

## Un modèle numérique au cœur de la stratégie d'optimisation du séchage du bois alimenté par des énergies intermittentes

STÉPHAN Antoine<sup>1</sup>, PERRÉ Patrick<sup>2,3</sup>, L'HOSTIS Clément<sup>4</sup>, RÉMOND Romain<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, 88000 Épinal, France

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, 91190 Gif-sur-Yvette, France

<sup>1</sup>Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), 51110 Pomacle, France

<sup>1</sup>FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, 77420 Champs-sur-Marne, France

[romain.remond@univ-lorraine.fr](mailto:romain.remond@univ-lorraine.fr)

**Mots clés :** modélisation multi-échelles ; optimisation aléatoire ; automate avancé ; méthode inverse

### Contexte et objectifs

Le séchage naturel est un processus intermittent, qui alterne entre des conditions sévères et douces de séchage, c'est à dire respectivement entre des humidités d'équilibre (EMC) basses et hautes. Dans les régions fortement exposées aux radiations solaires des séchoirs solaires peuvent être utilisés pour accélérer le processus (Luna et al 2009), mais sans contrôle de l'humidité d'équilibre la qualité du séchage n'est pas garantie. Pour pallier à cette situation tout en tirant parti de l'énergie solaire pour le séchage du bois plusieurs travaux se sont intéressés aux systèmes hybrides, comme dans le projet SolarWood (Bailly et al 2020). Des conduites traditionnelles ont été appliquées dans un séchoir à air chaud climatisé, partiellement alimenté par des panneaux solaires thermiques. Dans cette configuration et dans le cas des essences étudiées les résultats annonçaient un retour sur investissement trop long et le système n'a donc pas été testé à l'échelle industrielle.

Les automates utilisés dans le séchage du bois ont des fonctions sommaires de régulation des paramètres de consigne selon les tables de séchage et l'humidité du bois (MC). Certains travaux ont utilisé la logique floue ou des approches statistiques pour permettre d'utiliser les connaissances empiriques et de les implémenter dans des automates de régulation (Wang et al 2001, Allegretti et al 2012), apportant ainsi de nouvelles fonctionnalités attendues par l'industrie. Dans cette même dynamique des travaux ont utilisé des réseaux de neurones pour prédire la qualité du séchage (Aghbashlo et al 2015). La difficile collecte des données nécessaires à leur robustesse rend ces approches encore inadaptées au contrôle de la qualité de séchage. Dans notre cas, où une énergie fluctuante serait utilisée pour le séchage du bois, la gestion des aléas énergétiques requiert une quantité de données plus importante encore.

Des approches déterministes pour le séchage du bois ont été développées dans les quarante dernières années grâce notamment aux avancés dans la modélisation numérique et l'accès facilité aux puissances de calcul. Ces outils ont désormais un potentiel de prédiction et sont utilisés dans l'optimisation du séchage industriel. Certains d'entre eux ont déjà permis de réduire la consommation énergétique du séchage sous vide (Perré et al 2007) et de réduire les coûts du séchage (Salin 2001). L'utilisation d'énergies intermittentes (énergies renouvelables ou de récupération d'autres industries, EnR&R) pour réduire la consommation d'énergie fossile est l'objectif principal de ce travail. Une optimisation semble nécessaire pour atteindre cet

objectif, car les tables traditionnelles et les bases de données empiriques ne permettent pas à un contrôleur de gérer des conditions fluctuantes.

La première partie de ce document présente la stratégie globale adoptée pour tirer parti d'une énergie fluctuante dans le séchage du bois, en tenant compte de plusieurs critères objectifs. Des résultats et perspectives sont présentés dans la deuxième partie.

## Matériel et méthode

La stratégie globale suivie dans ce travail est présentée en Fig. 1. Le cœur de l'approche est le modèle numérique qui estime les meilleures conditions à appliquer au séchoir selon les différentes données d'entrée : (1) l'historique des conditions vues par la charge de bois ; (2) l'énergie disponible à l'instant  $t$  et sa prévision ; (3) les attentes ou objectifs de l'utilisateur en terme de durée, qualité, coût et énergie ; (4) le signal retour des capteurs précisant la cinétique réelle de séchage de différentes planches de la pile de bois.

