ParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY

AgroParisTech
INSTITUT DES SCIENCES ET INDUSTRIES DU VIVANT ET DE L'ENVIRONNEMENT
PARIS INSTITUTE OF TECHNOLOGY FOR LIFE, FOOD AND ENVIRONMENTAL SCIENCES

RP2E

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

L'Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (AgroParisTech)

Spécialité : Sciences du bois

présentée et soutenue publiquement par

Carmen Mariella DE LA CRUZ SANCHEZ

le 22 octobre 2012

Utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes liées au retrait du bois

Direction de la thèse : **Patrick PERRE**
Co-encadrement de la thèse : **Romain REMOND**

Jury

M. Joseph GRIL, Directeur de recherche, LMGC, CNRS Montpellier	Rapporteur
M. Frédéric ROUGER, Directeur de recherche, Institut Technologique FCBA Paris	Rapporteur
M. Wahbi JOMAA, Professeur, TREFLE, ENSAM Bordeaux	Examinateur
M. Patrick PERRE, Professeur, LGPM, Ecole Centrale Paris	Directeur de thèse
M. Romain REMOND, Maître de Conférences, LERMAB, ENSTIB Epinal	Examinateur
M. Daniel ALEON, Ingénieur, Institut Technologique FCBA Paris	Membre invité

AgroParisTech
UMR 1092 AgroParisTech-INRA, Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois
14, rue Girardet – CS 14216 – 54042 Nancy cedex

Résumé

UTILISATION DE CONDUITES DE SECHAGE OSCILLANTES
POUR REDUIRE LES CONTRAINTES LIEES AU RETRAIT DU BOIS

La maîtrise du procédé séchage, étape essentielle dans la transformation du bois, est devenue incontournable pour la filière bois. Cette thèse propose l'utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes de séchage liées au retrait par l'activation du fluage mécanosorptif. A ce jour, la meilleure façon d'appliquer les conduites oscillantes représente un défi pour la communauté scientifique. Dans ce travail, nous avons choisi comme matériel d'étude une essence feuillue fortement utilisée dans la filière et très susceptible aux déformations lors du séchage : le hêtre (*Fagus sylvatica*). L'effet des conduites oscillantes sur les contraintes de séchage est étudié par une approche expérimentale et par une approche théorique, articulées en trois parties :

- Un premier volet expérimental sur un séchoir semi – industriel pour saisir l'effet global des conduites oscillantes à l'échelle d'une pile de planches. L'amélioration de la qualité du bois séché s'est avérée par : une meilleure homogénéité de la teneur en eau finale inter et intra-planche, la diminution des déformations globales et la diminution des contraintes résiduelles exprimées par le gap du « slicing test ».
- Ensuite, nous avons développé un volet théorique sur la base de modélisations analytique et numérique pour étudier l'évolution des champs de teneur en eau et de contraintes mécaniques au sein d'une planche lorsque les conditions climatiques oscillent. Une formulation analytique simple, adaptée aux conduites oscillantes, est proposée pour les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué. L'approche numérique effectuée avec l'outil de simulation *TransPore* permet une étude plus réaliste du séchage oscillant. Ainsi, le module mécanique de *TransPore* a été utilisé pour dégager des configurations pertinentes de séchage permettant d'étudier l'effet des conduites oscillantes sur la relaxation des contraintes.
- Enfin, un second volet expérimental a été réalisé sur un séchoir de laboratoire, à l'échelle d'une planche, pour tester les informations issues du volet théorique. Un dispositif de séchage dissymétrique (flying wood) et deux dispositifs de séchage sous charge (poutre cantilever et flexion trois points) ont été utilisés pour étudier l'effet des oscillations. Toutefois, ces essais ne permettent pas de montrer clairement l'effet des oscillations sur la relaxation des contraintes.

La confrontation entre les résultats expérimentaux à l'échelle d'une planche et la simulation numérique a mis en évidence l'effet conséquent des oscillations parasites de faibles période et amplitude sur les résultats expérimentaux, provoquées par la régulation du séchoir. Des modifications du modèle de comportement mécanique différé ont été proposées en perspectives de ce travail afin de mieux saisir le comportement observé expérimentalement.

Mots clefs : *séchage du bois, conduite oscillante, mécanosorption, comportement différé, transferts de masse et de chaleur, séchage dissymétrique, séchage sous charge, hêtre.*

Abstract

UTILIZATION OF OSCILLATING DRYING CONDITIONS
TO REDUCE STRESSES INDUCED BY THE SHRINKAGE OF WOOD

Wood drying is an essential process in the wood industry. A perfect control of wood drying is nowadays very important for the wood industry. In this study, we propose the utilization of oscillating drying conditions to reduce the drying stresses induced by wood shrinkage by activating the mechanosorptive creep. The best way to apply this concept remains an open question in the scientific community. Beech wood (*Fagus sylvatica*), one of the most commonly used hardwood in France, was chosen for this study owing its elevated risk of drying defaults. The effect of oscillating conditions on drying stresses inside the boards was studied by both an experimental and a theoretical approach, structured in three parts:

❖ A first experimental part realized with a semi – industrial kiln in order to study the global effect of oscillating conditions at the stack scale. Improvement of the quality of dried wood was showed by the best homogeneity of water content inside the board and among the boards and by the decrease of global deformations and residual stresses expressed by the gap measured by the slicing test.

❖ The study was continued with a theoretical part based on analytical and numerical modeling to understand the development of internal heat and mass transfers inside the boards and the evolution of drying stresses during oscillating conditions. A simple analytical model adapted to the oscillating conditions was proposed, particularly for kiln users who don't have access to sophisticated numerical tools. The numerical approach used the simulation tool *TransPore*, able to simulate oscillating drying in more realistic conditions. Its mechanical module was used to set accurate drying schedules to study the effect of oscillating conditions on stresses relaxation.

❖ Finally, a second experimental part was performed in a laboratory scale kiln, at the board scale, to test the information obtained theoretically. A non-symmetrical drying device (flying wood) and two different loaded drying devices (cantilever beam test and three points bending) were used to study the effect of oscillations. However, it is difficult to see the oscillating conditions effect on the stresses relaxation.

The confrontation between experimental results at the board scale and the numerical simulation showed the significant effect produced on experimental results by parasite oscillations of small periods and intensities, originated by the kiln regulation. Further work should consider some modifications of the time dependent mechanical behavior model in order to capture the experimentally observed behavior.

Keywords: *wood drying, oscillating conditions, mechanosorption, time dependent behavior, heat and mass transfers, non – symmetrical drying, loaded drying, beech wood*

¿QUE ESPERA USTED DE SUS ALUMNOS?

Cuando me pediste, con la bella inocencia de tus 16 años, proferir un par de vaticinios definitivos en respuesta a la pregunta-trampa: "¿Qué espera usted de los alumnos de La Recoleta?", te contesté: "nada" con un tono definitivo y, por casualidad, sabía lo que decía. Pero me conminaste a esparcir un poco de mermelada sobre este zoquete de pan y aquí lo hago, por amistad, quizás... por exasperación seguramente. Escribo sin alegría: llega un momento en la vida en que las palabras ya no vuelan; son como piedras y uno tiene el oscuro sentimiento de que tendrían que servir para construir.

La vida de la mayoría de los hombres es un camino muerto que no conduce a nada, pero otros saben desde la infancia que se dirigen hacia un mar infinito; ya el sabor de la sal quema sus labios, el viento de los cuatro horizontes silba a sus orejas, hasta que, franqueada la última duna, esta pasión infinita les abofetea de arena y espuma; les queda entonces sumergirse en ella o hacer marcha atrás.

Se decía que las batallas que libro Inglaterra habían sido ganadas de antemano, en el campus de Eton. No sólo las batallas sino todo lo que hizo, en cierta época, la grandeza del Imperio con sus exploradores, sus aventureros, con sus arqueólogos y sus conquistadores de lo imposible.

Cuando hablo de Inglaterra no hablo, por supuesto, de un lugar en el mapa sino de una disposición de la mente.

Al dar el primer azadonazo en la colina de Hisarlic, Schliemann tenía 50 años, y, sin embargo, su búsqueda de la Troya de Príamo había empezado a los cinco o seis años cuando escuchaba a su padre leer, en La Ilíada, *las hazañas de los héroes homéricos.*

El colegio tendría que ser ese espacio donde sopla el Espíritu.

Encuentro deplorable que, en las escuelas de hoy, los Stanley y los Livingstone, los Peary y los Amundsen, los Lawrence de Arabia, los Pasteur y los Fleming, los Edison, los Roentgen, los Meiggs y los Bonner, los Faustino Sánchez Carrión y los cazadores de luna estén amontonados en el armario de los esqueletos.

Encuentro triste que sólo se enseñe el resultado de las ciencias y no de su historia: este fascinante viaje entre las hipótesis adoptadas y descartadas, entre las intuiciones y los instrumentos de medida que las confirman o desmienten; estas mil pistas abiertas y cerradas; este recorrido alucinante que nos lleva de Demócrito hasta Einstein; estos millones de experiencias detectivescas que sirvieron para desenmascarar un virus; esta concatenación, en el tiempo y el espacio, de conocimientos elaborados por una multitud de cerebros hermanados que rescatan lo que queda, en el hombre, de grandeza y de dignidad.

Actualmente, un alumno de primer año de ingeniería sabe más de física que Leonardo Da Vinci o Pascal; pero ¿sabrá pensar como ellos?

Escribía Maurois: "la adolescencia, esta edad entre dos edades, cuando el corazón se vuelva hacia no sé qué Asia".

Desgraciadamente, la espléndida definición del poeta envejeció. Ya no existe el Asia que atraía, como un imán, las negras carabelas. Marco Polo murió y con él todos los navegantes ebrios de espacio que, inclinados a la proa de las carracas panzudas, miraban las constelaciones desconocidas emerger desde los abismos de océanos nuevos.

La mayoría de los adolescentes de hoy sólo conoce, de las fosforescencias del Asia, la enseña de neón del chifa de la esquina.

Uno, a veces, sale de su clase con moretones en el alma.

"¿De qué me sirve?" Esta es la madre de todas las preguntas. "¿De qué sirve una flor, una puesta de sol, de qué sirve un cuadro de Van Gogh si no fuera por su valor mercantil, de qué sirve el amor?"

"El perrito del señor Bergeret –escribía Anatole France- nunca miraba el azul del cielo porque no era comestible".

La Recoleta nunca tuvo como meta primordial el fabricar minicerebros lo bastante chatos como para poder deslizarse cómodamente por la grieta de las respuestas "correctas" que dan acceso a las universidades amputadas de lo "universal"; mentes con opción única, homúnculos anémicos, víctimas de un sistema que termina por convertir al joven, no en hombre, sino en cosa, en artefacto eficiente henchido de conocimientos de los cuales el factor humano ha sido eliminado.

Todo el mundo puede pasar un examen, trabar amistades o enemistades, todo el mundo puede ganar o perder plata, ser víctima de un duelo. Pero lo esencial es el significado de este éxito, de este duelo o de esta amistad en la perspectiva de aquella búsqueda de sí mismo, de aquella encuesta y conquista que representa para cada uno, el cumplimiento de su destino.

Finalmente, uno nace príncipe o vendedor de salchichas. La formula seduce y llevarla hasta su conclusión lógica me procuraría una satisfacción perversa. Desgraciadamente, no resiste a la experiencia. Todos hemos conocido a algún tendero o mercachifle que en el curso de una noche de naufragio o de incendio se reveló superior a sí mismo y este incendio permanecerá como la noche de su vida. Pero, a falta de nuevas ocasiones, a falta de terreno favorable, a falta de religión exigente, volvió a dormir sin tener fe en su propia grandeza. Ciertamente las vocaciones ayudan al hombre a liberarse, pero es igualmente necesario liberar las vocaciones. Así se expresaba, en substancia, Saint Exupéry.

De ahí deriva la necesidad de los sueños y de los puntapiés para sacarlos de las trincheras de la mediocridad.

Cuando se estrelló en los Andes y después de haber caminado días y días hasta las primeras habitaciones humanas, el aviador Guillaumet dijo, al abrazar a sus compañeros de la Aeropostal: "lo que he hecho, lo juro, ningún animal lo hubiera hecho". ¡Magnífica frase! Para que los gusanos puedan devorar al hombre como si fuera una vieja zapatilla, la naturaleza tiene que pisarlo y machacarlo; pero, cuando un hombre dice: "lo que he hecho, lo que he soportado, ningún animal lo hubiera hecho", entonces ha conocido la cumbre del sufrimiento.

Una vida de hombre en la cual nunca hubo tal momento es una vida perdida. Este hombre tiene las patas enfurtidas. Ha tocado tan poco el suelo que pisó que se podría deslizar una hoja de papel entre su pie y la tierra. No es nada, se parece a alguien que arrastraría su vida en un costal con miedo de olvidarlo en alguna parte... Al oír esto van a estallar literalmente de cólera como esas ratas de montaña llamadas lemmings, *pero sé lo que digo.*

Veamos lo que pasa cuando un hombre ama. Cuando un hombre descansa su cabeza sobre el hombro de una mujer es la hora de su crepúsculo, este crepúsculo que llena a todos los animales de miedo. El hombre se siente solo y el mundo que lo rodea es un mundo extraño.

O es la guerra. La guerra no es nada en sí, es un momento del tiempo que llamamos de este modo para saber de qué hablamos. Es como si dijéramos: "hoy día es lunes o viernes". Pero si hablamos de este momento en el cual un hombre pudo decir: "lo que hice, ningún animal lo hubiera hecho", entonces esta guerra fue la guerra entre todas las guerras desde que existe el mundo, vale todas las muertes y todos los nacimientos: los ojos en los ojos de Dios y la fraternidad de la sangre entre los hombres. Eso se los digo para los hombres, no para aquellos que arrastran su vida en un costal.

Es por todo aquello, amigo, por todo aquello que acabo de escribir con una especie de rabia adolescente, que no quise darte una respuesta encerrada en párrafos pulcramente alineados como tarros de mermelada sobre los estantes de un supermercado. ¿Por qué no confesarlo? El niño que fui todavía se agita en mi viejo esqueleto y traba con ustedes misteriosas complicidades.

No espero nada, nada que ya no lleven en si como la fruta su cuesco. Al fin y al cabo, cuando se despierta un incendio, el bosque sólo se quema por intermedio de sus propios árboles.

Esperar... no tengo tiempo de esperar, nadie lo tiene. Como lo canta Joan Baez en su admirable elegía To Bobby: "the time is short and there is work to do".

Vuelvan a meditar el último capítulo de La Odisea y luego invoquen a Homero, a Saint Exupéry, al viejo hombre de Cuba para que les ayuden a templar el arco de Ulises.

P. Hubert Lanssiers

A Valentina et Mickaël
A mes parents
A Cecilia

Remerciements

Terminé, ¡por fin!

J'étais très tentée d'écrire cette partie de la thèse en espagnol, ma langue maternelle. Mais, je vous rassure, mon esprit « rationnel » est revenu… Et de toute façon, je me suis régalée en choisissant une très longue citation en espagnol.

Cette thèse a été un travail loin d'être solitaire, car beaucoup de personnes y ont contribué. D'abord, Patrick Perré (à Nancy) et Daniel Aléon (à Paris) qui m'ont accueilli dans leurs équipes respectives. Merci Patrick d'avoir développé une structure de pointe, idéale pour les thésards en quête féroce d'expérimentation. Votre encadrement m'a permis d'avancer tant sur le plan scientifique que personnel. Merci Daniel pour ton dévouement au service des praticiens du séchage. Merci de m'avoir sensibilisé aux besoins de l'industrie, d'avoir partagé tes connaissances et d'avoir été si disponible.

A ce duo, je dois ajouter une personne sans laquelle jamais cette thèse aurait abouti. Je tiens à remercier infiniment Romain Rémond. Merci pour ton encadrement, ta disponibilité et ta bonne humeur, surtout dans les moments de doute (qui ont été nombreux…).

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury de thèse. A Joseph Gril et Frédéric Rouger qui m'ont fait l'honneur de rapporter cette thèse et à Whabi Jomaa qui a présidé l'assemblée. Merci pour le temps que vous avez consacré à lire ce manuscrit.

Je voudrais remercier aussi l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) et l'Institut Technologique FCBA qui ont financé cette thèse dans le cadre d'une convention CIFRE. Au sein de FCBA je remercie tout particulièrement Robert Golja pour son implication et sa sensibilité pour la science, Cynthia de la Saussay qui a géré mes billets de TGV Paris-Nancy (cette merveille de l'ingénierie française), Francine Poujade pour le soutien administratif et les autres membres de l'équipe qui m'ont réservé un excellent accueil.

Sans appui technique pour la réalisation de bancs d'essai, ce travail n'aurait pas existé. Merci à Michel Contal et Philippe Jacquin, la cellule technique, pour votre aide précieuse et toujours dans la bonne humeur.

Un grand merci aussi à Jean-Claude Mosnier, fournisseur officiel de billons de hêtre fraîchement abattus et menuisier dévoué au découpage d'échantillons sans défaut.

Je remercie également Corinne Martin, indispensable pour déchiffrer les procédures administratives. Je n'oublierai pas la boîte à bonbons de ton bureau et tes délicieux gâteaux pour les pauses cafés.

Evidemment merci aussi aux autres membres de l'équipe, Mme Huber, Xavier, Giana, Patrice, Anis, Masahiko et Pin qui ont partagé mon quotidien.

Un grand merci aussi à tous les thésards de l'équipe. D'abord, mes compagnons de bureau à tour de rôle : Saloua qui m'a expliqué le fonctionnement du labo et m'a appris l'existence de l'école

doctorale ; Pierre avec qui les discussions devenaient vite intéressantes et par conséquent interminables ; et Liang qui m'a initié à la dégustation de thé. Puis, ceux du 2ème : Julien et ses déguisements improbables pour la rentrée des FIFs ; Floran avec qui on a dû faire dans les 10 000 km entre Nancy et Epinal et sous tous les temps (oui, on a eu le temps de refaire le monde !) ; Naoual, ma très chère et courageuse copine ; Tuan et tous les autres, merci à vous tous.

Enfin, un grand merci à ma famille pour leur soutien sans faille tout au long de cette thèse. Mil gracias por apoyarme todos estos años. A pesar de la distancia siempre los tengo en mi corazón. Je ne remercierai jamais assez Mickaël, mon mari, pour avoir supporté mes nombreuses absences, pour son aide et sa patience.

Sommaire

Résumé i

Abstract iii

Sommaire xi

Liste de figures xv

Liste de tableaux xix

Introduction générale 1

Chapitre 1: Séchage du bois soumis à des conditions climatiques oscillantes, du fondamental à l'appliqué 5

1.1. Matériel végétal étudié 7

1.2. Relation eau-bois 11

1.2.1. L'eau dans le bois 11

1.2.2. Le retrait du bois 12

1.2.3. Isothermes de sorption et hystérésis 12

1.3. Le comportement mécanique du bois 15

1.3.1. Orthotropie du bois 15

1.3.2. Elasticité orthotrope 15

1.3.3. Comportement différé à humidité constante 18

1.3.4. Comportement différé à humidité variable 21

1.3.5. Plasticité 22

1.4. Le comportement mécanosorptif du bois 22

1.4.1. Définition 22

1.4.2. Explications possibles 25

1.4.3. Modélisation 27

1.4.4. Approches expérimentales 30

1.5. Le séchage du bois et l'utilisation de conduites oscillantes 33

1.5.1. Pratique industrielle du séchage du bois : une vue d'ensemble 34

1.5.2. Principe et historique de conduites oscillantes 38

Conclusion 43

Chapitre 2: Conduite oscillante en configuration semi-industrielle 45

2.1. Conditions d'essai 47

2.1.1. Première campagne d'essais 48

2.1.2. Deuxième campagne d'essais 51

2.2. Matériel végétal 53

2.2.1. Echantillonnage 53
2.3. Dispositif expérimental 55
2.4. Présentation et discussion des résultats 59
2.4.1. Cinétique de séchage 60
2.4.2. Homogénéité de la teneur en eau finale intra et inter – planches 64
2.4.3. Déformations 69
2.4.4. Etat de contraintes à la fin de séchage (gap) 70
Conclusion 79
Chapitre 3: Etude théorique des transferts internes et de la mécanique du séchage d'une planche soumise à des conditions oscillantes 81
3.1. Approche analytique simplifiée des transferts de masse dans l'épaisseur de la planche 83
3.1.1. Modèle de migration diffusive sous conduite oscillante 83
3.1.2. Effet de la période et du coefficient de diffusion 85
3.1.3. Proposition d'un outil d'aide pour le choix des conduites oscillantes 87
3.2. Approche numérique des transferts couplés de masse et de chaleur 90
3.2.1. Apports du code numérique dans la compréhension des phénomènes de transfert en régime périodique stationnaire 90
3.2.2. Etude des transferts internes en régime périodique non établi 98
3.3. Approche numérique du comportement mécanique en conduite oscillante 100
3.3.1. Modèles de comportement mécanique utilisés dans le code 100
3.3.2. Quelques simulations en traction simple 101
Conclusions 109
Chapitre 4: Effet de conduites oscillantes sur les contraintes de séchage 111
4.1. Dispositifs expérimentaux 113
4.1.1. Séchoir 113
4.1.2. Séchage dissymétrique : flying wood 115
4.1.3. Séchage sous charge 117
4.2. Conditions d'essais et échantillonnage 120
4.2.1. Utilisation de *TransPore* pour le choix de conditions d'essais 122
4.2.2. Echantillonnage 124
4.2.3. Effet de la courbure de cernes sur la déformation mesurée 126
4.3. Présentation et discussion de résultats 128
4.3.1. Séchage dissymétrique 128
4.3.2. Séchage sous charge 133
Conclusion 138

Conclusions et perspectives 141
Bilan du travail réalisé 143
Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique 144
Perspectives 147
Annexes.....149
A. Analyse de corrélation de variables.....151
B. Comportement mécanique d'un échantillon épais pour trois configurations de séchage 157
C. Plan de découpe des échantillons 171
D. Fiches complètes de conditions d'essai et résultats 175
E. Modification du modèle de comportement mécanosorptif 199
F. Essais au DMA sur un barreau de colle époxy bi – composant 201
G. Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique – campagne n°1 203
H. Caractérisation expérimentale des paramètres mécanosorptifs – méthodologies explorées 205
Bibliographie 209

Liste de figures

Figure 1.1. Coupe transversale de hêtre (*Fagus sylvatica*) observée au microscope électronique (image ESEM Huber, 2004).....8
Figure 1.2. Isothermes de sorption du bois (Keylwerth, 1969, tiré de Aléon et al, 2001).....13
Figure 1.3. Hystérésis de sorption (adapté de Babiak, 2007 dans Perré, 2007).....14
Figure 1.4. A gauche : Système cylindrique; à droite : éprouvette orientée selon les axes de symétrie (adapté de Kollmann et Côté, 1968).....15
Figure 1.5. Variation du module d'Young E_T en fonction de la teneur en eau (d'après Pluvinage 1992). 18
Figure 1.6. Evolution de la déformation d'un échantillon de bois soumis à une contrainte constante sur l'intervalle de temps $[t_0 - t_1]$: OA: déformation instantanée; AB: déformation différée; BC: recouvrance instantanée et CD: recouvrance différée (d'après Navi et Heger, 2005). 19
Figure 1.7. Evolution de la contrainte appliquée à un échantillon de bois pour maintenir une déformation constante (d'après Bodig, et Jayne, 1982).....19
Figure 1.8. Représentation viscoélastique du fluage viscoélastique par *n* éléments de Kelvin associés en série.....21
Figure 1.9. Comportement mécanosorptif du bois (d'après Perré, P. 2007). 22
Figure 1.10. Courbe typique de l'effet mécanosorptif en flexion ou compression (d'après Hoffmeyer et Davidson, 1989) 24
Figure 1.11. Construction d'une trajectoire mécanosorptive. a. *Représentation temporelle* : déformation totale (ε) et déformation liée au retrait (ε^r), taux d'humidité (X) et contrainte σ en fonction du temps (t). b. *Trajectoire associée* : complaisance J (déformation diminuée du retrait rapportée à la contrainte appliquée σ_0) en fonction du taux d'humidité X (d'après Gril, 1988). 24
Figure 1.12. A gauche : structure de la paroi cellulaire et blocs pris en compte pour le mécanisme de Mukudai. A droite : mécanisme de décollement (adapté de Siau, 1984 et Gril, 1988). 26
Figure 1.13. Image MEB des plans de glissement dans un test de compression d'épicéa (*Picea abies*). Les flèches indiquent la localisation de deux plans de glissement de la couche S2 (d'après Hoffmeyer et Davidson, 1989). 27
Figure 1.14. Représentations rhéologiques de quelques modèles mécanosorptifs. 28
Figure 1.15. Schéma du séchage du bois : évolution du gradient de teneur en eau et du champ des contraintes au cours des trois phases de séchage.....34
Figure 1.16. Déformations les plus courantes dues au séchage du bois.....36
Figure 1.17. Techniques d'évaluation de contraintes de séchage. 37
Figure 1.18. Schéma d'une table de séchage à conduite classique et à conduite oscillante. 38
Figure 2.1.Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées. 50
Figure 2.2. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées. 50
Figure 2.3. Evolution des contraintes à la surface et au cœur de la planche obtenue par simulation numérique (*TransPore*). 51

Figure 2.4. Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées. 52
Figure 2.5. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées. 53
Figure 2.6. Schéma d'échantillonnage à partir de planches de 3 m de long et de 30 mm x 100 mm de section. 54
Figure 2.7. Schéma du séchoir Froilabo de l'Institut Technologique FCBA. Les flèches bleues représentent le flux d'air. 56
Figure 2.8. Empilage. A gauche : pile dans le séchoir avec les sondes de teneur en eau des échantillons témoins ; à droite : schéma de la pile, en gris les échantillons sur lesquels la teneur en eau à cœur a été mesurée au cours du séchage et en noir l'emplacement des anémomètres pour ajustement de la vitesse de l'air. 56
Figure 2.9. Schéma des mesures réalisées lors de chaque séchage pour chaque planche. 57
Figure 2.10. Plan de découpe à la fin du séchage pour la mesure des teneur en eau (X) finale et initiale, le slicing test et le gradient de teneur en eau finale. Les traits pointillés représentent les traits de coupe. En dessous, à gauche, lamelles pour le gradient après 24 heures dans l'étuve à 103°C ; à droite, lamelles pour le slicing test après 48 heures, on y aperçoit le gap. 59
Figure 2.11. Cinétiques de séchage pour la première campagne pour douze témoins et conditions de séchage. En rouge, température sèche ; en bleu, température humide. 61
Figure 2.12. Cinétiques de séchage pour la deuxième campagne pour douze témoins d'humidité et conditions de séchage. En rouge, température sèche ; en bleu, température humide. 62
Figure 2.13. Distribution de la teneur en eau finale. 66
Figure 2.14. Profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur – valeurs moyennes de la pile. 68
Figure 2.15. Profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur pour chaque échantillon. 68
Figure 2.16. Déformations moyennes (axe des ordonnées en mm) produites pendant le séchage pour les deux campagnes. 69
Figure 2.17. Evolution des contraintes résiduelles dans le temps. 71
Figure 2.18. Récapitulatif des résultats du *slicing test* exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage. 72
Figure 2.19. Résultats de slicing test exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage – campagne n°1. 74
Figure 2.20. Résultats de slicing test exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage – campagne n°2. 75
Figure 3.1. Schéma de l'évolution sinusoïdal de la teneur en eau pour *x = 0* (surface) et *x = 4 mm*. ...85
Figure 3.2. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et plusieurs périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%, $D=4{,}52\times10^{-10} m^2 s^{-1}$] 86
Figure 3.3. Variation du coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois selon la température et la teneur en eau. 87
Figure 3.4. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour un coefficient de diffusion estimé à une teneur en eau d'équilibre de 5% et 10% et pour deux périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%] 87

Figure 3.5. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur adimensionnelle de la planche (e*).....89
Figure 3.6. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10%: solution analytique et simulation numérique. [60°C, ΔX_{eq} 1%, dosse].....91
Figure 3.7. Ajout progressif de coefficients de transferts externes de masse et de chaleur, coefficient de diffusion dépendant de T et H, couplage de transferts de masse et de chaleur [60°C, teneur en eau d'équilibre 10%, ΔX_{eq} 1%, 1h, avec résistance à la diffusion.].....92
Figure 3.8. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi-épaisseur adimensionnelle de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et deux périodes (1 et 12 heures) : solution analytique et simulation numérique pour différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.].....93
Figure 3.9. Variation de la teneur en eau (X) à la surface d'échange et au cœur en fonction du temps pour une teneur en eau d'équilibre de 10%, deux périodes (1 et 12 heures) et différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.].....94
Figure 3.10. Solution analytique corrigée pour une planche de 20 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.].....96
Figure 3.11. Relation entre la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) et la demi épaisseur adimensionnelle critique (e^*_{cr}).....96
Figure 3.12. Solution analytique corrigée pour une planche de 2,5 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.].....97
Figure 3.13. Evolution de la teneur en eau en cinq points situés à différentes distances de la surface en mm (0 - 0,25 – 0,50 – 2,75 – 5,00) d'une planche de 10mm d'épaisseur séchée à X_{eq} 10%. 99
Figure 3.14. Modèle rhéologiques représentant la déformation mécanosorptive : a) Modèle de Ranta – Maunus ; b) Modèle de Salin.....101
Figure 3.15. Contrainte et teneur en eau fonction du temps [ΔX_{eq} 2,4%, période : 2h].....103
Figure 3.16. Déformation décomposée (selon la direction tangentielle du bois : ms = 135 GPa^{-1}, E_{ms} = 45 MPa).....104
Figure 3.17. Effet de la limite mécanosorptive (E_{ms}) dans la déformation totale pour un coefficient mécanosorptif (ms) de 135 GPa^{-1}.....105
Figure 3.18. Effet coefficient mécanosorptif (ms) dans la déformation totale pour une limite mécanosorptive (E_{ms}) de 45 MPa. 105
Figure 3.19. Effet de l'amplitude de la teneur en eau dans la déformation totale (période : 2 heures). 106
Figure 3.20. Effet de la période dans la déformation totale. (ΔX_{eq} = 0,75%) 107
Figure 4.1. Schémas et photos du séchoir utilisé pour les essais. 114
Figure 4.2. Principe de la technique « flying wood » (adapté de Perré, 2007). 115
Figure 4.3. Dispositif « flying wood » pour les essais de séchage dissymétrique. 116
Figure 4.4. Dispositif « poutre cantilever » pour les essais de séchage sous charge. 118
Figure 4.5. Dispositif expérimental pour les tests de flexion trois points. 119
Figure 4.6. Schéma des tables de séchage utilisées. 122
Figure 4.7. Variation adimensionnelle de teneur en eau en fonction de la demi-épaisseur pour différents séchages oscillants à 60°C de température sèche. ..... - 123 -
Figure 4.8. Géométrie des échantillons pour les dispositifs expérimentaux de séchage dissymétrique (flying wood) et séchage sous charge (poutre cantilever). 125

Figure 4.9. Déformation des planches en fonction de leur position dans la grume (d'après Aléon et al., 2001). 126
Figure 4.10. Synthèse des déformations des échantillons sur dosse en fonction de la position des cernes. 127
Figure 4.11. Quelques résultats du séchage dissymétrique (flying wood) pour les échantillons débités sur dosse et d'une épaisseur de 5 mm. 129
Figure 4.12. Séchage dissymétrique : effet de la période des oscillations et de l'épaisseur des échantillons (campagnes n°2 et n°3). 131
Figure 4.13. Séchage dissymétrique : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 5 mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis). 132
Figure 4.14. Explication du problème de pivot autour de la face d'appui à l'encastrement du dispositif poutre cantilever. 133
Figure 4.15. Quelques résultats du séchage sous charge (poutre cantilever). 135
Figure 4.16. Séchage sous charge : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 10mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis). 136
Figure 4.17. Résultats de séchage sous charge pour le dispositif de flexion trois points (campagne n°4)....137

Liste de tableaux

Tableau 1.1. Données bibliographiques des caractéristiques mécaniques du bois de hêtre. 10
Tableau 1.2. Rapport entre les valeurs des propriétés mécaniques du bois d'hêtre séché à l'air et les valeurs à l'état vert. 10
Tableau 1.3. Ordre de grandeur des coefficients de Poisson (d'après Guitard 1987). 17
Tableau 1.4. Ordre de grandeur des modules de Coulomb (d'après Guitard 1987). 17
Tableau 2.1. Table de séchage préconisée par l'Institut Technologique FCBA pour le hêtre (d'après Aléon, 2001). 48
Tableau 2.2. Tables de séchage de la campagne n°1. 48
Tableau 2.3. Tables de séchage de la campagne n°2. 52
Tableau 2.4. Composition des piles selon le débit pour les deux campagnes réalisées. 54
Tableau 2.5. Récapitulatif des cinétiques de séchage. 64
Tableau 2.6. Teneur en eau initiale et finale et gradient de teneur en eau finale dans l'épaisseur. 65
Tableau 2.7. Comparaison de gap entre conduite classique et conduites oscillantes et entre conduite oscillante 1 et conduite oscillante 2. 73
Tableau 3.1. Valeurs mécaniques utilisées dans le code numérique *TransPore*. 102
Tableau 3.2. Valeurs caractéristiques du milieu poreux utilisées dans le code numérique *TransPore*. 102
Tableau 4.1. Synthèse de conditions d'essais 121
Tableau 4.2. Organisation des résultats. 128

Introduction générale

Le bois a été un des premiers matériaux utilisés par l'homme. Aux premières heures de l'humanité, il a été utilisé pour fabriquer des outils, pour construire des abris, et plus tard, lors de la découverte du feu, pour se chauffer et cuire les aliments. Déjà en ces temps, il était un matériau essentiel pour l'homme. Et il l'est toujours avec des utilisations désormais très diverses. Au fil des siècles, la complexité du comportement du matériau bois a été déchiffrée peu à peu, par l'observation aigüe des utilisateurs, qu'il s'agisse des artisans ou praticiens porteurs des connaissances empiriques transmises de génération en génération ou, plus récemment, des scientifiques avides de mettre en équations la réponse du matériau à une situation donnée. Malgré tous ces efforts, il reste toujours des zones d'ombre dans la compréhension du comportement de ce matériau. La raison principale en est sans doute l'origine biologique du matériau. Nous sommes ainsi devant une multitude d'essences, chacune avec leur propre arrangement cellulaire, influencé par les conditions de croissances et le patrimoine génétique et, par conséquent, leur lot de propriétés physiques et mécaniques spécifiques.

Pour l'arbre sur pied, l'eau est un élément indispensable. Toutefois, lorsque sa tige est transformée en planches l'eau doit être évacuée afin d'amener la planche vers la teneur en eau d'équilibre de leur futur milieu d'utilisation. Le séchage devient donc un préalable essentiel dans la transformation du bois. Le séchage, nécessaire à la stabilité dimensionnelle des ouvrages, apporte également plusieurs avantages : il améliore les propriétés mécaniques, évite l'attaque d'agents biologiques (notamment champignons et insectes xylophages), et rend plus facile le collage et l'application de produits de finition.

Ainsi, l'objectif du séchage du bois est de diminuer le plus rapidement possible la teneur en eau du bois, tout en limitant au minimum les pertes éventuelles de qualité. Néanmoins, cela est loin d'être simple, en premier lieu parce que sur pied, le bois contient une grande quantité d'eau (parfois il contient plus d'eau que de matière ligneuse). Et l'évacuation de l'eau implique également des mécanismes physiques et mécaniques complexes, affectés par les caractéristiques anatomiques de l'essence en question. Lorsque le bois sèche, il est inévitablement le siège d'un gradient d'humidité qui, en raison du retrait, induit un champ de contraintes au sein du matériau. Il en résulte l'apparition de défauts de séchage, parfois rédhibitoires pour l'utilisation envisagée. En conséquence, il devient nécessaire de conduire le séchage prudemment, en choisissant des conditions adaptées à l'essence, l'épaisseur et l'évolution de la teneur en eau du bois tout au long du cycle de séchage. La variabilité du matériau bois et la complexité de son comportement mécanique différé rendent très compliqués le choix des conditions de séchage et leur optimisation. Cela s'entend évidemment pour le séchage artificiel. Dans le séchage à l'air libre, pratique encore très répandue dans l'industrie du bois, aucun contrôle des conditions de température et d'humidité de l'air et de l'aéraulique autour des planches n'est possible.

Du point de vue technologique, plusieurs méthodes de séchage artificiel existent tout en assurant une bonne qualité du produit séché : séchage convectif à basse ou à haute température (pour les résineux uniquement), séchage sous vide continu ou discontinu, séchage par haute fréquence, séchage mixte vide/hautes fréquences. Ces technologies visent à accélérer les transferts internes d'humidité, de façon à réduire la durée du séchage, les gradients d'humidité, et par conséquent, via le retrait, les contraintes de séchage. Toutefois, la plupart de ces technologies sont onéreuses, notamment en termes d'investissement.

Du point de vue industriel, le besoin de bois sec en France est énorme. La production annuelle de sciages, d'environ 10 millions de m^3 par an, devrait augmenter dans les années à venir : lors du Grenelle de l'Environnement de 2007, il a été décidé d'augmenter la récolte de bois dès 2012 à 12 millions de m^3 par an. Actuellement, seulement 25% de la production française de sciages est séchée artificiellement. De plus, plusieurs réglementations de niveau européen fixent des intervalles d'humidité à respecter et donnent des règles d'estimation de la qualité du séchage. Compte tenu de ces réglementations, des marchés et de leurs évolutions, le pourcentage de sciages séchés artificiellement devrait donc atteindre près de 53% de la production française en 2016. Ainsi, la maîtrise de programmes de séchage est incontournable.

Dans cette thèse, il était question de **proposer une nouvelle façon de sécher le bois sur le parc de séchoirs convectifs existants,** séchoir le plus couramment utilisé en France**, afin de réduire les contraintes mécaniques liées au retrait du bois**. Nous pouvons entendre également sécher plus rapidement à contraintes équivalentes. Le principe retenu ici consiste à **utiliser des conditions de séchage oscillantes en humidité d'équilibre du bois afin d'activer les propriétés mécanosorptives du bois**.

Cette thèse, réalisée dans le cadre d'une convention CIFRE (Convention Industrielle de Formation par la Recherche) entre le Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt – Bois (LERFoB) – équipe Bois Biomasse et Biomatériaux, et l'Institut Technologique FCBA, fait le lien entre un volet de recherche fondamentale visant à approfondir les connaissances sur la mécanosorption, et un volet plus applicatif, ayant comme objectif de contribuer à l'amélioration du procédé de séchage pour une essence feuillue fortement utilisée dans la filière : le hêtre (*Fagus sylvatica*).

Le travail réalisé, présenté dans ce manuscrit, est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre est dédié à une révision de la littérature allant des aspects fondamentaux vers la pratique industrielle de ce type de conduite de séchage. Le deuxième chapitre présente les résultats des expériences réalisées au niveau semi – industriel. Dans le troisième chapitre, la réflexion se tourne vers une étude théorique pour essayer de comprendre les transferts de masse (par une approche analytique d'abord, puis par une approche numérique) et la réponse mécanique dans l'épaisseur de la planche lors d'un séchage oscillant. L'étude théorique des transferts de masse nous a permis ensuite de proposer des conduites oscillantes, testées expérimentalement et présentées dans le quatrième chapitre. Enfin nous concluons ce manuscrit en dressant un bilan du travail présenté suivi d'une confrontation des résultats expérimentaux avec ceux issus de la simulation numérique qui nous mènent aux perspectives de ce travail.

