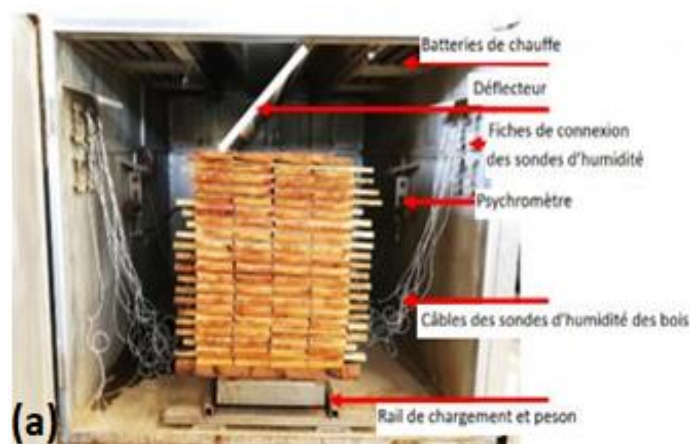
L'évolution des moyens de calculs et le caractère prédictif des outils de simulation numérique du séchage permettent désormais d'espérer placer l'approche déterministe au cœur du processus de décision de la conduite de séchage du bois d'œuvre. Pour cela, il est nécessaire que l'outil numérique puisse connaître d'où l'on part, i.e. les spécificités et caractéristiques des piles de bois, qui ont leur authenticité propre en terme de cartographie des débits dans la pile, d'humidité initiale, etc. Le travail récent de Ouertani et al. (2023a) a montré que le code *TransPore* (Perré et Turner 1999) pouvait, par analyse inverse, estimer des paramètres de transfert à partir de la cinétique de séchage au niveau du cœur de la planche. Dans ce travail, la mesure a été effectuée avec un densitomètre à rayons-X et selon un protocole qui ne peut être appliqué qu'en laboratoire. Au niveau des séchoirs industriels, la cinétique de séchage de la charge de bois est décrite par le suivi de l'humidité locale d'une dizaine de planches, jugées représentatives de la charge de bois. L'humidité est mesurée par méthode résistive avec des sondes enfoncées dans les planches à des épaisseurs données. Les sondes résistives ont du mal à donner des informations justes dans le domaine non hygroscopique du bois et les fluctuations rapides de la température de l'air de séchage amplifient l'erreur sur la valeur donnée par les sondes d'humidité (L'Hostis et al. 2020).

Le travail présenté ici vise à confronter cette approche à la réalité des conditions industrielles en tentant d'utiliser le code pour déterminer la perméabilité liquide (K_L) et le coefficient de diffusion massique de l'eau liée (D_b) par analyse inverse des cinétiques de séchage de planches instrumentées. Ici nous nous situons à une étape intermédiaire, échelle semi-industrielle, avec un protocole de mesures intermédiaire entre le laboratoire et l'industrie. L'objectif ultime serait que le code puisse apprendre à partir des données collectées par les sondes résistives pour ensuite choisir les conditions optimales à appliquer dans le séchoir afin de satisfaire les attentes

de l'opérateur sur la qualité, la durée, le coût et la consommation énergétique de l'opération de séchage.

Matériel et méthode

Le séchoir semi industriel de FCBA (Fig. 1a) a été utilisé pour sécher une pile de planche. C'est un séchoir à air chaud climatisé constitué (1) de batteries de chauffe, (2) de ventilateurs assurant le passage de l'air dans à travers la pile, (3) des extracteurs constitués de petits ventilateurs positionnés proche des clapets qui facilitent l'évacuation de l'air humide de la chambre de séchage, (4) de rails et d'un peson permettant respectivement le positionnement du chargement et la mesure de la perte de masse lors du séchage de la charge de bois, (5) d'un déflecteur qui concentre le flux d'air sur la hauteur de la pile et (6) des capteurs, sondes résistives de mesure d'humidité du bois, des psychromètres pour mesurer l'humidité dans l'air, des PT100 et thermocouples pour mesurer respectivement la température dans l'air et dans le bois. Les dimensions intérieures du séchoir sont de 2,7 m de long, 2,4 m de large et 2,8 m de haut avec une épaisseur des parois de 0,15 m. Deux compteurs d'énergie équipent le séchoir, l'un pour suivre l'énergie consommée par les ventilateurs et l'autre celle des batteries de chauffe.