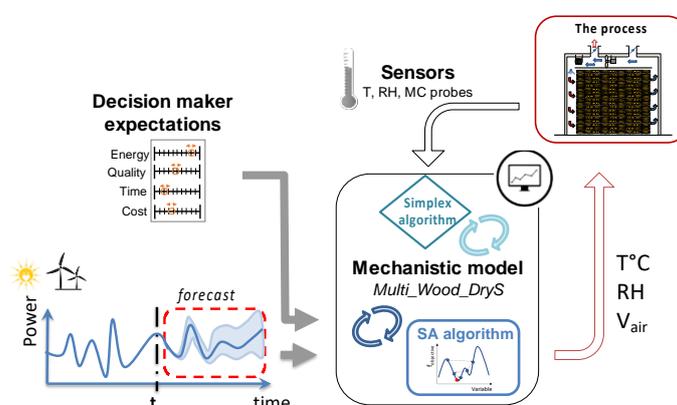


Fig. 1 : Schéma de la stratégie adoptée dans ce travail.

Les différentes composantes de cette stratégie sont décrites dans les sections suivantes.

### *Le modèle numérique du séchage du bois : Multi\_Wood\_DryS*

Au cœur de cette stratégie (Fig. 1), le code multi-échelles et multi-physiques Multi\_Wood\_DryS (Perré et Rémond 2006) a été utilisé. Ce modèle simule le séchage aux trois échelles imbriquées : séchoir, pile et planche. Le code numérique utilisé à l'échelle locale (planche) est une version monodimensionnelle du code TransPore (Perré et Turner 1999) qui permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Un modèle mécanique (Rémond et al 2007) a été intégré dans TransPore pour estimer les contraintes et déformations qui se développent pendant le séchage afin d'évaluer les risques de dégradation de la qualité. L'échelle pile permet de simuler le séchage simultané de plusieurs centaines de planches et prend en compte la variabilité du bois (Perré et al 2007) ainsi que les interactions entre l'air circulant dans la pile et les planches de bois. A l'échelle du séchoir le code Multi\_Wood\_DryS calcule la consommation énergétique nécessaire pour atteindre et maintenir les conditions de séchage, en considérant les performances du séchoir et le comportement de la pile (Perré et al 2007). Des présentations plus détaillées peuvent être trouvées dans ces références.

Le modèle multi-échelles Multi\_Wood\_DryS a été combiné avec un code d'optimisation (Stéphan et al 2024a) pour proposer des conduites de séchage adaptées aux critères de l'opérateur en termes de consommation énergétique, de qualité, de durée et de coût, ces derniers étant pondérés dans une fonction objective, que le code minimise.

Pour prédire le séchage le code de simulation a besoin de connaître des caractéristiques du matériau et des spécificités de la charge de bois. La méthode inverse permet d'estimer certaines de ces propriétés matérielles depuis les sorties observées du processus, notamment la cinétique de séchage. Ouertani et al (2024) a montré que le code TransPore peut estimer les principaux coefficients de transfert, à savoir le coefficient de diffusion et la perméabilité intrinsèque, à partir des cinétiques de séchage au cœur d'une planche, par méthode inverse.

#### *Système hybride : séchoir industriel et panneaux solaires PV/T*

L'approche développée dans ce travail va être testée sur un séchoir pilote de FCBA Bordeaux. Il s'agit d'un traditionnel séchoir à air chaud climatisé (charge utile de 1 à 2 m<sup>3</sup>, Cathild Industrie SA, France) qui a été couplé à des panneaux solaires et photovoltaïques (panneaux hybrides, Cogen'air, Base innovation, Marcheprime, France), à une pompe à chaleur eau/eau et à un ballon tampon. Ces différents éléments sont couplés pour collecter l'énergie solaire lorsqu'elle est disponible, la stocker et/ou l'utiliser pour répondre aux besoins du séchoir ; il est ainsi possible de n'utiliser que l'énergie électrique pour les batteries de chauffe, ou de bénéficier de la contribution de l'énergie solaire.