Chapitre 1: Séchage du bois soumis à des conditions climatiques oscillantes, du fondamental à l'appliqué

Le séchage est une étape essentielle de la transformation du bois. Il lui confère les caractéristiques indispensables à une utilisation rationnelle et performante : pérennisation des éléments structuraux par l'amélioration des caractéristiques mécaniques, stabilité dimensionnelle en conditions d'emploi, amélioration de la résistance fongique et aux attaques d'insectes, amélioration de l'aptitude au collage et à la réception des finitions. Néanmoins, si les procédés industriels de séchage induisent des modifications souhaitées des produits, ils ont aussi des conséquences secondaires, souvent moins bien connues, sur les qualités mécaniques de ceux – ci. En effet, au cours du séchage, une pièce de bois est le siège de gradients d'humidité évolutifs qui, en raison du retrait, induisent un champ de contraintes au sein du matériau. Il en résulte l'apparition de défauts de séchage, parfois rédhibitoires pour l'utilisation envisagée.

Le niveau de contraintes internes générées pendant le séchage dépend du comportement différé du matériau bois, celui – ci dépendant à son tour des conditions de température et de teneur en eau. Une bonne connaissance du comportement différé du matériau bois, particulièrement dans le plan transverse (radial – tangentiel), devrait apporter une meilleure compréhension des états de sollicitations mécaniques évolutifs que subit la matière au cours du séchage et permettrait de dégager des indications susceptibles d'être intégrées dans les tables de conduite de séchage, en vue de rechercher une qualité optimale des produits.

Ce chapitre dédié à la revue de la littérature comporte d'abord une description de l'essence retenue pour cette étude, soit le hêtre (*Fagus sylvatica*). Ensuite sont développées les principales caractéristiques du matériau bois, notamment la relation eau – bois, le comportement mécanique et particulièrement le comportement mécanosorptif. A la fin du chapitre, sont développés le contexte industriel du séchage du bois ainsi que le principe et l'historique de conduites oscillantes de séchage.

1.1. Matériel végétal étudié

Parmi les essences couramment séchées artificiellement en France, les feuillus sont généralement plus difficiles et plus longs à sécher que les résineux. L'essence retenue pour cette étude est le hêtre (*Fagus sylvatica*), de la famille des Fagacées. En volume, le hêtre est la deuxième essence française séchée artificiellement, après le chêne. C'est en outre, l'essence des régions tempérées qui se déforme le plus sous l'effet des contraintes de séchage. En effet, le bois de hêtre se place dans la catégorie des bois à fort retrait selon la norme NF B 51002. Le US Forest Product Laboratory classe ce bois dans la catégorie de « bois réfractaires » qui demande une manipulation délicate au séchage (Boone et al, 1993). Cette essence semble donc bien adaptée pour étudier la capacité des conduites oscillantes à améliorer la qualité du séchage.

La teneur en eau du bois sur pied de cette essence se situe entre 80% et 110%. En ce qui concerne ses caractéristiques physiques, le retrait moyen est de 6% en direction radiale, 12% en direction tangentielle et 18% en retrait volumique (Aléon et al, 2001). D'après ces valeurs, le bois de hêtre se place dans la catégorie des bois à fort retrait selon la norme NF B 51002. Le US Forest Product Laboratory donne quelques recommandations pour le séchage de cette essence, notamment pour le séchage convectif des sciages, en fortes épaisseurs pour lequel il préconise l'application d'un produit aux extrémités des planches pour empêcher un séchage trop rapide à ces endroits. En outre, le

séchage à haute température est fortement déconseillé. Il s'agit donc d'un bois susceptible de développer des contraintes de séchage très élevées entraînant l'apparition de défauts rédhibitoires pour une utilisation industrielle optimale.

Venet et Keller (1986) décrivent de façon détaillée les principales caractéristiques anatomiques du bois de hêtre. Du point de vue anatomique, le hêtre est un bois homogène. Les cernes sont caractérisés par la présence d'une zone de fibres aplaties et à parois épaisses, sur le bord extérieur de la zone de bois final. La largeur des cernes varie selon la provenance ainsi que la taille et le pourcentage de vaisseaux. Parfois, les vaisseaux sont plus concentrés au début de la zone de bois initial que dans le reste du cerne. Les rayons ligneux sont rectilignes mais d'épaisseurs diverses. En section radiale, ils donnent des mailles très apparentes, en raison de leur couleur, mais aussi à cause de leurs hauteurs inégales. En section tangentielle, les rayons ligneux donnent des petites plages lenticulaires de hauteurs et épaisseurs diverses, visibles à l'œil nu. Les pores sont nombreux (plus de 250/10mm^2) bien que ce nombre varie très sensiblement selon la station et le traitement sylvicole. Il n'y a pas de groupements ni d'alignement précis des pores. Il s'agit donc d'une essence à pores diffus (Figure 1.1). Cela a été primordial pour le choix de l'essence à étudier. Grâce aux pores diffus, la section transversale est homogène et donc sans différences de porosité entre le bois d'été et le bois de printemps. Cela nous a permis d'utiliser des échantillons de petites dimensions, comme cela sera développé au chapitre 4.

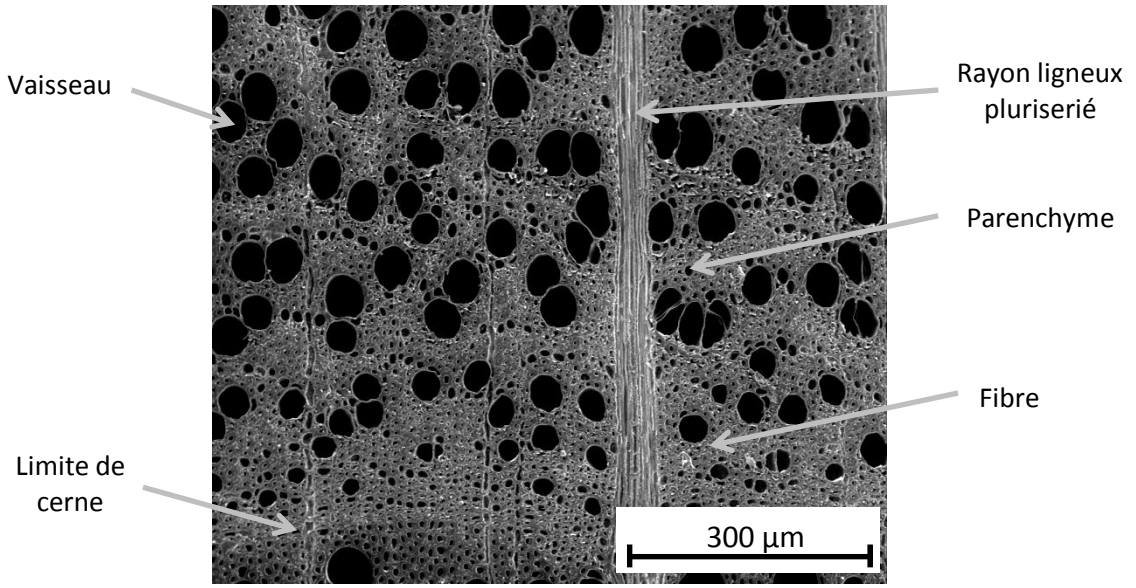


Figure 1.1. Coupe transversale de hêtre (*Fagus sylvatica*) observée au microscope électronique (image ESEM Huber, 2004)

En ce qui concerne la couleur, le bois de hêtre n'a pas d'aubier distinct. La couleur est variable suivant les provenances : blanc – crème, blanc – jaunâtre, rosâtre et même rougeâtre, en dehors de toute altération. Parfois, il présente un faux duramen fortement coloré en rouge foncé, ayant un contour en étoile ou en auréoles.

La masse volumique à 12% d'humidité est très variable selon les provenances : classes 5, 6, 7, 8 et même 9 ; correspondant respectivement à des valeurs comprises entre 500 et 600 kg.m^{-3}, 600 et 700 kg.m^{-3}, 700 et 800 kg.m^{-3}, 800 et 900 kg.m^{-3}, et 900 et 1000 kg.m^{-3}, les provenances méditerranéennes étant les plus lourdes et les plus dures ; les bois les plus légers et les plus tendres

venant de plateaux calcaires de l'est de la France. En ce qui concerne les caractéristiques mécaniques, le Tableau 1.1 récapitule les valeurs données par plusieurs auteurs. En outre, les bénéfices apportés par le séchage à l'air libre pour certaines propriétés mécaniques du bois de hêtre sont présentés dans le Tableau 1.2.

Les utilisations du bois de hêtre ont évolué dans le temps (Armand et Ningre, 2002). Longtemps considérée comme une essence de second rang, elle était utilisée principalement comme bois de chauffage vers la fin du XIXème siècle alors que de nos jours elle se place au rang des feuillus dits « nobles ». Actuellement, la majorité des volumes de bois d'œuvre de hêtre sont employés dans l'industrie de l'ameublement (intérieur et extérieur), de la menuiserie intérieure et du parquet flottant. Le hêtre est aussi utilisé par l'industrie papetière en mélange avec d'autres feuillus, et dans la fabrication de panneaux de fibres ou de particules. Grâce à ses bonnes aptitudes à l'usinage, le hêtre est aussi couramment utilisé pour l'emballage en contreplaqué et dans la fabrication d'un grand nombre d'objets de la vie courante (petits meubles de rangement, boutons de porte, jouets, petits ustensiles de cuisine, manches d'outils de jardin, queues de billard, abaisse – langue, bâtonnets de crèmes glacées).

Le hêtre est une des essences feuillues les plus présentes en France, occupant une surface uniquement dépassée par la surface occupée par le chêne. Avec une production annuelle de 342 000 m^3 de sciages (Agreste, 2010), elle est largement demandée par les industriels. Le choix du hêtre comme matériel d'étude pour cette thèse est donc tout à fait justifié.

Tableau 1.1. Données bibliographiques des caractéristiques mécaniques du bois de hêtre.

Masse volumique humide ($kg.m^{-3}$)	Teneur en eau (%)	Coefficients de déformation									Source
		s_{22} (10^{-3} MPa^{-1})	s_{33} (10^{-6} MPa^{-1})	s_{11} (10^{-3} MPa^{-1})	$s_{23} = s_{32}$* (10^{-3} MPa^{-1})	$s_{12} = s_{21}$* (10^{-3} MPa^{-1})	$s_{13} = s_{31}$* (10^{-3} MPa^{-1})	s_{55} (10^{-3} MPa^{-1})	s_{66} (10^{-3} MPa^{-1})	s_{44} (10^{-3} MPa^{-1})	
740	10,5	0,862	71,4	0,438	0,0370	0,310	0,0320	0,610	2,150	0,929	Keylwerth (1951)**
570	12	1,475	76,5	0,763	-	-	-	0,987	3,926	1,326	Bodig et Jayne (1982)
630	9,4	1,153	70,9	0,490	0,0329	0,356	0,0259	0,540	2,000	1,020	Guitard (1987)

*Les valeurs de ces coefficients sont négatives.

**Adapté de Kollmann et Côté 1968.

Tableau 1.2. Rapport entre les valeurs des propriétés mécaniques du bois d'hêtre séché à l'air et les valeurs à l'état vert.
(D'après Popper, R. cité par Tsoumis, G. 1991)

Propriété mécanique	Rapport entre les valeurs de bois séché à l'air et les valeurs à l'état vert (% d'augmentation)
Traction parallèle au fil	34,0%
Compression parallèle au fil	63,2%
MOR	43,1%
MOE	22,8%
Cisaillement	38,5%
Dureté parallèle au fil	45,4%
Dureté perpendiculaire au fil	41,0%

1.2. Relation eau-bois

Pour comprendre le séchage du bois et proposer des améliorations, il est important de bien connaître le matériau bois, particulièrement sa relation avec l'eau. S'agissant d'un matériau hygroscopique, le bois échange en continu de l'humidité avec son environnement.

1.2.1. L'eau dans le bois

Le bois est un tissu végétal dont les parois cellulaires sont constituées principalement de trois types de macromolécules : cellulose, hémicellulose et lignine. Le vide à l'intérieur de chaque cellule, le lumen, confère au matériau un caractère poreux. L'eau présente dans le bois peut être retenue dans les parois cellulaires ou dans les lumens. En général, on distingue les molécules d'eau retenues dans le bois sous trois formes : celles liées au niveau monomoléculaire, qui ne peuvent pas être éliminées et qui forment *l'eau de constitution* ; celles sorbées à titre polymoléculaire dans les parois cellulaires et qui constituent *l'eau liée* ; et enfin celles retenues dans les lumens cellulaires par action de forces de capillarité, qui constituent *l'eau libre*.

La **teneur en eau** du bois est le rapport entre la masse d'eau contenue dans une pièce de bois et la masse de bois. Cette dernière peut s'exprimer sur base sèche, celle utilisée dans le cadre de ce travail, ou sur base humide ainsi :

$$X_{base\,sèche} = \frac{m_{eau}}{m_{bois\,anhydre}} = \frac{m_{bois\,humide} - m_{bois\,anhydre}}{m_{bois\,anhydre}} \tag{1.1}$$

$$X_{base\,humide} = \frac{m_{eau}}{m_{bois\,humide}} = \frac{m_{bois\,humide} - m_{bois\,anhydre}}{m_{bois\,humide}} \tag{1.2}$$

La masse anhydre est obtenue après un séjour dans une étuve à 103°C jusqu'à stabilisation de la masse. Par convention, un séjour de 24 heures est considéré suffisant pour atteindre l'état anhydre. L'utilisation d'une formule ou de l'autre dépend de la filière. Généralement la première est utilisée pour le bois d'œuvre tandis que la deuxième est utilisée pour le bois énergie et la filière papetière. Ainsi, la teneur en eau utilisée dans cette étude est celle sur base sèche, notée *X* dans la suite du manuscrit.

Le séchage du bois consiste à enlever la totalité de l'eau libre et une partie de l'eau liée de façon à atteindre une teneur en eau finale compatible avec l'utilisation ultérieure. Lors du séchage, l'évacuation de l'eau libre contenue dans les cavités cellulaires précède localement l'évacuation de l'eau liée des parois cellulaires. Lorsque les parois cellulaires du bois sont saturées d'eau liée tandis que les cavités cellulaires sont dépourvues d'eau libre, le bois atteint une teneur en eau caractéristique appelée **point de saturation de fibres** (PSF). Cette teneur en eau correspond à une valeur d'environ 30% à 20°C, et diminue de 0,1% par °C d'augmentation de la température (Siau, 1984). Toute teneur en eau comprise entre le PSF et l'état anhydre correspond au domaine hygroscopique du bois. En séchage, une pièce de bois peut avoir des zones ayant atteint le PSF pendant que d'autres contiennent encore de l'eau libre. La notion de point de saturation des fibres est donc une information locale de l'humidité de la planche.

Le bois étant un matériau hautement hygroscopique, il tend vers un équilibre de teneur en eau avec l'air qui l'entoure, en lui restituant ou en lui prenant de la vapeur d'eau. Cet équilibre se manifeste par une teneur en eau particulière, la **teneur en eau d'équilibre** (X_{eq}), laquelle est fonction principalement de la température de l'air et de la pression de vapeur, mais aussi de l'histoire des variations d'humidité comme on le verra plus tard.

1.2.2. Le retrait du bois

Dans le domaine hygroscopique, c'est-à-dire une teneur en eau du bois entre l'état anhydre et le PSF, les échanges d'humidité entre le bois et l'air ambiant provoquent des modifications dans les propriétés physiques et mécaniques du bois. En général, les changements d'humidité provoquent des gonflements ou des retraits selon le sens de la variation de la teneur en eau (adsorption ou désorption), et ceux – ci affectent les caractéristiques mécaniques du bois.

En séchage, la teneur en eau du bois diminue progressivement. Dans le domaine hygroscopique, cela s'accompagne d'une diminution de l'épaisseur de la paroi cellulaire. Ces retraits microscopiques se traduisent à l'échelle d'une pièce de bois par la réduction des dimensions de la pièce de bois et donc de la surface d'échange avec l'environnement, et aussi par le développement de contraintes internes pouvant entraîner l'apparition de déformations et de fentes.

De plus, l'agencement cellulaire et la composition pariétale du bois de l'arbre sont tels que le matériau présent des hygrovariations orthotropes. La direction tangentielle est celle avec le plus fort retrait, suivie de la direction radiale. Le retrait en direction longitudinale est très faible. Cette anisotropie de retrait est à l'origine des déformations des pièces de bois observées à la fin de l'opération de séchage.

1.2.3. Isothermes de sorption et hystérésis

Tel que mentionné auparavant, le bois s'équilibre en humidité avec l'air qui l'entoure. La teneur en eau d'équilibre du bois dépend de la pression de vapeur et de la température de l'air. Pour une température donnée, l'**isotherme de sorption** est la courbe donnant la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative de l'air. Il existe un grand nombre de formulations physiques ou mathématiques de sorption pour interpoler les points expérimentaux ainsi que des tables, diagrammes ou graphiques tel que celui présenté dans la Figure 1.2.

La teneur en eau d'équilibre est affectée par l'hystérésis de sorption, selon laquelle la valeur de X_{eq} obtenue en désorption est supérieure à celle obtenue en adsorption (Figure 1.3). Ainsi, l'histoire des variations d'humidité d'une pièce de bois est soumise à l'effet de l'hystérésis de sorption. En d'autres termes, à une température donnée, et pour une même humidité relative de l'air, une pièce de bois peut s'équilibrer à différentes valeurs de X_{eq} selon qu'elle est en désorption ou en adsorption.

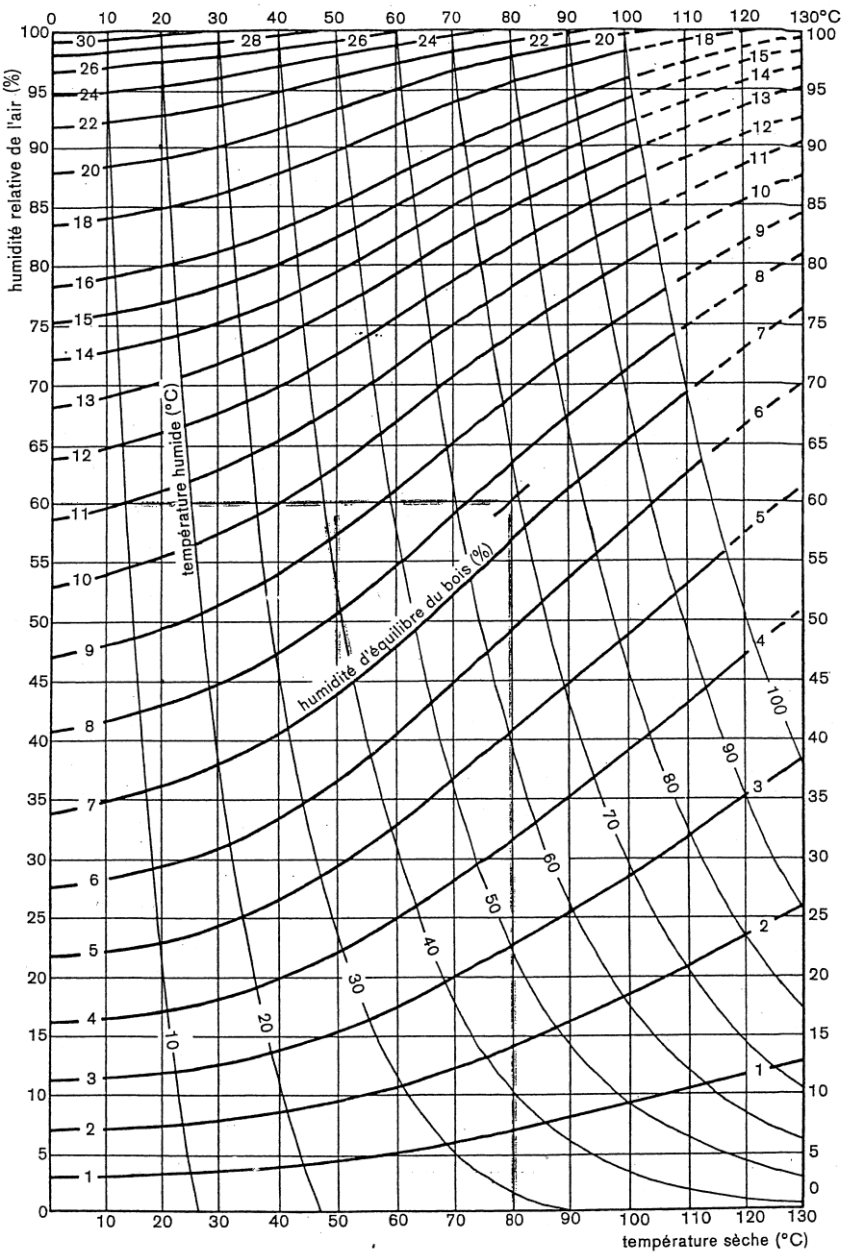


Figure 1.2. Isothermes de sorption du bois (Keylwerth, 1969, tiré de Aléon et al, 2001)

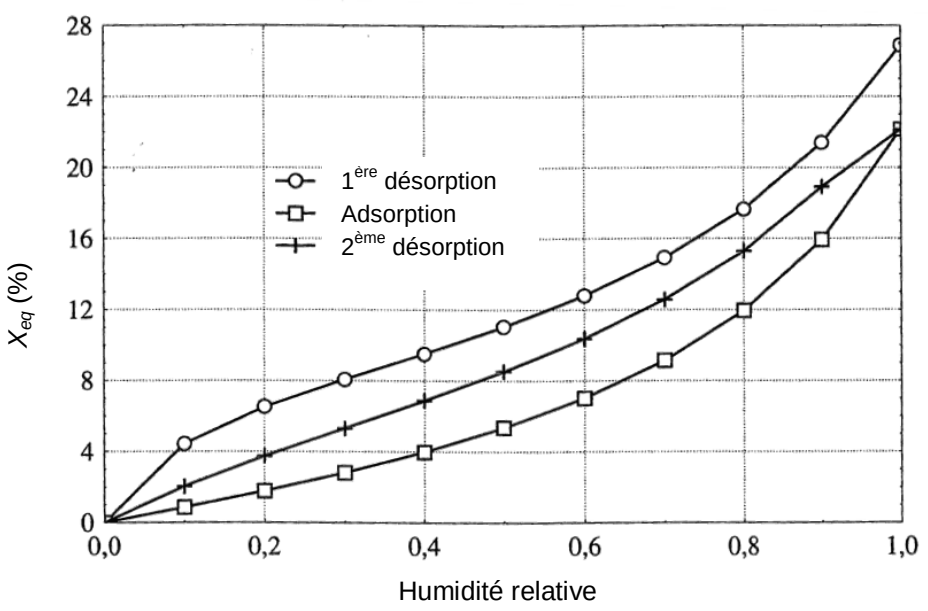


Figure 1.3. Hystérésis de sorption (adapté de Babiak, 2007 dans Perré, 2007)

Lorsque le milieu n'est pas en équilibre hygroscopique avec son environnement, un champ hétérogène d'humidité apparaît dans le matériau induisant des flux d'humidité pour revenir à l'état d'équilibre. Différent phénomènes de transport apparaissent comme la migration capillaire dans le domaine de l'eau libre et la diffusion de vapeur et d'eau liée dans le domaine hygroscopique. La surpression de la phase gazeuse peut être utilisée pour accélérer les transferts internes (séchage sous vide, séchage haute température, etc.). Nous renvoyons le lecteur désireux d'avoir plus d'informations sur les mécanismes de transferts de masse intervenant au cours du séchage du bois aux ouvrages de Siau 1984, Skaar 1988, Perré 2007.

1.3. Le comportement mécanique du bois

1.3.1. Orthotropie du bois

Afin d'étudier le comportement mécanique du bois, et particulièrement l'élasticité, on peut assimiler le volume d'une tige de bois à un cylindre constitué d'une succession de couches cylindriques concentriques correspondant aux accroissements annuels, ainsi que des rayons ligneux orientés perpendiculairement à l'axe longitudinal de la tige. Cet arrangement cellulaire confère à la tige une symétrie orthotrope cylindrique. En tout point de la tige, on distingue deux plans de symétrie (RL et TR) où les directions orthotropes sont les directions naturelles du bois, soit longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T) (Figure 1.4). Cette symétrie orthotrope cylindrique se reflète sur la plupart des propriétés physiques et mécaniques du bois.

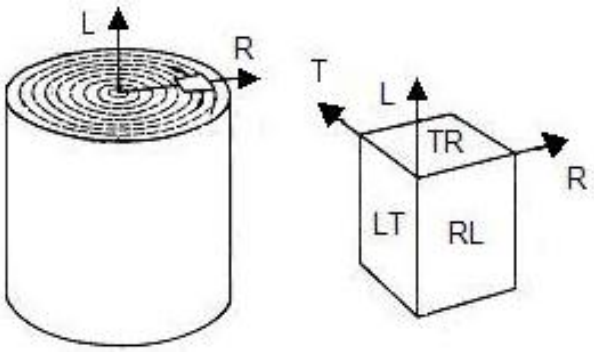


Figure 1.4. A gauche : Système cylindrique; à droite : éprouvette orientée selon les axes de symétrie (adapté de Kollmann et Côté, 1968)

1.3.2. Elasticité orthotrope

La déformation élastique d'un objet est une déformation instantanée et récupérable lorsque l'on retire la sollicitation. Dans la gamme de petites déformations, l'élasticité du matériau peut-être linéaire, c'est à dire que la déformation élastique reste proportionnelle à la sollicitation.

La loi de Hooke généralisée est utilisée pour exprimer le comportement mécanique élastique linéaire :

$$\{\varepsilon\} = [S]\{\sigma\} \tag{1.3}$$

où ε représente la déformation, S la complaisance élastique et σ la contrainte. Cette relation entre la déformation et la contrainte peut aussi s'écrire en notation tensorielle :

$$\varepsilon_{ij} = S_{ijkl}\sigma_{kl} \quad avec\, i, j, k, l \in (1,2,3) \tag{1.4}$$

Dans cette relation, la convention de sommation sur les indices répétés est convenue. Le tenseur de complaisance élastique ainsi obtenue donne 81 composantes qui ne sont pas linéairement indépendantes. Dans le but de faciliter certaines exploitations numériques, on remplace souvent la notation tensorielle par une notation matricielle :

$$\varepsilon_\alpha = S_{\alpha\beta}\sigma_\beta \quad avec\, \alpha,\beta \in (1,2,...6) \tag{1.5}$$

où [S] est la matrice de complaisance élastique avec ε et σ qui définissent les composantes du vecteur déformation et contrainte respectivement :

$$\begin{aligned} \{\varepsilon\} &= \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4, \varepsilon_5, \varepsilon_6\}^T \\ \{\sigma\} &= \{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6\}^T \end{aligned} \tag{1.6}$$

Pour le matériau bois, si on considère comme axes orthotropes les axes naturels du bois (L, T, R), la matrice des complaisances est donnée par :

$$[S] = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_R} & -\frac{\nu_{TR}}{E_T} & -\frac{\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & -\frac{\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{RL}}{E_R} & -\frac{\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{bmatrix} \tag{1.7}$$

où l'on distingue les modules d'élasticité ou modules de Young (*E*) correspondant aux axes R, T et L, les modules de cisaillement ou modules de Coulomb (*G*) correspondant aux plans RL, TL et RT et les coefficients de Poisson (ν). Cette matrice est symétrique pour un matériau orthotrope comme le bois :

$$\frac{\nu_{RT}}{E_R} = \frac{\nu_{TR}}{E_T}, \quad \frac{\nu_{RL}}{E_R} = \frac{\nu_{LR}}{E_R}, \quad \frac{\nu_{TL}}{E_T} = \frac{\nu_{LT}}{E_L} \tag{1.8}$$

Ainsi, seul neuf paramètres suffissent à caractériser les propriétés élastiques : E_R, E_T, E_L, G_{RL}, G_{TL}, G_{RT}, ν_{RL}, ν_{TR}, ν_{TL}.

Les valeurs de ces paramètres sont propres à chaque espèce de bois. Le module de Young parallèle au fil, soit en direction longitudinale, est beaucoup plus fort que ceux perpendiculaires au fil, la direction tangentielle étant plus faible que la direction radiale :

$$E_L >> E_R > E_T \tag{1.9}$$

Ce comportement anisotrope tient compte de l'arrangement cellulaire du bois (Guitard, 1987). Les fibres et les trachéides constituent des éléments de renforcement suivant leur grand axe, elles sont enrobées par une matrice plus souple constituée par la lamelle mitoyenne. Ainsi, puisque la majorité des fibres sont orientées suivant l'axe de la tige de bois, cela va conférer un renforcement fibreux dans la direction longitudinale et par conséquent un module de Young plus élevé. Les cellules

constituant les rayons ligneux induisent un renforcement dans le sens radial par rapport au sens tangentiel. Sous un effort tangentiel, les fibres longitudinales et les rayons ligneux sont sollicités perpendiculairement aux grands axes des cellules, ce qui donne un module tangentiel plus faible.

De leur côté, les coefficients de Poisson sont généralement ordonnés ainsi :

$$\nu_{RT}>\nu_{LT}>\nu_{LR}\approx\nu_{TR}>>\nu_{RL}>\nu_{TL} \quad (1.10)$$

Alors que les modules de cisaillement sont ordonnés de la manière suivante (Guitard, 1987) :

$$G_{LR}>G_{TL}>>G_{RT} \quad (1.11)$$

Quelques ouvrages récapitulent la valeur des paramètres élastiques pour les feuillus et résineux les plus utilisés (Bodig et Jayne, 1982 ; Guitard, 1987). Ici nous répertorions uniquement les valeurs moyennes des coefficients de Poisson et des modules de cisaillement pour les feuillus et résineux d'après Guitard (1987) (Tableau 1.3 et Tableau 1.4).

Tableau 1.3. Ordre de grandeur des coefficients de Poisson (d'après Guitard 1987).

	$\rho_{12\%}^{*}$ (kg/m^3)	ν_{TR}	ν_{TL}	ν_{RL}	ν_{RT}	ν_{LR}	ν_{LT}
Feuillus	650	0,67	0,46	0,39	0,38	0,048	0,033
Résineux	450	0,51	0,43	0,39	0,31	0,030	0,020

* Masse volumique à 12% de teneur en eau.

Tableau 1.4. Ordre de grandeur des modules de Coulomb (d'après Guitard 1987).

	$\rho_{12\%}^{*}$ (kg/m^3)	G_{TL} (MPa)	G_{LR} (MPa)	G_{TR} (MPa)	G_{LR}/G_{TR}	G_{TL}/G_{TR}
Feuillus	650	971	1260	366	3,4	2,6
Résineux	450	745	862	83,6	10,3	8,9

* Masse volumique à 12% de teneur en eau.

Les propriétés élastiques sont affectées principalement par la teneur en eau ainsi que par la masse volumique du bois. Egalement, la température peut avoir une influence (Tsoumis, 1991). Ici, nous nous intéressons particulièrement à l'effet de la teneur en eau. Nombreux sont les travaux consacrés à l'étude de l'influence de la teneur en eau sur les propriétés élastiques du bois (Siimes, 1967 ; Goulet et Ouellet, 1968 ; Gerhards, 1982 ; Hernández et Bizoň, 1994 ; entre autres). Ils montrent qu'au dessous du point de saturation des fibres, une diminution de la teneur en eau entraîne une augmentation de la rigidité du bois, en raison des changements au niveau de la paroi cellulaire (Figure 1.5). Lors d'une perte d'humidité, la paroi cellulaire devient beaucoup plus compacte puisque la masse de substance ligneuse dans un volume donné augmente.

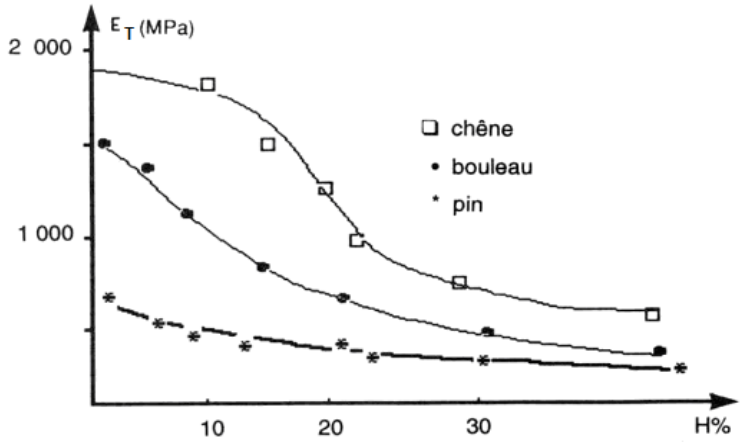


Figure 1.5. Variation du module d'Young E_T en fonction de la teneur en eau (d'après Pluvinage 1992).

Parmi les travaux à ce sujet, deux nous semblent particulièrement intéressants. Le premier est celui de Siimes (1967) portant sur une vaste étude expérimentale de deux résineux et un feuillu. Le résultat le plus important fut le fait que l'effet de l'humidité sur les constantes élastiques présente une bonne corrélation avec la masse volumique globale du bois. Les bois denses seraient plus sensibles que les bois légers aux variations de la teneur en eau. Le deuxième est plutôt une synthèse des résultats expérimentaux des divers auteurs présentée par Gerhards (1982). Bien que les méthodologies employées dans chacun de ces travaux soient différentes, l'analyse a dévoilé que l'effet de la teneur en eau n'est pas le même sur toutes les propriétés élastiques. Notamment, parmi les modules de Young, celui en direction tangentielle semble le plus sensible aux variations de teneur en eau, alors que celui en direction longitudinale semble le moins sensible.

1.3.3. Comportement différé à humidité constante

Dans le domaine élastique linéaire, la déformation apparaissant au moment de la charge est instantanément récupérable au moment de la décharge. Néanmoins, lorsque les contraintes sont maintenues dans le temps, le comportement mécanique ne peut plus être expliqué par l'élasticité. La déformation résultante de l'application d'une contrainte évolue au cours du temps. En effet, à la déformation instantanée (élastique) qui apparaît lors de l'application d'une contrainte, s'ajoute une déformation différée croissante. Cette déformation différée, appelé fluage, peut largement dépasser la déformation élastique et joue un rôle décisif dans la relaxation de contraintes liées au retrait du bois. Dans le contexte du séchage du bois cela est très important. Notamment, en absence du fluage le séchage du bois provoquerait inévitablement des fissurations sévères (voir par exemple les calculs de Ranta – Maunus et Kortesmaa cités par Hanhijärvi dans Perré, 2007).

Lorsque cette déformation différée se produit à humidité constante, il s'agit du fluage viscoélastique. A humidité variable, il s'agit du fluage mécanosorptif que nous décrirons plus tard. Le fluage viscoélastique apparaît donc en raison du maintien d'une contrainte dans le temps. Lorsque la contrainte cesse, il y a une recouvrance instantanée, puis une recouvrance différée, qui peut être totale ou partielle (Figure 1.6). Si la recouvrance instantanée est totale, cela indique qu'il n'y a pas eu de déformation plastique au cours de l'application de la contrainte. Cette déformation différée est dépendante surtout du temps, mais il est aussi dépendant de la contrainte, de l'histoire du matériau

(l'historique des déformations précédentes), de l'histoire d'humidité et de la température, sans oublier l'effet très important de l'anisotropie du matériau bois (Hanhijärvi et Hunt, 1998, Navi et Heger, 2005).

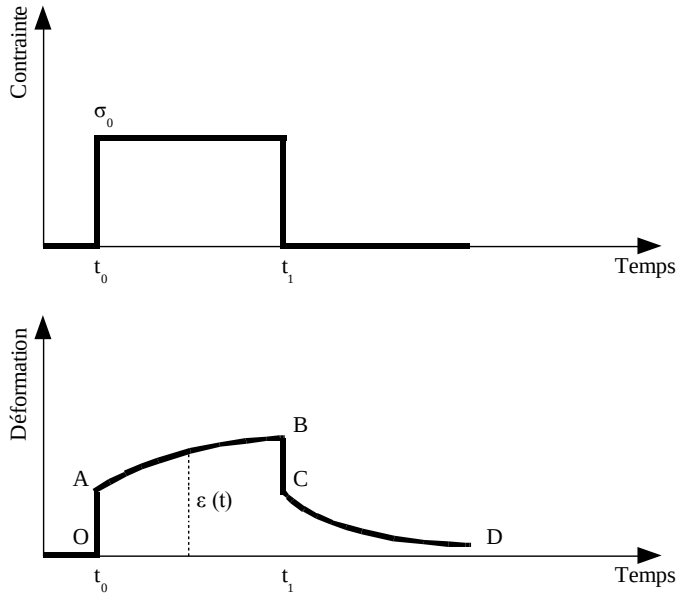


Figure 1.6. Evolution de la déformation d'un échantillon de bois soumis à une contrainte constante sur l'intervalle de temps [$t_0 - t_1$]: OA: déformation instantanée; AB: déformation différée; BC: recouvrance instantanée et CD: recouvrance différée (d'après Navi et Heger, 2005).

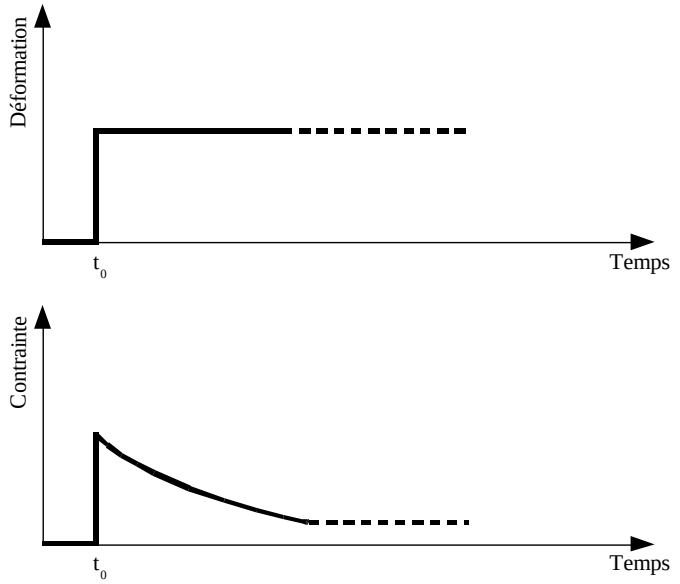


Figure 1.7. Evolution de la contrainte appliquée à un échantillon de bois pour maintenir une déformation constante (d'après Bodig, et Jayne, 1982).

Le fluage viscoélastique peut se caractériser aussi au moyen d'un essai de relaxation définie comme la contrainte nécessaire pour maintenir une déformation constante avec le temps. Dans ce cas, la contrainte est décroissante (Figure 1.7).

Théoriquement et d'un point de vue mécanique, le comportement viscoélastique du bois signifie que les contraintes développées sont fonction tant de la déformation que de la vitesse de déformation.

