UNIVERSITÉ DE LORRAINE | BIBLIOTHÈQUES UNIVERSITAIRES

AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact bibliothèque : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr
(Cette adresse ne permet pas de contacter les auteurs)

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

Tirer parti d'une énergie fluctuante dans le séchage du bois grâce à un automate avancé

THÈSE

Soutenue le 23 janvier 2025

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Lorraine

mention génie des procédés, des produits et des molécules

par

Antoine STÉPHAN

Composition du jury

Président :	Patrick PERRÉ	Pr., CentraleSupelec (LGPM)
Rapporteuses :	Giana ALMEIDA	MdC HDR, AgroParisTech (Sayfood)
	Delphine JULLIEN	Pr., Université de Montpellier (LMGC)
Examinateur :	Ottaviano ALLEGRETTI	DR, CNR-IBE
Invités :	Sylvain BORDEBEURE	Ing., ADEME
	Pauline CHAMPEAU	Ing., ADEME
Co-encadrant :	Clément L'HOSTIS	Ing. Dr., FCBA
Directeur de thèse :	Romain RÉMOND	MdC HDR, Université de Lorraine (LERMAB)

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX iii

LISTE DES FIGURES vii

INTRODUCTION ix

1 LE SÉCHAGE DU BOIS : UNE PRATIQUE À ADAPTER 1
- 1.1 Le séchage industriel du bois . . . 1
- 1.2 L'optimisation du procédé . . . 21

2 SYNTHÈSE EN FRANÇAIS 29
- 2.1 Comportement mécanosorptif du matériau et prédiction des contraintes . 30
- 2.2 Outils numériques de simulation du séchage industriel : apprendre et optimiser . . . 35
- 2.3 Stratégies d'optimisation et de régulation d'un séchoir utilisant des énergies intermittentes . . . 43

3 CARACTÉRISATION DE LA MÉCANOSORPTION 47
- 3.1 Introduction . . . 50
- 3.2 Materials and methods . . . 52
- 3.3 Results and discussions . . . 60
- 3.4 Conclusion . . . 65
- 3.A Test for Young's modulus estimation . . . 67
- 3.B Scans of samples . . . 68
- 3.C Viscoelastic contribution to the measured memory strain . . . 69
- 3.D Raw strain measurement results . . . 70

4 MODÉLISATION ET PRÉDICTION DU DÉVELOPPEMENT DES CONTRAINTES PENDANT LE SÉCHAGE 71
- 4.1 Introduction . . . 74
- 4.2 Materials and methods . . . 75
- 4.3 Results and discussion . . . 78
- 4.4 Conclusions and perspectives . . . 83
- 4.A Mechanical and transfer parameters . . . 85
- 4.B Fork test results at low and medium stiffness levels . . . 86

5 OPTIMISATION D'UNE CONDUITE TRADITIONNELLE VIA UN MÉTAMODÈLE 87
- 5.1 Introduction . . . 90

5.2 Materials and methods . . . 91
5.3 Results and discussion . . . 97
5.4 Conclusions and perspectives . . . 100
5.A Economic model . . . 100

6 APPRENTISSAGE / IDENTIFICATION EN COURS DE SÉCHAGE 103
6.1 Introduction . . . 106
6.2 Material and Methods . . . 107
6.3 Results and discussion . . . 112
6.4 Conclusions and perspectives . . . 121
6.A Mechanical and transfer parameters . . . 122
6.B Initial MC profiles of two boards . . . 123
6.C Transfer parameters estimated and measured . . . 124

7 INTÉGRATION ET VALORISATION DES ÉNERGIES INTERMITTENTES DANS LE SÉCHAGE DU BOIS D'ŒUVRE 125
7.1 Introduction . . . 128
7.2 Materials and methods . . . 129
7.3 Results and discussion . . . 133
7.4 Conclusions and perspectives . . . 137
7.A Parameters used by the multiscale model . . . 138
7.B Fourier series parameter range selection . . . 140
7.C Drying quality criteria . . . 142

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES 143
Conclusions . . . 143
Perspectives . . . 145

ABBRÉVIATIONS 149

BIBLIOGRAPHIE 151

COMMUNICATIONS 165

Liste des tableaux

1.1 Table de séchage du hêtre de 27 mm d'épaisseur 17

2.1 Extrait d'une table traditionnelle de séchage du chêne 39
2.2 Résultats d'optimisations du séchage de planches de hêtre 54 mm 40
2.3 Résultats des simulations des différentes conduites de séchage 44

3.1 Young's moduli of oak and beech in T and R 58

4.3.1 Boundary conditions of the dual annealing code 82
4.3.2 Parameters identified for the model 4 82
4.A.1 Values of transfer parameters 85
4.A.2 Values of mechanical parameters 85

5.2.1 Values of simulated annealing parameters 97
5.2.2 Kiln, stack and boards specifications 97
5.3.1 Weighting of criteria for the first optimizations 98
5.3.2 Simulation outputs of the optimizations of the drying schedule 99
5.A.1 Assignment of the quality class to the degree of case hardening of the boards 102
5.A.2 Costs and coefficients used in the economic model 102

6.3.1 Opening gap obtained from a the slicing test for the different instrumented boards 116
6.3.2 Simulation outputs for the different drying schedules 120
6.A.1 Values of transfer parameters 122
6.A.2 Values of mechanical parameters 122
6.C.1 Mass diffusivity coefficients 124
6.C.2 Intrinsic permeability 124

7.2.1 Ranges of possible values for the various harmonics of the Fourier series describing the evolution of temperature and that for the EMC 132
7.3.1 Results of the different drying schedules 135
7.A.1 Values of transfer parameters 138
7.A.2 Values of mechanical parameters 139
7.A.3 Kiln, stack and boards specifications 139
7.A.4 Costs and coefficients used in the economic model 140
7.A.5 Values of simulated annealing parameters 140

Liste des figures

1.1 Isothermes de sorption 4
1.2 Anatomie des résineux et feuillus, et directions et plans d'études 5
1.3 Déformations des pièces de bois dues au retrait, selon leurs débits 6
1.4 Classes d'emplois du bois 8
1.5 Photographie de plateaux de chêne présentant des discolorations 12
1.6 Hétérogénéité du séchage dans un lit de planches 13
1.7 Schéma de principe de la cinétique du séchage d'une planche et de l'essai de *Flying Wood* 14
1.8 Principaux organes d'un séchoir à air chaud climatisé 16
1.9 Ancien système d'enregistrement de la température au sein d'un séchoir . . . 17
1.10 Schéma de principe du prong test 19
1.11 Schéma de principe du slicing test 19

2.1 Principaux volets du projet de thèse 30
2.2 Schéma de principe (a) et description (b) de l'essai *Fourche* 31
2.3 Dessin éclaté de l'essai *Fourche* 32
2.4 Complaisance du hêtre chargé en R et du chêne chargé en R et T 33
2.5 Schéma du modèle mécanique 34
2.6 Confrontation entre les mesures et les simulations avec différents modèles . . 35
2.7 Consignes en humidité d'équilibre du hêtre au cours du séchage optimisé selon différents critères. 38
2.8 Conduites de séchage du hêtre et du chêne conventionnelles et sous forme de trajectoires 39
2.9 Confrontation d'une cinétique de séchage mesurée et simulée 41
2.10 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées par méthode inverse des coefficients de diffusion massique, selon la cinétique considérée 42
2.11 Comparaison entre les valeurs mesurées et estimées par méthode inverse des coefficients de perméabilité liquide, selon la cinétique considérée 42
2.12 Contribution de l'énergie solaire thermique au séchage selon la saison 44
2.13 Conduites de séchage traditionnelle et optimisées 45
2.14 Conduite de séchage optimisée sur le coût 45

3.1 Principle of the fork device 53
3.2 Pictures of the experiment 54
3.3 Wood sampling 59
3.4 Strain contributions in the *Fork* test for beech under high load in R 60
3.5 Stresses measured for the three samples loaded in R 61
3.6 Moisture content evolution for beech samples 61
3.7 Memory strain with MC evolution for beech samples loaded in R 62
3.8 Compliance with moisture content 63
3.9 Memory strain as a function of cumulative MC variation for beech samples loaded in R 63

3.10 Compliance as a function of cumulative MC variation for beech samples loaded in R . . . 64
3.11 Compliance as a function of cumulative MC variation for oak samples loaded in R . . . 64
3.12 Compliance as a function of cumulative MC variation for oak samples loaded in T . . . 65
3.A.1 Device and interpolation for Young's modulus estimation . . . 67
3.B.1 Scans of wood samples . . . 68
3.C.1 Memory strain and MC of a loaded wood sample at constant RH . . . 69
3.D.1 Raw strains measured with the *Fork* experiment for beech and oak samples . 70

4.2.1 Boundary conditions of *Fork* test . . . 76
4.3.1 Comparison between the different models . . . 80
4.3.2 Contributions of the Kelvin elements to the MS strain in the *Flying Wood* test using model 4b . . . 81
4.3.3 Parametric analysis of a single Kelvin-Voigt unit for the MS model . . . 81
4.3.4 Comparison of the MS strains measured with the *Fork* test and simulated . . 82
4.3.5 Comparison of the board curvature measured with the *Flying Wood* test and simulated . . . 82
4.3.6 Contribution of Kelvin elements to *Fork* simulation in model 3, with its optimized parameters . . . 83
4.3.7 Contributions of the Kelvin elements to the MS strain in the *Flying Wood* test using model 3 . . . 83
4.B.1 Comparison between the different models used in the simulations and the experimental results of the *Fork* test . . . 86

5.2.1 Evolution of the mean MC of a stack of beech boards, 54 mm thick, dried with conventional drying schedule . . . 92
5.2.2 Conventional drying schedules and path functions . . . 93
5.2.3 Global overview of different metamodel modules and their links . . . 96
5.3.1 Optimized schedules for beech boards 54 mm thick . . . 98

6.2.1 The scientific approach applied in this work . . . 107
6.2.2 Picture of the stack of boards . . . 109
6.2.3 Drying conditions and measured kinetics . . . 110
6.3.1 Comparaison of MC measured at core and estimated by the dry weight method 113
6.3.2 Mass diffusivity coefficients and intrinsic permeability estimated by direct measurement and inverse analysis . . . 114
6.3.3 Experimental and numerical results of MC over time . . . 115
6.3.4 Influence of the drying time considered in the inverse analysis on the estimation of the transfer properties . . . 116
6.3.5 Comparison of final MC measured at core and simulated . . . 117
6.3.6 Drying conditions and kinetics for the four cases studied . . . 119
6.3.7 Evolution of the stress at the surface and at the core . . . 120
6.3.8 Comparison of measured initial and final MC of all boards . . . 121
6.B.1 Initial MC profiles, estimated and measured at different material depth . . . 123

7.2.1 Global overview . . . 130
7.3.1 Conventional drying schedule and heat power demand during the summer . 134

7.3.2 Conventional drying schedule and heat power demand at low temperature during the summer . . . 134
7.3.3 Optimized drying conditions and heat power demand to maximize renewable energy contribution during the summer . . . 135
7.3.4 Conventional drying schedule and heat power demand during the spring . . 136
7.3.5 Optimized drying conditions and heat power demand to maximize renewable energy contribution during the spring . . . 137
7.3.6 Optimized drying conditions and heat power demand to reduce operating costs during the spring . . . 137
7.B.1 Examples of interpolation of a Fourier series . . . 140
7.B.2 EMC curves obtained using one of the Fourier series elements . . . 142

8 Schéma de principe de la régulation de séchage envisagée . . . 145

Introduction

Des éléments en bois qui vous entourent, connaissez-vous la consommation énergétique de leur séchage préalable ?

Avec une moyenne française de 2,3 tonnes de bois par habitation pour la seule structure [1] [2] [3], le séchage de ces éléments aura évacué environ 1,2 tonne d'eau. En considérant qu'ils ont été séchés artificiellement cela aura nécessité au minimum 1600 kWh, soit la consommation électrique moyenne d'un·e français·e pendant 8 mois [4].

Les tendances d'évolution de la construction en France indiquent une diminution des surfaces résidentielles neuves, mais qui restent conséquentes avec un minimum de 20,5 millions de m^2 bâtis annuellement [5]. Tenir nos engagements à fortement réduire nos émissions de gaz à effet de serre implique une augmentation massive de la part de bois dans la construction [6]. Cela correspond à minima au doublement du volume de bois mis en œuvre dans la construction, et augmente ainsi la consommation d'énergie par le séchage de ce matériau. À titre d'exemple, une habitation individuelle performante en bois lamellé croisé nécessite en moyenne 22,5 tonnes de bois, soit 15,7 MWh pour son séchage, l'équivalent de l'énergie consommée par un·e français·e pendant 5 mois, toutes sources confondues.

Si la filière bois offre déjà des solutions efficaces et souhaitables pour réduire nos émissions de gaz à effet de serre, grâce à un matériau se substituant à ceux les plus polluants tels que les produits à base de ciment, de sable ou d'acier, l'étape du séchage du matériau reste fortement consommatrice en énergie. L'évaporation d'un kilogramme d'eau nécessite l'apport de 0,7 kWh ; dans un séchoir industriel, ce sont entre 1,5 et 3 kWh [7] qui sont utilisés pour évacuer cette même quantité d'eau du bois. Le contrôle de la température et de l'humidité au sein d'un séchoir, enceinte fermée contenant des piles de bois, permet d'accélérer le séchage et de maîtriser la qualité du produit final ; elle entraîne cependant une surconsommation liée aux pertes thermiques et au renouvellement d'air. En tenant compte des caractéristiques des transferts couplés de masse et de chaleur dans le bois, quelle pourrait être la consommation énergétique minimale du séchage du bois et comment l'atteindre ?
Ou, en d'autres termes, comment réduire l'impact environnemental du séchage ?

[1] Paul GONTIA et al. « Material-intensity database of residential buildings: A case-study of Sweden in the international context ». In : *Resources, Conservation and Recycling* 130 (2018), p. 228-239. DOI : 10.1016/j.resconrec.2017.11.022.

[2] Béatrice BOUTCHENIK et al. *Chiffres clés du logement - Édition 2022*. Service des Données et Études Statistiques, 2022, p. 88.

[3] Richard SIKKEMA et al. « A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions ». In : *Sustainable Cities and Society* 90 (2023), p. 104370. DOI : 10.1016/j.scs.2022.104370.

[4] Source UpEnergie, données INSEE et Agence ORE

[5] Paul DONADIEU DE LAVIT et Nathalie LERIDON. *Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*. ADEME, France Bois Forêt, CODIFAB, 2019.

[6] MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE. *Stratégie nationale bas-carbone*. Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020.

[7] Daniel ALÉON. *Séchage des bois d'oeuvre: de la théorie à la pratique*. Première édition 2012. Paris : FCBA, 2012. 288 p. ISBN : 978-2-85684-080-1.

Une priorité actuelle est effectivement de réduire tant que possible les effets de notre activité humaine, et notamment les rejets de gaz à effet de serre (GES), qui ont pour conséquence la modification du climat et des écosystèmes terrestres et marins, bouleversant les espèces vivantes et nos conditions de survie.

> Dans tous les scénarios d'émissions de GES (sauf le plus optimiste), nous dépasserons le seuil de réchauffement mondial de + 1,5°C entre 2021 et 2024. [...] Plus nous dépassons les 1,5 °C (inscrits dans l'accord de Paris), plus notre avenir sera imprévisible et les dangers importants. Et ces points de non-retour pourraient advenir à l'échelle mondiale comme à l'échelle régionale. (GIEC 2021) [8]

Les émissions de GES étant étroitement liées à la production et à la consommation d'énergie, la « décarbonation » de l'industrie et la réduction de la consommation énergétique sont des voies nécessaires, mais pas suffisantes.
L'inexorable réduction de nos émissions de GES pour limiter les dégâts nécessite d'importantes modifications dans les modes de vie de notre société. De nombreux travaux ont été réalisés pour quantifier le péril et définir les objectifs à atteindre. La sensibilisation institutionnelle du plus grand nombre est plus récente en France, et s'est traduite notamment par la formulation de scénarios possibles pour limiter notre impact sur le climat [9].

Depuis plusieurs décennies les sources d'approvisionnement énergétiques sont de plus en plus coûteuses et volatiles, et le mythe de leur abondance a pris fin. Les scieries peuvent en être dépendantes et renoncent parfois à sécher le bois face à des coûts prohibitifs. Des conflits d'usage sur certaines ressources, tel que l'emploi des coproduits du sciage pour la valorisation énergétique au détriment de la fabrication de panneaux, sont bien présents. De façon plus dramatique des conflits armés sont entretenus et augmentent l'instabilité des approvisionnements énergétiques. Lors du déclenchement des combats en Ukraine en février 2022, la forte hausse du prix du gaz naturel qui s'en est suivi a amené plusieurs scieries françaises à redémarrer des brûleurs au fioul pour continuer leurs activités, contre toute logique de pérennité environnementale. Les sources énergétiques ont effectivement des impacts différents sur l'environnement et les énergies renouvelables à court terme sont plébiscitées en substitution des énergies fossiles, pour limiter les émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique ainsi généré. La dépendance à des énergies produites localement semble aussi préférables.

L'utilisation d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) dans le séchage du bois contribuerait à réduire l'empreinte environnementale du processus ainsi que sa dépendance à des sources problématiques. Ces nouvelles sources énergétiques, qui se substitueraient aux traditionnelles chaudières à hydrocarbures ou biomasses ainsi qu'à l'électricité générée par la fission nucléaire, sont par nature fluctuantes et potentiellement de plus faibles niveaux énergétiques. L'énergie issue de panneaux solaires ou de cellules photovoltaïques, l'énergie électrique générée par les éoliennes ainsi que les vapeurs issues de l'industrie varient effectivement avec la météo et l'activité du site industriel. Si l'intégration de ces énergies intermittentes dans le séchage du bois est un défi, notamment parce que les conduites de séchage actuelles sont anciennes et basées sur des sources

[8] Karim Beddiar et al. *Massification de la rénovation énergétique: accélérer et optimiser la rénovation énergétique grâce aux outils numériques et industriels*. Malakoff : Dunod, 2022. 223 p. ISBN : 978-2-10-082641-4.
[9] Éric Vidalenc et al. « Quatre scénarios pour la transition écologique. L'exercice de prospective de l'ADEME Transition(s) 2050 ». In : *Futuribles* 3.448 (2022), p. 5-21. DOI : 10.3917/futur.448.0005.

abondantes, la prise en compte des intérêts industriels et de la filière bois est une nécessité pour que ces évolutions soient mises en œuvre. Ainsi la qualité du bois séché doit être maintenu, et le coût et la durée du séchage contenus. Un approvisionnement énergétique fluctuant est cependant plus facile à gérer dans un contexte industriel que pour des particuliers ; ces derniers pourraient alors bénéficier d'une disponibilité plus importante de biomasse, largement décarbonée.

La recherche de nouvelles conduites de séchage adaptées aux EnR&R est l'objet des travaux présentés. Financés par l'ADEME et FCBA, ils visent à générer ces conduites tout en considérant les objectifs d'un·e pilote de séchoir en termes de durée, qualité, coût et consommation énergétique. La prise en compte de ces critères et de cette source énergétique est effectuée par un modèle d'automate de régulation avancé, capable de prédire et d'optimiser le processus de séchage, offrant ainsi une alternative aux régulations traditionnelles des séchoirs.

La qualité du bois séché, notamment caractérisée par l'absence de fentes, est primordiale. Ces dernières peuvent survenir lorsque des contraintes mécaniques trop importantes se développent pendant le séchage. La prédiction de ces contraintes, et notamment sous conditions fluctuantes, est donc nécessaire. Le chapitre 3 est consacré à cette tâche. Par un dispositif original il étudie le comportement du bois soumis à la fois à une charge mécanique et à des conditions de séchage variables. Il se concentre en particulier sur la caractérisation du comportement mécanosorptif du matériau bois dont l'effet sur les contraintes de séchage est déterminant. Des conditions de séchage variables et à basse température, qui résulteraient de l'utilisation d'énergies intermittentes ou d'EnR&R, sont effectivement susceptibles de favoriser ce comportement mécanosorptif.
L'étude expérimentale du comportement mécanique du bois dans les conditions précédentes sert ensuite au paramétrage d'un modèle mécanique ; ce travail est présenté dans le chapitre 4.
Ces deux premières études permettent de vérifier les capacités prédictives d'un modèle numérique quant au développement des contraintes de séchage, élément essentiel pour estimer la qualité du séchage.

En plus de cette qualité, les critères de durée, de coût et de consommation énergétique sont à considérer dans l'optimisation du séchage. Celle-ci est réalisée sur les différents critères dans le chapitre 5. Puisque les conduites traditionnelles sont empiriques et perfectibles, leur optimisation avec l'aide d'une modélisation numérique multiéchelle améliore les résultats du séchage.
Du fait de la nature végétale du matériau bois chaque planche et par là même chaque lot de planches, ou charge de bois contenue dans un séchoir, est unique ; l'adaptation de la conduite de séchage aux spécificités de la charge de bois, et aux aléas qui peuvent survenir en cours de séchage, est une fonctionnalité souhaitée du modèle et présentée au chapitre 6.

Enfin, dans le chapitre 7, l'ensemble des travaux développés dans les chapitres précédents se rencontrent. Dans cette dernière partie l'outil numérique développé utilise différents scénarios d'apport énergétique afin de répondre aux attentes d'un·e pilote de séchoir en termes de durée, qualité, coût et consommation énergétique.

Note aux lecteurs et lectrices :
Ce manuscrit de thèse se compose de plusieurs articles de recherche publiés, acceptés ou soumis pour publication et en cours d'évaluation par des pairs. Après le chapitre introductif (chapitre 1), une synthèse en français (chapitre 2) donne les liens entre ces articles et les apports de chacun dans la thèse. Chaque article traite d'un aspect spécifique de mon sujet de thèse ; un chapitre est donc dédié à chacun, incluant une page introductive en français qui replace l'article dans le contexte général de la thèse, et donne les références de la publication et les noms des co-auteurs. Ces articles scientifiques résultent en effet d'une collaboration avec d'autres chercheurs, co-auteurs de ces articles, qui les ont enrichi de leurs expertises scientifiques et de leur analyses. Chacun a donné son accord pour la publication des différents articles dans ce manuscrit de thèse.

Enfin, comme vous avez pu le voir dans cette introduction, les notes de bas de page sont utilisées pour les citations bibliographiques afin d'éviter au lecteur de se reporter à la fin du manuscrit. La première fois qu'une source est citée dans le texte, une note de bas de page fait apparaître la référence complète. Pour les citations suivantes de la même source, une forme abrégée est utilisée, indiquant simplement l'auteur et le titre. À la fin du manuscrit, toutes les références citées sont répertoriées par ordre alphabétique.

1

Le séchage du bois : une pratique à adapter

Ce premier chapitre vise à rendre compréhensibles le séchage industriel du bois, les mécanismes qu'il implique et les spécificités du matériau bois. L'intérêt de son optimisation ainsi que les travaux réalisés à ce sujet sont présentés en fin de chapitre. Un état de l'art de chaque avancée, présentée dans chacun des chapitres 3 à 7, peut être lu dans leurs parties introductives, en anglais.

1.1 LE SÉCHAGE INDUSTRIEL DU BOIS

1.1.1 *Principe du séchage*

Le séchage consiste à retirer l'eau d'une matière, partiellement ou totalement. Un séchage partiel peut avoir lieu naturellement à l'air libre, mais c'est aussi une étape courante dans les procédés de transformation. Dans ce cas, c'est une étape contrôlée qui enlève l'eau apportée intentionnellement dans la transformation d'une matière ou intrinsèque à celle-ci.

L'eau dans le bois

Dans le cas du bois, c'est une étape essentielle pour lui assurer des performances et une durabilité optimales. L'eau y est naturellement présente sous une forme liquide appelée eau libre, dans les cavités et vides cellulaires, sous une forme de vapeur d'eau, dans les vides cellulaires dépourvus d'eau libre, et sous la forme d'une eau liée [1]. La molécule d'eau est dans ce dernier cas liée par une liaison chimique faible, ici une liaison hydrogène, soit sur des sites de sorption (i.e. groupes hydroxyles -OH) de macromolécules du bois ou à d'autres molécules d'eau déjà liées présentes dans les parois de ce milieu poreux. Les hémi-celluloses, la cellulose et la lignine, qui composent ces parois cellulaires, sont les supports d'environ respectivement 47 %, 37 % et 16 % de l'eau liée [2]. L'évacuation de l'eau du bois nécessite un changement d'état d'eau liée ou liquide à l'état de vapeur. Le passage de l'eau liquide à vapeur d'eau nécessite l'apport de la chaleur latente de

[1] Alfred Joaquim STAMM. « Movement of fluids in wood — Part I: Flow of fluids in wood ». In : *Wood Science and Technology* 1.2 (1967), p. 122-141. DOI : 10.1007/BF00353384.

[2] Wilfred A. CÔTÉ. « Chemical Composition of Wood ». In : *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Sous la dir. de Franz F. P. KOLLMANN et Wilfred A. CÔTÉ. Berlin, Heidelberg : Springer, 1968, p. 55-78. ISBN : 978-3-642-87928-9.

vaporisation. Pour l'eau liée, une énergie supplémentaire est nécessaire pour rompre les liaisons entre l'eau et les macromolécules du bois : il s'agit de la chaleur différentielle de sorption.

Pour quantifier l'eau présente dans le bois, quelle que soit sa forme, le terme de teneur en eau ou humidité est employé. Nous considérerons dans ces travaux une teneur en eau sur "base sèche". Elle est définie comme la fraction massique de la quantité d'eau contenue dans le matériau sur la masse du matériau sans eau, aussi appelée masse anhydre (Éq. 1.1).

$$MC = \frac{m_{water}}{m_0} \tag{1.1}$$

avec $m_{water} = m - m_0$ où m est la masse du matériau à la teneur en eau MC et m_0 sa masse anhydre. Elle peut être déterminée selon au moins 15 méthodes différentes [3] ; dans ce travail elle est mesurée par la résistance électrique du matériau ou selon la méthode gravimétrique. Lorsque le matériau bois a une teneur en eau inférieure au point de saturation des fibres (PSF), l'eau y est présente uniquement sous la forme de vapeur ou d'eau liée. La valeur du point de saturation des fibres fait l'objet de nombreuses discussions depuis sa découverte [4] [5] ; elle est couramment estimée à environ 30 % mais varie en fonction des essences, de la température du bois, de la provenance et des conditions de croissance du bois [6]. Au-delà de cette valeur, les sites de sorption présents dans les parois cellulaires sont considérés liés à des molécules d'eau, et les variations d'humidité se reportent donc sur l'arrivée ou le départ d'eau liquide dans les cavités cellulaires. La transition entre présence d'eau libre et présence exclusivement d'eau liée n'est cependant pas aussi nette [7] dans le bois dont la morphologie complexe comporte une distribution importante de tailles de pores.

Lorsque les arbres sont récoltés et ébranchés sous forme de grumes, la teneur en eau moyenne varie couramment autour de 50 à 150 % [8], avec de grandes disparités selon l'essence, le lieu de croissance, le climat et la pluviométrie avant l'abattage [9]. L'humidité au sein même d'une grume est souvent hétérogène [10]. Dans une grume la couronne périphérique ou aubier, où circulait la sève brute [11], est plus humide que le duramen ou bois parfait, partie centrale de l'arbre qui n'assurait plus la fonction de transport de sève mais les fonctions de stockage et de soutien mécanique.

L'air humide et l'humidité d'équilibre du bois

L'air ambiant est composé de différents gaz, dont chacun exerce une pression partielle qui contribue à la pression globale de l'air. Il est ainsi possible de parler de la pression

[3] Franz KOLLMANN et Günther HÖCKELE. « Kritischer Vergleich einiger Bestimmungsverfahren der Holzfeuchtigkeit ». In : *Holz als Roh-und Werkstoff* 20.12 (1962), p. 461-473. DOI : 10.1007/BF02619168.

[4] Harry Donald TIEMANN. *Effect of Moisture Upon the Strength and Stiffness of Wood*. Washington, DC, USA : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1906. 152 p.

[5] Christen SKAAR. *Wood-Water Relations*. Réd. par T. E. TIMELL. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg : Springer, 1988. ISBN : 978-3-642-73685-8.

[6] Sébastien PARADIS et al. *TROPIX 7.5.1 : caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées*. 2015.

[7] Giana ALMEIDA et Roger E. HERNÁNDEZ. « Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point ». In : *Wood Sci Technol* 40.7 (2006), p. 599-613. DOI : 10.1007/s00226-006-0083-8.

[8] SKAAR, *Wood-Water Relations*.

[9] Gilbert AUSSENAC. « La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers ». In : *Rev. For. Fr.* 2 (1978), p. 103. DOI : 10.4267/2042/21213.

[10] Leonard CHALK et J. M. BIGG. « The distribution of moisture in the living stem in sitka spruce and douglas fir ». In : *Forestry: An International Journal of Forest Research* 29.1 (1956), p. 5-21. DOI : 10.1093/forestry/29.1.5.

[11] Marie-Christine TROUY-JACQUEMET. *Anatomie du bois - Formation, fonctions et identification*. Synthèses. Éditions Quae, 2015. 184 p. ISBN : 978-2-7592-2351-0.

partielle de diazote, celle de dioxygène, celle de dioxyde de carbone, etc. L'air humide contient de la vapeur d'eau ; en complément de la pression partielle de vapeur d'eau, on définit la pression partielle de l'air sec, qui regroupe la part de toutes les autres composantes de l'air. La pression maximale de vapeur pouvant être contenue dans l'air humide dépend notamment de la température de l'air ; elle est appelée pression de vapeur saturante. Dans un système fermé et à une température donnée, si de l'eau liquide est en contact avec l'air, celle-ci tend à s'évaporer jusqu'à ce que la pression de vapeur de l'air atteigne la pression de vapeur saturante. Une fois cette pression de vapeur maximale atteinte, un équilibre est établi entre les molécules d'eau à l'état gazeux qui condensent à la surface de l'eau liquide et les molécules d'eau liquide qui s'évaporent. L'humidité relative de l'air (HR) correspond au rapport entre la pression de vapeur et la pression de vapeur saturante tel que défini à l'équation 1.2.

$$HR = \frac{P_{vap}}{P_{vsat}(T)} \tag{1.2}$$

Le bois est un matériau hygroscopique : en contact avec l'air humide, il a la capacité d'augmenter ou de diminuer son humidité par adsorption ou désorption d'eau liée, selon, entre autres, l'humidité relative et la température de l'air, l'histoire de ses variations d'humidité, les contraintes mécaniques en son sein, son essence [12]. La sorption implique l'établissement ou la rupture des liaisons chimiques faibles décrites précédemment entre les molécules d'eau et les sites hydroxyles des parois cellulaires du bois. L'isotherme de sorption est la courbe donnant l'humidité d'équilibre du bois selon l'humidité relative pour une température de l'air donnée. La teneur en eau d'équilibre du bois (EMC, pour equilibrium moisture content) correspond donc à la teneur en eau qu'atteindrait une pièce de bois laissée dans des conditions constantes de température et d'humidité de l'air suffisamment longtemps pour qu'elle atteigne l'équilibre hygroscopique. Comme de nombreux autres matériaux biosourcés l'humidité d'équilibre du bois dépend non seulement de l'humidité relative de l'air mais aussi de l'historique des variations d'humidité, comme évoqué précédemment. Selon que sa teneur en eau augmente ou diminue, dans un même air ambiant, son humidité d'équilibre ne sera pas la même ; en désorption son humidité d'équilibre sera plus élevée que le même bois en adsorption. Cette différence est appelée hystérésis de sorption et sa modélisation fait l'objet de nombreuses études, dont les conclusions sur l'influence des différents paramètres (humidité, température, contraintes, historique) sont parfois contradictoires [13].

[12] John Finn SIAU. *Transport Processes in Wood*. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1984. 248 p. ISBN : 978-3-642-69215-4.

[13] Marián BABIAK. « Sorption isotherms of wood ». In : *Fundamentals of Wood Drying*. Patrick Perré. Nancy, France, 2007, p. 67-86.

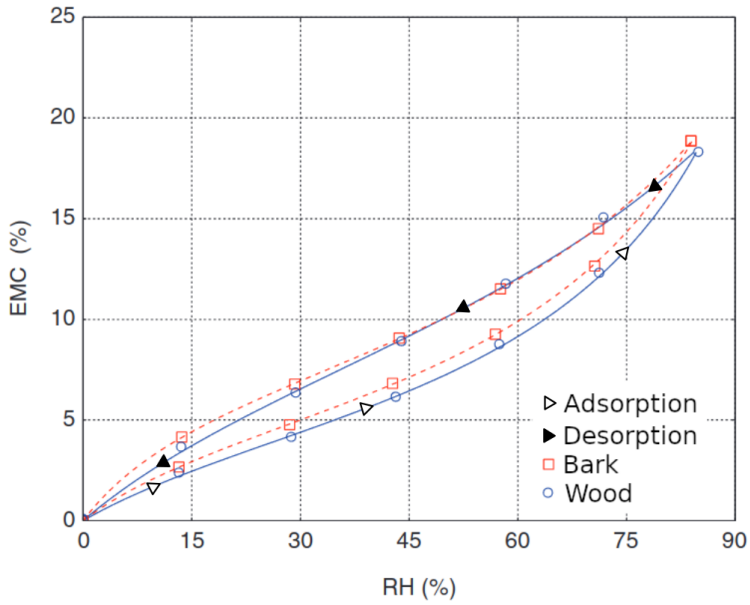


FIGURE 1.1 – Illustration d'isothermes de sorption et de l'hystérésis associé dans le cas de l'adsorption et de la désorption, pour de l'écorce et du bois de hêtre, adapté de Rémond et al. (2017) [14]

Un matériau anisotrope

Le bois est constitué de cellules tubulaires et de fibres orientées (fig. 1.2a). Elles sont principalement orientées dans l'axe longitudinal de la tige, les trachéides des résineux et les vaisseaux des feuillus servant à la migration de la sève brute entre les racines et le feuillage. Les fibres et trachéides servent aussi au maintien mécanique de l'arbre par leur orientation parallèle à la direction longitudinale du matériau. Mais, perpendiculairement à ces dernières, et orientées du cœur vers la périphérie du tronc, donc radialement, des cellules de parenchyme constituent les rayons ligneux. Ils servent au stockage de nutriments et au transport radial de ceux-ci et d'eau dans le plan horizontal de la tige. Des ponctuations permettent d'interconnecter toutes ces cellules. Enfin la croissance secondaire d'un arbre au niveau de son cambium, donc sa croissance radiale, génère des tissus plus ou moins denses selon la saison, dans le cas des essences tempérées. Le plan transversal est une succession d'accroissements annuels : ils sont composés de cellules aux parois fines et d'une proportion plus importante de vaisseaux dans le cas des feuillus au niveau du bois de printemps, ou bois initial, et de cellules aux parois plus épaisses, et de vaisseaux moins nombreux dans le cas des feuillus, au niveau du bois d'été, ou bois final. Cette anatomie du bois lui confère ainsi une anisotropie avec trois directions matérielles perpendiculaires (orthotropie) : les directions longitudinale, radiale et tangentielle, représentées dans la figure 1.2b. La structure interne du bois selon ces trois directions confère au matériau des propriétés et comportements distincts pour chacune d'elle.

[14] Romain RÉMOND et al. « Moisture transport and sorption in beech and spruce barks ». In : *Holzforschung* 72.2 (2017), p. 105-111. DOI : 10.1515/hf-2017-0066

[15] Chaoji CHEN et al. « Structure–property–function relationships of natural and engineered wood ». In : *Nat Rev Mater* 5.9 (2020). Publisher: Nature Publishing Group, p. 642-666. DOI : 10.1038/s41578-020-0195-z

[16] Julien COLIN. « Séchage en continu du bois énergie comme moyen de préconditionnement en vue de sa conversion thermochimique : approches expérimentale et numérique ». Thèse de doct. 2011

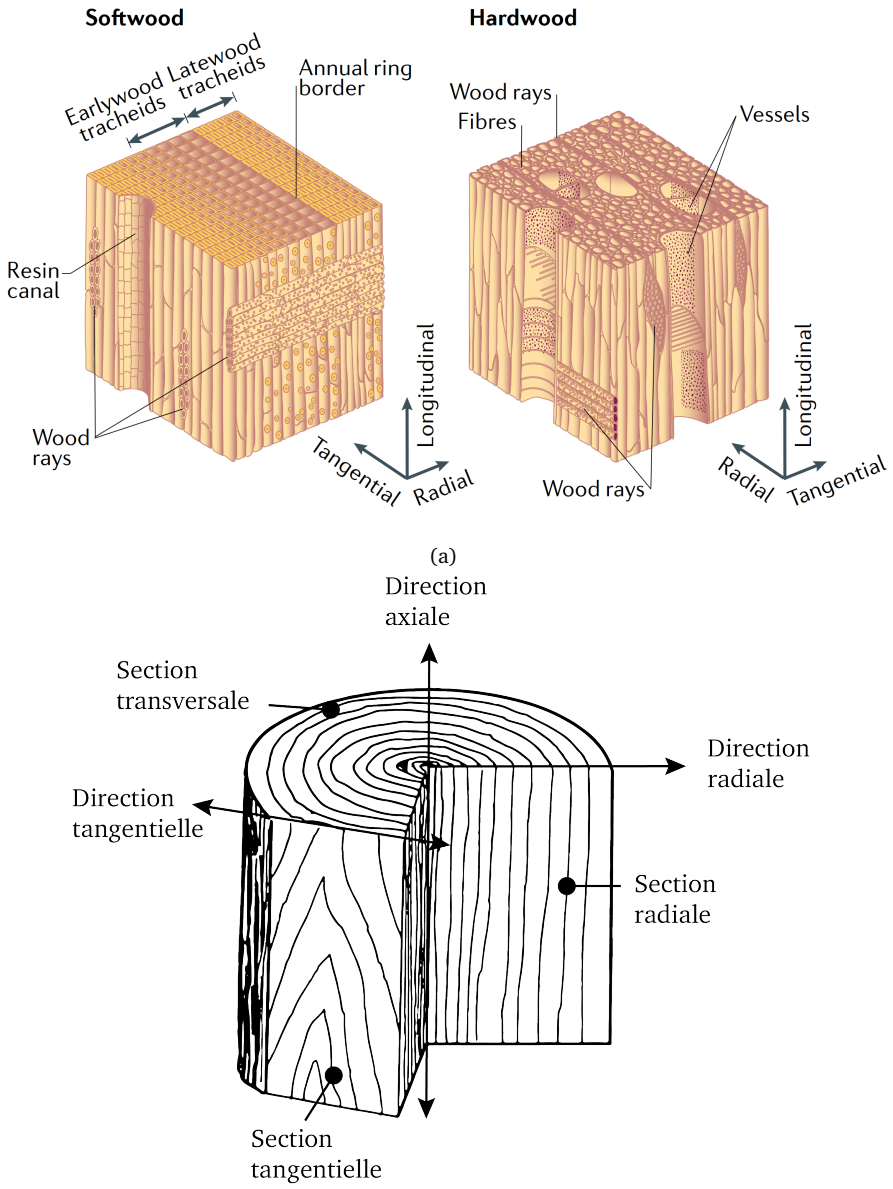


FIGURE 1.2 – Anatomie des résineux et feuillus (a) d'après Chen et al. (2020) [15], et directions et plans d'études (b) adapté de Colin (2011) [16]

La rétractabilité du bois

L'adsorption d'eau dans les parois cellulaires du matériau conduit au gonflement de celui-ci. A l'opposé, la désorption de l'eau génère un retrait du matériau. Ces variations dimensionnelles avec l'humidité n'interviennent que dans le domaine de l'eau liée, i.e. lorsque le matériau a une teneur en eau inférieure au PSF : le matériau est alors considéré comme étant dans son domaine hygroscopique. C'est dans ce domaine, entre l'état anhydre et à proximité du PSF, que la variation dimensionnelle du matériau est proportionnelle à la variation d'eau liée [17].

Ces phénomènes de retraits et gonflements du matériau ont des amplitudes qui diffèrent selon les directions matérielles du bois et selon les essences. La structure interne

[17] Edward C. PECK. « Shrinkage of boards of Douglas-fir, western yellow pine, and southern pines ». In : *Amer. Lumberman* 2774 (1928), p. 52-54.

du bois, illustrée dans la figure 1.2, détermine des coefficients de retrait et gonflement spécifiques pour chaque direction. De nombreux autres facteurs, notamment anatomiques et chimiques, contribuent également à ces variations en fonction de l'orientation [18]. Selon son débit, donc selon son orientation et sa position dans une grume, une planche de bois subira des retraits d'amplitudes différentes, et potentiellement asymétriques. Les déformations liées au retrait de planches débitées sur dosse et sur quartier, qui sont les débits étudiés dans ces travaux, peuvent être visualisées dans la figure 1.3.

L'ordre de grandeur constaté [19] du retrait dans la direction tangentielle est environ le double de celui en radial, lui-même plus de 10 à 100 fois supérieur au retrait dans la direction longitudinale. La rétractabilité du bois est une caractéristique qui est l'objet de nombreuses études [20] [21] car elle génère des contraintes préjudiciables dans le matériau lorsque son humidité varie de manière non homogène, par exemple lors d'une reprise anormale d'humidité après mise en œuvre. Ce phénomène influence par exemple la préservation des peintures [22], la pérennité des constructions [23] [24], la qualité de produits de l'ameublement [25] ainsi que la qualité des bois séchés [26].

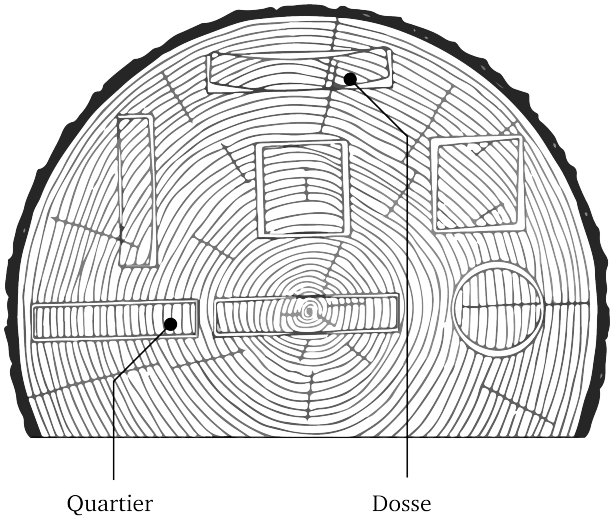


FIGURE 1.3 – Déformations des pièces de bois dues au retrait, selon leurs débits, adapté de Peck (1957) [27]. Les débits indiqués sont ceux étudiés dans ces travaux.

[18] Richard E. PENTONEY. « Mechanisms affecting tangential vs. radial shrinkage. » In : *Journal of the Forest Products Research Society* 3.2 (1953), p. 27-32.

[19] PARADIS et al., *TROPIX 7.5.1 : caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées*.

[20] Eric BADEL et Patrick PERRÉ. « Using a digital X-ray imaging device to measure the swelling coefficients of a group of wood cells ». In : *NDT & E International* 34.5 (2001), p. 345-353. DOI : 10.1016/S0963-8695(00)00072-4.

[21] Lars HANSSON et al. « Estimation of shrinkage coefficients in radial and tangential directions from CT images ». In : *Wood Material Science & Engineering* 12.4 (2017), p. 251-256. DOI : 10.1080/17480272.2016.1249405.

[22] Paola MAZZANTI et al. « Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain ». In : *Journal of Cultural Heritage* 13.3 (2012), S85-S89. DOI : 10.1016/j.culher.2012.03.015.

[23] Thomas GEREKE et al. « Identification of moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels from beech wood (Fagus sylvatica L.) » In : *Wood Sci Technol* 43.3 (2009), p. 301-315. DOI : 10.1007/s00226-008-0218-1.

[24] Frédéric DUBOIS et al. « Long-term creep behavior of timber columns: Experimental and numerical protocols ». In : *Engineering Structures* 275 (2023), p. 115283. DOI : 10.1016/j.engstruct.2022.115283.

[25] Rrahim SEJDIU et al. « A survey of the volume, species, origin of lumber and equipment used for kiln drying of lumber in Republic of Kosovo ». In : 16 (2020), p. 9.

[26] Adam L. REDMAN et al. « Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade ». In : *Wood Sci Technol* 50.4 (2016), p. 739-757. DOI : 10.1007/s00226-016-0818-0.

[27] Edward C PECK. « How Wood Shrinks and Swells ». In : *Forest Products Jounral* 7.7 (1957), p. 235-244

La nécessité du séchage

Le séchage du bois permet de répondre à plusieurs problématiques rencontrées par ce matériau lors de sa transformation ou de son usage :

— Les nutriments présents dans le bois, ainsi que sa structure lignocellulosique, sont la cible de nombreux organismes. Certains provoquent des dégradations esthétiques, comme la coloration du bois par des champignons de bleuissement ou d'échauffure, ou le développement de moisissures. L'association de plusieurs organismes peut accélérer leur développement, qui reste principalement tributaire des conditions de température et d'humidité du matériau. Les organismes xylophages, qui ont eux la capacité de dégrader les parois cellulaires du bois, comprennent notamment des insectes, des mollusques, des crustacés, et des champignons. Si les mollusques et les crustacés xylophages ne concernent que le bois au contact de l'eau de mer, les insectes et les champignons de pourriture sont plus répandus et peuvent aussi fortement dégrader les performances mécaniques du bois[28]. Le développement de ces pourritures et la prolifération de ces insectes n'est cependant possible que pour certaines plages de teneur en eau, de température et d'oxygène. Quelques insectes peuvent dégrader le bois sec, tel que la vrillette, mais le risque de dégradation biologique du bois n'est important qu'au-delà d'une teneur en eau estimée à 18 %. Le risque augmente fortement avec l'augmentation de la teneur en eau, jusqu'à une limite de saturation. En effet, ces organismes sont pour la plupart aérobies et voient leur développement dans la matière freinée lorsque l'ensemble des porosités du bois sont saturées en eau. C'est la raison pour laquelle, dans les parcs à grumes des scieries, des systèmes d'arrosage sont couramment employés pour maintenir le bois à une humidité proche de la saturation intégrale et ainsi éviter sa dégradation lors du stockage. En usage le bois est utilisé dans différents environnements, et donc plus ou moins exposé à l'humidité ou au risque de reprise d'humidité. Des classes d'emplois et de service ont été définies selon la fréquence et l'amplitude de l'humidification du bois pendant son usage. Définies dans des normes européennes (NF EN 335[29]), et illustrées dans la figure 1.4, ces classes d'emplois du bois dépendent aussi de l'ambiance, chauffée ou non, de l'exposition aux intempéries. Elles permettent d'évaluer le risque de dégradation biologique. Selon son usage le bois aura une humidité d'équilibre qu'il convient donc d'anticiper avant la mise en œuvre. Si le matériau s'équilibre naturellement dans son environnement, il est souvent nécessaire de l'amener rapidement à sa teneur en eau finale pour limiter les risques de dégradations.

— Dans l'optique d'une mise en œuvre de plus en plus standardisée des produits bois ceux-ci sont fréquemment transformés en bois d'ingénierie (BLC, CLT, etc.), ce qui nécessite un collage. Cette transformation ne peut se faire qu'avec un matériau à la teneur en eau maîtrisée et homogène, que seul le séchage artificiel peut assurer. En effet, le séchage "naturel" ne permet pas la maîtrise des conditions de séchage, car il est tributaire des conditions météorologiques, et la qualité associée n'est donc pas garantie. Le séchage artificiel, lorsqu'il est maîtrisé, permet de réguler la température, l'EMC et les vitesses d'air en fonction de la teneur en eau des bois.

[28] Christian BRISCHKE et Gry ALFREDSEN. « Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay ». In : *Appl Microbiol Biotechnol* 104.9 (2020), p. 3781-3795. DOI : 10.1007/s00253-020-10479-1.

[29] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION. *NF EN 335 - Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois*. 2013.

Ce que l'on appelle alors la conduite du séchage sera détaillée dans ces travaux.

— En limitant la durée du processus le séchage artificiel permet de réduire les encours et donc le coût financier du stockage de bois.

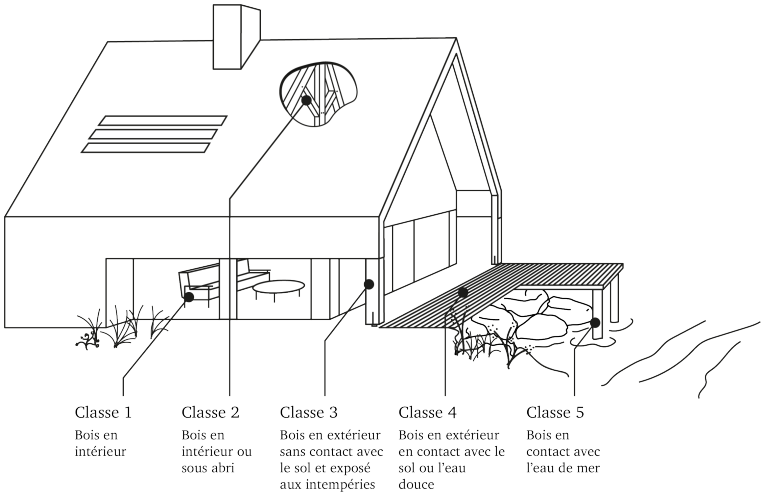


FIGURE 1.4 – Classes d'emplois du bois

Les critères de qualité et de pérennité des ouvrages bois énoncés ici résultent d'une standardisation des produits et des procédés de transformation et de mise en œuvre. Le travail du bois vert, ou éventuellement ressuyé, est une technique ancienne qui peut aussi valoriser des bois de tailles et formes plus variées qu'en industrie, et qui peut être réalisée avec des outils manuels. Le travail du bois vert s'effectue souvent à proximité immédiate du lieu d'usage du matériau transformé. Cette technique permet aussi bien la réalisation de fournitures domestiques [30] que d'importantes structures, telle que les charpentes de cathédrales. La reconstruction de la charpente de Notre-Dame de Paris a mis en avant cette technique constructive ; la transmission des connaissances et des savoir-faire ancestraux à ce sujet n'ayant que partiellement traversé la révolution industrielle, des travaux et projets récents visent à rassembler, vérifier et enrichir ces savoirs [31]. La caractérisation des propriétés du bois vert employé [32] permettrait aussi de compléter les normes de construction [33] et favoriserait son usage. Les perceptions et croyances des constructeurs actuels concernant l'usage du bois vert ont aussi été étudiées et peuvent être éclaircies par la diffusion de ces savoirs [34]. L'étude du travail des charpentiers bois vert montre quant à elle une pratique porteuse de nombreux liens, à la fois avec les forestiers, les clients et la forêt [35].

[30] Ray TABOR. *Le travail du bois vert: 300 modèles et plans d'objets*. Avec la coll. de BOUILLOT PIERRE. Paris : Vigot, 2024. ISBN : 978-2-7114-2708-6.

[31] Sandrine BARDET et Sabine CARÉ. « Projet GreenWood : Utilisation du bois vert dans la construction : Effet du séchage sur les propriétés rhéologiques et hydriques ». In : Paris, France, 2019.

[32] Frédéric DUBOIS et al. « Caractérisation par tomographie ultrasonore du chêne vert employé dans la charpente de la Cathédrale Notre Dame de Paris ». In : (2023).

[33] Nihal GHANEM. « Optimisation du dimensionnement des structures en bois en fonction de l'humidité ». Thèse de doct. École des Ponts ParisTech, 2022. 299 p.

[34] Marco CANIATO et al. « Designers' expectations of buildings physics performances related to green timber buildings ». In : *Energy and Buildings* 276 (2022), p. 112525. DOI : 10.1016/j.enbuild.2022.112525.

[35] Joseph BRIHIEZ. « Une forêt pour charpente : enquête avec le bois vert pour explorer les liens entre des charpentiers et des forêts ». In : (2021), p. 131.

La construction en bois vert nécessite cependant un travail manuel conséquent, une maîtrise lors de la fabrication et un suivi dans le temps qui ne sont pas adaptés à la massification rapide et accessible de la construction en bois. Le séchage artificiel permet aujourd'hui d'obtenir rapidement ces bois d'œuvre et d'assurer leurs performances, en termes de comportement mécanique comme de pérennité face aux risques biologiques.

Les transferts lors du séchage

Plusieurs phénomènes sont concomitants dans le séchage du bois : il y a à la fois des transferts de masse, principalement l'eau sous ses différentes formes, et des transferts de chaleur. Ces transferts sont couplés [36] et dépendent de comportements non-linéaires, ce qui complexifie leur analyse [37] [38].

Plusieurs mécanismes de migration de l'eau sont à considérer dans le séchage du bois pour comprendre la cinétique de séchage et la qualité des produits :

— la migration de l'eau liquide : l'eau liquide migre dans les différentes cellules du bois et peut traverser les parois au niveau de ponctuations. Ces chemins empruntés sont continus et correspondent à ceux utilisés par la sève lorsque l'arbre est vivant, pour assurer les échanges de substances nutritives. La migration par capillarité dépend de la tension superficielle à l'interface entre l'eau et l'air, de la géométrie des pores, de leur distribution, de la tortuosité rencontrée sur le cheminement continu du liquide, et de la différence de pression de liquide. La loi de Darcy permet de modéliser le flux de liquide à travers une structure complexe comme le bois, en intégrant toute la complexité du milieu poreux dans une constante, la perméabilité intrinsèque K. Elle exprime alors la proportionnalité entre le débit et le gradient de pression liquide. La structure interne du bois facilite la migration du liquide principalement dans le sens longitudinal, c'est pourquoi la perméabilité intrinsèque présente un ratio d'anisotropie extrême entre la direction longitudinale et les directions radiales et tangentielles du bois, et de fortes différences entre les essences. Puisqu'il existe deux phases fluides dans le bois pendant son séchage, une phase gazeuse et une phase liquide, la loi de Darcy généralisée est utilisée pour modéliser la migration du liquide dans le matériau en faisant intervenir la pression capillaire et la perméabilité relative qui sont fonctions du taux de saturation en liquide du milieu poreux [39].

— la migration advective d'air : en réponse à un gradient de pression de gaz au sein du milieu poreux un déplacement advectif d'air apparaît à travers le réseau de pores interconnectés et non saturés en eau liquide. Ce flux de gaz peut également être modélisé par la loi de Darcy généralisée. L'écoulement gazeux dans le milieu poreux entraîne avec lui la vapeur d'eau présente dans les pores. La modification du bois après le départ de toute l'eau liquide amène à la définition de deux perméabilités intrinsèques, la perméabilité intrinsèque liquide et la perméabilité

[36] Aleksei Vasilievich LUIKOV. « Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies ». In : *Advances in heat transfer* 1 (1964), p. 123-184.

[37] Stephen WHITAKER. « Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying ». In : *Advances in Heat Transfer* 13 (1977), p. 119-203. DOI : 10.1016/S0065-2717(08)70223-5.

[38] Patrick PERRÉ. « The proper use of mass diffusion equation in drying modelling: from simple configurations to non-fickian bahviours ». In : 19th International Drying Symposium (IDS 2014), August 24–27, 2014. Lyon, France, 2014.

[39] Patrick PERRÉ. *Fundamentals of wood drying*. COST E15 and ARBOLOR. Nancy, 2007. 366 p.

intrinsèque gazeuse.

— la diffusion de la vapeur d'eau : les molécules d'eau de la phase gazeuse migrent aussi naturellement des zones de plus fortes concentrations vers les zones de plus faibles concentrations, donc des volumes d'air les plus humides vers les volumes d'air les moins humides. La loi de Fick permet de modéliser le flux de vapeur d'eau en fonction du gradient de concentration de vapeur et du coefficient de diffusion de vapeur.

— la diffusion d'eau liée : une migration s'effectue aussi au niveau des molécules d'eau liée ; de proche en proche les molécules d'eau liées se lient à de nouveaux sites de sorption, migrant ainsi des zones les plus humides vers les zones les moins humides au sein de la matière lignocellulosique. Ces molécules d'eau liées traversent ainsi les parois cellulaires du bois, et le flux peut également être modélisé par la loi de Fick, avec comme force motrice le gradient de teneur en eau liée.

Ainsi, les diffusions de l'eau sous forme de vapeur et d'eau liée coexistent à l'échelle locale. Elles suivent toutes deux une loi de Fick, avec des coefficients de diffusion propres assurant la proportionnalité entre les flux et les gradients de teneur en eau ou de pression partielle de vapeur. Ces coefficients varient avec l'humidité et la température, on parle d'hydro- et de thermoactivation de la diffusion [40] [41]. La diffusion massique est un mécanisme de transfert très lent par rapport à la migration capillaire. Elle impose sa constante de temps lorsque ces deux mécanismes interviennent au sein du matériau.

La cinétique de séchage illustrée dans la figure 1.7 correspond à celle rencontrée dans le cas d'un séchage convectif par air chaud climatisé, technique courante et présentée plus en détails ensuite. Elle est divisée en 3 phases qui correspondent aux mécanismes prépondérants au cours du processus. Dans la 1re phase, de l'eau liquide est présente dans toute l'épaisseur du matériau : la migration capillaire est alors le principal moteur de transfert de masse, du cœur vers la surface de la planche. L'échange se fait alors avec l'air extérieur par évaporation de l'eau liquide présente à la surface. Cette phase a une vitesse de séchage constante qui dépend principalement du coefficient d'échange extérieur et de l'écart psychrométrique du flux d'air. Dans la 2e phase de séchage de l'eau liquide est encore présente au cœur de la planche mais des zones sous la surface de celle-ci ne contiennent plus d'eau libre ; cette dernière migre par capillarité uniquement jusqu'au front d'évaporation, qui est alors dans l'épaisseur du matériau. La vitesse de séchage est fortement réduite car limitée par le mécanisme de diffusion de l'eau, qui est le seul effectif depuis le front d'évaporation jusqu'à la surface de la planche. En 3e et dernière phase de séchage, l'ensemble de la planche est dans son domaine hygroscopique et les transferts de masse se font par diffusion dans toute l'épaisseur de la planche.

Lors du séchage du bois des transferts de chaleur s'effectuent par conduction dans la matière lignocellulosique. La conductivité thermique, qui caractérise la facilité avec laquelle ce transfert se réalise, est affectée par la teneur en eau du matériau. La vaporisation de l'eau liée ou de l'eau liquide en vapeur d'eau entraîne une réduction locale de la température dans le matériau. La migration d'humidité sous forme vapeur engendre un transfert enthalpique, principalement sous forme de chaleur latente, au sein du matériau.

[40] Alfred Joaquim STAMM. *Wood and Cellulose Science*. Google-Books-ID: cnRunQEACAAJ. Ronald Press Company, 1964. 576 p. ISBN : 978-0-471-06843-3.

[41] Stavros AVRAMIDIS. « Bound water migration in wood ». In : *Fundamentals of Wood Drying*. Patrick Perré. Nancy, France, 2007, p. 105-124.

Lorsque cette eau condense en un autre point du milieu poreux, cette chaleur latente est en partie restituée au milieu environnant, ce qui provoque une élévation locale de la température. Les transferts d'humidité génèrent ainsi un gradient de température, tandis que les variations de température induisent également un gradient d'humidité. Les transferts de chaleur et les transferts de masse sont ainsi couplés.

1.1.2 *La qualité du séchage*

La réussite de l'opération de séchage du bois dépend de nombreux paramètres et critères qui varient d'un opérateur·rice à un·e autre. Les matériels employés, les cahiers des charges, les procédures mises en place dans chaque entreprise vont également être déterminants. La qualité du bois à l'issue du processus est souvent d'importance, notamment dans le cas du séchage du bois d'œuvre, et exige certains niveaux de résultats, en fonction des critères détaillés dans les points suivants.

Le changement de couleur

Au cours du séchage le bois peut être amené à changer de couleur, sous l'effet de nombreux facteurs [42]. Cette discoloration, ou coloration, peut affecter grandement la valeur financière des bois séchés, mais presque jamais leur performances mécaniques. La liste des causes de ces dégradations est résumée par Sandoval Torres et al. (2010) [43]. Dans le cas du séchage industriel du bois, trois causes peuvent y être favorisées :

— l'hydrolyse et l'oxydation des composants du bois, activés par la température et l'humidité ;

— les réactions enzymatiques, entre des extractibles et des enzymes naturellement présents dans le bois ;

— la migration des extractibles, et donc des pigments, et leur concentration dans des zones visibles, avec une potentielle oxydation au contact de l'air ambiant [44]. Un plateau de chêne ayant subi cette migration au séchage est visible dans la figure 1.5

Les discolorations d'origines fongiques et photochimiques surviennent quant à elles principalement lors du séchage naturel. Ces mécanismes sont tous fortement dépendant de l'essence, de sa composition chimique, des extractibles présents dans les lumens, de la teneur en eau. La discoloration n'est pas prise en compte dans ces travaux, mais devra être tout de même considérée dans le choix des conduites de séchages. Elle pourra l'être par la mise en place de consignes limites déterminées empiriquement ; pour des clients réclamant des bois clairs la température de séchage est par exemple contenue tant que l'humidité du bois est au-dessus de son PSF.

[42] Brian H. Bond et Omar Espinoza. « A Decade of Improved Lumber Drying Technology ». In : *Curr Forestry Rep* 2.2 (2016), p. 106-118. doi : 10.1007/s40725-016-0034-z.

[43] Sadoth Sandoval-Torres et al. « Causes of color changes in wood during drying ». In : *For. Stud. China* 12.4 (2010), p. 167-175. doi : 10.1007/s11632-010-0404-8.

[44] Bertrand Charrier. « Les discolorations brunes du chêne apparaissant pendant le séchage artificiel : étude fondamentale et mise en place de techniques de prévention ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1992.



FIGURE 1.5 – Photographie de plateaux de chêne présentant des discolorations après séchage artificiel. Source : Clément L'Hostis - FCBA

Le risque de collapse

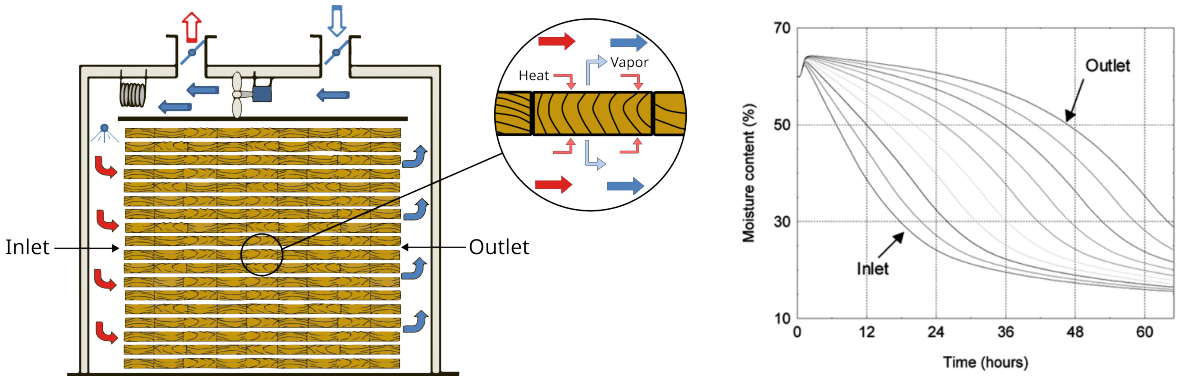
Il a été vu précédemment que l'eau liquide migre dans les vaisseaux, trachéides et via les ponctuations par capillarité, entraînée par les tensions surfaciques et les gradients de pression liquide. Pour certaines essences, en fonction de leur plan ligneux, les tensions capillaires s'appliquant sur les parois cellulaires peuvent, dans le cas notamment d'une température élevée, conduire à un effondrement des cellules sur elles-mêmes. Ce phénomène, appelé collapse, est notamment pris en considération dans le séchage du chêne et du peuplier. Au début du processus, lorsque l'eau liquide est encore présente dans les lumens, la température est maintenue basse, à moins de 35 °C, afin de limiter ce risque. L'effondrement cellulaire, bien que localisé dans le matériau, a des conséquences sur les performances mécaniques du produit et son état de surface[45].

L'homogénéité du séchage

Dans un séchoir, les planches sont empilées et placées bord à bord sur un même lit horizontal. Avec un séchage à basse et moyenne température, l'effet de la surpression interne de gaz est négligeable sur les transferts massiques[46] ; dans ces conditions et du fait des facteurs géométriques d'une planche, les transferts de masse et de chaleur s'effectuent principalement selon l'épaisseur de la planche. L'air qui circule entre les lits de planches a un taux d'humidité et une température qui varie dans le sens de l'écoulement, des échanges s'effectuant au contact de chaque planche, comme illustré dans la figure 1.6. Ainsi, dans un même lit de planche, les cinétiques de séchage sont différentes selon la position de chaque planche et le sens d'écoulement de l'air. Il existe donc à la fois une hétérogénéité de la teneur en eau au sein d'une même planche, mais aussi entre les différentes planches d'un même lit de bois. En ajoutant à ces deux facteurs d'hétérogénéité la diversité des débits, les singularités de chaque planche, les différences de coefficients de transfert, en somme l'unicité de chaque planche, les variations de teneurs en eau en fin de séchage peuvent être grandes si le séchage est interrompu prématurément, si les flux d'air sont hétérogènes au sein du chargement, ou si les conditions de séchage sont inadaptées. Si le chargement, en moyenne, peut être à la teneur en eau souhaitée en fin de séchage, son hétérogénéité peut conduire à des planches s'éloignant amplement des objectifs d'humidité attendus. Une telle situation, à minima dévalue les planches, voire les déclasse en fonction des usages, en particulier dans le cas de leur utilisation en collage, comme cela a été énoncé précédemment. La norme européenne NF EN 14298[47], qui propose une méthode pour estimer la qualité des bois séchés, considère effectivement

[45] William T. SIMPSON. *Dry Kiln Operator's Manual*. Madison, WI, 1991.
[46] PERRÉ, *Fundamentals of wood drying*.
[47] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION. *NF EN 14298 - Bois scié - Estimation de la qualité du séchage*. 2017.

l'humidité moyenne d'un lot et la dispersion des humidités de chaque planche du lot, par rapport à la valeur cible.
La différence de teneur en eau au sein d'une même planche s'atténue nécessairement avec le temps par une redistribution de l'humidité et un équilibrage avec les conditions environnantes. Cette redistribution du champ de teneur en eau s'accompagne de variations dimensionnelles du matériau lorsqu'elle a lieu sous le PSF. Si elle est non maîtrisée des fentes peuvent survenir et dégrader fortement les performances mécaniques du matériau, en plus de sa déformation. C'est la raison pour laquelle, en prévision du rabotage ou de l'usinage aux dimensions finies des planches de bois après leur séchage, une étape d'équilibrage est préconisée en fin de séchage.