(b)

				819B	819A
822B	822A	823B	823A	824B	824A
838B	838A	820B	820A	821B	821A
818B	818A	HB11	816A	HB10	837A
844B	844A	839B	839A	817B	817A
840B	840A	HB18	845A	HB17	843A
828B	828A	841B	841A	842B	842A
846B	846A	HB16	826A	HB15	827A
836B	836A	829B	829A	830B	830A
833B	833A	HB14	825A	HB13	835A
834B	834A	831B	831A	832B	832A

Fig. 1 : Séchoir semi-industriel de FCBA: (a) et cartographie de la pile de bois (b)

Dans notre expérience, 62 planches de bois de hêtre dépéri forment la pile de bois, dont 8 portent des sondes d'humidité, positionnées comme l'indique la figure 1b (références HB en vert). Le débit de chaque planche est relevé, ainsi que leurs dimensions et leurs masses initiale et finale (i.e. avant et après séchage). A la fin du séchage la teneur en eau à cœur est mesurée par méthode résistive sur toutes les planches. En supposant une humidité homogène à la fin du cycle, cette mesure permet avec la perte de masse mesurée de remonter à l'humidité initiale moyenne de chaque planche. La figure 2 présente l'évolution des conditions de séchage imposées (Fig. 2a), et de la cinétique de séchage des 8 planches suivies (Fig. 2b). Les dimensions des 68 planches testées sont de 2 m de long, 0.16 m de large et 56 ± 1 mm d'épaisseur. Les sondes d'humidité sont enfoncées à cœur dans les 8 planches étudiées. Les baguettes utilisées ont une épaisseur de 30 mm en moyenne.

Nous avons déterminé en laboratoire (LERMaB-Epinal) la perméabilité liquide et le coefficient de diffusion massique de l'eau liée sur des rondelles tirées des 8 planchettes suivies ci-dessus. Les dimensions des éprouvettes obtenues étaient de $68,5 \pm 0,5$ mm de diamètre et $8,5 \pm 0,5$ mm d'épaisseur. Deux à trois échantillons ont été découpés par planche. Les mesures de la perméabilité liquide et de la diffusivité massique de l'eau liée ont été effectuées sur les mêmes échantillons respectivement suivant les méthodes « ALU-CHA » (Perré et Agoua 2002) et

« PVC-CHA » (Zohoun et al 2003). Les conditions expérimentales sont les mêmes que celles utilisées par Ouertani et al (2023b).

Dans un premier temps, le code numérique *TransPore* (Perré et Turner 1999), code simulant les transferts couplés masse-chaaleur à l'échelle locale de la planche, a été utilisé pour déterminer le coefficient de diffusion massique et la perméabilité liquide de chaque planche instrumentée par une analyse inverse à partir de leur cinétique de séchage. L'algorithme du Simplex a été utilisé pour minimiser la fonction objective définissant l'écart entre les cinétiques à cœur calculées et mesurées. Des informations complémentaires sont données dans Ouertani et al (2023a). A noter pour cette analyse inverse, *TransPore* utilise comme conditions aux limites les caractéristiques de l'air à l'entrée de la pile et non au sein de la pile, autour de la planche instrumentée. Comme conditions initiales, *TransPore* utilise les valeurs mesurées sur les planches instrumentées, i.e. l'humidité moyenne, l'humidité à cœur et l'épaisseur de la planche. Les mesures sur site ont révélé des planches ayant une hétérogénéité forte d'humidité initiale, avec une humidité au cœur de la planche autour de 60% et une humidité moyenne de 35%. Le code a été adapté dans ce travail afin de pouvoir partir d'un profil d'humidité à l'état initial hétérogène dans l'épaisseur. Une fonction polynomiale a été utilisée pour que l'humidité maximale, à cœur, soit celle mesurée par la méthode résistive, que la moyenne du profil soit celle mesurée par pesées et que l'humidité en surface soit l'humidité d'équilibre de l'air extérieur, soit ici 15%. Les caractéristiques moyennes du bois de hêtre ont été utilisées pour les autres paramètres nécessaires au modèle. Elles sont résumées dans Thouraya et al. (2017).

Dans la partie suivante, une comparaison est faite entre les valeurs des paramètres physiques identifiées par analyse inverse et celles mesurées expérimentalement en laboratoire.