D'un point de vue anatomique, le fluage viscoélastique s'explique par la nature multi polymérique des parois cellulaires. En effet, les parois cellulaires sont constituées principalement de trois polymères : la cellulose, les hémicelluloses et la lignine. Les chaînes de cellulose, organisées en microfibrilles, constituent une structure de grande résistance mécanique qui est enveloppée des autres substances, lignine et hémicelluloses essentiellement, fonctionnant comme une matrice. Cette matrice a les caractéristiques d'un matériau dont l'état est intermédiaire entre l'état solide et l'état liquide, avec une teneur en eau élevée et un grand potentiel de déformation plastique. Lors d'une sollicitation mécanique, les microfibrilles se déforment d'une façon élastique produisant ainsi une déformation instantanée des fibres. Si la sollicitation se maintient dans le temps, la lignine et les hémicelluloses de la matrice sont aussi affectées : les composantes de la matrice fluent de manière continue. Si la déformation des microfibrilles dépasse la résistance au fluage de la matrice de lignine et des hémicelluloses, la déformation plastique se produit. Quand la sollicitation s'arrête, toute l'énergie élastique accumulée dans les microfibrilles se libère d'une façon similaire à un ressort. Les microfibrilles retrouvent leur position originale. Pourtant, ce processus est retardé par les caractéristiques visqueuses de la matrice de lignine et des hémicelluloses. En outre, il peut y avoir une portion de l'énergie viscoélastique qui n'est pas récupérée puisque le mouvement de composants visqueux de la matrice peut s'associer à une petite perte d'énergie sous forme de chaleur. Cela implique la rupture de liaisons chimiques en raison de la nouvelle disposition des microfibrilles et des pertes dues aux frictions entre les microfibrilles et la matrice. En conséquence, la configuration initiale des microfibrilles et de la matrice ne se rétablit pas complètement. Ainsi, il se produit une déformation permanente (irrécouvrable). En plus, la teneur en eau et la température peuvent plastifier les composants de la matrice et réduire sa viscosité, ce qui fait diminuer les frictions entre les microfibrilles et la matrice, favorisant ainsi la vitesse de déformation (Ananias 2004).

Quelques modèles rhéologiques ont été développés pour modéliser le comportement viscoélastique. Parmi les modèles de type Maxwell, Kelvin et Burger, celui de Kelvin semble le mieux adapté pour interpoler les courbes expérimentales (Haque et al. 2000). Le modèle de Kelvin (Figure 1.8) est constitué d'un ressort associé en parallèle à un amortisseur. Chaque élément de Kelvin est caractérisé par sa complaisance (J) et sa constante de temps (τ) :

$$J = \frac{1}{E} \tag{1.12}$$

$$\tau = \frac{\eta}{E} \tag{1.13}$$

où E est le module d'élasticité et η la viscosité.

Ainsi, le comportement viscoélastique du bois au cours d'un essai de fluage peut être reconstitué en associant en série n éléments de Kelvin (J_i,η_i) avec i = 1 à n (Figure 1.8).

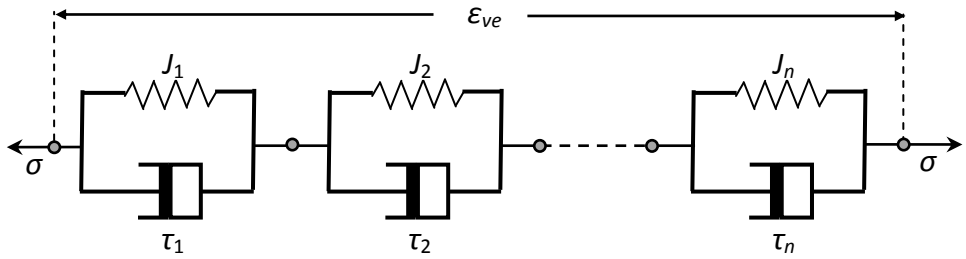


Figure 1.8. Représentation viscoélastique du fluage viscoélastique par *n* éléments de Kelvin associés en série.

Le fluage viscoélastique est dépendant de la température et de la teneur en eau. En effet, il faut tenir compte de la nature multi polymérique de la paroi cellulaire. Chaque polymère à sa propre température de transition vitreuse qui est fonction de la teneur en eau. La température de transition vitreuse diminue fortement avec l'augmentation de la teneur en eau. A titre d'exemple, nous pouvons citer quelques valeurs de la température de transition vitreuse d'après Guitard (1987) et Gril (1997) :

- pour les lignines : entre 130 et 195°C à l'état anhydre, et 60°C à 15% d'humidité
- pour les hémicelluloses : entre 150 et 220°C à l'état anhydre, et 20°C à 60% d'humidité

Ainsi, la distribution des temps de relaxation et des activations thermiques est très large.

Pour exprimer l'effet de la température dans l'activation thermique du fluage viscoélastique, on peut utiliser une loi de type Arrhénius (Mauget, 1996; Perré et Aguiar, 1999; Perré et Passard, 2004), selon laquelle une augmentation de la température accélère le fluage viscoélastique dans une mesure quantifiée par une énergie d'activation :

$$\tau_n = \tau_n^{T_{ref}} . \exp\left[\frac{\Delta W_n}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \tag{1.14}$$

où R est la constante de gaz parfaits, ΔW_n est l'énergie d'activation apparente (J/mol), T_{ref} est une température de référence en Kelvin (293°K), $\tau_n^{T_{ref}}$ est le temps caractéristique à T_{ref}, et T est la température (°K).

1.3.4. Comportement différé à humidité variable

Jusqu'ici, nous avons décrit le comportement différé du bois à humidité constante. Pourtant, lors du séchage la teneur en eau va évoluer dans le temps. L'ajout d'une variation de la teneur en eau à une pièce de bois soumise à une sollicitation maintenue dans le temps produit une déformation supplémentaire : le fluage mécanosorptif. Puisque nous consacrons une section entière au comportement mécanosorptif du bois, nous nous limiterons ici à définir l'effet mécanosorptif comme le couplage entre une contrainte mécanique et la variation de la teneur en eau du bois (Grossmann, 1976).

1.3.5. Plasticité

Par plasticité, on entend la déformation irrécouvrable qu'un matériau subit lorsque sa limite élastique est dépassée. Néanmoins, dans le cas du bois, une partie de cette déformation est partiellement réversible. Il serait donc plus juste de parler d'une « plasticité apparente ». En effet, le comportement purement plastique, que l'on retrouve dans les métaux, est définie comme une déformation plastique irréversible à condition de ne pas modifier le module d'élasticité en charge-décharge. Dans le cas du bois, cela n'est pas vrai puisque le module d'élasticité en décharge diminue. Il s'agit en fait d'un endommagement et d'une plasticité apparente. La déformation permanente résultante est la conséquence d'un endommagement structurel ou d'une dégradation chimique des constituants du bois (Navi et Heger, 2005).

1.4. Le comportement mécanosorptif du bois

1.4.1. Définition

A humidité constante, le comportement différé du bois peut être expliqué par le comportement viscoélastique. Néanmoins, lorsque l'humidité évolue dans le temps, la viscoélasticité ne peut plus expliquer à elle seule la déformation différée croissante. Lorsque le bois est soumis simultanément à une contrainte et à une variation de la teneur en eau au-dessous du point de saturation de fibres, l'effet de mécanosorption est observé (Figure 1.9).

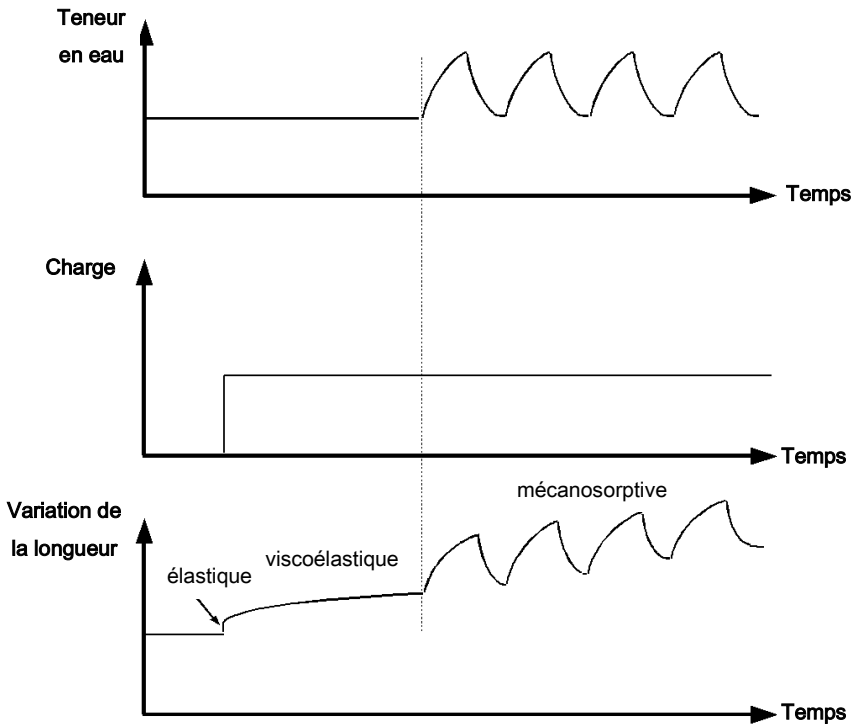


Figure 1.9. Comportement mécanosorptif du bois (d'après Perré, P. 2007).

L'effet mécanosorptif est un phénomène de couplage important entre les variations d'humidité et la déformation mécanique (Navi, P. et al. 2002). Il s'agit donc d'un couplage hydromécanique. La nature de l'effet mécanosorptif dans un matériau est similaire à celle du fluage viscoélastique sauf en ce qui concerne le mécanisme déclencheur. Dans le cas de la mécanosorption, il s'agit du changement cumulatif de la teneur en humidité locale plutôt que du temps. La mécanosorption est ainsi une déformation additionnelle qui ne peut pas être attribuée à une simple superposition de la déformation élastique, du retrait libre ou du fluage dans des conditions de température et humidité constantes (Muszyński et al., 2005).

D'après Gril (1988), l'effet mécanosorptif était déjà connu par des chercheurs japonais depuis les années quarante (Takeyama, 1944). Muszyński (2005) cite les travaux de Perkitny dans les années cinquante sur la « pression de gonflement » du bois. La mécanosorption fut ensuite définie comme l'effet produit par le changement de la teneur en eau dans le fluage de poutres en bois (Amstrong et Kingston 1960, Schniewind 1968). Plus tard, dans les années soixante-dix, elle fut reconnue comme un phénomène indépendant (Grossman, 1976). Grossman présente alors l'effet mécanosorptif comme un phénomène de couplage dont l'explication et la modélisation constituent un défi pour la communauté scientifique. Au cours des années, plusieurs modèles mathématiques et plusieurs descriptions qualitatives détaillées basées sur des recherches expérimentales ont été proposés. Ce qui semble clair est que la magnitude de la déformation mécanosorptive dépend du niveau de contrainte appliquée et qu'elle augmente avec le changement cumulatif de teneur en eau. Cependant, de nombreuses caractéristiques du mécanisme fondamental de la mécanosorption restent à éclaircir et sa caractérisation expérimentale représente un vrai challenge.

Parmi les caractéristiques de l'effet mécanosorptifs nous pouvons cités les principales (Grosmman, 1976 ; Hoffmeyer et Davidson, 1989) :

- Chaque cycle désorption – adsorption augmente la déformation mécanosorptive. Pourtant l'effet de cette dernière sur la déformation totale (retrait libre inclus) est dissymétrique entre l'adsorption et la désorption pour une sollicitation en flexion ou en compression (Figure 1.10). Pendant les phases de désorption la déformation totale augmente. Par contre, pendant l'adsorption la réponse du matériau est plus complexe. En effet, la première adsorption fait augmenter la déformation totale, alors que les adsorptions suivantes produisent une recouvrance de cette dernière pour des contraintes faibles ou modérées. Dans le cas des contraintes élevées, les phases d'adsorption augmentent la déformation totale.

- La déformation mécanosorptive serait virtuellement indépendante du temps et influencée seulement par la magnitude des variations d'humidité en dessous du point de saturation de fibres. Bien que cela ait été démontré dans les travaux de Pittet (1996, cité par Randriambololona, 2003), cette hypothèse reste difficile à vérifier expérimentalement. Gril (1988) souligne que des essais effectués avec un taux de variation d'humidité important risquent d'entraîner l'apparition d'un champ hétérogène d'humidité car la diffusion dans la matière ligneuse n'est pas instantanée. Au contraire, des essais trop longs risquent d'activer la viscoélasticité de façon non négligeable. Dans ce dernier cas il y aurait une contribution des deux types de fluage (viscoélastique et mécanosorptif) dans la réponse mesurée.

- La déformation mécanosorptive pure, corrigée des variations dimensionnelles liées au retrait, augmente quel que soit le sens des variations d'humidité. La Figure 1.11 représente la construction d'une trajectoire mécanosorptive lors d'un essai de fluage. Dans cette représentation, le temps est éliminé car il n'intervient plus que comme paramètre de la trajectoire.

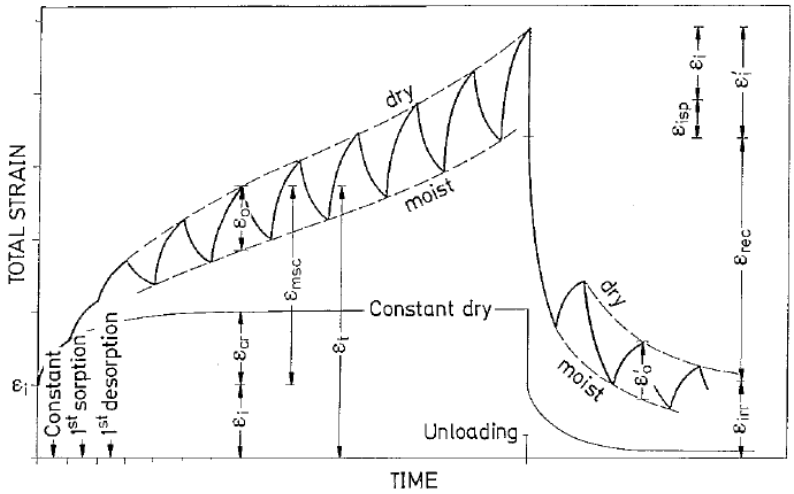
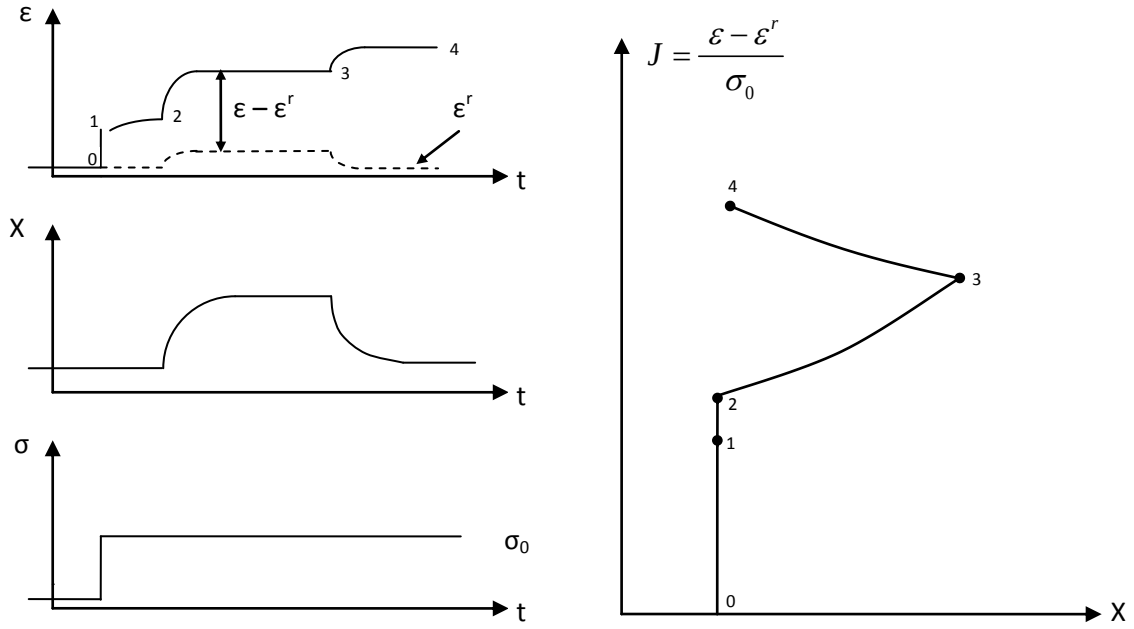


Figure 1.10. Courbe typique de l'effet mécanosorptif en flexion ou compression (d'après Hoffmeyer et Davidson, 1989)



a. b.

Figure 1.11. Construction d'une trajectoire mécanosorptive. a. *Représentation temporelle* : déformation totale (ε) et déformation liée au retrait (ε^r), taux d'humidité (X) et contrainte σ en fonction du temps (t). b. *Trajectoire associée* : complaisance J (déformation diminuée du retrait rapportée à la contrainte appliquée σ_0) en fonction du taux d'humidité X (d'après Gril, 1988).

A ces trois caractéristiques principales, on peut ajouter :

- L'augmentation de la déformation d'un bois initialement à l'état saturé est beaucoup plus importante que celle d'un bois initialement sec.
- A humidité constante les déformations restent figées. Après le déchargement et la recouvrance élastique instantanée, il reste une proportion plus ou moins forte de la déformation totale qui ne se recouvre pas. Cette déformation résiduelle diminue progressivement avec des cycles de variation de l'humidité, les phases d'adsorption permettant plus de recouvrance que les phases de désorption.
- Un gradient d'humidité constant entraînant un transfert continu des molécules d'eau mais sans modification locale des concentrations d'eau lorsque le régime permanent est atteint, ne produit aucun effet mécanosorptif.
- La déformation mécanosorptive semble être linéaire jusqu'à 15-20% de la contrainte de rupture à court terme. D'après les travaux de Hunt (1989), la limite de linéarité de la déformation mécanosorptive du bois de hêtre se situe entre 20% et 30% de la contrainte à la rupture en traction, et entre 12% et 38% en flexion.

Dans le cadre du séchage du bois, où les planches subissent des contraintes liées au retrait (en conséquence du gradient d'humidité dans leur épaisseur) en même temps que des variations locales de la teneur en eau, le fluage mécanosorptif peut atténuer ces contraintes. Tenant compte du fait que ces contraintes sont à l'origine des défauts rédhibitoires pouvant entrainer le rebut des avivés, l'activation de la mécanosorption s'avère intéressante.

1.4.2. Explications possibles

L'explication de la mécanosorption pourrait se trouver dans la structure de la paroi cellulaire, tout particulièrement dans la couche S2 de la paroi secondaire. Mukudai et Yata (1986) proposent un mécanisme de délamination ou décollement de la paroi, alors que Hoffmeyer et Davidson (1989) attribuent le comportement mécanosorptif du bois aux microfissures ou « plans de glissement » de la couche S2. Toutefois cette dernière proposition serait valable seulement dans les cas d'une déformation modérée à élevée en compression ou flexion longitudinale.

Le mécanisme de décollement de la paroi de Mukudai et Yata (1986) se base sur les différences de retrait de couches constituant la paroi cellulaire. On suppose l'existence de deux blocs dans la paroi (Figure 1.12) : d'une part il y a le bloc A constitué par les couches S3 et S2 de la paroi secondaire (S2+S3) et d'autre part le bloc B constitué par la couche S1, la paroi primaire et la lamelle mitoyenne (S1+P+LM). A l'état humide, l'adhérence entre les deux blocs est assurée par le gonflement de S2 qui frotte contre S1. A l'état sec, les deux blocs sont partiellement décollés mais demeurent solidaires grâce aux liaisons hydrogènes. En effet, au fur et à mesure que la teneur en eau diminue, la couche S2 rétrécit et le bloc A se désolidarise partiellement du bloc B produisant une redistribution de contraintes dans la paroi. La contrainte est reportée du bloc A (sec) vers le bloc B (humide). Toutefois, cette désolidarisation est transitoire puisque une reprise d'humidité produira le gonflement de la couche S2, et ainsi la friction entre les deux blocs. Cette hypothèse a été l'objet d'une modélisation constituée de deux sous – modèles, un pour chaque bloc, que nous décrirons plus tard.

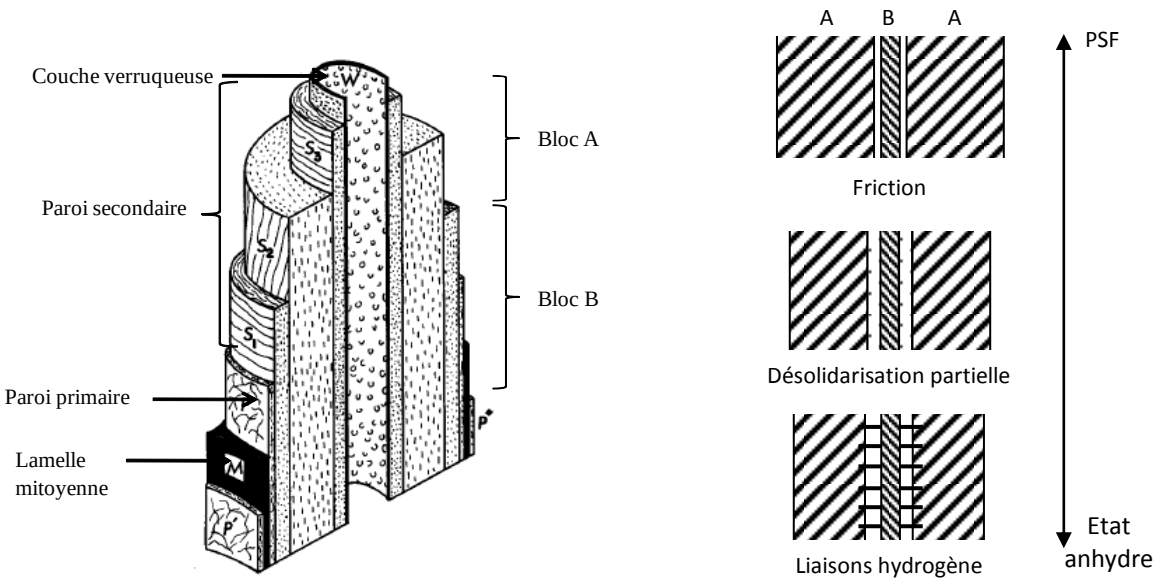


Figure 1.12. A gauche : structure de la paroi cellulaire et blocs pris en compte pour le mécanisme de Mukudai. A droite : mécanisme de décollement (adapté de Siau, 1984 et Gril, 1988).

Pour Hoffmeyer et Davidson (1989), le comportement mécanosorptif s'expliquerait par l'apparition de microfissures dans la paroi cellulaire produites par les contraintes. Cela est pourtant valide uniquement pour des contraintes de compression ou flexion dans le sens longitudinal. A l'intérieur de ces microfissures, appelées « plans de glissement », l'angle des microfibrilles de la couche S2 est considérablement modifié. Par conséquent, les propriétés mécaniques et physiques qui en résultent sont également modifiées : le module d'élasticité diminue et le retrait augmente. Il s'agit en effet, du glissement d'une partie de la couche S2 par rapport aux zones environnantes qui restent « en place » (Figure 1.13). Le glissement se traduit par une réorientation de l'angle des microfibrilles. La quantité de plans de glissement est fonction du niveau de contrainte, de la teneur en eau et de la durée de chargement. En effet, même à humidité constante les plans de glissement apparaissent à partir d'une contrainte égale à 50% de la contrainte de rupture, mais ils se formeraient davantage lorsqu'il y a des variations d'humidité et à des niveaux de contraintes bien plus faibles qu'à humidité constante. Plus la variation de l'humidité sera importante, plus il y aura des plans de glissement et plus le retrait sera augmenté (alors que le coefficient de gonflement est de l'ordre de 0,01% dans un bois libre des plans de glissement, il augmente à 0,06% en leur présence). La modification résultante des propriétés élastiques, viscoélastiques et plastiques est ainsi proportionnelle aux variations d'humidité.

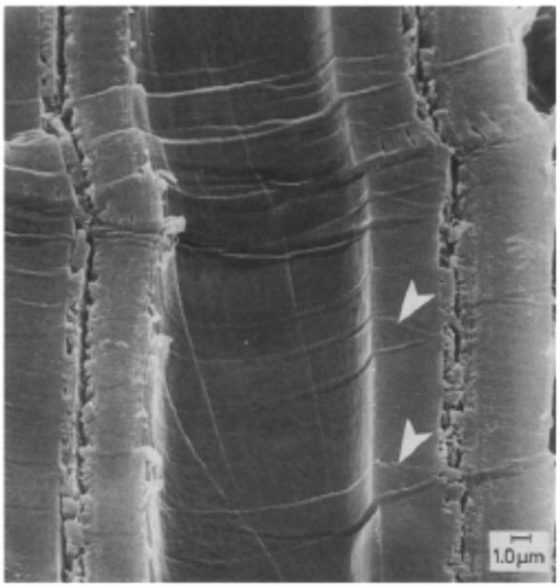


Figure 1.13. Image MEB des plans de glissement dans un test de compression d'épicéa (*Picea abies*). Les flèches indiquent la localisation de deux plans de glissement de la couche S2 (d'après Hoffmeyer et Davidson, 1989).

Enfin, nous rajouterons les observations de Hunt (1986) sur l'effet de l'angle des microfibrilles de la couche S2. Lors des essais de flexion en humidité variable sur des échantillons de pin ponderosa (*Pinus ponderosa*) et de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*), il a observé une complaisance instantanée et différée bien plus élevées pour ce dernier. Puisque ces deux espèces ont des masses volumiques voisines, l'explication de cette différence résiderait dans l'angle des microfibrilles de la couche S2 qui est nettement plus fort pour le pin sylvestre. Ainsi, un angle élevé entraîne non seulement une complaisance instantanée plus grande, mais aussi une complaisance différée (mécanosorptive) également plus grande.

1.4.3. Modélisation

Les efforts pour modéliser le comportement mécanosorptif du bois ont débuté dans les années soixante-dix. Grossman (1976) notamment, liste les caractéristiques qu'un tel modèle devrait posséder. Plus tard, plusieurs modèles phénoménologiques ont été proposés. Ils sont basés sur des observations macroscopiques de la mécanosorption. Ici nous ferons une synthèse de ces modèles. Néanmoins, il faut préciser que la modélisation de la mécanosorption au niveau microscopique demeure à ce jour un défi pour la communauté scientifique.

Randriambolona (2003) établit une synthèse des modèles existant dans la littérature. Ces modèles sont basés sur deux hypothèses concernant l'interaction entre le fluage viscoélastique et le fluage mécanosorptif. On distingue ainsi deux types de modèles : à activation indépendante et à activation combinée.

- **Modèles à activation indépendante**

Ils considèrent le fluage viscoélastique et le fluage mécanosorptif indépendantes. La déformation différée totale est ainsi :

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{ve} + \varepsilon^{ms} + \varepsilon^{r} + \varepsilon^{r\sigma} \tag{1.15}$$

où ε^{e} est la déformation élastique instantanée, ε^{ve} la déformation viscoélastique, ε^{ms} la déformation mécanosorptive, ε^{r} la déformation due au retrait libre et $\varepsilon^{r\sigma}$ la déformation due à l'influence de la contrainte sur le retrait libre. Chacune de ces déformations peut être mesurée indépendamment.

Depuis le premier modèle proposé par Leicester (1971), différents modèles ont été suggérés (Ranta – Maunus, 1975 ; Salin, 1992 ; Martensson et Svensson, 1997a, b ; Hanhijarvi, 2000 ; Svensson et Toratti, 2002). Il s'agit de modèles de type Maxwell et Kelvin qui se différencient par leur comportement à la recouvrance. Les modèles de type Kelvin permettent une recouvrance totale de la déformation mécanosorptive après déchargement. Au contraire, pour les modèles de type Maxwell une partie de la déformation mécanosorptive reste irrécouvrable après déchargement. En outre, le modèle de type Kelvin admet un ralentissement du fluage mécanosorptif vers une valeur limite après quelques cycles d'humidité (Salin, 1992), tandis que pour les modèles de type Maxwell il n'existe pas de limite (Ranta – Maunus, 1975).

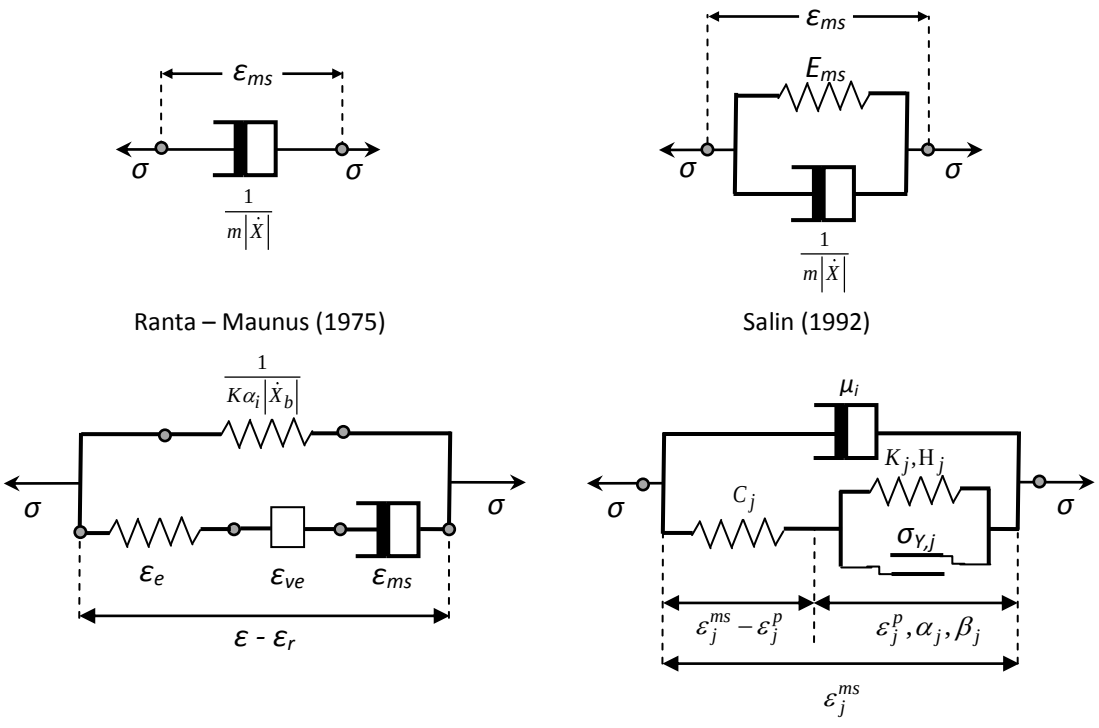


Figure 1.14. Représentations rhéologiques de quelques modèles mécanosorptifs.

La Figure 1.14 représente schématiquement quelques modèles rhéologiques. Nous nous sommes intéressés particulièrement aux modèles de Ranta – Maunus (1975) et de Salin (1992). Le premier

suggère un coefficient mécanosorptif (*m*) qui prend des valeurs m^+ ou m^{++} pour une adsorption et m^- pour une désorption, la valeur de m^{++} étant réservée à la première adsorption. Salin introduit la notion d'une limite mécanosorptive (E_{ms}) définie comme une constante liée à la déformation mécanosorptive maximale que le matériau peut atteindre pour une contrainte donnée. Pour être utilisé, le modèle requiert la connaissance au minimum de deux paramètres (une seule direction matérielle, sans effets +, ++ et -). En revanche, d'autres modèles notamment ceux de Martensson et Svensson (1997a, b) et Hanhijärvi et al. (2001) sont plus difficiles à vérifier en raison de la plus grande difficulté à identifier expérimentalement les nombreux paramètres pris en considération et qui peuvent être fonction de la température, de la teneur en eau et de l'essence entre autres.

- **Modèles à activation combinée**

Ils considèrent une forte interaction entre le fluage viscoélastique et le fluage mécanosorptif, les déformations dues à l'effet du temps et celles dues aux variations d'humidité sont donc couplées :

$$\varepsilon^{tot} = \varepsilon^{e} + \varepsilon^{ve+ms} + \varepsilon^{r} + \varepsilon^{r\sigma} \tag{1.16}$$

où ε^{ve+ms} est la déformation viscoélastique indissociable de la déformation due aux variations d'humidité. Le modèle à hydro – verrous proposé par Gril (1988) suggérait le couplage entre les deux fluages. Cette hypothèse semble confirmée par les travaux de Hanhijärvi et Hunt (1998), et plus récemment par Navi et al. (2002) et Randriambolona (2003), Montero et al. (2011).

D'après une révision des modèles existants, à activation indépendante ou combinée, la loi constitutive de la mécanosorption à prendre en compte devrait faire intervenir le taux d'humidité et surtout ses variations. Un modèle de loi de comportement adéquate rendant compte des effets mécanosorptifs, qui intègre diverses propositions antérieures (Bazant, 1985 ; Ranta-Maunus, 1975), suppose l'existence d'un état limite et prend en compte la valeur absolue de la vitesse de variation du taux d'humidité comme facteur d'activation des cinétiques des mécanismes de comportement différés évoqués par ailleurs. Les autres paramètres du modèle pouvant être des fonctions du taux d'humidité actuel. Dans ces conditions, la cinétique du $n^{ième}$ maillon d'une chaîne de modèles rhéologiques du type Kelvin est définie de la façon suivante :

$$\dot{\varepsilon}_m^n = \frac{(J^n \sigma - \varepsilon_m^n)}{\tau^n} \tag{1.17}$$

expression dans laquelle σ est le niveau de contrainte, J^n est la complaisance du $n^{ième}$ maillon (éventuellement fonction de la température et du taux d'humidité), $\dot{\varepsilon}_m^n$ et ε_m^n sont respectivement la part de déformation mécanique et la vitesse de déformation associées, et τ^n la constante de temps.

La constante de temps $\tau^n = \tau^n(T, X, |\dot{X}|)$ est supposée fonction de la température *T*, de la teneur en eau *X* et de la vitesse de variation de la teneur en eau $\dot{X}$ (Joyet, 1992) :

$$\tau^n(T, X, \frac{dX}{dt}) = \tau^n(X, T_0) \frac{\exp\left(\frac{\Delta W^n}{R}\right)\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}{1 + \beta^n \left|\dot{X}\right|} \quad (1.18)$$

Dans cette expression :

- L'activation thermique est caractérisée par l'énergie d'activation ΔW^n (R est la constante de gaz parfaits).
- L'activation hydrique est traduite par une forme hyperbolique de la mobilité hydrique $\left|\dot{X}\right|$, (valeur absolue de la vitesse de variation de la teneur en eau $\dot{X}$), pondérée par un paramètre β^n. Ceci signifie que la modélisation traduira une activation du processus de comportement différé dès que l'élément de matière considéré subira un changement de la teneur en eau, qu'il s'agisse d'un séchage (désorption) ou d'une reprise d'humidité (adsorption).

Un tel modèle de comportement, associée aux modèles de transferts de chaleur et de masse bidimensionnelles développés par ailleurs permettent le calcul des états de contraintes qui se développent dans un avivé en cours de séchage.

1.4.4. Approches expérimentales

L'utilisation d'un modèle de comportement mécanosorptif du bois nécessite la mesure des paramètres le définissant, identification qui constituent un véritable challenge. En absence d'un protocole expérimental normalisé, la comparaison des données disponibles dans la littérature s'avère compliquée. Les données concernent peu d'essences et la plupart du temps, elles sont obtenues avec des méthodologies très sophistiquées et gourmandes en temps (Muszyński, 2005).A cela, il faut rajouter la variabilité naturelle du matériau bois et la difficulté à obtenir des échantillons similaires entre eux (Hunt, 1986).

D'après Muszyński (2005), une approche expérimentale cohérente devrait mesurer l'effet mécanosorptif à une échelle locale, dans un volume homogène, sous une sollicitation mécanique élémentaire (traction ou compression) tout en permettant de dissocier les différents types de déformation (retrait libre, déformation élastique instantanée, déformation différée viscoélastique et mécanosorptive). Dans le cas du bois cela restreint la taille des échantillons, l'épaisseur devant être assez fine pour minimiser le gradient d'humidité et donc le gradient de retrait. Idéalement, l'épaisseur devrait correspondre à la direction longitudinale afin de favoriser les transferts de masse. La dissociation des différentes déformations impose l'exécution de plusieurs essais avec des échantillons provenant de la même génératrice dans l'arbre. Cet auteur suggère aussi d'explorer des possibles corrélations entre l'effet mécanosorptif et des propriétés physiques ou mécaniques faciles à mesurer expérimentalement (masse volumique, retrait libre, propriétés élastiques) et de présenter la déformation mécanosorptive sous la forme des trajectoires mécanosorptives en fonction de la teneur en eau.

Ci – après nous présentons une synthèse non exhaustive des quelques travaux abordant la caractérisation expérimentale de la mécanosorption à l'échelle macroscopique. Les premières études expérimentales sur l'effet mécanosorptif ont été menées au Japon pendant les années quarante par Takeyama (cité par Gril, 1988). Dans les années cinquante, en Pologne, Perkitny (cité par Muszyński, 2005) s'intéresse à la « pression de gonflement » du bois, alors que le chercheur japonais Susuki (cité par Gril, 1988) étudie le fluage de poutres en humidité variable. Dès le début des années soixante, de nombreux chercheurs s'intéressent au sujet utilisant notamment des tests de flexion avec des échantillons sollicités en direction longitudinale (Armstrong et Christensen, 1961 ; Armstrong et Kingston, 1962 ; Hearmon et Paton, 1964 ; Bethe, 1969 ; Raczkowski, 1969), des tests de compression en direction tangentielle (Perkitny, 1965), ou des tests de traction en direction tangentielle (Schniewind, 1966). Dans cette période, Gril (1988) cite également les travaux de Takemura (1966, 1967, 1968) sur les propriétés plastiques du bois en relation avec les variations d'humidité.

Plus tard, dans les années soixante-dix, pendant que Perkitny et ses collègues (1972) s'intéressent au tuilage de planches soumises au séchage et re-humidifiées, Armstrong (1972) continue ses travaux désormais en compression, Ranta – Maunus (1973) étudie le comportement de placages en flexion et en cisaillement, et Hunt (1979) commence ses recherches sur le fluage mécanosorptif de hêtre en traction. Ce même auteur continue de façon intensive ses travaux expérimentaux pendant les années quatre – vingt (Hunt, 1982, 1984, 1986, 1989 ; Hunt et Shelton, 1988). Ses recherches sur le hêtre (*Fagus sylvatica*), le pin (*Pinus ponderosa*) et le pin sylvestre (*Pinus ssylvestris*) sollicités en flexion, traction et/ou compression, dont les résultats sont présentés sous forme de trajectoires mécanosorptives, ont démontré l'existence d'une limite du fluage mécanosorptif et l'influence de l'angle de microfibrilles de la couche S2 sur le fluage mécanosorptif (un angle plus élevé favorise le fluage mécanosorptif). Aussi, il a mis en évidence une probable corrélation entre les propriétés mécanosorptives et élastiques et a étudié la linéarité et la non linéarité de la mécanosorption par rapport au niveau de contrainte. Dans cette même période, on peut citer également les travaux de Gril (1988) qui s'intéresse à la recherche expérimentale de « l'état d'équilibre » défini comme la déformation atteinte et n'évoluant plus, en fonction de la contrainte. Il étudie le bois d'épicéa au moyen de la procédure « multi paliers » : application de paliers de chargement et plusieurs cycles d'humidité pendant chaque palier. Pour cela, Gril a utilisé un dispositif de fluage en flexion et a aussi étudié la non linéarité par rapport à la contrainte appliquée.

Pendant les années quatre-vingt-dix, Hunt a poursuivi ses travaux (1997) sur le bois d'épicéa (*Picea abies*) sollicité en traction. Il a exploré l'interaction du fluage mécanosorptif avec les changements dimensionnels dus au retrait. Il a également étudié l'interaction entre le fluage viscoélastique et le fluage mécanosorptif en collaboration avec Hanhijärvi (1998). Cette étude, utilisant du bois de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sollicité en flexion quatre points, a mis en évidence un effet d'interaction faible mais significatif : le fluage mécanosorptif diminue le taux de fluage viscoélastique. Il est probable que l'interaction existe aussi dans le sens inverse, soit le taux du fluage mécanosorptif affecté par le fluage viscoélastique, mais cela reste difficile à démontrer expérimentalement. A ces travaux durant cette période, on peut ajouter quelques études ayant pour objectif la mesure expérimentale de la déformation mécanosorptive pendant le séchage du bois. On peut citer notamment Wu et Milota (1994, 1995, 1996), qui ont utilisé une caméra numérique pour enregistrer le déplacement de deux points repérés dans chaque échantillon et ensuite calculer la déformation, ainsi que les travaux de Rice et Youngs (1990) et Svensson (1995).