(a) (b)

FIGURE 1.6 – Schéma de principe de la circulation de l'air chaud et sec (flèches rouges) et froid et humide (flèches bleues) dans un séchoir au travers d'une pile de planches (a) et cinétiques de séchages de planches selon leurs positions au sein d'un même lit (b), adaptés de Rémond (2004) [48] et de Perré et Rémond (2006) [49]

Les fentes en surface et à cœur

La cinétique de séchage, en plus d'avoir un impact sur l'homogénéité du séchage, peut entraîner l'apparition de fentes en surface et au cœur du matériau. Les mécanismes impliqués dans le transfert de l'humidité sous forme de vapeur et d'eau liée, du cœur du matériau vers sa périphérie, sont lents et génèrent, en cours de séchage, un gradient de teneur en eau. La surface du matériau est la première zone à entrer dans son domaine hygroscopique, et donc à se rétracter. Le cœur du matériau est lui encore en présence d'eau libre, donc dimensionnellement stable, et s'oppose alors au retrait de la surface. Comme l'illustre la figure 1.7 la surface du matériau est à ce moment du séchage en traction, et le cœur en compression : des fentes peuvent alors apparaître en surface, si ces retraits différenciés génèrent des contraintes trop importantes. Au court du séchage le cœur vient à entrer lui aussi dans son domaine hygroscopique, où le retrait de l'eau liée des parois cellulaires entraîne un retrait du matériau. Si le comportement mécanique du bois était purement élastique et linéaire avec l'évolution de teneur en eau le retrait du cœur annulerait les contraintes de séchage. Mais la relaxation des contraintes de séchage, due au comportement viscoélastique et mécanosorptif du bois, présenté plus en détail ensuite, génère une inversion de celles-ci, donc un effort de traction à cœur et de

[48] Romain RÉMOND. « Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées ». Thèse de doct. 2004

[49] Patrick PERRÉ et Romain RÉMOND. « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ». In : *Drying Technology* 24.9 (2006), p. 1069-1074. DOI : 10.1080/07373930600778106

compression en surface. Cet effort à cœur peut générer des fentes, qui ne sont facilement observables que par la découpe d'une planche, et qui risquent de fortement dégrader les performances mécaniques du produit fini. Cet effort de compression en surface peut quant à lui refermer, et donc masquer, d'éventuelles fentes générées en début de séchage. Ces fentes pourront se révéler dans des phases ultérieures de la vie du produit avec la variation des conditions de son environnement.

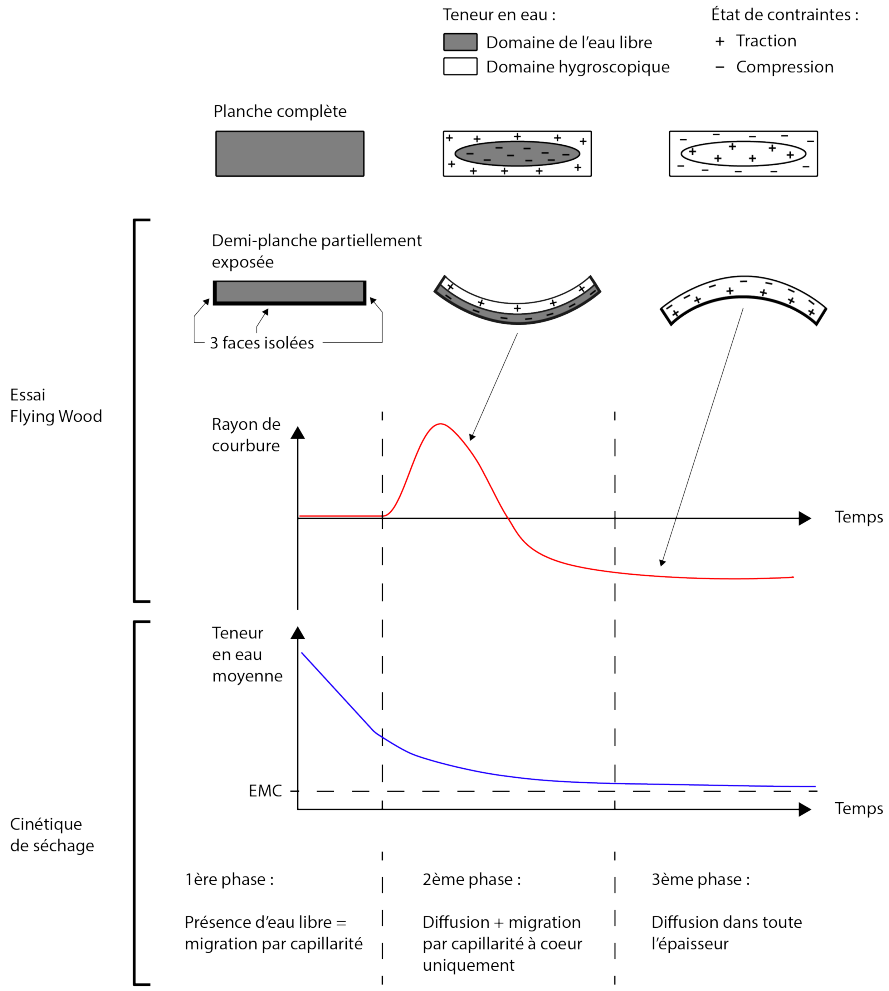


FIGURE 1.7 – Schéma de principe de la cinétique du séchage d'une planche et de l'essai de *Flying Wood* associé, adapté de Brandao et Perré (1996) [50]

1.1.3 *Méthodes et outils employés*

Comme vu précédemment la teneur en eau du bois s'équilibre selon les conditions environnantes : il est donc possible de sécher le bois naturellement en l'exposant à l'air libre. Le bois est alors stocké horizontalement ou verticalement, à l'abri des intempéries mais suffisamment exposé aux vents pour permettre l'évacuation de l'eau. L'empilement est soigné pour limiter les déformations lors du séchage et assurer la libre circulation de l'air entre les lits de planches. La protection à l'ensoleillement direct peut aussi être

[50] Alcir BRANDAO et Patrick PERRÉ. « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ». In : 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Québec, 1996, p. 315-324

nécessaire pour éviter un séchage trop rapide, et donc un risque de fentes. Il s'agit de la technique la plus ancienne de séchage, qui est la plus économe en termes de consommation énergétique puisqu'elle utilise l'énergie de l'air extérieur, mais qui nécessite une longue immobilisation des matériaux et dont la qualité finale est difficilement maîtrisable. Ce type de séchage permet d'atteindre environ 18 % de teneur en eau dans le matériau, ce qui correspond aux bois utilisés en charpente ou dans la construction. Cette humidité finale dépend cependant du climat et varie donc selon la zone géographique et la saison. Pour atteindre plus rapidement et de façon contrôlée cette humidité finale, ou celles plus basses encore requises pour la menuiserie et l'ameublement, des techniques de séchage artificiel ont été mises en place, appliquées dans des séchoirs. Les données fournies par la Fédération Nationale du Bois indiquent que 75 % des scieries de feuillues sont équipées de séchoirs artificiels, et 40 % dans le cas de scieries de résineux.

Plusieurs types de séchoirs sont employés en industrie, aux techniques plus ou moins complexes ou coûteuses. Celles-ci répondent souvent aux fonctions suivantes :

— Échanges de chaleur avec le matériau ; réalisés par convection d'air chauffé, généralement forcée, par conduction au contact de plaques chauffantes, ou par excitation de l'eau contenue dans le matériau au moyen de radiations micro-ondes, les échanges de chaleur permettent d'augmenter la température du matériau et d'accélérer les transferts d'eau. L'élévation de la température de l'air peut être assurée par des échangeurs (air/eau, air/vapeur, ou air/huile) couplés à une chaudière, par des résistances électriques, par des brûleurs directs au gaz ou par une pompe à chaleur.

— Échanges de masse avec le matériau ; l'eau extraite du matériau est quant à elle évacuée sous forme de vapeur dans l'air du séchoir. Le renouvellement de l'air humide contenu dans le séchoir par de l'air extérieur, à l'humidité absolue plus faible, est effectué au niveau des évents de ventilation et assurée par des extracteurs. Dans les séchoirs sous vide, l'extraction de l'eau se fait par la pompe à vide (pompe à anneau liquide). L'humidité de l'air peut être augmentée rapidement par des buses d'aspersion dans le séchoir.

— Isolation ; les cellules de séchage correspondent à des volumes fermés par des parois étanches de type "panneaux sandwich", constituées d'un isolant thermique pour limiter les déperditions, qui est recouvert d'aluminium ou d'acier inoxydable pour réduire le risque de corrosion de la structure par la vapeur.

— Manutention ; selon les quantités et les techniques de séchages employées les séchoirs peuvent fonctionner en continu ou par lots de bois séchés, et intègrent donc des portes et rails permettant le chargement et déchargement des charges de bois ou leur circulation.

Si la pression d'air à l'intérieur des séchoirs est, dans la plupart du temps, proche de la pression extérieure, certains séchoirs sous vide permettent d'accélérer fortement le séchage. Une faible pression d'air correspond à une température d'ébullition plus basse de l'eau ce qui facilite son évaporation au cœur du matériau et génère ainsi un gradient de pression important entre le cœur et la surface du matériau, et donc favorise la migration de la vapeur et de l'eau liquide.

Usage courant : le séchoir à air chaud climatisé

Le séchage convectif par air chaud climatisé (ACC) est aujourd'hui la technique la plus répandue et sert de modèle dans les travaux présentés ensuite. Cette technique consiste à contrôler la température et l'humidité d'un air humide, avec des batteries chauffantes, des buses d'humidification et des évents de renouvellement d'air. Un séchoir de ce type est illustré dans la figure 1.8. Dans ces séchoirs classiques les températures appliquées sont souvent entre 30 °C et 80 °C dans le cas de feuillus[51]. Un système de ventilation assure la circulation de l'air dans les charges de bois.



FIGURE 1.8 – Illustration d'un séchoir à air chaud climatisé comportant : une cellule isolée (A), une charge de planches empilées et lattées (B), des buses d'humidification (C), des batteries chauffantes (D), des évents de ventilation (E), des ventilateurs (F) et des déflecteurs souples (G). Le flux d'air chaud est représenté par des flèches oranges, celui de l'air froid par des flèches bleues. Modèle d'image issu de Incomac[52].

La conduite du séchage

Pour assurer un séchage conforme à ses attentes le ou la pilote de séchoir utilise quotidiennement plusieurs outils et méthodes :

— Des tables de séchage ; obtenues par expérience ou dans la littérature, les tables de séchages contiennent les consignes à appliquer en termes de température de l'air, d'humidité d'équilibre du bois, de ventilation et de gradient de séchage. Ces consignes dépendent de l'essence et de l'épaisseur, et sont appliquées selon la teneur en eau du matériau. Un exemple de table de séchage est présenté dans la table 1.1. Le gradient de séchage est défini dans l'industrie comme le rapport entre la teneur en eau du bois à cœur, ou plus généralement celle mesurée par les sondes résistives, et son humidité d'équilibre (X_{sensor}/EMC). Un fort gradient est souvent associé à un séchage dit "sévère", à l'opposé d'un séchage dit

[51] BOND et ESPINOZA, « A Decade of Improved Lumber Drying Technology ».
[52] *Incomac Srl Italy*. URL : https://www.incomac.com/en/systems/conventional-drying/

TABLE 1.1 – Table de séchage du hêtre de 27 mm d'épaisseur jusqu'à une humidité de 12 %, adaptée de Aléon (2012) [53]

A appliquer jusqu'à une humidité du bois de : (%)	Température sèche (°C)	Température humide (°C)	Humidité relative de l'air HR (%)	EMC (%)	Gradient de séchage
35	50	47	85	16,2	
32	50	46	80	14,4	
30	55	50	75	12,4	
25	60	53	70	10,8	2,8
20	65	55,5	62	8,9	2,8
15	70	57	52	7	2,9
12	70	50	35	5	3

"doux". Compte-tenu des risques de dégradation de la qualité, tels qu'indiqués précédemment, le séchage des feuillus sensibles au collapse ou au changement de teinte requiert une température modérée en début de processus (lorsque l'humidité est supérieure au PSF), avec une humidité d'équilibre haute, et tend vers de plus hautes températures, une plus faible ventilation et une teneur en eau d'équilibre plus basse en fin de séchage.

— Des capteurs de suivi ; des sondes de température ou thermomètres et psychromètres permettent de suivre l'évolution de la température sèche de l'air (Ts) ou Tdb) ainsi que sa température humide (Th), mesurant ainsi son humidité relative. De ces informations peut être calculée la température de rosée (Tr ou Tdp). Des sondes résistives, enfoncées dans des planches à des profondeurs connues et à différents endroits au sein des piles, permettent de suivre l'évolution de la teneur en eau de la charge de bois. Toutes ces données sont enregistrées et affichées au ou à la pilote en temps réel, et prises en compte par la régulation. Un exemple d'enregistrement est illustré dans la figure 1.9



FIGURE 1.9 – Ancien système d'enregistrement de la température au sein d'un séchoir

[53] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*

— Un automate de régulation ; la gestion des différents éléments du système est effectuée par un automate de régulation. Cet automate adapte la température, l'humidité et la vitesse d'air selon les retours des différentes sondes et la table de séchage indiquée par l'opérateur·rice. Constitué de correcteurs PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé), de variateurs et de commutateurs, cet automate assure le suivi des consignes de séchage par le système.

La gestion de la qualité

La présence de fentes ou de déformations est habituellement signalée lors d'un contrôle visuel en fin de séchage, ou dans le pire des cas par un rejet des sciages par le client. Plusieurs méthodes permettent aussi d'estimer la qualité en cours ou en fin de séchage, telles que le slicing test, le prong test et le *Flying Wood*. Le positionnement des sondes résistives peut permettre quant à lui de comprendre la qualité obtenue pour éventuellement corriger la dureté de la conduite de séchage au cycle suivant.

— Le positionnement des sondes résistives. Puisque les sondes résistives mesurent l'humidité du bois et indiquent à l'automate ou à l'opérateur·rice l'avancement dans le processus de séchage, leur positionnement dans le bois et dans la charge de bois est crucial pour assurer la qualité du séchage. Placées en entrée de pile, où l'air est le plus sec, les sondes vont relever des humidités du bois plus basses que la moyenne de la pile. Elles vont donc entraîner une élévation en température et une diminution de l'humidité d'équilibre du bois plus précoce pour les planches en sortie de pile, qui vont subir d'importants gradients de séchage mais assurer un séchage plus rapide pour l'ensemble de la pile ; à l'inverse l'instrumentation des planches en sortie de pile, où l'écoulement d'air se chargeant en humidité le long de la pile est le plus humide et donc le séchage le moins rapide, génère une conduite sécuritaire et douce, au détriment du temps de séchage. Ce point est à considérer dans le cas où l'alternance du sens de ventilation n'est pas assurée, mais le positionnement des sondes dans la charge reste un véritable enjeu dans le cas où la ventilation n'est pas homogène, ce qui peut être le cas si le chargement n'est pas réalisé correctement ou si le séchoir est mal dimensionné.

  De la même façon la profondeur d'une sonde au sein d'une planche influence la conduite du séchage, avec une conduite aux conditions sévères dans le cas de sondes enfoncées proche de la surface du matériaux ou aux conditions douces dans le cas de sondes enfoncées à cœur. Une recommandation couramment faite dans la littérature est d'enfoncer les sondes au tiers de l'épaisseur de la planche, pour s'approcher d'une mesure de la teneur en eau moyenne[54]. C'est aussi la raison pour laquelle, dans le cas d'un automate traditionnel intégrant l'évolution de teneur en eau de quelques planches, le séchage d'essences et de sections différentes peut difficilement être optimisé, et est aujourd'hui proscrit pour garantir la qualité et l'homogénéité du séchage.

— Le slicing test et prong test. Les contraintes lors du séchage, généralement symétriques dans l'épaisseur de la planche pour des sciages de droit fil, et donc sans

[54] Holger FORSÉN et Veikko TARVAINEN. *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. 420. Espoo, Finland : Technical Research Centre of Finland, 2000, p. 79.

effet sur sa forme, peuvent être visualisées aux moyens des slicing test [55] et prong test [56]. Ils consistent à libérer l'expression des déformations en sectionnant un échantillon de planche à mi-épaisseur. Dans le cas du prong test, illustré dans la figure 1.10, une tranche de planche est prélevée et sectionnée sur presque toute sa largeur au niveau de sa demi-épaisseur ; la "fourche" ainsi formée voit ses deux branches se courber selon les contraintes du matériau : ces branches se rapprochent dans le cas d'efforts de traction à cœur et de compression en surface, et s'écartent dans le cas opposé. Ce test destructif, généralement réalisé *a posteriori*, permet d'estimer les contraintes résiduelles et d'adapter les consignes au prochain cycle de séchage ; il n'est donc pas utilisé pour piloter le séchage selon le niveau de contrainte en cours d'opération. Dans le cas du slicing test, illustré dans la figure 1.11, la tranche de bois est sectionnée sur toute sa largeur : l'espacement entre les centres des courbures des deux pièces de bois obtenues est mesuré juste après la découpe. L'espacement est à nouveau mesuré entre les deux pièces, après 48 heures isolées des transferts de masse, dont les champs de teneur en eau, et de contraintes, se sont naturellement équilibrés.

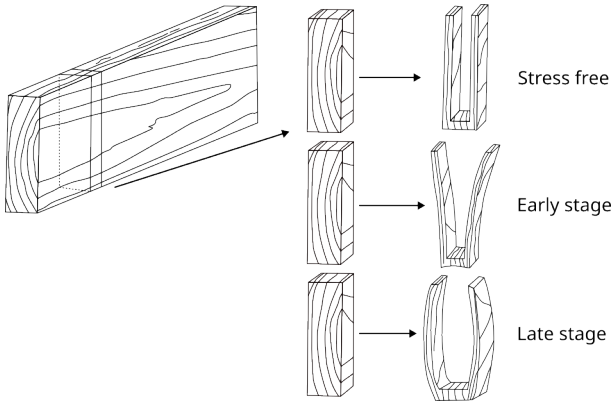


FIGURE 1.10 – Schéma de principe du prong test, adapté de Hiziroglu (2017) [57]

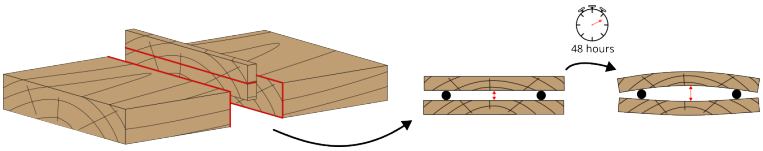


FIGURE 1.11 – Schéma de principe du slicing test

— Le *Flying Wood* test. Développé par Brandao et Perré (1996) [58] cet essai est principalement utilisé en laboratoire pour suivre les cinétiques de séchage et suivre le développement des contraintes de séchage en continu et tout au long du processus. Le principe de cet essai, illustré dans la figure 1.7, est de réaliser un séchage asymétrique d'une demi-planche, n'ayant qu'une seule face d'échange,

[55] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION. *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*. 2010.

[56] J. M. MCMILLEN. *Stresses in wood during drying*. 1652. Madison 5, Wisconsin : Forest Product Laboratory, United States Department of Agriculture, 1958.

[57] Salim HIZIROGLU. *Fundamental Aspects of Kiln Drying Lumber*. FAPC-146. Stillwater, Oklahoma : Robert M. Kerr Food & Agricultural Products Center, Oklahoma State University, 2017

[58] BRANDAO et PERRÉ, « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ».

dont la cinétique de séchage est identique à celle d'une planche complète à deux faces d'échange. L'axe médian de la demi-planche n'est dans ce cas pas confondu avec l'axe de symétrie des champs de contrainte, générant la déformation de toute sa section. Une courbure de la demi-planche peut donc être observée et mesurée dans la deuxième phase de séchage ; l'inversion de cette courbure plus tard pendant le séchage résulte de déformations "mémoire". De faibles rayons de courbure indiquent souvent des contraintes importantes liées à des conditions de séchage sévères, et donc un risque plus important d'apparitions de fentes.

1.1.4 *Une opération énergivore*

Une analyse de cycle de vie de la production de bois d'œuvre à partir de résineux aux États-Unis d'Amérique estime la part du séchage à 70 % de la consommation énergétique [59]. Le séchage du bois est effectivement considéré comme l'étape la plus énergivore de la 1re transformation du bois : elle requiert jusqu'à 3 kWh par kg d'eau évaporée, alors que l'énergie théoriquement nécessaire s'élève à environ 0,7 kWh par kg d'eau évaporée. La conduite de séchage appliquée et les performances du matériel utilisé affectent la consommation énergétique du processus. L'anatomie et la composition du bois, ainsi que les mécanismes de transferts présentés précédemment, sont aussi responsables de la forte consommation énergétique du séchage.

En effet, lorsque le matériau est dans son domaine hygroscopique, la diffusion d'eau dans le matériau impose sa constante de temps sur la cinétique de séchage, qui est alors particulièrement lente. Le séchage artificiel dure couramment de quelques jours, par exemple dans le cas de résineux de faible épaisseur, à plusieurs mois, pour des essences feuillues d'épaisseur plus importante. Le risque de dégradation de la qualité amène à modérer la cinétique de séchage des essences les plus "difficiles" à sécher, et impose des temps de séchage importants. Cette durée de séchage impacte directement la consommation énergétique du processus, au travers de deux postes de dépenses énergétiques :

— la ventilation : lors de la première phase de séchage (fig. 1.7), les ventilateurs tournent souvent à haute vitesse pour évacuer les importantes quantités d'eau évaporées. Leur vitesse de fonctionnement peut être ralentie mais nécessairement non nulle dans la deuxième et troisième phase de séchage, afin de maintenir possible un transfert de masse de la surface des planches vers l'écoulement d'air, et de permettre les transferts de chaleur. Ce poste de dépense énergétique est souvent le plus important dans le cas du séchage de feuillus difficiles à sécher comme le chêne, ou de forte épaisseur, car directement dépendant de la durée du séchage.

— les déperditions thermiques : la température à l'intérieur du séchoir est très souvent bien supérieure à 40 °C, et donc à la température extérieure en France, ce qui entraîne un flux énergétique de l'intérieur vers l'extérieur au travers des parois du séchoir. Ce poste de dépense énergétique varie selon les températures de consignes, la saison, la durée de séchage et l'état du séchoir.

Selon les essences et leur épaisseur, la consommation énergétique globale du séchage sera également impactée plus ou moins fortement par le chauffage de la charge de bois et

[59] Michael R. MILOTA et al. « Gate-to-Gate Life-Cycle Inventory of Softwood Lumber Production ». In : *Wood and Fiber Science* (2005), p. 47-57.

de l'air frais entrant dans le séchoir lors du renouvellement d'air. Ces postes de dépense énergétique sont impactés par la température et l'humidité initiales du bois, ainsi que par les conditions d'humidité et de température de l'air extérieur et des consignes appliquées.

Les ventilateurs consomment de l'électricité pour leur fonctionnement. L'utilisation de la ventilation pendant toute la durée du séchage nécessite donc une source d'électricité continue. L'énergie thermique échangée au niveau des batteries de chauffe peut provenir de chaudières fonctionnant au gaz, voire au fioul, ou d'une chaudière biomasse. Fonctionnant avec les co-produits de scierie, à savoir des plaquettes forestières et/ou de la sciure, les chaudières biomasse nécessitent un investissement financier important mais permettent ensuite de valoriser toute la matière utilisé au sein d'une scierie et ont ainsi un coût au kWh bien inférieur à celles fonctionnant aux énergies fossiles.

Comme indiqué dans l'introduction à ces travaux la réduction de l'empreinte environnementale est un objectif prégnant et peut être envisagée notamment par ces deux pistes, étudiées dans les chapitres suivant :

— la réduction de la consommation énergétique, en optimisant le processus de séchage

— l'utilisation d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) à moindre impacts environnementaux que les énergies fossiles, et permettant l'emploi des connexes de scieries pour d'autres usages.

Les énergies renouvelables considérées dans ces travaux ont une disponibilité intermittente et un niveau d'énergie fluctuant, à l'image d'un système photovoltaïque ou solaire ou d'une éolienne sans stockage de l'énergie. Une énergie de récupération correspond à l'énergie excédentaire d'une autre industrie ou d'un autre processus dont l'objet n'est pas la production d'énergie. Elle représente, selon l'ADEME, un gisement de 109,5 TWh, principalement récupérable sous forme de chaleur. Lorsqu'elles sont disponibles ces énergies sont potentiellement à plus faible niveau d'énergie que celle issue d'une chaudière dédiée. Contrairement aux co-produits des scieries, qui peuvent être stockés, transportés et réutilisés dans d'autres processus, tels que dans des chaufferies collectives, dans la fabrication de panneaux de particules, dans la chimie verte, ces énergies intermittentes sont difficiles à gérer pour une utilisation à la demande. Le séchage du bois, énergivore, peut valoriser ces énergies fluctuantes en substitut des énergies utilisées actuellement, à conditions d'avoir des conduites de séchage adaptées et dont l'impact sur les résultats du séchage sont prévisibles et acceptables par l'opérateur·rice.

1.2 L'OPTIMISATION DU PROCÉDÉ

Le séchage du bois est une pratique ancestrale qui a connu des évolutions permettant d'améliorer ses résultats. L'accumulation de connaissances empiriques sur le séchage a permis d'établir des pratiques sécuritaires, tel que le baguettage de piles de bois, qui assure le passage de l'air au contact de chaque planche, ou la protection des bois de bouts pour réduire le risque de fente. Des travaux proposent de réduire le risque de fente en enveloppant les planches de bois d'une pellicule partiellement ouverte au transfert de masse [60]. Dans le cas du séchage artificiel, les expérimentations et le développement

[60] Richard Denis SCHAFFNER. « Fundamental aspects of timber seasoning ». Thèse de doct. Australia : University of Tasmania, 1981. 343 p.

des sciences ont apporté des précisions et explications à ces connaissances, qui ont été exposées dans de nombreux écrits à destination des utilisateur·rices de séchoirs [61] [62] [63] [64]. Ces ouvrages donnent des tables de séchages, des recommandations pour améliorer le séchage en cas de défauts mais ne peuvent fournir, dans la pratique, de solution simple à appliquer étant donné le nombre de paramètres impliqués. Comme l'illustre l'enquête de Chalayer (2019) [65] plusieurs industriels du séchage indiquent, à la question d'améliorer la qualité du séchage, qu'" il y a tellement de paramètres que c'est impossible ". Plusieurs travaux ont été menés pour étudier l'influence de différents paramètres et proposer des stratégies d'optimisation. Elles visent principalement à l'amélioration de la durée et de la qualité du séchage, et plus récemment à la réduction de la consommation énergétique.

1.2.1 *Optimisation des conduites de séchage*

Le principe des optimisations est de trouver des tables de séchage qui favorisent les différents critères de résultat du séchage. L'influence des différents paramètres est donc étudiée lors d'expériences et/ou de simulations [66] pour proposer une meilleure conduite de séchage *a posteriori*, ou au moins une compréhension des paramètres influents lors d'essais en laboratoires.

Plusieurs travaux étudient notamment l'impact de la ventilation sur le séchage du bois dès le milieu du XXe siècle [67], à l'échelle d'une planche [68] comme à l'échelle d'une pile [69]. Il apparaît alors nécessaire de maintenir une vitesse importante de ventilation jusqu'à ce que la surface du matériau entre dans son domaine hygroscopique, afin d'assurer un régime turbulent au niveau des surfaces d'échanges [70] et d'évacuer d'importantes quantités d'eau. Dès qu'il n'y a plus d'eau liquide en surface (i.e. 2e phase de séchage) la vitesse de séchage est décroissante (fig. 1.7) et permet de réduire la vitesse de ventilation, réduisant par la même la consommation énergétique et le coût économique [71].

En traversant une pile de bois entre deux lits de planches l'air se charge progressivement en vapeur d'eau ; les transferts de masses sont alors moins importants en sortie de pile qu'en entrée de pile [72], impactant l'homogénéité du séchage. De plus, la circulation de l'air dans le séchoir est rarement homogène et présente de nombreuses turbulences ; pour s'en prémunir et orienter les flux d'air à travers les charges de bois, des déflecteurs sont utilisés dans les séchoirs industriels. Le développement de déflecteurs souples a facilité

[61] Hiram Leroy HENDERSON. *The Air Seasoning and Kiln Drying of Wood*. Albany, New York, 1936.

[62] SIMPSON, *Dry Kiln Operator's Manual*.

[63] Patrice JOLY. *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*. Avec la coll. de François MORE-CHEVALIER. Dourdan : H. Vial, 1980.

[64] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

[65] Maurice CHALAYER. *Les évolutions de la scierie française*. Paris : l'Harmattan, 2019. 219 p. ISBN : 978-2-343-16710-7.

[66] Sahbi OUERTANI et al. « Palm wood drying and optimization of the processing parameters ». In : *Wood Material Science & Engineering* 6.1 (2011), p. 75-90. DOI : 10.1080/17480272.2010.551546.

[67] O. W. TORGESON. *The Drying Rate of Sugar Maple as Affected by Relative Humidity and Air Velocity*. R1265. Forest Products Laboratory, 1940, p. 3.

[68] William T. SIMPSON. *Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards*. FPL-RN-266. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1997, FPL–RN-266.

[69] Ylva STEINER et al. « Impact of various measures to optimize the air velocity in an industrial wood-drying process ». In : *Wood Material Science & Engineering* 6.1 (2011), p. 15-22. DOI : 10.1080/17480272.2010.515034.

[70] SIAU, *Transport Processes in Wood*.

[71] Jarl-Gunnar SALIN. « Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying ». In : (2001), p. 14.

[72] P. CS. KHO et al. « The Variation of Local Mass-transfer Coefficients in Streamwise Direction over a Series of In-line, Blunt Slabs ». In : *Chemeca 90: The Eighteenth Australasian Chemical Engineering Conference; Processing Pacific Resources*. T. 1. Auckland, N.Z. : Chemical Engineering Group, 1990, p. 348-355. DOI : 10.3316/informit.842526468129533.

leur usage [73]. L'augmentation de la vitesse d'air peut aussi réduire l'hétérogénéité des conditions le long de l'écoulement entre deux lits de planches [74] [75], mais peut conduire à des fentes de surface au début du séchage. L'inversion régulière du sens de ventilation [76] est une solution efficace pour améliorer l'homogénéité du séchage. Cette gestion du flux d'air au sein du séchoir présente un potentiel d'amélioration de la qualité important et fait l'objet de plusieurs développements industriels. La fluctuation et l'inversion des flux d'air est par exemple proposée par Rémond et Perré (2008) [77]. La société Alent Dynamic quant à elle propose des modulations de la vitesse de séchage et des temps de pause entre deux inversions, stratégie qui fait l'objet d'un brevet [78].

Une autre approche est la modification ou l'ajustement des consignes en cours de séchage au niveau de l'automate de régulation. La quantité de paramètres qui affectent les résultats du séchage rend difficile sa maîtrise par un·e seul·e pilote de séchoir ; l'agrégation de connaissances pratiques sur le procédé requiert de nombreuses itérations, et donc de nombreuses années. Plusieurs évolutions ont permis de rendre plus accessible l'expertise du pilotage du séchage, et notamment par des automates avancés. La recherche de meilleurs automates de régulation capables d'adapter finement les conditions de séchage aux retours des capteurs a mis en évidence l'intérêt des contrôleurs à logique floue, couplés ou non à des contrôleurs PID plus communs [79]. Ces contrôleurs prennent en compte la température, la vitesse de ventilation et la teneur en eau effective des planches pour corriger les températures et humidités de consigne [80] [81]. La prise en compte de la vitesse de séchage par l'automate est aussi étudiée par More-Chevalier et Frayret (1996) [82] qui ont développé un expert du séchage non prédictif Xylexpert, basé sur la mémorisation de conduites passées et le déploiement d'une logique floue pour le choix des paramètres à appliquer au séchoir. Une piste d'augmentation de la maîtrise du procédé a été proposée par Allegretti et al. (2012) [83] au travers d'un automate de régulation équipé d'une importante base de données de séchage. Par son interface de régulation "dTouch" l'opérateur·rice est invité·e, à la fin de chaque séchage, à indiquer sa satisfaction ou non sur plusieurs critères, et notamment sur la qualité du bois séché et la vitesse de séchage. De plus, le retour des sondes en cours de séchage informe l'automate sur la

[73] Jonathan T. BURNETT. « Baffled wood drying kiln and process ». Brev. amér. 5878509A. IFI INC. 1999.

[74] J. J. NIJDAM et R. B. KEEY. « Influence of Local Variations of Air Velocity and Flow Direction Reversals on the Drying of Stacked Timber Boards in Kilns ». In : *Chemical Engineering Research and Design*. Heat and Mass Transfer 74.8 (1996), p. 882-892. DOI : 10.1205/026387696523184.

[75] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

[76] Shusheng PANG et al. « Airflow reversals in high-temperature kiln drying of pinus radiata boards. 2: Drying of a stack of boards ». In : *New Zealand Journal of Forestry Science* 24.1 (1994), p. 104-119.

[77] Romain RÉMOND et Patrick PERRÉ. « Drying strategies capable of reducing the stress level of a stack of boards as defined by a comprehensive dual scale model ». In : *Maderas. Ciencia y tecnologia* 10.1 (2008), p. 3-18.

[78] Eric BJÖRKMAN et Stefan ERICSSON. « Method for drying wood ». Brev. CA2602085. 2006.

[79] Givon Chuen Kee YAN et al. « Experimental modelling and intelligent control of a wood-drying kiln ». In : *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 15.8 (2001), p. 787-814. DOI : 10.1002/acs.656.

[80] Xiaochun George WANG et al. « Development of an intelligent control system for wood drying processes ». In : *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556). T. 1. Como, Italy : IEEE, 2001, p. 371-376. DOI : 10.1109/AIM.2001.936483.

[81] N. V. SKURATOV. « Intelligent Wood Drying Control: Problems and Decisions ». In : *Drying Technology* 26.5 (2008), p. 585-589. DOI : 10.1080/07373930801944788.

[82] F MORE-CHEVALIER et J.-M. FRAYRET. « A Fuzzy logic application to kiln dryer regulation ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec City, Canada, 1996, p. 221-229.

[83] Ottaviano ALLEGRETTI et al. « 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*. The Future of Quality Control for Wood & Wood Products', The Final Conference of COST Action E53, 4-7th May 2012, Edinburgh. 2012, p. 9.

réaction du système aux consignes imposées. Ces données sont analysées et enrichissent une base commune aux industriels, leurs automates dTouch étant connectés à un même réseau. Fort de ces retours d'expérience, de son code d'analyse et de sa base de données le contrôleur propose alors une conduite plus adaptée au prochain séchage.

1.2.2 *Modélisation du séchage*

De nombreux travaux visent à retranscrire sous forme d'équations à la fois les transferts s'effectuant lors du séchage mais aussi le comportement du matériau bois pendant ce même processus. L'utilisation d'un modèle ainsi constitué qui reproduirait fidèlement les expériences de séchage réalisées pourrait fournir une capacité de prédiction du séchage. Ces approches déterministes pour les transferts de masses et de chaleur couplés [84] ainsi que pour le comportement mécanique du bois sous variations de teneur en eau [85] sont apparues presque concomitamment, dans la deuxième moitié du XXe siècle. Le développement de l'informatique à cette période a fourni des outils aux capacités et coûts permettant l'exécution de différents modèles pour des simulations de séchage. L'évolution de ces modèles au cours des dernières décennies, ainsi que les perspectives d'applications et de développements futurs sont étudiées et présentées dans les travaux de Perré et al. (2023) [86].

Dans les travaux présentés ici, le code utilisé pour la prédiction de la cinétique de séchage est *TransPore* [87], développé pour modéliser les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux. Particulièrement adapté à la simulation du séchage d'une planche de bois, ce code a été couplé à un modèle mécanique pour déterminer l'évolution des contraintes et déformations en cours de séchage [88]. Enfin, pour approcher la réalité du séchage industriel, la simulation du procédé de séchage a été effectuée par une modélisation multiéchelle : le code *Multi_Wood_DryS*, qui distribue des micromodèles du code *TransPore* à l'ensemble des planches de la pile [89] [90], permet de simuler la consommation énergétique, le coût, la durée du séchage, la variabilité de l'humidité des planches en fin de séchage et l'état des contraintes résiduelles.

1.2.3 *Optimisation par des automates prédictifs*

Ces modèles ont rapidement présenté un intérêt pour l'optimisation des conduites de séchages ; de nombreux travaux visent donc à les implémenter dans les automates de régulation. L'estimation par un modèle des contraintes générées pendant le séchage [91]

[84] LUIKOV, « Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies ».

[85] Robert H. LEICESTER. « A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams ». In : *Wood Sci. Technol.* 5.3 (1971), p. 211-220. DOI : 10.1007/BF00353683.

[86] Patrick PERRÉ et al. « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids: A review of 40 years of progress and perspectives ». In : *Drying Technology* 0.0 (2023), p. 1-26. DOI : 10.1080/07373937.2022.2159974.

[87] Patrick PERRÉ et Ian W. TURNER. « TransPore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualising the drying of porous media ». In : *Drying Technology* 17.7 (1999), p. 1273-1289. DOI : 10.1080/07373939908917614.

[88] Romain RÉMOND et al. « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending ». In : *European Journal of Mechanics - A/Solids* 26.3 (2007), p. 558-572. DOI : 10.1016/j.euromechsol.2006.09.008.

[89] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

[90] Patrick PERRÉ et al. « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ». In : *Drying Technology* 30.11 (2012), p. 1136-1146. DOI : 10.1080/07373937.2012.705205.

[91] Jarl-Gunnar SALIN. « Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 50.5 (1992), p. 195-200. DOI : 10.1007/BF02663286.

peut par exemple servir à ajuster les consignes de température et d'humidité d'équilibre en cours de processus [92] et assurer une qualité finale du produit séché. De tels outils sont utilisés pour optimiser les conduites de séchage [93] mais permettent aussi de fiabiliser la conduite de séchage en confrontant les mesures des sondes du séchoir aux prédictions des modèles. Des sondes acoustiques ont ainsi permis de confronter l'apparition de fentes de séchage dans des feuillus australiens au code de simulation KilnSched [94] intégré dans un automate de régulation [95] et d'ajuster en temps réel les conditions de séchage. Cependant, dans la plupart des travaux précédemment cités sur l'optimisation du séchage, le modèle utilisé est simple. La physique adoptée limite l'exploration des solutions afin de garder un caractère prédictif. Le modèle simule souvent le comportement d'une planche unique sans prendre en compte la variabilité du bois ou de l'interaction entre les planches de la pile. Aussi, l'optimisation ne considère qu'un paramètre à la fois, par exemple la qualité, sans étudier l'effet de l'adoucissement des conditions sur la durée, la consommation énergétique ou le coût. Les solutions proposées peuvent donc être éloignées de la réalité des contraintes industrielles. Enfin, les modèles nécessitent en entrées les caractéristiques de transferts et mécaniques des bois ; dans les précédentes références des mesures préalables, fortement chronophages et difficilement applicables en industrie, ont été réalisées. La modélisation stochastique de la charge de bois [96] est une solution pour avoir des données représentatives à l'échelle d'une pile.

1.2.4 *Un algorithme d'optimisation : le recuit simulé*

Le recuit simulé, ou simulated annealing (SA) en anglais, est un algorithme d'optimisation d'une fonction objectif non linéaire et à variables multiples. Le recuit est un processus utilisé initialement en métallurgie pour modifier les propriétés des alliages et métaux ; des élévations en température et des phases de refroidissement plus ou moins rapides déterminent les structures cristallines des matières et donc leurs duretés, leur résistances. L'enchaînement des chauffes et trempes éventuelles à différents niveaux de températures amène de façon saltatoire, donc non linéaire, à répondre à la fonction objectif, qui est de s'approcher tant que possible de l'arrangement atomique souhaité.
Le recuit simulé permet, par analogie, de parcourir un très large domaine de solutions à la minimisation d'une fonction objectif. Ce domaine est constitué de plusieurs minima locaux, dont peut potentiellement s'échapper l'algorithme afin de trouver un minimum global plus intéressant. Le recuit simulé généralisé rend possible des bonds importants de l'algorithme sur son domaine de solutions et a une forte probabilité d'échapper à un minimum local [97] [98] [99]. L'algorithme "dual annealing" utilisé dans ces travaux combine le recuit simulé

[92] H. E. MUSCH et al. « Nonlinear model predictive control of timber drying ». In : *Computers & Chemical Engineering* 22.3 (1998), p. 415-425. DOI : 10.1016/S0098-1354(97)00235-4.

[93] Peter CARLSSON et Björn ESPING. « Optimization of the wood drying process ». In : *Structural Optimization* 14.4 (1997), p. 232-241. DOI : 10.1007/BF01197945.

[94] A. R. OLIVER. *A model of the behaviour of wood as it dries (with special reference to eucalypt materials)*. CM91-1. University of Tasmania, 1991.

[95] Peter E. DOE et al. « Optimal Lumber Seasoning Using Acoustic Emission Sensing and Real Time Strain Modelling ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Publisher: University of Tasmania. Quebec City, Canada, 1996, p. 209-212.

[96] RÉMOND et PERRÉ, « Drying strategies capable of reducing the stress level of a stack of boards as defined by a comprehensive dual scale model ».

[97] Yang XIANG et al. « Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model ». In : *Physics Letters A* 233.3 (1997), p. 216-220. DOI : 10.1016/S0375-9601(97)00474-X.

[98] Yang XIANG et Xingao G. GONG. « Efficiency of generalized simulated annealing ». In : *Phys. Rev. E* 62.3 (2000), p. 4473-4476. DOI : 10.1103/PhysRevE.62.4473.

[99] Yang XIANG et al. « Generalized Simulated Annealing for Global Optimization: The GenSA Package ». In : *The R Journal* 5.1 (2013), p. 13. DOI : 10.32614/RJ-2013-002.

généralisé à une recherche de minimum local. En sélectionnant des paramètres d'entrée d'un modèle déterministe et en analysant les sorties comprises dans une fonction objectif, cet algorithme a permis de trouver des conduites ou paramètres minimisant cette fonction.

1.2.5 *Réseaux neuronaux artificiels et modèles hybrides*

Au sein des automates, des alternatives au contrôle par modèle prédictif (MPC) sont étudiées, notamment les réseaux neuronaux artificiels (ANN). Ces derniers sont des outils numériques permettant de reproduire une fonction ou un système ; mais si les entrées et sorties des ANN sont généralement connues ou estimées, le fonctionnement interne au réseau neuronal ne l'est pas. Ce dernier a généralement acquis ses capacités par apprentissage, ou entraînement, à partir de bases de données indiquant les validités ou non d'entrées et sorties associées. Ils sont notamment employés pour résoudre des problèmes non-linéaires et à nombreuses variables. Les réseaux neuronaux sont donc étudiés pour être utilisé dans le séchage en général depuis plusieurs décennies [100] [101] et plus récemment dans le séchage du bois [102]. Leur utilisation pour la prédiction de la cinétique de séchage a montré des résultats prometteurs dans le séchage haute fréquence et sous vide [103]. Les durées de séchage, les nombreuses essences, leurs spécificités et le manque de mesures de qualité ralentissent la constitution de bases de données qui permettraient des apprentissages efficaces des réseaux de neurones ; les modèles déterministes requièrent quant à eux les caractéristiques des matériaux simulés, mais possèdent des capacités de prédiction avérées. L'hybridation de ces deux approches, ou leur utilisation en parallèle, peuvent être des solutions d'avenir [104] et apporter les fonctionnalités attendues depuis 75 ans pour la régulation des séchoirs [105].

1.2.6 *Optimisation de la consommation énergétique*

La consommation énergétique du séchage est parfois prise en compte [106] dans les études le concernant mais nécessite de réaliser des bilans énergétiques ou des mesures sur le système global, qui comprend la pile de bois et tous les éléments constitutifs du séchoir. Si l'étude énergétique à l'échelle du matériau apporte des informations intéressantes sur les transferts couplés de masse et de chaleur dans ce milieu poreux, la quantification de l'énergie nécessaire au retrait d'un kilogramme d'eau de la pile de bois dans son séchoir permet de comparer les systèmes et conduites entre elles, à qualité égale. La définition du système global requiert des paramètres pour tous les postes de dépense ou d'apport énergétique, tel que le renouvellement d'air, la ventilation, les éléments chauffants, l'humidification et les déperditions thermiques. La prise en compte de l'ensemble de ces

[100] B. HUANG et A.S. MUJUMDAR. « Use of neural network to predict industrial dryer performance ». In : *Drying Technology* 11.3 (1993), p. 525-541. DOI : 10.1080/07373939308916842.

[101] Mortaza AGHBASHLO et al. « Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review ». In : *Drying Technology* 33.12 (2015), p. 1397-1462. DOI : 10.1080/07373937.2015.1036288.

[102] Ken WATANABE et al. « Artificial neural network modeling for predicting final moisture content of individual Sugi (Cryptomeria japonica) samples during air-drying ». In : *J Wood Sci* 59.2 (2013). Number: 2 Publisher: SpringerOpen, p. 112-118. DOI : 10.1007/s10086-012-1314-2.

[103] Haojie CHAI et al. « Artificial Neural Network Modeling for Predicting Wood Moisture Content in High Frequency Vacuum Drying Process ». In : *Forests* 10.1 (2019), p. 16. DOI : 10.3390/f10010016.

[104] Patrick PERRÉ. « Toward mechanistic models "augmented" by machine learning. Example of a drying simulation data set exploited by a Physics Informed Neural Network ». In : *Drying Technology* 0.0 (2024), p. 1-15. DOI : 10.1080/07373937.2024.2411582.

[105] Raymond C. RIETZ. « Accelerating the Kiln-Drying of Hardwoods ». In : *Southern Lumberman* 181.2262 (1950).

[106] Murray C. MCCURDY. « Efficient Kiln Drying of Quality Softwood Timber ». Thèse de doct. 2005.

paramètres et de l'énergie nécessaire à une opération de séchage est rendue possible par l'utilisation de modèles de séchoirs [107] ou de modèles multiéchelles [108 109] où les volumes de contrôle sur lesquels sont réalisés les bilans de masse et de chaleur sont une portion de planche, la pile de bois et le séchoir. Ces outils de simulation permettent de rapporter la consommation globale d'une opération de séchage à la quantité de bois séché.

L'optimisation sur le coût peut aussi être privilégiée par un industriel pour la conduite du séchage ; la modélisation économique du processus nécessite un paramétrage propre à chaque entreprise, car les investissements et l'organisation de la production affectent fortement le coût du séchage [110]. Un modèle économique permet cependant de réunir au sein d'un même critère l'ensemble des résultats du séchage et peut ainsi faciliter la prise de décision entre différentes conduites possibles [111].

1.2.7 *Développement du séchage solaire*

Le séchage solaire est une technique millénaire remise au goût du jour [112] dans des productions industrielles de bois séchés pour réduire la dépendance à des sources énergétiques volatiles et polluantes. Si les premières traces de séchoirs solaires concernent des petits dispositifs conçus pour sécher de l'alimentaire [113] le principe est identique pour de plus grosses unités, développées depuis le début du XXe siècle, pour le séchage du bois : le rayonnement solaire est transmis jusqu'à la chambre de séchage où se situe la charge de bois et dont les flux d'air sont contrôlés ou naturels [114]. Cet apport radiatif constitue une source de chaleur mais peut entraîner des fluctuations de températures. Celles-ci peuvent être maintenues élevées durant la nuit et lors de fortes couvertures nuageuses aux moyens d'accumulateurs de chaleur [115] et par une forte isolation thermique des parois. La déshumidification de l'air par renouvellement et suppléée par un système conventionnel permet d'optimiser la consommation énergétique et donc le coût d'un tel séchage. L'utilisation de modèles déterministes [116] et de capteurs judicieusement placés [117] est une piste d'amélioration des performances des séchoirs solaires. Le couplage de sources énergétiques solaires photovoltaïques et thermiques est une solution envisagée pour réduire la consommation énergétique du procédé [118] tout en utilisant des conduites

[107] Diego Miguel ELUSTONDO et Luiz OLIVEIRA. « Model to assess energy consumption in industrial lumber kilns ». In : *Maderas. Ciencia y tecnología* 11.1 (2009), p. 33-46. DOI : 10.4067/S0718-221X2009000100003.

[108] Patrick PERRÉ et al. « Energy Saving in Industrial Wood Drying Addressed by a Multiscale Computational Model: Board, Stack, and Kiln ». In : *Drying Technology* 25.1 (2007), p. 75-84. DOI : 10.1080/07373930601160841.

[109] PERRÉ et al., « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ».

[110] SALIN, « Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying ».

[111] Thouraya SALEM. « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ». Thèse de doct. 2016. 172 p.

[112] David LUNA et al. « Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.6 (2009), p. 1446-1455. DOI : 10.1016/j.rser.2008.08.017.

[113] Souheyla Yahiaoui KHALDI. « Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie ». Thèse de doct. 2018.

[114] Merlin SIMO-TAGNE et al. « Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of ebony wood using indirect natural convection solar dryer ». In : *Drying Technology* 37.14 (2019), p. 1863-1878. DOI : 10.1080/07373937.2018.1544144.

[115] Y. KOBAYASHI et K. YOKOO. « Practical Use of Solar-dehumidification Dry Kiln ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec City, Canada, 1996, p. 385-390.

[116] H. A. KHATER et al. « Optimization of Solar Kiln for Drying Wood ». In : *Drying Technology* 22.4 (2004), p. 677-701. DOI : 10.1081/DRT-120034257.

[117] E. CORREA-HERNANDO et al. « Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 78.2 (2011), p. 167-175. DOI : 10.1016/j.compag.2011.07.004.

[118] Ahmed KHOUYA. « Energy analysis of a combined solar wood drying system ». In : *Solar Energy* 231 (2022), p. 270-282. DOI : 10.1016/j.solener.2021.11.068.

traditionnelles [119]. L'utilisation de conduites intermittentes, telles que naturellement subies dans un séchoir solaire, montre cependant des résultats prometteurs en terme de qualité de bois séché [120].

1.2.8 *Bénéfice de l'effet mémoire du matériau*

Comme indiqué dans la section 1.1.2 le matériau bois n'a pas un comportement mécanique purement élastique et linéaire avec sa teneur en eau. Soumis à un chargement le bois continue de se déformer avec le temps : il s'agit du comportement viscoélastique du matériau, aussi appelé fluage, et qui s'exprime aussi dans les aciers ou les plastiques. Dans le cas du bois la viscoélasticité est activée par la température et l'humidité. Des travaux ont aussi relevé une évolution du fluage du bois lorsqu'il est sous contrainte et soumis à des variations de teneur en eau [121], ce qui correspond à l'expression d'un mécanisme appelé "mécanosorption" [122]. Celui-ci dépend de l'histoire hydrique et mécanique du matériau. Cette forte dépendance de ces comportements au temps et à l'historique du matériau leur attribue un effet "mémoire". Ils sont étudiés pour la préservation du patrimoine, notamment des œuvres picturales dont les supports se déforment avec leurs différentes restaurations et variations de teneurs en eau [123] [124]. Ils sont aussi importants dans le séchage du bois, car ils ont un impact important sur la redistribution des contraintes, et donc sur la qualité finale. De nombreux modèles mécanosorptifs ont été développés pour prédire ce comportement du matériau lors du séchage [125]. Plusieurs travaux visent à exacerber et bénéficier du comportement mécanosorptif pour maîtriser la relaxation des contraintes, et ainsi pouvoir durcir les conditions de séchage, pour sécher plus rapidement et sans risques [126] [127]. Ils utilisent les fluctuations des conditions de séchage, et notamment de l'humidité d'équilibre, soit des conduites de séchage oscillantes, pour atteindre ces objectifs [128]. Dans le cas du séchage solaire, comme de tout autre séchage utilisant des énergies fluctuantes, les oscillations des conditions peuvent permettre d'activer la mécanosorption (MS) et de faciliter le séchage. Une partie des travaux présentés ensuite poursuivent cet objectif d'exploiter le caractère fluctuant des conditions pour bénéficier du comportement mécanosorptif.

[119] Olivier Bailly et al. « Energie solaire : apports thermique et électrique complémentaires pour les séchoirs de bois d'œuvre ». In : *FCBA* (2020), p. 58.

[120] Khamtan Phonetip et al. « Drying timber in a solar kiln using an intermittent drying schedule of conventional laboratory kiln ». In : *Drying Technology* 37.10 (2019), p. 1300-1312. DOI : 10.1080/07373937.2018.1496337.

[121] Les D. Armstrong et Reg S. T. Kingston. « Effect of Moisture Changes on Creep in Wood ». In : *Nature* 185.4716 (1960), p. 862-863. DOI : 10.1038/185862c0.

[122] Paul U. A. Grossman. « Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour ». In : *Wood Sci. Technol.* 10.3 (1976), p. 163-168. DOI : 10.1007/BF00355737.

[123] Paola Mazzanti et al. « A hygro-mechanical analysis of poplar wood along the tangential direction by restrained swelling test ». In : *Wood Sci. Technol.* 48.4 (2014), p. 673-687. DOI : 10.1007/s00226-014-0633-4.

[124] Jean-Christophe Dupre et al. « Experimental study of the hygromechanical behaviour of a historic painting on wooden panel : devices and measurement techniques ». In : *Journal of Cultural Heritage* 46 (2020), p. 165-175. DOI : 10.1016/j.culher.2020.09.003.

[125] Taoyi Yu et al. « An improved model for the time-dependent material response of wood under mechanical loading and varying humidity conditions ». In : *Engineering Structures* 259 (2022), p. 114116. DOI : 10.1016/j.engstruct.2022.114116.

[126] Mariella De La Cruz-Lefevre et al. « Effect of oscillating drying conditions on variations in the moisture content field inside wood boards ». In : *Wood Material Science & Engineering* 5.2 (2010), p. 84-90. DOI : 10.1080/17480272.2010.484103.

[127] Carmen Mariella de la Cruz Sanchez. « Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois ». Thèse de doct. 2012. 242 p.

[128] Salem, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».

2

Synthèse en français

Aujourd'hui, un automate de régulation accompagne chaque séchoir industriel. Il ajuste les paramètres de consignes que sont la température, l'humidité d'équilibre du bois, la vitesse de ventilation et le renouvellement d'air, selon la table de séchage attendue et le retour des sondes de teneurs en eau de la charge de bois. Cet automate a rarement des fonctions avancées d'optimisation, voire de correction en cas d'aléas. C'est souvent à l'opérateur·rice d'intervenir pour ajuster des consignes et éventuellement modifier les tables de séchage selon son expérience et ses attentes en termes de durée, coût, qualité et consommation énergétique. L'opération de séchage étant particulièrement énergivore, la réduction de son empreinte environnementale passerait par l'optimisation de sa conduite et par l'intégration d'EnR&R dans le processus. Pour répondre à ces deux objectifs le développement d'un automate de régulation avancé, capable d'incorporer les nombreux paramètres influents dans un modèle numérique, est une solution envisagée. Celui-ci permettrait de générer de nouvelles conduites de séchage, adaptées à une source énergétique intermittente, et de les optimiser en cours de séchage. Les travaux présentés ici visent à développer les premiers jalons de cet automate de régulation et à débloquer des verrous qui ont été identifiés (fig. 2.1).

Il s'agit dans un premier temps de caractériser le comportement mécanique du bois soumis à des chargements et des fluctuations de teneur en eau qui peuvent potentiellement réduire ses contraintes et permettre un séchage accéléré sans dégradations, et ainsi améliorer ses résultats.

Le modèle mécanique, et en particulier le modèle mécanosorptif, est ensuite paramétré et couplé avec un code numérique de simulation du séchage. Sa confrontation avec des résultats expérimentaux permet de valider la capacité de prédiction de la qualité du séchage, critère objectif indispensable à l'automate de régulation.

Les derniers travaux portent sur les diverses fonctionnalités ajoutées à cet automate de régulation, notamment sa capacité à optimiser la conduite de séchage, qu'elle soit fluctuante ou traditionnelle. Il a été également nécessaire de lui permettre d'apprendre grâce aux retours des capteurs en cours de séchage, pour améliorer ses capacités prédictives, ainsi que sa capacité à mieux intégrer des énergies fluctuantes dans le processus de séchage.

Le modèle d'automate de régulation avancé ainsi créé permet de générer de nouvelles conduites de séchage, de les adapter et les optimiser selon l'énergie disponible, les éventuels aléas et les critères de l'opérateur·rice. Il présente ainsi des solutions et des fonctionnalités prometteuses pour un futur système de régulation industriel capable d'intégrer les EnR&R dans le séchage du bois et ainsi réduire son impact environnemental

tout en améliorant la qualité des bois séchés.

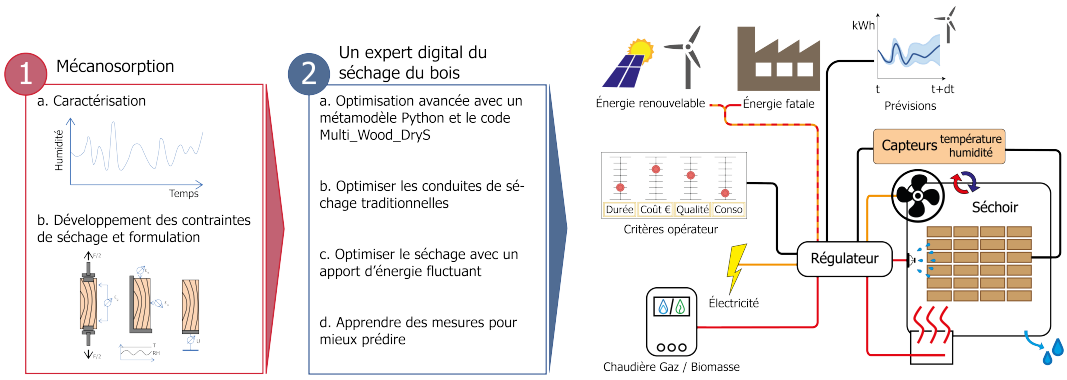


FIGURE 2.1 – Principaux volets du projet de thèse

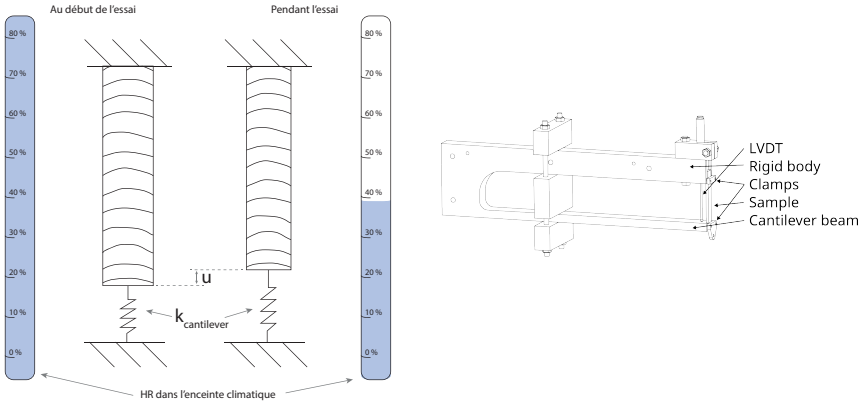
2.1 COMPORTEMENT MÉCANOSORPTIF DU MATÉRIAU ET PRÉDICTION DES CONTRAINTES

2.1.1 *L'essai Fourche pour caractériser la mécanosorption*

Les travaux publiés sur le comportement mécanosorptif du bois indiquent une augmentation de la complaisance par des fluctuations de teneur en eau, lorsque le bois est sous charge. Il est donc possible d'espérer une relaxation des contraintes du matériau lors de son séchage par ce même mécanisme, si l'intermittence de l'énergie disponible se traduit par des fluctuations cycliques de la teneur en eau du bois. Un prérequis, avant de tirer parti de la mécanosorption pour réduire les contraintes et donc potentiellement sécher plus vite sans dégradation, est de caractériser ce mécanisme. De nombreux travaux ont été publiés sur ce sujet et apportent des modèles mécaniques souvent adaptés aux bois chargés en traction ou compression, principalement dans la direction longitudinale et plus rarement dans les directions tangentielle et radiale. La caractérisation de la mécanosorption du hêtre ou du chêne chargé dans l'une de ces deux directions, et pour des variations de teneur en eau rencontrées dans le cas du séchage, est rare et a donc été étudiée dans ce premier travail.

L'objectif est de quantifier les déformations d'échantillons de bois sous contraintes et soumis à des variations cycliques d'humidité. Il s'agit d'expériences qui peuvent durer plusieurs semaines, aussi la possibilité de pouvoir tester plusieurs échantillons jumeaux en parallèle est souhaitable. L'expérience *Fourche* a donc été développée à cette fin et fait l'objet du chapitre 3. Il s'agit d'un dispositif original formé par une poutre cantilever et d'un bâti considéré rigide, illustré dans la figure 2.2b. Fixé entre ces deux parties de la fourche, l'échantillon de bois étudié a donc une liberté de déformation grâce à la flexibilité de la poutre cantilever. Ainsi lorsque l'ensemble est placé dans des conditions conduisant au séchage de l'échantillon, celui-ci se rétracte, mais sous contrainte ; la poutre cantilever, qui peut être assimilée à un ressort de raideur connue, exerce effectivement une force sur l'échantillon lorsqu'elle se déforme. De manière générale, les variations de teneur en eau de l'échantillon de bois entraînent des retraits et gonflements de ce dernier, générant une déflexion de la poutre cantilever. La mesure de la déflexion de cette dernière, à proximité de l'échantillon de bois, permet de connaître la déformation de l'échantillon. Le principe de la mesure peut être visualisé dans la figure 2.2a. Lors de la calibration de chaque fourche avant l'expérience, une relation entre la déformation du point de mesure et le chargement à une extrémité a été établie. Il est ainsi possible

d'obtenir, en même temps que la déformation de l'échantillon, la force qui s'exerce à son extrémité. Ce dispositif est installé dans une enceinte climatique dont la température est



(a) (b)

FIGURE 2.2 – Schéma de principe (a) et description (b) de l'essai *Fourche*

maintenue constante et l'humidité relative est programmée pour réaliser des variations cycliques. L'essai *Fourche* est accompagné d'un banc de retrait-gonflement libre, sur lequel la dimension principale d'un échantillon jumeau (i.e. issu de la même génératrice), non contraint, est mesurée. En considérant que la teneur en eau du bois est proportionnelle à son retrait, dans le domaine hygroscopique, ce banc additionnel permet de connaître à la fois le retrait-gonflement libre ainsi que la teneur en eau de l'échantillon à tout instant. L'obtention de la déformation mémoire se fait à partir de l'expression de la déformation totale $\varepsilon(t)$ de l'échantillon qui est constitué de plusieurs contributions (équation 2.1) :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_\alpha(t) + \varepsilon_{ve+ms}(t) \tag{2.1}$$

La déformation élastique $\varepsilon_e(t)$ est obtenue à partir de la loi de Hooke en mesurant la force exercée en extrémité de fourche et en connaissant le module d'Young. Cette valeur est obtenue sur un échantillon jumeau à l'aide d'un essai de traction réalisé sur une machine d'essai statique. La force appliquée sur l'échantillon est quant à elle déterminée par une relation obtenue lors de la calibration, qui établit son lien avec la déflexion de la poutre cantilever. La déformation du retrait ou gonflement libre $\varepsilon_\alpha(t)$ est issue de l'échantillon jumeau sur le banc dédié à cette mesure. Il est alors possible d'isoler la déformation mémoire $\varepsilon_{ve+ms}(t)$ de l'équation 2.1. L'essai *Fourche* étant réalisé à basse température (30°C), la viscoélasticité du bois est peu thermoactivée. Des tests sans variations cycliques de la teneur en eau, mais avec un unique palier d'humidité relative, ont permis d'estimer la part de la viscoélasticité à moins de 5 % des déformations mémoires obtenues par l'essai *Fourche*. La déformation mémoire observée dans ce travail est donc considéré comme étant la déformation mécanosorptive.

Le dispositif de cet essai a été réalisé en plusieurs exemplaires, tous installés dans une même enceinte climatique, avec plusieurs bancs de retrait/gonflement libre. Au cours d'un seul essai il a ainsi été possible de mesurer la déformation mémoire d'une essence, selon deux directions et avec trois niveaux de chargement. Les échantillons ont été prélevés dans des planches de bois vert de hêtre et de chêne et placés à cet état dans le dispositif. Les conditions de l'essai s'approchent ainsi de celles d'un bois séché industriellement, qui atteint son domaine hygroscopique pour la première fois. Les échantillons mesurent

uniquement 3 mm dans leur direction longitudinale. Les coefficients de transferts dans cette direction du bois sont importants et permettent donc d'atteindre rapidement la teneur en eau d'équilibre dans l'ensemble de l'échantillon. De cette façon la teneur en eau a été considérée homogène dans l'échantillon, l'exemptant de tout retrait différentiel. Pour tous les échantillons testés la déformation mécanosorptive augmente avec les cycles

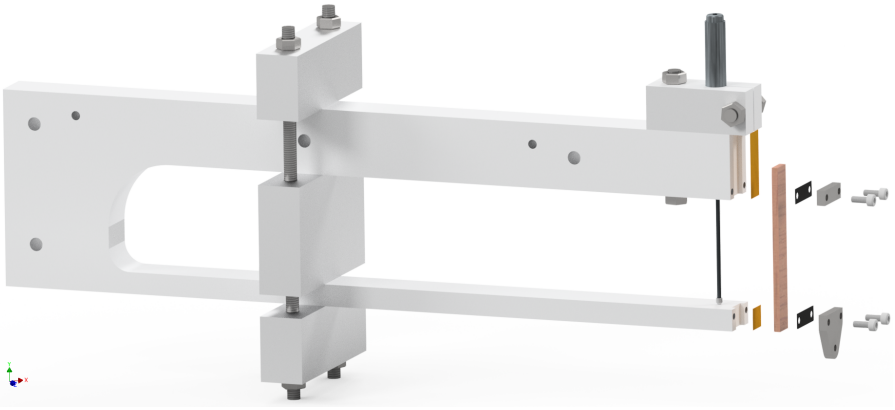


FIGURE 2.3 – Dessin éclaté de l'essai *Fourche*

d'humidité et semblent tendre vers une asymptote qui peut être assimilée à la limite mécanosorptive identifiée dans la littérature. La découverte de teneur en eau jamais précédemment atteinte dans l'histoire du chargement occasionne une augmentation de la déformation mémoire du même ordre de grandeur que celles ayant lieu à chaque cycle de teneur en eau. Les précédentes études sur le sujet, qui qualifient ce comportement d'effet "+ +", l'ont observé à chaque nouvelle teneur en eau rencontrée lors d'une humidification. Son équivalence dans le cas du séchage, donc lors d'une désorption associée à un éventuel effet "- -", n'a pas été relevée dans la littérature, et n'est pas non plus présente dans les résultats obtenus ici. L'originalité de ce travail est de mesurer l'évolution de la déformation mécanosorptive d'un échantillon soumis à un séchage sous charges variables avec des conditions de séchage fluctuantes. Cet essai permet d'étudier le développement des déformations mémoires dans le bois dans des conditions assez proches de celles du séchage. Mais il n'est pas possible de comparer la complaisance mécanosorptive obtenue ici à chaque instant avec celles obtenues dans la littérature sous chargement constant. En effet, dans ce travail elle est liée à l'histoire de chargement qui varie.