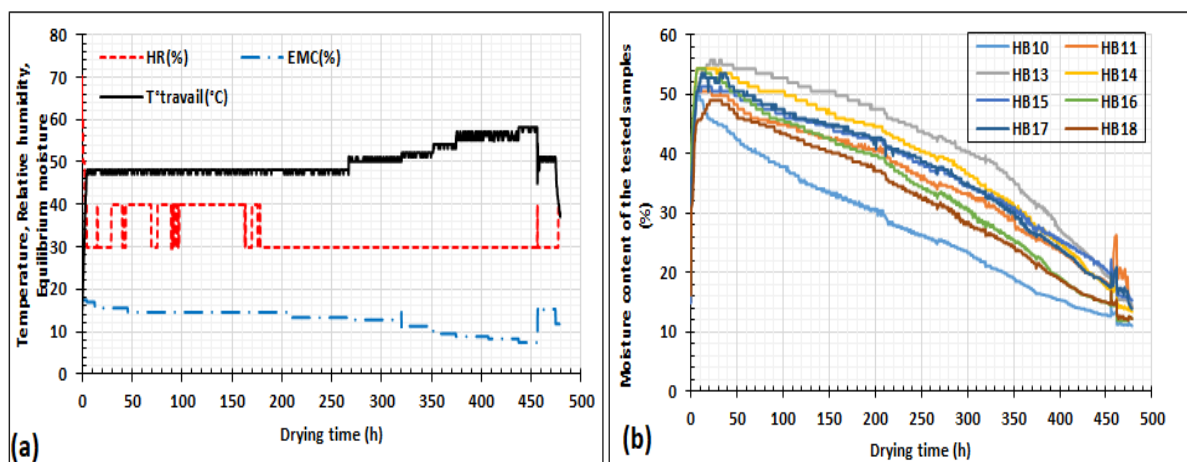


Fig.2 : Conditions de séchage appliquées dans le séchoir(a) et mesures des humidités à cœur effectuées sur les planches instrumentées(b)

La Fig. 3 présente deux exemples des courbes des cinétiques de séchage expérimentales et prédites par *TransPore* à l'issue de l'analyse inverse. Il faut noter que les sondes résistives ont donné un signal incohérent sur les dix premières heures (humidité à cœur inférieure à 20% au début du cycle), lors de la montée en température de la charge de bois. Ces points n'ont pas été pris en compte pour l'analyse inverse. Il reste néanmoins une incertitude sur l'humidité à cœur à l'état initial. Nous avons alors choisi d'étudier l'influence de la teneur en eau initiale à cœur sur les identifications renvoyées par le code en prenant comme teneur en eau initiale à cœur soit la valeur maximale mesurée par la sonde résistive sur les 15 premières heures de séchage, soit cette valeur à laquelle on ajoute +5%.

Résultats et discussion

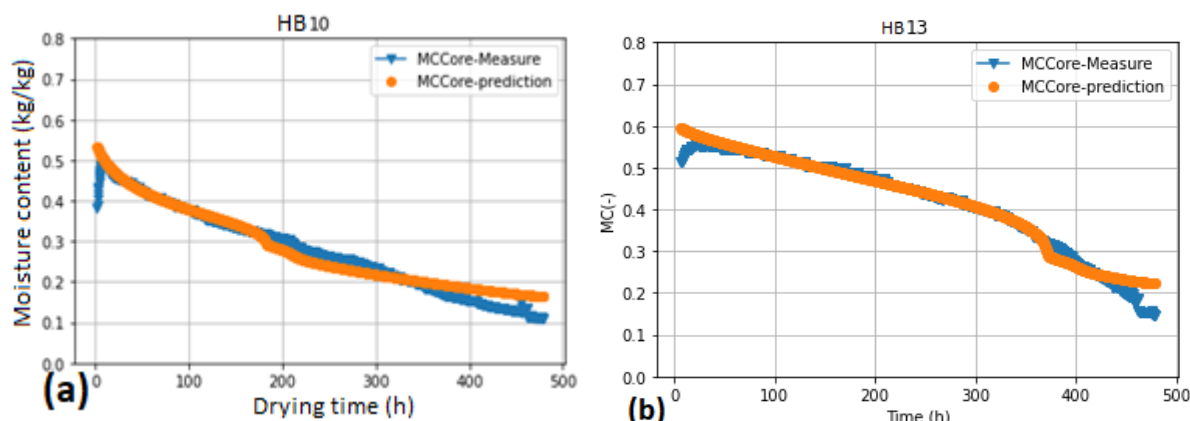


Fig. 3 : Exemples des confrontations des cinétiques de séchage expérimentales (*Measure*) et numériques (*Prediction*), planches HB10 (+5%) et HB13 (+5%).