Plus récemment, nous pouvons citer les recherches de Toratti et Svensson (2000, 2002) qui se sont intéressés au comportement mécanosorptif du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) sollicité perpendiculairement au sens des fibres. En effet, la plupart des travaux expérimentaux se sont concentrés sur la direction axiale (longitudinale) et très peu sur les directions transversales. Les échantillons ont été sollicités en traction ou en compression et la mesure des déplacements s'est faite à l'aide de capteurs type LVDT. Dans un premier temps les tests comportent un seul cycle d'humidité. Ils ont mesuré une déformation mécanosorptive cinq fois supérieure à la déformation élastique. De plus, la déformation serait affectée surtout par l'amplitude de la variation de l'humidité plutôt que par les valeurs d'humidité atteintes. Aussi, ils suggèrent que la déformation viscoélastique peut être négligée, sa valeur étant très petite par rapport à la déformation mécanosorptive et le retrait libre. Dans un deuxième temps les tests comportent plusieurs cycles d'humidité. Dans cette configuration, la déformation mécanosorptive mesurée a été dix fois supérieure à la déformation élastique et a augmenté lorsque le bois a atteint des teneurs en eau jamais atteintes auparavant. Enfin, une partie de la déformation reste irrécouvrable.

Dans cette période, nous pouvons citer également les travaux de Muszyński et al. (2002) sur le bois d'épicéa (*Picea rubra*). A partir des essais de fluage en traction en humidité constante et variable sur des échantillons jumelés, ils ont mesuré la déformation à l'aide d'une technique de corrélation d'images numériques (la déformation est calculée à partir du déplacement des cibles posées sur les échantillons, enregistré par une caméra numérique de haute résolution). L'avantage de cette méthodologie de mesure sans contact est donné par la simplification de la manipulation des échantillons et le gain de temps qui en résulte, ce qui est important lorsque les échantillons ont une teneur en eau très différente de celle des conditions ambiantes. Egalement, nous pouvons mentionner les travaux de Navi et al (2002) sur des échantillons très fins (0,7 mm d'épaisseur, dans la direction radiale) de pin maritime (*Pinus pinaster*) sollicités en traction. Les résultats ont confirmé l'existence d'une limite dans la déformation mécanosorptive, tel qu'avancé auparavant (Hunt, 1989) et suggèrent une indépendance entre viscoélasticité et mécanosorption contrairement aux observations de Hanhijärvi et Hunt (1998).

Dans une approche plus proche de la pratique industrielle, Hanhijärvi (2000) a étudié le fluage mécanosorptif pendant le séchage à haute température (95 – 125°C) pour deux essences : épicéa (*Picea abies*) et pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). D'après ses résultats, le fluage viscoélastique serait non négligeable uniquement pendant la première phase de séchage lorsque la teneur en eau est encore élevée. Au fur et à mesure que la teneur en eau diminue, le fluage mécanosorptif devient de plus en plus important favorisé par l'augmentation de la température. Aussi, Bengtsson (2001) a étudié le fluage mécanosorptif de planches d'épicéa d'une section de 45 mm x 70 mm, sollicités en flexion quatre points et soumis à des cycles d'humidité d'une durée de 4 semaines. Le fluage mécanosorptif obtenu lors de la première variation de l'humidité s'est avéré le plus important. De plus, le fluage obtenu après le premier cycle semble un bon indicateur du fluage obtenu avec des cycles supplémentaires.

Cette synthèse non exhaustive reflète la complexité de la caractérisation expérimentale de la mécanosorption. Par ailleurs, la validité de ces travaux au cas du séchage du bois n'est pas certaine au vu de la large plage de température, d'humidité et de sollicitation vu par le matériau. En effet, pendant le séchage le gradient d'humidité au sein de l'échantillon produit un champ de contrainte

hétérogène (traction – compression) évoluant tout au long du procédé. En parallèle à cela, la température plus élevée peut thermoactiver les comportements viscoélastique et mécanosorptif et l'hydroactivation diminue tout au long du séchage.

1.5. Le séchage du bois et l'utilisation de conduites oscillantes

Le séchage du bois consiste à évacuer l'eau contenue dans le matériau jusqu'à atteindre une teneur en eau compatible avec l'usage final du bois. L'évacuation de l'eau, généralement sous forme de vapeur, nécessite un apport énergétique qui peut être de type conductif, convectif, radiatif ou par agitation moléculaire. Il s'agit donc d'un procédé où les transferts de masse et de chaleur sont couplés, à la fois dans le milieu poreux et dans la masse d'air qui l'entoure, et amènent le produit vers son équilibre hygroscopique.

Dans l'industrie de la transformation du bois, le séchage du bois est une étape essentielle car il confère au matériau des caractéristiques indispensables à une utilisation rationnelle et performante : stabilité dimensionnelle, amélioration des caractéristiques mécaniques, préservation aux attaques biologiques, aptitude au collage et à recevoir des finitions (Aléon et al, 2001).

Toutefois, il s'agit d'un procédé délicat et complexe en raison des mécanismes physiques et mécaniques qui entrent en jeu. La Figure 1.15 explique schématiquement les différentes phases de séchage avec l'évolution du gradient de teneur en eau dans l'épaisseur d'une planche et le champ de contraintes qui en résulte.

Le procédé débute par une première phase où l'eau évacuée est l'eau libre. La vitesse de séchage est maximale et constante, la température du bois est égale à la température humide de l'air et le front d'évaporation est en surface. Dans cette phase, il ne se produit, en principe, aucune déformation dimensionnelle sensible (retrait) du matériau. Pendant la deuxième phase, le front d'évaporation pénètre à l'intérieur du matériau, la température du bois augmente. Le front d'évaporation est alimenté par l'eau liquide du cœur, et l'eau migre ensuite par diffusion au sein de la couche sèche. La vitesse de séchage diminue ainsi au fur et à mesure de l'augmentation de l'épaisseur de la couche sèche, et l'écart entre la température sèche de l'air et celle du bois se réduit. Dans cette phase, le gradient d'humidité fait apparaître via le retrait un champ hétérogène de contraintes : le retrait en périphérie entraîne des contraintes de traction, alors que le cœur, par équilibre mécanique, entre en compression. Enfin, pendant la troisième phase il n'y a plus d'eau sous forme liquide dans le bois. Il ne reste que de l'eau liée sous forme de vapeur. La vitesse de séchage continue de diminuer et devient nul lorsque l'équilibre est atteint. Dans cette phase le retrait concerne toute l'épaisseur de la planche. Néanmoins, les contraintes se sont inversées : la périphérie est désormais en compression pendant que le cœur est en traction.

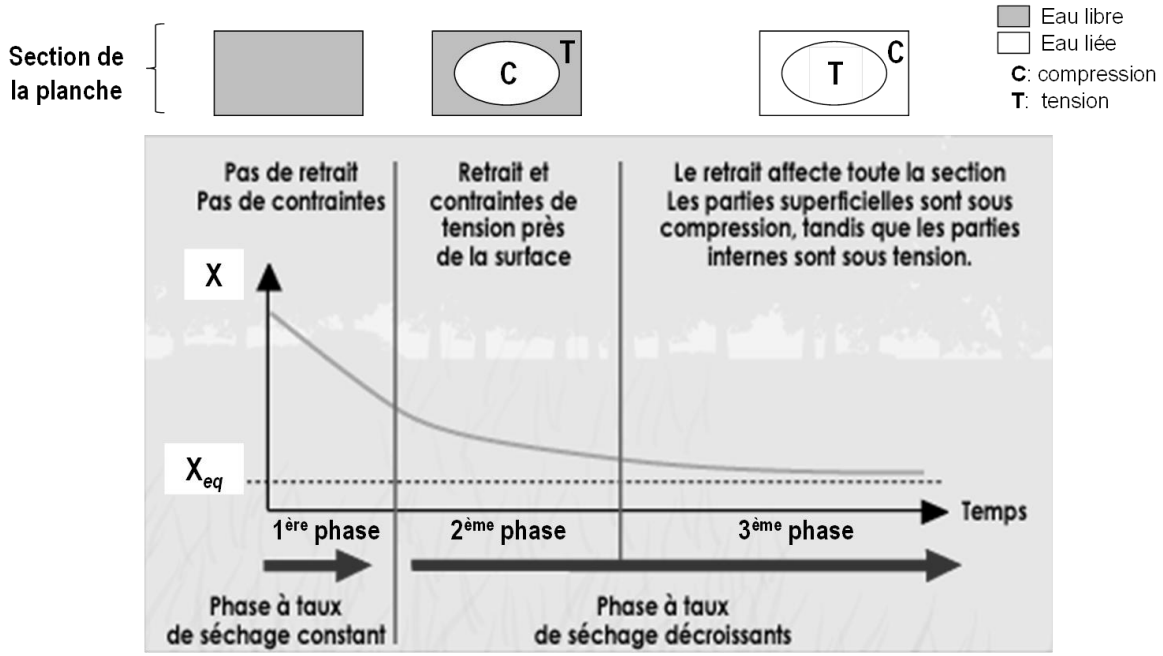


Figure 1.15. Schéma du séchage du bois : évolution du gradient de teneur en eau et du champ des contraintes au cours des trois phases de séchage.

L'apparition des contraintes mécaniques au sein de la planche en raison du gradient d'humidité, et leur inversion au cours du procédé, sont à l'origine de divers défauts de séchage. La maîtrise du procédé de séchage s'avère ainsi essentielle pour minimiser les défauts pouvant être rédhibitoires pour une utilisation industrielle optimale.

Cette dernière partie de la révision de la littérature est dédiée à une description succincte de la pratique industrielle du séchage en France et du principe et de l'historique des conduites oscillantes de séchage.

1.5.1. Pratique industrielle du séchage du bois : une vue d'ensemble

En milieu industriel le séchage du bois est pratiqué sous deux formes : le séchage à l'air libre, encore très répandu dans l'industrie du bois, et le séchage artificiel. Ce dernier concerne seulement 25% de la production française de sciages (Chanrion, 2006) probablement en raison des forts investissements nécessaires à l'installation d'un séchoir. Néanmoins, ce pourcentage devrait atteindre environ 53% en 2016 pour deux motifs. D'abord, en raison de l'augmentation de la production de sciages tel que préconisé par le Grenelle de l'Environnement de 2007 (de 9,9 millions de m^3 par an en 2007 elle devra augmenter à 12 millions de m^3 par an dès 2012). Et aussi, en raison des réglementations européennes qui fixent des intervalles d'humidité à respecter et donnent des règles d'estimation de la qualité du séchage. Le besoin en bois sec devrait donc augmenter, d'où la nécessité de maîtriser ce procédé.

Le **séchage à l'air libre**, appelé aussi naturel, est encore très répandu dans l'industrie du bois, soit comme seul moyen de séchage, soit combiné avec un procédé de séchage artificiel. Dans ce mode de

séchage les planches subissent les aléas des conditions climatiques (vent, apport radiatif du soleil, alternance jour/nuit affectant cycliquement l'humidité relative et la température, etc.). De plus, la température ambiante étant faible, le risque des discolorations est diminué. Cela est favorable pour le chêne notamment. Mais l'avantage le plus important de ce mode de séchage est qu'il ne nécessite aucun apport d'énergie artificielle. Néanmoins, en absence de toute maîtrise des conditions de température et d'humidité de l'air, la teneur en eau d'équilibre ne pourra être inférieure à celle donnée par les conditions ambiantes. Selon les régions et les saisons, la teneur en eau d'équilibre sera ainsi comprise entre 13% et 19%. De plus, l'absence de maîtrise de conditions entraîne un risque de fentes de surface et en bout, sans oublier que pendant le séchage le bois ne sera pas protégé d'attaques biologiques (insectes et champignons). Enfin, l'inconvénient le plus important est sans doute la durée du séchage qui peut atteindre plusieurs mois. Cela exige des grandes surfaces de terrain et peut entraîner des immobilisations de capitaux considérables (Aléon et al. 2001).

Le **séchage artificiel** permet d'accélérer le séchage tout en assurant une bonne qualité du produit séché. De plus, il est possible d'atteindre des teneurs en eau au dessous de ce qui est possible en séchage à l'air libre. Plusieurs méthodes de séchage artificiel existent :

- séchage convectif à basse et moyenne température, procédé le plus utilisé dans l'industrie (pré séchoirs, séchoirs à pompe à chaleur, séchoirs à air chaud climatisé).
- séchage convectif à haute température, procédé dans lequel la température de l'air est supérieure à la température d'ébullition de l'eau.
- séchage sous vide, continu ou discontinu.
- séchage par haute fréquence ou micro-onde.
- séchage mixte vide/haute fréquence.
- séchage solaire ou par infra-rouge.

Les technologies de séchage par vaporisation visent à faciliter les transferts internes d'humidité, de façon à réduire les gradients d'humidité, et/ou à activer le fluage viscoélastique, de façon à réduire le niveau des contraintes de séchage. Cependant, à part le séchage à haute température adapté seulement aux résineux, toutes ces technologies sont onéreuses, notamment au niveau de l'investissement.

Dans le milieu industriel, le séchage est conduit généralement suivant des tables empiriques adaptées selon les essences et l'épaisseur de la planche. Parmi les ouvrages destinés aux praticiens et aux opérateurs de séchoirs on peut mentionner ceux de Joly et More Chevalier (1980) et de Aléon et al. (2001) de l'Institut Technologique FCBA.

L'utilisation d'un procédé de séchage artificiel nécessite ainsi un savoir-faire afin de diminuer les pertes, le but étant de produire un bois sec, à la teneur en eau demandée, avec les caractéristiques suivantes :

- homogénéité de la teneur en eau finale dans les piles de planches
- homogénéité de la teneur en eau finale au sein de chaque planche
- sans ou avec peu de défauts (collapse, fentes, déformations et discolorations)
- avec peu de contraintes internes résiduelles

Les **défauts de séchage** sont souvent la conséquence d'une conduite de séchage mal adaptée à l'essence. Le collapse notamment est un effondrement localisé des parois cellulaires, reconnaissable par une ondulation des faces des planches et parfois accompagné de fentes internes. Il se produit lorsque des fortes pressions capillaires s'exercent sur les parois cellulaires. Il apparaît ainsi uniquement en présence d'eau liquide, donc au début du séchage lorsque la teneur en eau du bois dépasse le point de saturation des fibres, et lorsque la température est trop élevée. De leur côté, les fentes se produisent en raison du retrait. Elles peuvent apparaître sur les faces des planches (fentes de surface), dans les extrémités (fentes en bout) et à l'intérieur des planches (fentes internes). Les déformations globales les plus courantes sont représentées dans la Figure 1.16. Enfin, les discolorations, ou colorations superficielles, apparaissent en présence d'oxygène dans l'atmosphère, avec une température forte et une humidité élevée. Elles peuvent être d'origine biologique (bleuissement des résineux par l'action des champignons) ou d'origine chimique (discoloration du chêne par les tanins).

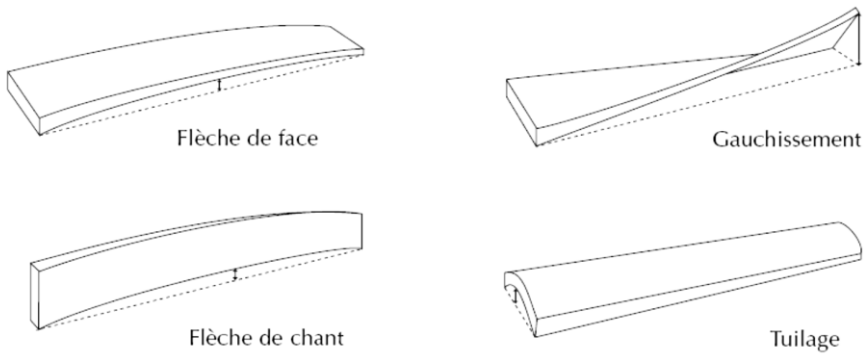
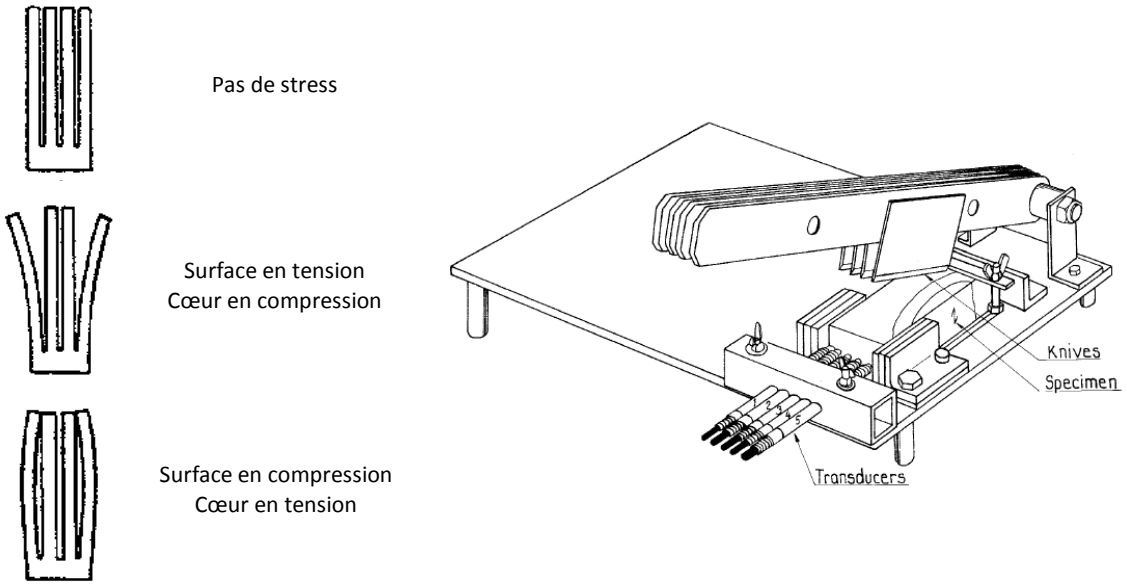


Figure 1.16. Déformations les plus courantes dues au séchage du bois.

Au cours du séchage, et tel que mentionné auparavant, des contraintes mécaniques peuvent se développer au sein des planches. A la fin d'un séchage bien conduit, les contraintes internes devraient être minimisées. **L'état de contraintes internes** à la fin du séchage est ainsi un indicateur de la qualité de séchage. D'après une enquête internationale menée par Ranta – Maunus et al. (2001) auprès des chercheurs et praticiens du séchage du bois, un bois ayant beaucoup de contraintes internes à la fin du séchage a tendance à se déformer, plus précisément à se tuiler, après sciage et homogénéisation de la teneur en eau. En anglais, on dénomme cela « case hardening », dont la traduction française « cémentation » est mal adaptée et porte à confusion. Dans ce travail nous préférons parler d'état de contraintes résiduelles, plutôt que d'utiliser le terme « cémentation ». Cette dernière, apparaissant pour des essences peu perméables et riches en extractibles hydrosolubles, conduit à la formation d'une couche périphérique imperméable au début du séchage bloquant la migration d'humidité.

L'état de contraintes à la fin de séchage ne peut pas se mesurer directement. On ne peut que l'estimer à partir des conséquences que les contraintes engendrent, notamment les déformations. Ainsi, les méthodes d'évaluation sont des méthodes destructives consistant à libérer les contraintes à partir de la destruction d'une partie ou de la totalité de la planche. Parmi les méthodes possibles, on peut citer la technique proposée par Sales (1984) qui quantifie le relâchement des contraintes à partir d'une éprouvette en forme de fourche. Également, Svensson et Toratti (2002) ont imaginé un dispositif qui mesure la relaxation d'une section de la planche découpée en lamelles (Figure 1.17). Le

principe de ces deux méthodes est essentiellement le même. La découpe de la section de la planche et le stockage de cette section pendant un certain temps à conditions de l'air constantes permettent une homogénéisation du gradient d'humidité dans l'épaisseur de la planche, le retrait qui en résulte étant lié à l'effet mémoire du bois (sorte d'historique des teneurs en eau atteints par la pièce et des contraintes mécaniques provoquées par le gradient d'humidité).



Test de la fourche (Sales, 1984) Dispositif utilisé par Svensson et Toratti (2002)

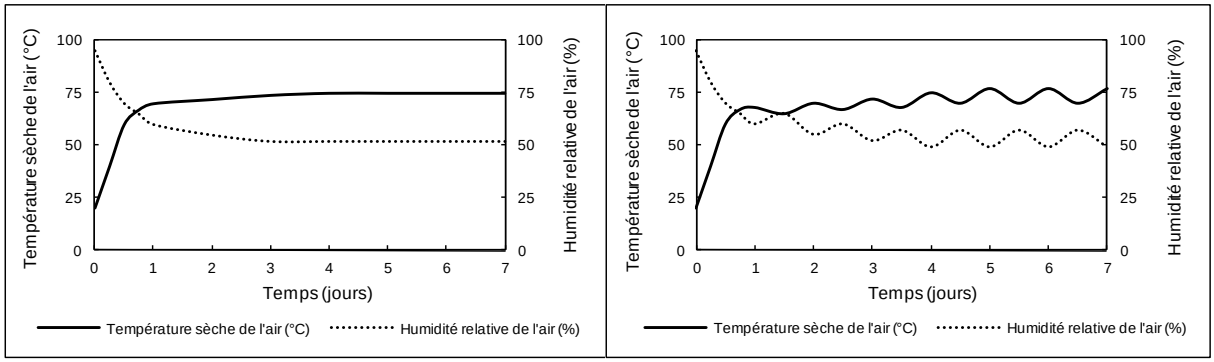
Figure 1.17. Techniques d'évaluation de contraintes de séchage.

Afin d'homogénéiser la mesure des contraintes dues au séchage, la norme européenne XP ENV 14464 (2003) a été proposée. Une section de la planche est découpée en deux lamelles, stockées par la suite en conditions ambiantes pendant 24 heures ou 48 heures selon qu'il s'agisse d'un résineux ou un feuillu. A la suite de ce délai on mesure l'écartement, appelé « gap », entre les deux lamelles. Dans cette thèse, nous avons choisi cette méthodologie pour l'évaluation des séchages en configuration semi – industrielle (chapitre 2).

Nous avons vu précédemment que sans le comportement différé du bois, il ne serait pas possible de sécher un avivé sans apparition de fentes de surface. Certains travaux cherchent donc à utiliser au mieux les propriétés viscoélastiques ou les propriétés mécanosorptives du bois afin de réduire les contraintes de séchage. Le séchage à transition vitreuse (Aguiar, 2001; Aguiar et Perré, 2002) et le séchage oscillant figurent parmi ces techniques. Nous présenterons ci-après ce dernier mode de séchage.

1.5.2. Principe et historique de conduites oscillantes

Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement aux conduites de séchage oscillantes. Cette technique est utilisée pour le séchage de différents matériaux, comme le cuir, certains grains végétaux et certains légumes comme les pommes de terre (Luboshtiz, 1963 et Luikov, 1968 cités par Terziev et al., 2002). Le séchage du bois utilisant des conduites oscillantes consiste à faire osciller la teneur en eau d'équilibre du bois au lieu de la maintenir constante. Dans un séchage classique, la température sèche de l'air augmente progressivement, et inversement, l'humidité relative de l'air diminue progressivement. Dans un séchage oscillant, il s'agit d'imposer de cycles d'humidification (adsorption) et de séchage (désorption) successifs comme schématisé dans la Figure 1.18.



a. Conduite classique b. Conduite oscillante

Figure 1.18. Schéma d'une table de séchage à conduite classique et à conduite oscillante.

Pour ceci, il faut faire varier les deux paramètres qui déterminent l'humidité relative de l'air : la température sèche et la température humide, où à défaut de cette dernière, la température de rosée. Les variations peuvent concerner une seule de ces deux températures ou les deux en même temps.

Les conduites oscillantes de séchage trouvent leur origine dans les fluctuations de l'humidité relative de l'air dans les séchoirs en raison des fluctuations liées à une mauvaise régulation de la température sèche et humide par rapport à la consigne. Il s'agit d'oscillations à faibles période et amplitude pouvant activer le fluage mécanosorptif de la couche superficielle sous contrainte des planches. Cela veut dire par exemple que les problèmes de régulation de séchoirs sont à l'origine des oscillations que l'on peut considérer aléatoires.

L'intérêt des conduites oscillantes réside ainsi dans la possibilité d'activer le fluage mécanosorptif dans la périphérie des planches et ainsi diminuer les contraintes liées au retrait apparaissant pendant le séchage. Néanmoins, malgré les nombreux travaux disponibles dans la littérature, il n'existe pas d'explication claire sur les principes d'oscillation, à savoir l'amplitude et la fréquence des oscillations de la teneur en eau d'équilibre. En général, ces paramètres lorsque l'on cherche à les maitriser sont choisis de façon aléatoire avec des résultats contradictoires autant en durée qu'en qualité. Parfois, les oscillations diminuent la dispersion finale de la teneur en eau du bois, les déformations ou la durée du séchage. Dans d'autres cas, aucune amélioration n'est obtenue. En outre, les tables de séchage oscillant sont spécifiques à l'essence et à l'épaisseur de la planche utilisées. Ce qui peut

marcher pour une essence déterminée, peut ne produire aucune amélioration pour une autre essence, même pour des essences appartenant à la même famille botanique. Aussi, les méthodes expérimentales utilisées manquent souvent de rigueur et les comparaisons portent généralement sur des séchages non comparables. Tout cela justifie une étude approfondie sur le sujet.

Depuis les premiers travaux de Haygreen en 1965, les conduites oscillantes ont été le sujet de nombreuses recherches, tant au niveau expérimental qu'au niveau de la modélisation. Ci – après nous présentons un historique non exhaustif des travaux surtout au niveau expérimental sur les conduites oscillantes dans le séchage du bois.

La première référence dans la littérature remonte aux travaux de Haygreen (1965). Il remarqua que la coupure régulière de la vapeur d'eau associée à l'ouverture des portes du séchoir pouvait accélérer le séchage de planches épaisses de deux essences de noyer (*Carya spp*) et pouvait en même temps réduire la consommation énergétique. Il s'agit néanmoins d'observations purement empiriques tenant compte du manque de contrôle des paramètres (température et humidité de l'air) et sans détermination rigoureuse de la qualité du produit séché. On peut citer aussi les travaux de Mingazov (1973) sur le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*). Il conclut que les tables oscillantes n'affectent pas les propriétés mécaniques du bois par rapport au séchage classique et avança quelques explications sur le principe théorique du séchage oscillant (Mingazov et Kachalin, 1975). Depuis, les conduites oscillantes ont été parfois utilisées pour réduire la durée du séchage et/ou améliorer la qualité du bois sec.

L'utilisation des conduites oscillantes avec des périodes et des amplitudes contrôlées est plutôt récente. D'après Sackey et al. (2004), Poskrobko et Vilchinski (1983) auraient mené les premiers séchages oscillants à amplitude et période définis, pour des planches de chêne (*Quercus sp*) de 25 mm d'épaisseur. Aucune différence significative de la durée ou de la qualité du bois séché ne fut trouvée, mais la consommation de vapeur pour la production de chaleur fut diminuée de 25% par rapport au séchage classique de référence. En 1991, Samuelson et Sönderström (cités par Sackey et al., 2004) ont étudié le séchage oscillant de pin de 75 mm d'épaisseur. Malgré une réduction de 28% de la durée du séchage, la qualité était inférieure à celle obtenue en conduite classique.

On peut mentionner également les travaux de chercheurs australiens sur la technique du « séchage intermittent » que l'on peut considérer comme une sorte de séchage oscillant. Cette technique a été développée par Langrish et al. (1992) en s'inspirant des améliorations constatées en termes de qualité avec l'utilisation du séchage solaire, dans lequel les contraintes de séchage produites pendant la journée sont relaxées pendant la nuit lorsque la température se refroidit et produit de la condensation à la surface des planches. Dans le séchage intermittent sont alternées des phases de séchage proprement dites et des phases d'arrêt des éléments chauffants et ventilateurs du séchoir. Langrish et al. ont travaillé sur le bois de hêtre rouge (*Nothofagus fusca*) de 27 mm d'épaisseur séché en alternant des phases de séchage proprement dites de 7 heures avec des phases de refroidissement (ou arrêt de séchoir) de 17 heures. Trois configurations de paramètres (température sèche et humide) ont été testées pour les phases de séchage et comparées à un séchage classique (continu). Selon leurs résultats il est possible d'améliorer la qualité du bois séché (sans fentes internes et moins de contraintes internes) sans affecter la durée totale du procédé. Néanmoins, le

nombre d'échantillons de cette étude étant très limité, les auteurs conseillent la réalisation des recherches avec un échantillonnage plus large et ainsi plus représentatif.

Une autre étude sur le séchage intermittent est celle de Chafe (1995) qui a testé cette technique avec du bois d'eucalyptus (*Eucalyptus regnans*) de 50 mm d'épaisseur séché après traitement thermique à différentes températures allant de 50°C à 90°C. Le séchage intermittent a produit moins de fentes de surface et internes que le séchage classique, particulièrement pour les bois traités à 50°C.

Chadwick et Langrish (1996) ont étudié le séchage intermittent d'un feuillu australien, turpentine (*Eucalyptus pellita*), de 25 mm d'épaisseur avec les extrémités colmatées. Deux séchages intermittents ont été réalisés, la différence étant l'humidité relative de l'air pendant les phases de relaxation, l'un à conditions ambiantes et l'autre à une humidité relative de l'air de 100%. Malgré des résultats plutôt encourageants en termes de durée et de qualité du bois séché, les conclusions de cette étude sont à prendre avec précaution car les conditions durant les phases de séchage proprement dites des séchages intermittents ont été plus sévères que celles du séchage continu de référence. La différence de la teneur en eau d'équilibre entre ce dernier et les séchages intermittents a été de +2,5% en début de séchage, et a diminué progressivement jusqu'à +0,4% en fin de séchage. A cela s'ajoute le fait que les phases de relaxation ont eu des durées différentes, celles à conditions ambiantes étant plus courtes.

Pour revenir au séchage oscillant proprement dit, on peut citer aussi les travaux de Vansteenkiste et al. (1997) sur le séchage oscillant à haute température de peuplier robusta (*Populus sp*) de 35 mm d'épaisseur. Malgré une amélioration de la dispersion de la teneur en eau finale, la qualité s'est vue nettement dégradée : plus de fentes internes, de collapse et de tuilage par rapport au séchage de référence.

Egalement, Frühwald et al. (2000, cités par Sackey et al., 2004) ont réalisé des séchages oscillants de pin (*Pinus sp*) de 30 mm d'épaisseur et de hêtre (*Fagus sp*) de 60 mm d'épaisseur. Avec une amplitude de la teneur en eau d'équilibre de ±1,5% et ±3% et avec des périodes de deux et quatre heures, ces séchages ont permis de diminuer la durée ainsi que le gradient de teneur en eau finale dans l'épaisseur des planches.

Le séchage oscillant de planches de pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) de 50 mm d'épaisseur a été également étudié autant au niveau expérimental qu'au niveau théorique (Terziev et al, 2002 ; Salin, 2003). Terziev et al. ont testé deux configurations de séchage oscillant, dont une seule a permis des améliorations de la qualité, bien que celles – ci ne soient pas toujours significatives du point de vue statistique. Au contraire, avec l'autre configuration la qualité du bois s'est dégradée. En l'absence d'une amélioration significative de tous les paramètres qualitatifs avec les conduites oscillantes, ils concluent que celles – ci ne modifient pas la qualité du produit séché. Néanmoins, il a été trouvé une bonne corrélation entre les valeurs obtenues par modélisation et les valeurs expérimentales pour la teneur en eau finale du bois. De son côté, Salin utilise un modèle pour concevoir des conduites oscillantes minimisant la durée de séchage sans pour autant dépasser le niveau de contrainte limite à partir duquel les fentes apparaissent. Ainsi, en faisant varier soit la température sèche, soit la

température humide, soit les deux en même temps, il a obtenu une diminution théorique de la durée du séchage de 28% à 40% selon les cas.

Riehl et Welling (2003) ont réalisé des recherches pour étudier l'effet de conduites oscillantes par inversion du flux d'air sur une pile de planches d'épicéa de Norvège (*Picea abies*) de 53 mm d'épaisseur. Leur étude comportait quatre séchages oscillants sur une pile de 4 m^3 dans un séchoir de laboratoire. Les configurations des séchages oscillants combinaient une table «douce » et une table « sévère » avec deux périodes, soit 2,5 ou 1 heure. Malheureusement cette étude ne comporte pas de séchage classique de référence. Toutefois, le séchage de 63% à 17% de teneur en eau a été raccourci de 32% et 12% avec les deux configurations utilisant une période de 2,5 heures, par rapport à celles utilisant la période courte (1 heure). De plus, la durée de séchage dans la plage de 63% à 50% de teneur en eau a été similaire pour les quatre configurations. Tenant compte du fait que les fentes de surface apparaissent en début de séchage si les conditions sont trop sévères, les auteurs concluent que des périodes courtes en début de séchage éviteraient l'apparition de fentes de surface sans pour autant rallonger la durée totale du procédé. Le choix des périodes doit donc tenir compte de la résistance du bois aux transferts de masse et de chaleur en réponse à des variations de l'humidité relative de l'air ambiant. Il s'agit de trouver une période suffisamment longue pour permettre une relaxation significative des contraintes dans la surface des planches.

Ce travail a été complété en 2005 par quatre séchages, dont un classique et trois oscillants, du bois d'épicéa de Sitka (*Picea sitchensis*) de 50 mm d'épaisseur. Dans chaque séchage, la moitié inférieure de la pile était sous charge. L'amplitude de la teneur en eau d'équilibre était décroissante (de ±3% à ±1%), et la période était constante pour un séchage (2,5 heures) et croissante pour les deux autres (soit de 1 à 2,5 heures pour l'un, soit de 1 à 3 heures pour l'autre). Les trois configurations oscillantes ont donné une durée de séchage inférieure de 2,5% (période constante) et de 13,8% (période croissante) à celle du séchage classique. Pourtant la qualité du bois séché (déformations et fentes) s'est vue dégradée avec les oscillations, les planches ayant séché sous charge étant légèrement moins dégradées.

On peut citer aussi les travaux de Sackey et al. (2004) sur le séchage oscillant des avivés de pruche de l'est (*Tsuga heterophylla*) d'une section de 115 mm par 115 mm. Cinq séchages, dont un classique de référence, ont été réalisés. Ce travail est intéressant car il compare deux configurations oscillantes identiques en termes d'amplitude et fréquence, mais obtenues en faisant osciller soit la température sèche, soit la température humide (deux séchages pour chaque option). De plus, la comparaison entre les séchages est très rigoureuse. La durée du séchage de 54% à 19% de teneur en eau est réduite de 11,5% avec la configuration à faible amplitude faisant osciller la température sèche. Bien que les autres configurations oscillantes aient aussi réduit la durée, cela a été très limité (de l'ordre de 3,3% ou moins). La vitesse de séchage le plus élevé a été obtenu avec les oscillations de la température sèche à forte amplitude. Cette vitesse a été augmentée de 11,6% par rapport au séchage classique, alors que pour les autres séchages oscillants il était inférieur à ce dernier. L'oscillation de la température sèche serait à privilégier pour favoriser les transferts de masse. La qualité du séchage (l'homogénéité de la teneur en eau finale, gradient de teneur en eau entre la surface et le cœur de planches et présence de fentes internes et de surface) a été améliorée dans trois cas sur quatre (pas forcément les mêmes configurations à chaque fois). Ainsi, ce travail

démontre bien qu'il est possible d'obtenir des améliorations substantielles de la qualité de séchage à condition d'utiliser des amplitudes et fréquences pertinentes.

Plus récemment, Herritsch et al (2008), inspirés de travaux de Langrish et al. (1992), se sont intéressés au « séchage intermittent » du hêtre rouge (*Nothofagus fusca*). Ils concluent que le séchage intermittent produit un bois séché de qualité équivalente à celle du bois séché en conduite classique, mais avec une durée supérieure. Malgré un échantillonnage représentatif (35 m^3), leurs conclusions sont à prendre avec précaution en raison des différences significatives entre les séchages comparés (volume de bois séché, température sèche, équipement utilisé).

Milić et Kolin (2008) ont étudié l'effet des conduites oscillantes sur la durée du séchage, la consommation d'énergie, l'homogénéité de la teneur en eau, le gradient de la teneur en eau dans l'épaisseur et l'état de contraintes internes (exprimé par le gap). Leur étude concerne le bois de hêtre (*Fagus sp*) séché en utilisant quatre configurations oscillantes : deux amplitudes dégressives de la teneur en eau d'équilibre (de 3% à 0,88%, et de 6% à 1,76%) combinées avec deux périodes (6 heures et 12 heures). Les séchages oscillants ont eu une durée plus courte que celle du séchage classique, le plus court étant celui avec l'amplitude faible (de 3% à 0,88%) et la période de 6 heures. Aussi, les séchages à amplitude faible ont été plus courts que ceux à amplitude forte ; et les séchages à période de 6 heures ont été également plus courts que ceux à période de 12 heures. Le gradient de la teneur en eau finale a été diminué avec les séchages oscillants. Il en est de même pour le gap, bien que cela ne soit pas significatif du point de vue statistique. De plus, les séchages oscillants ont permis une diminution de la consommation d'énergie de l'ordre de 7,5% jusqu'à 17% selon la configuration utilisée, cela en raison de la diminution de la durée du procédé. Ces travaux montrent ainsi que les oscillations peuvent diminuer la durée totale du séchage tout en conservant la qualité du produit séché, voire en l'améliorant.

Cet historique non exhaustif montre l'hétérogénéité des résultats. Les travaux plus récents bénéficient de plus de rigueur et réussissent à améliorer la qualité du bois séché. Néanmoins, le choix des amplitudes et périodes semble encore approximatif et empirique, bien que certains auteurs aient essayé de trouver des explications scientifiques aux résultats observés. Il est ainsi tout à fait justifié d'étudier l'effet des conduites oscillantes sur les contraintes de séchage liées au retrait avec une démarche scientifique, notamment en ce qui concerne le choix des amplitudes et périodes.

Conclusion

Le bois, en tant que matériau d'origine biologique, montre un comportement complexe. Son utilisation optimale nécessite ainsi une connaissance de ses caractéristiques physiques et mécaniques. Le séchage du bois fait partie des procédés essentiels dans la transformation du bois, mais sa maîtrise passe par la connaissance du comportement mécanique du matériau, particulièrement le comportement différé (viscoélasticité et mécanosorption).

L'intérêt de l'utilisation de conduites de séchage oscillantes réside dans la possibilité d'atténuer les contraintes de séchage liées au retrait à travers l'activation du fluage mécanosorptif. Les améliorations constatées jusqu'ici au niveau expérimental, en termes de durée du procédé et de qualité du bois séché, manquent toutefois d'une explication scientifique rigoureuse permettant le choix de la conduite à adopter pour activer au mieux les propriétés mécanosorptives du matériau.

Tout effort visant à améliorer la qualité du bois séché par l'utilisation de conduites oscillantes devrait ainsi tenir compte des mécanismes différés pour proposer des paramètres pertinents (amplitude et période).

