

Tirer parti d'une énergie fluctuante pour le séchage du bois grâce à un automate intelligent

STEPHAN Antoine¹, L'HOSTIS Clément², PERRÉ, Patrick³, RÉMOND Romain¹

¹Université de Lorraine, LERMAB, 27 rue Philippe Séguin, 88051 Épinal, France

²FCBA, 10 rue Galilée, 77420 Champs-sur-Marne, France

³LGPM, Université Paris Saclay, Centrale Supélec, 91190 Gif-sur-Yvette, France

antoine.stephan@univ-lorraine.fr

Mots clés : Séchage du bois ; EnR&R fluctuante ; Régulation intelligente ; Mécano-sorption ; Conduite DQC

Contexte et objectifs

Le séchage est une étape essentielle de la transformation du bois : elle rend possible la stabilité et la pérennité du matériau et des ouvrages bois. Cette étape est cependant très énergivore ; elle nécessite aujourd'hui jusqu'à 3 kWh.Kg⁻¹ d'eau évaporée, ce qui représente une part importante dans le bilan énergétique de la transformation du matériau. Activité ancestrale, le séchage du bois repose sur un savoir empirique, appliqué dans l'industrie sous la forme de conduites de séchage, garantissant un séchage rapide et qualitatif, c'est-à-dire limitant l'apparition de fentes, discolorations, et d'autres défauts. Les conduites de séchages consistent à augmenter la température et à diminuer l'humidité de l'air lorsque l'humidité des planches décroît. Les conduites de séchages requièrent donc une source d'énergie continue et de fortes puissances, telle qu'une chaudière gaz ou biomasse couplée à des ventilateurs électriques. Cette étape de séchage est donc un coût important pour l'environnement et nécessite la mobilisation de fonds et d'équipements conséquents, peu accessibles aux petites unités de production.

Un séchage du bois remplissant des critères de durée, qualité et coût (DQC) et à faible impact environnemental est souhaitable. L'utilisation des énergies renouvelables et récupérables (EnR&R) au sein d'un réseau énergétique intelligent serait une réponse efficace en terme de réduction de la facture énergétique. Ces énergies, qui peuvent notamment provenir des cellules photovoltaïques, des éoliennes et des extrants industriels, sont intermittentes et irrégulières ; leur utilisation pour le séchage requiert d'adapter en permanence la conduite de l'opération selon l'énergie disponible et de pouvoir l'effectuer à des températures plus basses que celles couramment employées (généralement, 60°-90°C pour l'épicéa, 40°-70°C pour le hêtre, 40°-60°C pour le chêne). Lors du séchage, l'humidité du bois évolue d'abord près des faces d'échange et le champ d'humidité dans la planche n'est donc pas uniforme. Un gradient s'établit au sein de la pièce de bois qui est à l'origine d'un champ de retrait non-uniforme, source de déformations et de contraintes. Si la contrainte dépasse la contrainte de rupture du matériau des fentes apparaissent.

La mécano-sorption est une manifestation particulière des couplages hygromécaniques et se traduit par une augmentation du fluage du bois sous humidité variable. Ce comportement a été défini par Grossman (1971). Les EnR&R utilisées pour le séchage peuvent être assimilées à des fluctuations de l'apport énergétique, et donc à des oscillations de la température, du taux d'humidité et de la ventilation au sein du séchoir. La fluctuation des conditions dans le

séchoir s'accompagne d'une variation de la teneur en eau à la surface des planches. Celle-ci va activer le fluage mécano-sorptif à la périphérie de la planche, siège des contraintes de séchage, et ainsi les relaxer en partie. En raisonnant à qualité de séchage équivalente, il devrait être possible de durcir les conditions de séchage pour sécher le bois plus vite.

Cet effet des oscillations des conditions de séchage sur la qualité du produit a été étudié dans plusieurs travaux de thèses (Rémond (2004), De la Cruz Sanchez (2012), Salem (2016)). Mais des travaux complémentaires sur le comportement mécano-sorptif dans le plan transverse du matériau sont nécessaires pour pouvoir maîtriser l'activation de ce comportement dans un séchoir à bois.

L'utilisation d'EnR&R pour le séchage du bois nécessite de lever plusieurs verrous :

- la mécano-sorption doit pouvoir être finement caractérisée et modélisée car à basse température (en dessous de 40°C) le séchage est lent et la thermo-activation des propriétés viscoélastiques du bois est trop faible pour relaxer une partie des contraintes internes. La mécano-sorption peut en revanche être activée par les fluctuations d'humidité pour réduire ces dernières et améliorer la qualité du produit séché.
- le caractère imprévisible de l'énergie fluctuante, dont la disponibilité et le niveau énergétique varie au cours du temps, requiert une adaptation permanente de la conduite de séchage à l'énergie disponible et à la charge de bois concernée. L'automate de régulation des séchoirs et les capteurs déjà en place ne sont plus suffisants, car ils ne sont pas adaptés à faire face à cette dynamique de l'apport énergétique.

Le projet de thèse vise à apporter des solutions aux verrous constatés avec pour objectif de conduire de manière autonome, sur une unité pilote, le séchage de planches de bois en utilisant une énergie fluctuante.