La Fig. 4 présente les perméabilités (Fig. 4a) et les coefficients de diffusion de l'eau liée (Fig. 4b) des échantillons de bois provenant des 8 planches suivies. Les valeurs expérimentales et celles estimées par méthode inverse sont comparées. Les résultats expérimentaux sont du même ordre que ceux de la littérature (Ouertani et al 2023b ; Agoua et al 2001). Nous constatons que le code sous-estime les coefficients de diffusion de l'eau liée avec un rapport moyen de 2,55, les rapports allant de 2,02 (HB18) à 3,34 (HB13). Ce constat est nuancé dans le cas de la perméabilité liquide. Le code sous-estime les perméabilités liquides de six échantillons avec des rapports allant de 2,51 (HB17) à 11,60 (HB13). Dans deux cas, les valeurs renvoyées par le code sont supérieures à celles obtenues expérimentalement avec des rapports de 15,60 (HB11) et 19,1 (HB10). La figure 4 montre les valeurs obtenues par analyse inverse en prenant comme point haut du profil parabolique d'humidité initial la valeur maximale à cœur ou celle majorée de +5% (voir commentaire précédent). Cela nous permet de constater que la teneur en eau initiale des planches (mal estimée par les sondes résistives) influence la valeur renvoyée par le code sur la perméabilité liquide, et moins sur le coefficient de diffusion.

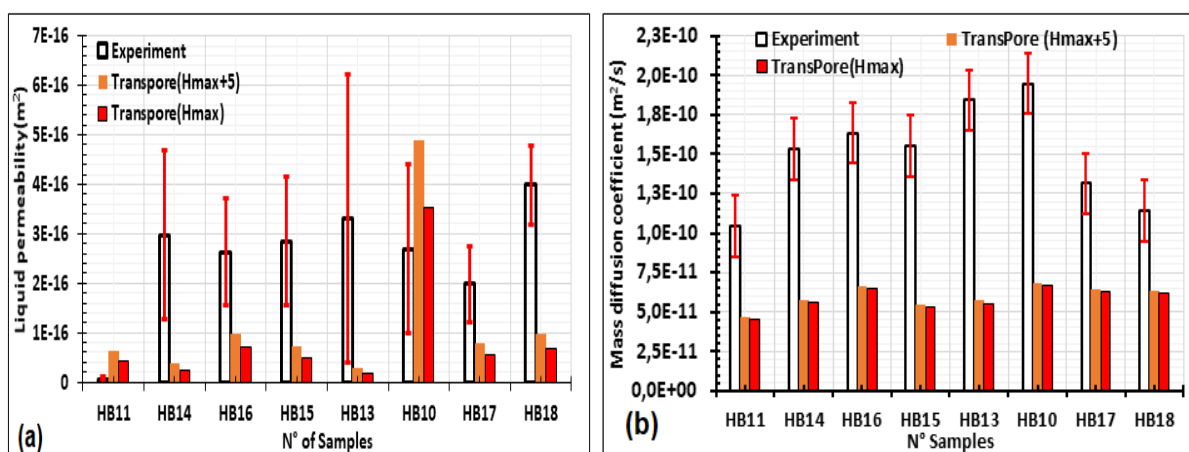


Fig. 4 : Comparaison des mesures expérimentales et par méthode inverse: (a) perméabilités liquides ; (b) coefficients de diffusion de masse de l'eau liée (b) .

Nous voyons ici que la transposition d'une méthode validée et éprouvée en laboratoire (Ouertani et al. 2023a, Perré et al. 2015) au contexte industriel s'avère pour le moment compliquée. L'analyse inverse présentée ici peine à trouver les valeurs des paramètres de transfert des planches en raison de l'incertitude de la forme du profil initial d'humidité dans la

planche et l'incertitude de la mesure des sondes résistives dans le domaine de l'eau libre et lors des variations de température.

La dernière partie de cette communication vise à regarder la capacité de l'analyse inverse à identifier le jeu de paramètre assez tôt pendant le séchage, i.e. sur une fenêtre temporelle réduite de la cinétique de séchage, dans la perspective d'utiliser le code sur la partie temporelle restante pour trouver les conditions de séchage optimales. Les Tab. 1 et 2 présentent des estimations respectivement du coefficient de diffusion de l'eau liée et de perméabilité liquide données par *TransPore* et les erreurs associées par rapport à la valeur identifiée en considérant toute la cinétique, la teneur en eau initiale étant celle maximale de la cinétique + 5%. La portion de la cinétique considérée dans l'analyse inverse est de 20%, 40%, 63%, 80% et 100% de la durée de séchage. L'exemple est donné pour la planche HB10. On observe que l'estimation du coefficient de diffusion obtenue en utilisant 40% (190h) de la durée de séchage donne déjà une valeur à 17,9% près de la valeur obtenue en utilisant toute la durée. Dans le cas de la perméabilité liquide, en utilisant 20% (95h) de la durée de séchage, le code donne une valeur à 33,3% près de la valeur identifiée avec la totalité de la durée du processus.