Chapitre 2: Conduite oscillante en configuration semi-industrielle

Ce chapitre est dédié à l'étude des conduites oscillantes de séchage en configuration semi – industrielle. Les essais présentés ici ont été réalisés dans le laboratoire de séchage de l'Institut Technologique FCBA, à Paris. Deux campagnes d'essais constituées chacune d'un séchage classique de référence et de deux séchages oscillants ont été réalisées. Nous avons évalué la qualité du produit séché au moyen de différents paramètres : l'homogénéité de la teneur en eau finale dans la pile, l'homogénéité de la teneur en eau dans l'épaisseur de chaque planche, les déformations et l'état de contraintes exprimé par le *gap* du *« slicing test »*. Nous avons étudié, à l'échelle d'une petite pile, l'effet des oscillations sur chacun de ces paramètres, tout particulièrement sur le *gap*.

2.1. Conditions d'essai

Afin d'établir les conditions d'essai, il a fallu en premier lieu choisir le paramètre oscillant. Pour faire osciller la teneur en eau d'équilibre du bois (X_{eq}) dans la cellule de séchage, il est possible de faire varier seule ou ensemble la température sèche et la température humide. Afin de simplifier l'analyse des séchages oscillants, nous avons choisi de faire osciller un seul paramètre. En tenant compte de caractéristiques technologiques de séchoirs industriels, il était préférable de choisir le paramètre le plus facile à maîtriser en régime oscillant, en l'occurrence, la température humide.

Bien que l'un comme l'autre puisse faire osciller la teneur en eau d'équilibre du bois, ce choix n'est peut-être pas sans influence sur les résultats. Par exemple, lors d'un séchage convectif classique les transferts de chaleur se produisent de la surface des planches vers le cœur, la surface étant plus chaude que le cœur. L'oscillation de la température sèche aurait pu inverser ces transferts, le rendant dans la même direction que les transferts de masse, soit du cœur vers la surface. Ainsi, pendant les phases de « refroidissement » les transferts de chaleur et de masse étant dans la même direction, le séchage pourrait être favorisé si le gradient de température était un des termes moteur de la diffusion. Toutefois ce sujet reste encore aujourd'hui controversé (Janssen, 2011).

Pour cette partie de la thèse deux campagnes d'essais ont été réalisées. Chaque campagne était constituée de trois séchages, un classique (sans oscillations) et deux oscillants, avec des échantillons provenant, trois à trois, du même sciage initial.

Les tables de séchage utilisées pour les séchages « classiques » (sans oscillations) étaient composées d'une succession de rampes et paliers, celle de la première campagne comportant plus d'étapes que celle de la deuxième campagne. Pour les tables oscillantes deux périodes d'oscillation ont été étudiées : 3 heures et 12 heures. La principale différence entre les deux campagnes concerne la variation de la teneur en eau d'équilibre, ΔX_{eq}, qui était dégressive pour la première campagne et constante pour la deuxième. Dans les deux sous-sections suivantes nous développerons plus en détail ce sujet.

2.1.1. Première campagne d'essais

La table de séchage classique retenue pour cette campagne a été inspirée de pratiques industrielles, plus particulièrement de la table préconisée par l'Institut Technologique FCBA presentée au Tableau 2.1 (Aléon, 2001). La table adoptée comporte moins de paliers (Tableau 2.2). La température sèche a été de 55°C jusqu'au point de saturation de fibres (PSF) et ensuite elle a augmenté progressivement jusqu'à 70°C. La température humide a été de 51,5°C jusqu'au PSF, pour progresser ensuite jusqu'à 57°C. Ensuite, lorsque le bois a atteint une teneur en eau de 20%, celle-ci a été abaissée à 50°C. La teneur en eau finale ciblée était de 10%.

Tableau 2.1. Table de séchage préconisée par l'Institut Technologique FCBA pour le hêtre (d'après Aléon, 2001).

Teneur en eau du bois (X) (%)	Température sèche (°C)	Température humide (°C)	Humidité relative de l'air (%)	Teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) (%)	Gradient de séchage*
Vert	50,0	47,0	85,0	17,0	
35	50,0	46,0	80,0	15,0	
32	55,0	50,0	75,0	13,0	
30	60,0	53,0	70,0	11,0	2,7
25	65,0	55,5	62,0	9,0	2,8
20	70,0	57,0	52,0	7,0	2,9
15	70,0	50,0	35,0	5,0	3,0

$$*Gradient\ de\ séchage = \frac{X}{X_{eq}}$$

Tableau 2.2. Tables de séchage de la campagne n°1.

Palier	Temps[1] (h)	TS[2] (°C)	TR[3] (°C)	Classique TH[4] (°C)	Classique X_{eq} (%)	Oscillants ΔTH (°C)	Oscillants ΔTR (°C)	Oscillants ΔX_{eq}[5] (%)
1	185	55,0	51,1	51,5	15	-3,1/+2,2	-3,5/+2,5	-4,0/+5,0
2	190	60,0	52,5	53,1	11	-2,7/+2,7	± 3,0	-2,1/+2,7
3	212	65,0	54,2	55,1	9	-2,7/+2,7	± 3,0	-1,7/+1,4
4	218	70,0	56,0	57,1	7	-2,7/+2,6	± 3,0	-0,8/+1,3
5	237	70,0	47,6	49,9	5	-2,4/+2,5	± 3,0	±0,6

1 Temps cumulé
2 Température sèche
3 Température de rosée
4 Température humide
5 Valeur estimée sans considérer l'hystérésis

La conduite du séchage classique s'est déroulée en fonction de l'humidité de planches témoins. Ainsi, la durée totale du procédé a été de 237 heures. Les tables de séchages oscillants ont été conçues pour que les planches aient, en moyenne, la même histoire de teneur en eau dans le temps que les planches du séchage classique. En effet, la durée totale de 237 heures a été respectée ainsi que la durée de chaque palier. Le choix de respecter la durée de chaque palier a été faite pour éviter

d'ajouter un paramètre supplémentaire (durée) et rendre l'analyse des résultats plus complexe. Ainsi les séchages oscillants n'ont pas été conduits en suivant la teneur en eau du bois mais sur le temps. Comme signalé précédemment, deux périodes d'oscillations ont été étudiées : 3 heures pour le séchage oscillant n°1 et 12 heures pour le séchage oscillant n°2. En multipliant par quatre la période initiale de 3 heures, l'épaisseur de la couche périphérique de la planche affectée par les oscillations devrait être multipliée par deux car la constante de temps de la diffusion fickienne est proportionnelle au carré de l'épaisseur. Le chapitre 3 aborde plus en détail le calcul de l'épaisseur affectée par les oscillations de la teneur en eau. Ainsi, les deux périodes retenues devraient permettre l'activation du fluage mécanosorptif sur une épaisseur allant du simple au double

En ce qui concerne l'amplitude des oscillations de la teneur en eau d'équilibre, ΔX_{eq}, nous avons décidé pour cette première campagne d'appliquer un ΔX_{eq} évolutif, en utilisant pendant toute la durée du procédé la même amplitude du paramètre oscillatoire, la température humide, correspondant à une variation de pic à pic de 6°C de la température de rosée. On remarque tout de même que l'amplitude de la température humide du dernier palier est légèrement inférieure à celle des autres paliers. Le Tableau 2.2 précise ces valeurs. En conséquence le ΔX_{eq} a évolué de 9% au début de séchage jusqu'à 1,2% en fin de séchage. Le Tableau 2.2 récapitule les tables de séchages utilisées autant en conduite classique qu'en conduite oscillante. Le ΔX_{eq} y est présenté ainsi que la température de rosée à titre informatif. Les Figures 2.1 et 2.2 permettent d'apprécier les différences entre les séchages oscillants.

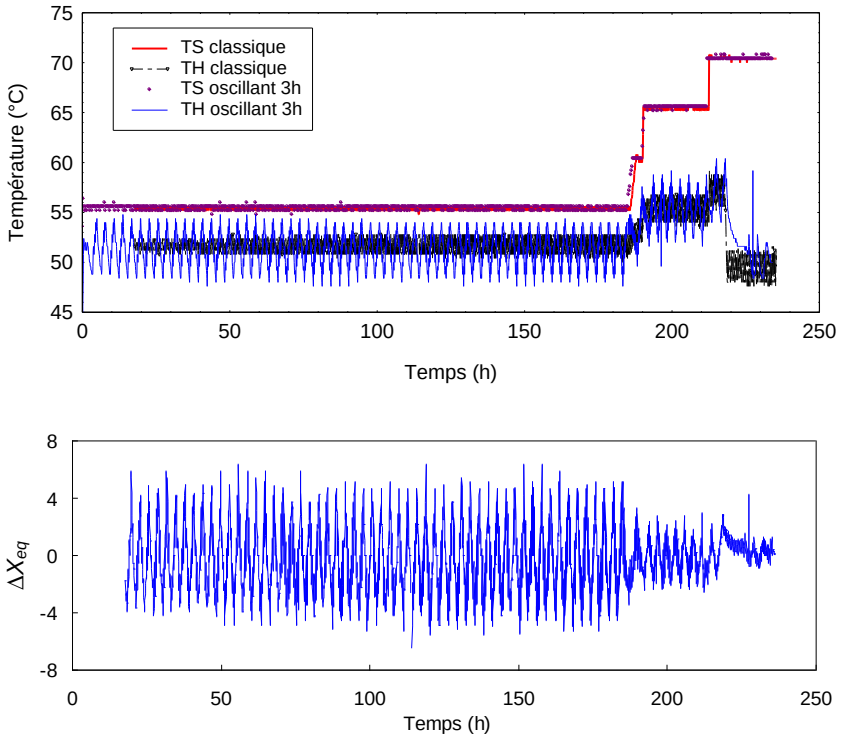


Figure 2.1.Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

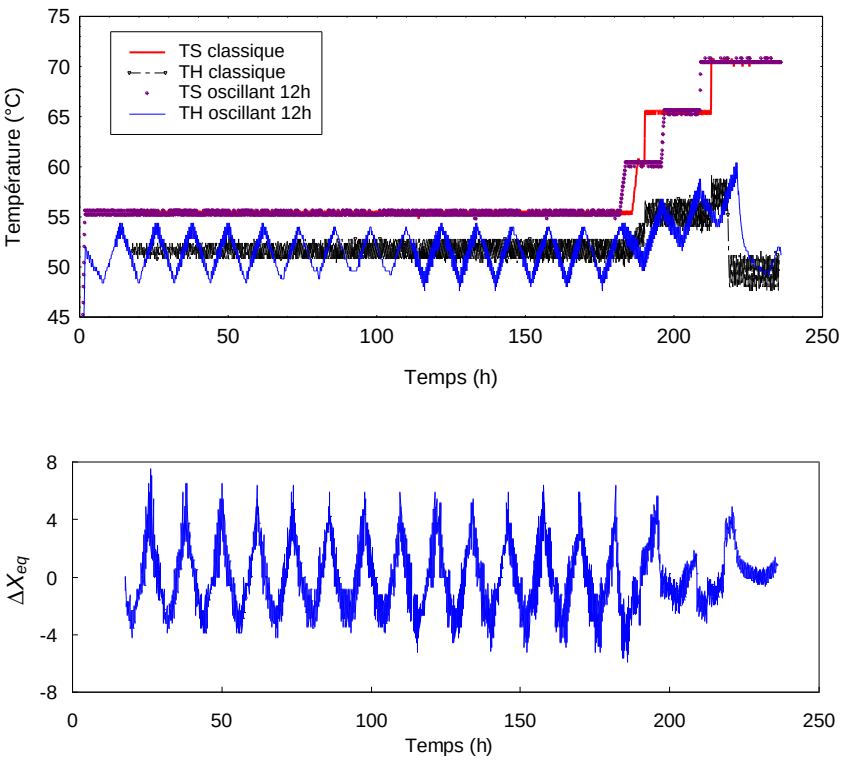
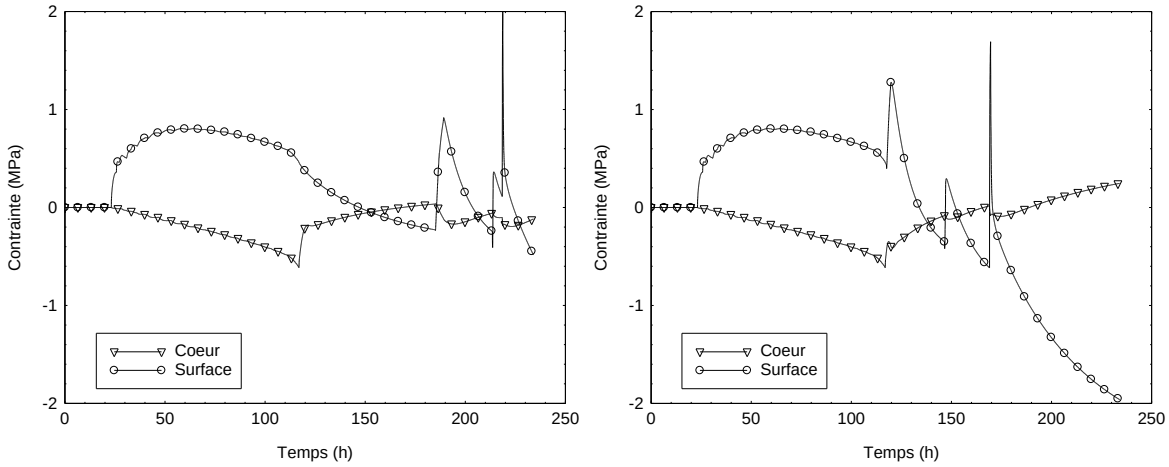


Figure 2.2. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

2.1.2. Deuxième campagne d'essais

Pour le séchage classique de la deuxième campagne, la table utilisée ressemble à celle de la première campagne mais elle a été simplifiée et "endurcie". Elle comporte moins de paliers et le gradient de séchage a été augmenté afin d'amplifier les défauts de séchage liés au retrait et de pouvoir mieux apprécier l'effet des oscillations. Avec l'aide du code de simulation numérique *TransPore*, code capable de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux et les contraintes de séchage (Perré et Degiovanni, 1990 ; Perré et Turner, 1999 ; Mauget et Perré, 2001 ; Rémond, Passard, Perré, 2007), nous avons conçu une table plus sévère. *TransPore* est utilisé ci-après comme un outil d'aide à la décision.

La conception de la nouvelle table classique a donc été faite à l'aide du volet mécanique de *TransPore*. Il s'agissait de concevoir une table où le gradient de contraintes au cours du séchage était amplifié par rapport à la table de la première campagne. Plusieurs tables ont été testées. La table retenue est illustrée dans la Figure 2.3 où est présentée l'évolution des contraintes à la surface et au cœur de la planche. On y apprécie clairement l'amplification du gradient de contraintes à 240 heures.



a. Table classique campagne n°1 b. Table classique campagne n°2

Figure 2.3. Evolution des contraintes à la surface et au cœur de la planche obtenue par simulation numérique (*TransPore*).

Dans cette nouvelle table, la température sèche de 55°C est maintenue jusqu'à 35% de teneur en eau et non plus jusqu'à 30%. L'augmentation vers 70°C s'est fait progressivement mais avec un palier de moins que dans la première campagne. La température humide de 51,5°C est également maintenue jusqu'à 35% de teneur en eau au lieu de 30%, pour progresser jusqu'à 57°C mais avec un palier de moins et descendre à 50°C lorsque le bois a atteint 20% de teneur en eau. Comme dans le cas de la première campagne, le séchage classique a été conduit en suivant la teneur en eau des planches témoins. La durée totale du séchage a été d'environ 212 heures, soit plus courte de 25 heures que celle de la première campagne. Les tables oscillantes ont respecté l'histoire d'humidité moyenne du bois dans le temps établie lors du séchage classique. Les périodes utilisées ont été les mêmes que celles de la première campagne, soit 3 et 12 heures. En revanche, l'amplitude des oscillations de la teneur en eau d'équilibre, ΔX_{eq}, a été constante (3%) tout au long des séchages alors que pour la campagne précédente elle évoluait dégressivement. Puisque la variation de X_{eq} devait être constante tout au long du processus nous avons choisi une amplitude relativement faible, par

rapport à la première campagne, en raison des limites technologiques de notre séchoir pour l'humidification et déshumidification en fin de processus. Le Tableau 2.3 résume les tables de séchage utilisées dans cette campagne et les Figures 2.4 et 2.5 et permettent de les illustrer.

Tableau 2.3. Tables de séchage de la campagne n°2.

Palier	Temps[1]	TS[2]	TR[3]	Classique		Oscillants		
				TH[4]	X_{eq}	ΔTH	ΔTR	ΔX_{eq}[5]
	(h)	(°C)	(°C)	(°C)	(%)	(°C)	(°C)	(%)
1	123	55,0	51,5	51,5	15,0	+0,8/-0,9	+0,8/-1,1	± 1,5
2	163	65,0	54,2	55,0	9,0	+2,4/-3,2	+2,6/-3,7	± 1,5
3	173	70,0	56,0	57,0	7,0	+3,3/-4,5	+3,6/-5,3	± 1,5
4	212	70,0	47,6	50,0	5,0	+5,5/-7,1	+6,6/-9,1	± 1,5

1 Temps cumulé
2 Température sèche
3 Température de rosée
4 Température humide
5 Valeur estimée sans considérer l'hystérésis

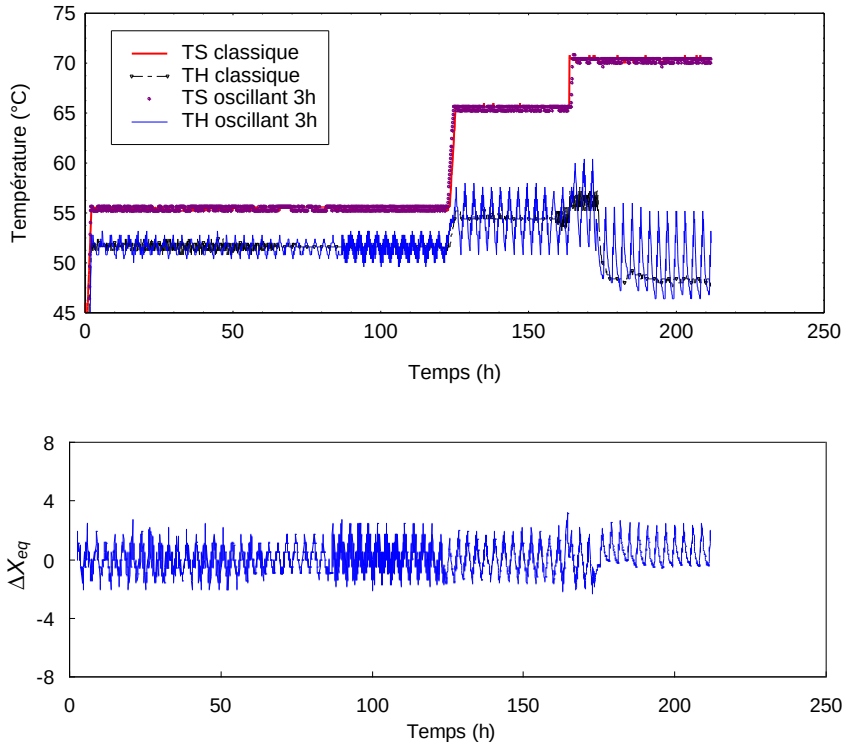


Figure 2.4. Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

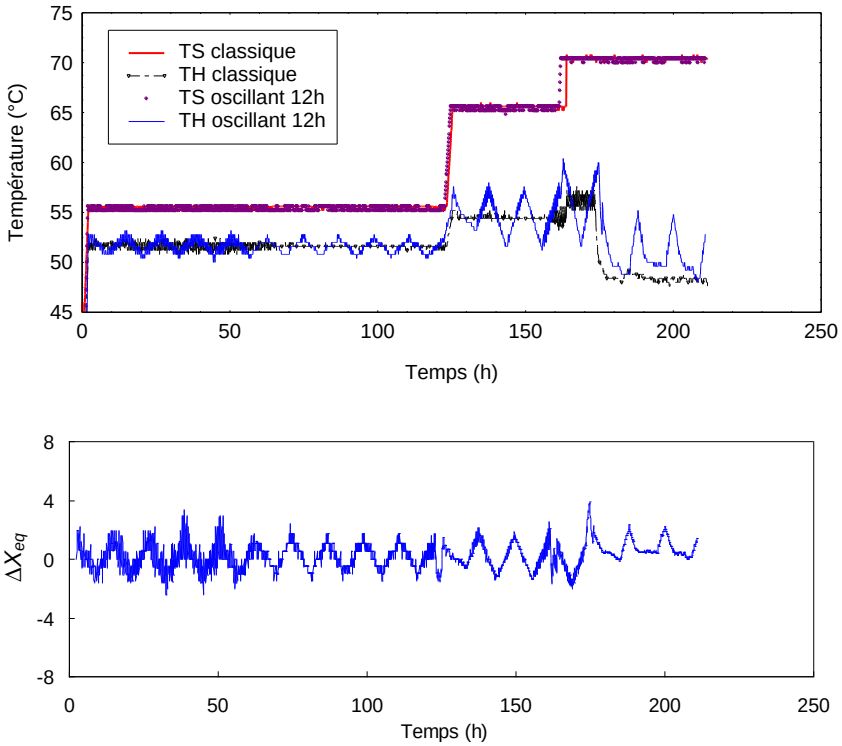


Figure 2.5. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

2.2. Matériel végétal

Le bois utilisé dans cette étude a été fourni par la scierie Petit SAS, située dans l'Oise. Il s'agissait de planches fraîchement sciées provenant d'arbres récemment abattus. Le cahier des charges spécifiait une qualité FF1. Cela veut dire, des planches sans nœuds et sans écorce. L'épaisseur de 27 mm a été choisie pour sa très large utilisation dans l'industrie. Bien que l'épaisseur de 50 mm soit aussi très répandue, elle a été écartée en raison du temps de séchage plus long. Il faut noter que ces épaisseurs correspondent aux valeurs commerciales. A l'état vert, les planches ont quelques millimètres supplémentaires en prévision du retrait dû au séchage. Ainsi, les planches fournies avaient une épaisseur moyenne de 30 mm.

2.2.1. Echantillonnage

Pour chaque campagne, 36 planches ont été sélectionnées à partir d'un lot de 40 planches de 100 mm de largeur et 3 m de longueur. Les planches sélectionnées ont été celles ayant le débit le plus uniforme dans toute la longueur. C'est-à-dire, celles où le débit était le même aux deux extrémités. Les planches retenues ont été coupées en trois échantillons de 1 m de longueur. L'échantillonnage devait assurer le jumelage et minimiser l'effet de la variabilité naturelle du bois. L'échantillon du milieu a été destiné au séchage classique et les échantillons extérieurs aux séchages oscillants (Figure

2.6). En effet, il était plus pertinent de comparer le comportement de deux échantillons contigus. Les échantillons ont été référencés ainsi :

N° de planche, emplacement dans la planche (a, b, ou c)

La lettre *a* désignait l'échantillon extérieur gauche, *b* l'échantillon du milieu et *c* l'échantillon extérieur droit.

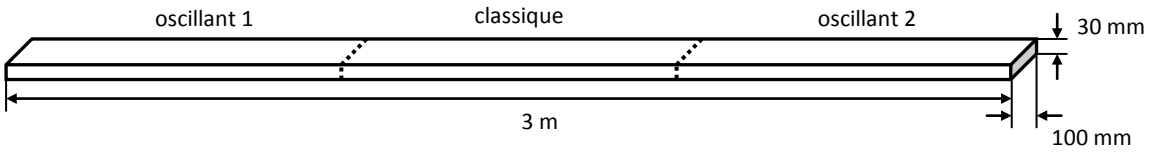


Figure 2.6. Schéma d'échantillonnage à partir de planches de 3 m de long et de 30 mm x 100 mm de section.

Le fil du bois de hêtre n'étant pas droit, il n'a pas été rare d'observer deux débits différents aux extrémités d'une même planche, voire d'un même échantillon. Parfois, le débit de trois échantillons issus de la même planche n'était pas similaire. Lorsque le débit était hétérogène au sein d'un échantillon, l'échantillon était nommé « mixte ». Théoriquement, les trois piles de chaque campagne devaient avoir le même nombre d'échantillons par débit, dosse, quartier, faux quartier et mixte. Pourtant, pour les raisons indiquées, cela n'a pas été le cas. Le Tableau 2.4 récapitule la composition des piles pour les deux campagnes selon les débits. La première campagne était composée principalement de planches sur dosse, tandis que la deuxième campagne comprenait surtout des planches sur quartier. A noter que même si les piles étaient composées de 36 planches, seulement 32 ont été prises en compte lors de l'analyse des résultats pour des raisons qui seront développées dans la section suivante.

Tableau 2.4. Composition des piles selon le débit pour les deux campagnes réalisées.

Séchage	Nombre d'échantillons				
	Dosse	Quartier	Faux quartier	Mixte	Total
Première campagne					
Classique	15	-	11	6	32
Oscillant 1 (3h)	20	-	8	4	32
Oscillant 2 (12h)	23	-	7	2	32
Deuxième campagne					
Classique	1	17	12	2	32
Oscillant 1 (3h)	1	14	10	7	32
Oscillant 2 (12h)	1	12	16	3	32

Une fois coupés et référencés, les échantillons ont été pesés puis répartis en 3 lots, un par séchage. Chaque lot a été enveloppé avec une bâche plastique pour limiter les pertes d'humidité. Tous les lots ont été stockés dans une chambre conditionnée à 4°C.

2.3. Dispositif expérimental

Les séchages ont été réalisés dans le séchoir Froilabo de l'Institut Technologique FCBA. Il s'agit d'un séchoir de 0,1m^3 piloté par un contrôleur Eurotherm à deux boucles. Le contrôleur pilote la température sèche et l'humidité relative de l'air grâce à un thermomètre à bulbe sec et un thermomètre à bulbe humide placés dans l'enceinte. La température sèche est régulée avec des résistances chauffantes placées dans la partie inférieure de l'enceinte. Une résistance électrique disposée dans un bac à eau thermo régulé, placé aussi dans la partie inférieure de l'enceinte, permet de réguler l'humidité relative de l'air (Figure 2.7). Le séchoir est également équipé d'un système frigorifique qui permet à la fois un abaissement rapide de la température sèche et un abaissement de l'humidité relative par déshumidification de l'air, cela étant d'une grande utilité pour les tables oscillantes. Un thermocouple à bulbe sec et un thermocouple à bulbe humide placés à l'intérieur de l'enceinte et reliés à un enregistreur Grant modèle Squirrel 1003 ont permis l'acquisition des conditions de séchage toutes les cinq minutes.

Lors de chaque campagne la disposition dans la pile des échantillons issus d'une même planche était la même pour les trois séchages. La pile été composée de 36 échantillons répartis en 9 lits et 4 colonnes. Les baguettes utilisées étaient de 20 mm d'épaisseur. La dimension totale de la pile était de 40 cm x 45 cm x 100 cm. Il faut signaler que pour les calculs de résultats, le lit au-dessus de la pile a été éliminé. La face supérieure des échantillons touchait la porte du séchoir, modifiant ainsi le flux d'air dans le lit. Sur les 32 échantillons pris en compte pour tous les calculs, dix-neuf étaient équipés des couples d'électrodes pour le suivi de la teneur en eau tout au long du séchage. L'emplacement de ces échantillons témoins était identique pour tous les séchages (Figure 2.8). Le suivi de la teneur en eau a été réalisé avec un humidimètre Gann M 2050 à résistance électrique. Les électrodes ont été insérés jusqu'au cœur de l'échantillon. Après l'installation de la pile, quatre anémomètres ont été placés à l'entrée du flux d'air (Figure 2.8). Le régulateur des ventilateurs a été ajusté jusqu'à obtention d'une vitesse moyenne de l'air de 2,5 $m.s^{-1}$. Ensuite les anémomètres ont été retirés. Avant et après chaque séchage, la masse et les déformations ont été mesurées. Quatre déformations ont été étudiées, la flèche de face, la flèche de chant, le tuilage et le gauchissement. La Figure 2.9 schématise l'enchaînement des mesures.

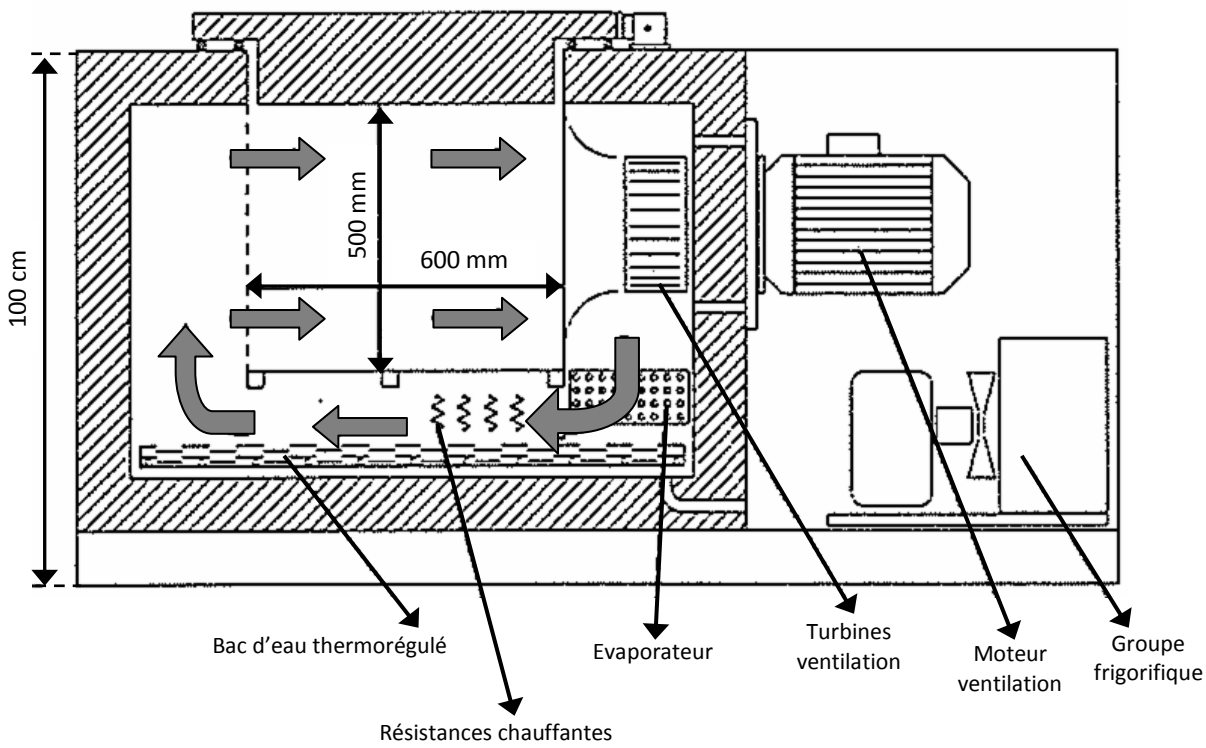


Figure 2.7. Schéma du séchoir Froilabo de l'Institut Technologique FCBA. Les flèches bleues représentent le flux d'air.

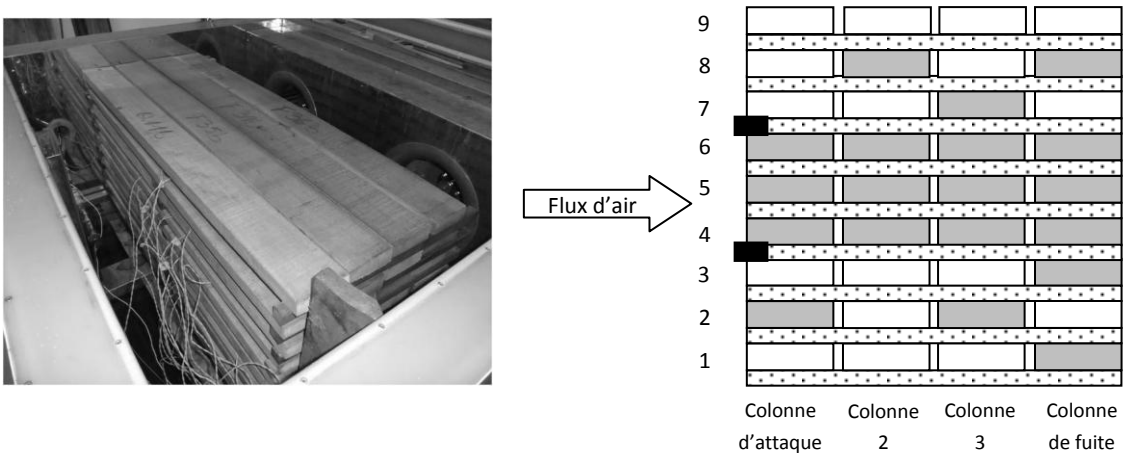


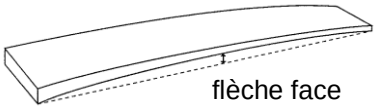
Figure 2.8. Empilage. A gauche : pile dans le séchoir avec les sondes de teneur en eau des échantillons témoins ; à droite : schéma de la pile, en gris les échantillons sur lesquels la teneur en eau à cœur a été mesurée au cours du séchage et en noir l'emplacement des anémomètres pour ajustement de la vitesse de l'air.

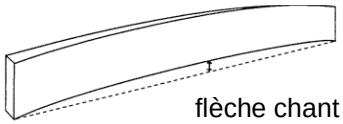
Avant séchage

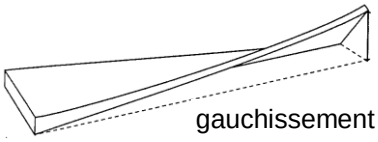
① masse



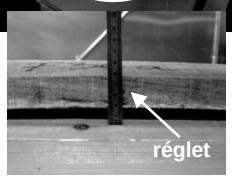
② déformations

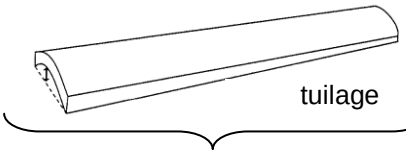


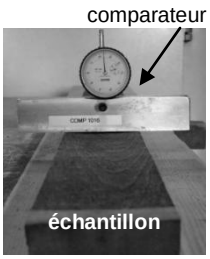




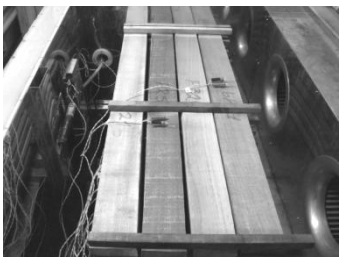








③ suivi de la teneur en eau



Après séchage

① retrait des électrodes

② masse

③ déformations

④ prélèvement des éprouvettes (Figure 2.10)

a. Déshydratation
b. Gradient *X*
c. Slicing test

Figure 2.9. Schéma des mesures réalisées lors de chaque séchage pour chaque planche.

Une fois le séchage terminé, les électrodes ont été retirées avant la pesée. La masse a été mesurée avec une balance Mettler PE11 de 0,1 g de précision. Les déformations ont été mesurées avec un réglet à l'exception du tuilage, pour lequel un comparateur a été utilisé.

Après les mesures de fin de séchage, trois éprouvettes ont été découpées dans chaque échantillon perpendiculairement au fil du bois (Figure 2.10). Elles ont été prélevées à une distance supérieure ou égale à 300 mm d'une des extrémités et dans une zone ne présentant aucune singularité (nœuds ou fentes). La première éprouvette, de 20 mm de longueur (sens du fil du bois), a été destinée à la mesure par double pesée de la teneur en eau finale moyenne de l'échantillon. Celle-ci permet d'estimer la teneur en eau initiale de la planche à partir de sa masse initiale. La deuxième, de 15 mm, a été utilisée pour le slicing test, qui sera décrit dans le paragraphe suivant. Enfin, la troisième, de 20 mm, a été découpée parallèlement à la surface en 5 lamelles pour la mesure du gradient de teneur en eau finale dans l'épaisseur de l'échantillon. Une fois découpées, les éprouvettes et les lamelles ont été numérotées pour les identifier.

Les éprouvettes n°1 ont été pesées avec une balance Mettler Toledo AB 104 S, d'une précision de 0,0001g. Ensuite elles ont été placées dans une étuve à 103°C pendant au moins 24 heures afin d'atteindre l'état anhydre. Une fois la masse anhydre connue, la teneur en eau a été calculée. Aussi, la teneur en eau de la planche a été calculée.

Les éprouvettes n°2 ont été utilisées pour mesurer l'état de contraintes par la méthode du slicing test suivant les préconisations de la norme XP ENV 1446. Cette méthode permet de visualiser et de quantifier les contraintes internes par la mesure de l'écartement, appelé gap, apparaissant entre les deux lamelles de la section transversale de la planche. L'éprouvette prélevée est coupée en deux lamelles comme illustré dans la Figure 2.10. Les lamelles sont numérotées et stockées dans un sac plastique étanche pendant 48 heures à température ambiante. Après ce délai, la teneur en eau est censée s'uniformiser éliminant ainsi les contraintes produites lors du séchage. Le gap entre les deux lamelles est ensuite mesuré à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0,01 mm.

La découpe des éprouvettes n°3 est illustrée dans la Figure 2.10. Préalablement à la découpe des lamelles une purge de 10mm à chaque extrémité dans le sens de la largeur a été effectuée. Dès leur découpe et leur numérotation, les lamelles ont été pesées et placées dans une étuve à 103°C pour obtenir la masse anhydre. Ainsi, le gradient de teneur en eau finale dans chaque échantillon a pu être obtenu.

Il faut signaler que la version française de la norme XP ENV 1446 utilise le terme « cémentation ». Néanmoins, nous trouvons ce terme ambigu et avons préféré nommer les résultats du slicing test « gap », valeur qui exprime l'état de contraintes à la fin du séchage. De même, le délai de 48 heures prévu par la norme pour les bois feuillus semble insuffisant pour permettre une homogénéisation complète de la teneur en eau et par conséquent, éliminer tout différentiel de retrait (Sandland 2010, Tarvainen, 2006). Afin de confirmer cela, plusieurs mesures au-delà des 48 heures ont été réalisées lors de la deuxième campagne.

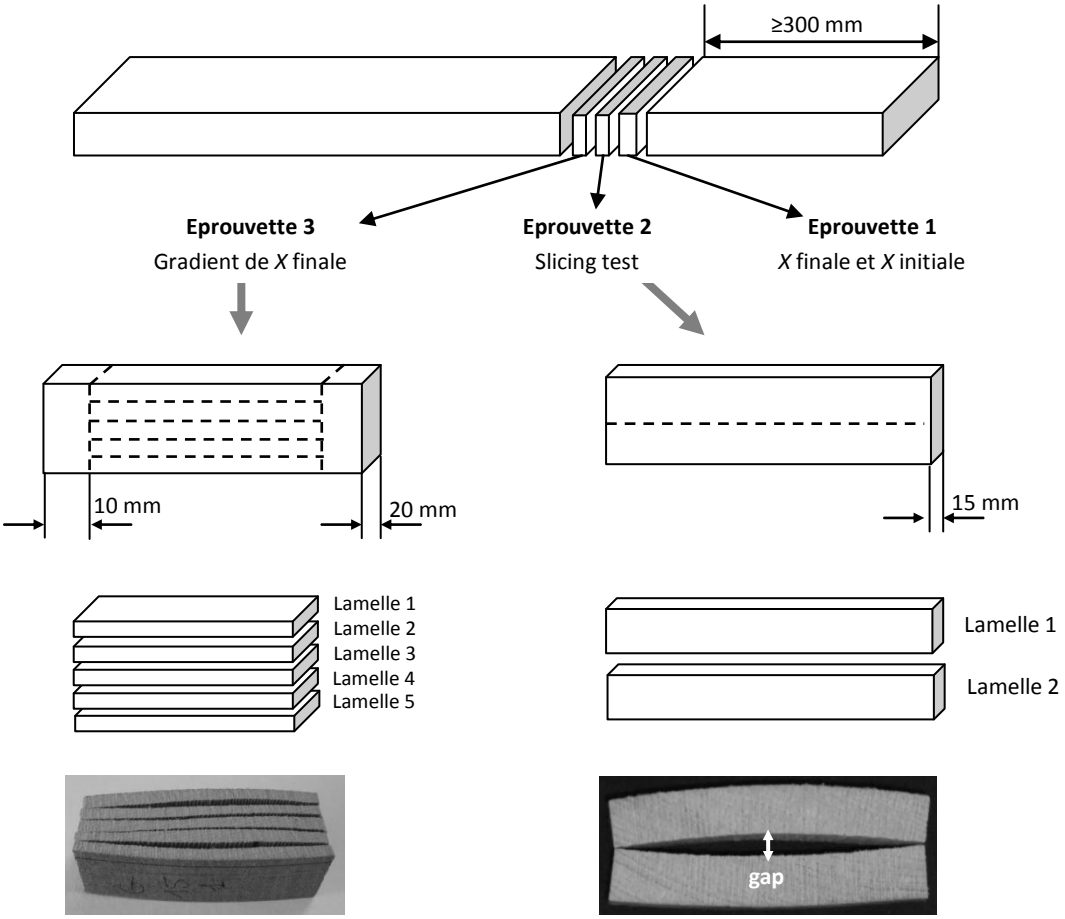


Figure 2.10. Plan de découpe à la fin du séchage pour la mesure des teneur en eau (*X*) finale et initiale, le slicing test et le gradient de teneur en eau finale. Les traits pointillés représentent les traits de coupe. En dessous, à gauche, lamelles pour le gradient après 24 heures dans l'étuve à 103°C ; à droite, lamelles pour le slicing test après 48 heures, on y aperçoit le gap.