Un comportement similaire a été observé pour le hêtre et le chêne dans l'évolution de la déformation mémoire. La similitude s'observe notamment par le tracé de la complaisance en fonction de la variation de teneur en eau cumulée dans la figure 2.4. Ces deux essences présentent des complaisances du même ordre de grandeur et de mêmes variations avec l'évolution de la teneur en eau. L'orientation du chargement a lui une influence non négligeable sur les valeurs de complaisance, environ 1,5 fois supérieure dans le cas d'un chargement tangentiel par rapport à un chargement radial.

Ces essais permettent donc de caractériser le comportement mécanique de ces deux essences feuillues selon deux orientations de chargement, selon plusieurs niveaux de chargement et selon des variations de teneurs en eau. Les conditions aux limites choisies correspondent à un premier passage du matériau de l'état vert au domaine hygroscopique, tel qu'il le rencontre dans le cas du séchage, puis à des cycles de teneurs en eau qui favorisent l'expression de la mécanosorption, naturellement activée lors du séchage mais qui pourrait être amplifiée par des conduites oscillantes.

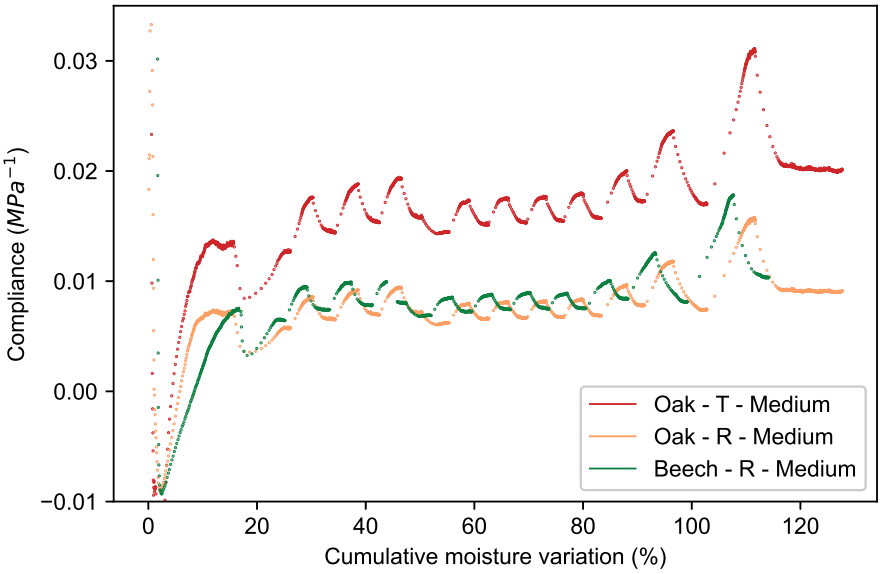


FIGURE 2.4 – Complaisance en fonction de la variation de teneur en eau cumulée, pour le hêtre chargé en R, et pour le chêne chargé en R et T, à un niveau de chargement moyen (environ 2 MPa)

Les essais *Fourche* permettent donc de caractériser le comportement mécanosorptif du bois lors de son séchage avec des conditions fluctuantes, et dans le cas particulier où l'humidité de l'échantillon évolue de manière homogène. Lors du séchage d'une planche, l'épaisseur importante de matière à travers laquelle s'effectuent les transferts de masse et de chaleur entraîne un profil parabolique de teneur en eau dans la section de la planche, et donc des retraits différenciés. Ces retraits différenciés sont la source de contraintes et de risques d'apparitions de fentes de séchage. Dans le pilotage du séchage du bois la prédiction de la qualité finale du produit, et donc du comportement mécanique du bois, est indispensable. Elle évite la dépréciation de bois mal séchés et permet d'ajuster la conduite de séchage au comportement du bois. Le caractère prédictif d'un modèle est donc évalué dans le chapitre 4.

2.1.2 *Modèle mécanique pour prédire les contraintes de séchage*

Un modèle mécanique a été utilisé pour prédire le comportement du bois lors du séchage. Il s'agit d'une formulation monodimensionnelle développée et vérifiée dans des travaux antérieurs [1] [2]. La résolution numérique des équations permet de simuler l'évolution des champs de déformations et de contraintes dans un élément en bois en fonction des champs de teneur en eau et de température. Dans ce travail de thèse, il a été nécessaire de tester plusieurs modèles mécanosorptifs de la littérature pour reproduire le comportement mémoire hygroactivé observé expérimentalement. Les résultats expérimentaux de deux types d'essai ont été utilisés : l'essai *Fourche* et le *Flying Wood*. Ces deux essais sont complémentaires. Le premier, la *Fourche*, renseigne sur le comportement mécanique du bois soumis à des conditions cycliques d'humidité et une charge variable mais avec une humidité homogène dans l'échantillon. Le second, le *Flying Wood*, permet de visualiser par la déformation globale de l'échantillon le développement des contraintes

[1] Patrick PERRÉ et Joëlle PASSARD. « A Control-Volume procedure compared with the Finite-Element method for calculating Stress and Strain during Wood Drying ». In : *Drying Technology* 13.3 (1995), p. 635-660. DOI : 10.1080/07373939508916978.

[2] RÉMOND et al., « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood ».

dans la planche avec un champ hétérogène d'humidité dans son épaisseur. Pour simuler l'expérience du *Flying Wood*, le modèle mécanique est couplé avec le code *TransPore* [3] qui permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur dans le bois.

Les modèles de Salin (1992) [4] et Fortino et al. (2009) [5] permettent de simuler des déformations mécanosorptives très proches de celles obtenues lors des essais *Fourche*. Leur comparaison avec des essais *Flying Wood*, représentée dans la figure 2.6, indique qu'ils ne sont pas aptes, en l'état, à prédire les contraintes de séchage. Parmi les modèles mécanosorptifs étudiés, celui de Svensson et Torrati (2002) [6] arrive le mieux à reproduire l'inversion de la courbure observée dans l'essai *Flying Wood*. Le modèle de Fortino et al. (2009) est une variante du modèle de Svensson et Toratti (2002) ; ce modèle rhéologique est constitué de 3 éléments de Kelvin en série et d'un terme irrécouvrable, et schématisé dans la figure 2.5.

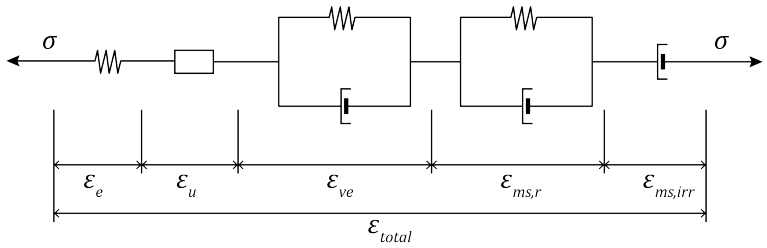


FIGURE 2.5 – Schéma du modèle mécanique (Yu et al. 2022) [7]

La formulation initiale du modèle de Fortino et al. (2009) produit un effet "- -" dans le cas du séchage du bois à travers le terme de déformation mécanosorptive irrécouvrable, phénomène que l'on ne retrouve pas dans la littérature. Il semblerait que ce biais ait été corrigé par Yu et al. (2022) [7]. Une analyse inverse a été réalisée sur les essais *Flying Wood*, issus de travaux antérieurs [8], et sur les essais *Fourche* pour identifier les paramètres mécanosorptifs de ce modèle. Un code d'optimisation, présenté plus en détails ensuite, a permis, après 12 000 itérations, d'identifier 6 paramètres du modèle mécanique (i.e. trois éléments de Kelvin-Voigt en série) qui donnent des résultats de simulation les plus proches possibles des résultats expérimentaux. La fonction objectif minimisée utilise la déformation mécanosorptive, dans le cas des essais *Fourche*, et le rayon de courbure de la planche dans le cas de l'essai *Flying Wood*. Malgré l'optimisation des paramètres du modèle, le modèle peut aisément reproduire la dynamique observée lors des essais *Fourche* mais a plus de difficultés à reproduire l'inversion et l'amplitude de la courbure des essais *Flying Wood*. La déformation mécanosorptive irrécouvrable anormale (i.e. effet "- -") produite lors de la première désorption par la formulation du modèle mécanosorptif de Fortino et al. (2009) [5] contribuait à améliorer sensiblement la dynamique d'inversion de la courbure mais atténuait l'amplitude de la courbure au début du séchage (fig. 2.6-modèle 4b) ; sa non prise en compte a entraîné des prédictions d'inversions des courbures plus tardives et moins intenses.

[3] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».

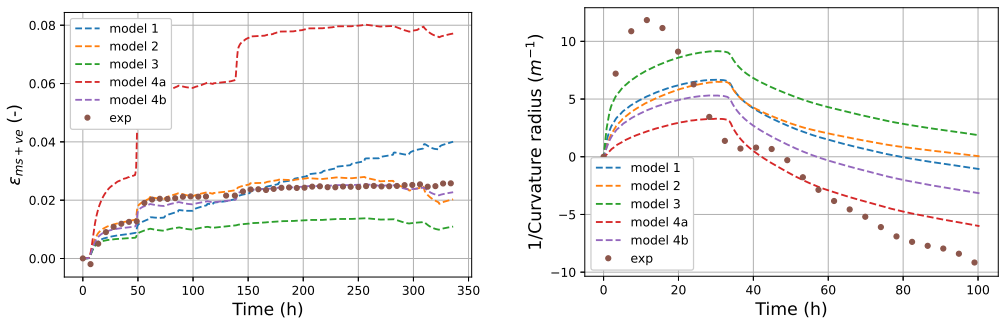
[4] SALIN, « Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model ».

[5] Stefania FORTINO et al. « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures ». In : *Mech Time-Depend Mater* 13.4 (2009), p. 333. DOI : 10.1007/s11043-009-9103-z.

[6] Staffan SVENSSON et Tomi TORATTI. « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity ». In : *Wood Sci. Technol.* 36.2 (2002), p. 145-156. DOI : 10.1007/s00226-001-0130-4.

[7] YU et al., « An improved model for the time-dependent material response of wood under mechanical loading and varying humidity conditions »

[8] SALEM, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».



(a) (b)

FIGURE 2.6 – Confrontation entre les simulations avec différents modèles mécanosorptifs et les mesures de l'essai *Fourche* (a) et de l'essai *Flying Wood* (b). Modèle 1, modèle MS de Ranta Maunus (1973) [9] ; 2, modèle MS de Salin (1992) [4] ; 3, modèle MS avec 3 élements de Kelvin en série ; 4a, modèle de Svensson et Toratti (2002) [6] ; 4b, Fortino et al. (2009) [5]

Dans ce travail plusieurs modèles mécanosorptifs ont ainsi été étudiés et confrontés aux mesures expérimentales ; basés sur des éléments de Kelvin-Voigt en série ces modèles mécanosorptifs ne couvrent pas l'ensemble de l'existant. Si la création d'un nouveau modèle reste une possibilité, des modèles basés sur des approches très différentes, tel que le modèle hygroverrou [10] [11], méritent d'être étudiés pour le séchage du bois. Des modèles plus simples avec un nombre de paramètres restreint ont été ici volontairement retenus pour limiter le temps de calcul lors de l'identification. Le temps de calcul pour minimiser la fonction objectif intégrant la simulation de trois essais *Fourche* et d'un essai *Flying Wood* était ici de deux heures sur un PC de calcul équipé d'un processeur Intel®Xeon®W-2265, avec 2 cœurs dédiés à une fréquence de 3.50 GHz.

Si les outils numériques paramétrés par ces essais *Fourche* et *Flying Wood* méritent d'être ajustés pour reproduire plus fidèlement le comportement mécanique du bois, nous avons vu qu'ils apportent dès aujourd'hui des informations exploitables pour la prédiction des contraintes dans le matériau lors du séchage. La partie suivante s'intéresse à la prédiction des autres éléments clés du séchage industriel à optimiser, à savoir la durée, la consommation énergétique, et en conséquence le coût. Différents outils numériques ont été utilisés à cette fin, et certaines de leurs fonctionnalités ont été améliorées dans cette thèse. Elles sont présentées en détail dans le paragraphe suivant.

2.2 OUTILS NUMÉRIQUES DE SIMULATION DU SÉCHAGE INDUSTRIEL : APPRENDRE ET OPTIMISER

2.2.1 *TransPore et ses modules environnants*

Le code *TransPore* développé par Perré et Turner (1999) [12] permet de simuler les transferts couplés de chaleur et de masse dans un un milieu poreux. Alimenté par les conditions de séchage (i.e. l'humidité relative, la température, la vitesse de l'air, etc.)

[9] Alpo RANTA-MAUNUS. « The viscoelasticity of wood at varying moisture content ». In : *Wood Sci. Technol.* 9.3 (1975), p. 189-205. DOI : 10.1007/BF00364637

[10] Julien COLMARS et al. « One-dimensional discrete formulation of a hygrolock model for wood hygromechanics ». In : *Mech Time-Depend Mater* 18.1 (2014), p. 309-328. DOI : 10.1007/s11043-013-9229-x.

[11] Joseph GRIL. « Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches ». In : *International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015) and 60th Anniversary of the Japan Wood Research Society*. International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015) and 60th Anniversary of the Japan Wood Research Society. Tokyo, Japan, 2015, p. 7.

[12] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».

et par les caractéristiques hygrothermiques du matériau, ce code numérique prédit la distribution d'humidité et de chaleur dans le bois au cours du temps. Étant donné que nous nous intéressons ici au séchage à basse et moyenne température, l'effet de la surpression de gaz sur les transferts massiques dans la planche peut être considéré comme négligeable. En outre, la longueur importante des planches et le fait qu'elles soient placées bord à bord dans une pile ont permis d'utiliser la version monodimensionnelle de cet outil numérique pour simuler les transferts uniquement selon l'épaisseur du produit. Dans cette configuration la simulation du séchage complet d'une planche est réalisée en moins d'une seconde sur un ordinateur de configuration standard. Cette version est particulièrement bien adaptée pour simuler le séchage de plusieurs centaines de planches simultanément.

Ce code a été couplé avec d'autres modules et étendu depuis pour permettre de simuler le séchage d'une charge de bois dans un séchoir industriel. Pour ce faire, nous avons vu précédemment qu'il doit être couplé avec un module mécanique pour simuler les contraintes de séchage [13]. Il a dû aussi être intégré dans une approche double échelle, de manière à prédire à la fois les transferts d'humidité et de chaleur entre les planches de la pile via l'écoulement d'air, et le séchage individuel de chaque planche [14]. Chaque planche de la pile peut avoir son authenticité propre via un module de génération de ses caractéristiques utilisant une méthode de Monte-Carlo. Un module séchoir est également couplé à ce modèle double échelle, planche-pile, de manière à pouvoir simuler la consommation énergétique du procédé pour une conduite donnée, par une approche simplifiée monozone [15].

Dans cette thèse, le code a été adapté pour simuler l'expérience du slicing test en fin de séchage. Présenté plus en détail dans le chapitre 1, le slicing test consiste à libérer les contraintes résiduelles en coupant un échantillon de planche en deux parties égales. La flèche de la courbure atteinte après équilibrage de l'humidité permet d'estimer la sévérité de la conduite de séchage. La distribution de cette flèche au sein de la charge de bois ainsi que l'homogénéité du séchage intraplanche et interplanches constituent des marqueurs de la qualité du bois séché.

Cette version multiéchelle du code *TransPore* est appelée *Multi_Wood_DryS*. Elle est utilisée dans les chapitres 5, 6 et 7.

2.2.2 *Metamodèle Python*

L'ensemble du code *Multi_Wood_DryS* est programmé dans le langage de programmation Fortran ; celui-ci est particulièrement adapté au calcul numérique et permet des temps d'exécution très courts. Les nombreuses modifications des conditions aux limites des simulations réalisées dans ces travaux ont été effectuées par un métamodèle programmé en Python. Celui-ci a permis d'automatiser des campagnes de simulations, d'étudier la sensibilité de certains paramètres, d'enregistrer et d'ordonner l'ensemble des scénarios testés avec leurs résultats, et enfin d'afficher en fin de simulation les résultats sous forme graphique. Le langage Python a été choisi pour programmer ce métamodèle pour les

[13] Rémond et al., « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood ».

[14] Perré et Rémond, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

[15] Patrick Perré. « Multiscale aspects of heat and mass transfer during drying ». In : *Transp Porous Med* 66.1 (2007), p. 59-76. doi : 10.1007/s11242-006-9022-2.

raisons suivantes :

— il remplit les fonctionnalités précédemment listées ;

— il est ouvert, libre d'utilisation et gratuit ;

— il possède une communauté d'utilisateur·rices importante, donnant accès à de nombreuses ressources et programmes déjà conçus ;

— il peut être développé dans des environnements variés, maintenus et multiplateformes. Le métamodèle a été principalement conçu dans l'environnement de développement Spyder ;

— il peut échanger des variables avec un code en Fortran par le biais d'un outil dédié : F2PY.

Les fonctionnalités attendues de ce métamodèle sont en grande partie issues de l'utilisation des bibliothèques de fonctions ; Matplotlib pour la représentation graphique, Pandas pour la gestion des données, Numpy pour l'utilisation de tableaux. L'outil F2PY, fourni avec la bibliothèque Numpy, a quant à lui été indispensable pour compiler le code en Fortran sous la forme d'un module pouvant être appelé depuis le métamodèle en Python et échanger des variables avec ce dernier. La compilation du code Fortran repose aussi en grande partie sur le programme ifort d'Intel®. C'est enfin dans cet environnement qu'a pu être utilisé la bibliothèque SciPy, comportant plusieurs fonctions d'optimisations, et notamment le recuit simulé utilisé pour l'optimisation des conduites de séchage et l'identification par méthode inverse.

2.2.3 *Optimisation par la méthode du recuit simulé*

L'algorithme de recuit simulé a été intégré en Python dans le métamodèle et appelé pour chaque procédure d'optimisation. La fonction objectif qui est minimisée par le code d'optimisation est composée de plusieurs critères ; ceux-ci peuvent correspondre aux attentes de l'utilisateur·rice dans le cas de l'optimisation du séchage, comme dans les chapitres 5, 6 et 7, ou des écarts aux résultats des différents essais simulés dans le cas de l'identification par méthode inverse comme dans les chapitres 4 et 6. Une pondération entre ses différentes composantes permet de retranscrire les priorités d'un·e opérateur·rice ou de privilégier certains essais.

Cet algorithme a dans un premier temps été testé avec le code *TransPore* couplé à un modèle de traitement thermique. Il a permis de limiter l'emballement thermique tout en assurant une perte de masse, une homogénéité et une durée de traitement acceptables. Le code a ainsi choisi des niveaux de températures et des durées de paliers de traitement thermique répondant aux attentes et ses résultats sont présentés en détails par Florez et al. (2023) [16]. Ce travail, mené à la marge du sujet de thèse, n'est pas présenté dans ce manuscrit.

Dans le cas du séchage du bois, la fonction objectif doit aussi combiner les attentes d'un·e utilisateur·rice que sont la durée, la qualité, la consommation énergétique et le coût. La qualité peut comprendre, selon le travail concerné, l'homogénéité de séchage

[16] Daniela FLOREZ et al. « Probabilistic multi-objective optimization of wood torrefaction conditions using a validated mechanistic model ». In : *Fuel* 335 (2023), p. 126932. DOI : 10.1016/j.fuel.2022.126932.

intra- et interplanches et la flèche du slicing test simulé. Il est cependant difficile de choisir la pondération à appliquer entre les différents critères précédents. Le calcul économique, introduit par Salem (2016) [17] et légèrement adapté pour ce travail, a permis de combiner l'ensemble des critères précédents et facilite la prise de décision quant au choix de la pondération. Dans le chapitre 5 le code d'optimisation développé permet, après plusieurs milliers d'itérations, de proposer une conduite de séchage privilégiant l'un ou l'autre des critères. La figure 2.7 représente les consignes en humidité d'équilibre d'une conduite de séchage pour des planches de hêtre à la suite d'une optimisation selon différents objectifs tels que le temps, la qualité, la consommation d'énergie ou encore le coût de l'opération de séchage. Pour chacune de ces optimisations représentées, la fonction objectif considérait uniquement le critère à optimiser. Les consignes obtenues sont comparées à celles issues de la table de référence pratiquée actuellement par de nombreux industriels. Une telle fonctionnalité, introduite dans une entreprise, apporterait une expertise supplémentaire dans la conduite du séchage.

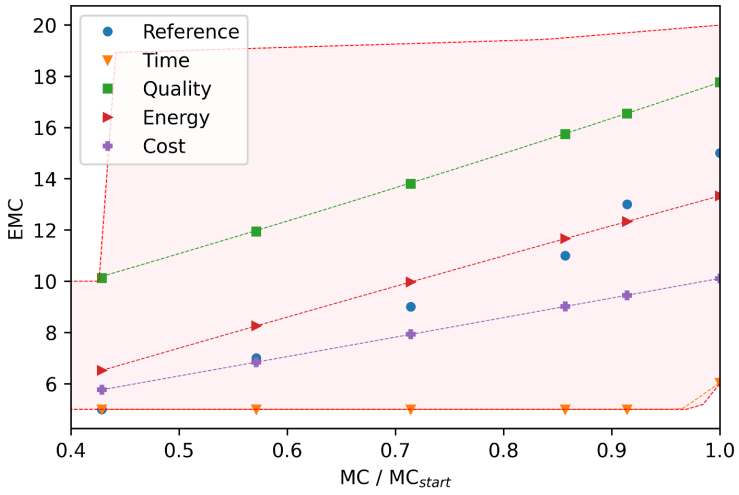


FIGURE 2.7 – Consignes en humidité d'équilibre du hêtre au cours du séchage optimisé selon différents critères ; le graphique se lit de la droite vers la gauche, avec pour abscisse le rapport entre la teneur en eau du bois (MC) et la première teneur en eau d'équilibre en consigne (MC_{start}).

2.2.4 *Fonctions trajectoires pour optimisation des conduites*

Les tables de séchage donnent les valeurs de consignes aux automates de régulation du séchoir. Ces tables contiennent plusieurs lignes de valeurs pour définir la température sèche, l'humidité d'équilibre du bois et la vitesse d'air à appliquer selon la teneur en eau mesurée dans le bois en cours de séchage. Par souci de simplification les valeurs de consignes sont indiquées pour des paliers de teneur en eau du bois, avec des intervalles plus petits pour des teneurs en eau inférieures au point de saturation des fibres (i.e. 30%), où la conduite nécessite une plus grande attention et pour lesquelles les mesures résistives sont plus fiables. Les tables proposées par Aléon [18] et Joly et More-Chevalier [19] pour le chêne et le hêtre en 54 mm, à l'image de la table 2.1, comprennent plusieurs paramètres qui peuvent être utilisés pour piloter le séchage selon les fonctionnalités des régulations. Dans les travaux présentés au chapitre 5 seuls la température en consigne et l'équilibre

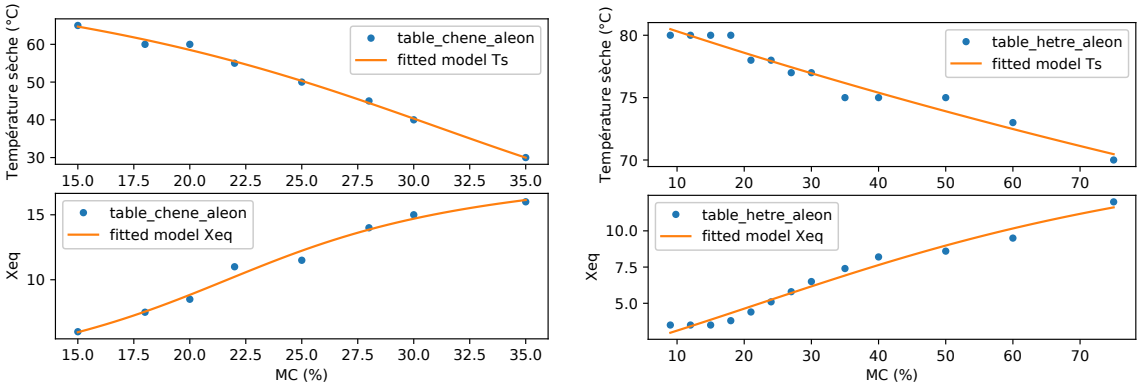
[17] SALEM, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».
[18] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.
[19] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.

TABLE 2.1 – Extrait d'une table traditionnelle de séchage du chêne en 54 mm issu de Joly et More-Chevalier (1980) [20]. Ts est la température sèche de l'air, Th est la température humide de l'air, Hr est l'humidité relative de l'air, He est l'humidité d'équilibre du bois et G est le gradient de séchage.

Humidité réelle du bois %	Période de séchage Ts °C	Th °C	ΔT °C	Hr %	He %	G
>50	35	32	3	95	19	
50 à 40	35	31	4	93	18	
40 à 30	35	30	5	90	17	1.8
30 à 27	40	37	3	81	16	1.8
27 à 24	40	36	4	76	14	1.8
24 à 21	40	35	5	70	12	1.8
21 à 18	45	37.5	7.5	63	10	1.8
18 à 15	45	36	9	54	9	1.8
15 à 12	45	64.5	10.5	49	8	1.8
12 à 8	45	30.5	14.5	34	6	1.8

hygroscopique du bois ont été étudiés, ce qui représente, dans ces mêmes tables de séchage, de 27 à 30 valeurs de consignes, comprenant les valeurs des paliers d'humidités. L'optimisation de la conduite en recherchant le jeu de paramètres optimal s'avère donc d'autant plus complexe à réaliser. Une réduction du nombre de paramètres recherchés s'avère nécessaire pour réduire le temps de calcul de l'optimisation. La démarche adoptée a donc été de proposer des fonctions trajectoires, capables de reproduire les consignes des tables traditionnelles en température et en teneur en eau d'équilibre du bois (fig. 2.8a et 2.8b) ou d'autres séquences de valeurs à partir de seulement 4 paramètres au lieu des 27 ou plus nécessaires au départ.

Ces fonctions trajectoires, dont les équations de définitions sont présentées dans le chapitre 5, permettent de couvrir un domaine conséquent de température et d'humidité.



(a) (b)

FIGURE 2.8 – Conduites de séchage du hêtre et du chêne conventionnelles [21] (points) et sous forme de trajectoires

Pondérées selon les différents objectifs précédemment listés, les optimisations de ces conduites ont permis d'améliorer chacun des critères pris individuellement ou de trouver un compromis par l'optimisation sur le coût. Un exemple des résultats de l'optimisation

[20] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*
[21] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*

des différents critères est présenté dans la table 2.2 pour le séchage de planches de hêtre de 54 mm d'épaisseur.

TABLE 2.2 – Résultats d'optimisations du séchage de planches de hêtre 54 mm. Les valeurs des critères optimisés apparaissent en gras.

Critère d'optimisation	Coût €·m^{-3}	Durée heures	Hétérogénéité teneur en eau	Slicing Test mm	Ecart-type	Cons. éner. kWh·kg$_{eau}^{-1}$
Référence	70.1	579.3	1.75	0.89	0.03	1.32
Durée	67.0	**275.0**	4.10	1.02	0.00	1.47
Qualité	81.0	809.0	**0.41**	**0.51**	0.05	1.43
Consommation énergétique	61.4	361.8	3.93	0.74	0.05	**1.26**
Coût	**60.3**	299.0	4.29	0.84	0.02	1.28

2.2.5 *Apprentissage du code et simulations avancées*

Le code *TransPore* utilise par défaut, en entrée, la valeur de grandeurs physiques moyennes que l'on rencontre dans la littérature pour les résineux, notamment ceux de l'épicéa. Pour assurer la qualité des prédictions il est nécessaire que l'utilisateur·rice entre les caractéristiques de l'essence étudiée (i.e. les valeurs moyennes des différentes grandeurs hygrothermiques pour l'essence et leurs écart-types si le module de tirage aléatoire du code est activé). De la même façon les tables utilisées pour le séchage en industrie se déclinent selon les essences courantes et quelques épaisseurs standards ; le seul ajustement réalisé en cours de processus est l'enchaînement des consignes selon l'évolution de la teneur en eau moyenne de la charge de bois, ou de quelques planches instrumentées. Une meilleure connaissance des caractéristiques de chaque charge de bois est souhaitable afin de proposer une conduite adaptée. La diversité des charges de bois possibles résulte à la fois de la variabilité du bois et donc des propriétés de chaque planche, des conditions climatiques auxquelles les billons, les planches ont été exposées avant l'opération de séchage, et du plan d'agencement des planches dans la pile.

La densité du matériau, le mode de débit de la planche, son épaisseur, son humidité initiale font partie des nombreux paramètres qui influencent le séchage du bois, et qui pourraient être mesurés en industrie. La perméabilité liquide et le coefficient de diffusion sont des paramètres mesurés presque exclusivement en laboratoire mais qui impactent fortement la cinétique du séchage et donc le développement des contraintes de séchage via le retrait du bois ; dans le chapitre 6 des données ont été collectées sur le séchoir pilote de FCBA (Bordeaux, France) lors du séchage d'une pile de planches de pin maritime. Les 8 planches instrumentées de sondes résistives pour la mesure de l'humidité, qui ont été utilisées par l'automate de régulation pour le déroulement de la conduite de séchage, ont ensuite été envoyées au LERMAB (Épinal, France) pour que des mesures soient effectuées. Le coefficient de diffusion (D) et la perméabilité (K) ont été mesurés expérimentalement sur des échantillons issus de ces planches par les méthodes ALU-CHA et PVC-CHA [22]. Ces mêmes paramètres ont également été estimés par analyse inverse des cinétiques mesurées par les sondes résistives lors du cycle de séchage. En minimisant l'écart entre la simulation et les cinétiques de séchage mesurées, la méthode inverse a permis d'obtenir des coefficients de diffusion et des perméabilités liquides du même ordre de grandeur que les mesures expérimentales. L'un des résultats obtenus est illustré dans

[22] Adam L. REDMAN et al. « Mass transfer properties (permeability and mass diffusivity) of four Australian hardwood species ». In : *BioRes* 7.3 (2012), p. 3410-3424. DOI : 10.15376/biores.7.3.3410-3424.

la figure 2.9 par une simulation du séchage d'une planche très proche de la mesure en séchoir semi-industriel.

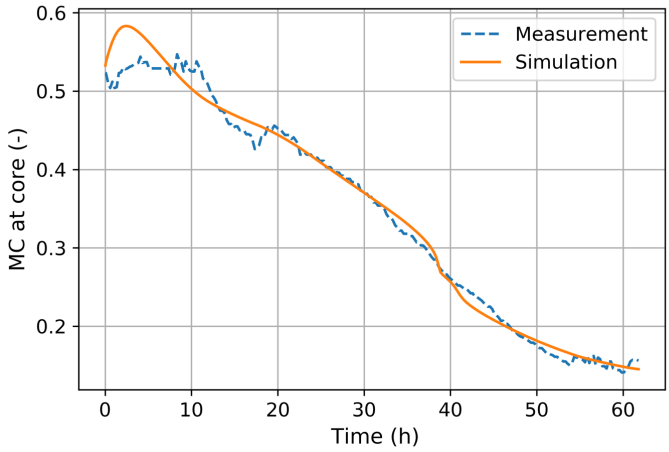


FIGURE 2.9 – Confrontation d'une cinétique de séchage mesurée et simulée numériquement, au cœur d'une planche de pin maritime dans le séchoir semi-industriel de FCBA

Une étude préalable avait été menée pour s'assurer que cette analyse inverse était capable d'identifier ces paramètres de transfert sur plusieurs essences de bois couvrant une large gamme de valeurs possibles pour K et D. Cette étude avait également permis de montrer que l'utilisation de l'évolution temporelle de l'humidité au cœur de la planche était suffisante pour identifier ces deux paramètres. Ce travail, qui n'est pas présenté dans ce manuscrit, a été publié dans Ouertani et al. (2024) [23]. Ainsi, le code numérique *TransPore* a montré sa capacité à identifier les coefficients de transferts massiques K et D du bois à partir des cinétiques complètes de séchage, donc *a posteriori*. Toutefois, il a été montré qu'il est possible d'obtenir ces paramètres avec une précision relative acceptable avec seulement une portion réduite de la cinétique de séchage ; en appliquant cette méthode inverse à seulement 25 %, 50 % ou 75 % de la cinétique complète la précision de l'identification augmente mais donne un ordre de grandeur proche du meilleur résultat dès 50 % de la cinétique du séchage considérés, et inférieur à l'écart-type des mesures directes. Cela confère au modèle une assez bonne capacité de prédiction pour le séchage ultérieur de ces planches. Il est à noter que cette capacité peut également être améliorée en permanence en itérant l'analyse inverse au fur et à mesure que le séchage progresse. Ce résultat, présenté dans le chapitre 6, est illustré dans les figures 2.10 et 2.11. La lecture des sondes résistives d'une charge de bois peut ainsi permettre au code d'"apprendre", en cours de séchage, les caractéristiques des planches instrumentées. Cette fonctionnalité permettra à l'automate avancé de proposer des conduites de séchage spécifiques à la charge de bois, donc potentiellement plus adaptées et réalistes. En raison d'un problème d'alimentation électrique des batteries de chauffe, le séchage réalisé au FCBA et présenté dans le papier a subi un aléa de régulation pendant les 30 premières heures, avec une chute brutale de la température et une augmentation de l'humidité relative. La perturbation a perduré pendant plusieurs heures avant que la température et l'humidité relative atteignent les conditions de la table de séchage préconisées. Il est difficile à un·e opérateur·rice de trouver une solution lorsque le processus s'écarte

[23] Sahbi OUERTANI et al. « Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation ». In : *Drying Technology* 42.1 (2024), p. 168-181. DOI : 10.1080/07373937.2023.2279164.

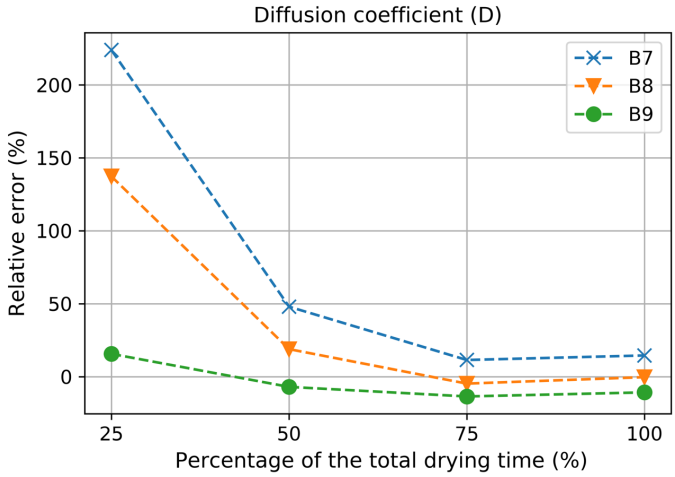


FIGURE 2.10 – Comparaison entre les valeurs mesurées des coefficients de diffusion massique de trois planches de pin maritime et celles estimées par méthode inverse, en considérant une portion ou la totalité de la cinétique de séchage

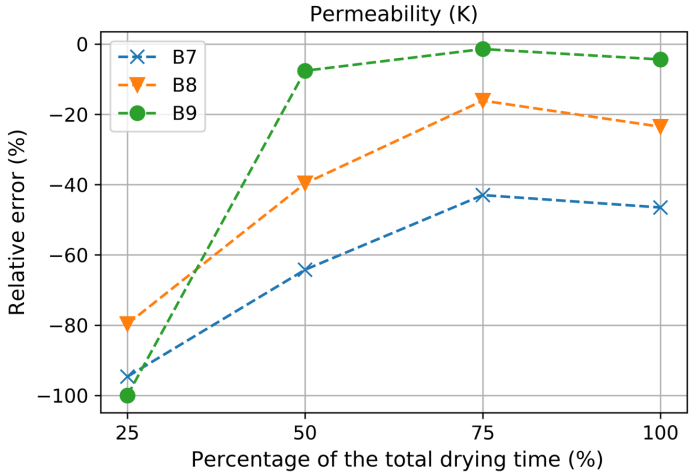


FIGURE 2.11 – Comparaison entre les valeurs mesurées des coefficients de perméabilité liquide de trois planches de pin maritime et celles estimées par méthode inverse, en considérant une portion ou la totalité de la cinétique de séchage. Il est à noter que l'écart-type des mesures directes de K était de 50 %, 25 % et 5 % pour B7, B8, et B9 respectivement

de la séquence habituelle, car la qualité finale, le coût et la consommation d'énergie dépendent de l'ensemble du processus de séchage. Cet aléa a donc été étudié avec le code *Multi_Wood_DryS* pour réaliser des simulations avancées après la phase d'apprentissage et tenter de trouver une conduite de séchage qui réponde au mieux aux attentes d'un·e utilisateur·rice potentiel·le en terme de durée ou de qualité.

Ce travail montre également qu'il est nécessaire d'avoir une instrumentation des planches qui soit connue et maîtrisée, afin de s'assurer de la profondeur des sondes résistives dans l'épaisseur des planches, ainsi que de leurs positions dans les piles et le long de l'écoulement de l'air. Ce travail a également mis en exergue le manque de représentativité des planches instrumentées dans le cas présenté où la charge de bois était constituée de planches avec des caractéristiques contrastées. Cela rend difficile l'optimisation de la conduite de séchage par le modèle s'il n'a pas une information complémentaire sur l'ensemble de la pile. D'autres types de mesures doivent être effectués, comme la pesée de la pile pour obtenir la cinétique moyenne de la charge de bois. Le

modèle pourrait également générer de manière stochastique, pour les planches non instrumentées, des planches virtuelles aux caractéristiques variées, par exemple en termes de débit, de proportion d'aubier, etc., afin de considérer la diversité des charges de bois possibles dans le processus d'optimisation.

2.3 STRATÉGIES D'OPTIMISATION ET DE RÉGULATION D'UN SÉCHOIR UTILISANT DES ÉNERGIES INTERMITTENTES

Dans le cas d'une opération de séchage alimentée par des énergies intermittentes, le suivi d'une conduite traditionnelle nécessite de faire des compléments énergétiques par d'autres sources afin de maintenir des températures élevées. La part d'énergie fluctuante utilisée contribue alors à réduire l'empreinte environnementale du processus. Pour augmenter cette contribution des énergies fluctuantes dans le processus il apparaît nécessaire de générer de nouvelles conduites de séchage. La gestion de l'incertitude quant à la disponibilité énergétique dans le temps n'a pas été étudiée dans ces travaux mais l'apport d'EnR&R est considéré comme une donnée d'entrée connue sur l'ensemble de la durée du cycle ; un scénario d'approvisionnement énergétique a ainsi été choisi et appliqué afin de concentrer l'analyse sur les stratégies d'optimisation et de régulation qui s'en sont suivies.

Le cas d'étude retenu est un séchoir industriel d'une capacité de 50 m^3 situé à Bordeaux (France) et dont l'apport énergétique est assuré par 60 panneaux solaires et photovoltaïques (PV/T) couplés à une chaudière gaz. La quantité de panneaux PV/T a pu restée limitée, Bordeaux bénéficiant de conditions climatiques favorables. À partir des caractéristiques de panneaux PV/T et des relevés météorologiques il a été possible de générer un scénario de puissances thermiques et électriques renouvelables produites par ces panneaux pour l'été, l'hiver et le printemps. La charge de bois simulée est constituée de planches de hêtre de 54 mm d'épaisseur. Le code *Multi_Wood_DryS* a été adapté pour pouvoir utiliser en entrée un apport d'énergie électrique ou thermique complémentaire à celui du réseau ou de la chaudière. Il est désormais possible d'étudier l'impact d'un apport d'énergie solaire sur la consommation d'énergie globale du processus en réponse à la conduite de séchage adoptée. Les résultats obtenus, dans le cas d'une conduite traditionnelle[24], sont représentés dans la figure 2.12.

Le modèle numérique permet donc de quantifier les contributions de cette source d'énergie renouvelable sur la consommation d'énergie thermique globale. En été, au printemps, et en hiver, elle est respectivement de 28 %, 20 % et 10 % pour le cas étudié. Il apparaît logiquement que l'énergie requise par le séchage évolue indépendamment de l'énergie EnR&R disponible. Les conduites de séchage ont donc été modifiées afin d'évoluer avec les scénarios de disponibilité d'EnR&R et ainsi potentiellement augmenter leur contribution au processus.

Pour adapter les conditions de séchage à cet apport cyclique d'EnR&R, des séries de Fourrier ont été utilisées pour modéliser l'évolution de la température sèche et l'humidité d'équilibre de l'air à l'entrée de la pile de planches. Le métamodèle développé en Python génère ainsi par ces séries de Fourrier l'évolution des conditions de séchage dans le séchoir. Ces données sont utilisées par le code *Multi_Wood_DryS* pour simuler le séchage de la charge de bois étudiée, et prédire la durée, le coût, la qualité et la consommation énergétique du process.

Les différents modules développés au cours de cette thèse ont donc finalement été réunis au sein du métamodèle. Un nouveau critère d'optimisation a été défini : la

[24] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

part d'énergie thermique renouvelable dans l'énergie thermique requise par le séchage. Plusieurs optimisations ont été réalisées sur ce critère, en été et au printemps, et ont générées des conduites de séchage originales. Ces dernières, tracées dans la figure 2.13, suivent les fluctuations énergétiques, multipliant presque par 2 la part d'énergie thermique renouvelable utilisée, mais augmentant aussi fortement la durée du séchage.

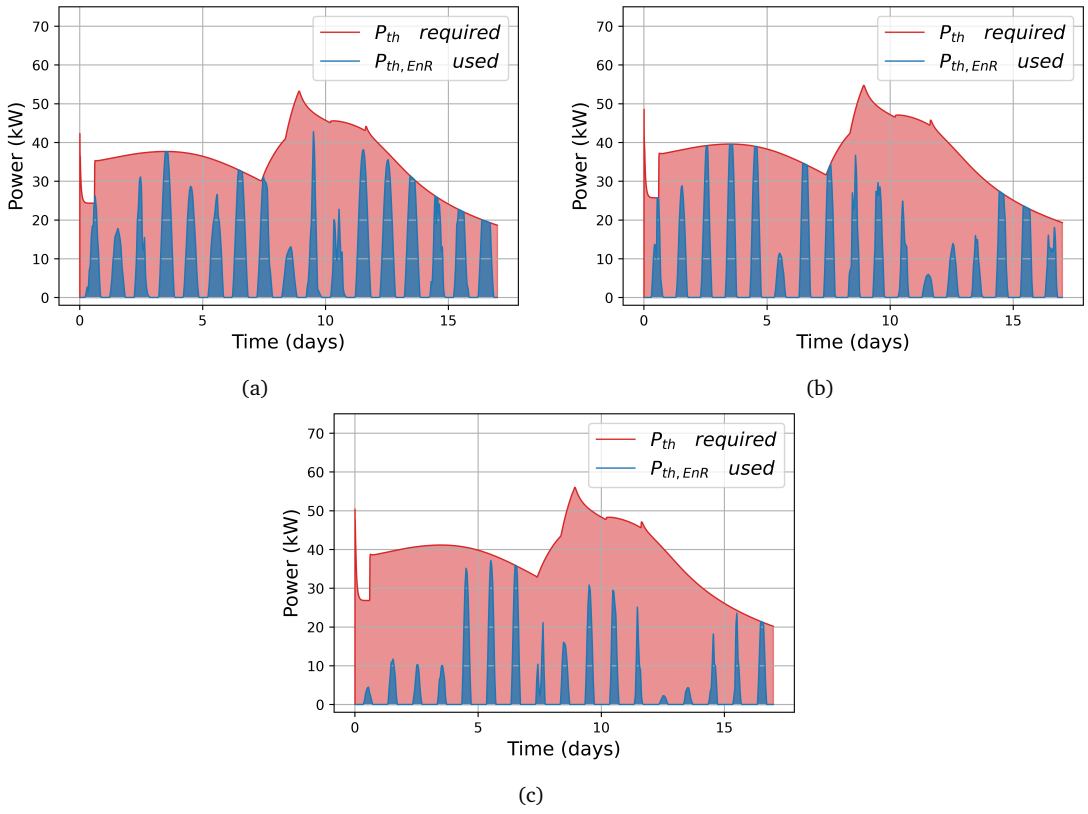


FIGURE 2.12 – Contribution de l'énergie solaire thermique au séchage selon la saison : été (a), printemps (b), hiver (c). La puissance thermique issue de source fluctuante est notée $P_{th,EnR}$.

La génération de conduites de séchage par des séries de Fourier permet au code d'optimisation de réduire le besoin de chauffage lorsque l'énergie renouvelable est peu disponible, ce qui est une fonctionnalité inexistante sur les automates de régulation actuels. La fluctuation des conditions génère une oscillation de l'humidité d'équilibre du bois, favorisant l'expression de la mécanosorption et donc la relaxation des contraintes.

TABLE 2.3 – Résultats des simulations des différentes conduites de séchage. Les critères d'optimisation sont indiqués en gras.

Saison	Cas	Conduite de séchage	Durée (h)	EnR th. (%)	EnR élec. (%)	Cons. éner. (kWh·kg^{-1})	Coût (€/m3)	Hétérogénéité teneur en eau (x10^{-4})	Slicing test (mm)	Écart-type
	1	Standard	408	28	47	1.01	47	6.6	4.2	0.21
Été	2	Std. - Basse T°	585	33	47	1.20	57	6.6	4.1	0.14
	3	Optimisée	970	**53**	47	1.22	65	2.1	2.4	0.07
	4	Standard	408	20	35	1.05	50	6.6	4.2	0.21
Printemps	5	Optimisée	843	**40**	37	1.18	64	2.6	2.5	0.07
	6	Optimisée*	452	24	35	1.02	**76**	3.3	2.9	0.22

*Scénario considérant un prix du gaz doublé par rapport au scénario standard

La température appliquée dans le cas d'une conduite optimisée, plus basse que pour une conduite traditionnelle, contribue à augmenter la durée de séchage mais aussi la part d'EnR&R dans la consommation énergétique globale du processus (table 2.3).

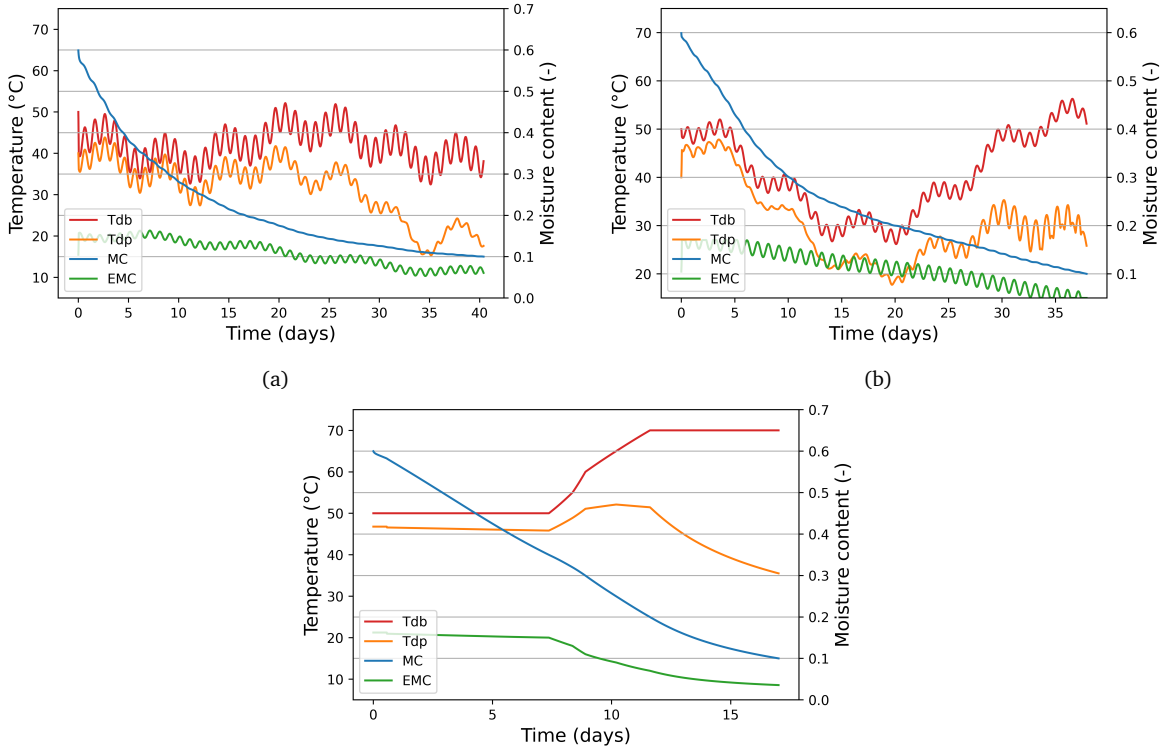


FIGURE 2.13 – Conduites de séchage optimisées sur la contribution de l'énergie thermique renouvelable en été (a) et au printemps (b), et traditionnelle (c). La température sèche (Tdb), la température de rosée (Tdp), la teneur en eau du matériau (MC) et la teneur en eau d'équilibre (EMC) sont tracés respectivmement en rouge, orange, vert et bleu.

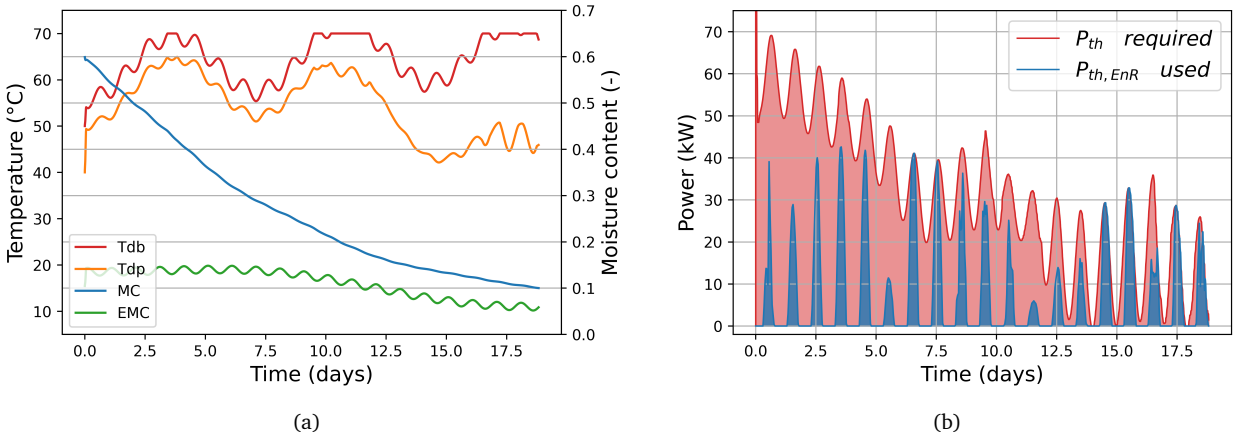


FIGURE 2.14 – Conduite de séchage optimisée sur le coût (a) et contribution de l'énergie thermique renouvelable associée au printemps (b), en considérant un doublement du prix du gaz par rapport à la valeur actuelle

Ainsi, comme la conduite qui valorise au mieux l'énergie apportée par les panneaux solaires est globalement plus basse en température, elle s'accompagne d'une augmentation de la durée de séchage. Ceci a un impact négatif sur le coût du séchage, bien que l'énergie renouvelable ait été considérée plus de 2 fois moins chère que l'énergie conventionnelle

(table 2.3). En effet, la consommation des ventilateurs et les déperditions thermiques sont proportionnelles à la durée du séchage, auxquelles s'ajoutent d'autres frais financiers dépendant de la durée du séchage. Mais une énergie fossile qui serait plus chère qu'une EnR&R peut conduire le code à proposer d'autres conduites de séchage. C'est ce qui a été fait dans le cas 6, en considérant un doublement du prix du gaz, et en demandant au code de trouver une conduite qui minimise le coût du séchage. Le modèle a finalement proposé une conduite qui augmente la contribution de l'énergie thermique renouvelable mais qui nécessite aussi un apport de puissance complémentaire venant de la chaudière gaz, afin de maintenir une température moyenne haute dans le séchoir et de limiter l'impact sur la durée du séchage (fig. 2.14).

Les outils développés dans ces travaux de thèse sont ainsi capables de trouver des conduites de séchages adaptées aux critères d'optimisation choisis par l'opérateur·rice et à la disponibilité énergétique d'EnR&R. Ils permettent de simuler et donc en partie de prédire les résultats de fin de séchage, ce qui facilite le choix des conduites de séchage et la recherche de meilleures solutions. L'outil numérique ainsi développé permet d'explorer des domaines de solutions plus larges et de diminuer plus fortement l'impact environnemental du séchage. Il pourrait s'avérer être un outil industriel d'aide à la décision pertinent dans un contexte de fluctuation des coûts énergétiques.

3

Caractérisation de la mécanosorption

Comme indiqué dans le chapitre 1 le bois est soumis à des contraintes lors de son séchage. Celles-ci peuvent dégrader la qualité en générant des fentes, mais elles peuvent aussi être en partie relaxées par la mécanosorption, activée notamment par les variations de teneurs en eau. Un bois qui présente peu de contraintes en cours de séchage peut voir ses conditions de séchage durcies, et donc sécher plus vite sans dégradation de la qualité. Exacerber l'effet de la mécanosorption est donc une piste pour améliorer les performances du séchage tout en bénéficiant, *a priori*, de fluctuations dans les conditions de séchage. Par ailleurs, un séchoir utilisant une EnR&R fluctuante, comme c'est l'enjeu dans le cadre de ce travail, sera potentiellement amené à avoir des conditions climatiques dans l'enceinte qui varient également. Être capable de prédire le comportement mécanique du bois avec une humidité d'équilibre du bois qui oscille apparaît donc essentiel pour ce travail. La déformation sous charge du bois, comme celles de nombreux autres matériaux hygroscopiques, est difficile à prédire lorsque il est soumis à des variations de teneur en eau et chargé sur la durée. Cette déformation dite "mémoire" est donc l'objet de nombreuses études qui visent à la modéliser correctement et semble résulter de la contribution de deux comportements : le comportement viscoélastique, qui intègre toute l'histoire des contraintes vues par le matériau et qui est un comportement thermo- et hydroactivé, ainsi que d'un comportement mécanosorptif, qui apparaît dès que le matériau est sous contrainte et voit des variations de teneurs en eau liée. L'objectif de ce papier est de caractériser cette déformation mémoire sur des essences feuillues, le hêtre et le chêne, lors d'un séchage oscillant à basse température.

À cet effet un nouveau dispositif expérimental a été conçu et développé : l'essai *Fourche*. Présenté en détail dans ce papier, l'essai *Fourche* permet de réaliser des campagnes d'essais sur plusieurs échantillons jumeaux et initialement verts, aux niveaux et directions de chargement différents mais soumis aux mêmes conditions climatiques, évoluant de manière cyclique. L'hypothèse d'un champ de teneur en eau uniforme au sein des échantillons est appliquée, la dimension des échantillons dans la direction longitudinale, propice aux transferts de masse, étant très faible (3 mm). La déformation aux extrémités des échantillons étant partiellement libre, la teneur en eau de chaque échantillon, et donc sa déformation dans le domaine hygroscopique, évolue en même temps que la contrainte qu'il subit. Cette simultanéité est très peu présente dans la littérature, aussi l'évolution de la complaisance du matériau avec les teneurs en eau atteintes est difficilement comparable aux travaux passés mais permet de comparer les essences et les directions de chargement entre elles. Cette liberté d'évolution de la contrainte en même temps que de la teneur en eau est de plus bien présente dans le cas du séchage d'une planche.

Ce papier a été accepté pour publication par le journal *Wood Science and Technology* le 15 octobre 2024.

The Fork device : a test for estimating the memory creep of wood under load during moisture variation

Antoine STÉPHAN [1], Patrick PERRÉ [2 3], Clément L'HOSTIS [4], Romain RÉMOND[1]

ABSTRACT

When a loaded piece of wood is exposed to variable climatic conditions, the stress state depends on both the stress and moisture content change history due to the memory creep. To explore this complex time-dependent interaction, a new experimental device have been developed. Called the "Fork" device, this simple setup allows the evolution of the memory creep of twin wood samples to be determined continuously under different loads. In this work, this device has been used at low temperature (i.e. 30 °C) and with six different humidity cycles to focus on the mechanosorptive part of the memory creep. The test was performed with thin quartersawn and flatsawn samples of beech and oak originally at green state. The cycles periods were chosen to obtain a moisture content quickly close to the equilibrium moisture content for each plateau. With negligible moisture gradient, the dynamics of mechanosorption was measured and compared with moisture variations, species and load direction. The results highlight an increase in mechanosorptive strain with cumulative moisture content variations with an asymptotic behavior towards a limit. For oak and beech, a common compliance can be found for each grain direction.

keywords : mechanosorption, wood drying, fluctuating conditions, beech, oak

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Épinal, 88000, France
[2] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, 91190, France
[3] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, 51110, France
[4] FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Champs-sur-Marne, 77420, France

3.1 INTRODUCTION

When wood is subjected simultaneously to mechanical load and bound water change (water sorption), mechano-sorptive strain occurs. This phenomenon can be seen as a modification of shrinkage under the effect of stress, or as an acceleration of viscoelastic creep by moisture content variations. This deformation has been studied in numerous studies since the 1970s, as it is ubiquitous in timber structural elements that are exposed to humidity variations during the service life, and also for its major contribution to stress reversal and casehardening of a wood boards during drying. This behavior is used to bend wood, or during wood drying to reduce warping by placing a weight to the top of the wood stacks. Since the first reported works on this phenomenon, in experiments [1] and also in modeling [2], there is still no clear convincing explanation for its micro-mechanism [3]. It is unclear whether time-dependent creep, i.e. viscoelastic creep, and mechano-sorptive creep are dependent or independent of one another at the macromolecular level because they occur simultaneously in any experiments performed to characterize them. These two mechanical behaviors lead the stress state at time t to depend on the whole stress and moisture change history of the material. They are often grouped together and referred to as wood memory effects.

As soon as the characterization is carried out with a fairly thick wood piece subject to moisture content change, the resistance to internal transfer induces moisture gradients within the sample, resulting in a non-uniform shrinkage field, hence non-uniform and additional fields of stress and strain. As a result, it is very complex to analyze the experimental data to isolate the pure mechano-sorptive behavior.

In the literature, different types of experimental tests have been developed to evaluate the intensity of the memory effects.
A common method used to quantify this effect in a cross section of the wood consists of cutting the material into slices to partly release and monitor the restrained stresses and measure the corresponding moisture content gradient. This slicing method [4] is commonly used during wood drying [5]. It is currently used to quantify the magnitude of casehardening [6], that evaluates the drying quality. The "Prong test" [7] or the slicing test [8] are destructive tests widely used in industry [9], namely at the end of drying, to assess the drying quality.

A continuous method was developed [10] to monitor the stress during nonsymmetrical drying of free sample through the "Flying Test". Such experiment provides information on the mechanical state during drying of a board twice its thickness. It has been compared

[1] ARMSTRONG et KINGSTON, « Effect of Moisture Changes on Creep in Wood ».
[2] LEICESTER, « A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams ».
[3] GRIL, « Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches ».
[4] SVENSSON et TORATTI, « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity ».
[5] Christian SALES. « Contribution à l'analyse des contraintes de séchage dans le bois ». Thèse de doct. 1984.
[6] Alpo RANTA-MAUNUS et al. « Analysis of case hardening ». In : *Proceedings of the 3rd workshop of COST Action E15 on softwood drying to specific end uses*. Helsinki, Finland, 2001, p. 11-13.
[7] MCMILLEN, *Stresses in wood during drying*.
[8] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION, *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*.
[9] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.
[10] BRANDAO et PERRÉ, « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ».

and enhanced with the measurement on constrained samples [11].

The bending test has also been used on wooden beams subjected to cyclic changes in moisture content to characterize the creep behavior in the longitudinal direction of hardwood and softwood [12], and in the radial and tangential directions [13] [14].

Tensile [15] [16] [17] or compressive testing [18] [19] have also been applied to wood samples under cyclic moisture changes to characterize the memory effects according to the different material directions.

An alternative experiment named compression set [20] was also proposed to analyze the hygro-mechanical behavior of poplar wood by means of restrained swelling tests. [21] The device allows a stress-strain monitoring on three matched specimens over various moisture cycles, one free to shrink and swell, the second prevented from swelling, and the last prevented from shrinking and swelling.

The literature reports numerous works to characterize the memory effects for softwoods species, that are currently preferred for structural applications. Scarce experiments were conducted to characterize creep behavior of hardwood in the cross grain direction, under monotonous moisture variation [22] [23]. In this work, the creep behavior has also been characterized in the cross grain directions, moreover for several stress levels, and with non-monotonous moisture variations, as may occur during the drying process and or in the use of wood products.

Most of the experiments cited above use fairly thick specimens whose internal mass resistance produces MC gradients when subjected to humidity cycles. The memory strains, affected by moisture content through shrinkage and stress history, are then tied to sorption kinetics. They can be representative of real conditions, such as structures submitted

[11] Ottaviano Allegretti et al. « Nonsymmetrical drying tests - Experimental and numerical results for free and constrained spruce samples ». In : *Drying Technology* 36.13 (2018), p. 1554-1562. DOI : 10.1080/07373937.2017.1417869.

[12] Charlotte Bengtsson. « Mechano-sorptive bending creep of timber – influence of material parameters ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 59.4 (2001), p. 229-236. DOI : 10.1007/s001070100217.

[13] Cruz Sanchez, « Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois ».

[14] Thouraya Salem et al. « Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber ». In : *Drying Technology* 35.5 (2017), p. 593-605. DOI : 10.1080/07373937.2016.1195842.

[15] Valérie Pittet. « Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée ». Thèse de doct. Lausanne : EPFL, 1996.

[16] Antti Hanhijärvi. *Perpendicular-to-grain creep of Finnish softwoods in high temperature drying conditions: experiments and modeling in temperature range 95-125 °C*. VTT-publications 301. Espoo : VTT, 1997. 94 p. ISBN : 978-951-38-5041-8.

[17] Hery Randriambololona. « Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable ». Thèse de doct. Université de Limoges, 2003.

[18] Zdenek Pavel Bažant et S. Meiri. « Measurements of compression creep of wood at humidity changes ». In : *Wood Sci. Technol.* 19.2 (1985), p. 179-182. DOI : 10.1007/BF00353079.

[19] Sabina Huč et al. « Hygro-mechanical analysis of wood subjected to constant mechanical load and varying relative humidity ». In : *Holzforschung* 72.10 (2018), p. 863-870. DOI : 10.1515/hf-2018-0035.

[20] Bruce Hoadley. « Chemical and physical properties of wood ». In : *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum*. Sous la dir. de Kathleen Dardes et al. Los Angeles, USA : The Getty Conservation Institute, 1995, p. 2-20. ISBN : 978-0-89236-384-1.

[21] Mazzanti et al., « A hygro-mechanical analysis of poplar wood along the tangential direction by restrained swelling test ».

[22] Arno P. Schniewind. « Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 24.3 (1966), p. 87-98. DOI : 10.1007/BF02608354.

[23] Mazzanti et al., « A hygro-mechanical analysis of poplar wood along the tangential direction by restrained swelling test ».

to variation of environment, but are very difficult to analyze to extract a constitutive equation.

In this work, the new experimental device is firstly presented in detail. Then, this device was used to measure the stresses and memory strains of beech and oak wood samples, under different tensile loads and non-monotonous moisture content variations (periodic variations plus changes of low/high values). To avoid the above-mentioned problem, very thin samples in the grain direction were used. The small thickness and high mass diffusivity in the longitudinal direction ensure that the equilibrium moisture content is reached quickly after any change of relative humidity of the chamber. These results are then discussed with a specific focus on wood drying stress prediction.

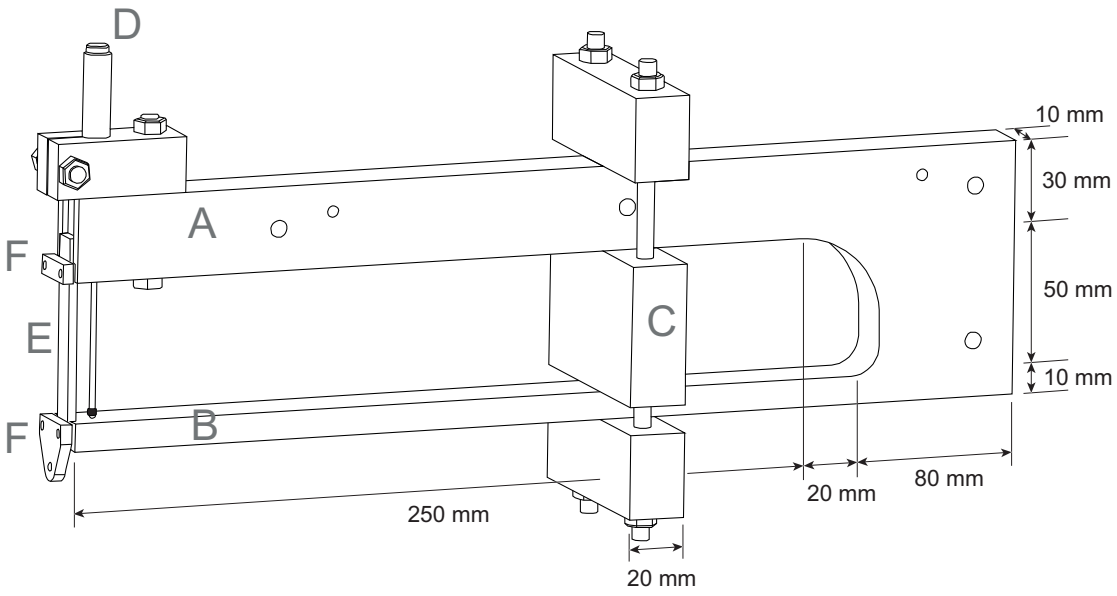
3.2 MATERIALS AND METHODS

A new experimental device has been developed to estimate the memory strain of loaded samples. It consists of measuring the stress and strain of a wood sample under load and at varying moisture contents, isolating the contribution of the memory part of the strain thanks to an unloaded twin sample (i.e. mechano-sorptive and viscoelastic).