#### *Caractérisation de la déformation mémoire sous conditions cycliques*

La déformation mémoire du bois peut réduire les contraintes de séchage, et notamment s'il est alimenté par des EnR&R, où peuvent advenir des variations cycliques d'humidité, favorables à son activation. La difficulté à modéliser le développement des déformations mémoire complique l'estimation des contraintes de séchage. L'essai fourche (Stéphan et al. 2024b) a permis d'isoler la déformation mémoire d'échantillons de bois soumis à des cycles de séchage/humidification. Ce dispositif mesure la contrainte et la déformation d'un échantillon de bois fin fixé à l'extrémité d'une fourche en aluminium et soumis à différentes humidités. Elle induit un retrait-gonflement gêné dont la mesure est comparée à celle d'un échantillon jumeau ayant un retrait-gonflement libre pour isoler la part de déformation mémoire.

## Résultats et discussion

### *Avancement sur ces différentes parties de l'approche globale*

#### Estimation de la déformation mémoire sous conditions cycliques

La déformation mémoire augmente avec l'accumulation de variations de MC et tend vers une limite (Fig. 2). Le modèle mécanique actuellement utilisé, qui reprend le modèle mécanosorptif de Fortino et al (2009), donne une simulation de l'essai fourche assez proche des mesures expérimentales (Fig. 2). Les essais fourche apportent cependant des données permettant d'améliorer la formulation du modèle mécanosorptif en identifiant les jeux de paramètres de différentes essences et orientations matérielles.

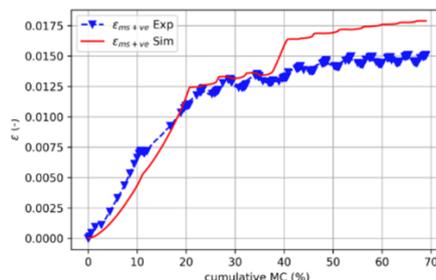


Fig. 2 : Déformation mémoire mesurée par l'essai fourche et simulé avec le modèle mécanique, en fonction de l'accumulation des variations de MC (Stéphan et al. 2024)

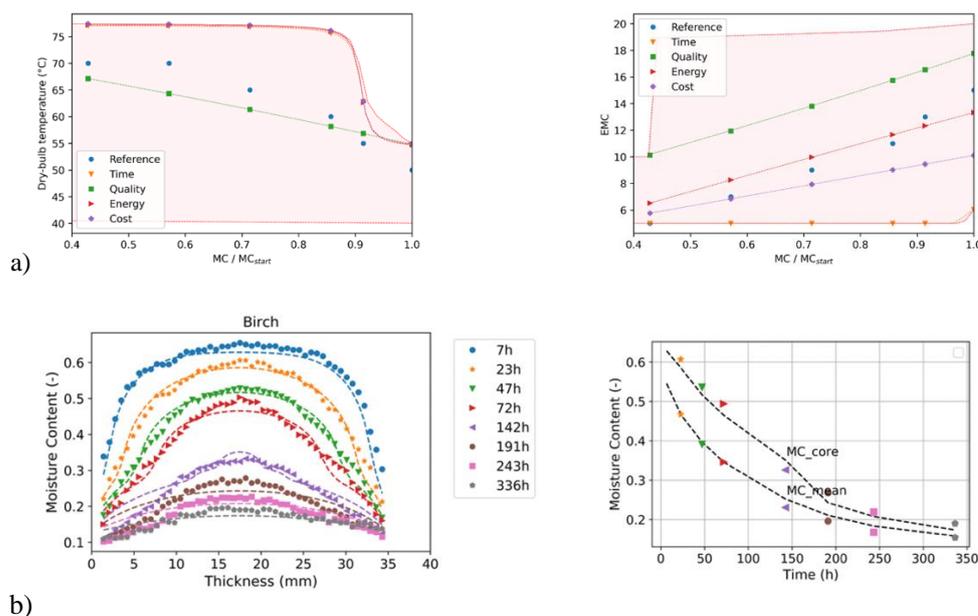


Fig. 3 : a) Conduites de séchage optimisées pour des planches de hêtre, le domaine couvert par les fonctions trajectoires est en rouge transparent, les conduites optimisées sont pour la température sèche (gauche) et l'humidité d'équilibre (droite) selon les différents critères d'optimisation (Stéphan et al. 2024) ; b) comparaison entre les profils de teneur en eau et les cinétiques de séchage d'après les paramètres de transferts mesurés et simulés sur une planche de bouleau (Ouertani et al. 2024).