2.4. Présentation et discussion des résultats

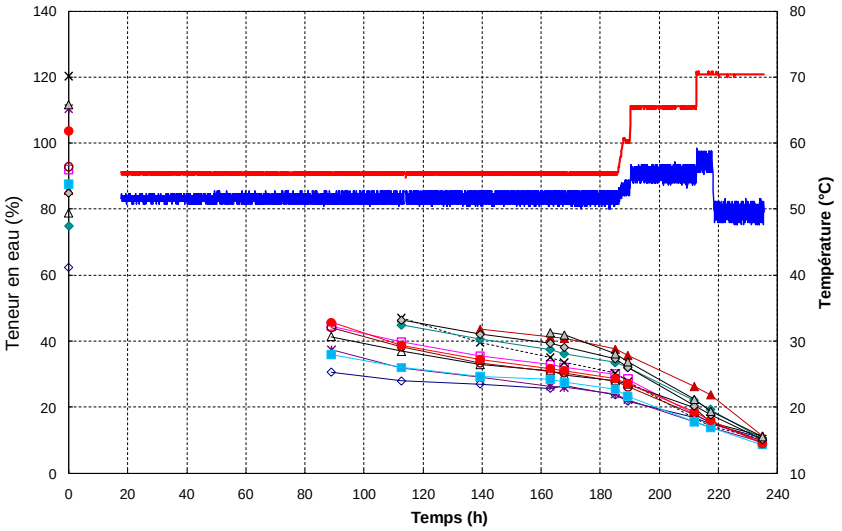
Les résultats de cette partie de l'étude comprennent la cinétique de séchage, l'homogénéité de la teneur en eau finale au sein de la pile, le gradient de teneur en eau finale au sein des planches, les déformations, et l'état des contraintes à la fin du séchage exprimé par le gap. Ces paramètres sont couramment utilisés pour évaluer la qualité d'un séchage. Il s'agit ici d'analyser l'effet des oscillations sur chacun de ces paramètres, particulièrement sur le gap. Dans les sections suivantes, les résultats des deux campagnes seront présentés et discutés simultanément, paramètre par paramètre. Il convient de rappeler que les résultats ont été calculés à partir de 32 planches pour chaque séchage, le lit supérieur de la pile ayant été éliminé pour les raisons évoquées dans la section précédente.

2.4.1. Cinétique de séchage

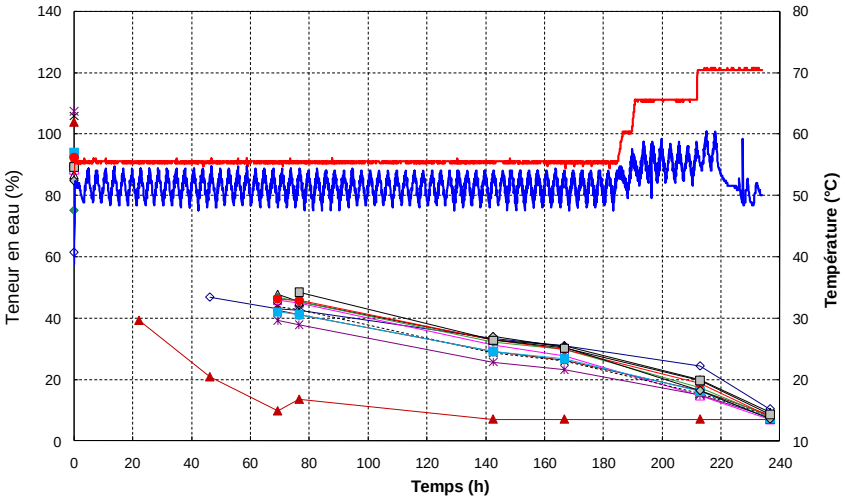
La cinétique de séchage a été tracée avec les valeurs de teneur en eau des planches témoins relevées avec l'humidimètre électrique. Cette mesure étant manuelle, les courbes sont constituées de peu de points. Dans les graphiques suivants, les teneurs en eau initiale et finale représentées sont celles obtenues par les calculs et non par l'humidimètre à résistance électrique. De plus, le premier point n'a pas été relié au reste de la courbe puisque nous ne disposions pas d'information sur l'allure de la courbe au dessus de 47% de teneur en eau, en raison des limites technologiques de l'appareil utilisé dans cette étude.

Les graphiques présentés concernent uniquement douze témoins, correspondant aux échantillons des lits 4, 5 et 6 de la pile. La température sèche et la température humide expérimentales sont également représentées. Les Figures 2.11 et 2.12 correspondent respectivement à la première et à la deuxième campagne. En raison d'un problème rencontré avec le système d'acquisition, il manque les premières heures des courbes de température du séchage classique issues de la première campagne.

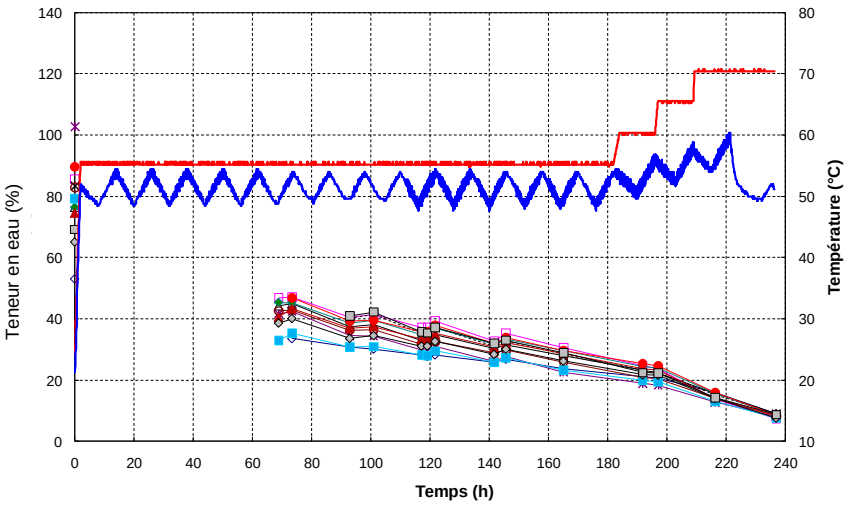
Pour la **première campagne**, la teneur en eau initiale de la pile était de 93,0% (classique), 89,3% (oscillant 1) et 83,2% (oscillant 2). A la fin du séchage, d'une durée de 237 heures, la teneur en eau était de 9,6% (classique), 9,0 (oscillant 1) et 8,9 (oscillant 2). D'après la Figure 2.11, relative à cette campagne, on peut constater que la teneur en eau atteint des valeurs lisibles par l'appareil (≤ 47%) à partir de 90 heures pour le séchage classique et dès 70 heures pour les séchages oscillants. Le PSF est atteint vers 185 heures avec le séchage classique et vers 142 heures avec les séchages oscillants, soit 43 heures plus tôt. Cela représente un gain de temps de l'ordre de 23%. Aux alentours de 140 heures et de 170 heures (fin du premier palier), on peut observer que la teneur en eau moyenne du séchage classique (34,4%) est plus élevée que celles des séchages oscillants (29,4% et 28,5% respectivement). On peut constater également que les cinétiques des séchages oscillants convergent beaucoup plus tôt, tandis que pour le séchage classique l'hétérogénéité se maintient plus longtemps au cours du procédé. Dans la Figure 2.11, nous observons également une trajectoire particulière pour l'un des échantillons du séchage oscillant 1. En effet, celui – ci sèche plus vite que les autres. Il est possible qu'il y ait eu un mauvais contact entre l'électrode et le bois ou que ce contact n'était pas à cœur mais à la périphérie de la planche, partie séchant avant le cœur. Pour le séchage oscillant 2, la teneur en eau remonte à certains moments au-dessus de la valeur mesurée à l'instant précédent. Cela s'explique par une mesure effectuée lors d'un ΔX_{eq} supérieur à celui de la mesure précédente. A l'exception de cette particularité, les cinétiques moyennes de deux séchages oscillants sont similaires.



a. Séchage classique

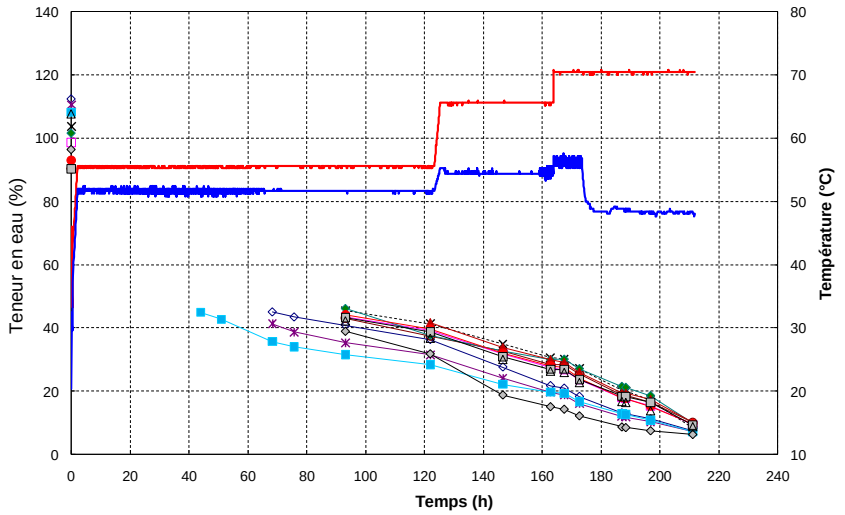


b. Séchage oscillant 1 (3h)

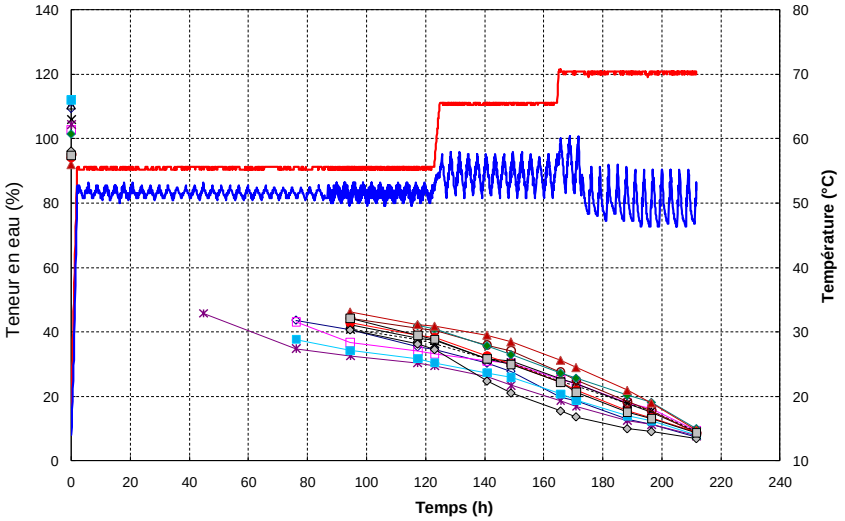


c. Séchage oscillant 2 (12h)

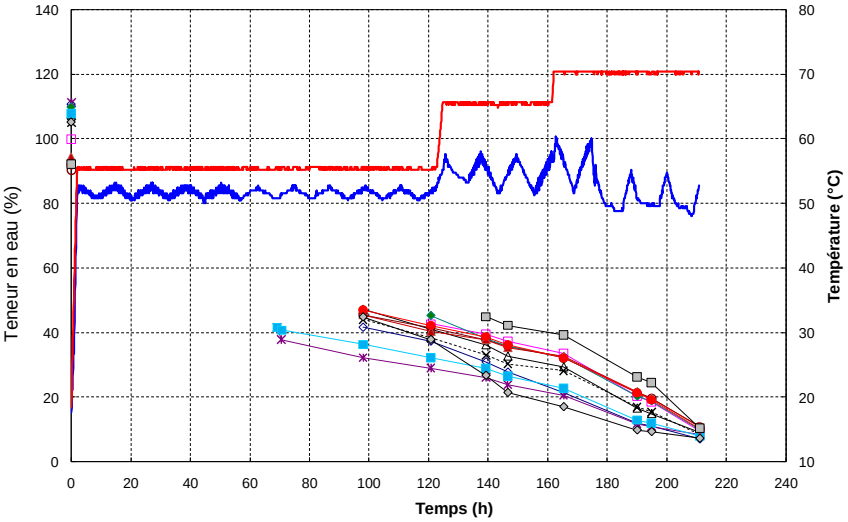
Figure 2.11. Cinétiques de séchage pour la première campagne pour douze témoins et conditions de séchage. En rouge, température sèche ; en bleu, température humide.



d. Séchage classique



e. Séchage oscillant 1 (3h)



f. Séchage oscillant 2 (12h)

Figure 2.12. Cinétiques de séchage pour la deuxième campagne pour douze témoins d'humidité et conditions de séchage. En rouge, température sèche ; en bleu, température humide.

Tout en tenant compte des limitations de l'humidimètre électrique, la configuration des oscillations utilisée dans cette campagne permettrait d'atteindre le PSF plus rapidement qu'un séchage classique. Le gain de temps constaté jusqu'au PSF est de l'ordre de 23%, ce qui semble cohérent avec les références de la littérature selon lesquelles la durée totale du séchage peut être diminué jusqu'à 20% avec les conduites oscillantes par rapport au séchage classique de référence (Chadwick et Langrish, 1996 ; Milić et Kolin, 2008). Les oscillations faciliteraient la migration de l'eau vers la surface des échantillons et réduiraient l'hétérogénéité des cinétiques des planches de la pile. Dans cette campagne la durée totale est la même pour les trois séchages, car comme mentionné précédemment, les séchages oscillants devaient respecter la même histoire de teneur en eau d'équilibre du bois séché en conduite classique. Néanmoins, s'ils étaient conduits en fonction de la teneur en eau du bois et non du temps, les séchages oscillants pourraient peut-être réduire la durée totale. Bien que la diminution de la durée du procédé ne soit pas l'objectif de cette thèse, ces résultats sont intéressants.

Pour la **deuxième campagne**, la teneur en eau initiale de la pile était de 104,5% (classique), 103,9% (oscillant 1) et 104,2% (oscillant 2). A la fin du séchage, la teneur en eau était de 8,7% (classique), 8,6 (oscillant 1) et 8,8 (oscillant 2), pour une durée totale de 212 heures. Malgré une teneur en eau initiale plus élevée que dans la première campagne, la teneur en eau finale obtenue est légèrement en dessous de cette dernière, et cela pour une durée de 25 heures plus courte. A priori, les conditions de séchage plus drastiques ont permis de raccourcir la durée du procédé.

Il faut rappeler que lors de cette campagne, l'amplitude de variation de ΔX_{eq} a été constante tout au long du séchage (3%). Lors de la première campagne la variation de ΔX_{eq} au début du séchage était nettement supérieure, soit 9% jusqu'à 185 heures (oscillant 1) ou 190 heures (oscillant 2). Ensuite, la variation de ΔX_{eq} a diminué à 4,8% et la valeur de 3% a été atteinte seulement après 190 heures (oscillant 1) ou 196 heures (oscillant 2). Les cinétiques obtenues avec cette configuration sont différentes de celles de la première campagne. La Figure 2.12 montre que la teneur en eau de la majorité des échantillons atteint des valeurs proches de 40% vers 94 heures pour le séchage classique et l'oscillant 1 et vers 100 heures pour l'oscillant 2. A la fin du premier palier, vers 120 heures, la teneur en eau moyenne est similaire pour les trois séchages, soit aux alentours de 35%. Le PSF est atteint après presque 150 heures pour les trois séchages, alors que pour la première campagne les oscillations permettaient un gain de 43 heures. On observe également que les courbes du séchage oscillant 2 convergent moins vite que les deux autres séchages.

Le Tableau 2.5 permet la **comparaison des cinétiques des deux campagnes**. La configuration des oscillations utilisées dans la campagne n°1 permet d'atteindre le PSF plus rapidement que le séchage classique. La durée de séchage du PSF jusqu'à la teneur en eau finale ciblée est presque le double pour les oscillations. Ceci est logique puisque les séchages oscillants se sont déroulés afin de respecter la durée de chaque palier du séchage classique. En revanche, en ce qui concerne la période (3 ou 12 heures), il semble qu'elle n'ait pas d'influence sur la cinétique.

Tableau 2.5. Récapitulatif des cinétiques de séchage.

Séchage	Nombre d'heures pour atteindre		Heures entre	*Xf*
	PSF[1]	*Xf*[2]	PSF et *Xf*	(%)
Première campagne				
Classique	185	235	50	9,6
Oscillant 1 (3h)	142	237	95	9,1
Oscillant 2 (12h)	142	237	95	8,9
Deuxième campagne				
Classique	147	212	65	8,7
Oscillant 1 (3h)	140	212	72	8,6
Oscillant 2 (12h)	147	211	64	8,8

1 Point de saturation de fibres
2 Teneur en eau finale

La campagne n°2 utilisant des oscillations au ΔX_{eq} constant et avec une amplitude généralement inférieure à celles de la campagne n°1 donne des résultats bien différents. Tout d'abord, avec les oscillations le PSF est atteint au bout du même temps (seulement 7 heures plus tôt qu'avec le séchage classique). Puis, la durée jusqu'à la teneur en eau finale est de 7 heures plus longue avec les oscillations. Ainsi, la configuration des oscillations de cette campagne ne permettrait aucune diminution de la durée du procédé. Néanmoins, les séchages de cette campagne sont plus courts de 43 heures que ceux de la campagne n°1 et cela, pour des teneurs en eau initiales très élevées dans les deux cas et des teneurs en eau finales très proches. Les consignes plus sévères de la deuxième campagne seraient à l'origine de cela. Dans cette campagne, comme dans la première, les périodes étudiées ne semblent avoir aucune influence sur la cinétique.

Pour résumer, les résultats concernant la cinétique de séchage montrent que les oscillations peuvent diminuer la durée du procédé à condition d'utiliser une configuration pertinente. Par contre, la cinétique ne semble pas être influencée par les périodes étudiées, soit 3 heures et 12 heures.

2.4.2. Homogénéité de la teneur en eau finale intra et inter – planches

L'homogénéité de la teneur en eau finale dans le lot séché et le gradient de teneur en eau dans l'épaisseur d'une planche sont parmi les critères les plus importants pour évaluer la qualité d'un séchage. Un procédé bien adapté est censé produire un lot de planches avec une teneur en eau moyenne la plus homogène possible, et un gradient de teneur en eau dans l'épaisseur de chacune d'elles faible.

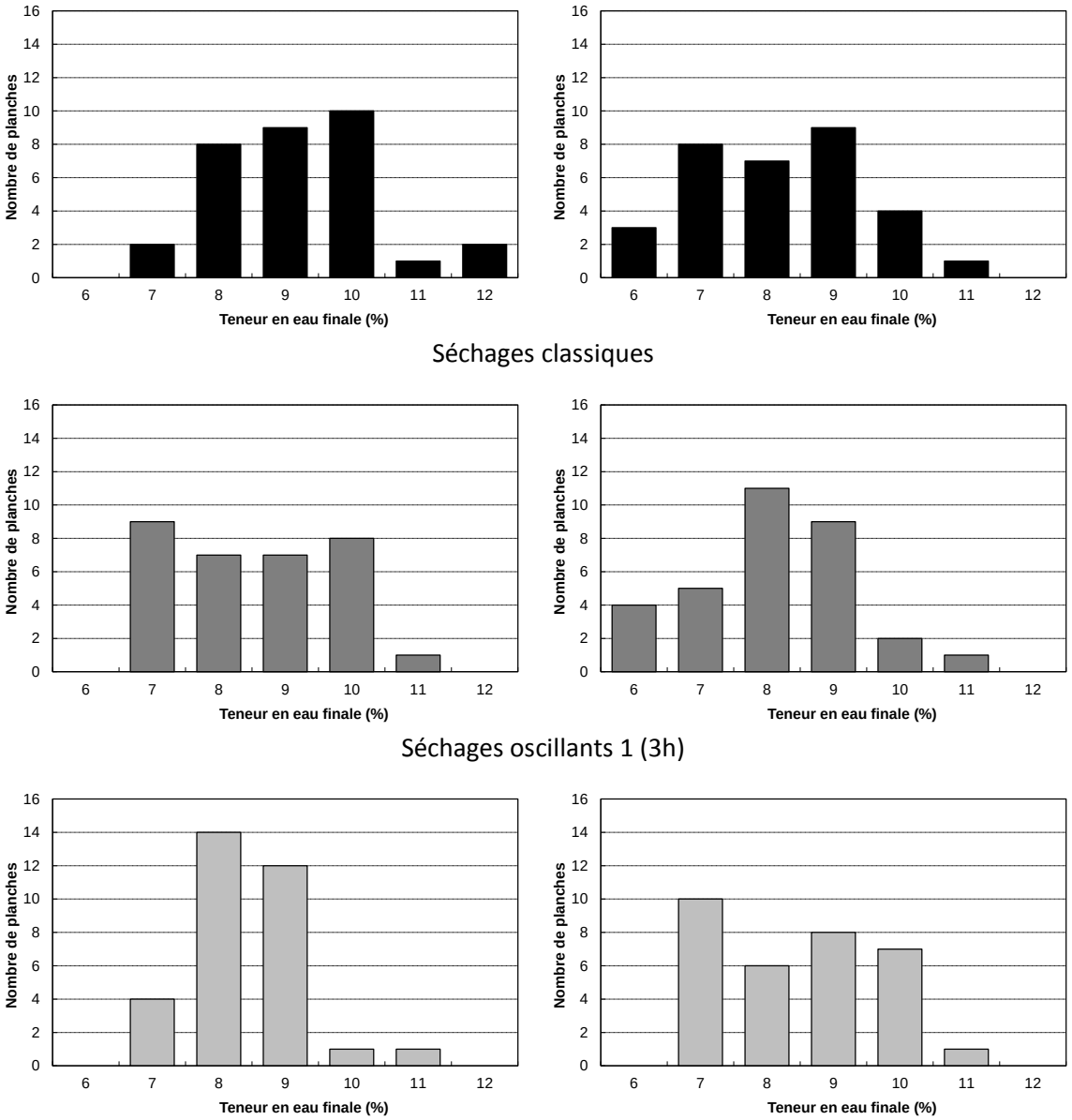
Dans chacune des campagnes, la teneur en eau finale des trois séchages était similaire. Soit 9,6% (classique), 9,0 (oscillant 1) et 8,9 (oscillant 2) pour la **campagne n°1** ; et 8,7% (classique), 8,6% (oscillant 1) et 8,8% (oscillant 2) pour la **campagne n°2**. Le Tableau 2.6 récapitule ces valeurs, accompagnées de l'écart – type. La teneur en eau initiale est également indiquée. Les échantillons avaient tous une teneur en eau initiale très élevée, supérieure à 80%. Le Tableau 2.6 présente aussi le gradient de teneur en eau finale, que nous analyserons plus tard.

Tableau 2.6. Teneur en eau initiale et finale et gradient de teneur en eau finale dans l'épaisseur.

Séchage	*Xi*[1] (%)	*Xf*[2] (%)	*Xf* cœur (%)	*Xf* surface (%)	Gradient *Xf* (%)
Première campagne					
Classique	93,04 *(17,50)*[3]	9,62 *(1,20)*	11,78 *(1,94)*	8,14 *(0,82)*	3,64
Oscillant 1 (3h)	89,33 *(14,29)*	9,05 *(1,26)*	10,76 *(2,03)*	7,21 *(0,80)*	3,55
Oscillant 2 (12h)	83,19 *(15,93)*	8,89 *(0,80)*	10,56 *(1,32)*	7,44 *(0,54)*	3,13
Deuxième campagne					
Classique	104,47 *(7,99)*	8,66 *(1,30)*	10,02 *(1,80)*	7,11 *(1,04)*	2,91
Oscillant 1 (3h)	103,88 *(9,25)*	8,59 *(1,24)*	9,77 *(1,64)*	7,08 *(0,88)*	2,63
Oscillant 2 (12h)	104,25 *(7,24)*	8,85 *(1,28)*	9,98 *(1,69)*	7,34 *(0,87)*	2,64

1 Teneur en eau initiale
2 Teneur en eau finale
3 Ecart – type

La Figure 2.13 donne des éléments complémentaires pour **l'analyse de l'homogénéité de la teneur en eau finale au sein de la pile**. La distribution de la teneur en eau finale est représentée sous forme d'histogrammes. Pour tous les séchages le faible écart – type indiqué dans le tableau 2.6 indique une assez bonne homogénéité de la teneur en eau finale. Pour la première campagne, l'écart – type du séchage oscillant 1 est légèrement supérieur à celui du séchage classique. A l'inverse, l'écart – type du séchage oscillant 2 est inférieur à celui du séchage classique. Dans la deuxième campagne, les oscillations entraînent un écart – type plus faible que dans le séchage classique de référence. De même, les histogrammes révèlent une dispersion plus faible pour les séchages oscillants. Dans la campagne n°1, la teneur en eau finale varie entre 7% et 12%. La catégorie la plus humide, soit 12%, disparaît avec les oscillations. Le séchage oscillant 1 permet une concentration de la plupart des échantillons dans la plage 7% – 10% ; et le séchage oscillant 2 entraîne une concentration de la plupart des échantillons dans deux catégories, celles de 8% et 9%. Dans le cas de la campagne n°2, la teneur en eau finale est comprise entre 6% et 11%. La teneur en eau finale du séchage oscillant 1 est comprise également entre ces valeurs, mais avec une forte concentration sur les catégories de 8% et 9%. Le séchage oscillant 2 élimine la catégorie la plus sèche, celle de 6%. Ainsi, il semble que les oscillations peuvent diminuer, voir supprimer, le nombre de planches surséchées ou insuffisamment séchées, ce qui constitue une amélioration de la qualité de séchage. A noter que dans les deux campagnes, ce sont les séchages oscillants à période de 12 heures qui diminuent davantage la dispersion.



a. Première campagne b. Deuxième campagne

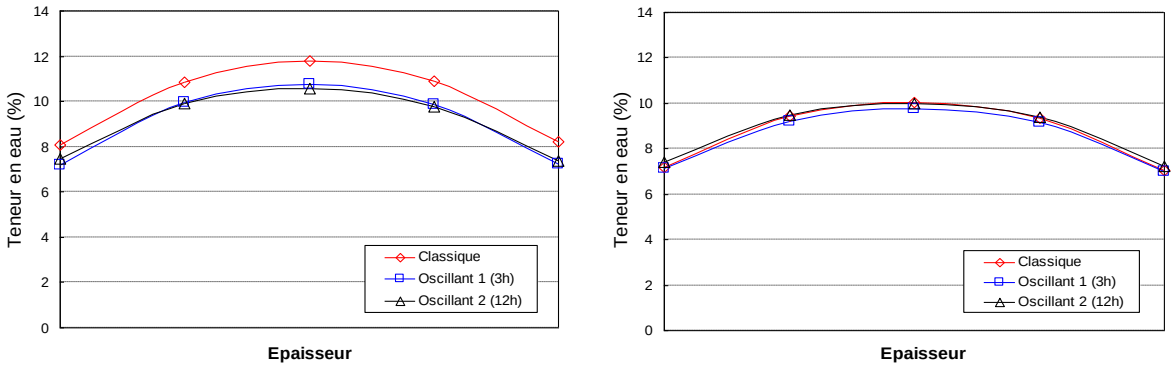
Figure 2.13. Distribution de la teneur en eau finale.

Il reste à analyser **le gradient de teneur en eau finale dans l'épaisseur de la planche**, défini comme l'écart entre la teneur en eau à cœur et la teneur en eau à la surface de la planche. Pour cela, il faut quelques précisions sur les valeurs présentées dans le Tableau 2.6. La teneur en eau de la surface correspond à la moyenne des lamelles n°1 et n°5 des éprouvettes n°3 prélevées dans chaque échantillon (voir Figure 2.10). La teneur en eau à cœur est celle de la lamelle n°3. Le gradient a été calculé pour chaque échantillon, la valeur représentée dans le Tableau 2.6 étant la moyenne pour chaque séchage. La Figure 2.14 illustre la répartition moyenne de la teneur en eau dans l'épaisseur pour chaque séchage, tandis que la Figure 2.15 représente le profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur pour chaque échantillon. Cinq valeurs de teneur en eau sont notées sur chaque courbe, correspondant aux cinq lamelles des éprouvettes. Pour la campagne n°1, la Figure 2.14 met en évidence des différences dans la teneur en eau finale, le séchage classique ayant une teneur en eau

légèrement plus élevée. En revanche, les teneurs en eau finales des trois séchages de la campagne n°2 sont similaires.

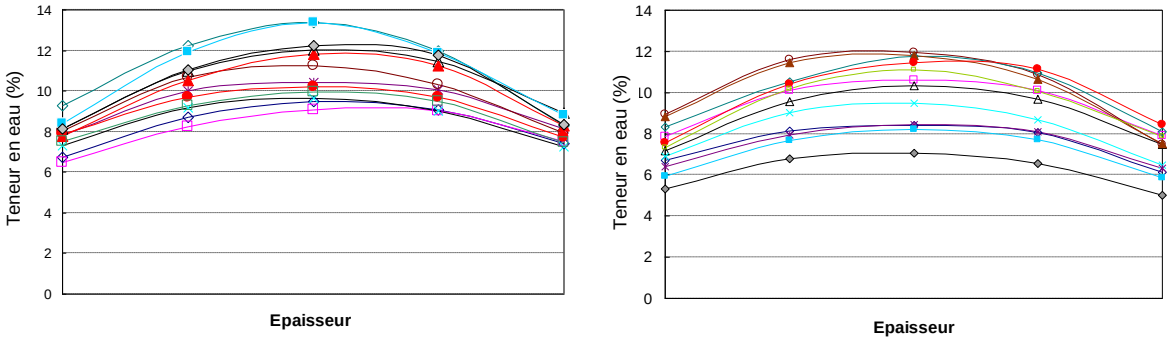
En ce qui concerne le gradient (Tableau 2.6), les séchages oscillants ont permis de le diminuer tel que constaté dans des travaux précédents (Sackey et al., 2004 ; Milić et Kolin, 2008). Les séchages oscillants de la campagne n°1 ont permis de diminuer le gradient respectivement de 2,5% et de 14,0% par rapport au séchage classique. Les séchages oscillants de la campagne n°2 produisent une diminution de l'ordre de 9,6% et de 9,3% respectivement. Aussi, nous constatons que pour les oscillations à ΔX_{eq} variable, utilisées dans la campagne n°1, la période semble avoir une influence puisque seules les oscillations de 12 heures conduisent à une amélioration marquante de ce paramètre. Néanmoins, à ΔX_{eq} constant (campagne n°2) la diminution du gradient obtenu grâce aux oscillations ne s'avère influencée par la période, la diminution du gradient étant la même pour les deux périodes étudiées. Cela met en évidence l'effet couplé de la période et de l'amplitude des oscillations. Comme cela a déjà été mentionné, pendant la plus grande partie du séchage l'amplitude utilisée pour la campagne n°1 était bien plus élevée que celle de la campagne n°2.

A noter également, que les gradients de cette dernière sont plus faibles que ceux de la campagne n°1. La conduite n°1, bien que plus douce, se durcit durant les 50 dernières heures avec la succession de 3 paliers durant cette période, tandis que la conduite n°2 présente un seul palier. Le durcissement de la conduite n°1 peut expliquer le plus fort gradient de teneur en eau final observé pour la campagne 1.

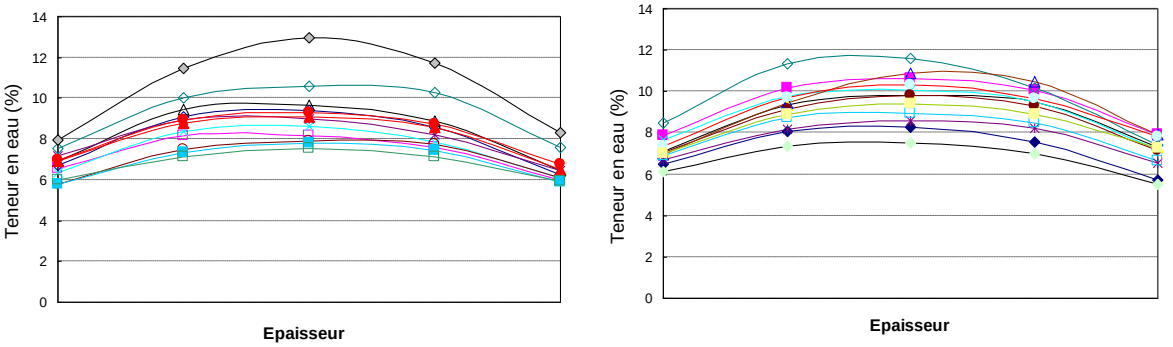


a. Première campagne b. Deuxième campagne

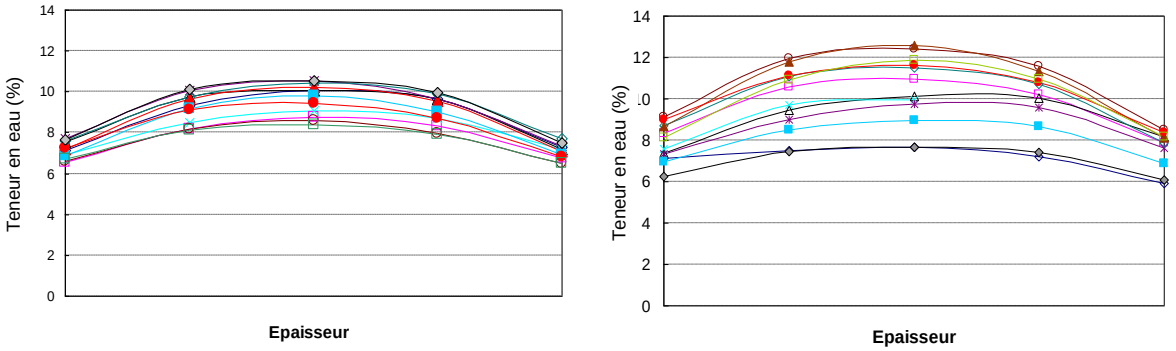
Figure 2.14. Profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur – valeurs moyennes de la pile.



Séchages classiques



Séchages oscillants 1 (3h)



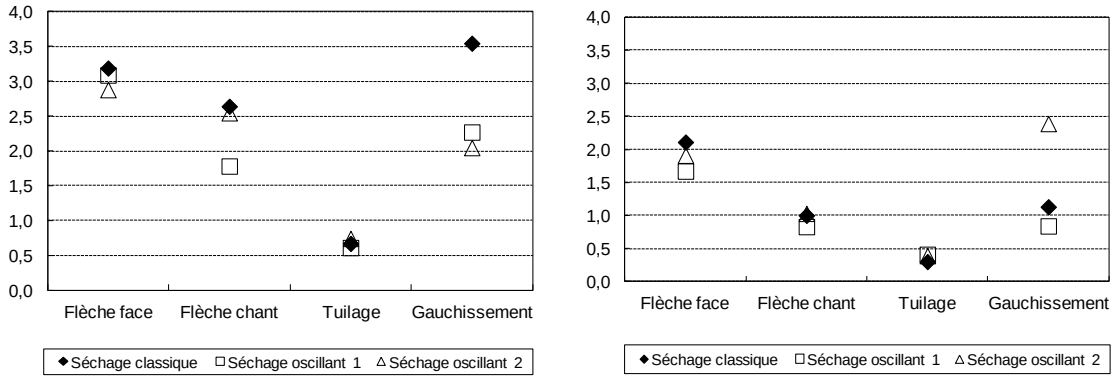
Séchages oscillants 2 (12h)

a. Première campagne b. Deuxième campagne

Figure 2.15. Profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur pour chaque échantillon.

2.4.3. Déformations

Lorsque les déformations produites pendant le séchage sont importantes, cela constitue des défauts inacceptables pour une utilisation industrielle. Dans cette thèse, nous avons mesuré avant et après séchage les déformations les plus courantes, soit la flèche de chant, la flèche de face, le tuilage et le gauchissement (Figure 2.16). Le débit des planches ainsi que l'anisotropie du retrait sont les principales causes de ces déformations, qui s'expriment pendant le procédé. La Figure 2.16 montre les déformations dues au séchage. Il est important de préciser que cela correspond à la différence entre la déformation finale et la déformation initiale. En effet, une libération des contraintes de croissance au moment de la découpe ou des déformations liées au séchage peuvent être déjà présentes avant même d'avoir commencé l'essai. Certaines déformations peuvent diminuer voir disparaître au cours du processus.



a. Première campagne b. Deuxième campagne

Figure 2.16. Déformations moyennes (axe des ordonnées en mm) produites pendant le séchage pour les deux campagnes.

Nous observons que les déformations de la deuxième campagne sont inférieures à celles de la première campagne. Le débit des planches l'explique. La campagne n°1 était constituée essentiellement de dosses, alors que la n°2 l'était de quartiers.

Les déformations dues aux séchages oscillants sont inférieures ou équivalentes à celles du séchage classique de référence. Seule exception, le gauchissement du séchage oscillant 2 de la campagne n°2. Dans la campagne n°1, l'effet des oscillations le plus notoire est celui sur le gauchissement, nettement diminué. Tenant compte que ce défaut est particulièrement contraignant pour la transformation du bois, ce résultat semblait intéressant. Cette tendance n'a pas été confirmée dans la campagne n°2. Le séchage oscillant 2 produit un gauchissement bien supérieur ; et l'oscillant 1 le diminue mais pas autant que dans la première campagne. A part cette exception, les oscillations mènent à une diminution ou un maintien des déformations obtenues sous conduite classique, tel que constaté dans d'autres travaux (Chadwick et Langrish, 1996). Cela peut s'expliquer par une relaxation plus importante des contraintes à l'intérieur de planches grâce au fluage mécanosorptif. Le changement continu de la teneur en eau dans la périphérie des planches permet l'activation de la mécanosorption tout au long du procédé. Ces résultats montrent que des oscillations pertinentes peuvent diminuer les déformations apparaissant pendant le séchage via le retrait.