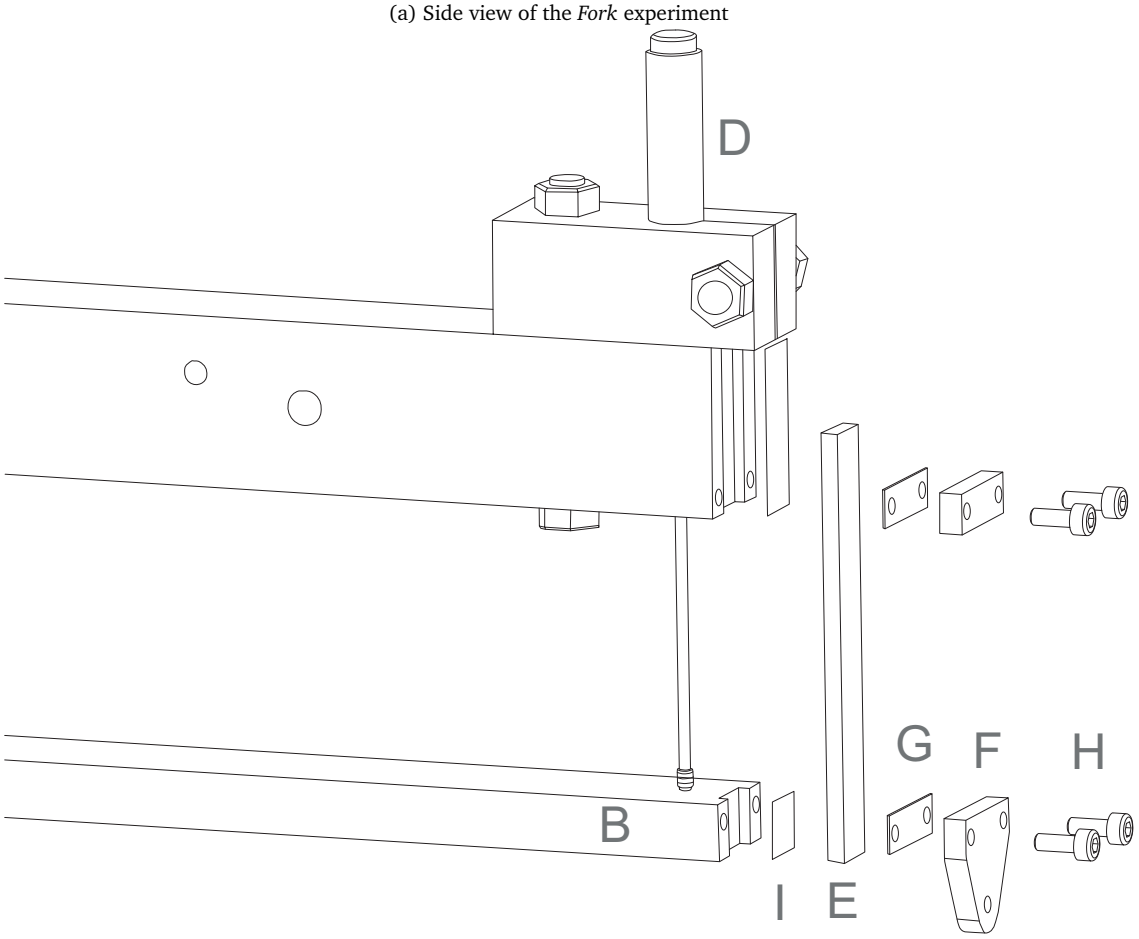
3.2.1 *The "Fork" device*

It is important to keep in mind that, in its transverse direction, wood breaks in tension at roughly one percent of strain, while shrinkage easily represents several percents of deformation. This poses severe problems to test constrained samples in tension. The *Fork* device was designed to fix this concern. Its important feature is that the load varies in time, depending on the sample shrinkage and the memory creep. This has the great advantage to reduce the load imposed by shrinkage thanks to the creep, allowing the stress to remain below the failure level. The designed and developed device is able to simultaneously and continuously i) load the sample, ii) measure its total strain and iii) determine the imposed load. In addition, the stress-strain relationship imposed on the sample can be selected prior to testing to suit the requirements of the experiment. The core of the device is the aluminum fork represented in Fig. 3.1a. It comprises a thick prong considered as undeformable beam and a thinner prong acting as a cantilever beam. The stiffness of the cantilever beam can be adjusted thanks to a blocking wedge that can be tightened at any position along the fork. A linear variable differential transducer (LVDT, OP/6/G from Solartron Metrology, UK), whose output voltage is acquired by a data acquisition unit (34970A from Keysight Technologies, California), measures the displacement of the cantilever beam.

The sample is placed between the two parallel prongs of the fork as shown in Fig. 3.1b : at each end of the fork, one extremity of the sample is tightened with a screwed clamp. To avoid any slippage at the interface between the fork and the sample, a piece of sand paper was glued to the aluminum end of each fork branch. In addition, a rubber sheet is added between the clamp and the sample to maintain tightness in spite of the change of sample thickness due to shrinkage. As the sample thickness is along the longitudinal direction of wood, with very low shrinkage, this precaution may be unnecessary.



(a) Side view of the *Fork* experiment

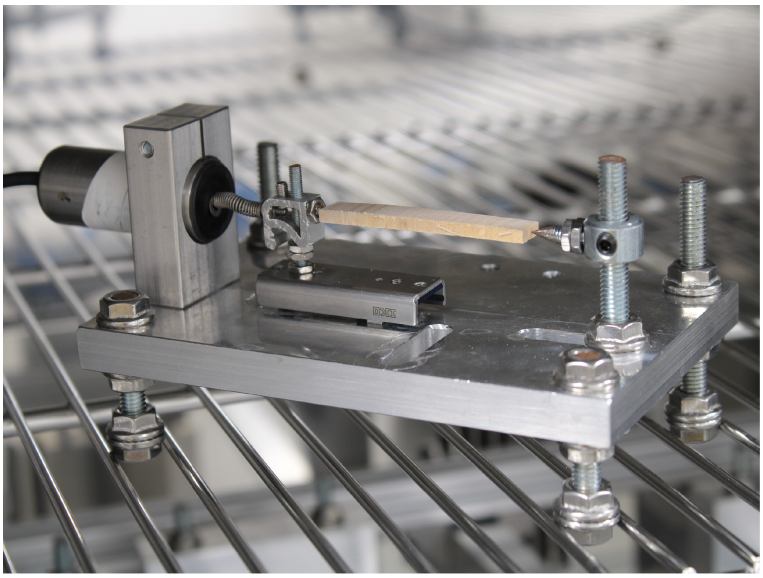


(b) Detail of the sample clamping

FIGURE 3.1 – Principle of the fork device (a) general view with the rigid body (A), the cantilever beam (B), the blocking wedge (C) and the sample (E) clamped at both ends of the fork (F). (b) Zoom over the sample clamping : The LVDT (D) measures the displacement of the cantilever beam (B). To avoid slippage and maintain holding in spite of section variation, the sample (E) is tight between a sheet of sand paper (I) glued at the extremities of the fork, and a rubber sheet (G) by aluminum clamp (F) and screws. (H)



(a) Several forks with samples clamped



(b) Rig for free shrinkage and swelling

FIGURE 3.2 – Pictures of the experiment

During a test, the moisture content (MC) of the hygroscopic sample changes according to the variations of the environment, as imposed by the climatic chamber, to tend towards the actual equilibrium moisture content (EMC). Shrinkage or swelling occurs in the material as its bound moisture content changes. Since the extremities of the sample are clamped to the two prong of the fork, the strain due to shrinkage and swelling generates a deflection of the cantilever beam, which imposes a force/deflection relationship, hence a strain/stress relation.

Because the slenderness ratio of the cantilever beam is always superior or equal to 15, and considering small displacements compared to the length of the cantilever beam, the shear deformations are considered negligible. In this Euler-Bernoulli beam theory[24] the deflection ν of a point of the cantilever beam at the distance x of the fixed end is expressed by Eq. 3.1 :

$$\nu(x) = \frac{P}{6 \cdot E \cdot I} \cdot x^2 \cdot (3 \cdot l - x) \tag{3.1}$$

[24] Stephen TIMOSHENKO. *History of Strength of Materials*. McGraw-Hill Inc., US. 1953. 445 p.

where P is the point load at the free end of the beam, l is the length of the beam, E is the modulus of elasticity and I is the moment of inertia of the beam.

The LVDT measures the deflection of the cantilever beam 25 mm apart from the extremity of the fork, where the sample is clamped and the load is applied. The displacement measured by the LVDT is calculated using Eq. 3.2 :

$$\nu(m) = u(m) \cdot c \tag{3.2}$$

where $\nu(m)$ is the displacement at the LVDT measurement point m, $u(m)$ is the tension at the output of the LVDT, and c is the coefficient between the LVDT displacement and the output voltage obtained by calibration.

Applying Eq. 3.1 at the distance m and l of the fixed end, at the measurement and sample points respectively, the ratio can be expressed as follows :

$$\frac{\nu(l)}{\nu(m)} = \frac{2 \cdot l^3}{m^2 \cdot (3 \cdot l - m)} \tag{3.3}$$

Because m and l are known the displacement at the extremity of the beam, i.e. the sample displacement $\nu(l)$, could then be calculated with Eq. 3.2 and Eq. 3.3.

Prior to the test, and with the same position of the blocking wedge, each fork stiffness has been calibrated without wood sample. Several weights have been suspended to the cantilever beam at the distance l of the fixed end and the signal from the LVDT was recorded. After a cycle of loading and unloading the interpolation of the measured values gives a coefficient between the load and the beam deflection. It is then possible to determine the force applied to the sample by measuring the beam displacement $\nu(m)$.

A set of six forks was manufactured (Fig. 3.2a) to characterize a series of samples under the same climatic conditions. Each fork device has its own stiffness, set by the blocking wedge tightened at a different position along of the cantilever beam. It allows different stress-strain relationships to be applied among samples. Twin samples, defined in the wood sampling section 3.2.5, are cut one after the other along the longitudinal axis of the board to minimise material variation between them.

Two material directions of wood (radial and tangential) were tested at the same time. Therefore, two sets of three forks were dedicated to each direction with three different fork stiffness values per direction. In parallel, the free shrinkage/swelling was measured on twin samples using the test rig described in the next section.

3.2.2 *Free shrinkage and swelling measurement*

As mentioned earlier, the free shrinkage/swelling was continuously measured on twin samples under the same air temperature and humidity conditions. To that purpose, a dedicated rig, depicted in Fig. 3.2b, continuously measures the strain of unloaded samples, for both directions, by a LVDT sensor (DFg5 from Solartron). The LVDT free-core is held in contact to the sides of the twin wood sample by the use of a spring. It has been verified that the small force applied by this spring to a point on the specimen has a negligible influence on its shrinkage/swelling. This was done by placing several twin samples in the same climatic chamber, one was in the free shrinkage and swelling rig with a low force spring, another with a high force spring, and some other samples were placed outside the rigs. A maximum difference of less than 5 % was observed in the total shrinkage of these samples after the desorption cycle.

This free shrinkage and swelling measurement is also used to determine the moisture content of the twin sample during the tests. To do this, the variations of the wood dimensions in its hygroscopic domain is supposed to vary linearly with the moisture content [25]. This is particularly true for small sample size. [26] [27] The small sample thickness along the longitudinal direction allows the absence of moisture gradient in the sample to be assumed, which validated the linear assumption at the sample level. To derive this relationship, the initial and final dimensions of the sample are measured by a caliper and the initial and final moisture contents are determined by oven dried weighting. Because the samples were cut from green wood, the moisture content of samples at the initial state was always above the MC at the fibre saturation point (MC_{FSP}). The change in MC between the initial MC and the FSP gives no changes in the wood dimensions. For MC below FSP, the fact that the dimension changes linearly with the moisture change allows the following equation to be written :

$$l_S(t) = l_{S,t0} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{MC_{FSP}} \cdot \Big(MC_{FSP} - MC(t)\Big)\right) \tag{3.4}$$

with

$$\alpha = \frac{l_{S,t0} - l_{S,oven-dry}}{l_{S,t0}} \tag{3.5}$$

where l_S is the dimension of the free sample given by the LVDT, t the time of measurement, the subscripts $t0$, and tf refer respectively to the beginning and the end of the test, and α is the shrinkage coefficient of wood.

From these equations, the MC at time t can be determined, and the shrinkage coefficient can be expressed as a function of the final moisture content and the final dimensions of the sample :

$$MC(t) = MC_{FSP} - \frac{MC_{FSP}}{\alpha} \cdot \frac{l_{S,t0} - l_S(t)}{l_{S,t0}} \tag{3.6}$$

with

$$\alpha = \frac{l_{S,t0} - l_{S,tf}}{l_{S,t0}} \cdot \frac{MC_{FSP}}{MC_{FSP} - MC_{tf}} \tag{3.7}$$

The following Eq. 3.8 was used to calculated the moisture content at the fiber-saturation point [28] :

$$MC_{FSP} = 0.325 - 0.001 \cdot T \tag{3.8}$$

with T the temperature of the sample, here equal to 30 °C, the dry-bulb temperature in the climatic chamber.

[25] SKAAR, *Wood-Water Relations*.

[26] Patrick PERRÉ. « Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples ». In : *Holzforschung* 61.4 (2007), p. 419-429. DOI : 10.1515/HF.2007.075.

[27] Giana ALMEIDA et al. « The Dynamic of Shrinkage/Moisture Content Behavior Determined During Drying of Microsamples for Different Kinds of Wood ». In : *Drying Technology* 26.9 (2008), p. 1118-1124. DOI : 10.1080/07373930802266108.

[28] SIAU, *Transport Processes in Wood*.

3.2.3 *Determination of elastic modulus*

The Young's modulus of the wood material was determined at the green state and at the end of drying, on a twin sample. The dedicated twin samples for elasticity measurements were stored in the same climatic chamber as the *Fork* test and the free shrinkage and swelling rig. A static testing machine (Criterion 43.104, MTS Systems Corporation, Minnesota) equipped with a load cell (low profile shear beam, 1 kN, with accuracy class 1 from 0.5 to 1 %, and class 0.5 from 1 to 100 % of full scale, MTS) and a clip-on extensometer (632.13F-20, travel of ± 1.5 mm, MTS) was used to measure the evolution of the stress with the strain of the material. A load applied to the sample was continusly increased until a maximal stress of 1 MPa. The extensometer clamped in the center of the sample provided the extension of that part. The strain could then be calculated knowing the initial length of the sample. The load was then reduced to zero and this cycle was repeated two more times. The slope of the straight-line portion of the stress/strain curve gives the Young's modulus, and the value retained for each pair of species and load direction corresponded to the mean value of the three load cycles (see an example of the results and the test device in Appendix A).

3.2.4 *Data analysis to extract the memory strain*

The total strain of the sample is considered as the cumulative of several contributions :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_e(t) + \varepsilon_\alpha(t) + \varepsilon_{ve+ms}(t) \tag{3.9}$$

where $\varepsilon(t)$ is the total strain, $\varepsilon_e(t)$ the elastic strain, $\varepsilon_\alpha(t)$ the strain due to free shrinkage and $\varepsilon_{ve+ms}(t)$ the memory strain.
The total strain comes directly from the *Fork* device, using Eq. 3.10.

$$\varepsilon(t) = \frac{\Delta l_{tot}(t)}{l_{tot,0}} \tag{3.10}$$

Where $\Delta l_{tot}(t)$ is the variation of the length of the sample in the *Fork* test and $l_{tot,0}$ is the length of the sample at the beginning of the test.

The calibration of the cantilever beam, as presented earlier, provides a curve giving the load applied at the extremity of the beam, hence the force applied to the sample, as a function of the displacement measured by the LVDT. During the test, the cross section of the sample in the *Fork* test was considered constant and equal to that measured in the initial state (fully swollen). The cross section deformation has not been taken into account because the results of this work are intended to obtain input parameters for computational simulation and the classical assumption of these models neglect the effect of dimensional changes on heat and mass transfer in wood.

The stress of the sample is calculated from the determined force of the fork using Eq. 3.11.

$$\sigma(t) = \frac{F(t)}{S} \tag{3.11}$$

Where S is the cross section of the fork sample (mm²) and $F(t)$ is the load at the extremity of the fork (N) determined by the correlation established during calibration.

The elastic strain can then be calculated with Eq. 3.12, using the Young's modulus determined on the reserved sample (the fifth sample in Fig. 3.3a). The dependence of Young's modulus on moisture content was taken into account by linear interpolation of the

values measured during the test for two different moisture contents (above the FSP at the start of the test and at approximately 9 % at the end), i.e. the Young's modulus changes over time according to the value of the moisture content (Eq. 3.6). For information the Young's moduli measured and used in this work are given in Table 3.1.

$$\varepsilon_e(t) = \frac{\sigma(t)}{E(t)} \tag{3.12}$$

TABLE 3.1 – Young's moduli of oak and beech measured in tangential and radial directions

Moisture content (%)	Modulus of elasticity (MPa)			
	Beech		Oak	
	Radial	Tangential	Radial	Tangential
Above MC_{FSP}	926	457	731	495
8.89 ± 0.14	1890	724	1434	818

Assuming twin samples, $\varepsilon_\alpha(t)$ is obtained by the strain measured on the free sample (the fourth sample in Fig. 3.3a), using Eq. 3.13.

$$\varepsilon_\alpha(t) = \frac{\Delta l_S(t)}{l_{S,t0}} \tag{3.13}$$

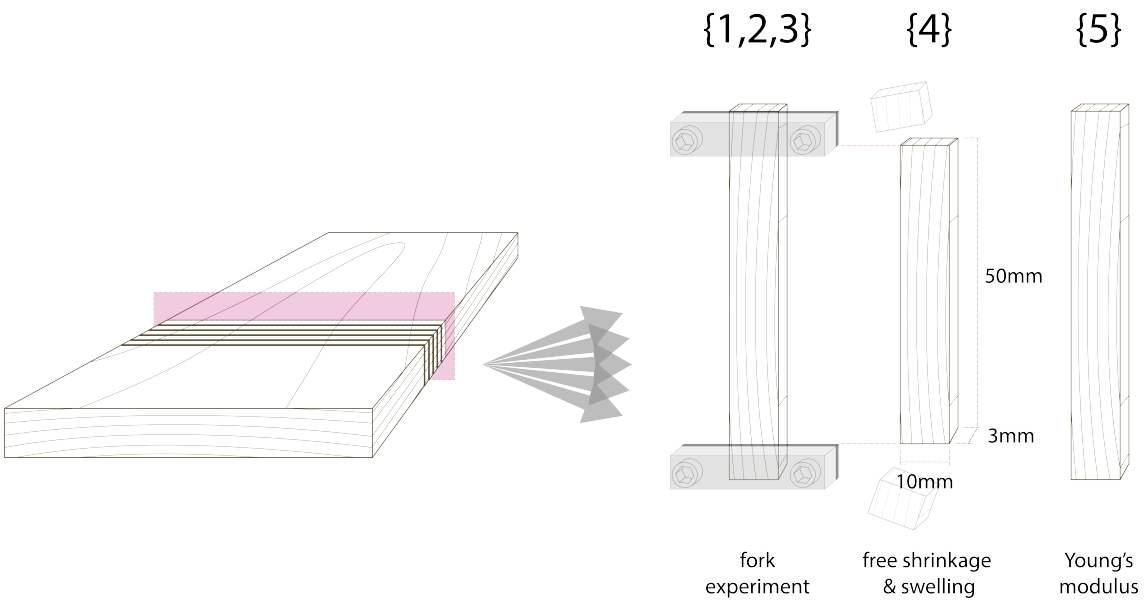
Where $\Delta l_S(t)$ is the variation of sample length in the measured direction and $l_{S,t0}$ the initial length of the free sample of the rig test.

Finally, once all other terms of Eq. 3.9 have been determined, the memory strain could be obtained by subtraction.

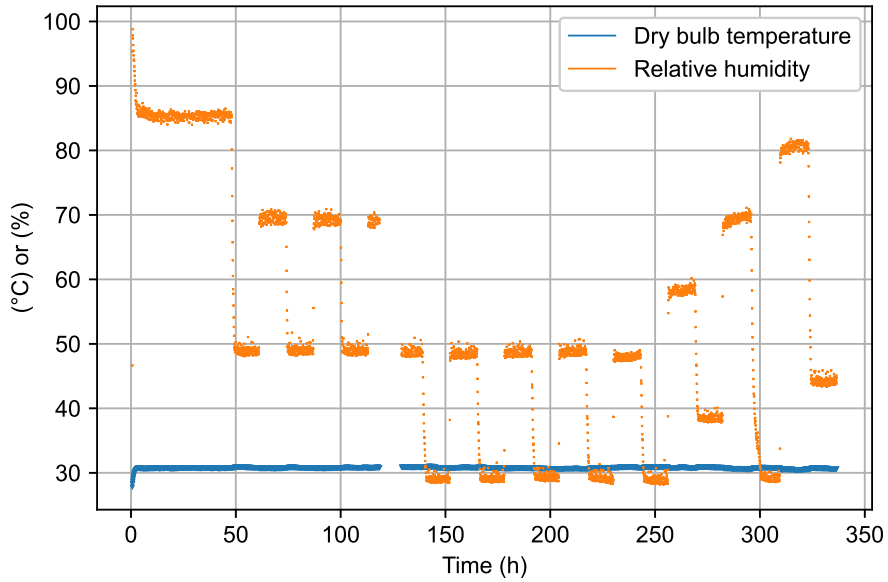
3.2.5 *Wood sampling*

The tests have been performed on beech (*Fagus sylvatica*) and oak (*Quercus ruber or petraea*) samples. For each species, the samples come from a freshly cut tree about 60 cm in diameter, originating from Lorraine (France) and live sawing. The samples come from quartersawn and flatsawn boards to perform tests in radial and tangential directions respectively. The boards were sawn to obtain several twin samples of 3 mm thickness in the longitudinal (L) direction, using a precision cutting machine (Struers Secotom-10, Denmark), as depicted in Fig. 3.3a. As shown in Fig. 3.3a, one full test requires 5 twin samples : one for free shrinkage, one to determine the elastic modulus of the material and one for each of the 3 fork stiffness values. The scans of the samples are shown in the Appendix B.

The quarter- and flatsawn samples were intended to be tested in the radial and tangential direction respectively. Samples were measured and weighed just before being placed in the fork or in the stress-free experiments. It should be noted that care was taken to keep the samples above the FSP throughout the sample preparation phase by storing them in liquid water. It ensured the first period of the test to be the first desorption in the hygroscopic domain, and a stress-free initial condition prior to testing.



(a)



(b)

FIGURE 3.3 – Sampling of the 5 twin specimens devoted to the different devices from flatsawn board (example given here) (a) and time pattern of temperature and RH imposed to the sample during the experiments (b)

3.2.6 *Experimental protocol*

The set of 6 forks and the set of 2 rigs for free dimensions were placed in a climatic chamber (Memmert HPP260, Germany). Throughout the test, the chamber was set at 30 °C and the RH sequence performed was 88 %, (50 %, 70 %) – 3 times, (50 %, 30 %) – 5 times, 30 %, 60 %, 40 %, 70 %, 30 %, 80 %, 45 % over a total of 340 hours, as depicted in Fig. 3.3b. Note that this figure plots the actual conditions measured in the chamber rather that the set values. The principle of this schedule was to first dry the material to an MC of about 20 %, thanks to a plateau of 50 hours, then to repeat RH-cycles with a period of 26 hours, and finally to impose a RH sequence with large and non-periodic variations to mimic what may occur when the material in used is exposed to variable climate of its

environment. The low temperature chosen should limit the activation of the viscoelastic properties and the RH cycles should, on the contrary, activate the mechanosorptive strain, that is expected to contribute the most to the memory strain. This is consistent with a preliminary test presented in Appendix C.

3.3 RESULTS AND DISCUSSIONS

3.3.1 *The whole set of data obtained for beech in radial direction*

The set of tests presented here was obtained for beech samples in the radial direction for 336 hours (see Appendix D for all other raw strain measurements). The blocking wedges of the fork devices were tightened at three different positions to study the effect of load on memory strain. As shown in Fig. 3.4, the signals have been lost between 118 hours and 128 hours, due to a bad connection of a USB port on the monitoring system. It should be noted that this had no effect on the climate in the chamber, which continued to follow the schedule.

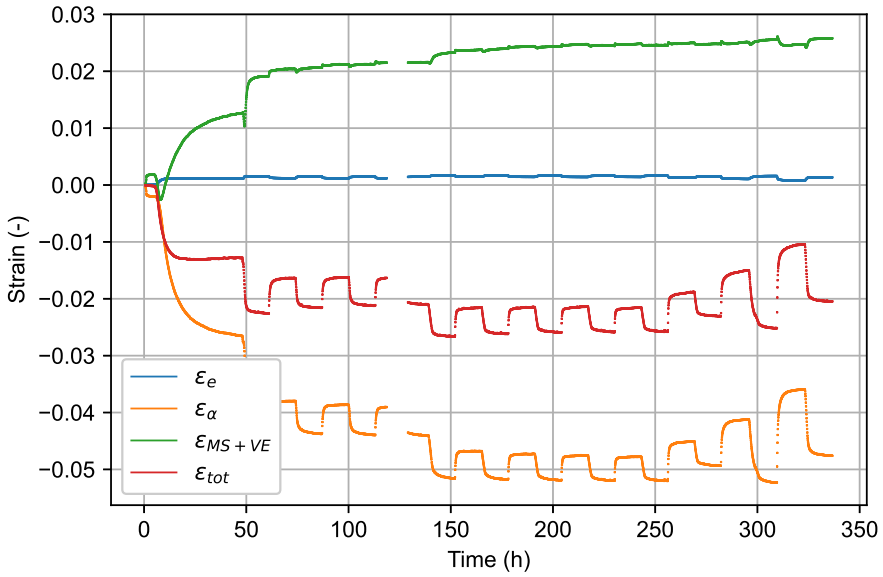


FIGURE 3.4 – The different strain contributions obtained in the *Fork* test for the beech sample under high load in radial direction

The contributions to the total strain measured for the high load sample, as detailed in Eq. 3.9, are shown in Fig. 3.4. The experiment allowed a clear distinction between the contributions of the swelling/shrinkage, elastic and memory strains to the total strain. The memory strain increases with moisture and load variations, tends to an asymptotic value during the first stage of periodic variations in equilibrium moisture content that starts at 50 h, suggesting a mechanosorptive limit.

The tensile stress obtained for the three different stiffness values are depicted in Fig. 3.5. The maximal tensile strengths in directions perpendicular to grain have been measured with a static testing machine on sample n°5 (Fig. 3.3a) ; the maximal tensile strength in radial direction was 21.6 MPa for a sample at 7.2 % of moisture content. This

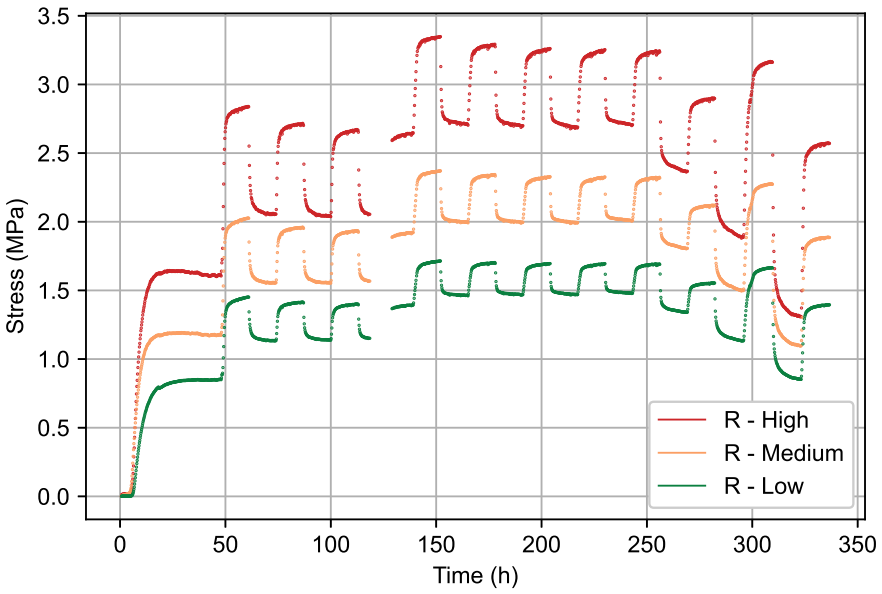


FIGURE 3.5 – Stresses measured for the three samples loaded in radial direction. The High, Medium and Low labels refer to the stiffness setting of each fork

value is in accordance with previous works [29] [30]. The stress measured in our test is then of around 8 %, 11 % and 15 % of the maximal tensile strength, for respectively Low, Medium and High load. This confirms that the fork device perfectly fulfills the objective of avoiding the sample failure thanks to the stress-strain relationship it applies to the sample.

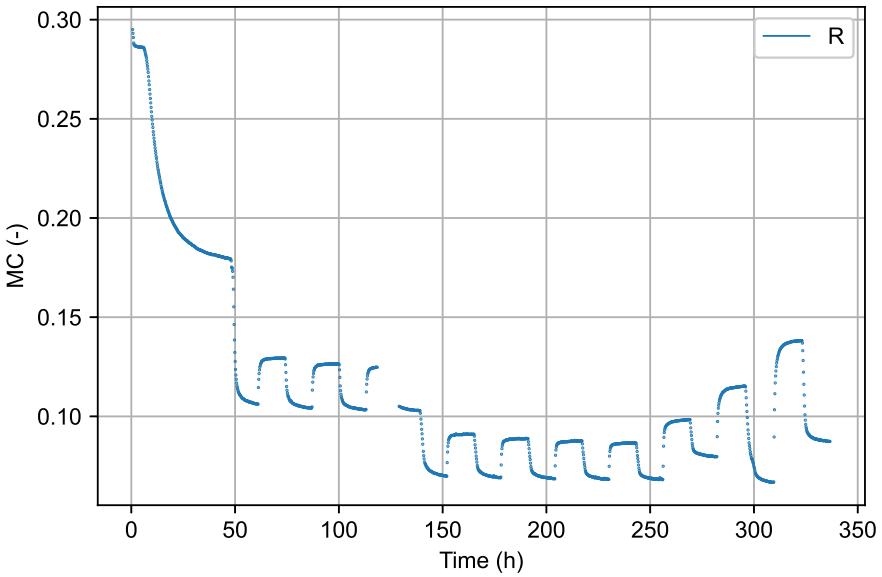


FIGURE 3.6 – Moisture content evolution for beech samples

The moisture content versus time was calculated following Eq. 3.6, thanks to the free

[29] Marcel GOULET. « Die Abhängigkeit der Querzugfestigkeit von Eichen-, Buchen- und Fichtenholz von Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich von 0° bis 100°C ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 18.9 (1960), p. 325-331. DOI : 10.1007/BF02627591.

[30] Wade H BEERY et al. « Quantitative wood anatomy - relating anatomy to transverse tensile strength ». In : *Wood and Fiber Science* 15 (1983), p. 395-407.

sample, and is shown in Fig. 3.6. The MC curve does not reach the same value during repeated RH cycles, due to the hysteresis of the sorption isotherm. For a given RH, e.g. 50 %, the EMC reached during desorption, here just over 10 % before 140 h, is higher than that reached during adsorption, here about 9 % after 150 h. The same observation can be drawn for RH at 70 %.

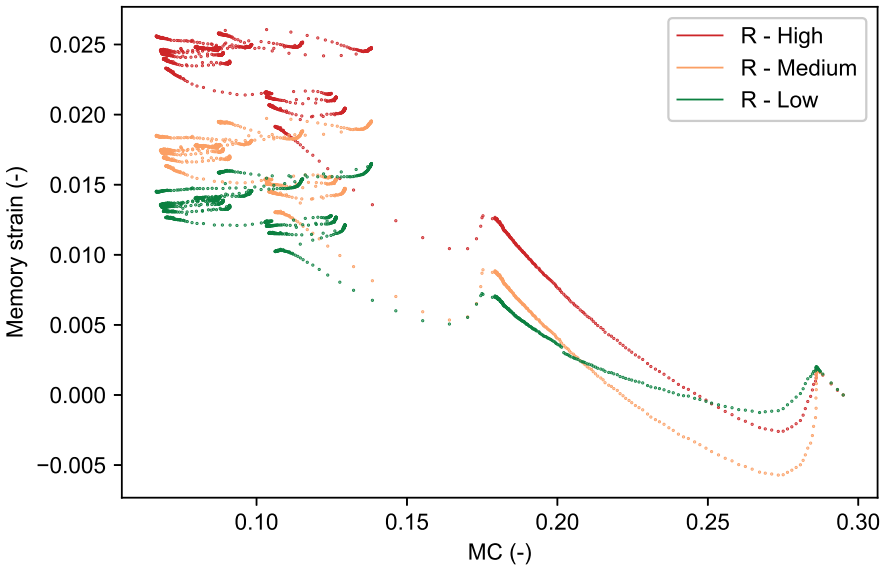


FIGURE 3.7 – Memory strain with moisture content evolution for beech samples loaded in the radial direction

3.3.2 *Mechanosorptive creep as a function of MC changes and load level (beech, radial)*

The memory strains calculated with Eq. 3.9 are plotted as a function of MC for the three samples under the different loads in Fig. 3.7. There is a clear monotonic effect of the stress level on the memory strain : the highest load generates the highest memory strain, and the lowest load corresponds to the lowest memory strain. The behavior of the three samples with moisture variations is however quite identical : each cycle increases slightly the memory strain.

To find a common mechanosorptive behavior under various load the ratio between the memory strain and the current stress, similar to compliance, was determinated and is shown in Fig. 3.8. It should be noted that this definition of memory compliance is unusual and rather artificial, since the memory creep, which results from the entire stress history and varies monotonically with MC cycles, is divided by the current stress level, which is a strong function of time (Fig. 3.5). However, this choice proves that the three load levels are nearly superimposed. Therefore, the behavior is additive and a common ratio between mechanosorptive strain and stress can be found, independently of the load level, at least for the stress range tested in this study, below 3.4 MPa. Yet, in our tests, the compliance decreases with desorption and increase with adsorption. This is in discordance with previous works, performed at a constant load level[31] [32] and is explained by the artifact exposed above. It should be noted that taking into account the shrinkage/swelling

[31] David G. HUNT. « Creep trajectories for beech during moisture changes under load ». In : *J Mater Sci* 19.5 (1984), p. 1456-1467. DOI : 10.1007/BF00563040.

[32] Martian ASSEKO ELLA et al. « Comparative investigation on viscoelastic and mechanosorptive creep behavior of two tropical hardwoods and one temperate softwood ». In : *Eur. J. Wood Prod.* 82.1 (2024), p. 35-52. DOI : 10.1007/s00107-023-02002-w.

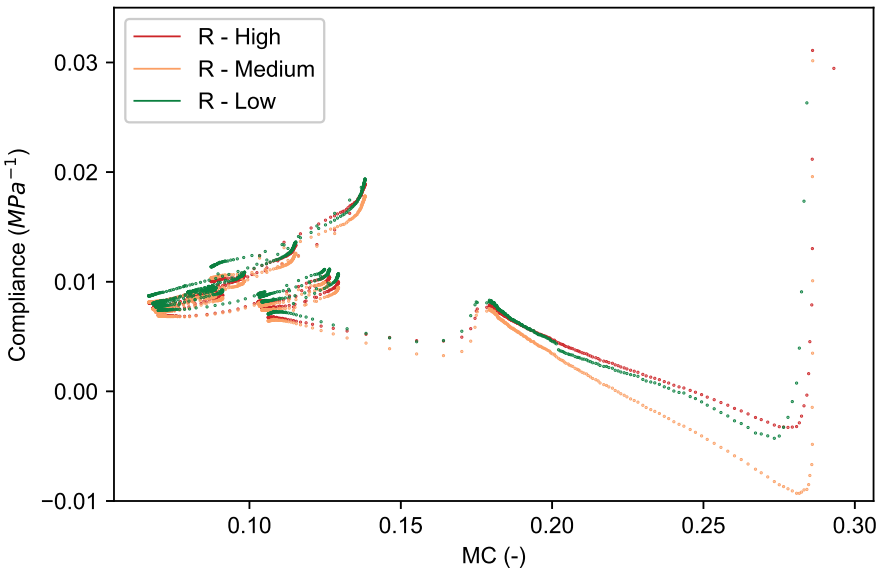


FIGURE 3.8 – Compliance with moisture content

of the sample cross section has been tested and does not change the trends.
Note that the first desorption, between fiber-saturation point (typically here at 29.5 %) and 18 % of moisture content, is not relevant for the analysis as the viscoelasticity, hydro-activated, might occurs more intensively with mechanosorption in this domain.

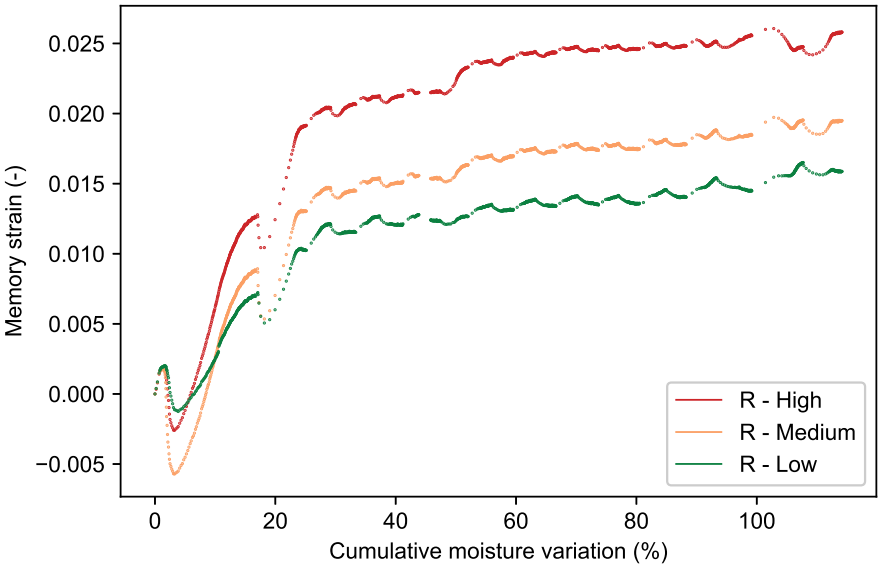


FIGURE 3.9 – Memory strain as a function of cumulative moisture content variation for beech samples loaded in the radial direction

Plotted as a function of cumulative moisture content variation (in absolute value) and shown in Fig. 3.9, the memory strains increase with the load level and globally increase with the cumulative variation with an asymptotic behavior. The first 20 % of cumulative MC variations are associated to the major memory strain increase, and the last 90 % of cumulative MC variations are associated to only a slight increase of memory strain.
Relative to the stresses, the memory strains expressed as compliances are shown in

Fig. 3.10 as functions of cumulative MC variations. All level loads are indistinguishable and evolve, even though there are significant variations with moisture cycles, around a fixed value of 0.01 MPa^{-1}.

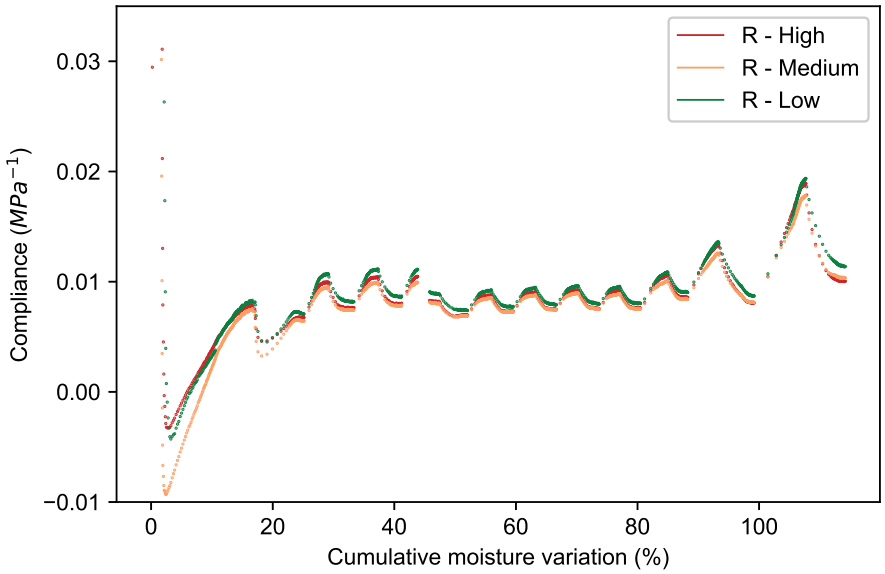


FIGURE 3.10 – Compliance as a function of cumulative moisture content variation for beech samples loaded in the radial direction

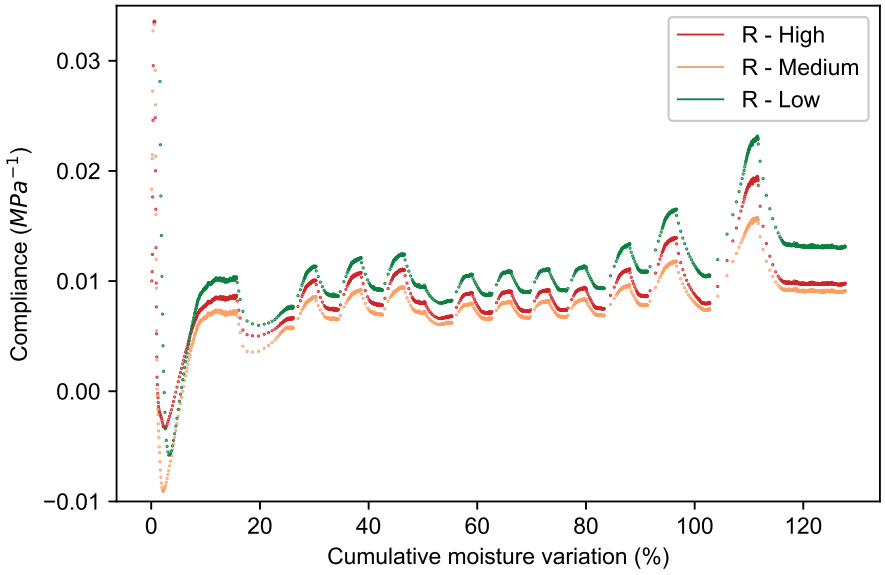


FIGURE 3.11 – Compliance as a function of cumulative moisture content variation for oak samples loaded in the radial direction

3.3.3 *Effect of species and direction*

The MC loading schedule at constant temperature, shown in Fig. 3.3 was also tested with oak in radial direction (*Quercus robur or petraea*). All parameters were kept the same, except the load levels that were adjusted to the maximum tensile strength measured for these samples, which was 13.5 MPa at a moisture content of 8.9 %. Typically, the

maximum stresses reached during this test were 2.9 MPa (High), 2 MPa (Medium), 1.4 MPa (Low), corresponding to around 21 %, 15 % and 10 % of the ultimate tensile strength, respectively. The compliances for oak, shown in Fig. 3.11, are quite similar to those for beech. There is a slight difference between the curves here for oak with load levels, but the compliances are also close to 0.01 MPa^{-1} after the first 20 % of cumulative MC variations. It is interesting to note that the compliance appears to be similar for these two hardwood species.

Tests in tangential direction were also performed for both species. In the case of oak, most flatsawn samples supported the loads without failure up to the end of the test. Typically, the maximum stresses reached during this test for each fork were 2.3 MPa (High), 1.9 MPa (Medium), 1.5 MPa (Low), corresponding to around 24 %, 20 % and 16 % of the ultimate strength measured in the tangential direction, respectively. The stress levels have similar orders of magnitude compared to the radial direction. This is consistent as, from radial to tangential, the stiffness is roughly divided by two but the shrinkage is roughly doubled. The results are shown in Fig. 3.12. Note that the sample under the highest load level broke for a cumulative moisture variation of 100 %. The compliances are very close to each other, suggesting an independence to load level also in the tangential direction. After the first 20 % of cumulative moisture variation, the compliances oscillate around a mean value, about 0.015 MPa^{-1}, which slighlty increase with cumulative MC variation. This value is higher than those in the radial direction, estimated about 0.01 MPa^{-1}.
This load orientation was also tested on beech. The less loaded sample showed very similar trends, while the two other, *High* and *Medium* broke for a cumulative moisture variation of 10 and 20 %, respectively.

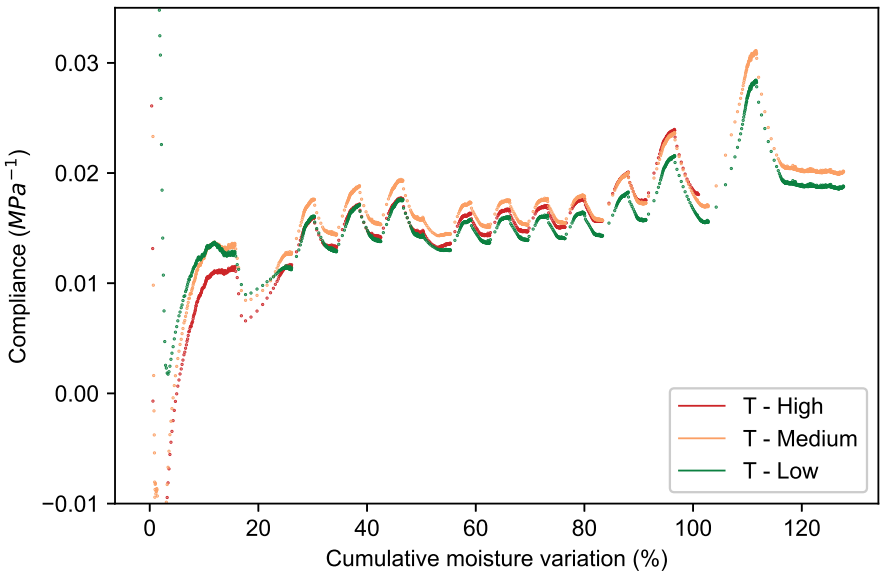


FIGURE 3.12 – Compliance as a function of cumulative moisture content variation for oak samples loaded in tangential direction

3.4 CONCLUSION

A new experimental set up, called the *Fork* device, has been designed, developed and used to characterize the memory strain of wood. This work focused on the mechano-

sorptive strain in the radial and tangential directions of hardwood samples under load and moisture content variations. In this test, the stress level changes with the moisture content, as may happen in a real situation for a piece of wood exposed to the variable conditions of its environment. This test therefore differs from the more common tests in the literature where a constant load is applied. The following conclusions can be drawn :

— the results highlight an increase of mechanosorptive strain with cumulative moisture content variations, tending towards a limit in the range of loads applied, typically here from 7.9 % to 15.3 % and from 10.3 % to 24.2 % of the ultimate strength for beech and oak respectively ;

— the memory compliance evolves with MC variations due to the change of stress in time but on a master curve independent of the load level and identical to oak and beech. However, the grain direction has an influence on the mechanosorptive behavior, the tangential compliance being higher than the radial one.

The *Fork* test is then an interesting experimental design, capable of providing very interesting data on mechanosorptive creep. In further works, these results will be used to tune the constitutive equation of wood, with the attempt to improve the prediction of the drying stress and quality in a kiln dryer supplied with intermittent energy.

Acknowledgements

ADEME is a partner of the project and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

Fagus sylvatica in green state was kindly provided by Gérard Ané, Tristan Denef, Didier Pierrel and Martin Pilon. *Quercus robur or petraea* in green state was kindly provided by Tristan Denef and Martin Pilon.

DECLARATIONS

Competing interests

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

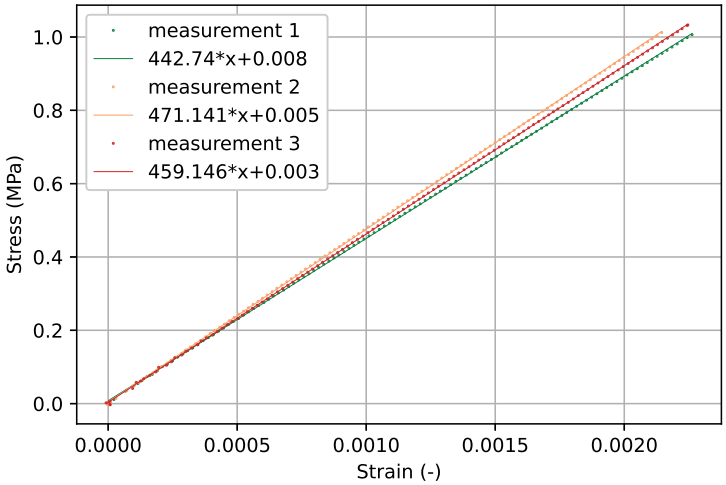
Author contributions

Conceptualization : Patrick Perré (PP), Romain Rémond (RR), Antoine Stéphan (AS) ; Methodology : AS, RR, PP ; Validation : RR, PP ; Data curation : AS ; Formal analysis and investigation : AS, RR ; Writing—original draft : AS ; Writing—review and editing : RR, PP, AS, Clément L'Hostis (CL) ; Visualization : AS ; Funding acquisition : RR, CL ; Resources : RR ; Supervision : RR, PP ; Project administration : RR.

3.a APPENDIX A - TEST FOR YOUNG'S MODULUS ESTIMATION



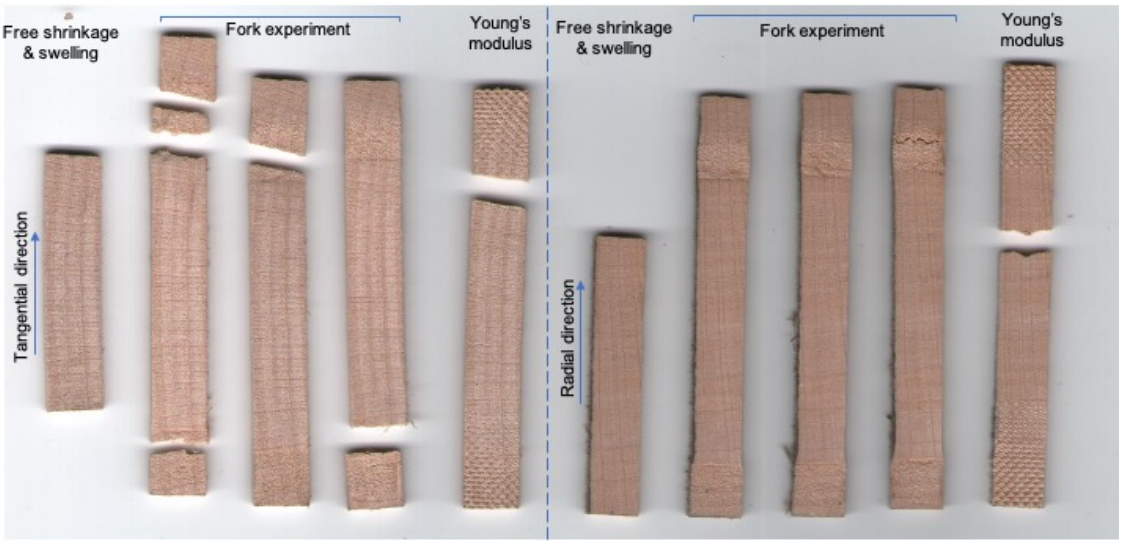
(a)



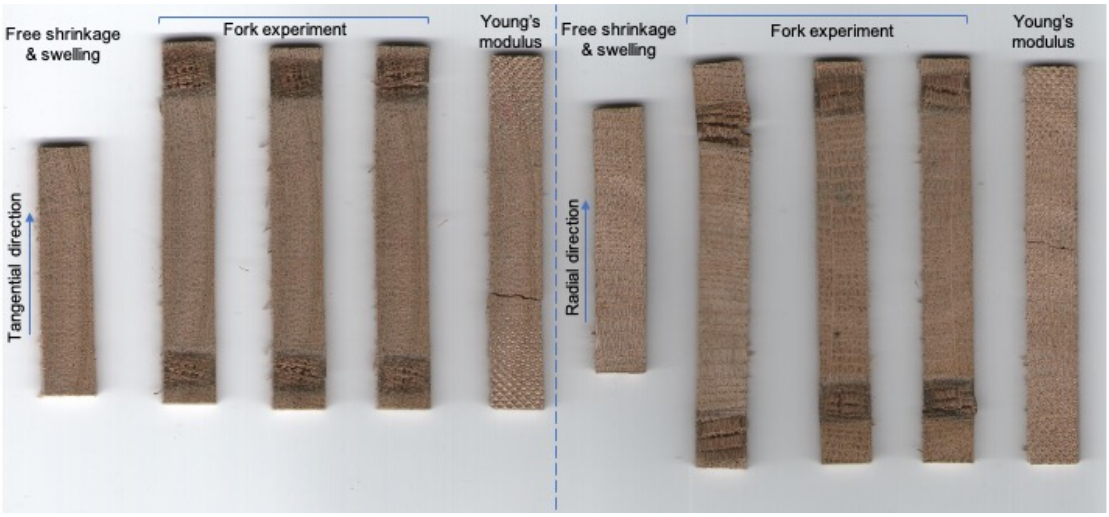
(b)

FIGURE 3.A.1 – Static testing machine for Young's modulus estimation, with sample and extensometer clamped. The image has been modified to hide the surrounding elements (a) and relation between stress and strain of a beech wood sample under tensile load in the tangential direction in green state, for Young's modulus calculation (b).

3.b APPENDIX B - SCANS OF SAMPLES



(a) Beech



(b) Oak

FIGURE 3.B.1 – Scans of the 5 twin samples at the end of the test in the tangential (left) and in the radial (right) directions and for beech wood (a) and oak wood (b)

3.c APPENDIX C - VISCOELASTIC CONTRIBUTION TO THE MEASURED MEMORY STRAIN

Prior to the following campaign, a specific test was performed to investigate the viscoelastic contribution at the temperature level used in the present work. For that purpose, the *Fork* test was performed on green twin samples, with 3 different loads in radial and in tangential directions. The climate conditions were set at 30 °C and at constant RH of 70 %. As there was no change in RH, the MC of the sample was constant once it reached the EMC and therefore the mechanosorption was no longer activated from that point.

The test with the largest effect of viscoelasticity, obtained with the stiffer fork, is shown in Fig. 3.C.1. The shrinkage of the sample between the green state and the EMC (15 %) induces a tensile stress on this sample which reached 1.9 MPa at 11 h and remained almost constant until the test ended. At that time the MC was still decreasing, contributing to activate the mechanosorptive creep. At 30 hours, the MC is close to its equilibrium value (at less than 3 % of its final value). From the start of the loading to 30 hours the memory strain includes the contribution of both viscoelasticity and mechanosorption. The deformation of the sample considered as pure viscoelastic creep correspond then to the deformation from t = 30 hours to the end of the test (nearly 300 hours). This deformation represents less than 5 % of the initial memory strain displayed during the initial state. This simple test proves therefore that the contribution of the viscoelasticity creep can be assumed to be negligible in the upcoming results.

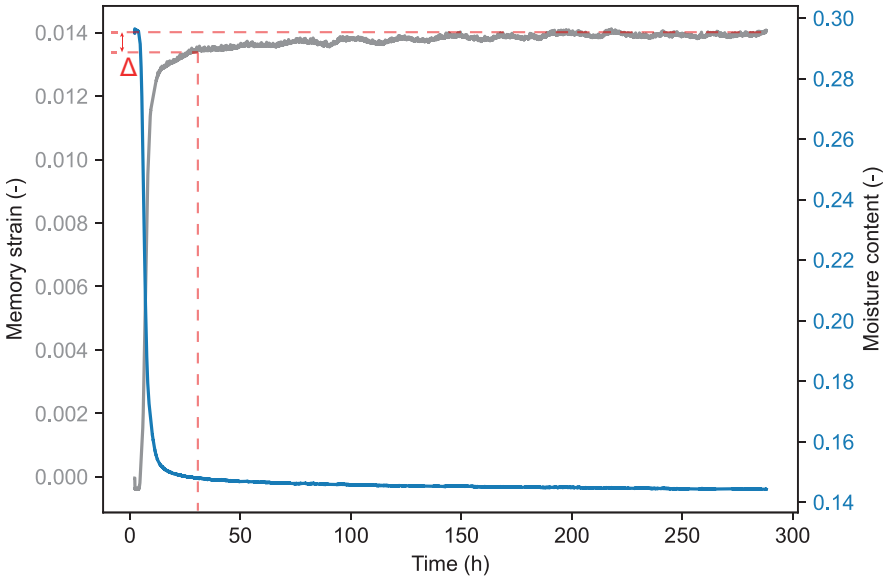


FIGURE 3.C.1 – Memory strain and moisture content of a loaded wood sample at constant RH. Δ is the deformation assumed to be viscoelastic creep

3.d APPENDIX D - RAW STRAIN MEASUREMENT RESULTS

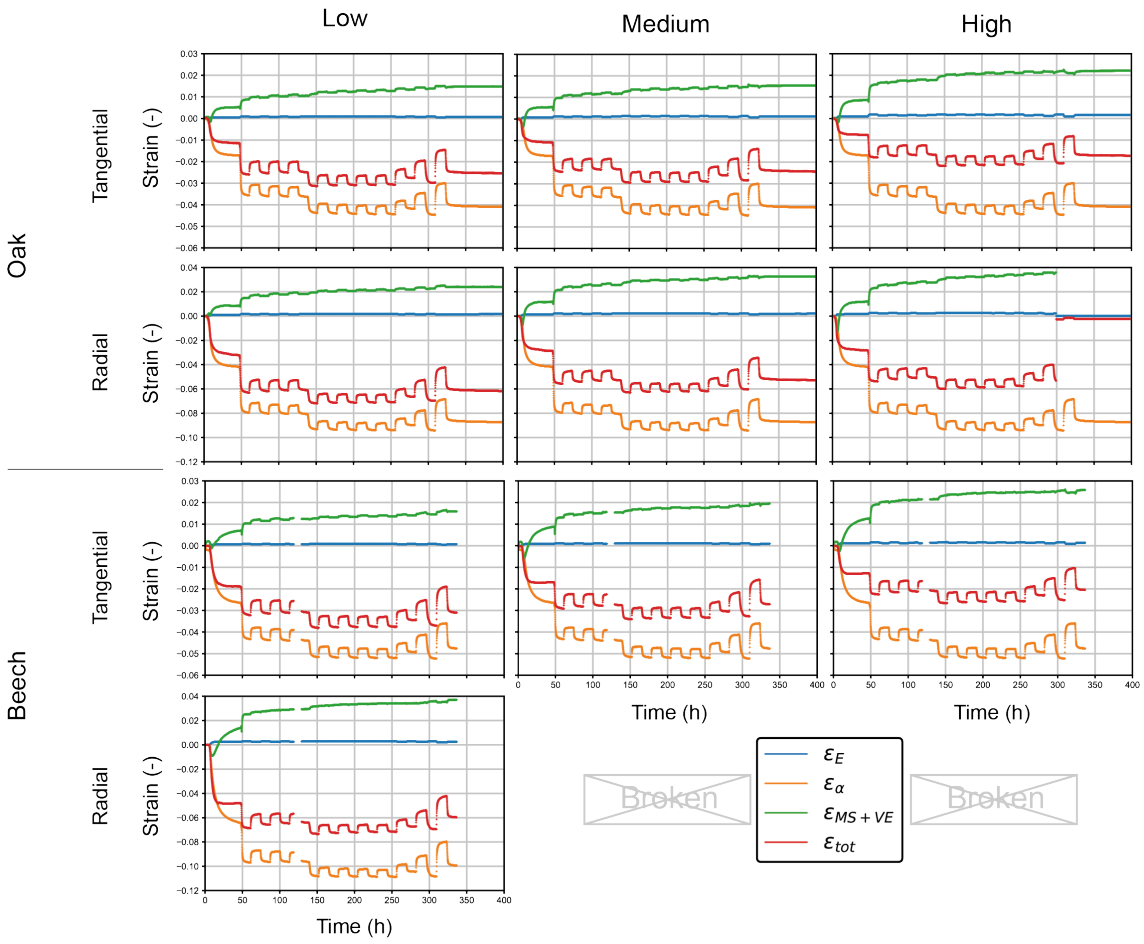


FIGURE 3.D.1 – Strains measured with the *Fork* experiment for beech and oak samples under tensile load in radial and tangential directions and for several levels of load.

4

Modélisation et prédiction du développement des contraintes pendant le séchage

Les campagnes d'essais menées dans le chapitre 3 ont permis de mesurer le comportement mécanosorptif d'échantillons de bois à teneur en eau considérée homogène, et leurs résultats sont réemployés dans ce papier. Cependant, lors du séchage d'une planche, son épaisseur crée une résistance aux transferts internes générant un gradient d'humidité qui s'accompagne de retraits différenciés. Ces retraits "gênés" dans le matériau sont à l'origine des contraintes de séchage. L'essai du *Flying Wood* [1] mérite d'être étudié car il permet de visualiser à la fois la cinétique de séchage et le développement des contraintes internes qui en découlent, par la mesure du rayon de courbure d'une demi-planche ouverte aux transferts de façon asymétrique. Les essais *Flying Wood* réalisés lors de précédents travaux [2] sur des planches de hêtre sont utilisés dans ce papier pour une analyse croisée avec l'essai *Fourche*. Ces deux expériences, complémentaires, sont utilisées pour retrouver, par méthode inverse, les paramètres d'un modèle mécanosorptif. L'objectif étant effectivement d'avoir un modèle mécanique prédictif pour le séchage du bois, plusieurs modèles de la littérature sont comparés. Le modèle proposé par Fortino et al. (2009) [3] s'est avéré assez proche des comportements observés et ses paramètres ont pu être ajustés par méthode inverse à partir des données des deux essais présentés. Dans ce sens, le modèle mécanique a été utilisé seul pour la comparaison de ses prédictions avec les résultats de l'essai *Fourche*, et il est couplé au code *TransPore* pour la comparaison des résultats de l'essai *Flying Wood*. Il a donc été nécessaire dans ce travail de réaliser un métamodèle de supervision en Python coordonnant le modèle mécanique, le code *TransPore* et un algorithme d'optimisation pour la mesure par méthode inverse des paramètres du modèle mécanosorptif. Cette approche a permis d'améliorer la prédiction du développement des contraintes de séchage du hêtre.

Ce papier sera soumis au journal *Wood Science and Technology* (date prévue de la soumission : décembre 2024).

[1] Brandao et Perré, « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ».
[2] Salem et al., « Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber ».
[3] Fortino et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures ».

Assessing mechanosorptive strain contribution to drying stress with Fork and Flying Wood tests

Antoine STÉPHAN [1], Patrick PERRÉ [2 3], Clément L'HOSTIS [4], Romain RÉMOND[1]

ABSTRACT

This paper analyzes the results of two previously published measurement campaigns carried out on two original experimental setups. The first, the *Fork* test, is used in this work to test the ability of the mechanical model to capture the observed mechanosorptive strain in beech samples under different tensile loads and non-monotonic moisture content variations. The second test, the *Flying Wood* test, is used to evaluate the ability of the mechanical model, embedded into a heat and mass transfer model, to predict drying stress development in a beech board. Several classical mechanosorptive models have been compared with these two complementary tests. Some of these models are able to simulate many of the observed trends, but the remaining differences show the need to improve the formulation. This work highlights the complementarity of these experiments for testing mechanical models for wood drying.

keywords : hardwood, cross grain directions, drying modelling, drying quality, rheological model, inverse analysis

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Épinal, 88000, France

[2] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, 91190, France

[3] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, 51110, France

[4] FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Champs-sur-Marne, 77420, France

4.1 INTRODUCTION

The quality of the wood at the end of the drying is of high importance for an industrial ; it affects the appearance, dimensions and mechanical properties of the material, and thus its value. To asset the performance of the final product and ensure its future use, soft drying conditions in the form of safe drying schedules are used, notably to avoid the risk of cracks [1]. Such empirical solutions are time-consuming and energy-intensive, and may not guarantee quality in the event of problems with the controller, boiler, etc., or meet the specific expectations of each user. During the drying process, the internal resistance to mass transfer leads to a moisture gradient within the section of the board, resulting in differential shrinkage and a stress field within the board. If the stresses exceed the strength of the wood, cracks will form. Predicting the maximum stress reached within the plank during drying as a function of drying conditions could provide answers to these questions and be used to optimize drying schedules.

For forward analysis of the impact of drying conditions on the product, numerous models have been developed for decades. They aim to reproduce the drying kinetics of the boards and predict their drying stress. Different rheological models have been proposed in the literature to express the stress-strain relationship of wood when subjected to load and moisture content changes caused by climatic variations. These models need to be embedded in computational models of heat and mass transfer to simulate the mechanical response of wood during drying. The mechanical state of wood is difficult to simulate as expected, since it has instantaneous and delayed linear behavior, but also non-linear behavior, in particular when it is subjected to moisture variations [2]. The history of moisture content (MC) changes and load affects the mechanical behavior of the material [3] [4], and more precisely its mechanosorptive (MS) strain, which is a part of the memory strain of wood. This non-linear response to moisture variations and material stresses requires then an advanced modeling. The first works that propose models for this complex relation [5] have been continuously and progressively enhanced until now [6] [7]. The prediction of recoverable and irrecoverable strains is now possible. The complexity of the model proposed requires the identification of many parameters through experimental campaigns.

The residual drying stresses or casehardening is sometimes evaluated in industry with destructive methods, at the end of the drying, with the prong test [8] and the slicing test [9]. These tests, by cutting in half the board section, allows the deformation of the material in accordance to the stress field. They revealed the severity of the drying schedule seen by the product by the curvature level of the slices after moisture equilibrium. Such method, destructive, could be replaced by a near-infrared detection of surface release strain during the process [10], on condition of being efficient also with industrial drying

[1] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

[2] B. N. UGOLEV. « General laws of wood deformation and rheological propertions of hardwood ». In : *Wood Sci. Technol.* 10.3 (1976), p. 169-181. DOI : 10.1007/BF00355738.

[3] ARMSTRONG et KINGSTON, « Effect of Moisture Changes on Creep in Wood ».

[4] Lennart ERIKSSON et Bengt NORÉN. « Der Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 23.5 (1965), p. 201-209. DOI : 10.1007/BF02612968.

[5] LEICESTER, « A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams ».

[6] GRIL, « Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches ».

[7] YU et al., « An improved model for the time-dependent material response of wood under mechanical loading and varying humidity conditions ».

[8] William T. SIMPSON et James C. WARD. « Chapter 8 Drying Defects ». In : *Dry Kiln Operator's Manual*. 1991, p. 27.

[9] MCMILLEN, *Stresses in wood during drying*.

[10] Ken WATANABE et al. « Nondestructive evaluation of drying stress level on wood surface using near-infrared

schedules. A method and a sensor for monitoring the stress along the process [11] has also been developed and patented. It gives an indication of the severity of the drying conditions and the risk of cracks throughout the drying process, but it is difficult to extract the compression caused by wood shrinkage from the sensor signal. The *Flying Wood* test [12] has been conceived to exhibit the stress of board during an asymmetrical drying by the evolution of the global curvature of the plank. The stress reversal due to memory strain is clearly shown by the reversal of the plank curvature. Such a test is on the right scale for assessing the drying quality of a plank. However, it is difficult to assess the relevance of the assumed memory strain model on the basis of the *Flying Wood* experience alone. In fact, the development of curvature results from the development of moisture content, temperature and stress fields within the board but also on their variations in time and on the history of their variations. The *Fork* test [13] can complement this initial test by characterizing the memory strain without a moisture gradient within the sample. It is then possible to test the relevance of the mechanical formulation alone.

The main objective of this work is to show the complementarity of these last two experimental setups in testing the robustness of the mechanical models in predicting the development of drying stresses. Simple and commonly used MS models were selected to support this work. After detailing the computational model and the experimental setup the results of their use for comparing the MS models are presented. The first part of this work aims actually to find a MS model that could be predictive for these two tests. The second part aims to identify the best parameters of the chosen MS model for mechanical prediction using the inverse method. The results are then discussed with particular emphasis on the MS behavior.