Tab. 1 : Estimation du coefficient de diffusion massique de l'eau liée par analyse inverse en utilisant une partie variable de la cinétique de séchage (HB10) et les erreurs relatives associées.

Durée (h)	95	190	300	382	478
D(m ² /s)	3,0x10 ⁻¹¹	7,4x10 ⁻¹¹	6,6x10 ⁻¹¹	7,1x10 ⁻¹¹	8.0x10 ⁻¹¹
%Num	62,5	7,5	17,5	11,25	0,00

Tab. 2 : Estimation de la perméabilité liquide par analyse inverse en utilisant une partie variable de la cinétique de séchage (HB10) et les erreurs relatives associées.

s	95	190	300	382	478
K _L (m ²)	5,2x10 ⁻¹⁶	4,6x10 ⁻¹⁶	5,1x10 ⁻¹⁶	4,6x10 ⁻¹⁶	3,9x10 ⁻¹⁶
%Num	33,3	17,9	30,8	17,9	0,00

Conclusion et Perspectives

Dans ce travail, le code *TransPore* a été utilisé pour tenter d'identifier des paramètres de transfert massique par analyse inverse sur des cinétiques de séchage obtenues sur le séchoir semi-industriel de FCBA. L'analyse inverse des coefficients de diffusion de l'eau liée et la perméabilité liquide présentent des différences non négligeables avec les valeurs réelles mesurées en laboratoire sur les mêmes planches suivies lors du séchage. On observe des rapports allant de 2 à 19 pour la perméabilité liquide, et de 2 à 3,3 pour le coefficient de diffusion de l'eau liée. Cette première mise en situation de l'approche développée en laboratoire à l'échelle semi-industrielle montre la difficulté de réunir toutes les conditions nécessaires à cette analyse inverse. Une autre campagne de mesure sera prochainement effectuée à FCBA avec des planches très humides. Le calibrage des sondes résistives sera vérifié et une mesure de l'humidité initiale par double pesée sera ajoutée sur les planches instrumentées. Aussi, il semble nécessaire d'ajouter un autre type de mesure tel que le suivi des contraintes de séchage, le suivi de la cinétique par pesée, pour conforter l'analyse inverse de ces paramètres.

Remerciements

L'ADEME finance le projet de recherche Ossolaire (AAP APRED21) et cofinance une bourse de thèse avec FCBA. Ils sont ici remerciés pour leur soutien.

Références

- Agoua E, Zohoun S, Perré P (2001) A double climatic chamber used to measure the diffusion coefficient of water in wood in unsteady-state conditions: determination of the best fitting method by numerical simulation, *International Journal of Heat and Mass Transfer* 44 (19): 3231-3744.
- Aléon D (2012) *Séchage des bois d'oeuvre : De la théorie à la pratique* / Daniel Aléon (Première édition 2012), FCBA.
- Joly P, More-Chevalier F (1980) *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*
- L'Hostis C, Chabagno-Lapie M, Fuente P, Silberberg O (2020) *Guide des solutions de séchage du bois bûche, Rapport de l'étude SOLUSEC*, 40 p.
- Ouertani S, Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2023a) Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation, *Drying technology*. (article en révision).
- Ouertani S, Simo-Tagne M, Rémond R (2023b) Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven central Africa hardwood species. *Wood Material Science and Engineering* 18 (2): 507-516.
- Perré P, Agoua E (2002) Mass transfer in MDF (medium density fiberboard): Identification of structural parameters from permeability and diffusivity measurements. 13th International drying symposium, *Drying*, 178-187.
- Perré P, Pierre F, Casalinho J, Ayouz M (2015). Determination of the mass diffusion coefficient based on the relative humidity measured at the back face of the sample during unsteady regimes. *Drying technology* 33(9): 1068-1075.
- Perré P, Turner I (1999) TransPore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualizing the drying of porous media. *International Journal for Heat and Mass Transfer* (42): 4501–4521.
- Thouraya S, Perre P, Bouali A, Mougél E, Remond R (2017) Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber. *Drying Technology*, 35 (5): 593 - 605.
- Zohoun S, Agoua E, Degan G, Perré P (2003) An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime. *Heat and Mass Transfer* (39) : 147-155.