2.4.4. Etat de contraintes à la fin de séchage (gap)

Afin de visualiser et quantifier les contraintes internes à la fin de séchage, nous avons utilisé la méthode du *slicing test*. En coupant une lamelle en deux morceaux (Figure 2.10), une partie des contraintes internes présentes à la fin de séchage s'exprime par une déformation de la section transversale. Lorsque le champ de teneur en eau est homogène dans la section, le gap du *slicing test* exprime l'histoire des contraintes vues par la planche au cours de l'essai. En conséquence de l'effet mémoire du bois, les planches ayant développé plus de contraintes internes pendant le séchage présentent un gap plus important.

Les valeurs présentées ici ne tiennent pas compte du facteur de correction (1,78) préconisé par la norme XP ENV 14464 pour les planches d'une largeur égale ou inférieure à 100 mm. Puisque il s'agissait d'une comparaison entre la conduite classique et les conduites oscillantes, l'application du facteur de correction ne nous a pas semblé nécessaire.

Dans cette section, nous présentons en premier lieu une analyse sur l'évolution du gap du *slicing test* dans le temps. Ensuite, les résultats sont présentés d'abord pour l'ensemble de la pile, puis plus en détail pour analyser le possible effet du débit et de la position de l'échantillon dans la pile selon la direction de l'écoulement d'air. Afin de décerner le caractère significatif des différences observées, nous avons réalisé une analyse statistique à l'aide du logiciel SAS (Statistical Analysis System) version 9.00 (SAS Institute 2002). La procédure GLM (General Linear Model) a été utilisée pour faire une analyse de variance. En cas d'effet significatif ($p < 0,05$) une comparaison multiple des moyennes a été effectuée en utilisant le test de Tukey ($p < 0,05$).).

2.4.4.1 Evolution du gap du *slicing test* dans le temps

Dans le cas des feuillus, la mesure du gap doit se faire 48 heures après la fin du séchage selon les préconisations de la norme XP ENV 14464. Néanmoins, ce délai est ressenti insuffisant pour une homogénéisation complète du gradient de teneur en eau et donc une relaxation complète des contraintes (Sandland, 2010 ; Tarvainen, 2006). En effet, nous avons observé que le gap peut évoluer au-delà de 48 heures. D'après les observations de Sandland (2010), à ce moment environ 80% seulement du gap serait exprimé.

Ainsi, le gap de la campagne n°2 a été mesuré cinq fois, soit immédiatement après le séchage, 48 heures après, 1 semaine après, 2 semaines après et 4 semaines après. La Figure 2.17 illustre ces mesures. La mesure immédiatement après la fin du séchage révèle un gap faible, inférieur à 1mm. Cela est évident puisque le gap ne peut s'exprimer complètement que lorsque le gradient de teneur en eau disparaît. L'évolution la plus importante se produit pendant les 48 heures qui suivent le séchage. Ensuite le gap augmente peu, puis il plafonne. La valeur à 48 heures correspond à 82,4%, 84,3% et 85,2% de la valeur à 4 semaines pour les séchages classique, oscillant 1 et oscillant 2 respectivement. Le délai prévu par la norme serait donc trop court pour une relaxation complète des contraintes.

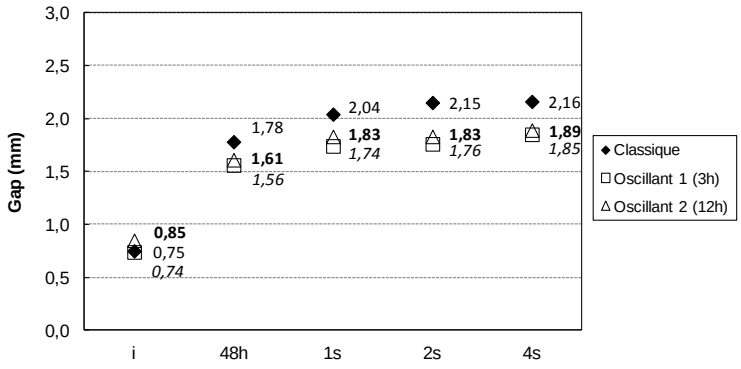


Figure 2.17. Evolution des contraintes résiduelles dans le temps.

Analysé statistiquement, à l'aide du logiciel SAS, le gap mesuré immédiatement après la fin de séchage est significativement inférieur pour un niveau de probabilité de 95%. Cela est vrai pour les trois séchages. Du point de vue statistique, le gap à 48 heures n'est pas toujours égal à celui des mesures postérieures. Dans le cas du séchage classique, il est égal au gap à 1 semaine, mais significativement inférieur à ceux à 2 et 4 semaines. Pour le séchage oscillant n°1, il est égal aux gaps à 1 et 2 semaines, tout en étant inférieur à celui de 4 semaines. Enfin, pour le deuxième séchage oscillant, aucune différence n'a été discernée. Dans deux cas sur trois, le gap à 48 heures s'est révélé significativement inférieur à ceux de mesures postérieures. D'après les résultats, le délai prévu par la norme permet en effet l'expression d'environ 84% du gap final. Si l'on veut une mesure plus tardive, les analyses montrent qu'un délai de 4 semaines serait nécessaire pour une annulation complète du gradient de teneur en eau et par conséquent de l'expression totale des contraintes résiduelles.

Grâce à cette analyse, nous avons constaté que le délai préconisé par la norme, bien que trop court pour une relaxation complète des contraintes résiduelles, est suffisant pour montrer la tendance dans un contexte pratique. Le délai de 48 heures constitue un bon compromis entre la fiabilité de la mesure et une attente raisonnable (48 heures) dans un contexte industriel.

2.4.4.2 Analyse globale des résultats sur la pile (Gap à 48h)

Dans cette partie, nous allons présenter et discuter les résultats du *slicing test*, exprimés par le gap mesuré tel que préconisé par la norme XP ENV 14464, soit 48 heures après la fin du séchage. La Figure 2.18 synthétise les résultats du *slicing test*.

Le gap moyen est inférieur pour les séchages oscillants. Il est significativement inférieur à un niveau de probabilité de 95% uniquement pour la campagne n°1. En effet, d'autres recherches ont aussi constaté une diminution du gap non significative du point de vu statistique (Terziev et al, 2002 ; Milić et Kolin, 2008). L'amplitude des oscillations peut expliquer cela, la campagne n°2 utilisant une amplitude constante tout au long du séchage mais surtout plus petite que celle de la campagne n°1 (Figures 2.1, 2.2, 2.4 et 2.5). Cela met en évidence l'importance du choix des amplitudes pour avoir un effet positif sur la qualité du produit séché. Aussi, le gap de la campagne n°1 s'est avéré systématiquement supérieur à celui de la campagne n°2. Ici, la différence de débit des planches entre

les deux campagnes pourrait expliquer cette différence, la deuxième campagne étant composée principalement de quartiers soumis à des conditions de séchage plus brutales.

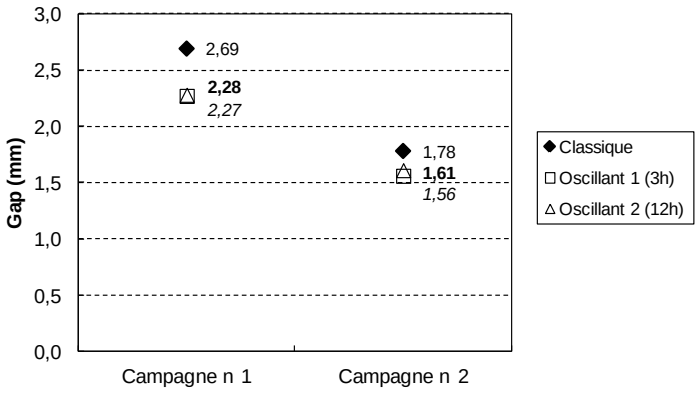


Figure 2.18. Récapitulatif des résultats du *slicing test* exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage.

Le gap mesuré est provoqué d'une part par le gradient de la teneur en eau finale, qui est inférieur pour les oscillations (Figure 2.18), et d'autre part par l'effet mémoire. Après le délai de 48 heures, le gradient de teneur en eau finale est censé s'être annulé. Prenant en considération que le gap est l'expression de contraintes internes des planches, les résultats montrent une réduction de celles-ci pour les conduites oscillantes. Les oscillations, activant le fluage mécanosorptif, ont conduit à une amélioration de la qualité du produit séché, puisque les contraintes internes sont responsables de plusieurs défauts (fentes, déformations, collapse).

Les gap moyens des deux séchages oscillants au sein d'une même campagne sont très proches, voir similaires pour la campagne n°1. Les oscillations d'une période de 12 heures ont produit un gap légèrement supérieur mais pas de façon significative. Avec une période plus longue, la couche à la périphérie de la planche affectée par le fluage mécanosorptif devait être plus importante, relaxant davantage les contraintes internes. N'ayant pas observé des différences significatives entres les deux périodes étudiées, le comportement mécanosorptif s'avère complexe et il est difficile de dégager des conclusions sur l'effet de la période. Cela montre la difficulté de choisir une période pertinente d'oscillations, choix essentiel pour obtenir des améliorations dans la qualité du produit séché. Une période pertinente devrait tenir compte particulièrement de l'essence et de l'épaisseur.

Le Tableau 2.7 présente des compléments à cette première analyse générale. Il précise, le nombre et le pourcentage d'échantillons présentant un gap plus faible, plus important ou identique lors des séchages avec oscillations. Dans tous les cas, plus de 60% des échantillons ont vu leur gap diminuer grâce aux oscillations. Même si pour certains échantillons le gap a augmenté, cela n'a pas empêché un effet global positif. En revanche, peu de différences sont observées entre les deux séchages oscillants.

Tableau 2.7. Comparaison de gap entre conduite classique et conduites oscillantes et entre conduite oscillante 1 et conduite oscillante 2.

	Première campagne				Deuxième campagne			
Comparaison entre classique et oscillants								
	Oscillant 1 (3h)		Oscillant 2 (12h)		Oscillant 1 (3h)		Oscillant 2 (12h)	
	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%
oscillant > classique	8	25	6	19	6	19	8	25
oscillant ≈ classique	2	6	-	-	5	15	2	6
oscillant < classique	22	69	26	81	21	66	22	69
Comparaison entre oscillants								
	Nombre échant.	%			Nombre échant.	%		
oscillant 2 > oscillant 1	15	47			18	56		
oscillant 2 ≈ oscillant 1	1	3			1	3		
oscillant 2 < oscillant 1	16	50			13	41		

2.4.4.3 Analyse des paramètres influant le gap

Puisque les oscillations peuvent, dans certains cas, n'avoir aucun effet sur le gap ou au contraire l'augmenter, il était important d'analyser les résultats plus en détail pour évaluer une éventuelle influence du débit de l'échantillon et de sa position dans la pile dans la direction de l'écoulement d'air, malgré sa largeur restreinte (environ 40cm). Les résultats de la Figure 2.18 sont développés en détail dans les Figures 2.19 et 2.20 correspondant à la campagne n°1 et n°2 respectivement. Les figures représentent schématiquement les piles. Dans celles-ci sont indiqués le débit de chaque échantillon, le gap de chaque échantillon, la moyenne par colonne selon le débit, la moyenne par colonne tous débits confondus et la moyenne générale de la pile. Afin de mieux apprécier les différences entre les séchages oscillants et le séchage classique, un code couleur a été utilisé. Les valeurs en noir indiquent un gap oscillant égal au gap classique ; en vert est indiqué un gap oscillant inférieur au gap classique ; et en rouge est indiqué un gap oscillant supérieur au gap classique. Pour comparer les deux séchages oscillants, des petites flèches ont été insérées à droite des gaps des séchages oscillants 2. Une flèche verte indique un gap inférieur à celui du séchage oscillant 1 ; une flèche rouge indique le contraire, soit un gap supérieur ; et le symbole ≈ indique un gap similaire. Dans les paragraphes suivants les résultats sont discutés en détail en commençant par l'effet du débit, suivi de l'effet de la position dans la pile et finalement leur effet combiné.

Lit	Séchage classique				Séchage oscillant 1 (3h)				Séchage oscillant 2 (12h)			
	C attaque	C2	C3	C fuite	C attaque	C2	C3	C fuite	C attaque	C2	C3	C fuite
8	D	D	D	M	M	D	D	M	D	FQ	D	D
	2,30	2,25	3,81	3,58	1,41	2,63	3,03	2,49	2,05 ↑	2,27 ↓	2,60 ↓	2,57 ↑
7	FQ	FQ	FQ	FQ	FQ	FQ	FQ	FQ	M	D	FQ	FQ
	3,60	3,61	3,30	2,94	3,21	2,38	2,20	1,63	2,87 ↓	2,23 ↓	2,19 ≈	2,45 ↑
6	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D	D
	1,95	1,45	3,05	3,09	3,18	1,41	2,07	1,97	2,81 ↓	1,27 ↓	2,12 ↑	2,05 ↑
5	D	D	D	FQ	D	D	D	D	D	D	D	D
	1,99	2,53	3,43	3,02	1,34	1,84	2,27	1,36	1,44 ↑	2,23 ↑	2,98 ↑	2,53 ↑
4	D	D	M	D	D	D	D	D	D	D	M	D
	2,04	1,41	1,78	3,16	1,45	2,17	1,13	2,34	1,96 ↑	2,26 ↑	2,11 ↑	2,11 ↓
3	M	D	M	M	FQ	D	D	D	D	D	FQ	D
	1,37	2,43	3,76	2,83	1,70	3,09	3,26	1,67	1,54 ↓	2,05 ↓	2,56 ↓	2,15 ↑
2	M	FQ	FQ	FQ	D	FQ	M	D	D	D	FQ	D
	2,99	2,25	2,95	3,25	3,44	2,19	2,95	3,26	2,75 ↓	2,54 ↑	2,25 ↓	2,72 ↓
1	FQ	D	FQ	FQ	D	D	FQ	FQ	FQ	D	D	FQ
	2,06	2,32	2,71	3,00	2,92	2,66	1,74	2,18	1,97 ↓	2,91 ↑	2,38 ↑	2,04 ↓

Gap par débit et colonne

	Moyenne du séchage : 2,69 *(0,71)*[3]				Moy. débit	Moyenne du séchage : 2,27 *(0,68)*				Moy. débit	Moyenne du séchage : 2,28 *(0,41)*				Moy. débit
Dosse	4[1] 2,07[2] *(0,21)*[3]	6 2,07 *(0,52)*	3 3,43 *(0,38)*	2 3,13 *(0,05)*	**15** **2,48** ***(0,70)***	5 2,47 *(1,00)*	5 2,23 *(0,66)*	5 2,35 *(0,85)*	5 2,12 *(0,73)*	**20** **2,29** ***(0,76)***	6 2,09 *(0,58)*	7 2,21 *(0,50)*	4 2,52 *(0,37)*	6 2,35 *(0,28)*	**23** **2,27** ***(0,45)***
Faux quartier	2 2,83 *(1,10)*	2 2,93 *(0,33)*	3 2,99 *(0,21)*	4 3,05 *(0,58)*	**11** **2,97** ***(0,49)***	2 2,46 *(1,07)*	2 2,29 *(0,13)*	2 1,97 *(0,33)*	2 1,91 *(0,39)*	**8** **2,15** ***(0,51)***	1 1,97	1 2,27	3 2,33 *(0,20)*	2 2,24 *(0,29)*	**7** **2,24** ***(0,21)***
Mixte	2 2,18 *(1,15)*	-	2 2,77 *(0,13)*	2 3,21 *(0,54)*	**6** **2,72** ***(0,96)***	1 1,41	1 2,65	1 2,95	1 2,49	**4** **2,37** ***(0,67)***	1 2,87	-	1 2,11	-	**2** **2,49** ***(0,54)***
Moy. colonne	**2,29** ***(0,69)***	**2,28** ***(0,69)***	**3,10** ***(0,66)***	**3,11** ***(0,23)***		**2,33** ***(0,93)***	**2,30** ***(0,52)***	**2,33** ***(0,72)***	**2,11** ***(0,60)***		**2,17** ***(0,57)***	**2,22** ***(0,46)***	**2,40** ***(0,30)***	**2,32** ***(0,27)***	

D : dosse ; FQ : faux quartier ; M : mixte. 1 : Nombre de planches dans la catégorie ; 2 : gap moyen de la catégorie ; 3 : écart – type.

Figure 2.19. Résultats de slicing test exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage – campagne n°1.

Lit	Séchage classique				Séchage oscillant 1 (3h)				Séchage oscillant 2 (12h)			
	C attaque	C2	C3	C fuite	C attaque	C2	C3	C fuite	C attaque	C2	C3	C fuite
8	M	FQ	FQ	Q	Q	FQ	M	M	FQ	FQ	FQ	Q
	1,17	1,40	1,49	1,88	1,18	1,41	1,01	1,18	0,72 ↓	1,16 ↓	1,35 ↑	1,46 ↑
7	FQ	Q	FQ	FQ	FQ	Q	FQ	FQ	FQ	Q	FQ	FQ
	0,84	2,23	1,65	1,36	0,85	1,99	1,36	1,42	1,06 ↑	1,93 ↓	1,60 ↑	1,66 ↑
6	M	Q	Q	Q	Q	Q	Q	Q	FQ	FQ	Q	Q
	1,28	1,95	1,99	1,64	1,49	1,80	1,83	1,83	0,45 ↓	1,74 ↓	1,45 ↓	2,03 ↑
5	Q	Q	Q	Q	M	Q	M	Q	Q	Q	Q	Q
	1,01	2,41	2,17	2,63	1,01	1,63	1,73	1,90	1,31 ↑	2,44 ↑	1,70 ↓	2,46 ↑
4	Q	Q	D	Q	Q	Q	D	M	M	Q	D	M
	1,04	2,38	1,72	1,91	1,54	1,70	1,39	1,88	1,05 ↓	2,03	1,54 ↑	2,08 ↑
3	Q	FQ	Q	FQ	Q	M	Q	FQ	M	FQ	Q	FQ
	1,70	1,99	2,12	2,32	1,21	1,98	1,70	1,99	0,80 ↓	1,99 ≈	1,66 ↓	1,86 ↑
2	FQ	FQ	Q	Q	FQ	FQ	M	Q	FQ	FQ	FQ	Q
	1,22	2,01	1,94	2,39	1,19	1,60	1,62	1,90	1,13 ↓	1,78 ↑	1,87 ↑	2,12 ↑
1	FQ	Q	FQ	FQ	FQ	Q	FQ	FQ	FQ	Q	FQ	FQ
	1,57	2,00	2,16	1,31	1,88	1,93	1,25	1,38	2,10 ↑	1,88 ↓	2,20 ↑	1,06 ↓

Gap par débit et colonne

	Moyenne du séchage : 1,78 *(0,47)*[3]				Moy. débit	Moyenne du séchage : 1,56 *(0,33)*				Moy. débit	Moyenne du séchage : 1,61 *(0,50)*				Moy. débit
Dosse	-	-	1 1,72	-	**1** **1,72**	-	-	1 1,39	-	**1** **1,39**	-	-	1 1,54	-	**1** **1,54**
Quartier	3[1] 1,25[2] *(0,39)*[3]	5 2,19 *(0,21)*	4 2,06 *(0,11)*	5 2,09 *(0,41)*	**17** **1,96** ***(0,44)***	4 1,36 *(0,19)*	5 1,81 *(0,15)*	2 1,77 *(0,09)*	3 1,88 *(0,04)*	**14** **1,69** ***(0,25)***	1 1,31	4 2,07 *(0,25)*	3 1,60 *(0,13)*	4 2,02 *(0,42)*	**12** **1,87** ***(0,37)***
Faux quartier	3 1,21 *(0,37)*	3 1,80 *(0,35)*	3 1,77 *(0,35)*	3 1,66 *(0,57)*	**12** **1,61** ***(0,43)***	3 1,31 *(0,52)*	2 1,51 *(0,13)*	2 1,31 *(0,08)*	3 1,60 *(0,34)*	**10** **1,43** ***(0,33)***	5 1,09 *(0,63)*	4 1,67 *(0,36)*	4 1,76 *(0,36)*	3 1,53 *(0,42)*	**16** **1,48** ***(0,51)***
Mixte	2 1,23 *(0,08)*	-	-	-	**2** **1,23** ***(0,08)***	1 1,01	1 1,98	3 1,45 *(0,39)*	2 1,53 *(0,49)*	**7** **1,49** ***(0,41)***	2 0,93 *(0,18)*	-	-	1 2,08	**3** **1,31** ***(0,68)***
Moy. colonne	**1,23** ***(0,29)***	**2,05** ***(0,32)***	**1,91** ***(0,26)***	**1,93** ***(0,49)***		**1,29** ***(0,33)***	**1,76** ***(0,21)***	**1,49** ***(0,28)***	**1,69** ***(0,31)***		**1,08** ***(0,49)***	**1,87** ***(0,36)***	**1,67** ***(0,27)***	**1,84** ***(0,44)***	

D : dosse ; Q : quartier ; FQ : faux quartier ; M : mixte. 1 : Nombre de planches dans la catégorie ; 2 : gap moyen de la catégorie ; 3 : écart – type.

Figure 2.20. Résultats de slicing test exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage – campagne n°2.

- **Effet du débit**

D'après la Figure 2.19, nous constatons que les piles de la **campagne n°1** étaient constituées essentiellement de dosses et en moindre quantité de faux quartiers. Il y avait aussi des échantillons à débit mixte, mais en raison de leur faible nombre, ils ont été écartés pour l'analyse statistique. Pour rappel, le débit mixte fait référence à un échantillon où le débit d'une extrémité est différent de celui de l'autre extrémité. Dans tous les cas, le gap moyen par débit diminue avec les oscillations. Néanmoins, seul le faux quartier s'est révélé significativement inférieur à un niveau de probabilité de 95%. Débit présentant le gap le plus élevé en conduite classique (2,97 mm), il devient le débit présentant le gap le plus faible avec les oscillations, n'ayant pas, pour autant, de différence statistiquement significative entre les deux séchages oscillants (2,15 mm et 2,24 mm respectivement). Au sein d'un même séchage, aucune différence significative n'a été décelée entre les dosses et les faux quartiers.

De leur côté, les piles de la **campagne n°2** étaient constituées principalement de quartiers et de faux quartiers (Figure 2.20). Un échantillon sur dosse et quelques échantillons au débit mixte étaient également présents, mais en raison de leur faible nombre ils ont été écartés de l'analyse statistique. On observe que le gap des quartiers, autant que celui des faux quartiers, diminue avec les séchages oscillants, la diminution étant plus importante pour le séchage oscillant n°1, à période de 3 heures. Néanmoins, ces diminutions n'ont pas un caractère significatif. Le gap moyen des quartiers est systématiquement supérieur à celui des faux quartiers. Mais cette différence est significative uniquement pour le séchage classique. On peut dire ainsi, que les oscillations suppriment l'effet débit constaté dans le séchage classique.

- **Effet de la position de la planche dans la pile**

L'effet de la position dans la pile, dans le sens de la largeur, est assez complexe car il faut tenir compte du débit des échantillons présents dans chaque colonne. Pour la **campagne n°1**, en séchage classique, tous débits confondus, on distingue deux groupes. D'une part la colonne d'attaque et la colonne 2, et d'autre la colonne 3 et la colonne de fuite, le premier groupe ayant un gap inférieur au deuxième. Cela pourrait paraitre surprenant, car l'air traversant la pile se charge d'humidité au fur et à mesure qu'il avance dans la pile. En attaque, l'air est plus sec qu'en fuite, ce qui devrait accentuer les contraintes. Toutefois, cet effet pile est sans doute négligeable pour un écoulement traversant seulement 4 planches. L'effet position de la planche dans la pile est plutôt lié à l'aéraulique propre de ce séchoir et à la géométrie de la charge de bois. L'analyse statistique révèle que seul le gap de la colonne de fuite est significativement supérieur à ceux de la colonne d'attaque et de la colonne 2. Ces dernières ne sont pas statistiquement différentes de la colonne 3, en raison de leur dispersion (exprimée par l'écart – type). En séchage oscillant, quelle que soit la période, le gap de quatre colonnes est assez homogène, éliminant toute différence significative entre elles.

En ce qui concerne la **campagne n°2**, tous débits confondus, le gap dans la colonne d'attaque s'est avéré significativement inférieur à celui de toutes les autres colonnes et cela pour les trois séchages. La colonne 3 du séchage oscillant n°1 (3h) constitue la seule exception, avec un gap certes supérieur à celui de la colonne d'attaque mais pas pour autant différent du point de vue statistique. Comme cela a été expliqué pour la campagne n°1, on supposait le gap le plus fort dans la colonne d'attaque.

- **Effet combiné débit – position**

Après avoir analysé l'effet du débit et de la position dans la pile, nous nous intéressons à l'étude de l'effet combiné de ces deux paramètres. Ainsi, l'analyse des colonnes débit par débit de la **campagne n°1**, met en évidence pour le séchage classique deux groupes distincts pour les dosses, de la même façon que pour l'analyse tous débits confondus. Dans les colonnes d'attaque et n°2 les gaps des dosses sont significativement inférieurs à ceux des colonnes n°3 et de fuite. En revanche, le gap des faux quartiers est similaire pour les quatre colonnes. Il est intéressant d'observer que les faux quartiers ont des gaps nettement inférieurs à ceux des dosses dans les colonnes d'attaque et n°2, alors que pour les deux autres colonnes les valeurs se rapprochent. Pour les séchages oscillants, aucune différence significative n'a été constatée entre les colonnes pour un seul débit. Dans le cas des dosses, les oscillations homogénéisent le gap dans les quatre colonnes. Les gap des colonnes d'attaque et n°2 ont augmenté par rapport au séchage classique, pendant que ceux des autres colonnes ont diminué. Cet effet combiné produit un gap moyen plus faible que celui du séchage classique. De leur côté, les faux quartiers ont vu leur gap diminuer dans toutes les colonnes grâce aux oscillations. Il est important de signaler que les comparaisons statistiques ont été restreintes aux cas où le nombre de répétitions (nombre d'échantillons présents par catégorie) le permettait.

Dans **la campagne n°2** les quartiers se sont révélés significativement sensibles à leur position dans la pile. La colonne d'attaque ayant un gap inférieur à celui des autres colonnes. Ce constat ne concerne pas le séchage oscillant n°2 (12h) puisque la colonne d'attaque ne contenait qu'un seul échantillon empêchant ainsi toute comparaison statistique. Avec les oscillations, les quartiers voient leur gap augmenté dans la colonne d'attaque et diminué dans toutes les autres colonnes. Cela rappelle le comportement des dosses de la campagne n°1, puisque dans la globalité le gap est diminué avec les oscillations. En revanche, les faux quartiers ont un gap statistiquement similaire dans les quatre colonnes, malgré un gap inférieur pour la colonne d'attaque. Le séchage oscillant n°2 présente une particularité à ce sujet. Du point de vue statistique, le gap de la colonne d'attaque est égal à celui de la colonne n°3. Cela expliquerait pourquoi ceux deux colonnes n'ont pas de différences significatives lorsque analysées tous débits confondus.

L'ensemble des analyses développées ci-dessus nous mène à faire deux synthèses. : une première pour chacune des campagnes, et une deuxième comme comparaison entre les deux campagnes.

Les oscillations utilisées dans la **campagne n°1** ont permis une diminution significative de l'état de contraintes à l'intérieur des échantillons. Le gap étant diminué avec les oscillations, ceci favorise la qualité du produit séché. De même, nous avons observé que les échantillons débités sur faux quartier sont significativement sensibles aux oscillations, mais leur présence limitée dans les piles (34% des échantillons maximum), ne suffit pas à expliquer la diminution globale du gap. Aussi, nous avons constaté que l'effet des oscillations sur les échantillons débités sur dosse est lié à leur position dans la pile et ce malgré une largeur de pile très limitée. Ainsi, on peut conclure pour cette première campagne que la diminution globale du gap observée est due principalement aux oscillations utilisées, sans différence avérée entre les deux séchages oscillants aux périodes de 3 heures et de 12 heures.

L'analyse de la **campagne n°2** dévoile une diminution globale mais non significative de l'état de contraintes, exprimé par le gap. En outre, la distinction significative entre les quartiers et les faux quartiers observée pour le séchage classique est supprimée grâce aux oscillations, quelle que soit la période. De plus, nous avons constaté que les quartiers sont sensibles à leur position dans la pile, la colonne d'attaque favorisant un gap significativement plus faible. Le peu de différences marquantes, constatées grâce à l'analyse statistique approfondi, explique le résultat général de la campagne : l'utilisation des oscillations entraîne une diminution globale mais non significative du gap.

En toute logique, nous pouvons désormais faire une deuxième synthèse de **comparaison globale entre les deux campagnes**. Seules les améliorations apportées par la campagne n°1 se sont avérées significatives du point de vue statistique. Les oscillations de 12 heures n'ont pas apporté de bénéfices supplémentaires par rapport aux oscillations de 3 heures bien que l'épaisseur affectée par l'activation mécanosorptive soit censée supérieure pour les périodes plus longues. Il est donc nécessaire d'approfondir la réflexion à ce sujet. Les différences entre les deux campagnes peuvent s'expliquer par les caractéristiques des amplitudes utilisées. La campagne n°1 comportait des oscillations de X_{eq} variable, allant de 9% de crête à crête en début de séchage jusqu'à 1,2% vers la fin de séchage, alors que les oscillations de la campagne n°2 avaient une amplitude constante, de l'ordre de 3% (Figures 2.1 à 2.4). Plus que le caractère variable ou constant des amplitudes, c'est plutôt la magnitude de celle–ci qui semble être à l'origine des différences constatées. En effet, les oscillations de la campagne n°1 étaient nettement plus grandes pendant la plus grande partie du procédé. En oscillant dans une plage de teneur en eau plus large, le fluage mécanosorptif serait activé d'avantage. Cela impliquerait aussi que l'effet de l'amplitude des oscillations serait particulièrement important pendant les heures qui suivent le passage de toute la planche dans le domaine hygroscopique.

Vu la disponibilité de données issues de l'ensemble des mesures effectuées dans cette partie de la thèse, une **étude de corrélation des variables** a été réalisée afin d'examiner l'existence d'une liaison entre elles. Elle est présentée en détail dans l'annexe A. De cette analyse, nous n'exposerons que les conclusions, parfois évidentes, qui s'en sont dégagées :

- le gap à 48 heures et le gap à 4 semaines ont une corrélation presque parfaite,
- le gap, qu'il soit à 48 heures ou à 4 semaines, est fortement corrélé avec la teneur en eau finale et avec le gradient de teneur en eau finale,
- les déformations présentes avant le séchage et celles produites lors du séchage ne présentent statistiquement aucun lien.

Bien qu'intéressante, cette analyse n'a mis en évidence aucune corrélation linéaire significative entre le gap et les déformations, ou entre les déformations et la teneur en eau. En tout cas, la constatation des fortes corrélations entre la teneur en eau finale et le gradient de teneur en eau et entre celles – ci et les gap à 48 heures et à 4 semaines, constitue un résultat tout à fait intéressant. Dans ce cas précis, de modèles simples de régression linéaires permettraient la prédiction de paramètres dépendants où, éventuellement, de ceux étant plus difficiles ou contraignants à mesurer.

Conclusion

Cette partie de la thèse a cherché à explorer en conditions semi-industrielles, l'effet des conduites oscillantes de séchage sur la qualité globale du bois séché. Les résultats montrent l'intérêt de leur utilisation pour améliorer la qualité du bois séché. Les conduites oscillantes étudiées ont dévoilé qu'il est possible d'améliorer l'homogénéité de la teneur en eau finale, le gradient de la teneur en eau finale dans l'épaisseur, les déformations et les contraintes résiduelles exprimées par le gap. Ces résultats sont en accord avec ceux évoqués dans la littérature, où des améliorations ont été répertoriées.

Les deux campagnes d'essais réalisés ont permis d'étudier l'effet de la période et, indirectement, l'effet de l'amplitude. Le caractère variable ou constant de l'amplitude pendant la durée du séchage ne semble pas avoir un effet déterminant. Les différences observées entre les deux campagnes seraient plutôt produites par la différence de l'amplitude de X_{eq}, particulièrement au moment du passage dans le domaine hygroscopique. D'après les résultats, des amplitudes plus fortes au début du séchage et jusqu'au passage du cœur de la planche dans le domaine hygroscopique seraient à l'origine des améliorations les plus marquées et statistiquement significatives, particulièrement pour les contraintes résiduelles exprimées par le gap. L'effet de la période reste difficile à interpréter, car les résultats entre les deux conduites oscillantes présentent peu de différences significatives. Des améliorations supplémentaires étaient attendues pour les séchages oscillants à période longue (12 heures), mais cela n'a pas été confirmé. Dans la plupart des cas, les améliorations apportées par les séchages à période de 12 heures ont été similaires à celles des séchages à période de 3 heures.

Les analyses statistiques complémentaires ont permis d'étudier, d'une part, la pertinence du délai préconisé par la norme XP ENV 14464 pour la mesure du gap, et d'autre part, l'existence de corrélations linéaires significatives entre les variables mesurées. Les résultats montrent, dans deux cas sur trois, que le délai de 48 heures permet l'expression d'environ 84% du gap final. Une deuxième mesure, à 4 semaines, permettrait l'annulation complète du gradient de la teneur en eau finale et par conséquent l'expression totale des contraintes résiduelles. Cependant, la très forte corrélation observée entre le gap à 48 heures et le gap à 4 semaines incite à l'utilisation d'un modèle de régression linéaire pour le calcul du gap à 4 semaines. Le gap à 48 heures et à 4 semaines se sont aussi avérées fortement corrélées à la teneur en eau finale et au gradient de teneur en eau finale. Ces derniers ont aussi une forte corrélation entre elles. Ainsi, on peut constater que des teneurs en eau finales plus faibles permettent de diminuer le gradient de teneur en eau finale, et par conséquent les contraintes résiduelles de séchage exprimées par le gap.

D'une façon générale, on peut conclure que les améliorations observées seraient dues au fluage mécanosorptif activé grâce au changement continu de l'humidité de la périphérie des échantillons avec l'utilisation de conduites oscillantes de séchage. Ainsi, les résultats de cette partie de la thèse montrent que l'amélioration de la qualité du produit séché est possible avec l'utilisation de conduites oscillantes. Néanmoins, le manque de différences entre les deux périodes d'oscillations utilisées nous mène à une réflexion plus approfondie sur l'activation du fluage mécanosorptif dans l'épaisseur de la planche. Il est indispensable de comprendre comment cette activation évolue dans l'épaisseur. Puisque le moteur de la mécanosorption est le changement cyclique de la teneur en eau d'équilibre,

le chapitre suivant est consacré aux transferts d'humidité dans l'épaisseur de la planche, afin de connaître les zones affectées par les oscillations et donc les zones où le fluage mécanosorptif est activé.

Chapitre 3: Etude théorique des transferts internes et de la mécanique du séchage d'une planche soumise à des conditions oscillantes

L'activation de la mécanosorption par les conduites oscillantes vise à relaxer les contraintes de séchage à l'intérieur des planches. Pourtant, l'ampleur de l'activation mécanosorptive est hétérogène dans l'épaisseur de la planche. Elle diminue de la surface vers le cœur en raison de l'effet d'amortissement dû à la diffusion. Pour mieux comprendre l'évolution de ce champ, il est essentiel de comprendre d'abord les variations de l'humidité dans l'épaisseur de la planche soumise aux conditions oscillantes.

Cette atténuation est influencée par les caractéristiques physiques du matériau, particulièrement les caractéristiques liées à la diffusion, et par les conditions aux limites. L'évolution du champ d'humidité dans l'épaisseur dépendra aussi de l'amplitude et de la fréquence des oscillations des conditions climatiques dans le séchoir, paramètres qui peuvent être choisis par l'opérateur, dans la limite des possibilités techniques.

Dans un premier temps, ce chapitre vise à analyser l'évolution des oscillations d'humidité dans l'épaisseur de la planche. Deux approches ont été explorées pour cette étude : d'abord une approche analytique simplifiée de la migration diffusive sous conduite oscillante et ensuite une approche numérique avec l'aide de l'outil *TransPore* dans sa version 1D, capable de considérer l'intégralité des transferts couplés de masse et de chaleur au cours du séchage. Dans un deuxième temps, ce chapitre présente une approche numérique du comportement mécanique en conduite oscillante. Pour cela, le module mécanique de la version 1D du code *TransPore* a été utilisé.

3.1. Approche analytique simplifiée des transferts de masse dans l'épaisseur de la planche

Cette partie est consacrée à l'étude des transferts d'humidité dans l'épaisseur de la planche par un modèle analytique. Sous des conditions oscillantes de température et ou d'humidité relative de l'air, l'humidité dans l'épaisseur de la planche alterne des phases d'adsorption et de désorption. En raison de la résistance aux transferts de masse et de chaleur entre l'air et le bois et aussi à l'intérieur de bois, l'amplitude des oscillations de la teneur en eau décroît progressivement de la surface d'échange vers le cœur de la planche. Ainsi, l'amplitude est-elle plus élevée à la périphérie de la planche que dans les couches plus profondes. Pour étudier l'évolution de l'amplitude des oscillations de la teneur en eau dans la section de la planche, nous avons utilisé une approche analytique simplifiée de la diffusion de l'humidité dans le matériau.

3.1.1. Modèle de migration diffusive sous conduite oscillante

Dans cette approche analytique, on considère uniquement les transferts dans le domaine hygroscopique selon une seule dimension afin de simplifier les calculs. Dans les séchoirs, les planches sont empilées côte à côte, les transferts sont ainsi prépondérants dans l'épaisseur des planches car leurs deux faces sont exposées au courant d'air. En conséquence, la dimension prise en compte par notre approche analytique est l'épaisseur de la planche. Aussi, le coefficient de diffusion massique

est-il supposé indépendant de la teneur en eau et de la température. Dans ces conditions, l'équation de conservation de la masse donne :

$$\frac{\partial U_{(x,t)}}{\partial t} = D\frac{\partial^2 U_{(x,t)}}{\partial x^2} \tag{3.1}$$

$$U_{(x,t)} = X_{(x,t)} - \overline{X}_{eq} \tag{3.2}$$

où x est la distance à la surface (m), t est le temps (s), $X_{(x,t)}$ est la teneur en eau pour un x donné à un instant t, X_{eq} est la teneur en eau d'équilibre moyenne et D le coefficient de diffusion massique ($m^2.s^{-1}$). Pour obtenir une solution unique, l'équation 3.1 doit être assortie de conditions aux limites et de conditions initiales. Pour obtenir une solution analytique simple, les conditions aux limites choisies supposent que la résistance aux transferts dans la couche limite est négligeable. Les conditions oscillantes imposées à l'air sont donc directement appliquées à la surface du bois (conditions de Dirichlet). Par ailleurs, la teneur en eau initiale est égale à la teneur en eau à l'équilibre :

$$U_{(0,t)} = A\cos(\omega \cdot t) \tag{3.3}$$

$$U_{(x,0)} = 0 \tag{3.4}$$

Pour résoudre cette équation de manière analytique, on considère les hypothèses suivantes :

- La température est supposée homogène à l'intérieur du matériau et égale à la température ambiante.
- Le coefficient de diffusion est indépendant à la fois de la teneur en eau et de la température.
- La planche est supposée être un milieu semi – infini.
- La solution est obtenue au régime établi (la mise en régime transitoire n'est pas traitée)

Les variations sinusoïdales de la teneur en eau invitent à passer en notation complexe. En utilisant la technique classique de séparation des variables pour résoudre l'équation de conservation de la masse (Crank, 1975), on obtient :

$$U_{(x,t)} = \Delta X_{\max(x=0)} \cdot \exp\left(-\sqrt{\frac{\pi}{\tau D}}\, x\right) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{\tau} t - \sqrt{\frac{\pi}{\tau D}} x\right) \tag{3.5}$$

où $\Delta X_{\max(x=0)}$ est l'amplitude de crête à crête de la variation de la teneur en eau à la surface, et τ est la période (s).