4.2 MATERIALS AND METHODS

4.2.1 *Experimental setups*

Fork experiment for investigating mechanosorptive behavior

This new experiment has been described in detail in an earlier publication [13], and some of the results obtained have been reused in this paper. It consists of measuring the behavior of wood samples under tensile stress at varying moisture content (Fig. 4.2.1). The contribution of the memory part to the total strain is determined thanks to an unloaded twin sample. Since the samples were only 3 mm thick in the longitudinal direction, where the mass transfer coefficients are the highest due to the orientation of the vessels in the same direction, the moisture content was considered to be homogeneous in the sample. The total strain could then be measured free of differential shrinkage within the sample thickness, considering only the level of loads applied and the moisture content history. Beech (*Fagus sylvatica*) samples were firstly at green state and entered their hygroscopic domain for the first time during the tests. The tensile stresses applied in the radial direction of the material were below 3.3 MPa during the tests, which represents 15.3 % of the measured ultimate strength.

spectroscopy ». In : *Wood Sci. Technol.* 47.2 (2013), p. 299-315. DOI : 10.1007/s00226-012-0492-9.

[11] Ottaviano ALLEGRETTI et Silvia FERRARI. « A Sensor for Direct Measurement of Internal Stress in Wood During Drying: Experimental Tests Toward Industrial Application ». In : *Drying Technology* 26.9 (2008), p. 1150-1154. DOI : 10.1080/07373930802266256.

[12] BRANDAO et PERRÉ, « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ».

[13] Antoine STÉPHAN et al. « The fork device: a test for estimating the memory creep of wood under load during moisture variation (under review) ». In : *Wood Science and Technology* (2024). DOI : 10.1007/s00226-024-01606-6.

The tests were carried out at a low temperature, 30 °C, so as not to activate the viscoelastic properties of the wood and reduce its contribution to the memory strain. In this way, the observed memory strain should be mainly due to mechanosorptive strain.

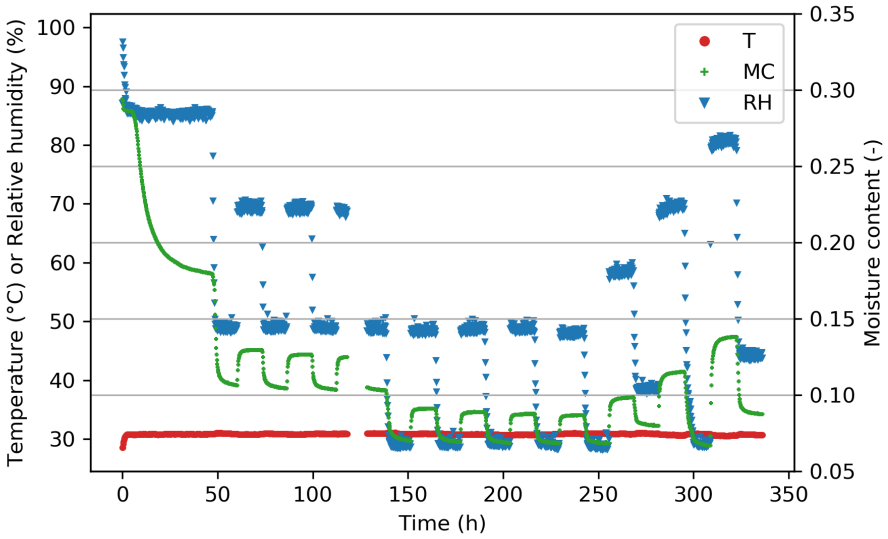


FIGURE 4.2.1 – Boundary conditions of *Fork* test. T and RH are the temperature and relative humidity in the chamber respectively.

Flying Wood test for investigating the drying stress development

The drying stress development within a board has been studied with the *Flying Wood* test, developed by Brandao and Perré (1996) [14]. The *Flying Wood* test uses only half the thickness of a drying board, isolating five sides with aluminium foil to have only a single exchange surface with a one-dimensional mass transfer. It presents the same drying kinetics as a full board, but reveals the development of the drying stress through a global curvature of the half-board. The radius of the curvature and its direction is highly dependent of the drying kinetics and the potential relaxation of stress by memory creep. The experimental results used in this work are those from Salem et al. (2017) [15]. The test has been performed on beech samples with dimension 150x100x5 mm (LxTxR for the radial test and LxRxT for the tangential test).

The first test was carried out at a constant dry-bulb temperature (31 °C) and relative humidity (41 %). A second test was conducted at a constant temperature (31 °C) and oscillating relative humidity between 30 and 60 %.

4.2.2 *Computational tools for simulating drying and mechanical wood behavior*

The heat and mass transfer model TransPore

Developed to simulate the coupled heat and mass transfer in porous media the code *TransPore* [16] was used to calculate the drying kinetics during the *Flying Wood* test, i.e. the moisture content and temperature at each node of the mesh across the board thickness.

[14] BRANDAO et PERRÉ, « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ».
[15] SALEM et al., « Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber ».
[16] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».

The reader could refer to the above reference to have a detailed description of the set of equations or synthetically in the recent work of Perré et al. (2023) [17].

The drying conditions measured in the experiment and the characteristics measured on the sample (dimensions, initial moisture content, oven dry density) were used as input parameters to the *TransPore* code. The average physical properties of beech are used, except for the diffusion coefficient, for which the value has been set to a value within the possible range of variation of this parameter. This will ensure that the drying kinetics of the experimental and simulated curves are close. The main transfer properties used in this work are presented in Appendix 4.A.

Mechanical model

Stresses and deformations develop in the test samples due to shrinkage. The mechanical model presented here was used alone for the *Fork* test because the moisture field within the sample can be considered almost homogeneous. Whereas, the mechanical model is embedded in the *TransPore* code for the *Flying Wood* test where internal mass transfer resistance occurs within in thicker specimens.

This model adopts a rigorous one-dimensional mechanical formulation whose constitutive equations gives the total strain tensor as the sum of several contributions. Plasticity is not considered in this work. Shrinkage is supposed to be proportional to variations in bound water content, elastic strain is related to actual stresses via Hooke's law, and the memory strain is the sum of the viscoelastic and mechanosorptive strains. The viscoelastic expression uses four thermally activated Kelvin's elements whose values have been identified from different creep tests on spruce [18]. As we have already seen, its effect is negligible under the conditions of our tests. With regard to the formulation of the mechanosorptive strain, different rheological model often used in the literature have been embedded in the mechanical model and tested (the main mechanical properties are given in Appendix 4.A) :

— Model 1. The widely used single dashpot which is a function of the absolute value of the moisture change ;

— Model 2. A Kelvin-Voigt unit, analog to a dashpot parallel to a spring, introduces a limit to the creep. It has been notably studied by Salin (1992) [19] ;

— Model 3. It is composed of 3 Kelvin-Voigt units in series, taking into account the different characteristic moisture ranges that allow to increase the MS levels contribute to the creep rate ;

— Model 4. It consists of the model 3 with an additional element for describing irrecoverable mechanosorption . The model 4a and 4b are set with parameters obtained by Svensson and Toratti (2002) [20] and Fortino et al. (2009) [21] respectively. This model includes the classical features of the (+)/(-)/(++) cases introduced

[17] Perré et al., « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids ».

[18] Patrick Perré et Joëlle Passard. « A Physical and Mechanical Model Able to Predict the Stress Field in Wood over a Wide Range of Drying Conditions ». In : *Drying Technology* 22.1 (2004), p. 27-44. doi : 10.1081/DRT-120028202.

[19] Salin, « Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model ».

[20] Svensson et Toratti, « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity ».

[21] Fortino et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures ».

earlier by Ranta-Maunus (1975) [22].

Inverse analysis

The mechanical model used the experimental boundary conditions and the material properties as inputs, and calculated the MS strain for the *Fork* test as output. For the *Flying Wood* test, the mechanical model used the above elements as inputs, together with the evolution of the temperature and MC fields within the board computed by the *TransPore* model, and output the evolution of the board curvature during drying. An optimization code has been used to find the best parameters of the model for retrieving the experimental results by minimizing an objective function. This function included the error between the simulated and the experimental values and is defined in Eq. 4.1 :

$$f = \gamma_{FW} \cdot \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^{time} \left(r_{exp}(t) - r_{calc}(t)\right)^2}{\sum_{t=0}^{time} r_{exp}(t)^2}} + \gamma_{fork} \cdot \sum_{j=1}^{3} \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^{time} \left(\varepsilon_{ms,exp}(t) - \varepsilon_{ms,calc}(t)\right)^2}{\sum_{t=0}^{time} \varepsilon_{ms,exp}(t)^2}} \tag{4.1}$$

where $r_{exp}(t)$ and $r_{calc}(t)$ are the curvature radius of the *Flying Wood* test measured and simulated respectively, $\varepsilon_{ms,exp}(t)$ and $\varepsilon_{ms,calc}(t)$ are the mechanosorptive strain of the *Fork* test measured and simulated respectively, $time$ is the duration of the considered test. Weighing coefficients γ_{FW} and γ_{fork} were used to consider the two tests, the *Flying Wood* and *Fork* tests respectively, into the same objective function. The ponderation has been chosen to promote the solutions succeeding to retrieve the curvature inversion, with $\gamma_{FW} = 2$ and $\gamma_{fork} = 1$.

The optimization code developed in the Python language was the simulated annealing, developed by Xiang et al. (2013) [23]. The algorithm parameters are those successfully used in a previous work [24].

4.3 RESULTS AND DISCUSSION

4.3.1 *Comparison of the models with the experiments*

The four MS models have been used in the simulation of the *Fork* and *Flying Wood* tests and the results have been compared with the experimental value as shown in Fig. 4.3.1a and 4.3.1b respectively. By default, the parameter values of models 1 to 3 are set to those suggested by Svensson and Toratti (2002) [25], which they obtained by fitting these models to the results obtained from dry Scots pine samples that were subjected to a constant load while the surrounding humidity was cycled. The comparison of the models with two others twins sample on the *Fork* test are gathered in Appendix 4.B. The model 1 succeed to retrieve the increase of strain with variations of MC but don't converge to a limit as present on the measured values. Despite numerous MC variations, the memory strain measured with the *Fork* test approaches an asymptotic value, which can be interpreted as a limit (Fig. 4.3.1a). The single Kelvin-Voigt element set in the

[22] RANTA-MAUNUS, « The viscoelasticity of wood at varying moisture content ».

[23] XIANG et al., « Generalized Simulated Annealing for Global Optimization ».

[24] Antoine STÉPHAN et al. « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ». In : *Drying Technology* 42.7 (2024), p. 1178-1187. DOI : 10.1080/07373937.2024.2323095.

[25] SVENSSON et TORATTI, « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity ».

model 2 appears suitable for reproducing the memory strain of a sample in the *Fork* test. However, the same parameter values used to predict the curvature in the *Flying Wood* test appear to be unsuitable, as the simulated results differ significantly from the experimental data, as shown in Fig. 4.3.1b.

The parameters used in MS model 3, three Kelvin-Voigt elements, appear to be inappropriate to reproduce the magnitude of the memory strain measured on the *Fork* sample or the curvature reversal observed in the *Flying Wood* test. The identification of more appropriate parameters is necessary and will be investigated in the next section.

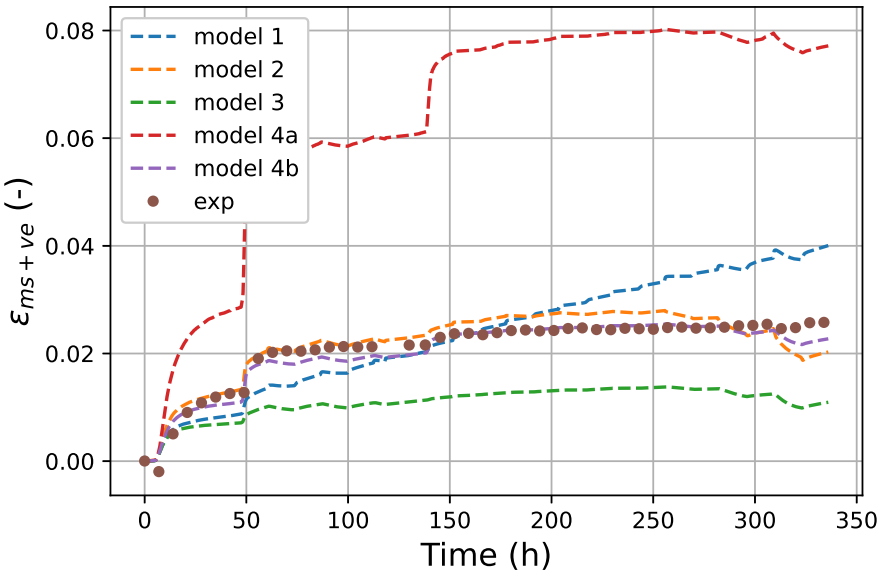
Despite low magnitudes of curvature the model 4a succeed to retrieve the time of curvature reverse of the *Flying Wood*, but the comparison with the *Fork* test measurements reveals that this set model can't be used as it. With the parameter values from Fortino et al. (2009) [26], described as model 4b, it is able to capture both the memory strain evolution in the *Fork* test (Fig. 4.3.1a) and the curvature reversal in the *Flying Wood* test (Fig. 4.3.1b). While the model 4b shows good agreement with the experimental and simulation results, the analysis in Fig. 4.3.2 reveals that most of the memory strain comes from the irrecoverable contribution. This irrecoverable memory strain is often associated to the "+ +" effect and has been observed during wetting of samples until a moisture content level never seen during the previous strain history [27]. In this work, the samples reach a new, lower moisture content. No effect "- -" has been reported in the literature for this drying condition. This abnormal effect from model 3b seems to be corrected in Yu et al. (2022) [28], where it no longer appears in the simulation-measurement comparisons on a loaded dry sample subjected to humidity cycles. Under our drying conditions from the green state of wood, we observe MS creep only during the desorption (-) and adsorption (+) phases, with no adsorption occurring above the highest level reached during loading (+ +). In this condition, model 4, corrected for the "- -" effect, should return the predictions of model 3.

4.3.2 *Identification of the mechanical model parameters*

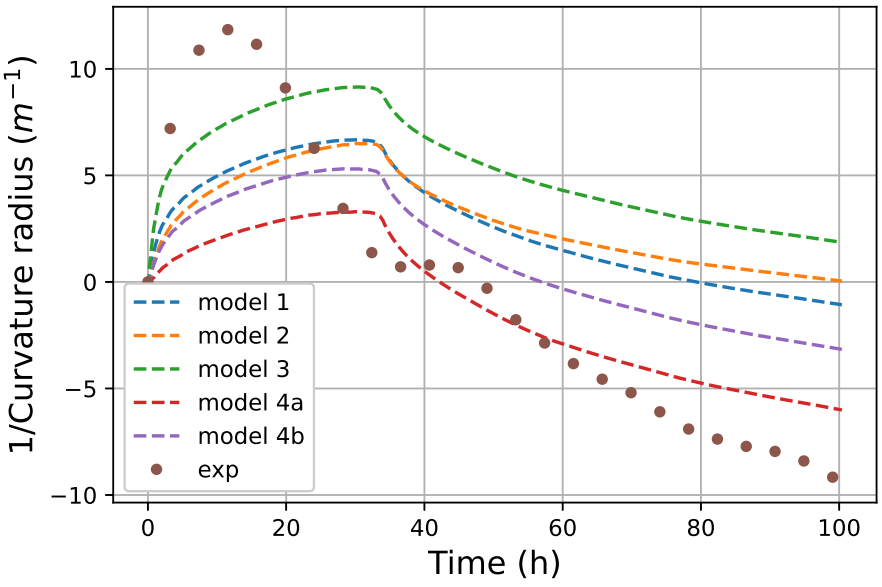
To understand the role of each coefficient in a Kelvin-Voigt element on the results of these two tests, a parametric analysis was conducted using a single Kelvin-Voigt unit. Initially, only the parameter τ was varied, with values ranging from 0.001 to 10, while the MS coefficient was kept constant at 0.016. Figure 4.3.3a clearly illustrates that as τ increases, the inversion of curvature in the *Flying Wood* occurs later, appears later, and the attenuation of the peak curvature at the beginning of drying becomes progressively weaker. It is interesting to note from Fig. 4.3.3b that as τ increases, the MS strain of the *Fork* test becomes weaker, and the dynamics induced by the cyclic variations in humidity are smoothed out.

In a second stage, only the parameter ms was varied, with values ranging from 0.004 to 1.6, while the τ coefficient was kept constant at 0.1. In this new configuration, we observe from Fig. 4.3.3c that as the coefficient increases, the curvature peak is more attenuated, and the inversion of curvature becomes more pronounced and occurs earlier. The relaxation of stresses due to MS strain appears to take effect right from the beginning of drying, driven by a significant increase of this strain with the initial variations in MC.

[26] Fortino et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures ».
[27] Ranta-Maunus, « The viscoelasticity of wood at varying moisture content ».
[28] Yu et al., « An improved model for the time-dependent material response of wood under mechanical loading and varying humidity conditions ».



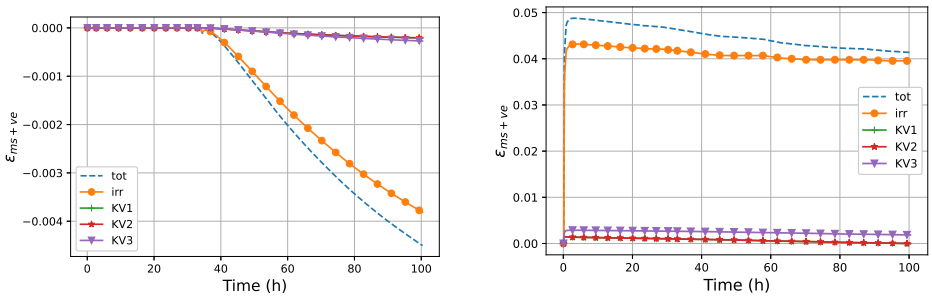
(a)



(b)

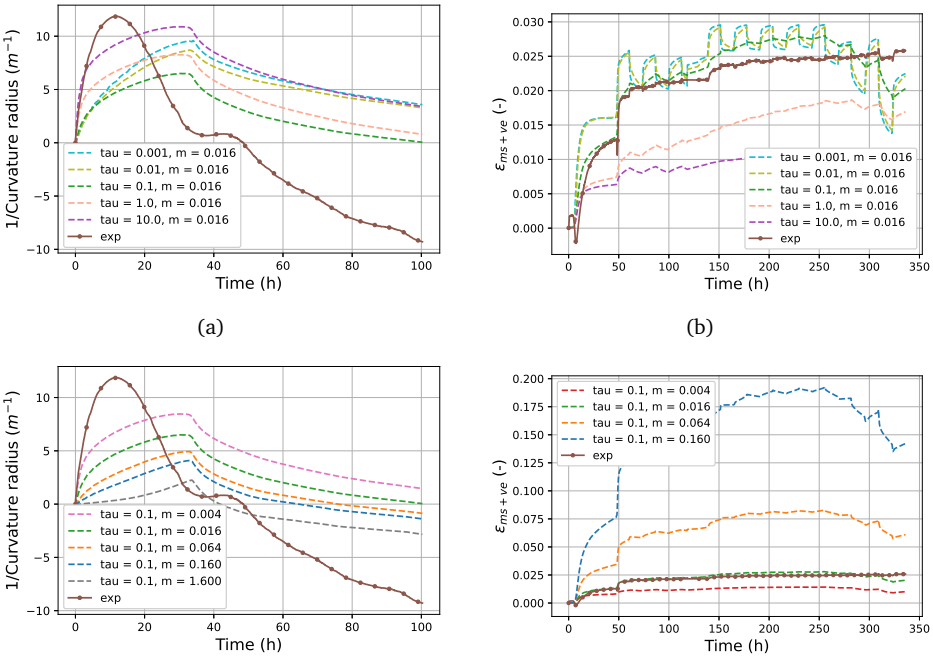
FIGURE 4.3.1 – Comparison between the different models used in the simulations and the experimental results of the *Fork* test for beech sample load at high level in the radial direction (a) and the experimental results of the *Flying Wood* test for beech sample of quartersawn board

This is further confirmed in Fig. 4.3.3d, where we see a substantial increase in MS strain with the cumulative cycles of humidity during the test as the MS coefficient increases.



(a) (b)

FIGURE 4.3.2 – Contributions of the Kelvin elements ($KV_{i=1,3}$) and irrecoverable element (irr) to the total MS strain (tot) at the core (a) and at the surface (b) of the board in the *Flying Wood* test using model 4b



(a) (b)

(c) (d)

FIGURE 4.3.3 – Parametric analysis conducted using a single Kelvin-Voigt unit for the MS model. Simulated results are compared with experimental measurements for the *Flying Wood* (a, c) and *Fork* (b, d) test configurations.

Following the previous comment, only the parameters of model 3, with 3 Kelvin-Voigt units, were identified, i.e. 6 parameters.

The inverse analysis uses the measurements from three *Fork* tests and the *Flying Wood* test. The intervals of unknown parameters are given in Table 4.3.1. It should be noted that the humidity cycles performed during the *Fork* test result in a cumulative absolute humidity variation that is 5 to 10 times greater than that observed at a single point on the *Flying Wood* sample. The *Fork* test allows the MS model to be tested over a wide characteristic moisture range.

After 12,000 iterations, corresponding to less than 84 minutes of computing, the code proposed the parameters listed in Table 4.3.2. The strain simulated by this model with these material parameters closely matches the measurements from the *Fork* test, as shown in Fig. 4.3.4. In contrast, the results from the *Flying Wood* test are presented in

[29] FORTINO et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures »

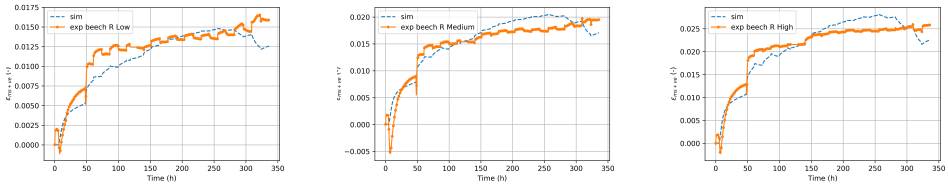
TABLE 4.3.1 – Boundary conditions of the dual annealing code for the search of parameters τ_i and ms_i, the characteristic moisture range and the MS compliance. $\tau_{i,0}$ and $ms_{i,0}$ are the starting values and correspond to the values set by Fortino et al. (2009) [29]

	starting values	lower bound	higher bound
τ_i (-)	[0.001, 0.01, 0.1]	$\tau_{i,0}/100$	$\tau_{i,0} \cdot 100$
ms_i (MPa^{-1})	[0.0006, 0.0006, 0.005]	$ms_{i,0}/100$	$ms_{i,0} \cdot 100$

TABLE 4.3.2 – Parameters identified for the model 4

			MPa
τ_1	0.23546	ms_1	0.0006
τ_2	0.23453	ms_2	0.0006
τ_3	0.23474	ms_3	0.0163

Fig. 4.3.5, revealing that the simulated curvature amplitude is significantly lower than the measured values. With the set parameters the model successfully identifies curvature reversal. However, this mechanical model still requires improvement to capture the time of curvature reversal and the curvature amplitude.



(a) (b) (c)

FIGURE 4.3.4 – Comparison of the MS strains measured with the *Fork* test with three different fork stiffness values (low (a), medium (b), high (c)) and simulated with mechanical model 3 and its optimized parameters

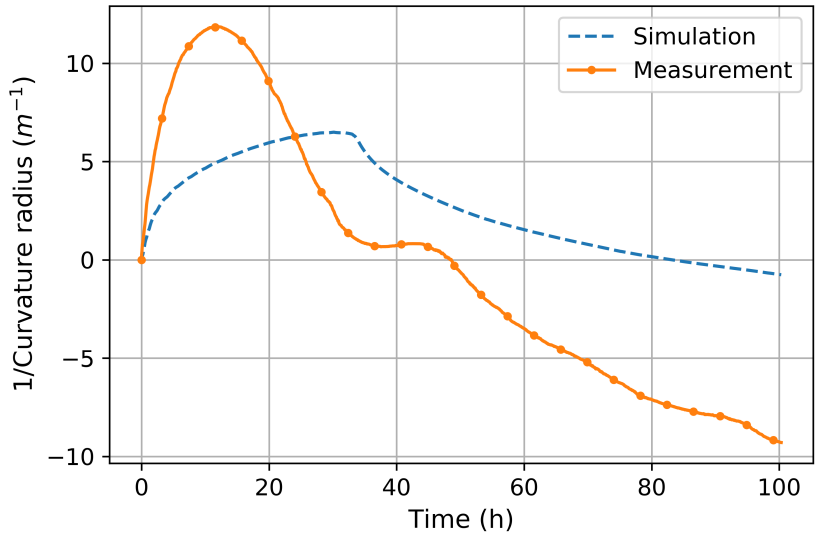


FIGURE 4.3.5 – Comparison of the board curvature measured with the *Flying Wood* test and simulated with mechanical model 3, with its optimized parameters

A single Kelvin-Voigt unit appears sufficient to capture the behavior of the sample tested in the *Fork* test, with the contribution of other units being relatively negligible for this test (Fig. 4.3.6). Regarding the *Flying Wood* test, Fig. 4.3.7b shows that MS strain,

which occurred at the start of drying to relieve surface tension, decreases during the drying process due to the recovery of the Kelvin-Voigt element and the reduction in surface tension. Comparing this behavior to the model 4b, the abnormal irrecoverable MS strain (Fig. 4.3.2b) that appeared at the beginning of surface drying remained locked for the rest of the test, causing an earlier inversion of the *Flying Wood*'s curvature.

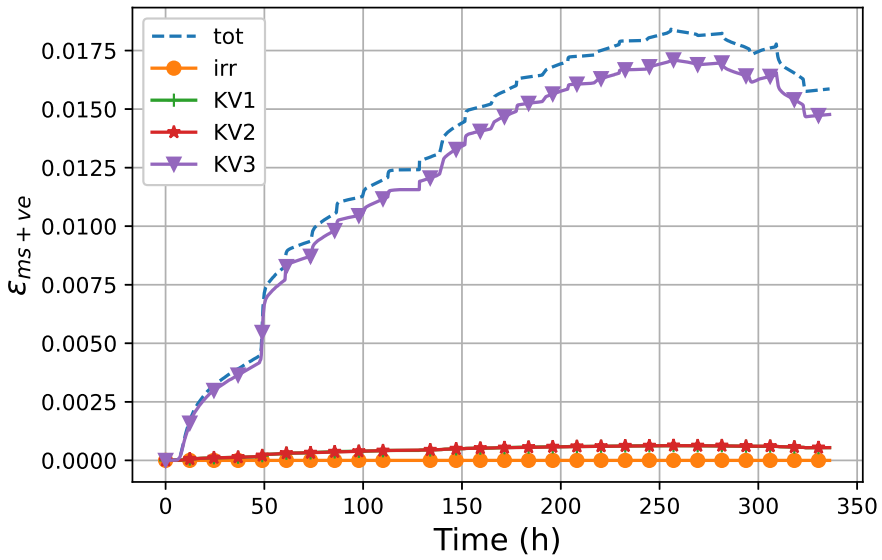
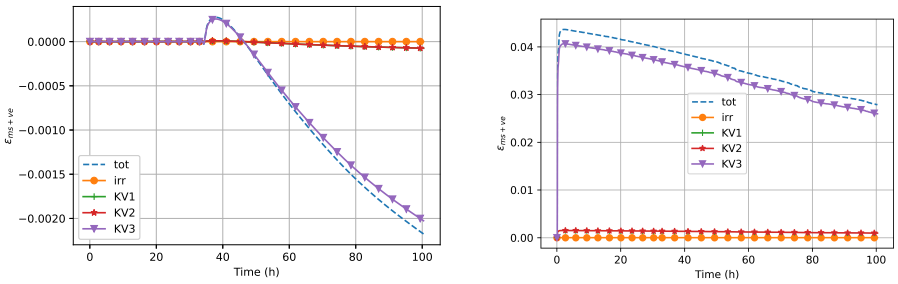


FIGURE 4.3.6 – Contribution of Kelvin elements to *Fork* simulation in model 3, with its optimized parameters



(a) (b)

FIGURE 4.3.7 – Contributions of the Kelvin elements ($KV_{i=1,3}$) and irrecoverable element (irr) to the total MS strain at the core (a) and at the surface (b) of the board in the *Flying Wood* test using model 3 with its optimized parameters

4.4 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

In this work, several embedded MS models have been compared with two complementary tests : the *Fork* and *Flying Wood* tests. Both experiments were conducted with samples under drying, which differs from the boundary conditions used to establish the mechanical models. Fortino et al.'s model (model 4b), with default parameters for Scots pine, is able to fairly accurately reproduce the observed behavior for beech in these two tests. However, the formulation used produces an irrecoverable MS strain during the first desorption, comparable to a "- -" effect that has not been reported in the literature on MS behavior. The use of multiple Kelvin-Voigt elements in series (model 3) requires inverse analysis to identify a set of parameters suitable for reproducing the *Fork* test. However,

there is a difference in curvature between the measurement and simulation for the curvature of the *Flying Wood* test, which is further away from the measurement than the previous model. Other MS formulations will have to be tested on these two experiments to enable the model to predict the development of stresses during low-temperature drying and thus hope to optimise drying quality using a mechanistic model.

Acknowledgements

ADEME is a partner of the project and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

DECLARATIONS

Competing interests

The authors have no relevant financial or non-financial interests to disclose.

4.a APPENDIX A - MECHANICAL AND TRANSFER PARAMETERS

TABLE 4.A.1 – Values of transfer parameters used in this work to simulate the drying kinetic. The other values used by the model are given in Perré and Turner (1999) [30] for softwood.

	Value	Unit
Porosity	0.63	(-)
Oven-dry density	550 (default value) or measured	$kg{\cdot}m^3$
Liquid permeability	determined in this work	m^2
Bound water diffusion	$D = D_0 \cdot exp\left(-9.9 + 9.8 \cdot X_b - \frac{4300}{T}\right)$ the value of D_0 was determined in this work	$m^2{\cdot}s^{-1}$
Sorption isotherm	$RH = 1 - exp\left(-0.9114 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right) - 3.904 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right)^2\right)$ with X_b the bound water content and X_{fsp} the fibers saturation point	(-)
Thermal conductivity	$\lambda = 0.14 + 0.3 \cdot X$	$W{\cdot}m^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
Heat capacity	$\rho \cdot C_p = \rho_0 \cdot (1400 + 4185 \cdot X)$	$J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
External heat transfer coefficient	15	$W{\cdot}m^{-2}{\cdot}°C^{-1}$
External mass transfer coefficient	0.015	$m{\cdot}s^{-1}$

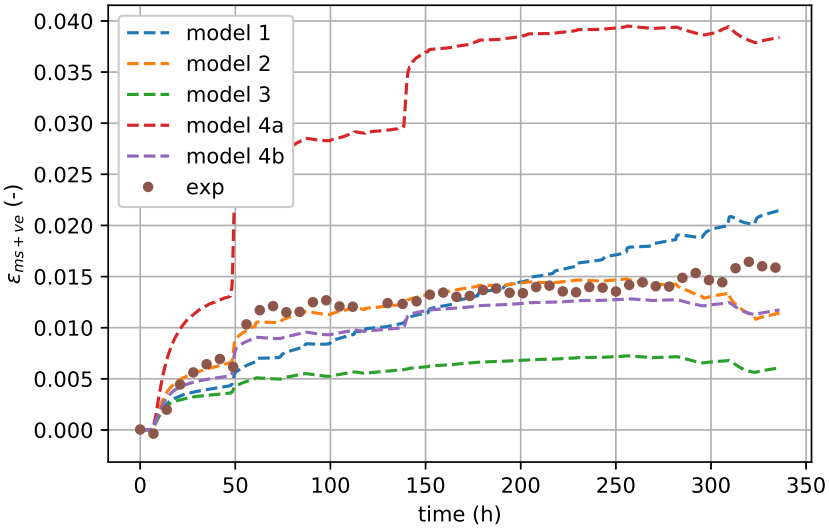
TABLE 4.A.2 – Values of the mechanical parameters used in this work to simulate the drying stress in beech samples.

		Value		Unit	Source
	Radial	Tangential	Longitudinal		
Shrinkage coefficient	0.23	0.48	0.005	%/%MC	
Young modulus	1.1	0.59	14.0	GPa	
Poisson coefficient	ν_{RT}=0.73 ; ν_{LR}=0.36 ; ν_{TL}=0.03			-	[31]
Viscoelastic compliances J and associated retardation time τ at 20 °C in radial direction (4 Kelvin's elements)	$J_1 = 2.82$; $J_2 = 8.0$; $J_3 = 18.9$; $J_4 = 51.3$ $\tau_1 = 1.77$; $\tau_2 = 700$; $\tau_3 = 4.9E8$; $\tau_4 = 2.5E5$			GPa^{-1} hours	[32]
Activation energy	$W_1 = 44.2$; $W_2 = 121$; $W_3 = 271$; $W_4 = 111$			$kJ{\cdot}mol^{-1}$	[32]
Mechanosorptive compliances (J)	Single dashpot (M1)	ms = 160 GPa^{-1}			[33]
	1 Kelvin-Voigt unit (M2)	J_1 = 0.8 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.1			[33]
	3 Kelvin-Voigt units (M3)	J_1 = 0.98 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.235			
Characteristic moisture range (τ)	Svensson et al. (2002) (M4a)	J_1 = 0.98 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.235 J_1 = 26.5 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.235 J_1 = 1.5 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.01 J_2 = 1.5 GPa^{-1} ; τ_2 = 0.1 J_3 = 5 GPa^{-1} ; τ_3 = 1.0			[33]
Irrecoverable mechanosorptive compliance (m_{irr}) in radial direction	Fortino et al. (2009) (M4b)	m_{irr} = 165 GPa^{-1} J_1 = 0.3 GPa^{-1} ; τ_1 = 0.01 J_2 = 0.3 GPa^{-1} ; τ_2 = 0.1 J_3 = 2.5 GPa^{-1} ; τ_3 = 1.0 m_{irr} = 33 GPa^{-1}			[34]

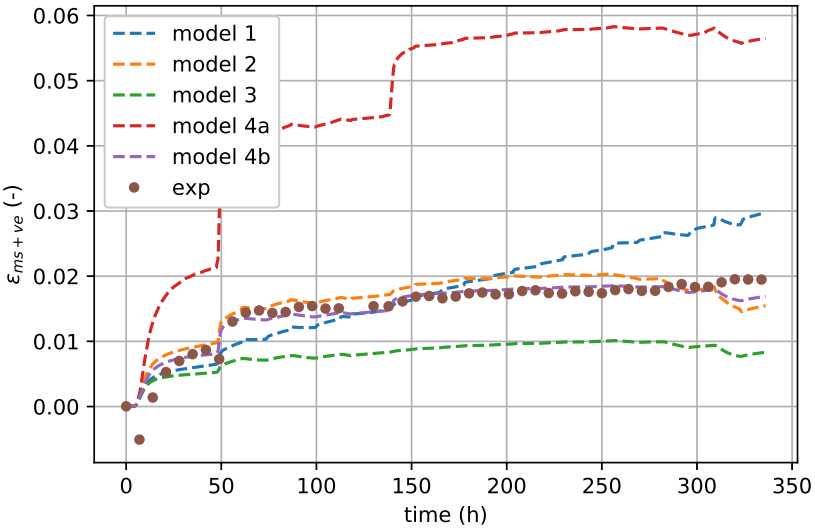
(*) The coefficients were provided in these references in the tangential direction of wood. As proposed by Fortino et al. (2009)[34], the MS coefficient in the radial direction is calculated using the elastic matrix ratios $\frac{E_T}{E_R}$, which has been taken here as 0.5

[30] Patrick PERRÉ et Ian W. TURNER. « A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42.24 (1999), p. 4501-4521. DOI : 10.1016/S0017-9310(99)00098-8

4.b APPENDIX B - *fork* TEST RESULTS AT LOW AND MEDIUM STIFFNESS LEVELS



(a)



(b)

FIGURE 4.B.1 – Comparison between the different models used in the simulations and the experimental results of the *Fork* test for beech samples loaded in the radial direction, at different fork stiffness values, low level (a) and medium level (b)

[31] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE »

[32] Daniel GUITARD. *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues éditions, 1987. ISBN : 2-85428-152-7

[33] SVENSSON et TORATTI, « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity »

[34] FORTINO et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures »

5

Optimisation d'une conduite traditionnelle via un métamodèle

Les conduites de séchages recommandées dans la littérature peuvent être considérées comme perfectibles, dans le sens où elles permettent des séchages aux résultats acceptables selon les attentes de l'opérateur·rice, de lots de planches aux débits, teneurs en eau, et caractéristiques potentiellement hétérogènes, sans pouvoir vérifier leurs potentiels d'amélioration. Établies au fil de décennies de pratique ces conduites traditionnelles sont adaptées à une source énergétique considérée constante et abondante ; dans le cas de l'utilisation d'EnR&R, par nature fluctuantes, de nouvelles conduites devront être proposées et choisies par l'automate avancé afin de répondre aux attentes de l'opérateur·rice. L'objectif de ce chapitre est de mettre en place cette fonctionnalité de l'automate futur qui est l'optimisation du séchage selon des critères de durée, de qualité, de consommation énergétique et de coût. Elle est dans un premier temps appliquée à des conduites traditionnelles, dont les nombreux paramètres ont été réduits au moyen de fonctions trajectoires. Le code de simulation *TransPore*, intégré dans un modèle multiéchelle *Multi_Wood_DryS*, est utilisé pour déterminer les durées, consommations énergétiques, coûts et homogénéités de séchages pour chaque conduite testée ; un modèle mécanique proche de celui utilisé dans le chapitre 4 est lui aussi intégré dans *Multi_Wood_DryS* et permet de simuler une flèche de slicing test pour chaque planche en fin de séchage, et donc de prédire une potentielle dégradation du matériau. L'ensemble de ces codes, développés en Fortran, est encapsulé et appelé par un métamodèle d'orchestration développé en Python. Celui-ci utilise un module d'optimisation prenant en compte l'objectif à atteindre. Ce code d'optimisation, utilisé de la même façon pour choisir des conduites de traitement thermique [1], vise ici à choisir la conduite de séchage qui répond à différents critères ; pour simplifier leur pondération dans la fonction objectif ils sont finalement réunis sous un seul critère, le coût, dont le modèle économique est issu des travaux de Salem (2016) [2]. La conduite de séchage traditionnelle du hêtre en 54 mm est ainsi optimisée selon différents scénarios et présente des gains pour plusieurs critères lorsqu'elle est optimisée sur le coût.

Ce papier a été publié par le journal *Drying Technology* en mars 2024 [3].

[1] Florez et al., « Probabilistic multi-objective optimization of wood torrefaction conditions using a validated mechanistic model ».

[2] Salem, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».

[3] Stéphan et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ».

Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost

Antoine STÉPHAN [1], Patrick PERRÉ [2 3], Clément L'HOSTIS [4], Romain RÉMOND[1]

ABSTRACT

Drying is the most energy consuming process in the industrial transformation of wood. The current energy and climate crisis makes it imperative to adapt the process to energy availability, in terms of quantity, cost and temperature level. Wood drying schedules are historically based on practice. In the present work, a mechanistic drying model is used as a predictive tool to adapt conditions to specific situations. A multiscale computational model, *Multi_Wood_DryS*, has been combined with a probabilistic optimization code to propose tailor-made drying schedules that meet operators' expectations in terms of energy consumption, quality, drying time and cost. Optimizations of drying schedules of a stack of boards are proposed. The cost-optimized schedule is advantageous for all criteria with a 48% reduction in drying time. The resulting metamodel is a first step toward an intelligent controller for wood drying.

keywords : multiscale modeling ; process optimization ; intelligent controller ; wood drying ; process efficiency

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Épinal, 88000, France
[2] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, 91190, France
[3] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, 51110, France
[4] FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Champs-sur-Marne, 77420, France

5.1 INTRODUCTION

To give standardized wood products durability, dimensional stability and mechanical properties, the material is typically dried in industrial kilns. This process requires typically between 1 and 2 kWh per kg of water removed and up to 3 kWh for the slowest processes such as thick pieces of oak, [1] [2] making it the most energy consuming stage in the wood processing chain. The current energy situation, combined with the climate crisis, is the main driving force to improve wood drying in terms of energy consumption. The drying schedules used to operate the industrial kilns are based on empirical knowledge that has been collected and simplified [1] [3] to try to achieve a good final product quality in a short time. Considering that kiln specifications do not allow for high relative humidity at high temperatures, the schedules consist in increasing the temperature and decreasing the relative humidity of the air as the moisture content of wood decreases. This allows the kiln to slow down external transfers at the beginning of the process to ensure moderate moisture content (MC) profiles and avoid mechanical degrade. The improvement of drying schedules by empirical approach is a very tedious, costly and time-consuming work. In addition, they assume the energy to be always available at low cost. Over the last 40 years, numerous works on drying modeling and simulation has been done to address this issue. [4] It is indeed a very complex work that requires a multiphysics and multiscale modeling to be close enough to the real industrial process of timber drying. [5] [6] [7] [8] To that purpose, in addition to coupled heat and mass transfer, the model must consider the solid mechanics aspects (shrinkage, constitutive equation and drying stresses), the diversity of wood (sawing pattern, sapwood/heartwood, inter-species variability) and the stack effects (evolution of drying conditions along the air flow). Some of these tools are now able to provide a good prediction accuracy on some objectives of the decision makers such as the drying time or the energy consumption and in a reasonable computation time. The optimization of the drying schedule has been attempted to reduce the drying time, the energy consumption and the process duration. [9] This demand is even greater in today's industrial environment, where change has become a constant and the process needs to adapt to changes in energy costs and availability, or changes in product quality requirements. A deterministic approach implemented in the kiln controller could provide drying expertise to companies, offering them the best solution for their specific configuration and expectations. The aim of this work was to develop an optimization algorithm that uses the objectives of the decision maker and a comprehensive model of wood drying to search for a trade-off solution. This work focuses on low temperature

[1] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

[2] Patrick PERRÉ et al. « Energy Issues of Drying and Heat Treatment for Solid Wood and Other Biomass Sources ». In : *Modern Drying Technology*. T. 4. Energy saving. John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 245-293. ISBN : 978-3-527-63172-8.

[3] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.

[4] PERRÉ et al., « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids ».

[5] PERRÉ et al., « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ».

[6] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

[7] V. ZADIN et al. « Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns ». In : *Applied Mathematics and Computation*. The Fourth European Seminar on Computing (ESCO 2014) 267 (2015), p. 465-475. DOI : 10.1016/j.amc.2015.01.104.

[8] Jarl-Gunnar SALIN. « Information transfer to kiln operators in the form of drying simulation models ». In : (2001), p. 11.

[9] Yves FORTIN et al. « A Simulation Tool for the Optimization of Lumber Drying Schedules ». In : *Drying Technology* 22.5 (2004), p. 963-983. DOI : 10.1081/DRT-120038575.

convective drying, the most widespread industrial conventional kiln drying processes. [10] The first part introduces the numerical simulation tool and its capabilities. Then, the purpose, expression and forms of the path functions (evolution of drying conditions during the process) used as degree of freedom for optimization are explained. After the presentation of the user criteria, the objective function and a method for its minimization are explained. In the last part, the results of such optimization on the drying of beech planks are presented and discussed. The result of an optimization on a single criterion, the cost, is finally presented.

5.2 MATERIALS AND METHODS

5.2.1 *Numerical simulation of wood drying*

In this work, the multiscale and multiphysics computational model *Multi_Wood_DryS*, [11] [12] developed in the programming language Fortran, has been used. This model simulates the drying at three intricate scales : kiln, stack and board. The computational model used at the local scale of the board is the one-dimensional version of the code TransPore, [13] which is used for the very fast simulation of coupled heat and mass transfer in porous media. A mechanical model [14] [15] was embedded in *TransPore* to estimate the strain and stress which develops during drying, so that quality issues can be addressed. The stack level is able to compute the drying of hundreds of boards simultaneously and to account for air flow with boards interactions and for wood variability. [12] At the kiln level, the *Multi_Wood_DryS* code calculates the energy consumption necessary to reach the drying conditions set by the drying schedule, accounting for the characteristics of the kiln and the stack behavior. [11] More details can be found about the model in the previous references.

5.2.2 *Path functions*

A conventional drying schedule is given as a table of values (pair dry bulb temperature (T_{db}) – equilibrium moisture content (EMC) for successive MC ranges of the wood load) which are the drying conditions to be applied as the wood moisture content decreases. [10] [16] Figure 5.2.1 depicts an example of the drying of a stack of beech boards, 54 mm thick, dried with conventional drying schedule proposed by Aléon (2012).[10] The drying schedules generally start with soft drying conditions (high EMC- noted below EMC_{max}, low T_{db} - noted below $T_{db,min}$) maintained constant as long as the MC is higher than a starting MC (MC_{start}), which is nearly 35 %, the upper limit of the range where MC measurement by the resistive method remains accurate. Then, the drying schedule generally increases the temperature and decreases the relative humidity of the air for each new row in the table as the moisture content of wood decreases. The last drying conditions of the schedule ($T_{db,End}$, EMC_{End}), more severe drying conditions, are maintained until the target MC is reached by the kiln wood load.

[10] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.
[11] PERRÉ et al., « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ».
[12] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».
[13] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».
[14] RÉMOND et al., « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood ».
[15] SALEM, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».
[16] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.

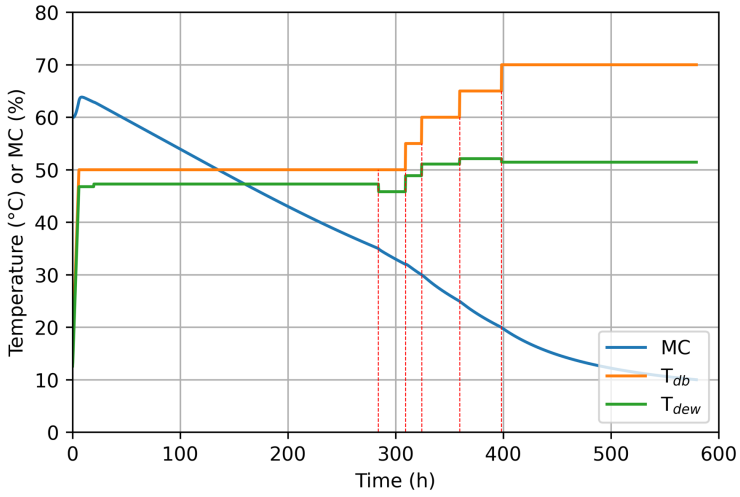


FIGURE 5.2.1 – Evolution of the mean MC of a stack of beech boards, 54 mm thick, dried with conventional drying schedule proposed by Aléon [17]. The red dashed line depicts the changes in drying conditions in the schedule according to the value of the mean MC of the wood load. T_{dew} is the dew point temperature (Tdp)

Figure 5.2.2 depicts the drying schedule proposed by Joly and More-Chevalier [18] for oak with blue dots and those of Aléon (2012) [17] for beech with orange circles. The optimization of such a schedule would involve more than 24 parameters in the cases of oak. To reduce the number of parameters, conventional drying schedules have been simplified into parametric functions. For each schedule, two continuous functions of the actual moisture content of the wood have been defined : one for the dry-bulb temperature (T_{db}), and one for the equilibrium moisture content (EMC). The functions have been built to fulfil the following requirements :

1. the curve of the function must be able to interpolate the series of data points of T_{db} and EMC of the conventional drying schedules
2. the numbers of parameters to describe these paths should be as small as possible
3. the boundary conditions are defined as follows :

$$EMC\left(MC_{start}\right) = EMC_{max} \tag{5.1}$$

$$EMC_{End} = EMC_{max} - \Delta EMC \tag{5.2}$$

$$T_{db}\left(MC_{start}\right) = T_{db,min} \tag{5.3}$$

$$T_{db,End} = T_{db,min} + \Delta T_{db} \tag{5.4}$$

To meet these requirements, the following equations have been used for this work :

$$T_{db}\left(MC\right) = T_{db,min} + \Delta T_{db} \cdot \left(1 - k_2 \left(tan^{-1}\left(\alpha_1 \cdot \left(\frac{MC}{MC_{start}}\right) + \beta_1\right) - k_1\right)\right) \tag{5.5}$$

With α_1, β_1 the parameters and k_1, k_2 defined to follows the requirement (3) :

$$k_1 = tan^{-1}\left(\alpha_1 \cdot \beta_1\right) \tag{5.6}$$

$$k_2 = \left(tan^{-1}\left(\alpha_1 \cdot \left(1 + \beta_1\right)\right) - tan^{-1}\left(\alpha_1 \cdot \beta_1\right)\right)^{-1} \tag{5.7}$$

[17] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*
[18] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.

and

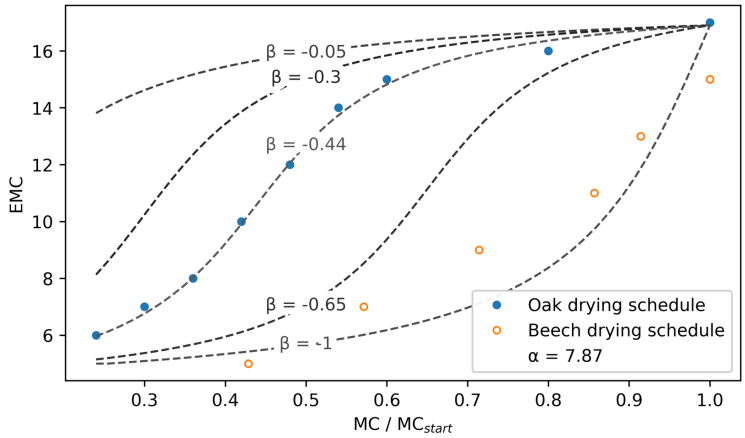
$$EMC\,(MC) = EMC_{max} - \Delta EMC \cdot \left(1 - k_4 \left(tan^{-1}\left(\alpha_2 \cdot \left(\frac{MC}{MC_{start}}\right) + \beta_2\right) - k_3\right)\right) \tag{5.8}$$

With α_2, β_2 the parameters and k_3, k_4 defined to follows the requirement (3) :

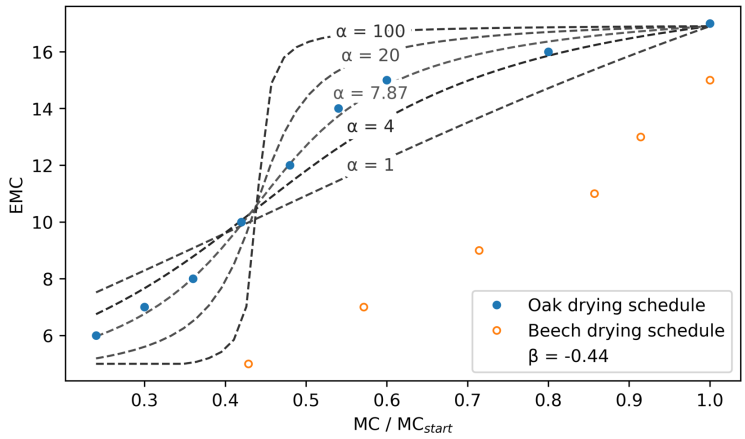
$$k_3 = tan^{-1}\left(\alpha_2 \cdot \beta_2\right) \tag{5.9}$$

$$k_4 = \left(tan^{-1}\left(\alpha_2 \cdot (1 + \beta_2)\right) - tan^{-1}\left(\alpha_2 \cdot \beta_2\right)\right)^{-1} \tag{5.10}$$

Each function is then defined by two independent parameters. As shown in Fig. 5.2.2, the variation of each parameter allows a large domain of possibilities to be covered. The combination of both functions gives access to a large and realistic range of drying conditions.



(a)



(b)

FIGURE 5.2.2 – Conventional[19] drying schedules of oak (blue dots) and modeled (dashes) drying schedules for different values of β (a) and α (b) and for fixed values of EMCmax, ΔEMC, k_1 and k_2. The orange circles represent the conventional drying schedule for beech. The abscissa is moisture content of the kiln wood load, which decreases during drying, divided by MCstart, here equal to 50 % and 35 % for the oak and beech drying schedule respectively.

In the present work, the gain achieved by optimisation will be compared to the reference criteria values obtained with the standard drying schedule. The standard

[19] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*

schedule was simulated by the computational model using a linear interpolation between successive steps of the schedule, which mimics what is done by a kiln controller. The set points T_{dbsp} and EMC_{sp} are then defined as follows :

$$T_{dbsp}(t) = \varphi(t) \cdot T_{dbi} + (1 - \varphi(t)) \cdot T_{dbi+1} \tag{5.11}$$

$$EMC_{sp}(t) = \varphi(t) \cdot EMC_i + (1 - \varphi(t)) \cdot EMC_{i+1} \tag{5.12}$$

With

$$\varphi(t) = \frac{MC_{i+1} - MC(t)}{MC_{i+1} - MC_i} \tag{5.13}$$

Where MC_i and MC_{i+1} are the defined values of moisture content to reach at i-th and i+1-th steps of the reference schedule, $MC(t)$ is the mean value of moisture content of wood load, evaluated at simulation time step t.

5.2.3 *Objective function*

Since it immobilizes a large amount of material for several days or weeks, the drying operation is time consuming and is often considered as a bottleneck in the production process. In addition, this operation requires suitable equipment, a significant investment and energy supply, and it can also induce some degradations (checking, heterogeneity in the final MC, discoloration, collapse, etc.) that affect the quality of the products. It is therefore necessary to find the right balance between three major aims that define the user expectations : duration, quality and energy consumption. [20] For a general purpose, the three output goals were firstly kept separate with different weights in the objective function, to exacerbate the optimization strategies. The weight of each output could be adjusted by the operator to meet his priorities. The first criterion is the drying time, which means the time elapsed from the start of the drying until the average moisture content of the boards reaches the target final MC. An equalizing step is usually performed after drying to reduce the variation of MC, followed by a cooling phase to avoid any risk of deterioration when opening the kiln door and cold and dry air is introduced into the wood stacks. This last phase is not simulated in the present paper to focus the comparison on the raw results at the end of the drying stage. The second and third criteria are related to the drying quality, which is quantified by MC specifications such as the MC heterogeneity within the kiln load and within each board, and by the mechanical quality (absence of checking, absence of case-hardening, straightness, absence of collapse, etc.). The indicator of the moisture content heterogeneity is defined as the sum of the stack heterogeneity (difference between the average MC of each board and the average stack MC) and the MC heterogeneity within boards (difference between the local MC of the profile and the average board MC) :

$$Q_{MC} = \frac{1}{N_{Board}} \left(\sum_{k=1}^{N_{Board}} \left(\left(\overline{MC_k} - \overline{MC_{Stack}} \right)^2 + \frac{1}{e} \sum_{icv=1}^{NCV} Xl_{icv} \cdot \left(\overline{MC_k} - MC_{icv} \right)^2 \right) \right) \tag{5.14}$$

Where N_{Board} is the number of boards in the kiln wood load, NCV is the number of control volume (CV) within the board thickness, $\overline{MC_k}$ is the average MC of board k, $\overline{MC_{Stack}}$ is the average MC of the global kiln load, MC_{icv} is the local MC of the CV icv, e is the board thickness and Xl_{icv} is the width of the CV icv. In this work, the mechanical

[20] PERRÉ, *Fundamentals of wood drying*.

quality was estimated by the average value of a Slicing Test, [21] performed numerically on each simulated board at the end of the drying. Commonly used in the industry and similar to those formalized earlier in the 20th century, [22] the Slicing Test is a way to characterize the internal drying stress by cutting the section in two slices at the end of drying so that the stress field is partly converted into a global deformation. The gap between the two slices must be measured 48 hours later for hardwood in accordance with the recommendations of the standard. [21] In this numerical study the virtual sawn of the sample of the slicing test is obtained by setting to zero the bending force that constraint the half-board to stay flat. Its curvature, calculated by the mechanical model embedded in TransPore, is then free to change to partially relax its residual stress field. Conditioning at ambient temperature is simulated by computing the redistribution of MC within the piece of wood for 48 hours, with heat but not mass transfer at the boundaries. A large average curvature reveals that the boards have been subjected to strong stresses during drying, which could cause cracks and deterioration of the material. The fourth criterion is the energy consumption. It is expressed in kilowatt-hours per kilogram of water removed from the boards from their initial MC to their final MC reach at the end of drying. The objective function is computed as a weighted average of these four criteria, using the conventional schedule as reference :

$$f_{obj} = \gamma_1 \cdot \frac{t_i}{t_{conv}} + \gamma_2 \cdot \frac{Q_{m,i}}{Q_{m,conv}} + \gamma_3 \cdot \frac{Q_{MC,i}}{Q_{MC,conv}} + \gamma_4 \cdot \frac{E_i}{E_{conv}} \tag{5.15}$$

Where t_{conv}, $Q_{m,conv}$,$Q_{MC,conv}$ and E_{conv} are respectively drying time, indicator of the mechanical quality, indicator of the moisture content heterogeneity and energy consumption of the simulated conventional drying schedule. t_i, $Q_{m,i}$, $Q_{MC,i}$ and E_i represent the same outputs for the guess simulated schedule number i along the optimize procedure. The mathematical normalization is done to compare criteria that have various magnitude and unit. Coefficients γ_1, γ_2, γ_3 and γ_4 allow the user to give his priority to the different criteria and satisfy the following equation :

$$\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 = 1 \tag{5.16}$$

The choice of these four coefficients can be difficult for a user of such optimization code. Choosing a combination requires a thorough understanding of what is acceptable to the company for each criterion and what is a viable compromise. Finally, a lumped criterion has been built that combine all criteria in the form of cost of the process. It includes the energy cost, the loss of value with the degradation of the wood quality and the cost of the assets that are used in the process, that depend on the four previous criteria. The drying cost has been also calculated because it is one of the main concerns for the industry. The cost calculation is highly tied to the company organization, investments and financial facilities, as well as employee policies, deeply different between countries. Therefore, the cost of one drying schedule depends on each company. [23] It is also likely to evolve in time. For example, when the supply of dry product is the priority, time becomes more important than quality. The cost criterion had been implemented with a simplified version of the cost calculation presented in a previous work. [24] The main equations are summarised in Appendix A, together with the characteristics of the chosen configuration

[21] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION, *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*.

[22] MCMILLEN, *Stresses in wood during drying*.

[23] SALIN, « Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying ».

[24] SALEM, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».

in terms of kiln, stack of boards and company. In this case, the objective function is simply the cost of the drying operation :

$$f_{obj-cost} = \frac{Fixed\ costs \cdot drying\ time + Energy\ cost + Loss\ of\ value}{kiln\ capacity} \tag{5.17}$$

5.2.4 *Minimization of the objective function*

A metamodel has been developed in the versatile language Python that permitted to adjust the parameters of the path functions and to call the code *Multi_Wood_DryS* with these parameters, as shown in Fig. 5.2.3. The interface between the Fortran and Python languages is provided by the package F2PY. [25] In turn, *Multi_Wood_DryS* predicts the effect of the guess drying schedule on the four indicators : drying time, energy consumption, drying quality and cost. The metamodel also includes an optimization algorithm, the simulated annealing (SA), which is part of the SciPy Python package. This algorithm calls the *Multi_Wood_DryS* module and minimizes the criterion of Eq. 5.15 or Eq. 5.17, depending on the operator's weighting factors. In order to limit the time and resource consumed by the SA, a compromise was sought between the quality of minimum of the objective function and the number of calls. Defaults values were used to set the parameters of the SA function [26] and are presented in Table 5.2.1. The number of iterations was set in the parameter "maxfun" at a value of 1000 for the search of the optimized drying schedule. The entire optimization process took 230 minutes with two Intel®Xeon®W cores at 3.5 GHz. Noted that the number of iterations has been intentionally limited to minimise the computational time required to keep the mechanistic model capable of forward regulation for implementation in a process controller.

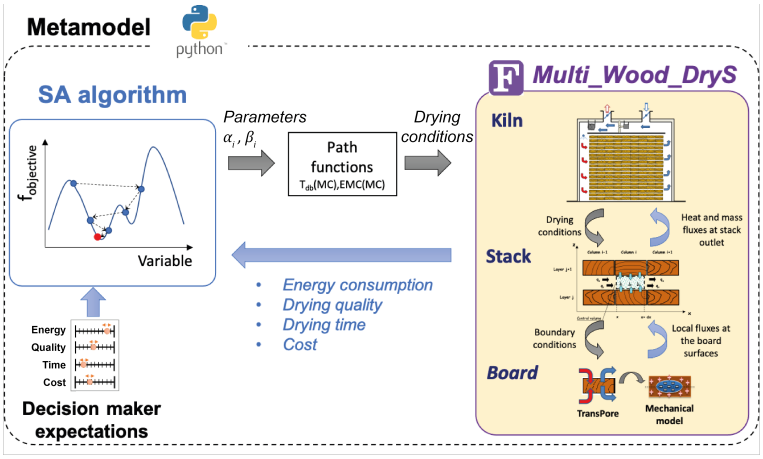


FIGURE 5.2.3 – Global overview of different metamodel modules and their links

The search algorithm was bounded to a range that could be industrially feasible, i.e. temperatures and MCs that could be obtained in a conventional kiln drying with the limitations due to the risk of collapse or discoloration. The dry-bulb temperature had to be between 40 °C and 55 °C at the beginning of the drying, when MC was higher or equal to MCstart. The exact bounds of the path parameters of the algorithm are shown in Table 5.2.1.

[25] Pearu PETERSON. « F2PY: a tool for connecting Fortran and Python programs ». In : *IJCSE* 4.4 (2009), p. 296. DOI : 10.1504/IJCSE.2009.029165.

[26] XIANG et al., « Generalized Simulated Annealing for Global Optimization ».

TABLE 5.2.1 – Values of simulated annealing parameters

	Set values	
Visiting distribution	2.62	
Initial artificial temperature	5230	
Acceptance distribution	-5	
Ratio to restart	2.10^{-5}	
Local search strategy	False	
	Bounds	
Parameter	Min	Max
$T_{db,min}$	40	55
ΔT_{db}	0.1	20
α_1	-100	100
β_1	0	100
EMC_{max}	6	20
ΔEMC	1	20
α_2	-100	100
β_2	0	100

5.2.5 *Some details about the tested configuration*

Out of the thousands of boards that make up the wood load, the drying of only 46 boards was simulated. The different quantities of the energy and mass balance at the kiln level are then extrapolated to those of the actual volume of wood in the kiln. To facilitate the analysis of the results, all the boards have identical characteristics, i.e. they are similar boards subjected to different conditions depending on their position in the stack. These are flatsawn beech boards with an initial MC of 60 %. Drying is stopped when the average MC of the wood load reaches the target MC set here at 10 %. Average transfer and mechanical properties from the literature were used for each species. Some characteristics of boards, stack and kiln simulated in this work are presented in Table 5.2.2.

TABLE 5.2.2 – Dimensions and thermal characteristics of the kiln and its load used for the case studies

	Kiln	Stack	Boards
Width (m)	5.52	3.45	0.15
Length (m)	6.48	6.48	6.48
Height (m)	4.95	3.81	0.027
Volume (m^3)	177.1	86.3	48.9 (all)
Kth walls and roof ($W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$)	0.38		
Kth floor ($W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$)	2.00		

Conventional drying schedule from the literature [27] for beech was simulated. The air flow simulated has been fixed at 1.5 $m{\cdot}s^{-1}$. The results obtained for that schedule are the base values for the upcoming optimization.

5.3 RESULTS AND DISCUSSION

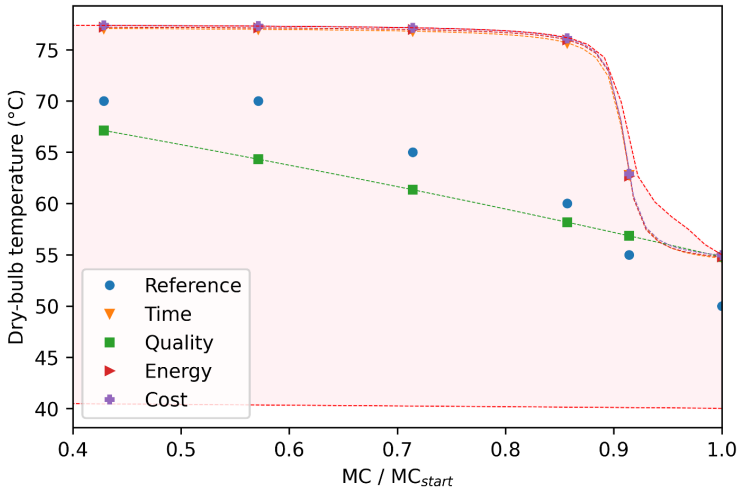
At first, optimization has been conducted successfully with the maximal priority on each criterion in order to understand the strategies of the code. The criteria weighting

[27] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

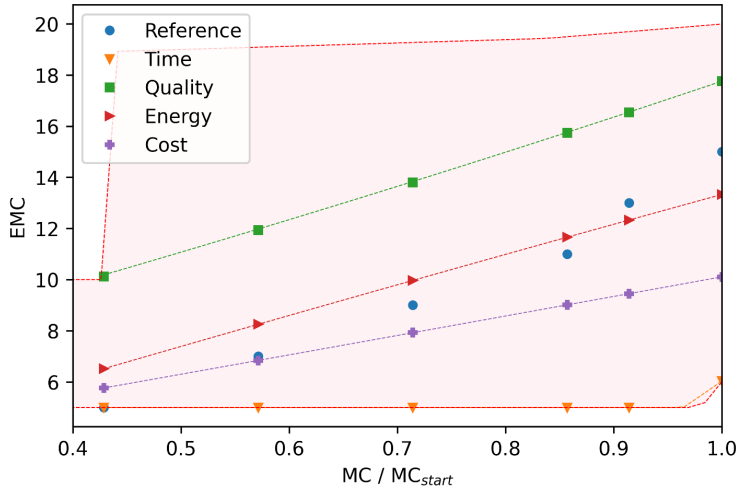
(Eq. 5.15 and 5.16) for these optimizations is summarized in Table 5.3.1. The results of optimization are shown in Table 5.3.2. The schedules proposed by the optimization are displayed in Fig. 5.3.1 where the entire area covered by the path functions appears as a transparent red background.

TABLE 5.3.1 – Weighting of criteria for the first optimizations

Optimization	$\gamma 1$	$\gamma 2$	$\gamma 3$	$\gamma 4$
Drying quality	0	0.5	0.5	0
Energy consumption	0	0	0	1
Drying time	1	0	0	0



(a)



(b)

FIGURE 5.3.1 – Optimized schedules for beech boards 54 mm thick. Area covered by the path functions appears as a transparent red background. The blue dots represent the reference schedule. The optimized schedules are shown in temperature (a) and EMC (b) with orange triangles for time optimization, green squares for quality optimization, red triangles for energy optimization and purple plus for cost optimization.