### Méthode inverse et approche prospective dans le modèle numérique

Le code a démontré sa capacité à trouver la meilleure trajectoire d'un paramètre de table de séchage selon les attentes de l'opérateur (Fig. 3a). De plus, il peut estimer les paramètres de transfert en entrée d'après la cinétique de séchage mesurée (Fig. 3b) ; avec la seule mesure de MC à cœur l'analyse inverse a trouvé des paramètres proches des valeurs mesurées, qui permettent donc au code de reproduire assez fidèlement l'évolution des profils de MC d'une planche au cours du séchage, comparée aux mesures réalisées au densitomètre à rayons X. L'analyse inverse peut aussi être réalisée à partir des teneurs en eau à cœur mesurées par des sondes résistives, ce qui représente une opportunité, pour les sécheurs industriels, de caractériser le matériau en cours de séchage, et donc potentiellement d'optimiser la conduite du séchage selon la charge réelle. Cette méthode réussit à trouver des paramètres d'entrée même avec une petite portion de la cinétique de séchage, ce qui fera l'objet d'une publication prochaine.

Par ces modélisations, par apprentissage et prédiction en cours de séchage, il pourrait être possible de gérer des aléas en cours de séchage tels qu'ils pourraient survenir lors de l'utilisation d'énergie intermittente (EnR&R).

### Implémentation de ces deux approches dans un séchoir industriel

Cette partie présente des résultats obtenus avec le séchoir de FCBA. Au sein d'une pile de planches les cinétiques de séchage de 9 planches ont été mesurées (Fig. 4a). Il s'agit des seules informations connues sur l'ensemble de la centaine de planches séchées, et ne sont pas nécessairement représentatives de l'ensemble de la pile, tel que l'illustre la figure 4b. Les conduites de séchage optimisées doivent cependant être suffisamment robustes pour ne pas être trop sévères pour les planches qui s'éloignent fortement des planches instrumentées, en termes de MC et de propriétés de transfert.

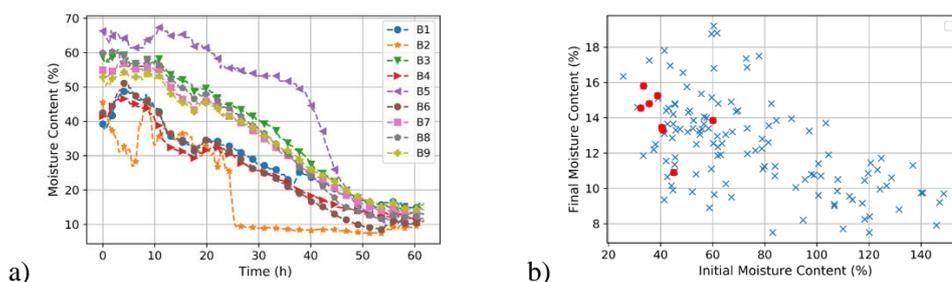


Fig. 4 : a) Cinétiques de séchage mesurées sur 9 planches instrumentées dans la charge de bois, b) teneurs en eau initiales et finales mesurées pour toutes les planches (les points rouges correspondent aux planches instrumentées).

### Perspectives

Pour le moment la stratégie d'optimisation du modèle est basée sur les conduites traditionnelles, qui augmentent généralement la température et diminuent l'humidité d'équilibre avec la diminution de MC. L'utilisation d'énergie intermittente va nécessiter de complètement revoir cette stratégie. Pour le modèle numérique, l'historique de séchage est contenu dans le matériau par ses champs de MC, déformations mémoires et contraintes. Cependant, au cours du séchage, l'horizon de calcul du code, dans son choix d'évolution des paramètres (température, humidité de l'air, vitesse d'air, apport énergétique auxiliaire) peut se réduire si les conditions de séchage étaient trop sévères en début de séchage. La question de la stratégie d'optimisation à adopter dans le cas d'énergies fluctuantes, dont la prévision va de quelques jours pour les énergies renouvelables à quelques semaines pour les énergies de récupération, est donc déterminante. D'autant plus que la qualité finale du processus dépend de l'ensemble de toute l'histoire vue par le matériau au cours du séchage. Deux stratégies vont pour le moment être explorées dans nos travaux futurs pour répondre à cette question, en considérant une énergie prévisible à court terme :

- L'énergie est stockée et le séchage se poursuit si possible dans les mêmes conditions. Cette stratégie ne présente pas de risques pour la qualité finale, et permet de compenser les aléas de l'approvisionnement énergétique, au détriment de son empreinte environnementale.
- Toutes les énergies disponibles à l'instant  $t$  sont utilisées pour accélérer le séchage. La durée est potentiellement réduite mais cela présente des risques en cas de ruptures dans l'approvisionnement énergétique et peut limiter les possibilités futures par un séchage trop sévère. Cette approche repose sur la capacité du modèle à savoir ce qui peut être réalisé sans compromettre la qualité finale du bois séché.