Matériel et méthode

Le projet de thèse se déroulera en 3 tâches successives (Fig. 1). La première tâche consiste à caractériser la mécano-sorption du bois soumis à des variations de température et d'humidité, entre 20 et 35 °C et entre 6 et 12 % d'humidité d'équilibre. Le comportement mécano-sorptif sera mesuré sur un banc d'essai statique et comparé au test de *Flying Wood* (Aguiar (2000)). La confrontation avec le modèle numérique *TransPore* et son module mécanique (Perré et Turner 1999, Rémond et al. 2007) permettra de tester différents modèles de comportement mécanique afin d'améliorer son potentiel prédictif au niveau de la qualité du produit séché, principalement ici le niveau de contrainte et de déformation. L'étude s'intéressera à deux essences tempérées feuillues, le chêne et le hêtre, respectivement 1^{ère} et 2^{ème} essence en terme de volume sur pied en France. Le chêne présente notamment un risque de collapse et discoloration au séchage, dont la durée importante affecte l'efficacité énergétique. Le hêtre peut être séché plus rapidement mais présente un risque de changement de couleur, et des risques de fentes et de déformations au séchage importants du fait de sa nervosité. Leurs caractéristiques au séchage contrastées et les potentiels d'économies d'énergie et d'amélioration de la qualité en font des candidats idéals pour cette nouvelle conduite de séchage.

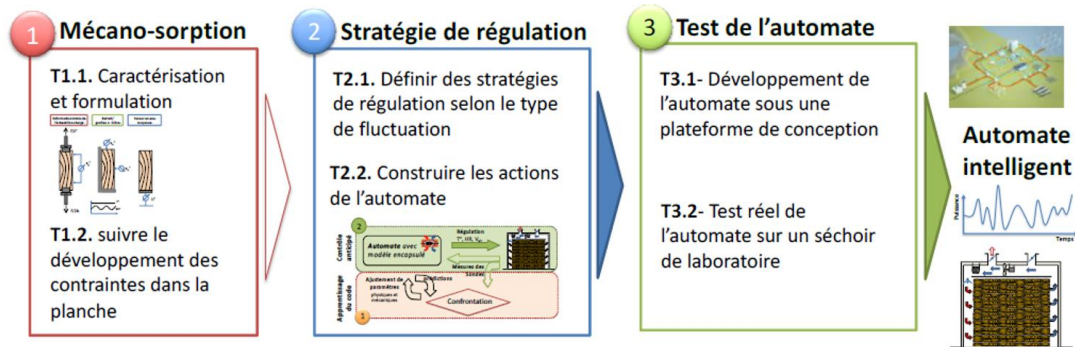


Fig. 1 : Tâches successives envisagées pour le projet de thèse

La deuxième tâche vise à assurer un pilotage fin du séchage, selon l'énergie disponible et l'état de contrainte dans le bois. Le développement d'un nouveau capteur de l'état de contrainte (étude en cours de brevetabilité), permettra d'alimenter au cours du séchage le modèle numérique double échelle planche-pile (Perré et al. (2006)) utilisant le code *TransPore* à l'échelle locale. Ce modèle sera intégré dans l'automate de régulation du procédé (Fig. 2), et ajustera en temps réel les consignes d'humidité, température et ventilation du séchoir selon les prédictions obtenues et l'énergie disponible.

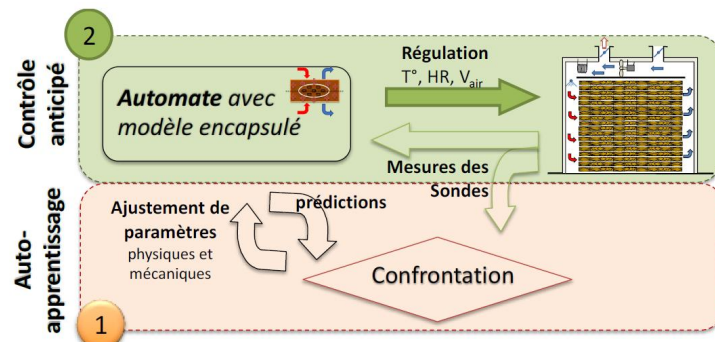


Fig. 2 : Stratégie de régulation de l'automate intelligent

La troisième tâche a pour objectif de valider l'automate et les différentes conduites sur le séchoir pilote du LERMAB (capacité utile de $0,3 \text{ m}^3$). Des tests de résistances seront menés pour mesurer la fiabilité de l'automate aux variations d'énergie ; des simulations menées sur Matlab Simulink seront confrontées aux données expérimentales du séchoir du LERMAB et aux données du projet OSSOLAIRE (FCBA, Cathild, BASE - séchage du bois par énergie solaire).

Conclusion et perspectives

Ce projet de thèse vise à utiliser le comportement mécano-sorptif du bois pour réduire les contraintes de séchage avec des variations de température et d'humidité. L'automate intelligent envisagé pour la conduite du séchage, intégrant un modèle prédictif basé sur *TransPore*, serait une innovation importante et permettrait d'optimiser le séchage au niveau

des critères de durée, qualité et coût. Ces deux avancées combinées permettraient d'utiliser les EnR&R fluctuantes-qui réduiraient l'impact environnemental du séchage tout en maîtrisant la qualité du bois transformé et la durée du séchage.

Remerciements

L'Ademe est partenaire du projet et co-finance une bourse de thèse dans le cadre de la thématique « Forêt, agriculture et bioéconomie ».

Références

Aguiar, O., Perré, P. The "Flying Wood" Test used to Study the Variability of Drying Behaviour of Oak. Proceedings of 2nd Workshop of COST Action E15, "Quality Drying of Hardwood", Sopron, Hungary, 2000; p 10.

Grossman, P. U. A. (1971). Use of Leicester's "Rheological model for mechano-sorptive deflections of beams", Wood science and technology, vol. 5, p.232-235.

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.

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, 26 (3), 558-572.

Rémond, R., De La Cruz-Lefevre, M., Aléon, D., Perré, P. (2013) Investigation of oscillating climates for wood drying using the flying wood test and loaded beams : need for a new mechanosorptive model. Maderas Ciencia y tecnología, 15(3).

Salem, T., Perré, P., Bouali, A., Mougél, E., Rémond, R. (2017) Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber. Drying Technology, 35(5), 593-605.