Compared to the reference schedule, the schedule chosen by the code for the best dried quality reduces the average Slicing Test by 42 % (Table 5.3.2) and the moisture heterogeneity by 76 %, to the detriment of the process duration (+40 %), the energy

consumption (+8 %), and the cost (+16 %). The dry-bulb temperature and EMC start almost at the highest values allowed in the solution search area when the MC of the wood load is above 35 % (i.e. MC/MCstart = 1). The optimized schedule increases to a higher temperature as MC decreases. It has higher paths for EMC than the conventional schedule. The increase in temperature activates moisture diffusion in the material, and higher EMC reduces the mass transfer at the board exchange surfaces. As a result, the difference in moisture content between the surface and the core of the boards remains low throughout the process, reducing the drying stress and moisture heterogeneity. The higher cost and energy consumption are explained by the longer drying time which increases heat loss and electricity consumption. The optimization of energy consumption allowed the reduction of the drying time by 37 %, which represents a gain of 4 % in energy consumption, but was also beneficial to all other criteria. To reduce the process duration, the code chose the highest possible dry-bulb temperature throughout the drying process, which activates thermo-activation of moisture diffusion and liquid migration by the reduction of the liquid water viscosity. If this strategy could easily be proposed by a kiln operator, the strategy of the code for the EMC is less obvious. Because of the energy consumed by air renewal, the code did not choose the lowest EMC_{start} as we might have been expected to reduce drying time. The optimized process is a compromise between process duration and energy consumption of air renewal, to obtain the best energy consumption per kilogram of extracted water. Regarding the drying time criterion, the obtained schedule allows the time to be reduced by 52 %. The slicing test deviation is also reduced to the detriment of the cost, the average slicing test, the moisture heterogeneity and the energy consumption. The lowest EMC_{start} and higher $T_{db,start}$ (Fig. 5.3.1) in this configuration facilitate moisture transfer by establishing important gradients within the material, but also worsen internal stresses, as seen by the increase in the average slicing test (Table 5.3.2). The final optimization, focused on cost, combined the previous strategies; it chose a low EMC_{start} and a high Tdb,start to favour the moisture transfer and kept the highest temperature as possible to maintain such a strategy and obtain the fastest process. However, a compromise was automatically found between process duration, quality and energy consumption by having low EMC but not the lowest one. Such a moderate EMC limits the internal stresses and the risk of cracks, but also the energy consumption of the air renewal. By combining of all criteria into one lumped one, the cost, the code was able to propose such a compromise. The optimized schedule also succeeds in finding a drying time shorter (-48 %) than the reference schedule, and also a better energy consumption (-3 %). The number of iterations was sufficient to obtain the best schedule for each optimization criterion with limited computation time.

TABLE 5.3.2 – Simulation outputs of the optimizations of the drying schedule for beech boards, 54 mm thick. In each row, the optimized variable appears in bold.

Optimization	Cost €·m^{-3}	Duration hours	Moisture heterogeneity	Average Slicing Test mm	Slicing Test deviation	Energy consumption kWh·kg$_{water}^{-1}$
Reference	70.1	579.3	1.75	0.89	0.03	1.32
Drying time	67.0	**275.0**	4.10	1.02	0.00	1.47
Drying quality	81.0	809.0	**0.41**	**0.51**	0.05	1.43
Energy consumption	61.4	361.8	3.93	0.74	0.05	**1.26**
Cost	**60.3**	299.0	4.29	0.84	0.02	1.28

5.4 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

In this work, a meta-model was developed in Python, that calls the multiscale mechanistic Fortran code *Multi_Wood_DryS* to predict the effects of a drying schedule on some important indicators, namely drying time, quality of the dried product, energy consumption. The decision maker can define his expectations on these different objectives by defining the weighting factors of the objective function. The choice of the weight of each criterion, that requires several tests, was lumped into one single explicit criterion : the process cost. The optimization algorithm included in the meta-model finds the best path of the drying schedule after several hundred iterations. It successfully optimized conventional schedules for beech, in a simple case where all the boards have initially the same characteristics. The results were obtained under the assumption of an accurate monitoring of the drying schedule. Consequences of deviations from this optimized schedule will be included in a further work. The cost-optimized process allows the drying time to be drastically reduced. The mechanical quality and energy consumption were also slightly improved. The sole MC heterogeneity was degraded. The use of intermittent energy (renewable energy or waste heat from industries) is one of the perspectives of this work to reduce the amount of fossil fuels. The interest of this mechanistic-based optimization is crucial for these applications, as they cannot be addressed by the classical drying schedules.

Acknowledgments

ADEME is a partner of the project and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

5.a APPENDIX A - ECONOMIC MODEL

The drying cost is calculated with the following equation :

$$drying\ cost = fixed\ costs + variable\ costs$$

5.A.1 *Fixed costs*

The kiln, boiler, buildings and others investments are summoning into one amount with a common useful life. The depreciation (€·h^{-1}) is calculated as follows :

$$depreciation = \frac{investment}{depreciation\ period \cdot 365.25 \cdot 24}$$

With $investment$ in euros (€) and $depreciation\ period$ in years. The cost of the structure, maintenance, insurance and taxes is taken into account as a fixed value (€·h^{-1}).

$$structure\ cost = \frac{overhead\ rate \cdot investment}{365.25 \cdot 24}$$

The asset of material through the stock has a cost (€·h^{-1}) calculated as follows :

$$short\ term\ asset = \frac{wood\ value \cdot kiln\ capacity \cdot stock\ cost\ coefficient}{365.25 \cdot 24}$$

With $wood\ value$ (€·m^{-3}) the cost of the material before the drying process, $kiln\ capacity$ (m^3) the volume of material that can be dried in each process and $stock\ cost\ coefficient$ (-) which depends on each company and which is often estimated as a percentage of the annual stock value. All these fixed cost (€·h^{-1}) are together with the following equation :

$$fixed\ cost = depreciation + structure\ cost + short\ term\ asset$$

5.A.2 *Variable costs*

Employees are mainly involved in loading and unloading the kiln, which depends on the kiln capacity and board dimensions. In this work, the kiln capacity is fixed for all simulations, and since the control of the drying process is necessary but less time consuming, no labor cost was used. The cost of energy required for the ventilation (€·h^{-1}) is calculated as follows :

$$electric\ energy\ cost = electricity\ price \cdot \int_0^{process\ duration} P_{elec}(t) \cdot dt$$

With $electricity\ price$ (€·kWh^{-1}) a fixed value and P_{elec} the power of the fans, that varies in time with the air flow. The cost of energy that comes from the boiler is calculated as follows :

$$thermal\ energy\ cost = \frac{fuel\ cost}{\mu_{boiler} \cdot fuel\ LHV} \cdot \int_0^{process\ duration} P_{th}(t) \cdot dt$$

With $fuel\ cost$ (€·t^{-1}) the price of the gas in our case, μ(-) the boiler efficiency, $fuel\ LHV$ the lower heating value of the fuel (kW·t^{-1}) and $P_{th}(t)$ the power of the boiler required to reach the temperature set point into the kiln. The quality of the wood is taken into account when calculating the cost of the drying process. Depending on the drying schedule, the residual internal stress in the wood boards, at the end of the drying, can reach several levels. High levels of internal stress can cause cracking and depreciation of the dried material. The slicing test, which is destructive, releases the internal stresses and allows the operator to visualize the residual internal stresses, by measuring and comparing a deformation amplitude ; such a test is simulated for each board at the end of the drying. Because each board is considered drying symmetrically the calculated drying stresses are balanced and no asymmetrical deformation occurs. To simulate the Slicing Test the boundaries conditions of each board are changed at the end of the drying : the half cutting of a board slice parallel to the exposed faces [28] is modeled by the release of external forces at one face of a half simulated board. An asymmetric stress field occurs, which can lead to a global deformation of the board. The result of such a simulation is a deflection sag for each board. Table 5.A.1 shows the different quality classes according to opening gap of the slicing test. The limits of the quality classes have been defined on the basis of the traditional drying schedule simulated with the ending Slicing Test ; it has been considered that ¾ of the opening gaps would be classified as good quality, and ¼ of the opening gaps would be classified as medium quality. Any gap outside this range is defined as poor quality. A depreciation rate is affected to estimate the impact of the case-hardening on the drying cost. This rate was chosen as a compromise between market

[28] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION, *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*.

prices, which emphasize a minimum depreciation of 16.5 % in 2022 [29] for hardwood boards with some defects or visual degradation, and feedback from operators who do not always apply depreciation to sales prices. Obviously, this is an initial hypothesis, which can be adjusted according to the perception and experience of drying practitioners in the field.

TABLE 5.A.1 – Assignment of the quality class to the degree of case hardening of the boards, as estimated by the gap of curvature on the slicing test

Quality class	Gap opening (in mm) for the 54 mm thick boards
Bad	> 1.2
Medium	]1.0-1.2]
MGood	< 1.0

$$Loss\ of\ value = \sum_{k=1}^{Nquality\ Class} Depr_rate_k \cdot Volume_k \cdot Dried_product_value$$

Where $Depr_rate_k$ and $Volume_k$ are the depreciation rate and volume of boards (m^3) of quality class k respectively, $Dried_product_value$ is the price of the dried products per cubic meter (€·m^{-3}). Finally, the drying cost (€·m^{-3}) is calculated as follows :

$$C = \frac{Fixed\ cost \cdot drying\ time + Energy\ cost + Loss\ of\ value}{kiln\ capacity}$$

TABLE 5.A.2 – Costs and coefficients used in the economic model

Type	Parameter	Value	Unit
Investment	investment (kiln, boiler, buildings, etc)	80 000	€
	useful life	10	years
Structure cost	overhead rate	0.03	-
Short term asset	kiln capacity	49	m^3
	wood value - Beech	290	€·m^{-3}
	stock cost coefficient	0.05	-
Energy	propan gas price	1200	€·t^{-1}
	boiler efficiency	0.8	-
	LVH propan	12780	kWh·t^{-1}
	conventionnal electricity price	0.2	€·kWh^{-1}
Depreciation rate of the dried product	dried wood value - Beech	1000	€·m^{-3}
	quality class - Bad	10	%
	quality class - Medium and Good	0	%

[29] CEEB. *Prix et indices nationaux - sciages et bois énergie 2ème Trimestre 2023*. Centre d'Etudes de l'Economie du Bois, 2023.

6

Apprentissage / Identification en cours de séchage

Les simulations précédentes ont été réalisées sur des planches aux propriétés issues de la littérature et pour un débit donné. Dans la pratique chaque charge de bois est unique, avec des débits, des teneurs en eau initiales, des densités qui varient fortement selon les qualités nécessaires à la production, la saison, le lieu de croissance des arbres, la sylviculture... La prise en compte des paramètres influents sur les propriétés du matériau est difficile et souvent partielle. Il existe des outils optiques et à rayons X pour mesurer les caractéristiques d'arbres sur pied et de grumes, ainsi que des méthodes de traçabilité permettant d'identifier chaque planche séchée ; ils nécessitent des investissements conséquents, sont encore peu répandus mais se déploient progressivement. L'un des objectifs de ce travail est d'adapter la conduite de séchage à la charge de bois réelle. L'approche développée est différente de celles précédemment mentionnées : elle vise à permettre à l'automate de régulation d'enrichir sa connaissance sur quelques planches représentatives de la charge de bois de manière à améliorer ses capacités prédictives, et ainsi pourvoir trouver les meilleures conduites pour cette charge de bois. La première partie de ce chapitre compare les valeurs mesurées de perméabilité intrinsèque et de coefficient de diffusion massique de quelques planches de la charge de bois séchée à celles identifiées par analyse inverse de leur cinétique de séchage. Même en limitant l'analyse inverse à une portion réduite des cinétiques de séchage, il est possible d'obtenir des valeurs de paramètre proches de celles mesurées. Une fois ces paramètres identifiés, le métamodèle développé dans le chapitre 5 est réutilisé pour optimiser le séchage selon les critères de durée et de qualité. Le séchage réel du lot étudié, une centaine de planches de pin maritime, a été réalisé à FCBA, dans un séchoir semi-industriel ; les aléas survenus pendant l'opération sont pris en compte par le code numérique pour proposer des conduites correctives. Les quelques planches aux cinétiques de séchage enregistrées ne sont cependant par représentatives de la pile de bois, et malgré les fonctionnalités développées et souhaitées dans l'automate futur, les conduites optimisées pour seulement quelques planches de la pile ne donneront probablement pas le résultat attendu pour l'ensemble de la charge de bois. Il apparaît donc utile de suivre, en complément, la teneur en eau globale de la charge de bois, par exemple au moyen de la pesée en continu d'une partie de celle-ci. Un processus stochastique de génération de pile de planche, similaire

à celui utilisé par Perré et Rémond (2006) [1], pourrait aussi être couplé à ce processus d'apprentissage du code, afin d'améliorer sa prédiction du séchage et pouvoir trouver une conduite optimale pour les critères fixés par l'opérateur·rice et adaptée à la diversité des planches de la charge de bois.

Ce papier a été accepté pour publication par le journal *Drying Technology* le 21 octobre 2024.

[1] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

On-line evaluation of moisture transfer properties for a feed-forward control of a wood drying kiln with a mechanistic model

Merlin SIMO-TAGNE [1], Antoine STÉPHAN[1], Patrick PERRÉ [2 3], Clément L'HOSTIS [4], Romain RÉMOND[1]

ABSTRACT

Kiln operators are forced to rely on their own experience and expertise when adapting standard drying schedules to tackle changing situations or to better suit their needs. The online tuning of a mechanistic model and its use as forward control is therefore proposed to address the current lake of tools. An inverse analysis of the drying kinetics of wooden boards dried in an industrial kiln is carried out to determine the moisture transfer properties of the boards. The values obtained by the inverse method are found to be relatively close to those obtained by direct measurement. The mechanistic model is then used with these input values to simulate the drying of a stack of boards to find the best drying strategy to meet the objectives. This work focuses on achieving a compromise between quality and time. Several difficulties were encountered in developing this approach for a semi-industrial dryer, and some recommendations are made for developing this innovative strategy further.

keywords : wood drying ; inverse analysis ; liquid permeability ; diffusion coefficient ; industrial kiln ; process optimization ;

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Épinal, 88000, France
[2] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, 91190, France
[3] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, 51110, France
[4] FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Champs-sur-Marne, 77420, France

6.1 INTRODUCTION

Wood drying is an essential stage of the transformation chain, and is intended to bring the timber to a moisture content (MC) that is close to the service values of wood. Artificial drying of wood in a kiln allows for air circulation, relative humidity and temperature around the boards to be controlled. Depending on the species and thickness of lumber, drying schedules have been proposed in the literature based on empirical knowledge [1] [2]. These consists of tables of values that give the drying conditions to be applied as the wood MC decreases. Kiln operators have no objective methods that can help them change a standard drying schedule, and their own experience and expertise are therefore typically used to make changes to the existing drying schedules. Allegretti et al. (2012) [3] have developed a control system for kiln dryers, called the dTouch system, which relies on a large database of standard drying schedules, together with a history of operator evaluations at the end of the cycles, to propose a schedule that better met the user's requirements. This control system was capable of assisting an operator in the selection of the table by collecting and adding to the empirical knowledge.

However, there are many factors that can lead to a change in the basic schedules, such as a change in the decision maker's expectations (priority of cost, quality, energy or time), a need to change the drying conditions in response to transient disturbances in the process (boiler failure, faulty humidification nozzles, etc.) or a need to consider the energy cost (for example to reduce or stop the fans during peak hours). The operator is then faced with a complex situation, especially if the process deviates from the usual sequence, since the final quality, cost and energy consumption depend on the entire history of drying. Following recent improvements in the power of personal computers and the predictive ability of mechanistic drying models, these models can now be introduced as a core component of the wood drying decision system [4]. In the work of Stéphan et al. (2024) [5], a multiscale computational model was combined with a probabilistic optimization code to propose tailor-made drying schedules that met operator's expectations. However, due to the variability of wood, this numerical tool needed to be supplied with relevant product characteristics, namely the transfer properties of the boards. In the present work, we go one step further towards addressing this need by using the drying kinetics of the boards to extract some transfer parameters via an online inverse method. These relevant parameters are then used by the model for prospective purposes (Fig. 6.2.1). In this way, the model predictions become increasingly accurate as drying progresses. Recent work by Ouertani et al. (2024) [6] has shown that the *TransPore* code [7] can estimate transfer parameters from the drying kinetics at the core of the board by inverse analysis. Their results were obtained by measuring with an X-ray densitometer following a protocol that can only be applied in a laboratory. In industrial kilns, the drying kinetics of the wood load is described by monitoring the local MC of about 10 boards, which is considered to be representative of the wood load. Moisture is measured using a resistive method with probes inserted into

[1] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.
[2] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.
[3] ALLEGRETTI et al., « Dtouch – drying has never been so easy ».
[4] PERRÉ et al., « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids ».
[5] STÉPHAN et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ».
[6] OUERTANI et al., « Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation ».
[7] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».

the boards to given depths [8] [9]. We note that these resistive probes have limited accuracy in the non-hygroscopic domain of wood, and any rapid fluctuations in the temperature of the drying air will increase the error in the values given by these probes [10]. This is one of the limitations that can make the *in situ* determination of transfer parameters by the inverse method inaccurate. The reliability of this approach must therefore be checked by comparing the values obtained by the inverse method with those obtained by direct measurement on several boards.

In the first part of this work, we study the relevance of the inverse analysis of the drying kinetics of boards dried under industrial conditions, in order to determine two important moisture transfer properties : the liquid permeability and the water diffusion coefficient. Once calibrated (i.e. when the code has learned from the data collected by the sensors), the model can be used to select the best drying conditions to meet the operator's expectations. A practical example is considered in terms of quality and duration (Fig. 6.2.1).

6.2 MATERIAL AND METHODS

This section summarizes the experimental tools used for measuring the drying kinetics in an industrial dryer and the laboratory tools used to measure the transfer properties of the instrumented boards in the dryer. A multiscale mechanistic model is briefly presented. This model is the physical platform used to optimize the drying schedule (the forward problem in Fig. 6.2.1) and to estimate the transfer properties of the boards by inverse analysis of the drying kinetics (inverse problem in Fig. 6.2.1).

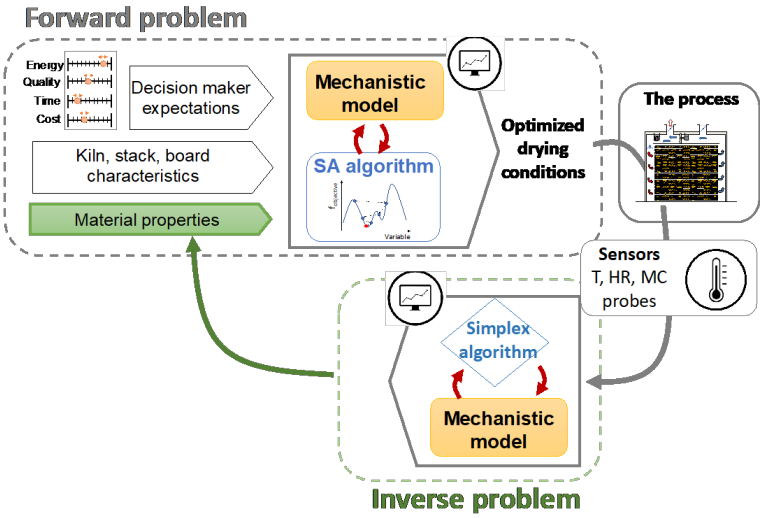


FIGURE 6.2.1 – The scientific approach applied in this work

6.2.1 *Multiscale and multiphysics computational model for wood drying simulation*

Multi_Wood_DryS was used in this work. This model simulates the drying of a stack of boards at different scales. At the local scale of one board, the model uses a one-

[8] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.
[9] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.
[10] SKAAR, *Wood-Water Relations*.

dimensional version of the *TransPore* code to simulate heat and mass transfer in the board thickness [11]. It also includes a mechanical model [12] to estimate the stresses and strains that develops within the board during drying. At the scale of a stack, the model simulates the drying of a few dozen or few hundred boards simultaneously, together with their interaction with the airflow [13]. The variability of the board stack can be accounted for by using a stochastic approach or, as in this work, by reading a file describing the known characteristics of each board in the stack. *Multi_Wood_DryS* is then able to predict the drying of a load of wood and the effect of a drying schedule on the drying time and dried product quality. It can also predict energy consumption and cost, although these modules were not used in the present work due to the reduced size of the wood load.

In a recent study, *Multi_Wood_DryS* was combined with a probabilistic optimization code to propose tailor-made drying schedules that met the operator's expectations in terms of energy consumption, quality, drying time and cost [14] (Fig. 6.2.1). A comprehensive description of the mechanistic modeling of the wood drying, including the key macroscopic formulations of heat and mass transfer and drying stress formulation used in this paper, is given by Perré et al. (2023) [15] (See Appendix 6.A for the main parameters used in the simulation). For more details of the different parts of the model, please refer to the mentioned here.

6.2.2 *Drying kinetics in an industrial kiln*

A wood stack of 133 boards of maritime pine (*Pinus pinaster*) was dried in an industrial kiln (Cathild Industrie SA, France) at the FCBA site in Bordeaux, France. The wood samples were taken from freshly cut logs. The dimensions of the green boards were 2400 mm in length, 159 mm in width and 27 mm in thickness. The wood stack was made up of 19 layers of seven boards, and the layers were separated by stickers 30 mm thick, which were placed every 50 cm perpendicular to the longitudinal direction of the boards. Figure 6.2.2 shows the wood stack in the drying chamber of the conventional air-conditioned hot-air dryer. The internal dimensions of the dryer were 2.7 m (length) by 2.4 m (width) by 2.8 m (height). Nine boards in the stack had penetrating pin-type electrodes that were hammered down to the core of the board and connected to a resistance moisture meter. These were positioned on the side of the stack, at the airflow outlet, and were the last boards of the first nine layers from the bottom. They are denoted here by their layer number, from B1 to B9. Boards B6, B5 and B3 were quarter sawn boards, mainly in heartwood, while B9 was rift sawn, B8, B7, B4, B2 and B1 were flat sawn boards. The sawing pattern, initial and final dimensions, and weights (i.e. before and after drying) of each board were recorded. At the end of drying, the MC at the core of each board was measured using the resistive method (Hydromette HT 85 T, Gann, Germany). We assumed a homogeneous MC at the end of the drying cycle, and this measurement, together with the measured mass loss, enabled the determination of the average initial MC for each board.

The standard drying schedule for maritime pine was followed, with the temperature increasing from 65 °C to 80 °C and the relative humidity decreasing from 80 % to 10 %

[11] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».
[12] RÉMOND et al., « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood ».
[13] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».
[14] STÉPHAN et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ».
[15] PERRÉ et al., « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids ».

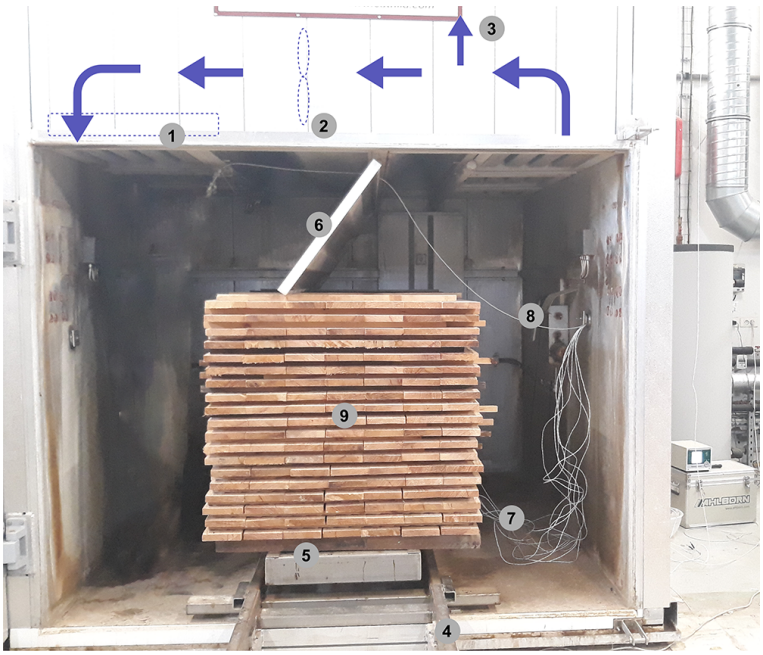
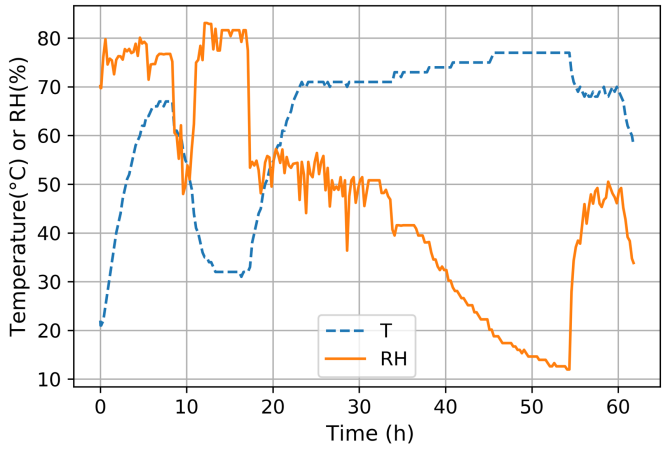


FIGURE 6.2.2 – The stack of boards considered in this study, shown inside the kiln (the picture has been edited to remove a person, without influencing the items shown here) : (1) heating coils, (2) fans, (3) extractors, (4) rails and (5) cart for loading the kiln, (6) deflector that concentrates the air flow over the height of the stack, and sensors such as (7) resistive probes to measure wood moisture content, (8) psychrometers used to measure humidity in the air, PT100 and thermocouples used to measure temperature in the air and wood, respectively.

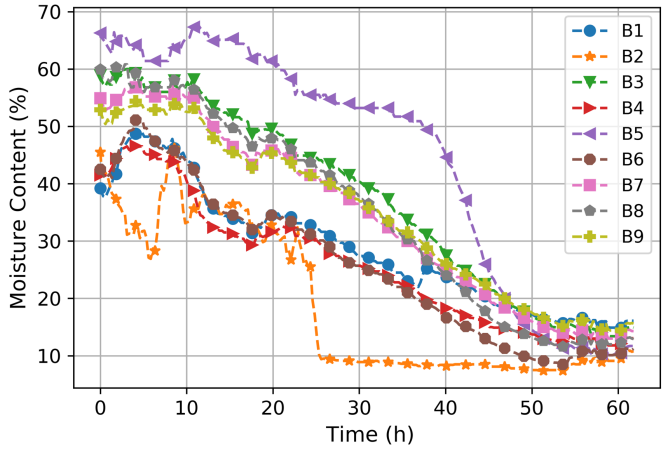
as the wood MC decreased. A problem with the heating element meant that the standard schedule was stopped between 8 h and 24 hours of drying. Figure 6.2.3 shows the evolution of the actual drying conditions (Fig. 6.2.3a), and the drying kinetics at the core of the monitored boards (Fig. 6.2.3b). The curve for B2 clearly indicates a problem with the humidity probes used on this board, and for this reason, this board was excluded from the analysis. When the instrumented boards were close to the desired moisture content, typically at 14 % after 55 h of drying (Fig. 6.2.3a), a conditioning stage of 5 h was applied to equalize the MC throughout the board thickness, by increasing the RH and decreasing the dry bulb temperature. The final step of drying cycle was a cooling step. The end of the cycle fell on a weekend, i.e. the company's rest days. During this last phase, which lasted longer than expected, the climatic conditions around the boards continued to be recorded. Unstacking of the boards and all of the end-of-cycle measurements were carried out on the next working day.

6.2.3 *Direct measurements of mass diffusivity and permeability*

At the LERMaB laboratory (Épinal, France), the permeability and bound water diffusion coefficient were determined according to the thickness direction of the nine planks described above. For these measurements, cylindrical samples of 69±0.5 mm in diameter and 9±0.5 mm in thickness were cut into the boards. Four to six specimens per board were cut near the MC electrode positions, which allowed for several duplicates per plank. Measurements of the permeability and bound water diffusion coefficient were carried



(a)



(b)

FIGURE 6.2.3 – Drying air conditions used during the drying process (a) and the drying kinetics of each board measured by resistive probe (b)

out on the same samples using the "ALU-CHA" [16] and "PVC-CHA" [17] methods, respectively. The experimental conditions were the same as those used by Ouertani et al. (2022) [18]. A brief description is given here, and a more detailed description can be found in the articles reviewed above.

The water diffusion coefficient was determined in the steady state using the cup method at 35 °C. An airtight PVC-CHA device was used to assemble the sample with a glass containing a saturated saline solution of NaCl. A constant relative humidity gap was maintained on both sides of the sample (75 % inner cup–40 % outer cup) and the mass flow Q was determined by the slope of mass loss versus time. The bound water diffusion

[16] Patrick PERRÉ et Eusèbe AGOUA. « Mass transfer in MDF (medium density fiberboard): identification of structural parameters from permeability and diffusivity measurements ». In : *13th International Drying Symposium, Drying*. 2002, p. 178-187.

[17] Sylvain ZOHOUN et al. « An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime ». In : *Heat and Mass Transfer* 39.2 (2003), p. 147-155. DOI : 10.1007/s00231-002-0324-9.

[18] Sahbi OUERTANI et al. « Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven Central Africa hardwood species ». In : *Wood Material Science & Engineering* (2022), p. 1-10. DOI : 10.1080/17480272.2022.2051736.

coefficient was then estimated using Fick's law, with the gradient of MC as the driving force :

$$D = \frac{Q}{S} \cdot \frac{1}{\rho_0} \cdot \frac{e}{\Delta X} \tag{6.1}$$

where Q is the measured mass flow (kg·s^{-1}), S is the cross section of the sample (m^2), e is the thickness of the sample (m), and ΔX is the gap of the MC expressed as a decimal (kg·kg^{-1}). ΔX was estimated from the sorption isotherm of Almeida et al. (2018) [19], for the range of RH values used in the tests. Its value was 6.6 %.

The air permeability was determined by imposing a constant air pressure on the inlet to a sample and recording the resulting air flow obtained at the other side of the sample. The variation in the air flow rate was plotted as a function of the pressure gap, and the corresponding slope was used to calculate the permeability of the sample via Darcy's law :

$$K = \frac{Q_L \mu e P}{\overline{P} S \Delta P} \tag{6.2}$$

where K is the intrinsic permeability (m^2), Q_L is the air flux (m^3·s^{-1}), μ is the dynamic viscosity of air (Pa·s), e is the sample thickness (m), ΔP is the pressure difference and $\overline{P}$ is the averaged pressure between the sample faces. The value used for the dynamic viscosity of air was μ=1.97·10^{-5} Pa·s.

6.2.4 *Inverse analysis of drying kinetics to determine mass diffusivity and permeability*

The computational code *TransPore* [20], which simulates coupled heat and mass transfer in porous media, was used to determine the water diffusion coefficient and liquid permeability of each instrumented board by inverse analysis from their drying kinetics. The bound water diffusivity D is dependent on the temperature and MC. An inverse analysis determines the value of D_0, a weighting factor applied to the expression considering the effect of temperature and MC on the mass diffusivity for softwood drying [21] :

$$D = D_0 \cdot exp\left(-9.9 + 9.8 \cdot X_b - \frac{4300}{T}\right) \tag{6.3}$$

with T the temperature and X_b the moisture content. The Simplex algorithm was used to minimize the objective function defining the difference between the calculated and measured core kinetics, as follows :

$$\delta = \sum_{i=1}^{n} \left(MC_i^{calc} - MC_i^{meas}\right)^2 \tag{6.4}$$

where MC_i^{calc} and MC_i^{meas} are the predicted and measured values of the MC at the core, respectively. The index i represents the discrete time and n is the number of measurements considered in the inverse analysis.

As input parameters, the code used the thickness, the density, the initial MC measured for the board, and other parameters and functions given in Perré and Turner (1999) [20].

[19] Giana Almeida et al. « Hygroscopic behaviour of lignocellulosic materials: Dataset at oscillating relative humidity variations ». In : *Journal of Building Engineering* 19 (2018), p. 320-333. DOI : 10.1016/j.jobe.2018.05.005.

[20] Perré et Turner, « TRANSPORE ».

[21] Perré et Turner, « A 3-D version of TransPore ».

The unknown parameters, i.e. the liquid permeability and diffusion coefficient, were modified by the downhill-Simplex method, which iterates to minimize the objective function δ. Further details are given by Ouertani et al. (2024) [22].

On-site measurements revealed that the planks had a high level of heterogeneity in the initial moisture, with a core moisture of around 60 % and an average value of around 35 %. Despite the uncertainty in the resistivity measurement above the fibre saturation point (FSP, about 30 % for this species), it is likely that the boards had already begun to dry between sawing and the start of the drying cycle. This is probably a fairly common occurrence, which is not the case under normal laboratory conditions, where care is taken to keep the initial MC of the sample as high as possible before drying. In this work, the code was adapted to start from an initial-state moisture profile that was heterogeneous over the thickness. A polynomial function was used so that the maximum core MC was that measured by the electrical resistivity method, the profile average was that measured by weighing, and the surface MC was assumed to be at the equilibrium MC of the outside air, in this case 14 %. Examples of the initial MC profile are shown in the Appendix 6.B. It should be noted that when this initial MC profile is considered, only its influence on the drying kinetics of the board is taken into account. For the simulation of drying stresses, an initial stress-free state was considered for each board, due to a lack of information.

6.3 RESULTS AND DISCUSSION

6.3.1 *Determination of permeability and water diffusion coefficient for the instrumented boards*

Laboratory measurements

The values of the bound water diffusion coefficients and intrinsic permeabilities estimated by the direct measurement method are shown in Fig. 6.3.2 and their values are given in Appendix 6.C. Despite the fact that the samples of each plank were taken from the immediate vicinity of the probe positions, an intra-plank difference can be observed. It is well known that the anatomical orientation of the board strongly influences the transfer parameters. For most cross-sections, the direction of the wood material over the thickness changes across the width of the board. From one board to another, a distinction is also observed. B4 has the lowest water diffusion coefficient ($5.44{\cdot}10^{-11}$ $m^2{\cdot}s^{-1}$), which is three times lower than for B5 ($1.6{\cdot}10^{-10}$ $m^2{\cdot}s^{-1}$). B1 has the highest value for permeability ($1.3{\cdot}10^{-15}$ m^2), which is 20 times higher than for B6 ($6.2{\cdot}10^{-17}$ m^2). The average values obtained are $1.06{\cdot}10^{-10}{\pm}2.28{\cdot}10^{-11}$ $m^2{\cdot}s^{-1}$ and $4.16{\cdot}10^{-16}{\pm}2.46{\cdot}10^{-16}$ m^2 for the diffusion coefficient of bound water and intrinsic permeability, respectively. These average values are close to those obtained by Kouchade [23] and Ai [24] for the bound water diffusion coefficient and intrinsic permeability of maritime pine wood, respectively ($1.03{\cdot}10^{-10}{\pm}$ $3.6{\cdot}10^{-11}$ $m^2{\cdot}s^{-1}$ and $8.6{\cdot}10^{-16}$ m^2). These mean values taken from the literature are averages of the values obtained in the radial and tangential directions.

[22] OUERTANI et al., « Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation ».

[23] Adéyèmi Clément KOUCHADE. « Mass diffusity of wood determined by inverse method from electrical resistance measurement in unsteady state. » Thèse de doct. Lermab, ENGREF : Nancy I, 2004.

[24] Wei AI. « Glissement moléculaire dans les matériaux lignocellulosiques: mesures de perméabilité apparente et identification de paramètres morphologiques ». Thèse de doct. Université Paris Saclay (COmUE), 2016.

Determination of transfer parameters by an inverse method

For the inverse analysis, a homogeneous initial moisture profile was first considered as input to the model. The moisture considered in this case was that measured at the core by the resistance probe. We note that the MC given by the electrical resistivity cannot always be taken as read, especially at high MCs (above FSP) where the decrease in resistivity with an increase in MC is much less pronounced [25]. This reduces the sensitivity of the instrument and hence the reliability of the measurement. However, we attempted to use this approach in this work, as it is by far the most common method currently used in wood drying kilns. It should also be borne in mind that the accuracy of the electrical measurement increases at lower values of MC. As demonstrated below, this is very positive in terms of tuning the parameters and improving the kiln control towards the end of the drying. The initial MC values for the instrumented boards measured at the core and the average MC obtained using the dry weight method are shown in Fig. 6.3.1. Among all the instrumented boards, only B9 had the same core moisture value as the average, indicating that this board may have had a uniform moisture distribution throughout its thickness. In

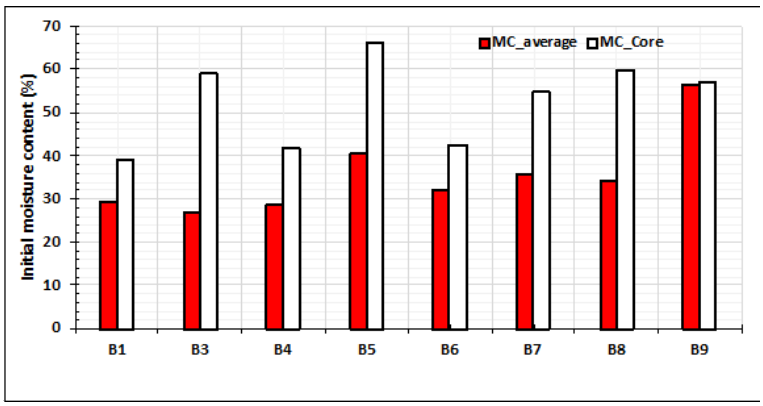
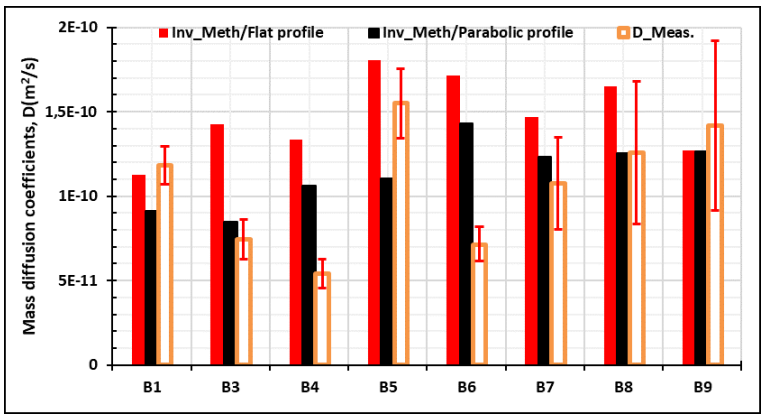


FIGURE 6.3.1 – Initial moisture content at core measured by resistivity method (MC_Core) and average MC estimated by the dry weight method (MC_average)

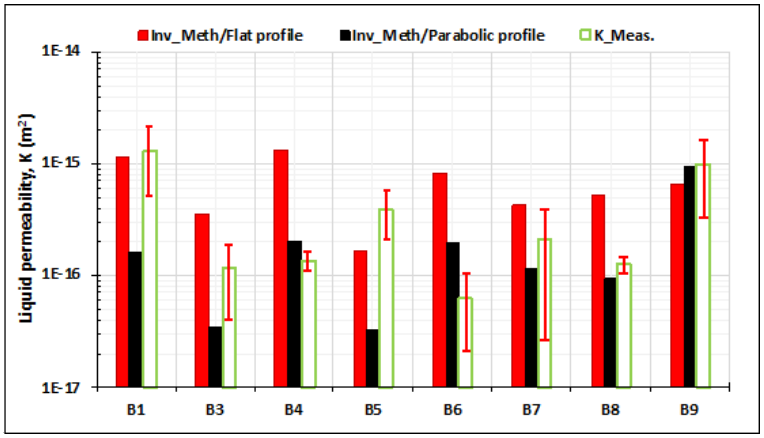
the second approach, an initial parabolic moisture profile was considered as input. The transfer parameters obtained by the inverse method with these two approaches are shown and compared with direct measurements in Fig. 6.3.2. In order to compare the laboratory measurements with the diffusion coefficient determined by the inverse analysis, D was evaluated at 35 °C and 10 % of MC (using the cup method conditions) from Eq. 6.1. An inverse analysis of the drying kinetics for boards B7, B8 and B9 boards gave parameters within an acceptable range of the values obtained by direct measurements. For a uniform profile, B1 and B5 give satisfactory results, with the parabolic profile giving values lower than those obtained experimentally. The values obtained for boards B3, B4 and B5 are not far from those obtained experimentally when uncertainties are taken into account and one of the profile types is chosen. However, regardless of the profile chosen, the values obtained for B6 are far from the experimental values. The parabolic profile gives values closest to those obtained experimentally (see Fig. 6.3.2 and Appendix 6.C for the values obtained for K and D). Overall, the numerical model *TransPore* is capable of extracting the order of magnitude of the transfer parameters from the kinetics of boards by inverse analysis.

Two examples of the core moisture kinetics measured and simulated from the inverse analysis are shown in Fig. 6.3.3. In these examples, the inverse analysis used the drying

[25] SKAAR, *Wood-Water Relations*.



(a)



(b)

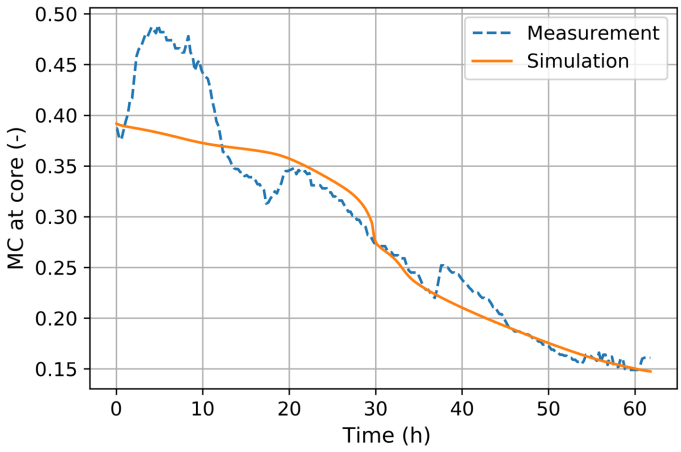
FIGURE 6.3.2 – Mass diffusivity coefficients (a), and intrinsic permeability (b) estimated by direct measurement (D_Meas.) and by inverse analysis (Inv_Meth.)

kinetics over the whole cycle. However, it is interesting to know whether these parameters can be estimated online during the first part of drying, so the mechanistic model gradually increases its prediction for a better forward control. This is the aim of the next section.

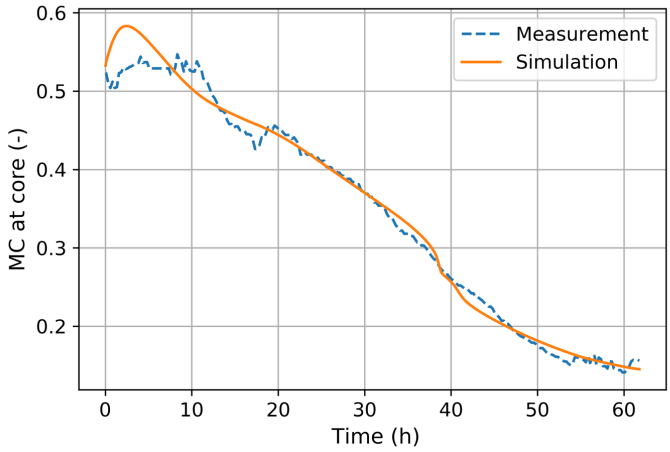
Online determination of transfer properties by inverse analysis.

The ability of online determination of the transfer parameters was investigated using an increasing portion of the drying kinetics of B7, B8 and B9 boards. The gap with direct measurement is the parameter estimation error. As shown in Fig. 6.3.4, the accuracy gradually increases as more data are used in the inverse analysis. It should be noted that the standard deviation is about 35 % of the measured value for the diffusion coefficient and ranges from 20 % to 80 % for the intrinsic permeability of these boards (Fig. 6.3.2 and Appendix 6.C). When the first 30 h of drying (50 % of full kinetics) are considered, the error in estimating the parameter is then similar or even smaller than the standard deviation of the direct measurements. This gives the model a fairly good predictive capability for the subsequent drying of these boards. This can also be continuously improved by iterating the inverse analysis as drying progresses.

In the following section, we report the use of online parameters tuning to enable the code to adapt the drying process after the problem with the heating element.



(a)



(b)

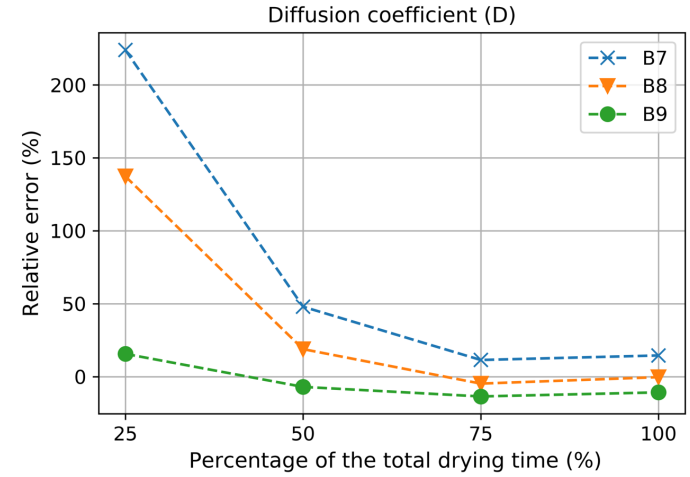
FIGURE 6.3.3 – Experimental and numerical results for the evolutions of moisture content over time, for boards B1 (a) and B9 (b)

6.3.2 *Predicting the drying process and improving the drying schedule*

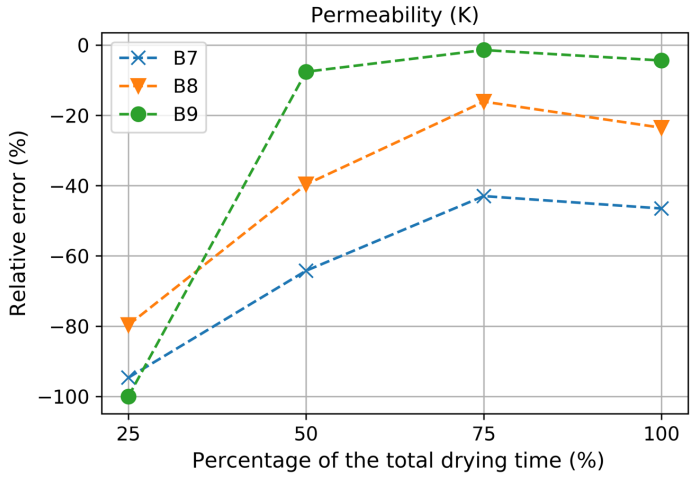
Comparison of measurements and simulations

The first step is to assess whether the code can predict the drying quality of this stack of boards. This depends on the final moisture distribution compared to the target average moisture and the final mechanical quality, which is usually estimated by a standardized method [26] known as a slicing test, to evaluate the internal drying stress. A slicing test is a way to characterize the internal drying stress by cutting the section into two slices at the end of drying, so that the stress field is partly converted into a global deformation. The gap between the two slices is then measured 48 h later. The results, in terms of average opening gap recorded in a slicing test performed on each instrumented board at the end of the drying, are shown in Table 6.3.1. The simulation overestimates most of the gaps by a factor of two, except for boards B6, B8 and B9. Note that the stress state at the end of the drying process is difficult for the model to capture. This depends not only on the final

[26] AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION, *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*.



(a)



(b)

FIGURE 6.3.4 – Influence of the drying time (percentage of the total drying time) considered in the inverse analysis on the estimation of the transfer properties, water diffusion coefficient (a), intrinsic permeability (b).

TABLE 6.3.1 – Opening gap obtained from a slicing test (in mm) for the different instrumented boards

	B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
Measurements	1.7	0.8	1.2	0.7	1.1	0.8	2.3	1.3
Simulation	3.2	1.8	2.6	2.1	1.2	2.3	2.1	1.8

moisture field within the board, but also on the whole history of the stress and moisture changes in the material due to the memory strains. The difference may also be due to the fact that none of the boards had an identical material orientation across the thickness, as assumed by the computational model. Differences in shrinkage across the thickness of the board altered the evolution of drying stress predicted by the model, meaning that the simulated opening gap deviated from that measured. However, the mechanical model was expected to reflect a general trend rather than the absolute values. The simulated final gap increases with the severity of the conditions, so that the optimization keeps its sense.

Figure 6.3.5 shows the MC at the core of the boards at the end of the drying process, once the stack of boards had been unstacked, i.e. approximately 57 h after the end of the cycle. The experimental final measured MC, shown on the y-axis, has a fairly high level

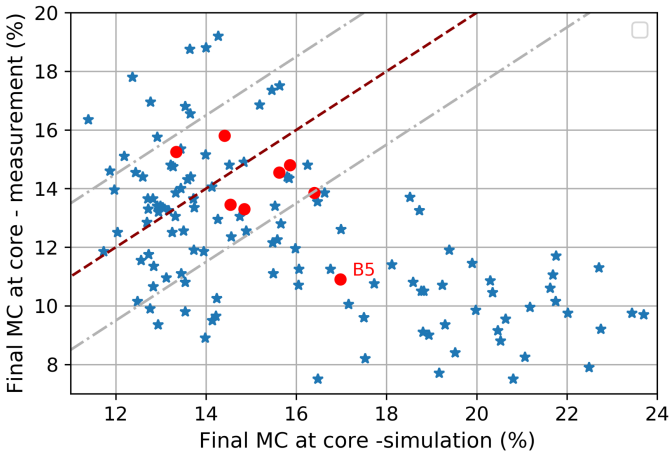


FIGURE 6.3.5 – Final MC at the core after the cooling period, simulated on the x-axis and measured on the y-axis. The red circle represents the instrumented boards for which Db and Kl were estimated by inverse analysis. The dark red dashed line shows the exact correspondence between simulation and measurement based on the equation y = x, and the accuracy interval at ±2.5 % of MC is bounded by the grey dashed-dotted lines.

of heterogeneity, with values ranging from 7.5 % to almost 20 %. The simulated final MC, shown on the x-axis for the same boards, shows even higher heterogeneity, ranging from 11 % to 24 %. In fact, many boards deviate from the ideal line, and only about 60 % of the final MC values for the boards are predicted with an accuracy of within ±2.5 %. There are several reasons for these discrepancies. Only the transfer parameters of the eight instrumented boards were determined, and for all the other boards (i.e. 94 % of the boards in the stack), the average K and D values obtained from these eight boards were used in the model. We are aware that considering the instrumented boards to be representative of the whole load is a strong assumption. In addition, it is well known that the properties of board depend on the sawing pattern and the position of the tree ; for this reason, the variation in the properties is not independent of the boards, i.e. low initial MC values and low transfer properties tend to be found for heartwood, and the opposite in sapwood [27] [28]. This means that the effect of the direction of the material on these transfer properties, and the effect of the natural variability of the wood, are not taken into account in our model. There are also further possible reasons, such as the uncertainty of the resistive moisture meter and a lack of knowledge of the initial moisture profile within the board thickness. It is important to mention that the final MC value for each instrumented boards was well predicted, with the exception of board B5, which had one of the least accurate estimates of K (Fig. 6.3.2).

Adaptative drying schedule

Despite some differences, the code was able to predict the final moisture dispersion of more than half the boards in the stack and the relative difference in the opening gap obtained in the slicing test. In this section, the parameters identified through the inverse analysis are used for a forward simulation to select the best drying conditions after the

[27] Patrick PERRÉ et Maurice MARTIN. « Drying at high temperature of sapwood and heartwood : theory, experiment and practical consequence on kiln control ». In : *Drying Technology* 12.8 (1994), p. 1915-1941. DOI : 10.1080/07373939408962213.

[28] Shusheng PANG. « Mathematical Modeling of Kiln Drying of Softwood Timber: Model Development, Validation, and Practical Application ». In : *Drying Technology* 25.3 (2007), p. 421-431. DOI : 10.1080/07373930601183751.

heating element problem to meet the operator's expectations. The characteristics of the stack of boards tested in the FCBA kiln are used. In all cases discussed below, drying was stopped and the results were compared when the average MC at the core of the eight instrumented boards reached 16.5 %. It should be noted that only the drying stage is studied here, i.e. without a conditioning stage or a cooling stage at the end of the schedule. Several cases were investigated, which varied in terms of the drying schedule used :

— Case 1 represented the standard drying schedule for maritime pine, as recommended by the kiln manufacturer.

— Case 2 involved the experimental drying conditions, i.e. Case 1 including the heating problem during the first drying day.

— Case 3 was based on Case 2 up to 30 h, and an optimized schedule was then proposed by the probabilistic optimization code to reduce the drying time.

— Case 4 followed Case 3, except that the probabilistic optimization code was used to improve the drying quality, with a time limit of 70 h.

The range explored by the model in terms of drying conditions for the last two cases was defined as follows :

— The temperature started at 71 °C, which is the value experimentally measured inside the dryer after 30 h of drying, and could increase by 10 °C ;

— EMC started at 8 %, a value that is close to the EMC after 30 h of experimental drying, and could go down to 5 %.

The MC used to apply the drying schedule was the average moisture at the core predicted by the model for the eight instrumented boards.

We defined an indicator of MC heterogeneity as the sum of the stack heterogeneity and the MC heterogeneity within the boards [29] :

$$Q_{MC} = \frac{1}{N_{Board}} \left(\sum_{k=1}^{N_{Board}} \left(\left(\overline{MC_k} - \overline{MC_{Stack}} \right)^2 + \frac{1}{e} \sum_{icv=1}^{NCV} Xl_{icv} \cdot \left(\overline{MC_k} - MC_{icv} \right)^2 \right) \right) \quad (6.5)$$

where N_{Board} is the number of boards in the kiln wood load, NCV is the number of control volumes (CVs) within the board thickness, $\overline{MC_k}$ is the average MC for board k, $\overline{MC_{Stack}}$ is the average MC for the global kiln load, MC_{icv} is the local MC for the CV icv, e is the board thickness, and Xl_{icv} is the width of the CV icv.

Figure 6.3.6a shows the drying process using the classical drying schedule, i.e. without the heating problem (Case 1). To overcome the heating problem (Case 2, Fig. 6.3.6a) the drying had to be extended by 10 % (i.e. seven additional hours) to achieve a moisture content of 16.5 % in the core of the eight instrumented boards. The drying quality for Case 2 was close to that of Case 1, with similar values for Q_{MC} and for the opening gap obtained in the slicing test (Table 6.3.1). Figure 6.3.7a and 6.3.7b shows the evolution

[29] STÉPHAN et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ».

of the drying stresses at the surface and in the core of board B9. It is interesting to note the sudden increase in surface tensile stress between 10 h and 20 h during the heating element problem. This change in conditions is likely to cause surface checks.

The optimized schedule used in Case 3 allowed the time to be reduced by 7 % (Table 6.3.2). The opening gap obtained in the slicing test and the final moisture heterogeneity (Q_{MC}) were also reduced by 12.5 % and 7 % respectively. After 30 h of drying, the model chose the higher temperature and the lowest possible EMC (Fig. 6.3.6c) to intensify moisture transfer within the wood.

For Case 4, the optimized schedule after 30 h allowed the opening gap of the slicing test to be reduced by 33 % compared to the schedule in Case 2. This represents a significant reduction in internal stresses. The results can be seen, for example, for board B9, where the surface tension after 30 h was no more than 0.58 MPa (Fig. 6.3.7d), compared with 0.75 MPa for Case 2 (Fig. 6.3.7b). The slightly longer drying time (+8 %) also allowed the final moisture heterogeneity, Q_{MC}, to be reduced by 40 %. To achieve this improvement, the optimization procedure involved setting the EMC to the highest possible value, i.e. the EMC after 30 h of drying, and maintaining it until the end of drying.

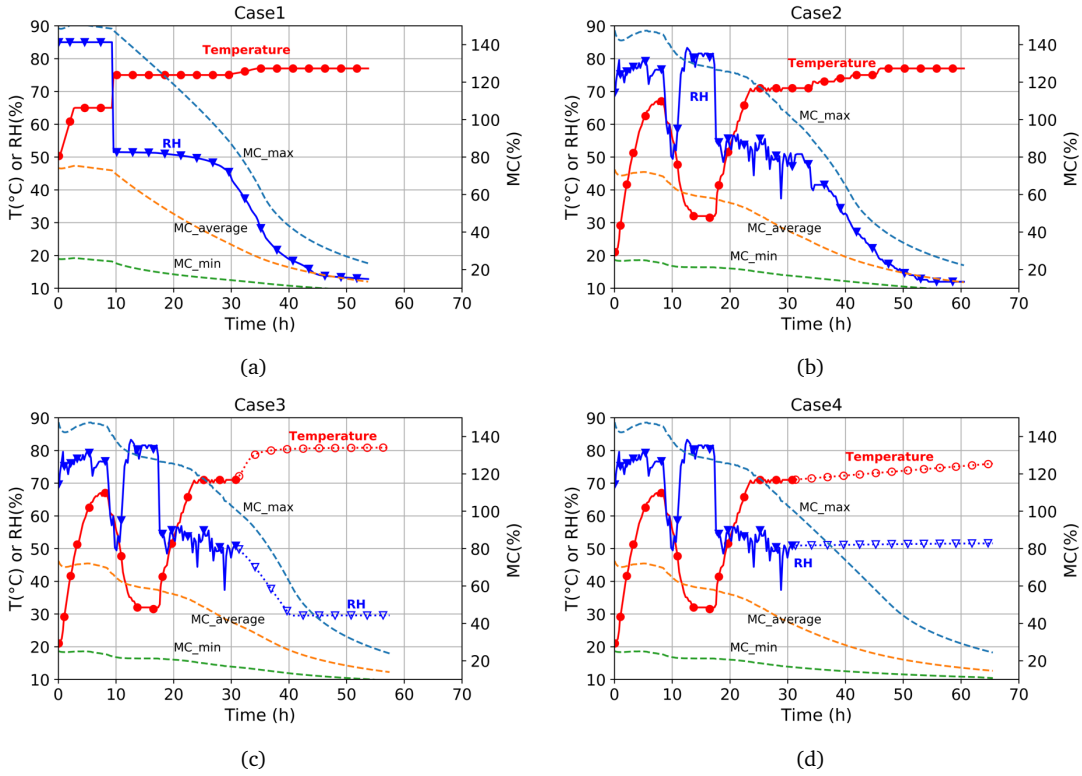


FIGURE 6.3.6 – Evolution of temperature and RH in the kiln chamber on the left y-axis for the four cases studied (a)-(d). The dotted line with open markers shows the part of the drying schedule that has been optimized. The simulated drying kinetics of the boards with the highest and lowest initial MC and the average wood load kinetics are shown on the right y-axis.

Figure 6.3.8 plots the final MC as a function of the initial MC for all boards used in the experiment. Significant heterogeneity can be seen in both the initial and final MC values. The eight instrumented boards for which the process is monitored are marked with red circles. Their initial values of MC lie at the lower end of the initial MC range of all the boards, an observation that raises the concern over the representativeness of the instrumented boards, and constitutes an additional difficulty in ensuring the drying quality of an entire load of boards. Optimizing the process based on a reduced number of

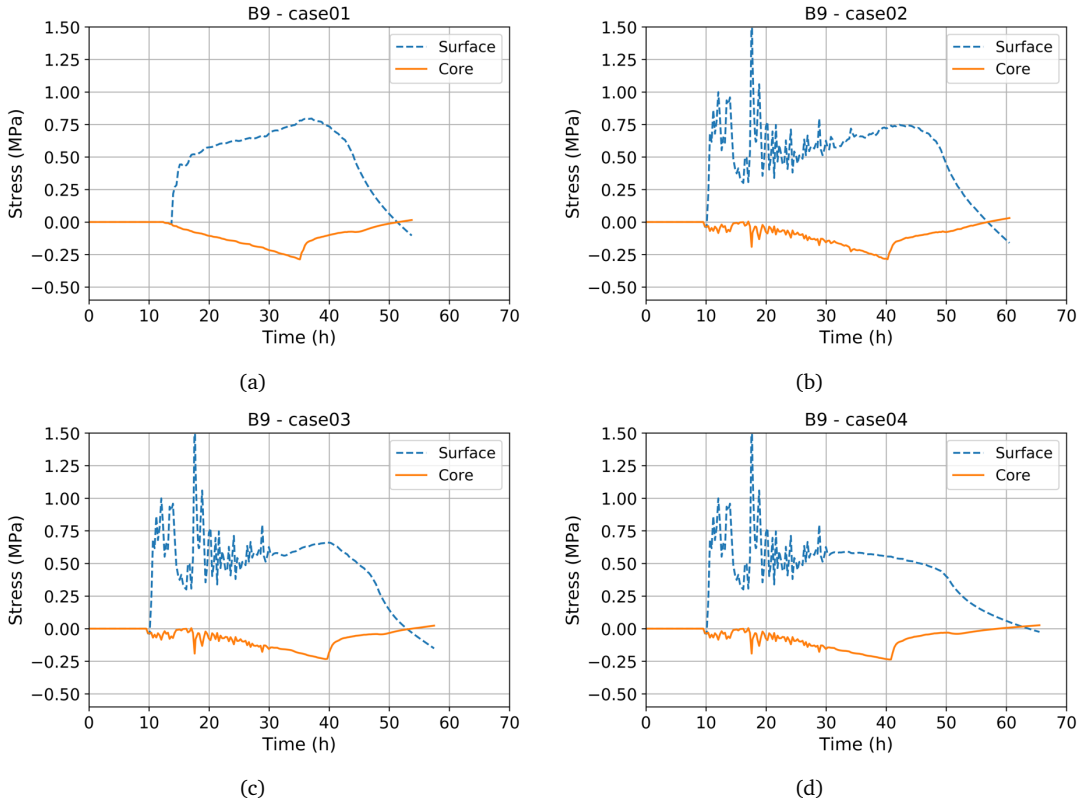


FIGURE 6.3.7 – Evolution of the stress at the surface and at the core of the B9 board for the four cases studied (a)-(d)

TABLE 6.3.2 – Simulation outputs for the different drying schedules for Cases 1 to 4. In Cases 3 and 4, the optimized variable appears in bold.

	Drying time (h)	Q_{MC}	Gap opening (mm)
CASE 1	54	29.7	4.7
CASE 2	61	26.5	4.8
CASE 3	**57**	24.7	4.2
CASE 4	66	15.5	**3.2**

boards that are not necessarily representative will therefore lead to an optimal solution for those specific boards, but not necessarily for the whole load. The negative trend depicted in Fig. 6.3.8 confirms than the content of sapwood is an essential factor : boards with a high initial MC, which are likely to contain a large proportion of sapwood and hence to be flatsawn, are those that tend to have a lower final MC (due to the ease of moisture migration in sapwood along the radial direction).

This issue could be addressed in various ways. At the industrial level, the problem could be overcome by sorting the boards prior to drying, to create more homogeneous stacks. Other types of measurements could also be added, such as weighing certain stacks of boards to obtain the average kinetics of the wood load. Finally, at the software level, we could integrate a stochastic module for generating non-instrumented stacks of boards, in order to reproduce the diversity in the possible board stack solutions and to select the control parameters that optimizes the drying for all the stacks thus generated. However, this stochastic generation must rely on realistic facts, for example the range of log diameters and the position of a given board within the log, to account for both the direction (radial/tangential) and the radius (sapwood/heartwood).

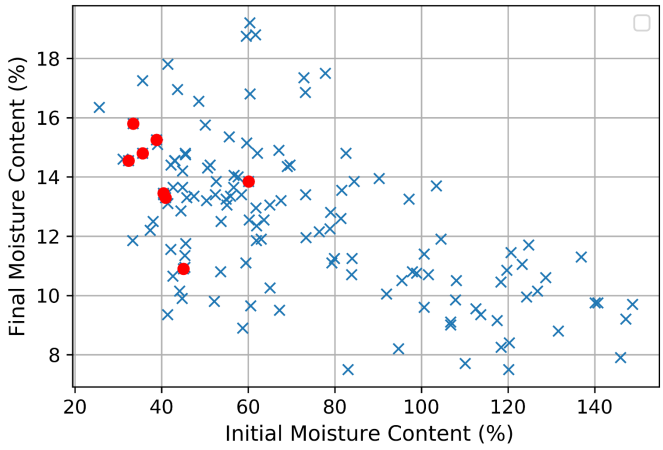


FIGURE 6.3.8 – Measured final MC corresponding to the measured initial values of MC for all boards in the stack. The red circles represent the eight instrumented boards.

6.4 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

In this work, the drying kinetics of boards dried in a semi-industrial kiln were used for online determination of transfer parameters by inverse analysis, using a comprehensive multiscale model as a physical engine. As expected, we proved that the accuracy of parameter evaluation increased throughout the process. The values identified in this way were subsequently used by the mechanistic model as feed-forward control to meet the user's expectations. The following conclusions can be drawn :

— Using the time evolution of the core MC value measured by the resistive method, the two transfer parameters K and D can be identified with fairly good accuracy by an inverse analysis. This identification can be done on-line, with an accuracy that increases with the drying time.

— The lack of representativeness of the instrumented boards makes it difficult for the model to adapt or optimize the drying schedule for the variety of boards in the stack. Further types of measurements must be made, such as weighing of the stack to obtain the average kinetics of the wood load. The mechanistic model could also stochastically generate virtual boards with a wide variety, for example in terms of sawing patterns and proportions of sapwood, in order to capture the diversity of real lumber loads.

By iterating these inverse and forward modeling approaches throughout the drying process, it may be possible to cope with unforeseen events in the drying conditions, or to tackle the issue of intermittent energy. The concept of virtual stochastic boards is presently under investigation by our team.

Acknowledgments

ADEME is a partner of the project Ossolaire and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

6.a APPENDIX A - MECHANICAL AND TRANSFER PARAMETERS

TABLE 6.A.1 – Values of transfer parameters used in this work to simulate the drying kinetic. The other values used by the model are given in Perré and Turner (1999) [30] for softwood.

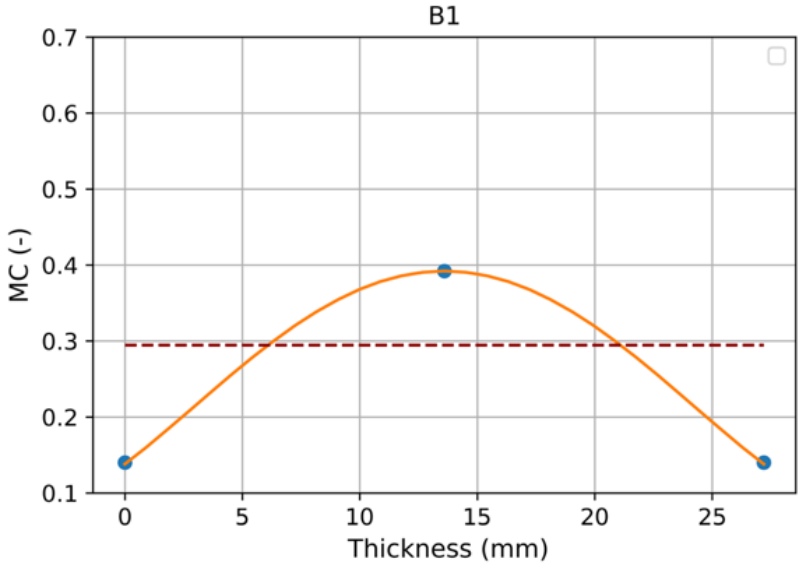
	Value	Unit
Porosity	0.63	(-)
Oven-dry density	550 (default value) or measured	$kg{\cdot}m^3$
Liquid permeability	determined in this work	m^2
Bound water diffusion	$D = D_0 \cdot exp\left(-9.9 + 9.8 \cdot X_b - \frac{4300}{T}\right)$ the value of D_0 was determined in this work	$m^2{\cdot}s^{-1}$
Sorption isotherm	$RH = 1 - exp\left(-0.9114 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right) - 3.904 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right)^2\right)$ with X_b the bound water content and X_{fsp} the fibers saturation point	(-)
Thermal conductivity	$\lambda = 0.14 + 0.3 \cdot X$	$W{\cdot}m^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
Heat capacity	$\rho \cdot C_p = \rho_0 \cdot (1400 + 4185 \cdot X)$	$J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
External heat transfer coefficient	15	$W{\cdot}m^{-2}{\cdot}°C^{-1}$
External mass transfer coefficient	0.015	$m{\cdot}s^{-1}$

TABLE 6.A.2 – Values of mechanical parameters used in this work to simulate the drying stress in the sofwood boards.