La prise en compte de l'hétérogénéité des planches est aussi nécessaire, et permettrait de réaliser l'optimisation sur des charges de bois aux propriétés contrastées. Différents scénarios énergétiques devraient aussi être générés, afin de trouver les scénarios critiques ; le code pourrait alors sélectionner la solution la plus robuste pour ces différents scénarios, dans un nuage de solutions autour d'un objectif.

### Conclusion et perspectives

Ce papier synthétise plusieurs travaux qui montrent l'avancée vers une utilisation optimale d'énergies fluctuantes dans le séchage du bois. Il s'agit d'étapes intermédiaires dans le développement d'un automate de régulation avancé pour le séchage du bois, basé sur un modèle déterministe. Le potentiel de cette approche est important et plusieurs résultats ont été présentés. Enfin des questions, des limites et des perspectives prometteuses ont été exposées.

## Remerciements

L'ADEME et FCBA financent cette thèse et sont ici remerciés pour leur soutien.

## Références

- Aghbashlo M, Hosseinpour S, Mujumdar A S (2015) Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review. *Drying Technology*, 33 (12), 1397–1462.
- Allegretti O, Cuccui I, Ferrari S, Sione A (2012) Dtouch – Drying Has Never Been so Easy. In *The Future of Quality Control for Wood & Wood Products*, The Final Conference of COST Action E53, 4-7th May 2012, Edinburgh, p 9.
- Bailly O, L'Hostis C, Guennec T, Ackermann S (2020) Energie solaire : apports thermique et électrique complémentaires pour les séchoirs de bois d'œuvre, FCBA, 58 p.
- Fortino S, Mirianon F, Toratti T (2009) A 3D Moisture-Stress FEM Analysis for Time Dependent Problems in Timber Structures. *Mech Time-Depend Mater*, 13 (4), 333.
- Luna D, Nadeau J-P, Jannot Y (2009) Solar Timber Kilns: State of the Art and Foreseeable Developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (6), 1446–1455.
- Ouertani S, Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024) Evaluating Moisture Transfer Properties of Wood by Inverse Analysis of Moisture Content Profiles Determined during Drying by X-Ray Attenuation. *Drying Technology*, 42 (1), 168–181.
- Perré P, Rémond R (2006) A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation. *Drying Technology*, 24 (9), 1069–1074.
- Perré P, Rémond R, Aléon D (2007) Energy Saving in Industrial Wood Drying Addressed by a Multiscale Computational Model: Board, Stack, and Kiln. *Drying Technology*, 25 (1), 75–84.
- Perré P, Turner I W (1999) TransPore: A Generic Heat and Mass Transfer Computational Model for Understanding and Visualising the Drying of Porous Media. *Drying Technology*, 17 (7–8), 1273–1289.
- Rémond R, Passard J, Perré P (2007) The Effect of Temperature and Moisture Content on the Mechanical Behaviour of Wood: A Comprehensive Model Applied to Drying and Bending. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 26 (3), 558–572.
- Salin J-G (2001) Determination of the Most Economical Drying Schedule and Air Velocity in Softwood Drying. COST Action E15, 11-13th June 2001, Helsinki, Finland, p10.
- Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024a) Mechanistic-Based Probabilistic Optimization of Industrial Wood Drying Considering Energy Consumption, Process Duration, Quality and Cost. *Drying Technology*, 0 (0), 1–10.
- Stéphan A, Perré P, L'Hostis C, Rémond R (2024b) Fork and Flying Wood Tests to Improve Prediction of Board Stress Development during Drying. In *Hardwood Conference Proceedings*, 30-31st May 2024, Sopron, Hungary.
- Wang X G, Liu W, Gu L, Sun C J, Gu C E, de Silva C W (2001) Development of an Intelligent Control System for Wood Drying Processes. In *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*, Vol. 1, pp 371–376.