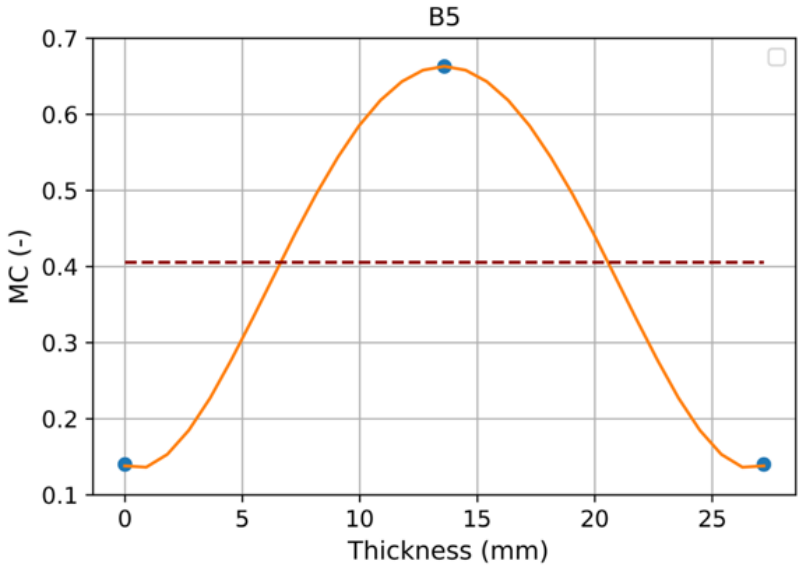
	Value			Unit
	Radial	Tangential	Longitudinal	
Shrinkage coefficient	0.12	0.25	0.002	%/%MC
Young modulus	0.90	0.50	13.9	GPa
Poisson coefficient	ν_{RT}=0.73 ; ν_{LR}=0.36 ; ν_{TL}=0.03			(-)
Viscoelastic compliances J and associated retardation time τ at 20 °C in radial direction (4 Kelvin's elements)	$J_1 = 2.82$; $J_2 = 8.0$; $J_3 = 18.9$; $J_4 = 51.3$			GPa^{-1}
	$\tau_1 = 1.77$; $\tau_2 = 700$; $\tau_3 = 4.9E8$; $\tau_4 = 2.5E5$			hours
Activation energy (viscoelastic creep)	$W_1 = 44.2$; $W_2 = 121$; $W_3 = 271$; $W_4 = 111$			$kJ{\cdot}mol^{-1}$
Mechanosorptive compliances m and associated retardation time τ in radial direction (3 Kelvin's elements)	$m_1 = 0.3$; $m_2 = 0.3$; $m_3 = 2.8$			GPa^{-1}
	$\tau_1 = 0.01$; $\tau_2 = 0.1$; $\tau_3 = 1$			(-)
Irrecoverable mechanosorptive compliance in radial direction	ms = 37			GPa^{-1}

[30] PERRÉ et TURNER, « A 3-D version of TransPore »

6.b APPENDIX B - INITIAL MC PROFILES OF TWO BOARDS



(a)



(b)

FIGURE 6.B.1 – Initial MC profiles estimated by a polynomial function and fitted to match the MC measured at the core, to the average MC of the board, and the EMC at the surface

6.c APPENDIX C - TRANSFER PARAMETERS ESTIMATED AND MEASURED

TABLE 6.C.1 – Mass diffusivity coefficients ($x10^{-10}$ $m^2 \cdot s^{-1}$) estimated by direct measurement and by inverse analysis using an initial parabolic moisture profile as input. The relative error (i.e. the absolute error divided by the direct measurement) is also given.

	B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
D_Inv. Meth	0.9	0.8	1.1	1.1	1.4	1.2	1.3	1.3
D_meas. (SD) (%)	1.2 (9)	0.7 (16)	0.5 (16)	1.5 (13)	0.7 (15)	1.1 (25)	1.3 (34)	1.4 (36)
relative error (%)	-23	14	97	-29	100	15	0	-11

TABLE 6.C.2 – Intrinsic permeability ($x10^{-16}$ m^2) estimated by direct measurement and by inverse analysis using an initial parabolic moisture profile as input. The relative error is also given.

	B1	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9
K_Inv. Meth	1.6	0.3	2.1	0.3	2.0	1.1	1.0	9.3
K_meas. (SD) (%)	13.2 (61)	1.1 (64)	1.4 (19)	3.9 (46)	0.6 (66)	2.1 (87)	1.2 (19)	9.7 (66)
relative error (%)	-88	-70	49	-92	217	-46	-24	-4

7

Intégration et valorisation des énergies intermittentes dans le séchage du bois d'œuvre

Dans les chapitres précédents plusieurs fonctionnalités ont été apportées au métamodèle afin qu'il puisse améliorer le séchage en amont et pendant le processus, en prédisant les résultats et en optimisant la conduite. Pour tirer parti des EnR&R dans le séchage du bois le métamodèle a besoin en plus d'intégrer les scénarios de disponibilité énergétique prévus. L'objectif de ce dernier chapitre est donc d'utiliser en entrée du métamodèle un scénario énergétique réaliste et d'obtenir, par optimisation des conduites de séchage, les stratégies de régulation les plus adaptées. Les scénarios énergétiques utilisés considèrent un séchoir industriel alimenté par un système hybride, couplant une chaudière gaz à des panneaux solaires thermiques et photovoltaïques. Considérant la météo de son lieu d'implantation, Bordeaux, des scénarios de puissances thermiques et électriques disponibles au cours du temps, pour des saisons différentes, ont été définis. Un nouveau critère de résultat est considéré dans ce travail pour valoriser les énergies renouvelables dans le processus. Il s'agit de la proportion d'énergie renouvelable thermique utilisée dans l'énergie thermique globale requise pour le séchage. Les conditions de séchage (i.e. évolution de la température et de l'humidité relative) appliquées sur l'ensemble du cycle sont modélisées désormais sous la forme de séries de Fourier ; ces fonctions périodiques temporelles peuvent reproduire les conduites traditionnelles ainsi que les dynamiques des scénarios énergétiques appliqués. Les paramètres de ces conduites ainsi modélisées ont pu être choisis par le code d'optimisation afin de sélectionner, au printemps et en été, les scénarios permettant de maximiser la part d'énergie renouvelable thermique dans le séchage. Les résultats obtenus, pour une charge de bois homogène, permettent de doubler la part d'EnR&R thermique dans le séchage, par rapport à une conduite traditionnelle, au détriment du temps de séchage. Les oscillations des conditions de séchage, à plus basse température, augmentent aussi la qualité du bois séché. Comme dans le chapitre 5 l'optimisation sur le coût permet de considérer plusieurs critères et de trouver des compromis, ici entre la durée de séchage et la part d'EnR&R. Le coût des énergies conventionnelles considérées peut cependant avoir un impact important sur les stratégies choisies par le code et doit donc être précisé. Dans un contexte de changement climatique et de volatilité des prix de l'énergie, l'approche développée prend tout son sens.

Ce papier sera soumis au journal *Drying Technology* (soumission prévue fin 2024).

Advanced control system harnesses fluctuating energy for industrial wood drying

Antoine STÉPHAN [1], Patrick PERRÉ [2 3], Merlin SIMO-TAGNE[1], Clément L'HOSTIS [4], Romain RÉMOND[1]

ABSTRACT

The use of renewable energy and heat recovery sources in wood drying would help reduce the environmental footprint of the process as well as its dependence on sources with volatile costs. A mechanistic model is used to generate original drying conditions for wood drying adapted to fluctuating power input. A Fourier series based drying condition generation module has been embedded in the computational model to generate conditions tailored to different RE&R scenarios. The simulated annealing algorithm has been used to increase the use of renewable energy. This approach is used in a case study of a kiln dryer equipped with solar PV/T panels for drying thick beech wood boards. The results proposed original drying conditions that improve final product quality and double the amount of renewable thermal energy used in the process, but often at the cost of longer drying times and higher operating costs as long as fossil energies remain cheap.

keywords : renewable energy ; process modeling ; optimization ; fossil energies ; PV/T panels

[1] Université de Lorraine, INRAE, LERMAB, Épinal, 88000, France
[2] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM, Gif-sur-Yvette, 91190, France
[3] Université Paris-Saclay, CentraleSupélec, LGPM SFR Condorcet FR CNRS 3417, Centre Européen de Biotechnologie et de Bioéconomie (CEBB), Pomacle, 51110, France
[4] FCBA – Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Champs-sur-Marne, 77420, France

7.1 INTRODUCTION

Evaporating one kilogram of water requires about 0.7 kWh ; however, during the drying of wood, between 1.5 and 3 kWh are consumed to remove the same amount of water due to thermal losses [1]. This is the reason why drying remains the most energy-intensive step of wood processing. Taylor et al. (1996) [2] report that this process can consume around 70 % of the total energy used in the manufacture of most wood products. With an average of about 2380 kg of wood per household in France for the structure alone, drying these elements would result in the evaporation of approximately 1500 kg of water, requiring a minimum of 2300 kWh [3] [4]. This energy consumption is comparable to the annual electricity usage of a typical French citizen.

It should be noted that trends in wood construction in France, especially if we commit to significantly reducing our greenhouse gas emissions, indicate a substantial increase in the construction of wooden buildings [5]. The proportion of energy used to dry wood for construction is therefore expected to increase in coming years. The use of renewable energy and heat recovery sources (RE&R) in wood drying would help reduce the environmental footprint of the process as well as its dependence on sources with volatile costs. These new energy sources, which would replace traditional hydrocarbon or biomass boilers and electricity generated from nuclear fission, are inherently variable and may provide lower energy levels. Energy from solar panels or photovoltaic cells, electricity generated by wind turbines, and steam from industrial processes indeed fluctuate with weather conditions and site activity. Several strategies have been investigated in the literature for the use of renewable energy sources in wood drying in view of these challenges. Many studies have focused on solar energy dryers, used to dry agricultural or marine products [6]. There are many types of solar dryers, that are generally classified according to the method used to collect the solar energy, how it is converted into useful thermal energy for drying and the arrangement of the main components of the kiln [7] [8]. Solar drying is obviously all the more advantageous where solar energy is abundant, such as in tropical countries. In order to ensure drying quality of wood products, the temperature and humidity in the kiln dryer must be correctly regulated despite the intermittent nature of solar energy. To address this challenge, solar systems are used to incorporating energy storage solutions that absorbs temperature fluctuations in the kiln chamber, ensuring a continuous drying process [7] [9]. Based on this strategy, hybrid solutions are then proposed. They combine solar energy with another energy source to provide the required energy level for drying regardless of solar availability, while still

[1] ALÉON, *Séchage des bois d'oeuvre*.

[2] J. M. TAYLOR et al. « Energy related aspects of timber drying ». In : *International Journal of Ambient Energy* 17.1 (1996), p. 41-48. DOI : 10.1080/01430750.1996.9675214.

[3] GONTIA et al., « Material-intensity database of residential buildings ».

[4] SIKKEMA et al., « A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and new circular economy ambitions ».

[5] DONADIEU DE LAVIT et LERIDON, *Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*.

[6] Ching Lik HII et al., éd. *Solar drying: Fundamentals, applications and innovation*. Singapore : TPR Group Publication, 2012.

[7] LUNA et al., « Solar timber kilns ».

[8] HII et al., *Solar drying: Fundamentals, applications and innovation*.

[9] David LUNA et al. « Model and simulation of a solar kiln with energy storage ». In : *Renewable Energy* 35.11 (2010), p. 2533-2542. DOI : 10.1016/j.renene.2010.03.024.

following a conventional drying schedule [10] [11]. By providing a more stable temperature in the kiln chamber, these solutions allow the conventional drying schedule for lumber to be applied [12] [13]. This generally involves increasing the temperature and decreasing the relative humidity of the air as the moisture content of the lumber decreases.

However, such inconstancy of energy availability seems more appropriate to intermittent than stationary drying. Intermittent drying is of great importance for the processing of bio-products, because fluctuations of drying conditions can reduce energy consumption and improve the quality of the final product [14]. For optimal results, the parameters of the intermittency must be tailored to the transfer properties of the product [15]. This method has been also tested in wood drying processes [16] ; such fluctuating drying conditions is promising for reducing energy consumption and reducing drying stress by activation of mechanosorption through oscillating moisture content [17] [18].

While integrating these intermittent energy sources into wood drying presents challenges—particularly because conventional drying systems are outdated and based on abundant resources—it is essential to consider industrial interests and the timber sector to implement these changes effectively. Thus, the quality of the dried wood must be maintained, along with controlled drying costs and durations. The search for new drying methods suitable for RE&R, taking into account the objectives of a dryer operator in terms of duration, quality, cost and energy consumption, is the objective of the work presented here. These criteria and energy sources are addressed by an advanced kiln controller capable of predicting and optimizing the drying process, providing an alternative to traditional dryer control. The first part of this work presents the computational tool and a typical case study, an industrial kiln dryer partially powered by solar panels. The second part presents and discusses the results obtained from this example, in particular the correspondence of the optimized drying process performance with the industrial needs. The conclusion brings a concise overview of the previous parts and the perspective of generalizing such strategies.

7.2 MATERIALS AND METHODS

Figure 7.2.1 shows the overall strategy used in this work. The heart of the approach is the mechanistic model, which estimate the optimal drying conditions in the kiln chamber in response to different input factors as (i) the history of drying conditions seen by the wood load, and the RE&R input at time t and its forecasts ; (ii) the expectations defined by the decision maker for his objectives in term of energy consumption and RE&R contribution, quality, time, cost ; (iii) the return signal from the probes that provides

[10] Xiang CHI et al. « Energy and quality analysis of forced convection air-energy assisted solar timber drying ». In : *Energy* 283 (2023), p. 128718. DOI : 10.1016/j.energy.2023.128718.

[11] BAILLY et al., « Energie solaire : apports thermique et électrique complémentaires pour les séchoirs de bois d'œuvre ».

[12] Daniel ALÉON et al. *Séchage du bois: guide pratique*. Paris : CTBA, 2001. 126 p.

[13] JOLY, *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*.

[14] Ana Caroline RAIMUNDINI ARANHA et al. « Conventional and intermittent drying modeling of agricultural products: A review ». In : *Journal of Food Process Engineering* 46.1 (2023), e14206. DOI : 10.1111/jfpe.14206.

[15] Charlotte VAN ENGELAND et al. « Comprehensive analysis of intermittent drying. A theoretical approach ». In : *Food and Bioproducts Processing* 131 (2022), p. 86-101. DOI : 10.1016/j.fbp.2021.10.009.

[16] A. HERRITSCH et al. « Intermittent and Continuous Drying of Red Beech Timber From the Green Condition ». In : *Drying Technology* 28.2 (2010), p. 269-277. DOI : 10.1080/07373930903530287.

[17] CRUZ SANCHEZ, « Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois ».

[18] SALEM, « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ».

information on the drying kinetics of the boards in the stack. A probabilistic optimization code, briefly presented in the next section, proposes tailor-made drying conditions that can vary with energy input and that meet operators' expectations (part 1 in Fig. 7.2.1). The multiscale model (part 2 in Fig. 7.2.1), *Multi_Wood_DryS*, simulates the drying of the wood load and return to the optimization code drying time, quality, cost, and energy consumption. This mechanistic model was used in Simo-Tagne et al. (2024) [19] to estimate the transfer properties of the boards by inverse analysis of the drying kinetics (part 3 in Fig. 7.2.1, not used in this work) in order to better predict the behavior of the wood load.

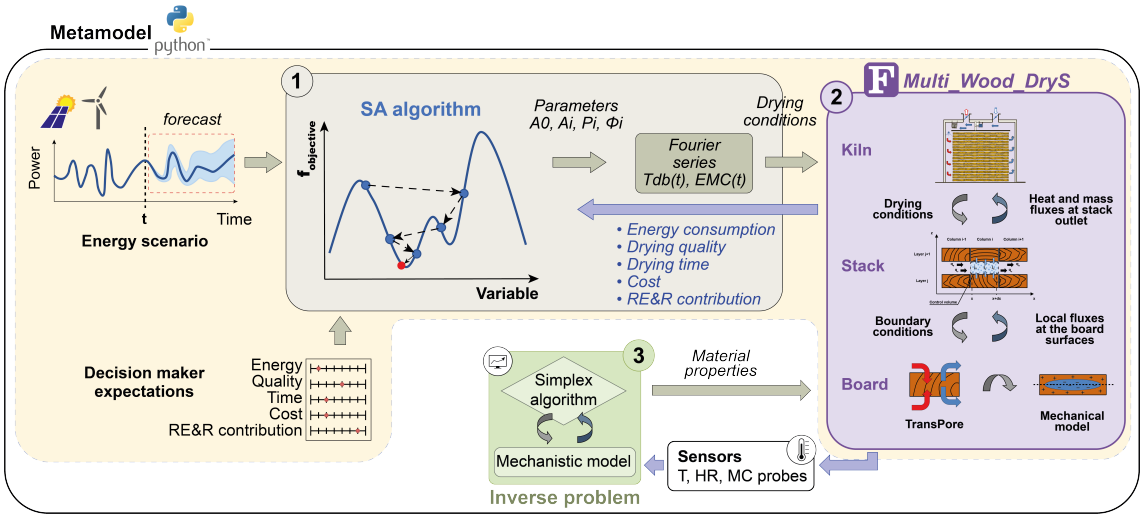


FIGURE 7.2.1 – Global overview of the different modules of the computational model and their links in the wood drying control system. The functionalities used in this work are Modules 1 and 2 shown in beige color scheme. Module 3, published in Simo-tagne et al. (2024) [19], incorporates measurements from kiln dryer sensors to improve model predictions.

7.2.1 *Computational tool for simulating wood drying*

Multi_Wood_DryS [20] is a multiscale and multiphysics computational model, which simulates the drying at three intricate scales : kiln, stack and board. The computational model used at the local scale of the board is the one-dimensional version of the code *TransPore* [21] which is used for the very fast simulation of coupled heat and mass transfer in porous media. A mechanical model [22] was embedded in *TransPore* to estimate the strain and stress that develop during drying, so that quality issues can be addressed. The stack level is able to compute the drying of hundreds of boards simultaneously and to account for the airflow/boards interactions and for wood variability [23]. At the kiln level, the *Multi_Wood_DryS* code calculates the energy consumption necessary to reach the drying conditions set, accounting for the characteristics of the kiln and the stack

[19] Merlin SIMO-TAGNE et al. « On-line evaluation of moisture transfer properties for a feed-forward control of a wood drying kiln with a mechanistic model ». In : *Drying Technology* 0.0 (2024). Publisher: Taylor & Francis _eprint: https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2420873, p. 1-14. DOI : 10.1080/07373937.2024.2420873.

[20] PERRÉ et al., « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ».

[21] PERRÉ et TURNER, « TRANSPORE ».

[22] RÉMOND et al., « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood ».

[23] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

behavior [24]. The key macroscopic formulations of heat and mass transfer and drying stress formulation used in mechanistic modeling have been summarised in a recent work [25]. For more details of the different parts of the model, please refer to the references mentioned here (See Appendix 7.A for the main parameters used in the computational tool).

7.2.2 *Optimize wood drying conditions*

In Stephan et al. (2024) [26], the multiscale model, *Multi_Wood_DryS*, has been combined with a probabilistic optimization code to propose tailor-made drying schedules that meet operators' expectations in terms of energy consumption, quality, drying time and cost. The decision maker then had to define his expectations about these different objectives by defining the weighting factors in the objective function. A new criterion has been introduced to include the contribution of renewable thermal energy to total energy consumption within the objective function. In this paper, our main focus is on maximizing this contribution, which is why the weighting is based solely on this criterion. The objective function is then simply defined as :

$$f_{obj} = \left(1 - \frac{E_{th_RE,i}}{E_{th,i}}\right) \tag{7.1}$$

where $E_{th,i}$ is the energy required for the guess simulated drying schedule and $E_{th_RE,i}$ represent the energy used from renewable source by the guess simulated schedule number i along the optimize procedure. The simulated annealing algorithm was used for to minimize the objective function. It is capable of testing different drying conditions, more or less adapted to intermittent fluctuations in process input power. The parameters of this global optimization algorithm are given in Appendix 7.A.

7.2.3 *Fourier-series-based drying condition generator*

The drying conditions of the kiln must be able to evolve in phase with fluctuations in the input power. In the case discussed in the paper, the energy output of the PV/T panels varies on a daily basis, with changes occurring over longer periods. If the drying temperature varies, the EMC and the air velocity through the boards stack must also be adapted to these variations. This leads us to define several Fourier series to model the evolution of the drying conditions adapted to the intermittent variations of the process input power. To limit the range of conditions explored, we restricted the model to three Fourier terms for temperature and EMC curves (Eq. 7.2). This simplification is sufficient to capture the overall trend of temperature and EMC dynamics, whether for a weather file or a conventional drying schedule (Appendix 7.B). The air velocity is initially assumed to be constant throughout the cycle.

$$f(t) = A_0 + \sum_{i=1}^{3} A_i \cos\left(\frac{2\pi}{P_i}t + \phi_i\right) \tag{7.2}$$

Each drying schedule explored requires computational time to simulate the drying of the wood load by the multiscale model. The search intervals for the Fourier series

[24] PERRÉ et RÉMOND, « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ».

[25] PERRÉ et al., « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids ».

[26] STÉPHAN et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ».

TABLE 7.2.1 – Ranges of possible values for the various harmonics of the Fourier series describing the evolution of temperature and that for the EMC

		Tdb		EMC	
		min	max	min	max
	A_0	40	70	10	10.5
1st harmonic	A_1	1	7.5	0.5	2.5
	P_1	23	24	23	24
	ϕ_1	2	3	$2+\pi$	$3+\pi$
2nd harmonic	A_2	1	15	0.5	1.5
	P_2	3*24	7*24	24	30*24
	ϕ_2	0	π	0	π
3rd harmonic	A_3	1	15	4	7
	P_3	15*24	40*24	30*24	90*24
	ϕ_3	0	π	0	π

parameters have to be limited in order to guide the search towards the schedule that seems relevant. The Table 7.2.1 shows the ranges of values explored in this work for the various harmonics of the Fourier series. The choices for reducing the search interval are explained in Appendix 7.B.

7.2.4 *Details of tested configurations*

The usable capacity of the kiln simulated here is approximately 50 m^3, a volume that is relatively representative of the average size of kilns installed in the timber industry in France. The case study presented here focuses on the drying of beech boards, which, along with oak, are two of the most commonly sawn hardwoods in France. In a conventional dryer, it takes about 1 month to dry beech wood with a thickness of 54 mm from the green state to approximately 12 % moisture content [27]. There are many possible scenarios for the RE&R contribution. An approximate calculation has been made to generate data for a fluctuating supply of heat and electricity. We have taken the example of hybrid solar PV/T (photovoltaic and thermal) panels, which can simultaneously supply electricity and heat and which have already been used to dry various agricultural, food products [28], wood chips. On the basis of a manufacturer's data sheet [29], an overall efficiency of 65 % was considered for these PV/T panels (20 % for electricity - 45 % for thermal energy). We used solar data extracted from the Meteonorm software [30] to obtain solar irradiance specific to the location. The electrical and thermal outputs were estimated using an approximate calculation. The electrical power output of the PV/T panel (P_{elec}) is estimated from the global solar irradiation received on the inclined plane, which in this paper is set at 36° south.

$$P_{elec}(t) = \eta_{PV} \cdot A \cdot I_{glo}(t) \tag{7.3}$$

With A, $I_{glo}(t)$, η_{PV} representing the collector area given here as 1.65 m^2 per panel, the global solar irradiance received on the inclined plane (in $W{\cdot}m^{-2}$) at time t, the

[27] ALÉON et al., *Séchage du bois*.

[28] Sourav DIWANIA et al. « Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement ». In : *Int J Energy Environ Eng* 11.1 (2020), p. 33-54. DOI : 10.1007/s40095-019-00327-y.

[29] BASE. *Cogen'Air, Marcheprime, France*. URL : https://www.base-innovation.com/la-technologie-thermovoltaique-cogenair/.

[30] Jan REMUND et al. *Meteonorm*. Version 8. Bern, Switzerland, 2020. URL : https://meteonorm.com/en/meteonorm-version-8.

efficiency of the photovoltaic cells at converting sunlight into electricity (given here as 0.2), respectively. The thermal power output of the PV/T panel (P_{th}) is then estimated from the following equation :

$$P_{th}(t) = \eta_{glo} \cdot A \cdot I_{glo}(t) - P_{elec}(t) \tag{7.4}$$

With η_{glo} the global efficiency of the solar collector, i.e. both electrical and thermal, and given here as 0.65. It should be noted that the approach taken here is primarily intended to generate a plausible simulation file of fluctuating energy input, while the exact panel surface area is ultimately of little importance. This approximate calculation is therefore sufficient for this work.

The typical energy ratio (i.e. energy consumption per kg of evaporated water) for conventional dryers, as reported by Perré et al. (2012) [31], is 1.10 kWh·kg^{-1} for heating consumption. Using these values, a rough calculation indicates that drying 50 m^3 of beech wood from 50 % to 10 % MC would require the evaporation of 13.5 tons of water, which translates to approximately 15 MWh for heating consumption. In a city like Bordeaux, with a temperate oceanic climate and more hours of sunshine than the average for other French cities, the thermal energy output from 60 PV/T panels over a month could cover approximately 30 %, 25 %, and 13 % of the thermal energy required for drying in summer, spring and winter respectively, based on the approximate calculation above.

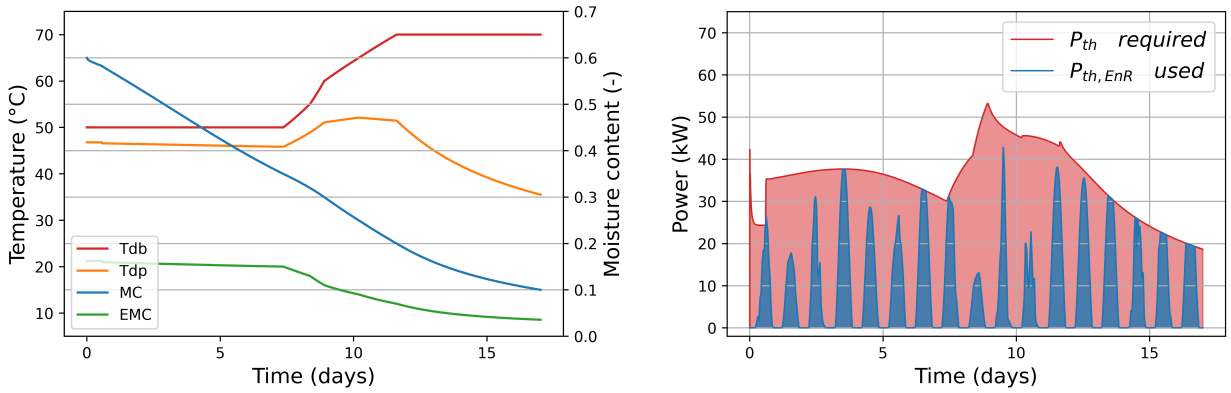
For the calculation of heat loss through the kiln walls, the average outdoor temperature for each period was taken into account, which was 21 °C, 13 °C, and 7 °C for the summer, spring, and winter periods, respectively. In order to simplify the analysis of the results, several assumptions have been made : all the boards in the stack are considered to be identical (flatsawn boards, initial MC of 60 %; see Appendix 7.A for the additional characteristics) ; drying is stopped when the average MC of the wood load reaches 10 %. This work focuses only on the main drying phase, i.e. the initial heating and final conditioning phases of the drying schedule have not been considered. The initial temperature of the wood load is then assumed to be at the drying temperature, around 50 °C, at the start of the simulation.

7.3 RESULTS AND DISCUSSION

During the summer period, including the power generated by 60 PV/T panels in the energy supply of the kiln dryer can cover about 28 % of the total heat consumption (see Table 7.3.1-Case 1) when using the conventional drying schedule for beech (Fig. 7.3.1a). The available thermal energy is fully used for the process, but a significant additional contribution from the conventional energy source is required to keep the temperature in the kiln chamber constant or to increase it (Fig 7.3.1b). The PV/T panels also supply around 47 % of the electricity used to power the fans in a process. Without the heating and equalizing phases and without taking into account the variability of the wood load, the energy ratio obtained and the drying time are slightly lower than those found in practice (Table 7.3.1-Case 1). The cost of this drying process per cubic meter of dried wood is given here to give a relative trend. In this case, it would be around 47 euros per m^3 of dried wood. The purchase price for thermal energy from renewable sources is assumed to be half the cost of fossil energy (e.g., gas here), while the price of electricity from RE&R is assumed to be four times lower than the grid electricity price (See Appendix 7.A for more

[31] Perré et al., « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ».

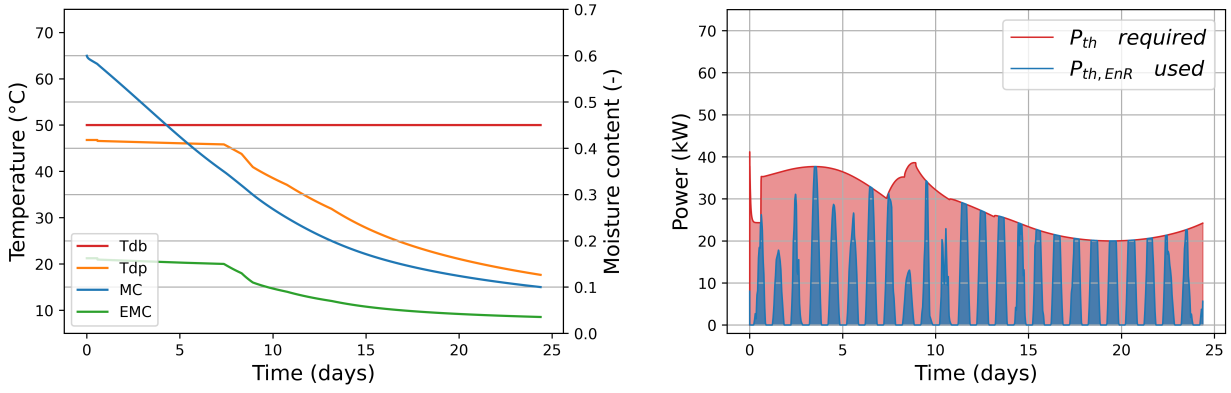
details on the input parameters of the cost estimation model). This calculation probably favours RE&R at the moment, but it is still a plausible scenario for the near future.



(a) (b)

FIGURE 7.3.1 – Conventional drying schedule during the summer period (a), showing the dry-bulb (Tdb) and dew point (Tdp) temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

The low temperature drying presented in Table 7.3.1-Case 2 is identical in terms of the evolution of the EMC with the MC of the wood load, but with a maximum temperature limited to 50 °C (Fig. 7.3.2a). This lower temperature has a direct impact on the drying time, which is +43 % longer, and therefore on the energy ratio of the operation (+20 %) and finally on the cost price (+24 %). On the other hand, it can be seen that reducing the drying temperature allows the RE&R to make a slightly greater contribution to the energy consumed by this operation, increasing by about 5 % (Table 7.3.1-Case 2) (Fig. 7.3.2b).



(a) (b)

FIGURE 7.3.2 – Conventional drying schedule at low temperature during the summer period (a), showing the dry-bulb and dew point temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

In the Case 3, the computational model was set to optimize the proportion of renewable heat in the process by matching the drying conditions as closely as possible to the fluctuation of the RE&R source in summer. The optimization code then performed at least 400 iterations, which required around 1.5 hour on a computer with Intel®Xeon®W-2265 with a clock rate of 3.5 GHz. The code succeeds in making use of the fluctuating energy

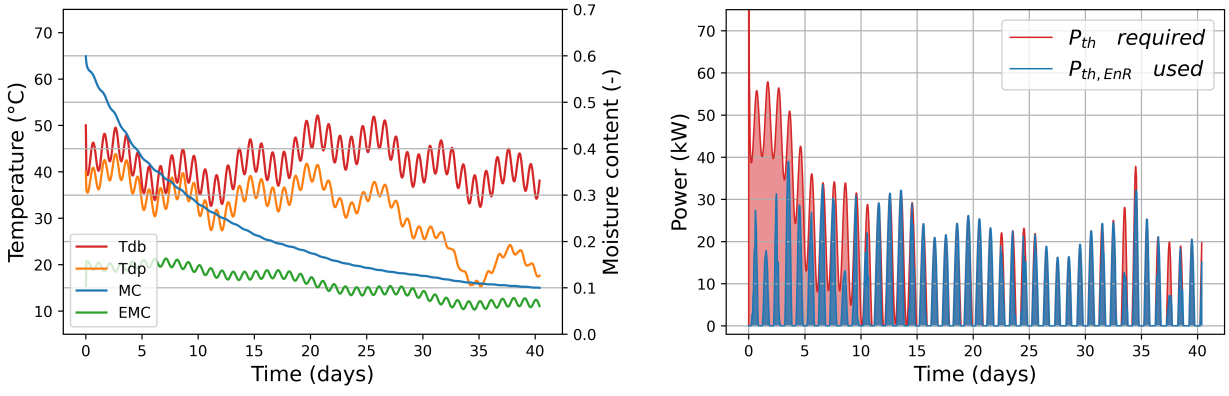
[32] STÉPHAN et al., « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost »

TABLE 7.3.1 – Results of the different drying schedules. Bolded values are those of the optimized criteria. These criteria were defined in Stéphan et al (2023) [32] and are briefly given in Appendix 7.C.

Season	Case	Drying schedule	Time (h)	Energy ther. (%)	Energy elec. (%)	Energy ratio (kWh·kg^{-1})	Cost (€/m3)	MC heterogeneity (x10^{-4})	Slicing Test (mm)	Std dev. ST
Summer	1	Std.	408	28	47	1.01	47	6.6	4.2	0.21
	2	Std. - Low T°	585	33	47	1.20	57	6.6	4.1	0.14
	3	Optim.	970	**53**	47	1.22	65	2.1	2.4	0.07
Spring	4	Std.	408	20	35	1.05	50	6.6	4.2	0.21
	5	Optim.	843	**40**	37	1.18	64	2.6	2.5	0.07
	6	Optim.*	452	24	35	1.02	**76**	3.3	2.9	0.22

*The baseline scenario has been modified by doubling the gas price.

input. 53 % of the heat needed for drying is now covered by RE&R. However, in this case, the optimized schedule produces a drying process that takes more than twice as long as the conventional schedule (Fig. 7.3.3a). The optimized drying conditions generated by the model results in a temperature that fluctuates similarly to the available thermal input power (Fig. 7.3.3b) ; it follows the daily evolution of solar radiation. These drying conditions are unique and specific to the energy scenario proposed here as an input to the model. At the beginning of the drying process, a significant energy input is required from the auxiliary source, the gas boiler, to maintain the desired average temperature above 40 °C (Table 7.2.1-A_0 value), when the evaporation rate is at its highest. The optimization code chose a schedule with temperature at the lower end of its range. The dry bulb temperature is kept below 55 °C even though the code allowed it to reach 70 °C. This low temperature, compare to the conventional drying schedule, can explain the long process duration. The EMC curve, constrained by the third harmonic of the Fourier series (Table 7.2.1), decreases with time, showing a daily oscillation and a slight weekly fluctuation. These EMC oscillations activate the mechanosorptive strain that relaxes the drying stresses. This can explain the decrease in the slicing test result (Table 7.3.1-Case 3) corresponding to low residual stresses. The slowness of this schedule also greatly improves moisture heterogeneity at the end of the process (Table 7.3.1-Case 3), contributing to better product quality.

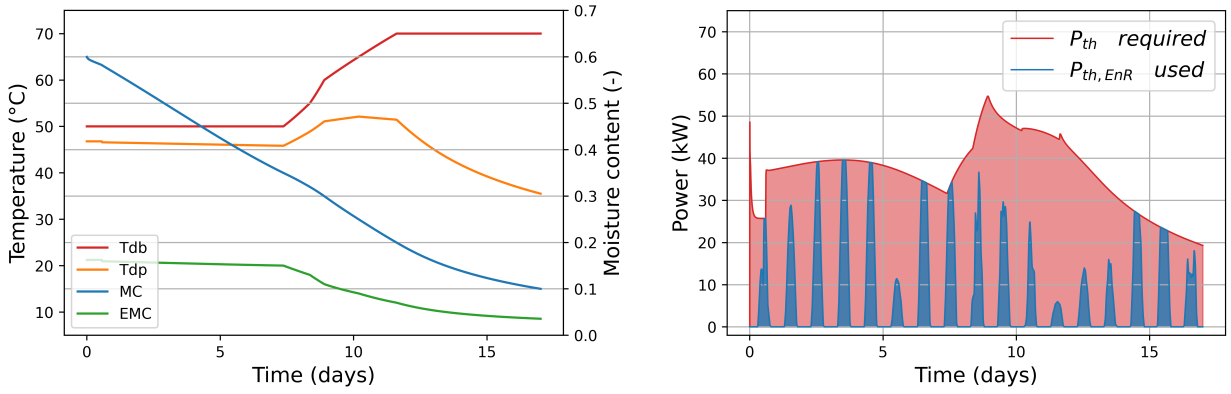


(a) (b)

FIGURE 7.3.3 – Optimized drying conditions during the summer period, showing the dry-bulb and dew point temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load (a) ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

This approach makes it possible to adapt to any energy availability scenario, and

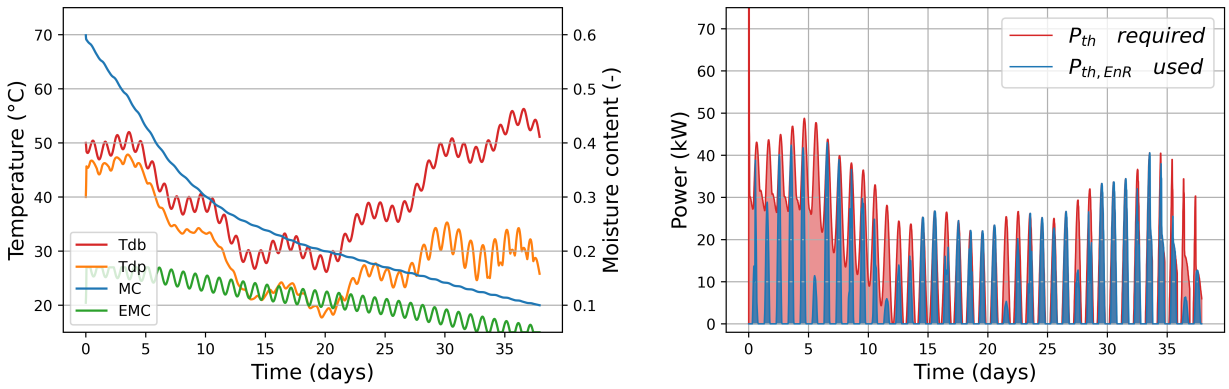
therefore to dry the wood load in a way that is always unique and best suited to the criteria set by the operator. In Case 5 (Table 7.3.1), the optimization is still based on the contribution of renewable thermal energy to total energy consumption, but with a production scenario for PV/T panels in the spring period. The conventional drying schedule was simulated again with this new RE&R input for comparison (Fig. 7.3.4b). In this case, the heat losses through the dryer walls are slightly higher due to the lower outside temperature. The energy ratio is about +5 % higher than in Case 1 and the contribution of RE&R is only 20 % (Table 7.3.1-Case 4). The optimized drying conditions with the spring scenario also more than doubles the drying time (Fig. 7.3.5a and Table 7.3.1-Case 6) and may therefore be unsuitable for industrial use ; on the other hand, it allows 40 % of the heat required to be supplied by intermittent energy from the solar panels, which also doubles the proportion of renewable heat that could be used with the conventional schedule. The model successfully finds a Fourier series that gives a temperature that follows the energy availability nicely. A global temperature decrease is observed around the 15th day as RE&R energy availability decreases (Fig. 7.3.5b). The model then increases the temperature at the end of the drying process because more RE&R energy is available. The oscillation of the drying conditions, which generates a fluctuating EMC, combined with a longer drying time than with conventional drying schedule, could be responsible for improving the final quality of the product, as seen with the simulated slicing test and the final homogeneity of the moisture content.



(a) (b)

FIGURE 7.3.4 – Conventional drying schedule during the spring period, showing the dry-bulb and dew point temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load (a) ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

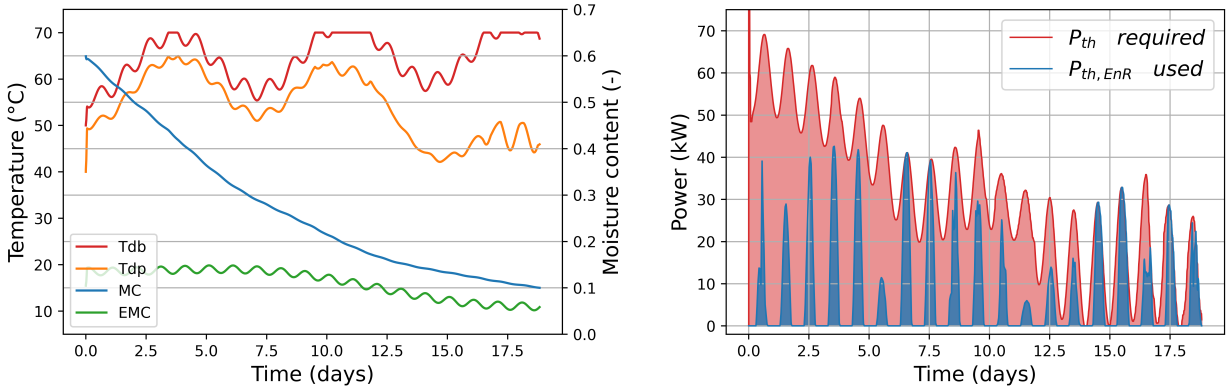
Although the optimized processes in Cases 3 and 5 doubled the amount of thermal renewable energy used in the process, assumed here to be 2 times cheaper than gas, the drying cost increased by 30 % because the drying time more than doubled. Optimizing the cost of a process typically leads to the pursuit of the fastest possible drying cycle, often relying on a significant amount of fossil energy to reach the maximum allowable temperature. This is likely the current approach, but the rising cost of fossil fuels will inevitably drive the search for alternative methods. The final optimization in this case study is therefore aimed at minimizing this cost during the spring period in a situation where the gas cost has doubled from around 0.1 €/kWh to 0.2 €/kWh. In a conventional drying schedule situation, this increases the cost to almost 80 € per m^3 of dried wood. Figure 7.3.6a shows the optimized behavior in this scenario. The model still opts for a significant contribution of fossil energy for rapid drying at a high temperature close to 70 °C. However, this temperature fluctuates on a daily and weekly basis, following the



(a) (b)

FIGURE 7.3.5 – Optimized drying conditions during the spring period, showing the dry-bulb and dew point temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load (a) ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

availability profile of renewable energy (Fig. 7.3.6b). The proposed drying conditions make it possible to increase the RE&R contribution to 24 % (i.e. 20 % more than with the conventional schedule), to keep the drying time only 10 % longer than with the conventional schedule, and to reduce the price by 5 % (Table 7.3.1-Case 6).



(a) (b)

FIGURE 7.3.6 – Optimized drying conditions to reduce operating costs during the spring period, showing the dry-bulb and dew point temperatures, EMC curves, and the average MC of the wood load (a) ; evolution of heat power demand and the integration of renewable heat into the process (b)

It should be noted that in this work, to simplify the comparison with the conventional drying, the air velocity through the wood load was assumed to be constant throughout the drying step. As the electrical energy consumption of the fans is proportional to the drying time, this item becomes significant when the drying time is long. This is an unnecessary cost, as the drying temperature and drying rate periodically decrease. The obvious way to reduce these costs is to vary the fan speed in phase with variations in drying temperature and drying rate. It is also necessary to periodically reverse the direction of the air flow in order to reduce the heterogeneity of conditions in the stack of boards. The study appears as a perspective of this work.

7.4 CONCLUSIONS AND PERSPECTIVES

In this work, the computational model *Multi_Wood_DryS* has been used to propose tailor-made drying schedules that harnesses the fluctuating RE&R energy and can jointly

meet the operators' expectations. This numerical model was used in a case study of a kiln dryer equipped with solar PV/T panels for drying thick beech wood boards. The main results obtained from this example show that : The Fourier series based drying condition generation module added to the model has proven its ability to generate drying conditions tailored to different RE&R scenarios ; the model is able to propose original drying conditions that enhances the final produce quality and doubles the proportion of renewable thermal energy used in the process, but at the cost of a longer drying time and a higher operating cost ; optimization provides solutions for different energy scenarios, but requires fine-tuning of energy costs and industrial priorities to propose a customized and cost-effective drying schedule. By iterating the modeling approaches presented in this work and in Fig. 7.2.1 throughout the drying process, it may be possible to tackle the issue of intermittent energy and harness it in the industrial wood drying process.

Acknowledgments

ADEME is a partner of the project and co-finances with FCBA a scholarship for a thesis whose subject is to take advantage of fluctuating energy for the wood drying process by using an intelligent control system.

7.a APPENDIX A - PARAMETERS USED BY THE MULTISCALE MODEL IN THIS PAPER

TABLE 7.A.1 – Values of transfer parameters used in this work to simulate the drying kinetic. The other values used by the model are given in Perré and Turner (1999) [33] for softwood.

	Value	Unit
Porosity	0.55	(-)
Oven-dry density	680 (default value) or measured	$kg{\cdot}m^3$
Liquid permeability	$4{\cdot}10^{-16}$	m^2
Bound water diffusion	$D = D_0 \cdot exp\left(-9.9 + 9.8 \cdot X_b - \frac{4300}{T}\right)$ the value of D_0 was determined to be 0.6 in this work	$m^2{\cdot}s^{-1}$
Sorption isotherm	$RH = 1 - exp\left(-0.9114 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right) - 3.904 \cdot \left(\frac{X_b}{X_{fsp}}\right)^2\right)$ with X_b the bound water content and X_{fsp} the fibers saturation point	(-)
Thermal conductivity	$\lambda = 0.14 + 0.3 \cdot X$	$W{\cdot}m^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
Heat capacity	$\rho \cdot C_p = \rho_0 \cdot (1400 + 4185 \cdot X)$	$J{\cdot}kg^{-1}{\cdot}°C^{-1}$
External heat transfer coefficient	15	$W{\cdot}m^{-2}{\cdot}°C^{-1}$
External mass transfer coefficient	0.015	$m{\cdot}s^{-1}$

[33] PERRÉ et TURNER, « A 3-D version of TransPore »

TABLE 7.A.2 – Values of the mechanical parameters used in this work to simulate the drying stress in beech samples.

	Value			Unit	Source
	Radial	Tangential	Longitudinal		
Shrinkage coefficient	0.23	0.42	0.004	%/%MC	
Young modulus	1.1	0.59	14.0	GPa	[34]
Poisson coefficient	ν_{RT}=0.73 ; ν_{LR}=0.36 ; ν_{TL}=0.03			-	
Viscoelastic compliances J and associated retardation time τ at 20 °C in radial direction (4 Kelvin's elements)	$J_1 = 2.82$; $J_2 = 8.0$; $J_3 = 18.9$; $J_4 = 51.3$ $\tau_1 = 1.77$; $\tau_2 = 700$; $\tau_3 = 4.9E8$; $\tau_4 = 2.5E5$			GPa^{-1} hours	[35]*
Activation energy (viscoelastic creep)	$W_1 = 44.2$; $W_2 = 121$; $W_3 = 271$; $W_4 = 111$			$kJ{\cdot}mol^{-1}$	[35]
Mechanosorptive compliances (J)					
Characteristic moisture range (τ)	$J_1 = 0.3\ GPa^{-1}$; $\tau_1 = 0.01$ $J_1 = 0.3\ GPa^{-1}$; $\tau_1 = 0.1$ $J_1 = 2.5\ GPa^{-1}$; $\tau_1 = 1.0$				[36]*
Irrecoverable mechanosorptive compliance (m_{irr}) in radial direction	$m_{irr} = 33\ GPa^{-1}$				

*The coefficients were provided in these references in the tangential direction of wood. As proposed by Perré and Passard (2004) [35] and Fortino et al. (2009) [36], the MS coefficient in the radial direction is calculated using the elastic matrix ratios $\frac{E_R}{E_T}$, which is around 2.0.

TABLE 7.A.3 – Dimensions and thermal characteristics of the kiln and its load used for the case studies

	Kiln	Stack	Boards
Width (m)	5.52	3.45	0.15
Length (m)	6.48	6.48	6.48
Height (m)	4.95	3.80	0.054
Volume (m^3)	177.1	85.0	48.9 (all)
Kth walls and roof ($W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$)	0.38		
Kth floor ($W{\cdot}m^{-2}{\cdot}K^{-1}$)	2.00		

[34] GUITARD, *Mécanique du matériau bois et composites*

[35] PERRÉ et PASSARD, « A Physical and Mechanical Model Able to Predict the Stress Field in Wood over a Wide Range of Drying Conditions »

[36] FORTINO et al., « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures »

TABLE 7.A.4 – Costs and coefficients used in the economic model

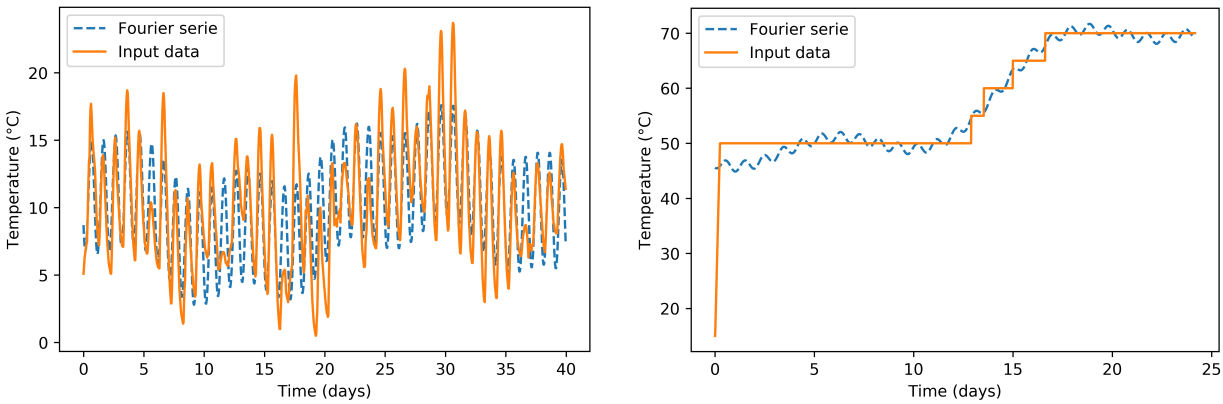
Type	Parameter	Value	Unit
Investment	investment (kiln, boiler, buildings, etc)	80 000	€
	useful life	10	years
Structure cost	overhead rate	0.03	-
Short term asset	kiln capacity	49	m^3
	wood value - Beech	290	€·m^{-3}
	stock cost coefficient	0.05	-
Energy	propan gas price	1200	€·t^{-1}
	boiler efficiency	0.8	-
	LVH propan	12780	kWh·t^{-1}
	electricity price (grid)	0.2	€·kWh^{-1}
	electricity price (RE&R)	0.05	€·kWh^{-1}
	thermal energy price (RE&R)	0.05	€·kWh^{-1}
Depreciation rate of the dried product	dried wood value - Beech	1000	€·m^{-3}
	quality class - Bad	10	%
	quality class - Medium and Good	0	%

TABLE 7.A.5 – Values of simulated annealing parameters

	Set values
Visiting distribution	2.62
Initial artificial temperature	5230
Acceptance distribution	-5
Ratio to restart	2.10^{-5}
Local search strategy	False

7.b APPENDIX B - FOURIER SERIES PARAMETER RANGE SELECTION

Figure 7.B.1 shows that three elements can be used to predict the temperature and EMC dynamics of a weather file, here the city of Bordeaux (France) in spring, or also to capture the trend of the conventional drying schedule used to dry 54 mm thick beech boards.



(a) (b)

FIGURE 7.B.1 – Examples of interpolation of a Fourier series with 3 harmonics of two contrasting temperature curves, one representing the outside temperature in Bordeaux in spring (a), the other the kiln temperature for the conventional drying schedule on 54 mm thick beech boards (b)

The search intervals for the Fourier series parameters have to be limited. The following Fourier series parameters were selected for the temperature in the kiln dryer :

— The constant term A_0 - in the example dealt with in this paper, the species chosen is beech, whose traditional drying line develops at a temperature between 50 and 70 °C. In order to keep the drying time as short as possible, we have chosen to let the temperature fluctuate around A_0 of 55 °C ;

— One of the temperature harmonics must oscillate in phase with the daily power input and with a high amplitude ;

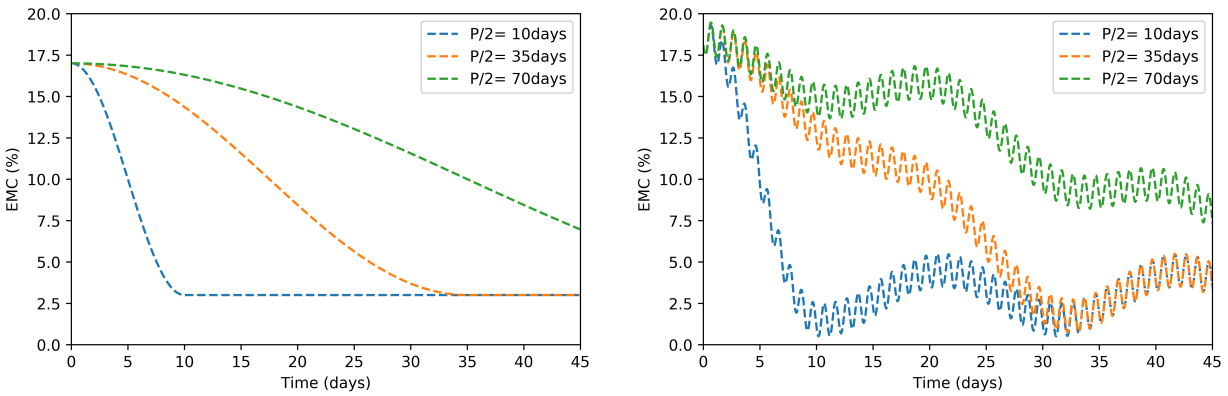
— The other harmonics are less constrained to describe different possible temperature changes over longer periods, from a few days to a few weeks.

For the evolution of the EMC in the dryer, the following parameters from the kiln series were chosen :

— The constant term A_0 - In this work, the target humidity was set at 10 %, which represents the average equilibrium moisture content of wood used inside a heated home. The constant term A_0 was set to 10 %.

— For drying quality, when the wood is initially at the green state, the EMC should be high at the start of drying and decrease during drying to reach the target moisture content. In the conventional drying schedule, the EMC starts at around 17 % and ends at 3-5 % at the end of the drying process. One of the harmonics is therefore dedicated to inducing this decrease over time. At the start, its amplitude is at its maximum (+4 to +7 % / A_0). It then decreases over a half period lasting between 15 and 90 days. Once the harmonic has reached its minimum value, it is kept constant to avoid rewetting the wood. Figure 7.B.2a illustrates some possible changes in this harmonic.

— The other harmonics are less constrained, in order to be able to describe potential oscillations of the EMC, but with a lower amplitude than that of the first harmonic. One of these harmonics oscillates over a 24-hour period, in phase opposition to the temperature, so that it alternates between hot - dry conditions and less hot - more humid conditions. The other harmonic has a longer period, from a few days to a few weeks. Figure 7.B.2b shows an example of global oscillation once these harmonics have been added to the first.



(a) (b)

FIGURE 7.B.2 – EMC curves obtained using one of the Fourier series elements to produce a decreasing curve with a large amplitude from the start to the end of drying over half a period of 10 to 70 days (a), previous EMC curves with 2 additional harmonics, one with a period of 1 days ±1 % and the other 21 days ±1.5 % (b)

7.c APPENDIX C - DRYING QUALITY CRITERIA

The various drying quality criteria assessed in this work are :

— *drying time* the time elapsed from the start of the drying until the average moisture content of the boards reaches the target final MC (here set at 10 %), excluding heating and equalization steps, to focus the comparison on the raw results of the drying phase.

— *MC heterogeneity* within the kiln load and within each board

$$Q_{MC} = \frac{1}{N_{Board}} \left(\sum_{k=1}^{N_{Board}} \left(\left(\overline{MC_k} - \overline{MC_{Stack}} \right)^2 + \frac{1}{e} \sum_{icv=1}^{NCV} Xl_{icv} \cdot \left(\overline{MC_k} - MC_{icv} \right)^2 \right) \right) \quad (7.5)$$

Where N_{Board} is the number of boards in the kiln wood load, NCV is the number of control volume (CV) within the board thickness, $\overline{MC_k}$ is the average MC of board k, $\overline{MC_{Stack}}$ is the average MC of the global kiln load, MC_{icv} is the local MC of the CV icv, e is the board thickness and Xl_{icv} is the width of the CV icv.

— *mechanical quality* was estimated by the average value of a Slicing Test, performed numerically on each simulated board at the end of the drying. The indicated value refers to the gap between the two slices, measured 48 hours after cutting the section into two at the end of drying, the time required for a redistribution of the MC in the piece of wood.

Conclusions et perspectives

CONCLUSIONS

Pour permettre l'utilisation d'énergies renouvelables et de récupération dans le séchage industriel du bois, et ainsi réduire son empreinte environnementale, plusieurs verrous ont été partiellement levés dans ces travaux de thèse :

— Le faible niveau énergétique de ces sources d'énergies potentielles et leur caractère intermittent avaient en effet rendu les conduites traditionnelles caduques. Il apparaissait alors nécessaire de trouver de nouvelles conduites de séchage.

— Ces nouvelles conduites de séchage devaient aussi répondre aux besoins des industriels : les critères de durée, de coût, de qualité et de consommation énergétique devaient être pris en compte et optimisés.

— Dans le même temps, les outils actuellement utilisés en industrie ne permettent pas aux opérateur·rices de rectifier les conduites de séchage, après la survenue d'un aléa ou selon leurs attentes ; la prédiction des résultats du séchage devait donc être rendue possible et accessible.

Le séchage du bois est un processus dépendant de nombreux paramètres et présentant des objectifs multiples : un automate de régulation avancé, illustré dans la figure 8, capable par sa puissance de calcul de simuler, d'apprendre et d'optimiser ce processus en continu, apparaissait alors comme un élément nécessaire. Les premiers jalons d'un outil remplissant ces fonctions ont donc été posés dans ces travaux.

Le code numérique multiphysique *TransPore*, développé depuis plusieurs décennies, est le support des différentes avancées ; il permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux, et a donc été utilisé pour simuler le séchage du bois. Initialement développé en Fortran, ce code permet des temps de calculs très courts, se prêtant ainsi à de nombreuses itérations de simulation. La première avancée a été de l'encapsuler dans un métamodèle développé en Python, ce qui facilite la modification des paramètres d'entrée, son lancement et l'analyse des résultats, en l'occurrence les cinétiques de séchages.

Une cinétique du séchage ainsi obtenue peut partiellement expliquer la qualité d'un bois séché, mais nécessite un modèle rhéologique pour établir un lien entre les gradients d'humidités dans une planche et les champs de contraintes qui s'y développent. Ces contraintes, lorsqu'elles sont trop importantes, peuvent conduire à l'apparition de fentes. Le comportement mécanique du bois a donc été caractérisé, et dans des conditions qu'il serait susceptible de rencontrer dans la suite des travaux. Des fluctuations de teneur en eau, à basse température (30 °C), ont été appliquées à des échantillons de bois chargés, initialement à l'état vert. Ces essais, dont les conditions sont proches de celles potentiellement rencontrées lors d'un séchage alimenté par des EnR&R, ont été réalisés dans un dispositif spécialement conçu, l'essai *Fourche*. Il a ainsi été possible de caractériser le comportement mécanosorptif de bois de deux essences feuillues, le hêtre et du chêne,

et de constater l'absence d'influence de l'essence sur sa complaisance mécanosorptive. Les niveaux de chargement n'ont pas non plus d'influence sur l'évolution de la complaisance avec la teneur en eau du bois. Cette complaisance augmente avec les cycles de teneur en eau et tend vers une limite mécanosorptive. L'orientation du chargement influence quant à elle cet effet mémoire, avec une complaisance mécanosorptive tangentielle 50 % plus importante que la complaisance mécanosorptive radiale.

Différents modèles mécaniques, considérant ce comportement mécanosorptif, ont ensuite été comparés aux résultats de l'essai *Fourche* et d'un essai de *Flying Wood*. Pour ce dernier essai, réalisé dans des travaux précédents, la dimension du matériau a induit des cinétiques de séchage, qui ont été simulées par *TransPore* puis utilisées comme entrées du modèle mécanique. Un modèle mécanique couplé à *TransPore* a finalement été paramétré par méthode inverse afin de s'approcher au plus près des résultats expérimentaux.

La recherche de paramètres mécaniques, tout comme les optimisations du séchage, ont rapidement nécessité l'utilisation d'un algorithme d'optimisation. Le recuit simulé a montré de bons résultats pour adapter le traitement thermique aux attentes d'un·e opérateur·rice, en utilisant le code *TransPore* couplé à un modèle de traitement thermique [1]. Il a donc été réutilisé pour toutes les étapes d'optimisation de ces travaux de thèse.

Les tables de séchage conventionnelles peuvent, en l'état, être optimisées pour répondre aux différents critères des opérateur·rices. En simulant le séchage aux échelles planche-pile-séchoir, au moyen du code *Multi_Wood_DryS*, il a ainsi été possible de trouver une conduite réduisant de 48 % la durée de séchage et de 3 % la consommation énergétique en contrepartie d'une augmentation de l'hétérogénéité du séchage. Une telle optimisation a été rendue possible par la formulation des conduites traditionnelles sous formes de trajectoires, réduisant ainsi grandement le nombre de paramètres à rechercher.

Il est de plus désormais possible d'améliorer le séchage en cours de processus. Le métamodèle *Multi_Wood_DryS* a été utilisé pour trouver la meilleure conduite de séchage après la survenue d'un problème d'alimentation en énergie thermique. Après analyse des données expérimentales relevées avant l'aléa, et plutôt que de reprendre les consignes de la conduite traditionnelle, l'outil propose une conduite adaptée à la charge de bois et permettant de répondre aux attentes de l'utilisateur·rice.

Pour proposer des conduites de séchages adaptée à la charge de bois le modèle a désormais une capacité d'apprentissage : l'analyse par méthode inverse de l'évolution de teneur en eau dans une charge de bois lui a permis de préciser les coefficients de transfert du matériau utilisés dans la simulation. Utilisée en cours de séchage pour une optimisation "en ligne", cette fonctionnalité peut retrouver assez précisément la perméabilité intrinsèque et le coefficient de diffusion de vapeur des planches instrumentées dès 50 % du séchage réalisé.

Le dernier jalon a été de réemployer le métamodèle multiéchelle *Multi_Wood_DryS* pour l'optimisation d'une conduite de séchage considérant un scénario d'EnR&R disponibles et fournies par des panneaux solaires et photovoltaïques. Les conduites de séchage ont alors été modélisées sous la forme de séries de Fourier pour permettre des fluctuations proches des variations journalières et saisonnières d'ensoleillement. Le code a ainsi proposé une conduite de séchage permettant de doubler la contribution de l'énergie thermique fluctuante dans le processus tout en améliorant la qualité du produit séché.

[1] FLOREZ et al., « Probabilistic multi-objective optimization of wood torrefaction conditions using a validated mechanistic model ».

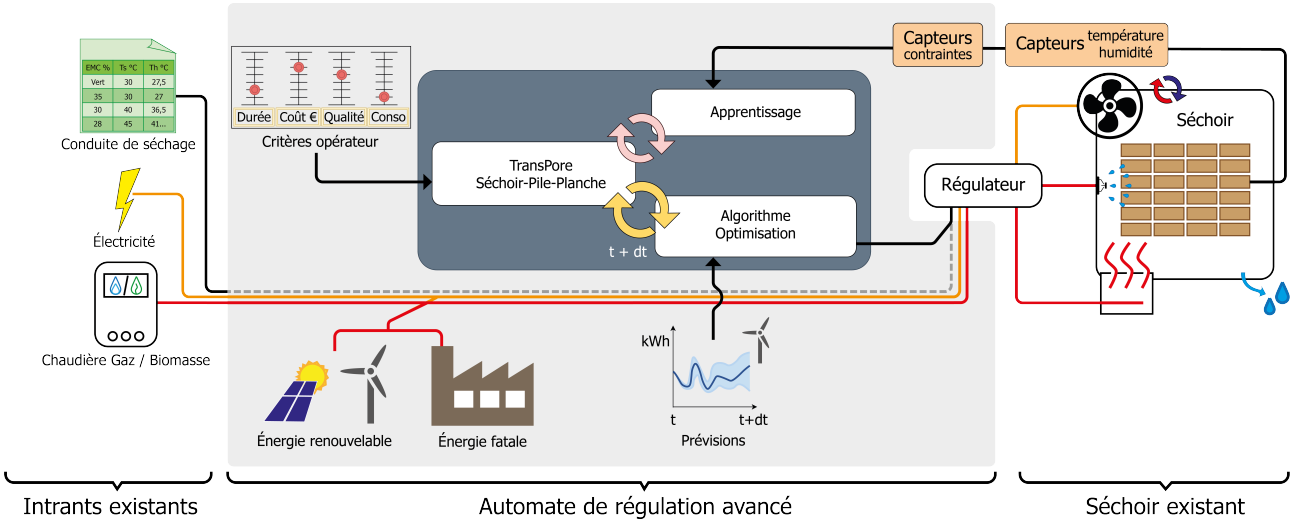


FIGURE 8 – Schéma de principe de la régulation de séchage envisagée

PERSPECTIVES

Ces travaux ouvrent de nombreuses perspectives. Quelques-unes sont regroupées ci-dessous dans les horizons temporels court, moyen et long termes. Elles sont rassemblées selon deux thèmes : le développement numérique et l'adaptation de la régulation aux conditions réelles.

L'outil numérique développé dans ces travaux de thèse facilite l'exploration de nouvelles conduites en des temps relativement courts, ce qui serait impossible pour un·e expert·e du séchage. Plusieurs améliorations possibles ont déjà été identifiées pour cet outil numérique :

À court terme

— *amélioration de la formulation du modèle mécanosorptif* - Le modèle mécanique paramétré dans le chapitre 4 a montré sa difficulté à retrouver le comportement mesuré dans l'essai *Flying Wood*. La prédiction du comportement mécanosorptif semble incomplète et requiert l'examen plus approfondi des modèles. L'étude et le paramétrage d'autres modèles, en se servant des essais complémentaires présentés dans ces travaux, pourraient fournir des simulations plus proches des mesures expérimentales. D'autres approches, telles que les modèles basés sur les hygroverrous [2], pourraient aussi être appliquées au séchage du bois.

— *poursuite de l'exploration de nouvelles conduites et résolution des problèmes de convergence du code numérique* - Plusieurs paramètres, et notamment la vitesse d'air dans le séchoir ainsi que sa variation, ont été bridés et n'ont pas été étudiés afin de réduire le risque de divergence du code à l'échelle de la pile. Comme indiqué dans le chapitre 1 la régulation de la vitesse d'air peut permettre de réaliser d'importantes économies d'énergie tout en améliorant la qualité par l'inversion du flux. La disponibilité de l'énergie renouvelable électrique et l'oscillation des gradients de séchage incitent probablement à

[2] GRIL, « Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches ».

faire osciller les vitesses des ventilateurs, même si actuellement, au niveau industriel, peu de séchoirs sont dimensionnés pour pouvoir le faire.

Le code numérique *Multi_Wood_DryS* a été utilisé dans ce travail avec un couplage faible entre l'échelle du séchoir et l'échelle de la pile de planches. Il calcule les transformations que doit subir la masse d'air en sortie de pile pour revenir aux conditions souhaitées à l'entrée de la pile (couplage faible échelle pile $\rightarrow$ échelle séchoir) ; mais la possibilité, en cours de séchage, d'imposer une puissance de chauffage et de calculer la température de l'air correspondante est une fonctionnalité nécessaire (couplage fort dans les deux sens échelle séchoir $\rightleftharpoons$ échelle pile). Elle permettrait de proposer des conduites de séchage mixant des périodes où la température est contrôlée, en combinant l'utilisation d'EnR&R et d'une chaudière, avec des phases où seule l'EnR&R est utilisée, permettant à la température d'évoluer librement et avec une humidité de l'air éventuellement contrôlée dans le séchoir. Cette stratégie a été écartée dans le dernier chapitre en raison de problèmes de convergence du code.

— *alternance des phases "inverse problem" - "forward problem"* - Il est nécessaire de rassembler et d'orchestrer dans le métamodèle en Python tous les modules numériques utilisés dans cette thèse pour pouvoir alterner en cours de processus la phase d'analyse inverse (i.e. estimation des paramètres physiques du modèle à partir des données collectées par les capteurs dans le séchoir) avec la phase de simulation numérique de la suite du séchage (*forward problem*).

— *optimisation adaptative avec les prévisions d'EnR&R* - Étant donné que les prévisions d'EnR&R s'affinent au cours du processus, il est nécessaire d'ajuster la conduite au fur et à mesure des nouvelles prévisions. Puisque les optimisations vont se faire en cours de séchage, les conduites optimisées doivent être suffisamment robustes pour accepter de nouvelles optimisations. Une conduite "trop optimisée" pourrait effectivement s'avérer bloquante pour la suite du séchage, en cas d'écart à la conduite initiale. Cette difficulté est abordée dans le point suivant des perspectives à moyen terme.

À moyen terme

— *analyse de sensibilité dynamique* - A cause des déformations mémoires du bois, la redéfinition successive par le modèle de la "bonne" trajectoire à suivre pour les conditions de séchage va agir elle aussi sur la qualité finale du produit. Cela ouvre une question plus délicate à traiter : comment trouver un optimum robuste lorsque les trajectoires proposées par le code varient en fonction des prévisions, et que ces choix itérés influencent eux mêmes les résultats ?

Il est probable qu'une analyse de sensibilité itérée au cours du process soit nécessaire pour comprendre comment les variations de l'apport d'EnR&R affectent l'optimisation. Cela pourrait aider à identifier des plages de trajectoires optimales dans lesquelles l'optimisation reste robuste et assure la qualité du produit, même si les prévisions évoluent.

— *modèle hybride, approches déterministes et réseaux de neurones* - La collecte des

données de séchage, telle qu'initiée par Allegretti et al. (2012) [3], permettrait d'enrichir une base de données des résultats de ces processus longs et coûteux. Une base de données conséquente servirait alors à l'entraînement de réseaux de neurones artificiels. Un modèle hybride [4], comportant un modèle déterministe tel qu'utilisé dans ces travaux et un réseau de neurones, proposerait alors des conduites de séchages pour un nombre réduit d'itérations.

À long terme

— *automate de régulation industriel* - Le développement d'un automate de régulation avancé, capable d'utiliser des énergies renouvelables fluctuantes et d'optimiser le séchage selon les prévisions d'énergie et les critères de l'opérateur·rice, en est à ses débuts. Le déploiement de cet outil en industrie nécessite de fiabiliser le métamodèle d'orchestration en Python et le noyau, le code *Multi_Wood_DryS*. Cela nécessite également d'intégrer l'ensemble dans un automate de régulation d'un séchoir de manière à tester sa robustesse en situation réelle. Enfin, il nécessite le développement d'une interface utilisateur conviviale pour pouvoir paramétrer le modèle économique, ainsi que les caractéristiques et attentes de chaque entreprise.

Les conduites optimisées par l'outil numérique permettent d'améliorer les résultats du séchage simulé mais ont été faites avec des conditions simplifiées qu'il est nécessaire d'adapter à un séchage industriel réel. Des travaux sont donc nécessaires pour avoir une régulation de la conduite au plus proche de la situation réelle :

À court terme

— *valider les propositions de conduites oscillantes* - Les stratégies d'optimisation proposées par le code numérique méritent d'être confrontées aux résultats expérimentaux d'un séchage industriel pouvant réaliser des fluctuations des conditions de séchage. Cela permettrait de vérifier et éventuellement d'ajuster le paramétrage du modèle.

— *prendre en compte la variabilité des planches dans le choix de l'optimum* - Dans plusieurs travaux d'optimisations présentés précédemment les charges de bois ont été considérées comme étant constituées de planches identiques, tant en terme de débit que de teneur en eau initiale. De cette façon, les résultats issus des optimisations ont pu être analysés avec un nombre réduit de facteurs influents. La variabilité au sein d'une pile de bois est cependant très importante. L'intégration de cette variabilité est donc nécessaire pour s'approcher d'un séchage réel, et devra être prise en compte en appelant un module existant du code *Multi_Wood_DryS* qui génère de manière stochastique la pile de planches. De cette manière, la conduite proposée par le métamodèle devrait être optimale pour n générations de piles de planches.

[3] Allegretti et al., « Dtouch – drying has never been so easy ».
[4] Perré, « Toward mechanistic models "augmented" by machine learning. Example of a drying simulation data set exploited by a Physics Informed Neural Network ».

À moyen terme

— *enrichir les informations collectées dans le séchoir sur la cinétique* - Comme relevé dans le chapitre 6 les planches instrumentées, qui contrôlent l'avancement dans les tables de séchage, ne sont pas nécessairement représentatives de la charge de bois. Il est donc important de s'assurer que les planches instrumentées soient bien choisies. L'ajout d'un suivi du séchage global d'une pile de planche, au moyen d'un peson par exemple, pourrait améliorer l'apprentissage du code et ses prédictions.

— *capteur pour évaluer les contraintes dans les planches* - Les conduites de séchage sont couramment pilotées par la teneur en eau de quelques planches. Puisque le risque de fente a un impact très important sur la qualité du produit séché, il apparaît intéressant de pouvoir piloter le processus avec l'évolution des contraintes de séchages. La mesure indirecte des contraintes en cours de séchage pourrait à minima servir de garde-fou aux conduites appliquées, ou servir au pilotage complet, la mesure de la teneur en eau ne servant alors qu'à mesurer l'atteinte de l'humidité cible. Aussi, avec ce type de capteur, le paramétrage du modèle mécanique pourrait être réalisé en ligne, comme l'est désormais celui du modèle de la cinétique de séchage. En bénéficiant du retour d'un capteur, renseignant sur l'état de contrainte en cours de séchage, le modèle mécanique pourrait s'ajuster et augmenter son caractère prédictif sur la qualité du séchage.

Abbréviations

ADEME Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie, Agence de la transition écologique

EMC Equilibrium Moisture Content

EnR&R Énergies Renouvelables et de Récupérations

FCBA Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement, Institut technologique

FSP Fiber Saturation Point

He Humidité d'équilibre du bois

HR Humidité Relative de l'air

MS Mécanosorption, en anglais mechanosorption

PSF Point de Saturation des Fibres

RH Relative Humidity

Tdb Dry-bulb temperature

Tdp Dew-point temperature

Th Température humide de l'air

Tr Température de rosée

Ts Température sèche de l'air

Bibliographie

AGENCE FRANÇAISE DE NORMALISATION. *Sawn timber - Method for assessment of case hardening, XP CEN/TS 14464*. 2010 (cf. p. 19, 50, 95, 101, 115).

— *NF EN 335 - Durabilité du bois et des matériaux à base de bois - Classes d'emploi : définitions, application au bois massif et aux matériaux à base de bois*. 2013 (cf. p. 7).

— *NF EN 14298 - Bois scié - Estimation de la qualité du séchage*. 2017 (cf. p. 12).

AGHBASHLO, Mortaza, Soleiman HOSSEINPOUR et Arun Sadashiv MUJUMDAR. « Application of Artificial Neural Networks (ANNs) in Drying Technology: A Comprehensive Review ». In : *Drying Technology* 33.12 (2015), p. 1397-1462. DOI : 10.1080/07373937.2015.1036288 (cf. p. 26).

AI, Wei. « Glissement moléculaire dans les matériaux lignocellulosiques: mesures de perméabilité apparente et identification de paramètres morphologiques ». Thèse de doct. Université Paris Saclay (COmUE), 2016 (cf. p. 112).

ALÉON, Daniel. *Séchage des bois d'oeuvre: de la théorie à la pratique*. Première édition 2012. Paris : FCBA, 2012. 288 p. ISBN : 978-2-85684-080-1 (cf. p. ix, 17, 22, 38, 39, 43, 50, 74, 90-93, 97, 106, 107, 128).

ALÉON, Daniel, Patrice CHANRION et Gilles NÉGRIÉ. *Séchage du bois: guide pratique*. Paris : CTBA, 2001. 126 p. (cf. p. 129, 132).

ALLEGRETTI, Ottaviano, I CUCCUI, Silvia FERRARI et A SIONE. « 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*. The Future of Quality Control for Wood & Wood Products', The Final Conference of COST Action E53, 4-7th May 2012, Edinburgh. 2012, p. 9 (cf. p. 23, 106, 147).

ALLEGRETTI, Ottaviano et Silvia FERRARI. « A Sensor for Direct Measurement of Internal Stress in Wood During Drying: Experimental Tests Toward Industrial Application ». In : *Drying Technology* 26.9 (2008), p. 1150-1154. DOI : 10.1080/07373930802266256 (cf. p. 75).

ALLEGRETTI, Ottaviano, Romain RÉMOND et Patrick PERRÉ. « Nonsymmetrical drying tests - Experimental and numerical results for free and constrained spruce samples ». In : *Drying Technology* 36.13 (2018), p. 1554-1562. DOI : 10.1080/07373937.2017.1417869 (cf. p. 51).

ALMEIDA, Giana, Carole ASSOR et Patrick PERRÉ. « The Dynamic of Shrinkage/Moisture Content Behavior Determined During Drying of Microsamples for Different Kinds of Wood ». In : *Drying Technology* 26.9 (2008), p. 1118-1124. DOI : 10.1080/07373930802266108 (cf. p. 56).

ALMEIDA, Giana et Roger E. HERNÁNDEZ. « Changes in physical properties of tropical and temperate hardwoods below and above the fiber saturation point ». In : *Wood Sci Technol* 40.7 (2006), p. 599-613. DOI : 10.1007/s00226-006-0083-8 (cf. p. 2).

ALMEIDA, Giana, Romain RÉMOND et Patrick PERRÉ. « Hygroscopic behaviour of lignocellulosic materials: Dataset at oscillating relative humidity variations ». In : *Journal of Building Engineering* 19 (2018), p. 320-333. DOI : 10.1016/j.jobe.2018.05.005 (cf. p. 111).

ARMSTRONG, Les D. et Reg S. T. KINGSTON. « Effect of Moisture Changes on Creep in Wood ». In : *Nature* 185.4716 (1960), p. 862-863. DOI : 10.1038/185862c0 (cf. p. 28, 50, 74).

ASSEKO ELLA, Martian, Giacomo GOLI, Claude Feldman PAMBOU NZIENGUI, Joseph GRIL, Eric FOURNELY et Rostand MOUTOU PITTI. « Comparative investigation on viscoelastic and mechanosorptive creep behavior of two tropical hardwoods and one temperate softwood ». In : *Eur. J. Wood Prod.* 82.1 (2024), p. 35-52. DOI : 10.1007/s00107-023-02002-w (cf. p. 62).

AUSSENAC, Gilbert. « La sécheresse de 1976 : influence des déficits hydriques sur la croissance des arbres forestiers ». In : *Rev. For. Fr.* 2 (1978), p. 103. DOI : 10.4267/2042/21213 (cf. p. 2).

AVRAMIDIS, Stavros. « Bound water migration in wood ». In : *Fundamentals of Wood Drying*. Patrick Perré. Nancy, France, 2007, p. 105-124 (cf. p. 10).

BABIAK, Marián. « Sorption isotherms of wood ». In : *Fundamentals of Wood Drying*. Patrick Perré. Nancy, France, 2007, p. 67-86 (cf. p. 3).

BADEL, Eric et Patrick PERRÉ. « Using a digital X-ray imaging device to measure the swelling coefficients of a group of wood cells ». In : *NDT & E International* 34.5 (2001), p. 345-353. DOI : 10.1016/S0963-8695(00)00072-4 (cf. p. 6).

BAILLY, Olivier, Clément L'HOSTIS, Tifenn GUENNEC et Sébastien ACKERMANN. « Energie solaire : apports thermique et électrique complémentaires pour les séchoirs de bois d'œuvre ». In : *FCBA* (2020), p. 58 (cf. p. 28, 129).

BARDET, Sandrine et Sabine CARÉ. « Projet GreenWood : Utilisation du bois vert dans la construction : Effet du séchage sur les propriétés rhéologiques et hydriques ». In : Paris, France, 2019 (cf. p. 8).

BASE. *Cogen'Air, Marcheprime, France*. URL : https://www.base-innovation.com/la-technologie-thermovoltaique-cogenair/ (cf. p. 132).

BAŽANT, Zdenek Pavel et S. MEIRI. « Measurements of compression creep of wood at humidity changes ». In : *Wood Sci. Technol.* 19.2 (1985), p. 179-182. DOI : 10.1007/BF00353079 (cf. p. 51).

BEDDIAR, Karim, Pascal CHAZAL et Riad ZIOUR. *Massification de la rénovation énergétique: accélérer et optimiser la rénovation énergétique grâce aux outils numériques et industriels*. Malakoff : Dunod, 2022. 223 p. ISBN : 978-2-10-082641-4 (cf. p. x).

BEERY, Wade H, Geza IFJU et Thomas E MCLAIN. « Quantitative wood anatomy - relating anatomy to transverse tensile strength ». In : *Wood and Fiber Science* 15 (1983), p. 395-407 (cf. p. 61).

BENGTSSON, Charlotte. « Mechano-sorptive bending creep of timber – influence of material parameters ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 59.4 (2001), p. 229-236. DOI : 10.1007/s001070100217 (cf. p. 51).

BJÖRKMAN, Eric et Stefan ERICSSON. « Method for drying wood ». Brev. CA2602085. 2006 (cf. p. 23).

BOND, Brian H. et Omar ESPINOZA. « A Decade of Improved Lumber Drying Technology ». In : *Curr Forestry Rep* 2.2 (2016), p. 106-118. DOI : 10.1007/s40725-016-0034-z (cf. p. 11, 16).

BOUTCHENIK, Béatrice, Solène COLIN, Yannick FENDRICH, Sylvie LEFRANC, Benoit MATHIEU, Roxane MOREL, Quentin NOUVELLON, Gaétan POLARD et Guillaume RATEAU. *Chiffres clés du logement - Édition 2022*. Service des Données et Études Statistiques, 2022, p. 88 (cf. p. ix).

BRANDAO, Alcir et Patrick PERRÉ. « The Flying Wood - A quick test to characterize the drying behaviour of tropical woods ». In : 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Québec, 1996, p. 315-324 (cf. p. 14, 19, 50, 71, 75, 76).

BRIHIEZ, Joseph. « Une forêt pour charpente : enquête avec le bois vert pour explorer les liens entre des charpentiers et des forêts ». In : (2021), p. 131 (cf. p. 8).

BRISCHKE, Christian et Gry ALFREDSEN. « Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay ». In : *Appl Microbiol Biotechnol* 104.9 (2020), p. 3781-3795. DOI : 10.1007/s00253-020-10479-1 (cf. p. 7).

BURNETT, Jonathan T. « Baffled wood drying kiln and process ». Brev. amér. 5878509A. IFI INC. 1999 (cf. p. 23).

CANIATO, Marco, Arianna MARZI, Federica BETTARELLO et Andrea GASPARELLA. « Designers' expectations of buildings physics performances related to green timber buildings ». In : *Energy and Buildings* 276 (2022), p. 112525. DOI : 10.1016/j.enbuild.2022.112525 (cf. p. 8).

CARLSSON, Peter et Björn ESPING. « Optimization of the wood drying process ». In : *Structural Optimization* 14.4 (1997), p. 232-241. DOI : 10.1007/BF01197945 (cf. p. 25).

CEEB. *Prix et indices nationaux - sciages et bois énergie 2ème Trimestre 2023*. Centre d'Etudes de l'Economie du Bois, 2023 (cf. p. 102).

CHAI, Haojie, Xianming CHEN, Yingchun CAI et Jingyao ZHAO. « Artificial Neural Network Modeling for Predicting Wood Moisture Content in High Frequency Vacuum Drying Process ». In : *Forests* 10.1 (2019), p. 16. DOI : 10.3390/f10010016 (cf. p. 26).

CHALAYER, Maurice. *Les évolutions de la scierie française*. Paris : l'Harmattan, 2019. 219 p. ISBN : 978-2-343-16710-7 (cf. p. 22).

CHALK, Leonard et J. M. BIGG. « The distribution of moisture in the living stem in sitka spruce and douglas fir ». In : *Forestry: An International Journal of Forest Research* 29.1 (1956), p. 5-21. DOI : 10.1093/forestry/29.1.5 (cf. p. 2).

CHARRIER, Bertrand. « Les discolorations brunes du chêne apparaissant pendant le séchage artificiel : étude fondamentale et mise en place de techniques de prévention ». Thèse de doct. Institut National Polytechnique de Lorraine, 1992 (cf. p. 11).

CHEN, Chaoji, Yudi KUANG, Shuze ZHU, Ingo BURGERT, Tobias KEPLINGER, Amy GONG, Teng LI, Lars BERGLUND, Stephen J. EICHHORN et Liangbing HU. « Structure–property–function relationships of natural and engineered wood ». In : *Nat Rev Mater* 5.9 (2020). Publisher: Nature Publishing Group, p. 642-666. DOI : 10.1038/s41578-020-0195-z (cf. p. 4).

CHI, Xiang, Sai TANG, Xiaoxue SONG, Sohrab RAHIMI, Zechun REN, Guangping HAN, Sheldon Q. SHI, Wanli CHENG et Stavros AVRAMIDIS. « Energy and quality analysis of forced convection air-energy assisted solar timber drying ». In : *Energy* 283 (2023), p. 128718. DOI : 10.1016/j.energy.2023.128718 (cf. p. 129).

COLIN, Julien. « Séchage en continu du bois énergie comme moyen de préconditionnement en vue de sa conversion thermochimique : approches expérimentale et numérique ». Thèse de doct. 2011 (cf. p. 4).

COLMARS, Julien, Frédéric DUBOIS et Joseph GRIL. « One-dimensional discrete formulation of a hygrolock model for wood hygromechanics ». In : *Mech Time-Depend Mater* 18.1 (2014), p. 309-328. DOI : 10.1007/s11043-013-9229-x (cf. p. 35).

CORREA-HERNANDO, E., F. J. ARRANZ, B. DIEZMA, E. JULIÁ, J. I. ROBLA, L. RUIZ-GARCIA, J. GARCÍA-HIERRO et P. BARREIRO. « Development of model based sensors for the supervision of a solar dryer ». In : *Computers and Electronics in Agriculture* 78.2 (2011), p. 167-175. DOI : 10.1016/j.compag.2011.07.004 (cf. p. 27).

CÔTÉ, Wilfred A. « Chemical Composition of Wood ». In : *Principles of Wood Science and Technology: I Solid Wood*. Sous la dir. de Franz F. P. KOLLMANN et Wilfred A. CÔTÉ. Berlin, Heidelberg : Springer, 1968, p. 55-78. ISBN : 978-3-642-87928-9 (cf. p. 1).

CRUZ SANCHEZ, Carmen Mariella de la. « Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois ». Thèse de doct. 2012. 242 p. (cf. p. 28, 51, 129).

DE LA CRUZ-LEFEVRE, Mariella, Romain RÉMOND, Daniel ALÉON et Patrick PERRÉ. « Effect of oscillating drying conditions on variations in the moisture content field inside wood boards ». In : *Wood Material Science & Engineering* 5.2 (2010), p. 84-90. DOI : 10.1080/17480272.2010.484103 (cf. p. 28).

DIWANIA, Sourav, Sanjay AGRAWAL, Anwar S. SIDDIQUI et Sonveer SINGH. « Photovoltaic–thermal (PV/T) technology: a comprehensive review on applications and its advancement ». In : *Int J Energy Environ Eng* 11.1 (2020), p. 33-54. DOI : 10.1007/s40095-019-00327-y (cf. p. 132).

DOE, Peter E., James Derek BOOKER, T. C. INNES et A. R. OLIVER. « Optimal Lumber Seasoning Using Acoustic Emission Sensing and Real Time Strain Modelling ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Publisher: University of Tasmania. Quebec City, Canada, 1996, p. 209-212 (cf. p. 25).

DONADIEU DE LAVIT, Paul et Nathalie LERIDON. *Étude prospective : Évolution de la demande finale du bois dans la construction, la rénovation et l'aménagement des bâtiments*. ADEME, France Bois Forêt, CODIFAB, 2019 (cf. p. ix, 128).

DUBOIS, Frédéric, Jérôme AFOUTOU et Xi ZHANG. « Caractérisation par tomographie ultrasonore du chêne vert employé dans la charpente de la Cathédrale Notre Dame de Paris ». In : (2023) (cf. p. 8).

DUBOIS, Frédéric, Jérôme DOPEUX, Octavian POP et Mickaël METROPE. « Long-term creep behavior of timber columns: Experimental and numerical protocols ». In : *Engineering Structures* 275 (2023), p. 115283. DOI : 10.1016/j.engstruct.2022.115283 (cf. p. 6).

DUPRE, Jean-Christophe, Delphine JULLIEN, Luca UZIELLI, Franck HESSER, Lorenzo RIPARBELLI, Cécilia GAUVIN, Paola MAZZANTI, Joseph GRIL, Gilles TOURNILLON, Danièle AMOROSO, Philippe Hazael MASSIEUX, Pierre STEPANOFF et Marina BOUSVAROU. « Experimental study of the hygromechanical behaviour of a historic painting on wooden panel : devices and measurement techniques ». In : *Journal of Cultural Heritage* 46 (2020), p. 165-175. DOI : 10.1016/j.culher.2020.09.003 (cf. p. 28).

ELUSTONDO, Diego Miguel et Luiz OLIVEIRA. « Model to assess energy consumption in industrial lumber kilns ». In : *Maderas. Ciencia y tecnología* 11.1 (2009), p. 33-46. DOI : 10.4067/S0718-221X2009000100003 (cf. p. 27).

ERIKSSON, Lennart et Bengt NORÉN. « Der Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf die Verformung von Holz bei Zug in Faserrichtung ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 23.5 (1965), p. 201-209. DOI : 10.1007/BF02612968 (cf. p. 74).

FLOREZ, Daniela, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ et Romain RÉMOND. « Probabilistic multi-objective optimization of wood torrefaction conditions using a validated mechanistic model ». In : *Fuel* 335 (2023), p. 126932. DOI : 10.1016/j.fuel.2022.126932 (cf. p. 37, 87, 144).

FORSÉN, Holger et Veikko TARVAINEN. *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. 420. Espoo, Finland : Technical Research Centre of Finland, 2000, p. 79 (cf. p. 18).

FORTIN, Yves, M. DEFO, M. NABHANI, C. TREMBLAY et G. GENDRON. « A Simulation Tool for the Optimization of Lumber Drying Schedules ». In : *Drying Technology* 22.5 (2004), p. 963-983. DOI : 10.1081/DRT-120038575 (cf. p. 90).

FORTINO, Stefania, Florian MIRIANON et Tomi TORATTI. « A 3D moisture-stress FEM analysis for time dependent problems in timber structures ». In : *Mech Time-Depend Mater* 13.4 (2009), p. 333. DOI : 10.1007/s11043-009-9103-z (cf. p. 34, 71, 77, 79, 81, 86, 139).

GEREKE, Thomas, Thomas SCHNIDER, Andreas HURST et Peter NIEMZ. « Identification of moisture-induced stresses in cross-laminated wood panels from beech wood (Fagus sylvatica L.) » In : *Wood Sci Technol* 43.3 (2009), p. 301-315. DOI : 10.1007/s00226-008-0218-1 (cf. p. 6).

GHANEM, Nihal. « Optimisation du dimensionnement des structures en bois en fonction de l'humidité ». Thèse de doct. École des Ponts ParisTech, 2022. 299 p. (cf. p. 8).

GONTIA, Paul, Claudio NÄGELI, Leonardo ROSADO, Yuliya KALMYKOVA et Magnus ÖSTERBRING. « Material-intensity database of residential buildings: A case-study of Sweden in the international context ». In : *Resources, Conservation and Recycling* 130 (2018), p. 228-239. DOI : 10.1016/j.resconrec.2017.11.022 (cf. p. ix, 128).

GOULET, Marcel. « Die Abhängigkeit der Querzugfestigkeit von Eichen-, Buchen- und Fichtenholz von Feuchtigkeit und Temperatur im Bereich von 0° bis 100°C ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 18.9 (1960), p. 325-331. DOI : 10.1007/BF02627591 (cf. p. 61).

GRIL, Joseph. « Modelling mechano-sorption in wood through hygro-locks and other approaches ». In : *International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015) and 60th Anniversary of the Japan Wood Research Society*. International Symposium on Wood Science and Technology (IAWPS 2015) and 60th Anniversary of the Japan Wood Research Society. Tokyo, Japan, 2015, p. 7 (cf. p. 35, 50, 74, 145).

GROSSMAN, Paul U. A. « Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour ». In : *Wood Sci. Technol.* 10.3 (1976), p. 163-168. DOI : 10.1007/BF00355737 (cf. p. 28).

GUITARD, Daniel. *Mécanique du matériau bois et composites*. Cepadues éditions, 1987. ISBN : 2-85428-152-7 (cf. p. 86, 139).

HANHIJÄRVI, Antti. *Perpendicular-to-grain creep of Finnish softwoods in high temperature drying conditions: experiments and modeling in temperature range 95-125 °C*. VTT-publications 301. Espoo : VTT, 1997. 94 p. ISBN : 978-951-38-5041-8 (cf. p. 51).

HANSSON, Lars, José COUCEIRO et Bengt-Arne FJELLNER. « Estimation of shrinkage coefficients in radial and tangential directions from CT images ». In : *Wood Material Science & Engineering* 12.4 (2017), p. 251-256. DOI : 10.1080/17480272.2016.1249405 (cf. p. 6).

HENDERSON, Hiram Leroy. *The Air Seasoning and Kiln Drying of Wood*. Albany, New York, 1936 (cf. p. 22).

HERRITSCH, A., J. DRONFIELD et J. J. NIJDAM. « Intermittent and Continuous Drying of Red Beech Timber From the Green Condition ». In : *Drying Technology* 28.2 (2010), p. 269-277. DOI : 10.1080/07373930903530287 (cf. p. 129).

HII, Ching Lik, Sachin Vinayak JANGAM, Sze Pheng ONG et Arun Sadashiv MUJUMDAR, éd. *Solar drying: Fundamentals, applications and innovation*. Singapore : TPR Group Publication, 2012 (cf. p. 128).

HIZIROGLU, Salim. *Fundamental Aspects of Kiln Drying Lumber*. FAPC-146. Stillwater, Oklahoma : Robert M. Kerr Food & Agricultural Products Center, Oklahoma State University, 2017 (cf. p. 19).

HOADLEY, Bruce. « Chemical and physical properties of wood ». In : *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a symposium at the J. Paul Getty Museum*. Sous la dir. de Kathleen DARDES, Andrea ROTHE et The Getty Conservation INSTITUTE. Los Angeles, USA : The Getty Conservation Institute, 1995, p. 2-20. ISBN : 978-0-89236-384-1 (cf. p. 51).

HUANG, B. et A.S. MUJUMDAR. « Use of neural network to predict industrial dryer performance ». In : *Drying Technology* 11.3 (1993), p. 525-541. DOI : 10.1080/07373939308916842 (cf. p. 26).

HUČ, Sabina, Staffan SVENSSON et Tomaž HOZJAN. « Hygro-mechanical analysis of wood subjected to constant mechanical load and varying relative humidity ». In : *Holzforschung* 72.10 (2018), p. 863-870. DOI : 10.1515/hf-2018-0035 (cf. p. 51).

HUNT, David G. « Creep trajectories for beech during moisture changes under load ». In : *J Mater Sci* 19.5 (1984), p. 1456-1467. DOI : 10.1007/BF00563040 (cf. p. 62).

Incomac Srl Italy. URL : https://www.incomac.com/en/systems/conventional-drying/ (cf. p. 16).

JOLY, Patrice. *Théorie, pratique et économie du séchage des bois*. Avec la coll. de François MORE-CHEVALIER. Dourdan : H. Vial, 1980 (cf. p. 22, 38, 39, 90-92, 106, 107, 129).

KHALDI, Souheyla Yahiaoui. « Etude numérique du comportement thermique d'un séchoir solaire utilisant un lit thermique pour le stockage d'énergie ». Thèse de doct. 2018 (cf. p. 27).

KHATER, H. A., N. H. HELWA, M. M. ENAYET et M. I. HASHISH. « Optimization of Solar Kiln for Drying Wood ». In : *Drying Technology* 22.4 (2004), p. 677-701. DOI : 10.1081/DRT-120034257 (cf. p. 27).

KHO, P. CS., R. B. KEEY et J. CF. WALKER. « The Variation of Local Mass-transfer Coefficients in Streamwise Direction over a Series of In-line, Blunt Slabs ». In : *Chemeca 90: The Eighteenth Australasian Chemical Engineering Conference; Processing Pacific Resources*. T. 1. Auckland, N.Z. : Chemical Engineering Group, 1990, p. 348-355. DOI : 10.3316/informit.842526468129533 (cf. p. 22).

KHOUYA, Ahmed. « Energy analysis of a combined solar wood drying system ». In : *Solar Energy* 231 (2022), p. 270-282. DOI : 10.1016/j.solener.2021.11.068 (cf. p. 27).

KOBAYASHI, Y. et K. YOKOO. « Practical Use of Solar-dehumidification Dry Kiln ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec City, Canada, 1996, p. 385-390 (cf. p. 27).

KOLLMANN, Franz et Günther HÖCKELE. « Kritischer Vergleich einiger Bestimmungsverfahren der Holzfeuchtigkeit ». In : *Holz als Roh-und Werkstoff* 20.12 (1962), p. 461-473. DOI : 10.1007/BF02619168 (cf. p. 2).

KOUCHADE, Adéyèmi Clément. « Mass diffusity of wood determined by inverse method from electrical resistance measurement in unsteady state. » Thèse de doct. Lermab, ENGREF : Nancy I, 2004 (cf. p. 112).

LEICESTER, Robert H. « A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams ». In : *Wood Sci. Technol.* 5.3 (1971), p. 211-220. DOI : 10.1007/BF00353683 (cf. p. 24, 50, 74).

LUIKOV, Aleksei Vasilievich. « Heat and Mass Transfer in Capillary-Porous Bodies ». In : *Advances in heat transfer* 1 (1964), p. 123-184 (cf. p. 9, 24).

LUNA, David, Jean-Pierre NADEAU et Yves JANNOT. « Solar timber kilns: State of the art and foreseeable developments ». In : *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13.6 (2009), p. 1446-1455. DOI : 10.1016/j.rser.2008.08.017 (cf. p. 27, 128).

— « Model and simulation of a solar kiln with energy storage ». In : *Renewable Energy* 35.11 (2010), p. 2533-2542. DOI : 10.1016/j.renene.2010.03.024 (cf. p. 128).

MAZZANTI, Paola, Julien COLMARS, Joseph GRIL, David HUNT et Luca UZIELLI. « A hygro-mechanical analysis of poplar wood along the tangential direction by restrained swelling test ». In : *Wood Sci. Technol.* 48.4 (2014), p. 673-687. DOI : 10.1007/s00226-014-0633-4 (cf. p. 28, 51).

MAZZANTI, Paola, Marco TOGNI et Luca UZIELLI. « Drying shrinkage and mechanical properties of poplar wood (Populus alba L.) across the grain ». In : *Journal of Cultural Heritage* 13.3 (2012), S85-S89. DOI : 10.1016/j.culher.2012.03.015 (cf. p. 6).

MCCURDY, Murray C. « Efficient Kiln Drying of Quality Softwood Timber ». Thèse de doct. 2005 (cf. p. 26).

MCMILLEN, J. M. *Stresses in wood during drying*. 1652. Madison 5, Wisconsin : Forest Product Laboratory, United States Department of Agriculture, 1958 (cf. p. 19, 50, 74, 95).

MILOTA, Michael R., Cynthia D. WEST et Ian D. HARTLEY. « Gate-to-Gate Life-Cycle Inventory of Softwood Lumber Production ». In : *Wood and Fiber Science* (2005), p. 47-57 (cf. p. 20).

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE. *Stratégie nationale bas-carbone*. Ministère de la transition écologique et solidaire, 2020 (cf. p. ix).

MORE-CHEVALIER, F et J.-M. FRAYRET. « A Fuzzy logic application to kiln dryer regulation ». In : *Quality wood drying through process modelling and novel technologies*. 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Quebec City, Canada, 1996, p. 221-229 (cf. p. 23).

MUSCH, H. E., G. W. BARTON, Timothy A. G. LANGRISH et A. S. BROOKE. « Nonlinear model predictive control of timber drying ». In : *Computers & Chemical Engineering* 22.3 (1998), p. 415-425. DOI : 10.1016/S0098-1354(97)00235-4 (cf. p. 25).

NIJDAM, J. J. et R. B. KEEY. « Influence of Local Variations of Air Velocity and Flow Direction Reversals on the Drying of Stacked Timber Boards in Kilns ». In : *Chemical Engineering Research and Design*. Heat and Mass Transfer 74.8 (1996), p. 882-892. DOI : 10.1205/026387696523184 (cf. p. 23).

OLIVER, A. R. *A model of the behaviour of wood as it dries (with special reference to eucalypt materials)*. CM91-1. University of Tasmania, 1991 (cf. p. 25).

OUERTANI, Sahbi, Soufien AZZOUZ, Lamine HASSINI et Ali BELGHITH. « Palm wood drying and optimization of the processing parameters ». In : *Wood Material Science & Engineering* 6.1 (2011), p. 75-90. DOI : 10.1080/17480272.2010.551546 (cf. p. 22).

OUERTANI, Sahbi, Merlin SIMO-TAGNE et Romain RÉMOND. « Sorption isotherms and moisture transfer properties of seven Central Africa hardwood species ». In : *Wood Material Science & Engineering* (2022), p. 1-10. DOI : 10.1080/17480272.2022.2051736 (cf. p. 110).

OUERTANI, Sahbi, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. « Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation ». In : *Drying Technology* 42.1 (2024), p. 168-181. DOI : 10.1080/07373937.2023.2279164 (cf. p. 41, 106, 112).

PANG, Shusheng. « Mathematical Modeling of Kiln Drying of Softwood Timber: Model Development, Validation, and Practical Application ». In : *Drying Technology* 25.3 (2007), p. 421-431. DOI : 10.1080/07373930601183751 (cf. p. 117).

PANG, Shusheng, R. B. KEEY, J. C. F. WALKER et Timothy A. G. LANGRISH. « Airflow reversals in high-temperature kiln drying of pinus radiata boards. 2: Drying of a stack of boards ». In : *New Zealand Journal of Forestry Science* 24.1 (1994), p. 104-119 (cf. p. 23).

PARADIS, Sébastien, Daniel GUIBAL, Jean GÉRARD, Jacques BEAUCHÊNE, Loïc BRANCHERIAU, Brigitte CABANTOUS, Isabelle CHÂLON, Claude DAIGREMONT, Pierre DÉTIENNE, Daniel FOUQUET, Patrick LANGBOUR, Sylvain LOTTE, Catherine MÉJEAN, Marie-France THÉVENON, Anne THIBAUT et Michel VERNAY. *TROPIX 7.5.1 : caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées*. 2015 (cf. p. 2, 6).

PECK, Edward C. « How Wood Shrinks and Swells ». In : *Forest Products Jounral* 7.7 (1957), p. 235-244 (cf. p. 6).

— « Shrinkage of boards of Douglas-fir, western yellow pine, and southern pines ». In : *Amer. Lumberman* 2774 (1928), p. 52-54 (cf. p. 5).

PENTONEY, Richard E. « Mechanisms affecting tangential vs. radial shrinkage. » In : *Journal of the Forest Products Research Society* 3.2 (1953), p. 27-32 (cf. p. 6).

PERRÉ, Patrick. « Experimental device for the accurate determination of wood-water relations on micro-samples ». In : *Holzforschung* 61.4 (2007), p. 419-429. DOI : 10.1515/HF.2007.075 (cf. p. 56).

— *Fundamentals of wood drying*. COST E15 and ARBOLOR. Nancy, 2007. 366 p. (cf. p. 9, 12, 94).

— « Multiscale aspects of heat and mass transfer during drying ». In : *Transp Porous Med* 66.1 (2007), p. 59-76. DOI : 10.1007/s11242-006-9022-2 (cf. p. 36).

— « The proper use of mass diffusion equation in drying modelling: from simple configurations to non-fickian bahviours ». In : 19th International Drying Symposium (IDS 2014), August 24–27, 2014. Lyon, France, 2014 (cf. p. 9).

— « Toward mechanistic models “augmented” by machine learning. Example of a drying simulation data set exploited by a Physics Informed Neural Network ». In : *Drying Technology* 0.0 (2024), p. 1-15. DOI : 10.1080/07373937.2024.2411582 (cf. p. 26, 147).

PERRÉ, Patrick et Eusèbe AGOUA. « Mass transfer in MDF (medium density fiberboard): identification of structural parameters from permeability and diffusivity measurements ». In : *13th International Drying Symposium, Drying*. 2002, p. 178-187 (cf. p. 110).

PERRÉ, Patrick, Giana ALMEIDA et Julien COLIN. « Energy Issues of Drying and Heat Treatment for Solid Wood and Other Biomass Sources ». In : *Modern Drying Technology*. T. 4. Energy saving. John Wiley & Sons, Ltd, 2014, p. 245-293. ISBN : 978-3-527-63172-8 (cf. p. 90).

PERRÉ, Patrick et Maurice MARTIN. « Drying at high temperature of sapwood and heartwood : theory, experiment and practical consequence on kiln control ». In : *Drying Technology* 12.8 (1994), p. 1915-1941. DOI : 10.1080/07373939408962213 (cf. p. 117).

PERRÉ, Patrick et Joëlle PASSARD. « A Control-Volume procedure compared with the Finite-Element method for calculating Stress and Strain during Wood Drying ». In : *Drying Technology* 13.3 (1995), p. 635-660. DOI : 10.1080/07373939508916978 (cf. p. 33).

— « A Physical and Mechanical Model Able to Predict the Stress Field in Wood over a Wide Range of Drying Conditions ». In : *Drying Technology* 22.1 (2004), p. 27-44. DOI : 10.1081/DRT-120028202 (cf. p. 77, 139).

PERRÉ, Patrick et Romain RÉMOND. « A Dual-Scale Computational Model of Kiln Wood Drying Including Single Board and Stack Level Simulation ». In : *Drying Technology* 24.9 (2006), p. 1069-1074. DOI : 10.1080/07373930600778106 (cf. p. 13, 23, 24, 36, 90, 91, 104, 108, 130, 131).

PERRÉ, Patrick, Romain RÉMOND et Daniel ALÉON. « Energy Saving in Industrial Wood Drying Addressed by a Multiscale Computational Model: Board, Stack, and Kiln ». In : *Drying Technology* 25.1 (2007), p. 75-84. DOI : 10.1080/07373930601160841 (cf. p. 27).

PERRÉ, Patrick, Romain RÉMOND, Giana ALMEIDA, Pedro AUGUSTO et Ian TURNER. « State-of-the-art in the mechanistic modeling of the drying of solids: A review of 40 years of progress and perspectives ». In : *Drying Technology* 0.0 (2023), p. 1-26. DOI : 10.1080/07373937.2022.2159974 (cf. p. 24, 77, 90, 106, 108, 131).

PERRÉ, Patrick, Romain RÉMOND, Julien COLIN, Eric MOUGEL et Giana ALMEIDA. « Energy Consumption in the Convective Drying of Timber Analyzed by a Multiscale Computational Model ». In : *Drying Technology* 30.11 (2012), p. 1136-1146. DOI : 10.1080/07373937.2012.705205 (cf. p. 24, 27, 90, 91, 130, 133).

PERRÉ, Patrick et Ian W. TURNER. « A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media ». In : *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42.24 (1999), p. 4501-4521. DOI : 10.1016/S0017-9310(99)00098-8 (cf. p. 85, 111, 122, 138).

— « TransPore: a generic heat and mass transfer computational model for understanding and visualising the drying of porous media ». In : *Drying Technology* 17.7 (1999), p. 1273-1289. DOI : 10.1080/07373939908917614 (cf. p. 24, 34, 35, 76, 86, 91, 106, 108, 111, 130).

PETERSON, Pearu. « F2PY: a tool for connecting Fortran and Python programs ». In : *IJCSE* 4.4 (2009), p. 296. DOI : 10.1504/IJCSE.2009.029165 (cf. p. 96).

PHONETIP, Khamtan, Graham Ian BRODIE, Barbara OZARSKA et Benoit BELLEVILLE. « Drying timber in a solar kiln using an intermittent drying schedule of conventional laboratory kiln ». In : *Drying Technology* 37.10 (2019), p. 1300-1312. DOI : 10.1080/07373937.2018.1496337 (cf. p. 28).

PITTET, Valérie. « Etude expérimentale des couplages mécanosorptifs dans le bois soumis à variations hygrométriques contrôlées sous chargements de longue durée ». Thèse de doct. Lausanne : EPFL, 1996 (cf. p. 51).

RAIMUNDINI ARANHA, Ana Caroline, Rafael Oliveira DEFENDI et Luiz Mario de Matos JORGE. « Conventional and intermittent drying modeling of agricultural products: A review ». In : *Journal of Food Process Engineering* 46.1 (2023), e14206. DOI : 10.1111/jfpe.14206 (cf. p. 129).

RANDRIAMBOLOLONA, Hery. « Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable ». Thèse de doct. Université de Limoges, 2003 (cf. p. 51).

RANTA-MAUNUS, Alpo. « The viscoelasticity of wood at varying moisture content ». In : *Wood Sci. Technol.* 9.3 (1975), p. 189-205. DOI : 10.1007/BF00364637 (cf. p. 35, 78, 79).

RANTA-MAUNUS, Alpo, Holger FORSÉN et Veikko TARVAINEN. « Analysis of case hardening ». In : *Proceedings of the 3rd workshop of COST Action E15 on softwood drying to specific end uses*. Helsinki, Finland, 2001, p. 11-13 (cf. p. 50).

REDMAN, Adam L., Henri BAILLERES, Ian TURNER et Patrick PERRÉ. « Mass transfer properties (permeability and mass diffusivity) of four Australian hardwood species ». In : *BioRes* 7.3 (2012), p. 3410-3424. DOI : 10.15376/biores.7.3.3410-3424 (cf. p. 40).

— « Characterisation of wood–water relationships and transverse anatomy and their relationship to drying degrade ». In : *Wood Sci Technol* 50.4 (2016), p. 739-757. DOI : 10.1007/s00226-016-0818-0 (cf. p. 6).

RÉMOND, Romain. « Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées ». Thèse de doct. 2004 (cf. p. 13).

RÉMOND, Romain, Livia Cipriano Almeida BARROS et Giana ALMEIDA. « Moisture transport and sorption in beech and spruce barks ». In : *Holzforschung* 72.2 (2017), p. 105-111. DOI : 10.1515/hf-2017-0066 (cf. p. 4).

RÉMOND, Romain, Joëlle PASSARD et Patrick PERRÉ. « The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending ». In : *European Journal of Mechanics - A/Solids* 26.3 (2007), p. 558-572. DOI : 10.1016/j.euromechsol.2006.09.008 (cf. p. 24, 33, 36, 91, 108, 130).

RÉMOND, Romain et Patrick PERRÉ. « Drying strategies capable of reducing the stress level of a stack of boards as defined by a comprehensive dual scale model ». In : *Maderas. Ciencia y tecnologia* 10.1 (2008), p. 3-18 (cf. p. 23, 25).

REMUND, Jan, Stefan MÜLLER, Michael SCHMUTZ et Pascal GRAF. *Meteonorm*. Version 8. Bern, Switzerland, 2020. URL : https://meteonorm.com/en/meteonorm-version-8 (cf. p. 132).

RIETZ, Raymond C. « Accelerating the Kiln-Drying of Hardwoods ». In : *Southern Lumberman* 181.2262 (1950) (cf. p. 26).

SALEM, Thouraya. « Séchage intermittent du bois d'oeuvre : étude expérimentale et numérique ». Thèse de doct. 2016. 172 p. (cf. p. 27, 28, 34, 38, 87, 91, 95, 129).

SALEM, Thouraya, Patrick PERRÉ, Anis BOUALI, Eric MOUGEL et Romain RÉMOND. « Experimental and numerical investigation of intermittent drying of timber ». In : *Drying Technology* 35.5 (2017), p. 593-605. DOI : 10.1080/07373937.2016.1195842 (cf. p. 51, 71, 76).

SALES, Christian. « Contribution à l'analyse des contraintes de séchage dans le bois ». Thèse de doct. 1984 (cf. p. 50).

SALIN, Jarl-Gunnar. « Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano-sorptive creep model ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 50.5 (1992), p. 195-200. DOI : 10.1007/BF02663286 (cf. p. 24, 34, 77).

— « Determination of the most economical drying schedule and air velocity in softwood drying ». In : (2001), p. 14 (cf. p. 22, 27, 95).

— « Information transfer to kiln operators in the form of drying simulation models ». In : (2001), p. 11 (cf. p. 90).

SANDOVAL-TORRES, Sadoth, Wahbi JOMAA, Francoise MARC et J. -R. PUIGGALI. « Causes of color changes in wood during drying ». In : *For. Stud. China* 12.4 (2010), p. 167-175. DOI : 10.1007/s11632-010-0404-8 (cf. p. 11).

SCHAFFNER, Richard Denis. « Fundamental aspects of timber seasoning ». Thèse de doct. Australia : University of Tasmania, 1981. 343 p. (cf. p. 21).

SCHNIEWIND, Arno P. « Über den Einfluß von Feuchtigkeitsänderungen auf das Kriechen von Buchenholz quer zur Faser unter Berücksichtigung von Temperatur und Temperaturänderungen ». In : *Holz als Roh- und Werkstoff* 24.3 (1966), p. 87-98. DOI : 10.1007/BF02608354 (cf. p. 51).

SEJDIU, Rrahim, Ramadan TOPUZI, Muharrem SEJDIU et Agron BAJRAKTARI. « A survey of the volume, species, origin of lumber and equipment used for kiln drying of lumber in Republic of Kosovo ». In : 16 (2020), p. 9 (cf. p. 6).

SIAU, John Finn. *Transport Processes in Wood*. Heidelberg : Springer-Verlag Berlin, 1984. 248 p. ISBN : 978-3-642-69215-4 (cf. p. 3, 22, 56).

SIKKEMA, Richard, David STYLES, R. JONSSON, B. TOBIN et Kenneth BYRNE. « A market inventory of construction wood for residential building in Europe – in the light of the Green Deal and

new circular economy ambitions ». In : *Sustainable Cities and Society* 90 (2023), p. 104370. DOI : 10.1016/j.scs.2022.104370 (cf. p. ix, 128).

SIMO-TAGNE, Merlin, Beguidé BONOMA, Lyes BENNAMOUN, Louis MONKAM, Angélique LÉONARD, André ZOULALIAN et Yann ROGAUME. « Modeling of coupled heat and mass transfer during drying of ebony wood using indirect natural convection solar dryer ». In : *Drying Technology* 37.14 (2019), p. 1863-1878. DOI : 10.1080/07373937.2018.1544144 (cf. p. 27).

SIMO-TAGNE, Merlin, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. « On-line evaluation of moisture transfer properties for a feed-forward control of a wood drying kiln with a mechanistic model ». In : *Drying Technology* 0.0 (2024). Publisher: Taylor & Francis _eprint: https://doi.org/10.1080/07373937.2024.2420873, p. 1-14. DOI : 10.1080/07373937.2024.2420873 (cf. p. 130).

SIMPSON, William T. *Dry Kiln Operator's Manual*. Madison, WI, 1991 (cf. p. 12, 22).

— *Effect of air velocity on the drying rate of single eastern white pine boards*. FPL-RN-266. Madison, WI : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1997, FPL–RN-266 (cf. p. 22).

SIMPSON, William T. et James C. WARD. « Chapter 8 Drying Defects ». In : *Dry Kiln Operator's Manual*. 1991, p. 27 (cf. p. 74).

SKAAR, Christen. *Wood-Water Relations*. Réd. par T. E. TIMELL. Springer Series in Wood Science. Berlin, Heidelberg : Springer, 1988. ISBN : 978-3-642-73685-8 (cf. p. 2, 56, 107, 113).

SKURATOV, N. V. « Intelligent Wood Drying Control: Problems and Decisions ». In : *Drying Technology* 26.5 (2008), p. 585-589. DOI : 10.1080/07373930801944788 (cf. p. 23).

STAMM, Alfred Joaquim. *Wood and Cellulose Science*. Google-Books-ID: cnRunQEACAAJ. Ronald Press Company, 1964. 576 p. ISBN : 978-0-471-06843-3 (cf. p. 10).

— « Movement of fluids in wood — Part I: Flow of fluids in wood ». In : *Wood Science and Technology* 1.2 (1967), p. 122-141. DOI : 10.1007/BF00353384 (cf. p. 1).

STEINER, Ylva, Geir I. VESTØL, Henning HORN et Knut Magnar SANDLAND. « Impact of various measures to optimize the air velocity in an industrial wood-drying process ». In : *Wood Material Science & Engineering* 6.1 (2011), p. 15-22. DOI : 10.1080/17480272.2010.515034 (cf. p. 22).

STÉPHAN, Antoine, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. « Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost ». In : *Drying Technology* 42.7 (2024), p. 1178-1187. DOI : 10.1080/07373937.2024.2323095 (cf. p. 78, 87, 106, 108, 118, 131, 134).

— « The fork device: a test for estimating the memory creep of wood under load during moisture variation (under review) ». In : *Wood Science and Technology* (2024). DOI : 10.1007/s00226-024-01606-6 (cf. p. 75).

SVENSSON, Staffan et Tomi TORATTI. « Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity ». In : *Wood Sci. Technol.* 36.2 (2002), p. 145-156. DOI : 10.1007/s00226-001-0130-4 (cf. p. 34, 50, 77, 78, 86).

TABOR, Ray. *Le travail du bois vert: 300 modèles et plans d'objets*. Avec la coll. de BOUILLOT PIERRE. Paris : Vigot, 2024. ISBN : 978-2-7114-2708-6 (cf. p. 8).

TAYLOR, J. M., D. J. LAVERY et K. CRONIN. « Energy related aspects of timber drying ». In : *International Journal of Ambient Energy* 17.1 (1996), p. 41-48. DOI : 10.1080/01430750.1996.9675214 (cf. p. 128).

TIEMANN, Harry Donald. *Effect of Moisture Upon the Strength and Stiffness of Wood*. Washington, DC, USA : U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 1906. 152 p. (cf. p. 2).

TIMOSHENKO, Stephen. *History of Strength of Materials*. McGraw-Hill Inc., US. 1953. 445 p. (cf. p. 54).

TORGESON, O. W. *The Drying Rate of Sugar Maple as Affected by Relative Humidity and Air Velocity*. R1265. Forest Products Laboratory, 1940, p. 3 (cf. p. 22).

TROUY-JACQUEMET, Marie-Christine. *Anatomie du bois - Formation, fonctions et identification*. Synthèses. Éditions Quae, 2015. 184 p. ISBN : 978-2-7592-2351-0 (cf. p. 2).

UGOLEV, B. N. « General laws of wood deformation and rheological propertions of hardwood ». In : *Wood Sci. Technol.* 10.3 (1976), p. 169-181. DOI : 10.1007/BF00355738 (cf. p. 74).

VAN ENGELAND, Charlotte, Laurent SPREUTELS, Robert LEGROS et Benoît HAUT. « Comprehensive analysis of intermittent drying. A theoretical approach ». In : *Food and Bioproducts Processing* 131 (2022), p. 86-101. DOI : 10.1016/j.fbp.2021.10.009 (cf. p. 129).

VIDALENC, Éric, Jean-Louis BERGEY, Valérie QUINIOU, David MARCHAL et Emmanuel COMBEL. « Quatre scénarios pour la transition écologique. L'exercice de prospective de l'ADEME Transition(s) 2050 ». In : *Futuribles* 3.448 (2022), p. 5-21. DOI : 10.3917/futur.448.0005 (cf. p. x).

WANG, Xiaochun George, Wei LIU, Lizhu GU, Colin Jian SUN, Caikang Elton GU et Clarence W. de SILVA. « Development of an intelligent control system for wood drying processes ». In : *2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556)*. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Proceedings (Cat. No.01TH8556). T. 1. Como, Italy : IEEE, 2001, p. 371-376. DOI : 10.1109/AIM.2001.936483 (cf. p. 23).

WATANABE, Ken, Isao KOBAYASHI, Shuetsu SAITO, Naohiro KURODA et Shuichi NOSHIRO. « Non-destructive evaluation of drying stress level on wood surface using near-infrared spectroscopy ». In : *Wood Sci. Technol.* 47.2 (2013), p. 299-315. DOI : 10.1007/s00226-012-0492-9 (cf. p. 74).

WATANABE, Ken, Yasuhiro MATSUSHITA, Isao KOBAYASHI et Naohiro KURODA. « Artificial neural network modeling for predicting final moisture content of individual Sugi (Cryptomeria japonica) samples during air-drying ». In : *J Wood Sci* 59.2 (2013). Number: 2 Publisher: SpringerOpen, p. 112-118. DOI : 10.1007/s10086-012-1314-2 (cf. p. 26).

WHITAKER, Stephen. « Simultaneous Heat, Mass, and Momentum Transfer in Porous Media: A Theory of Drying ». In : *Advances in Heat Transfer* 13 (1977), p. 119-203. DOI : 10.1016/S0065-2717(08)70223-5 (cf. p. 9).

XIANG, Yang et Xingao G. GONG. « Efficiency of generalized simulated annealing ». In : *Phys. Rev. E* 62.3 (2000), p. 4473-4476. DOI : 10.1103/PhysRevE.62.4473 (cf. p. 25).

XIANG, Yang, Sylvain GUBIAN, Brian SUOMELA et Julia HOENG. « Generalized Simulated Annealing for Global Optimization: The GenSA Package ». In : *The R Journal* 5.1 (2013), p. 13. DOI : 10.32614/RJ-2013-002 (cf. p. 25, 78, 96).

XIANG, Yang, Deyan Y. SUN, W. FAN et Xingao G. GONG. « Generalized simulated annealing algorithm and its application to the Thomson model ». In : *Physics Letters A* 233.3 (1997), p. 216-220. DOI : 10.1016/S0375-9601(97)00474-X (cf. p. 25).

YAN, Givon Chuen Kee, Clarence W. DE SILVA et Xiaochun G. WANG. « Experimental modelling and intelligent control of a wood-drying kiln ». In : *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing* 15.8 (2001), p. 787-814. DOI : 10.1002/acs.656 (cf. p. 23).

YU, Taoyi, Ani KHALOIAN et Jan-Willem van de KUILEN. « An improved model for the time-dependent material response of wood under mechanical loading and varying humidity condi-

tions ». In : *Engineering Structures* 259 (2022), p. 114116. DOI : 10.1016/j.engstruct.2022.114116 (cf. p. 28, 34, 74, 79).

ZADIN, V., H. KASEMÄGI, V. VALDNA, S. VIGONSKI, M. VESKE et A. AABLOO. « Application of multiphysics and multiscale simulations to optimize industrial wood drying kilns ». In : *Applied Mathematics and Computation*. The Fourth European Seminar on Computing (ESCO 2014) 267 (2015), p. 465-475. DOI : 10.1016/j.amc.2015.01.104 (cf. p. 90).

ZOHOUN, Sylvain, Eusèbe AGOUA, Gérard DEGAN et Patrick PERRÉ. « An experimental correction proposed for an accurate determination of mass diffusivity of wood in steady regime ». In : *Heat and Mass Transfer* 39.2 (2003), p. 147-155. DOI : 10.1007/s00231-002-0324-9 (cf. p. 110).

Communications

Les travaux réalisés au cours de cette thèse ont été présentés à la communauté scientifique lors des évènements et par les moyens suivants :

COMMUNICATIONS ORALES

2024 : 11th Hardwood Conference, 30-31 May 2024, Sopron (Hongrie)
2023 : 8th European Drying Conference, 4-7 July 2023, Łódź (Pologne)

POSTERS ET RÉSUMÉS

2024 : 23rd International Drying Symposium, 22-25 November 2024, Wuxi (Chine)
2024 : 13es journées du GDR 3544 « Sciences du bois », 20-22 novembre 2024, Nantes
2023 : 12es journées du GDR 3544 « Sciences du bois », 22-24 novembre 2023, Limoges
2022 : 11es journées du GDR 3544 « Sciences du bois », 16-18 novembre 2022, Nice
2021 : 10es journées du GDR 3544 « Sciences du bois », 17-19 novembre 2021, Montpellier

PUBLICATIONS

FLOREZ, Daniela, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ et Romain RÉMOND. *Probabilistic multi-objective optimization of wood torrefaction conditions using a validated mechanistic model.* In : *Fuel* 335 (2023), p. 126932. DOI : 10.1016/j.fuel.2022.126932

OUERTANI, Sahbi, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. *Evaluating moisture transfer properties of wood by inverse analysis of moisture content profiles determined during drying by X-ray attenuation.* In : *Drying Technology* 42.1 (2024), p. 168–181. DOI : 10.1080/07373937.2023.2279164

SIMO-TAGNE, Merlin, Antoine STÉPHAN, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. *On-line evaluation of moisture transfer properties for a feed-forward control of a wood drying kiln with a mechanistic model.* In : *Drying Technology* 42.16 (2024), p. 2348–2361. DOI : 10.1080/07373937.2024.2420873

STÉPHAN, Antoine, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. *Mechanistic-based probabilistic optimization of industrial wood drying considering energy consumption, process duration, quality and cost.* In : *Drying Technology* 42.7 (2024), p. 1178–1187. DOI : 10.1080/07373937.2024.2323095

STÉPHAN, Antoine, Patrick PERRÉ, Clément L'HOSTIS et Romain RÉMOND. *The fork device : a test for estimating the memory creep of wood under load during moisture variation.* In : *Wood Science and Technologies* 59.1 (2025), 22. DOI : 10.1007/s00226-024-01606-6

Remerciements

Je tiens à remercier les membres du jury, et en tout premier lieu Madame Delphine Jullien et Madame Giana Almeida, qui ont apporté leurs expertises pour évaluer les travaux réalisés. Je remercie aussi Monsieur Ottaviano Allegretti, pour l'examen du manuscrit et de la soutenance. Je remercie enfin Monsieur Patrick Perré pour la présidence du jury et pour tous nos échanges au cours de cette thèse, par lesquels ont transité des encouragements, des remarques et des idées bienvenus.

Je remercie Madame Pauline Champeau et Monsieur Sylvain Bordebeure pour nos discussions et le partage de perspectives sur le sujet, ainsi que Monsieur Nicolas Tonnet et Madame Elsa Chony pour le suivi de la thèse auprès de l'ADEME.

Je remercie Monsieur Clément L'Hostis pour le co-encadrement et la mise en lien des travaux de recherche avec les retours de terrain.

J'exprime un très grand merci à Monsieur Romain Rémond, pour la direction de cette thèse, pour sa disponibilité, pour son écoute, et pour la dynamique qu'il donne à l'équipe et aux projets de recherche.

Je remercie les collègues du campus et du laboratoire, et tout particulièrement Linda, pour les innombrables commandes et le soutien administratif.

Je remercie les collègues de 6N20 pour nos échanges et leurs entrains bien qu'envahis de cartons. J'ai une pensée particulière pour Daniela, Merlin et Sahbi, dont leur partage d'expérience de thèse m'a beaucoup aidé.

Je remercie les collègues des nouvelles équipes PVBD et CPMŒ, les collègues du CRITT et les anciennes collègues de l'IJL, pour les astuces culinaires au RU et les dégustations à la cuisine.

Je remercie les copains et copines pour ces belles années spinaliennes, et plus encore la grande équipe du Palace.

Je remercie Sophie pour ses dessins garnis d'attention, sa patience, les projets entraînants et pour la découverte de nouveaux sentiers.

Je remercie ma famille, pour son soutien volontaire et pour son affection.

COLOPHON

This thesis was typeset using LaTeX and the `memoir` documentclass. It is based on Matteo Belenchia's template for University of Camerino [1], Denis Roegel's template `thesul` [2] and Aaron Turon's thesis *Understanding and expressing scalable concurrency* [3], itself a mixture of `classicthesis` [4] by André Miede and `tufte-latex` [5], based on Edward Tufte's *Beautiful Evidence*.

The bibliography was processed by Biblatex.

The body text is set 10/14pt (long primer) on a 26pc measure. Matthew Carter's Charter acts as the text typeface. Monospaced text uses Jim Lyles's `Bitstream Vera Mono` (« Bera Mono »). The display typeface is Knuth's `Concrete Modern`.

[1] https://www.overleaf.com/latex/templates/unicam-template-for-thesis/nptgrmpghfkh
[2] https://members.loria.fr/DRoegel/TeX/TUL.html
[3] https://people.mpi-sws.org/~turon/turon-thesis.pdf
[4] https://bitbucket.org/amiede/classicthesis/
[5] https://github.com/Tufte-LaTeX/tufte-latex

Abstract

The use of renewable and recovered energy (RE&R) in the industrial drying of wood would reduce its environmental impact. Drying is the most energy-intensive step in the 1st stage of wood processing, especially for hardwoods, and often uses fossil fuels that exacerbate global warming or biomass at the expense of more limited uses. The fluctuating nature of these alternative energies makes it necessary to create new drying schedules, since those currently in use are based on the assumption of constant and abundant energy. It also represents an opportunity to activate the material's memory behavior by varying the drying conditions, at least to the benefit of the quality of the dried wood products. The mechanosorptive behavior of hardwoods, initially in the green state and subjected to humidity variations, has therefore been studied using a new device : the *Fork* test. In conjunction with the *Flying Wood* test, these experiments were used to select and parameterize a mechanical model, after comparing measurements with simulations from the *TransPore* numerical code. The integration of the *Multi_Wood_DryS* drying model, which is a multiscale version of the *TransPore* code, and its coupling with an optimization algorithm in a metamodel developed in Python, initially allowed to improve traditional drying schedules to be improved in terms of duration and quality. Energy consumption and drying costs, which are also part of the operator's criteria, are also predicted by the simulation. A learning capability was then added to the model to determine the characteristics of the wood load during the process, and adjust the drying process accordingly. By integrating the history of moisture content and stresses seen by the material, the model can also suggest a corrective drying schedule after a hazard that will lead to the expected drying results. Finally, the metamodel has been modified to take into account the contribution of renewable energy in the drying process and to optimize the process, notably by doubling its contribution. This work thus represents the first milestone in the development of an advanced automatic control system, capable of taking into account a large number of influencing parameters, taking into account RE&R and optimizing their use, while ensuring that wood drying meets the operator's criteria of duration, cost, energy consumption and dried wood quality.

Résumé

L'utilisation d'énergies renouvelables et de récupération (EnR&R) dans le séchage industriel du bois d'œuvre permettrait de réduire son impact environnemental. Le séchage est effectivement l'étape la plus énergivore de la 1re transformation du bois, notamment des feuillus, et mobilise souvent des énergies fossiles, accentuant le réchauffement climatique, ou issues de la biomasse, au détriment d'usages plus contraints. Le caractère fluctuant de ces énergies de substitution nécessite de générer de nouvelles tables de séchage, celles actuellement employées étant basées sur l'hypothèse d'énergies constantes et abondantes. Il constitue aussi l'opportunité d'activer le comportement mémoire du matériau par la variation des conditions de séchage, au bénéfice, à minima, de la qualité des bois séchés. Le comportement mécanosorptif de feuillus initialement à l'état vert et soumis à des variations d'humidité a donc été étudié au moyen d'un nouveau dispositif : l'essai *Fourche*. Utilisées en complément de l'essai *Flying Wood*, ces expériences ont permis de choisir et paramétrer un modèle mécanique, après confrontation des mesures avec les simulations issues du code numérique *TransPore*. L'intégration du modèle de séchage *Multi_Wood_DryS*, qui est une version multiéchelle du code *TransPore*, et son couplage à un algorithme d'optimisation dans un métamodèle développé en Python ont dans un premier temps permis d'améliorer des conduites de séchage traditionnelles en terme de durée et de qualité. La consommation énergétique et le coût du séchage, qui font aussi partie des critères d'un·e opérateur·rice, sont également prédis par la simulation. Une capacité d'apprentissage a ensuite été apportée au modèle afin de déterminer en cours de processus les caractéristiques de la charge de bois et d'ajuster à cet égard la conduite à suivre. Intégrant l'historique des teneurs en eau et contraintes vues par le bois ce modèle peut également proposer, après un aléa, une conduite menant aux résultats de séchage attendus. Enfin, le métamodèle a été modifié pour prendre en compte l'apport d'EnR&R dans le séchage et optimiser la conduite, permettant notamment de doubler leur contribution. Ces travaux constituent ainsi les premiers jalons d'un automate de régulation avancé, capable de considérer un grand nombre de paramètres influents, de prendre en compte des EnR&R, d'optimiser leur usage tout en assurant un séchage du bois conforme aux critères des opérateur·rices que sont la durée, le coût, la consommation énergétique et la qualité du bois séché.