Cette solution n'est pas valide pour des temps courts car on suppose que le matériau suit un régime périodique stationnaire. Donc, dans notre cas, cette solution est applicable en fin de séchage quand la planche s'approche de la teneur en eau d'équilibre.

La diffusion massique doit être choisie en fonction de l'essence et du débit de la planche mais aussi en fonction de la température et de la teneur en eau d'équilibre en fin de séchage. Pour estimer la valeur du coefficient de diffusion, dans ces conditions, une loi d'Arrhenius est utilisée (Siau 1984) :

$$D(T_K, X) = \exp\left(a - \frac{b}{T_K} + c \cdot X\right) \tag{3.6}$$

où T_K est la température (K), X est le la teneur en eau, a est une constante dépendant de la morphologie du bois, b = 4300, et c = 9,8.

La constante a dépend de l'essence et du débit. Selon les valeurs moyennes de coefficient de diffusion identifiées par Kouchadé (2004) pour le bois de hêtre a est égale à -9,996 pour la direction tangentielle et -9,59 pour la direction radiale.

A partir de ce modèle analytique, nous avons tracé des courbes représentant ΔX_{max} en fonction du temps à la surface ($x = 0$) et pour une couche plus profonde ($x = 4$ *mm*) (Figure 3.1). On constate clairement que ΔX chute fortement lorsque l'on s'éloigne de la surface d'échange. On remarque également un déphasage entre les courbes.

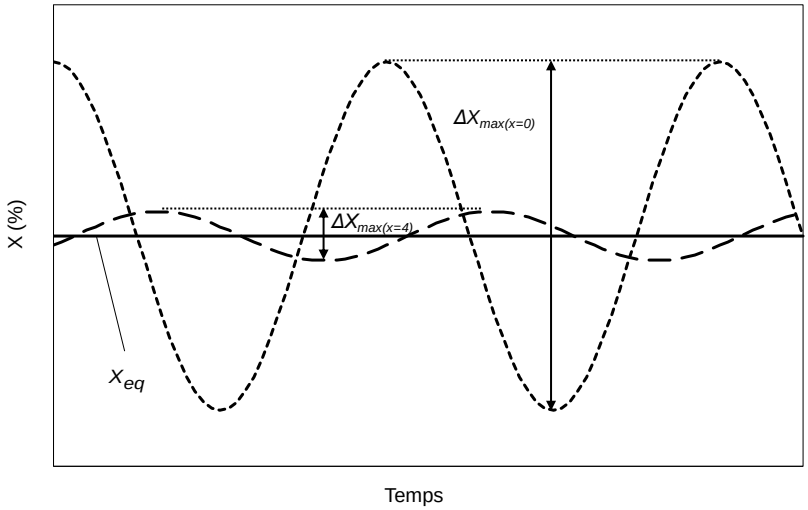


Figure 3.1. Schéma de l'évolution sinusoïdal de la teneur en eau pour $x = 0$ (surface) et $x = 4$ *mm*.

3.1.2. Effet de la période et du coefficient de diffusion

Le modèle analytique a été utilisé pour étudier l'effet de la période des conditions climatiques sur les variations de teneur en eau. Ainsi, le calcul a-t-il été fait pour une planche de hêtre débitée sur dosse, séchée en conduite oscillante à 60°C de température sèche, pour 10% de teneur en eau d'équilibre et $\Delta X_{max(x=0)}$ égal à 1%. Dans ces conditions, et d'après l'équation 3.6 on estime que le coefficient de diffusion D est égal à $4{,}52\times10^{-10}$ m^2s^{-1}, la valeur considérée de a étant -9,59. Afin de mieux visualiser l'atténuation de l'intensité des oscillations dans l'épaisseur de la planche, nous avons calculé un ΔX adimensionnel, noté ΔX^*, ainsi :

$$\Delta X^* = \frac{\Delta X_{\max(x)}}{\Delta X_{\max(x=0)}} \tag{3.7}$$

Selon ce rapport, ΔX^* à la surface ($x = 0$) est toujours égal à 1. L'utilisation de ΔX^* permet aussi de supprimer l'effet de l'amplitude ($\Delta X_{max(x=0)}$). Dans notre cas, il était question d'étudier l'effet de la période dans les conditions précisées dans le paragraphe précédent. La Figure 3.2 décrit ΔX^* en

fonction de la demi épaisseur de la planche pour différentes périodes. On observe que seule la partie périphérique de la planche est affectée par les oscillations avec une diminution exponentielle de l'intensité de Δ*X** (voir équation 3.5). Cette réduction de Δ*X** est très forte pour de courtes périodes. Notamment, une période de 1 heure n'affecte que les trois premiers millimètres de l'épaisseur de la planche, alors qu'une période de 12 heures affecte la planche jusqu'à une profondeur de presque 10 mm à partir de la surface. La Figure 3.2 montre en particulier l'atténuation des oscillations pour différentes périodes et épaisseurs. Ainsi, selon cette figure, plus la période est longue plus profondes seront les couches affectées par l'oscillation de teneur en eau. Cette information se révèle très utile puisque les oscillations de teneur en eau sont l'élément activant le fluage mécanosorptif du matériau sous contrainte.

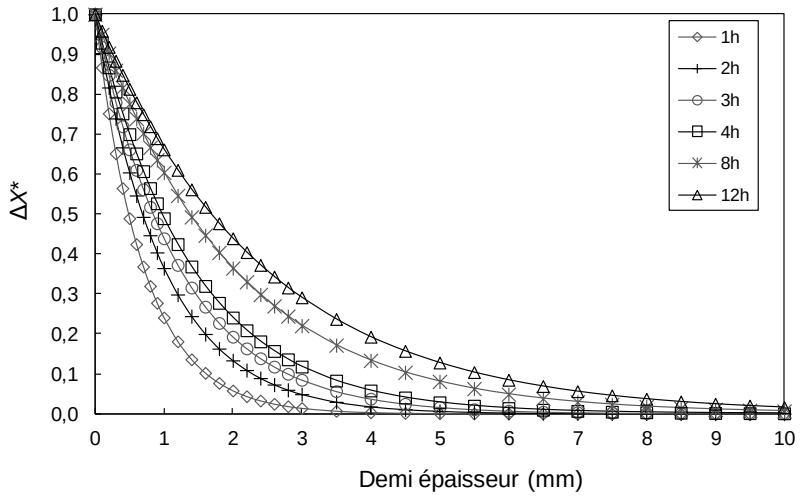


Figure 3.2. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (Δ*X**) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et plusieurs périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%, D=4,52×$10^{-10}$$m^2s^{-1}$]

L'atténuation des oscillations, obtenue à partir de l'équation 3.5, est également affectée par le coefficient de diffusion. La Figure 3.3 illustre la dépendance du coefficient de diffusion avec la température et la teneur en eau dans le domaine hygroscopique (équation 3.6). Le coefficient augmente de façon exponentielle avec la température et la teneur en eau. Le cumul de ces effets explique les fortes valeurs de la diffusivité avec des teneurs en eau élevées proches du PSF.

Pour étudier l'effet de l'activation de la diffusion sur les variations de teneur en eau, nous avons fait un second calcul dans les mêmes conditions que celles précisées dans le premier paragraphe de cette section à l'exception de la teneur en eau d'équilibre, désormais de 5% au lieu de 10%, situation pouvant être rencontrée dans les conduites de séchage en fin de cycle. Le coefficient de diffusion est plus faible, estimé à 2,77×$10^{-10}$$m^2s^{-1}$, la résistante au transfert interne est donc plus importante. Ce second calcul a été effectué pour deux périodes contrastées, soit 1 heure et 12 heures, dans le but d'analyser l'effet combiné de la période et du coefficient de diffusion. Tel qu'illustré dans la Figure 3.4 l'atténuation des oscillations est évidement plus prononcée pour la teneur en eau d'équilibre plus faible, soit 5%. Nous remarquons également que l'effet de cette hydroactivation de la diffusion s'exprime davantage pour des périodes longues.

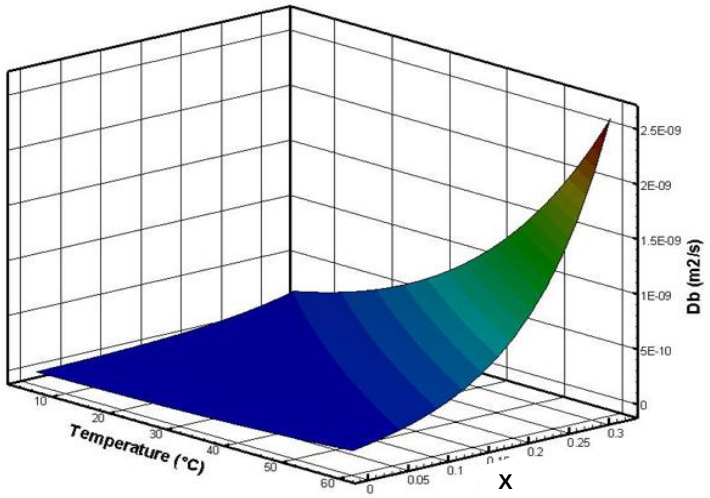


Figure 3.3. Variation du coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois selon la température et la teneur en eau.

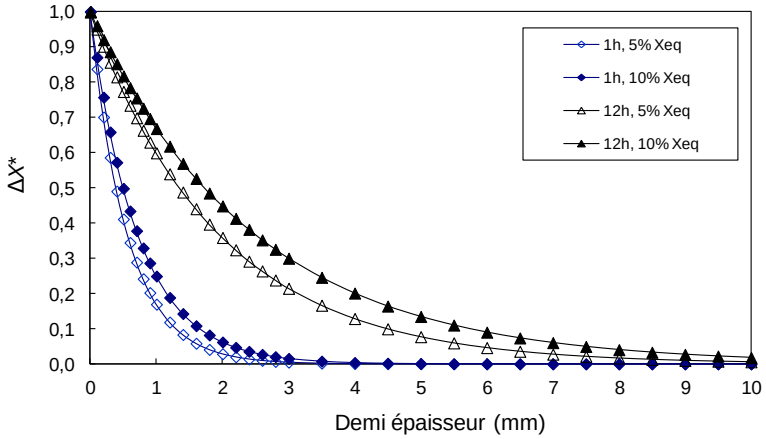


Figure 3.4. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour un coefficient de diffusion estimé à une teneur en eau d'équilibre de 5% et 10% et pour deux périodes. [60°C, ΔX_{eq} 1%]

3.1.3. Proposition d'un outil d'aide pour le choix des conduites oscillantes

A partir des informations recueillies grâce au modèle, il semblait pertinent de proposer un outil d'aide pour l'élaboration de tables de séchage. Dans ce but, il était nécessaire d'intégrer les informations fournies par le modèle dans une seule courbe, indépendamment de la valeur de diffusivité de masse, de la période et de l'épaisseur de la planche. Pour cela, nous avons calculé une demi épaisseur adimensionnelle, nommée e^* :

$$e^* = \frac{e\sqrt{1/\tau}}{\sqrt{4D}} \tag{3.8}$$

où e est la demi épaisseur de la planche. Ainsi, la variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) donne une courbe unique, que l'on peut considérer comme un abaque.

A partir de cette courbe unique (Figure 3.5), on peut déterminer l'intensité des oscillations de la teneur en eau de la surface au cœur de la planche, indépendamment de la teneur en eau d'équilibre X_{eq}, des périodes et même de la température sèche. Cet abaque, en combinaison avec l'équation 3.8 permet de visualiser la proportion de l'épaisseur perturbée par les oscillations de la teneur en eau. Dans la Figure 3.5 quelques points ont été insérés afin d'expliquer son utilisation. Chaque point représente le cœur de la planche, obtenu à partir de l'équation 3.8. Plus ce point se situe à des abscisses élevées, moindre sera la proportion de la demi-épaisseur affectée par les oscillations. La position du point est dépendante de la période, de X_{eq} et de la température sèche. Parmi les exemples illustrés dans l'abaque, celui permettant l'activation des oscillations dans la plus grande proportion de la demi-épaisseur est celui avec l'abscisse e^* le plus faible. Il correspond à un séchage avec des oscillations de 12 heures, pour X_{eq} de 13% et une température sèche de 80°C. Hélas, cet exemple sort des hypothèses du modèle analytique puisque le cœur de la planche étant perturbé par les changements de teneur en eau, l'hypothèse de milieu semi-infini n'est pas valide. Rappelons que l'estimation quantitative de la variation de teneur en eau en régime oscillant établi est valide uniquement pour les planches d'épaisseur supposée semi infinie. Ainsi, les cinq points illustrés aux faibles valeurs de e^* sont à prendre uniquement à titre d'exemple.

Tout en tenant compte des restrictions du domaine de validité, le modèle analytique ici développé est un bon outil pour étudier l'effet des périodes et de l'atténuation des changements de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche. Sa simplicité le rend utilisable par le scientifique, l'ingénieur et particulièrement par les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué.

Cela dit, il est nécessaire d'étudier les transferts d'humidité dans l'épaisseur de la planche par une approche plus réaliste prenant en compte :

- La migration de l'humidité concernant autant l'eau libre, l'eau liée que la vapeur d'eau
- Les résistances aux transferts convectifs externes de masse et de chaleur
- Le couplage des transferts de chaleur et de masse au sein du matériau
- La planche en tant qu'un milieu fini.

Une telle approche nécessite un outil plus complexe qu'un modèle analytique. Ainsi, dans la section suivante, une approche numérique des transferts couplés de masse et de chaleur se produisant pendant le séchage d'un milieu poreux tel que le bois a été réalisée.

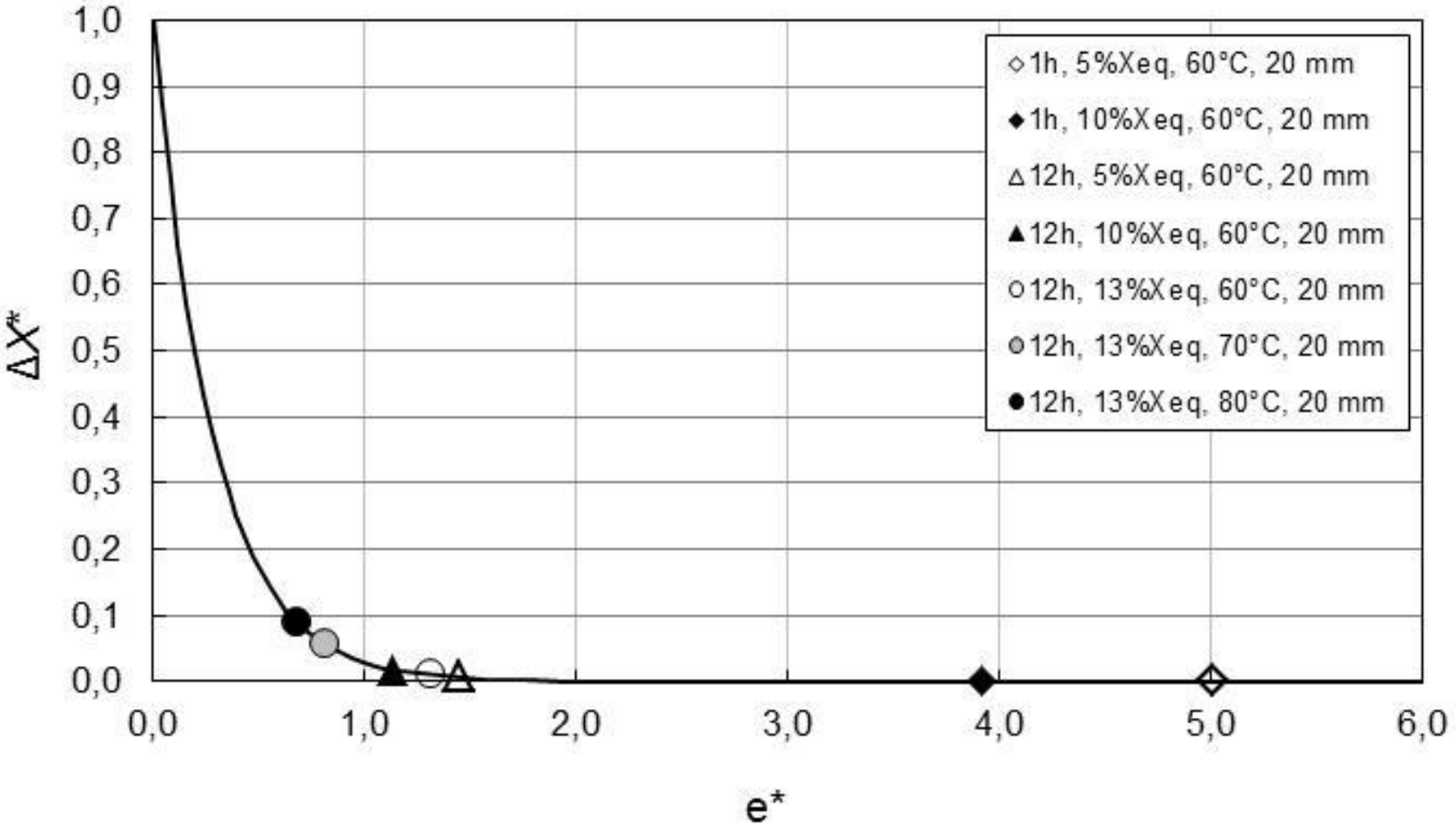


Figure 3.5. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (Δ*X**) en fonction de la demi épaisseur adimensionnelle de la planche (e*).

3.2. Approche numérique des transferts couplés de masse et de chaleur

Afin d'étudier l'atténuation des oscillations avec des conditions plus réalistes que celles du modèle analytique, nous avons utilisé le code numérique *TransPore* développé par P. Perré. Cet outil de simulation numérique permet de simuler les transferts couplés de masse et de chaleur se produisant pendant le séchage au sein du milieu poreux tel que le bois. La discrétisation des équations de conservation est effectuée par la méthode des volumes de contrôle. Ses prédictions ont été validées pour un large éventail de conditions de séchage, lui donnant un potentiel prédictif fondé pour les transferts de chaleur et de masse dans le bois. La formulation physique des transferts masse/chaleur intégrée dans le code *TransPore* permet une estimation beaucoup plus réaliste de l'évolution du champ de teneur en eau lors du séchage que le modèle analytique. Une description détaillée de la formulation physique du modèle et de sa résolution numérique pourra être trouvé dans les publications des travaux de Perré et Degiovanni (1990), Perré et Turner (1996, 1999).

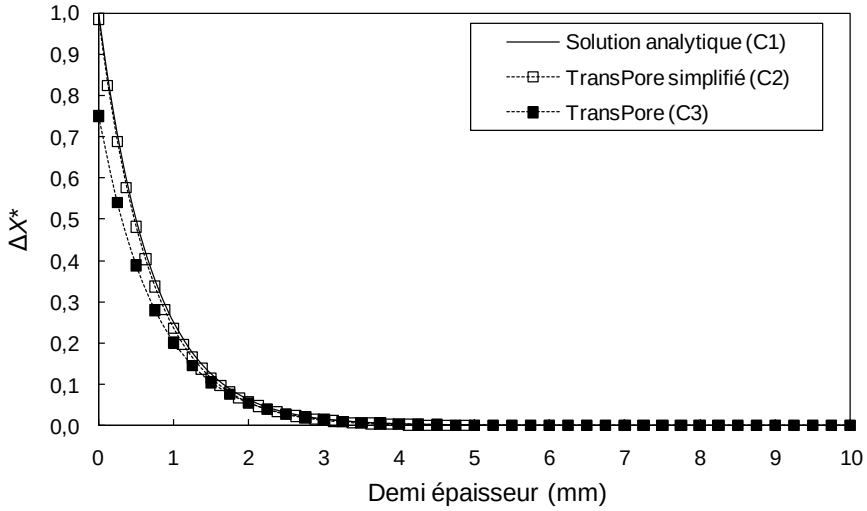
Pour cette étude, nous avons utilisé la version monodimensionnelle (1-D) de *TransPore* pour simuler le séchage oscillant en régime périodique stationnaire, configuration du modèle analytique, mais aussi en régime périodique non établi. Le temps de calcul du séchage d'une planche est d'environ 0,1 seconde sur un ordinateur de bureau standard.

3.2.1. Apports du code numérique dans la compréhension des phénomènes de transfert en régime périodique stationnaire

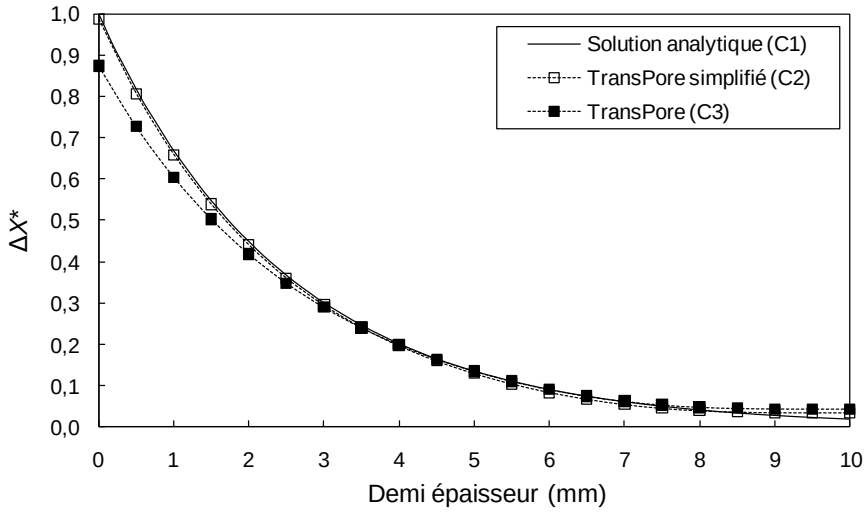
3.2.1.1 Effet de la période

L'étude des transferts réalisée avec le modèle analytique était restreinte à la troisième phase du séchage, lorsqu'un régime périodique stationnaire est établi, et cela pour des hypothèses assez restrictives pour résoudre analytiquement l'équation de transfert massique. L'utilisation de l'outil numérique *TransPore* permet une estimation beaucoup plus réaliste des transferts au sein du milieu poreux soumis à des conditions climatiques fluctuantes. Nous avons simulé le séchage oscillant d'une planche de hêtre débitée sur dosse, séchée à 60°C de température sèche, pour X_{eq} final de 10%, $\Delta X_{max(x=0)}$ égale à 1% et deux périodes contrastées, soit 1 et 12 heures. La Figure 3.6 décrit la variation adimensionnelle de teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi-épaisseur d'une planche épaisse obtenue par la simulation numérique et le modèle analytique (courbes C1). Dans un premier temps, *TransPore* a été simplifié pour obtenir les mêmes hypothèses que celles du modèle analytique : coefficient de diffusion constant, résistances des transferts convectifs externes négligés et pas de couplage entre transfert de masse et transfert de chaleur au sein du milieu poreux. Avec ces restrictions, la courbe de simulation C2 est identique à la courbe analytique C1. La deuxième courbe de simulation (C3) prend en compte la dépendance du coefficient de diffusion avec l'humidité et avec la température, la résistance aux transferts externes et le couplage entre les transferts de masse et de chaleur. Il n'est pas surprenant de constater que le modèle analytique échoue à proximité de la surface d'échange, particulièrement pour la période de 1 heure. Cela est

principalement dû au couplage chaleur/masse et à la résistance aux transferts dans la couche limite. Dans ce cas, l'amplitude de la variation de teneur en eau à la surface de la planche n'atteint que 75 % de la valeur donnée par l'équilibre avec l'air ambiant.



a. 1 heure



b. 12 heures

Figure 3.6. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi épaisseur de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10%: solution analytique et simulation numérique. [60°C, ΔX_{eq} 1%, dosse]

Aussi, il était pertinent d'observer l'influence des paramètres pris en compte par *TransPore* dans l'allure des courbes. L'ajout progressif de ces paramètres devrait éloigner progressivement la courbe simulée de celle obtenue à partir du modèle analytique. Pour cela, quelques simulations ont été faites en rajoutant un à un les paramètres que le modèle analytique néglige. En ajoutant des résistances aux transferts externes de masse et de chaleur on observe un léger décalage à la surface. La simulation suivante prend en compte la dépendance de la diffusion à la température et à la teneur en eau. Pourtant, la courbe obtenue est pratiquement identique à la précédente. En effet, en régime oscillant établie, l'amplitude de la variation de teneur en eau est trop faible dans le matériau pour

modifier le champ de cette grandeur via l'hydroactivation de la diffusion. Pour la dernière simulation, on rajoute le couplage entre les transferts de masse et de chaleur. Le décalage de la courbe au niveau de la surface d'échange est net. L'allure de la courbe est ainsi clairement modifiée et montre l'importance de la prise en compte du couplage masse/chaleur dans cette estimation des changements de teneur en eau. On note également que cette courbe rejoint celle du modèle analytique pour des valeurs de *e** supérieurs à 1.

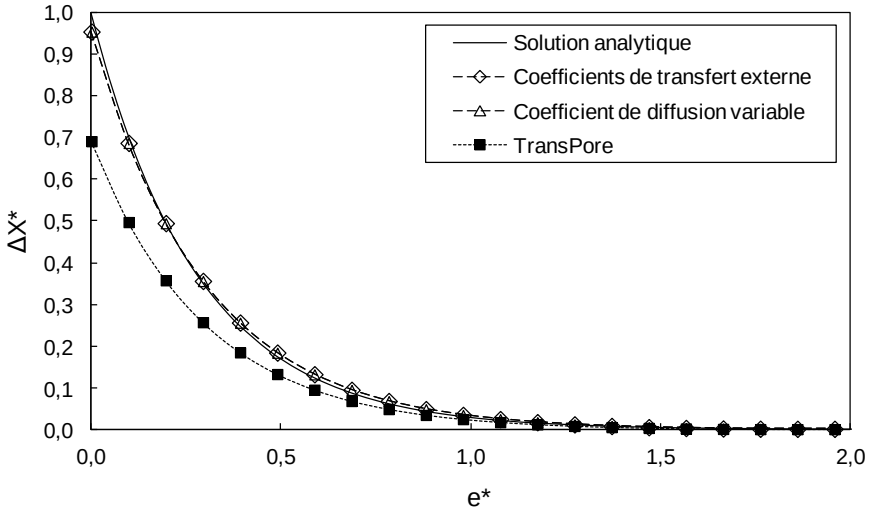
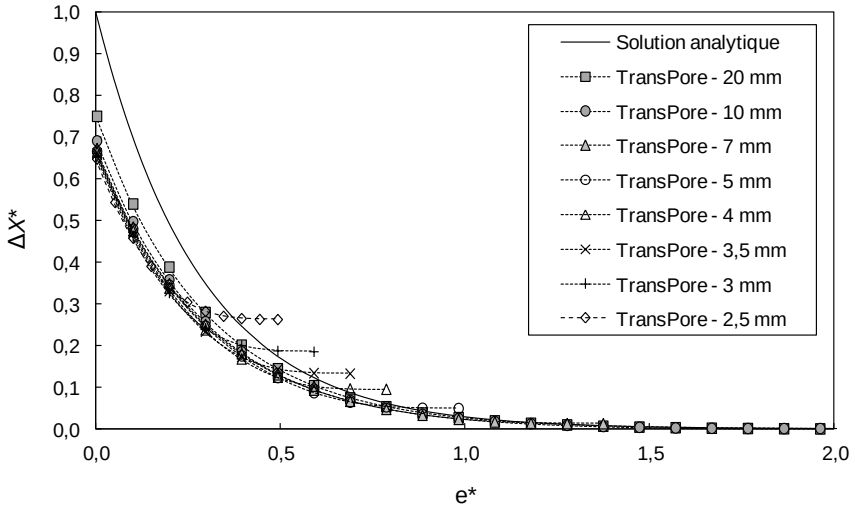


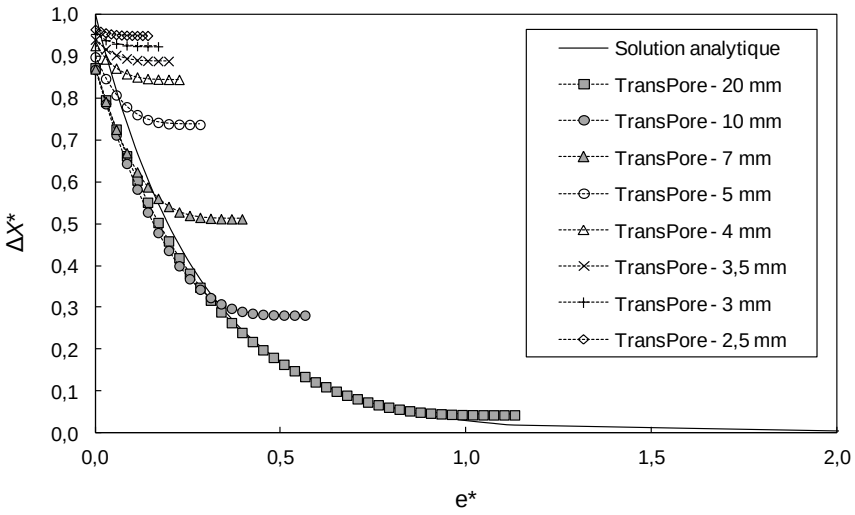
Figure 3.7. Ajout progressif de coefficients de transferts externes de masse et de chaleur, coefficient de diffusion dépendant de T et H, couplage de transferts de masse et de chaleur [60°C, teneur en eau d'équilibre 10%, ΔX_{eq} 1%, 1h, avec résistance à la diffusion.]

3.2.1.2 Effet de l'épaisseur

Puisque pour *TransPore* la planche est un milieu fini, nous avons étudié l'effet de l'épaisseur de la planche dans l'atténuation des oscillations de teneur en eau. Différentes épaisseurs ont été testées pour deux périodes, soit 1 et 12 heures (Figure 3.8). Avec la période longue et de faibles épaisseurs, on se rapproche du comportement de petits corps (courbe presque plate). En effet la résistance aux transferts internes est réduite. Il reste seulement la résistance aux transferts externes et donc ΔX^* en surface se rapproche d'une valeur légèrement inférieure à 1. Dans ce cas, le cœur de la planche est presque autant perturbé par les oscillations que la surface d'échange (Figure 3.9). Lorsque l'épaisseur augmente, la résistance aux transferts internes gagne en importance et ΔX^* tend vers une valeur plus faible et dépendante de la période. Le modèle analytique, qui suppose le cœur non perturbé, ne peut donc être valide que pour des épaisseurs supérieures à 20 mm, sans oublier qu'à la surface d'échange il échoue. Un facteur correctif à la surface permettrait d'améliorer le modèle analytique pour des planches ayant une épaisseur supérieure à 20 mm. Ceci est traité dans la partie suivante.



a. 1 heure

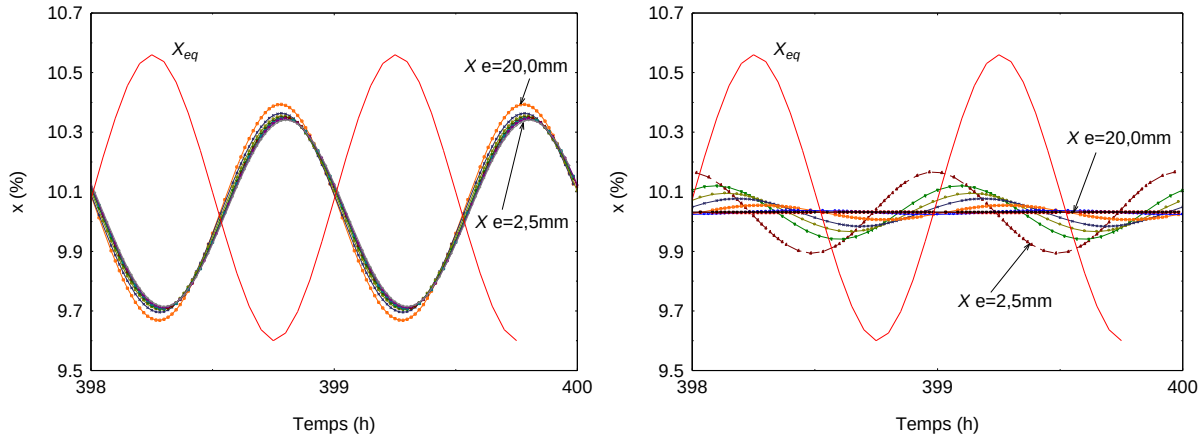


b. 12 heures

Figure 3.8. Variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*) en fonction de la demi-épaisseur adimensionnelle de la planche pour une teneur en eau d'équilibre de 10% et deux périodes (1 et 12 heures) : solution analytique et simulation numérique pour différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

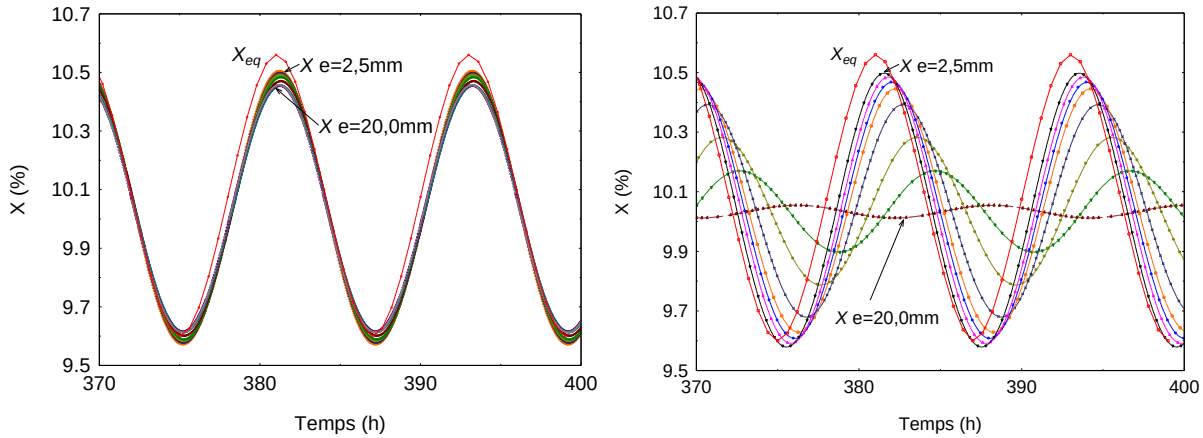
Nous pouvons noter un comportement contrasté lorsque l'on regarde l'effet de l'épaisseur de la planche sur ΔX^* en surface pour les deux périodes proposées : lorsque la fréquence des oscillations est élevée, l'épaisseur de la planche a peu d'effet sur l'atténuation des oscillations au niveau de la surface d'échange. En effet, la couche périphérique affectée par les oscillations est faible et les planches ont un comportement éloigné du petit corps. Le ratio entre la constante de temps liée à la diffusion et la période est tel dans cet exemple que les oscillations de la teneur en eau en surface et de la teneur en eau d'équilibre (liée aux conditions extérieures) sont en opposition de phase (Figure 3.9.a). La résistance au transfert interne d'humidité conduit la teneur en eau du cœur des planches à avoir un déphasage par rapport à la surface d'autant plus important que l'épaisseur est grande. Dans le cas présenté, les oscillations au cœur des planches plus épaisses tendent à être en phase avec les oscillations des conditions climatiques (Figure 3.9.b). Ceci amène ΔX^* en surface à diminuer

légèrement lorsque l'épaisseur de la planche diminue. En revanche, lorsque la fréquence des oscillations est basse (période de 12 heures), la valeur de ΔX^* en surface augmente et se rapproche de 1 au fur et à mesure que l'épaisseur diminue. Cela s'explique par le fait qu'avec une fréquence basse la teneur en eau de la surface a le temps d'atteindre la teneur en eau d'équilibre. Les oscillations de l'humidité en surface et l'humidité d'équilibre sont en phase (Figure 3.9.c). En raison de la résistance au transfert interne d'humidité et le déphasage entre la surface et le cœur qui en résulte, lorsque la surface devrait être la plus humide, l'humidité du cœur est plus faible (Figure 3.9.d). Ce déphasage tire vers le bas l'humidité en surface pour les planches plus épaisses. Toutefois, la valeur de *e** à partir de laquelle la courbe numérique quitte la courbe analytique ne semble pas pourvoir être exprimée simplement pour corriger le modèle analytique.



a. 1 heure – *X* surface

b. 1 heure – *X* cœur



c. 12 heures – *X* surface

d. 12 heures – *X* cœur

Figure 3.9. Variation de la teneur en eau (*X*) à la surface d'échange et au cœur en fonction du temps pour une teneur en eau d'équilibre de 10%, deux périodes (1 et 12 heures) et différentes épaisseurs. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

3.2.1.3 Extension du domaine de validité du modèle analytique

Nous avons vu que le modèle analytique échoue au niveau de la surface d'échange. Afin d'étendre son domaine de validité, nous proposons un **facteur correctif de surface**. Cela permettra de corriger

la valeur de Δ*X** en surface (*x = 0*) et le relier ensuite au point correspondant à une demi épaisseur adimensionnelle (*e**) égale à 1, valeur à partir de laquelle la courbe de *TransPore* rejoint la courbe du modèle analytique.

A partir d'une série des valeurs de Δ*X** en surface pour différentes périodes allant de 5 minutes à 24 heures obtenue avec l'outil numérique *TransPore*, nous avons identifié un facteur de correction *α** calculé ainsi:

$$\alpha^* = \frac{h_c \, \Delta T}{h_{vap}^o \, \rho \sqrt{\frac{1}{\tau}} \sqrt{D} \, \frac{\Delta X_{eq}}{2}} \tag{3.9}$$

où h_c est le coefficient de transfert de chaleur (W.m^{-2}.°C^{-1}), *ΔT* l'écart entre la température sèche et la température humide (°C), h_{vap}^o la chaleur latente d'évaporation (kJ. kg^{-1}), *ρ* la masse volumique basale (kg.m^{-3}), *τ* la période (s), *D* le coefficient de diffusion (m^2.s^{-1}) et ΔX_{eq} la variation de la teneur en eau d'équilibre.

Ensuite, pour estimer la valeur corrigée de Δ*X** en surface, le facteur *α* adimensionnelle est inséré à une fonction de type puissance:

$$\Delta X^*_{(x=0)\,corrigé} = a(\alpha^*)^d + b - \frac{c}{\alpha^*} \tag{3.10}$$

Où *a* est égal à 3,1834.10^{-12}, *b* égal à 0,8993, *c* égal à 85,4645 et *d* égal à 2,8414. Ces paramètres ont été identifiés pour minimiser une fonction objective définie comme la somme du carré des écarts entre les valeurs estimées par cette expression et les valeurs d'origine obtenues par simulation numérique.

Cette correction permet de reproduire correctement (en comparant la valeur obtenue par simulation numérique et celle obtenue avec l'expression 3.10) l'effet de la résistance aux transferts externes, l'effet de la période, l'effet de la résistance au transfert interne d'humidité, l'effet de l'écart psychométrique sur la valeur de Δ*X** en surface.

La Figure 3.10 illustre l'utilisation de ce facteur de correction. La valeur de Δ*X** en surface est corrigée en fonction des caractéristiques du séchage. En l'occurrence, un séchage oscillant d'une planche de 20 mm d'épaisseur avec une période de 1 heure, une amplitude Δ*X* de 1%, une teneur en eau d'équilibre moyenne de 10% et une température sèche de 60°C. En considérant que la solution analytique est correcte à partir de *e** égal à 1, la valeur de Δ*X** en surface peut être reliée à ce niveau. Ici, les deux points ont été liés par une courbe exponentielle qui ressemble à la courbe obtenue en simulation numérique (voir Figure 3.8). Cette correction de l'atténuation au niveau de la surface d'échange étend le domaine de validité du modèle analytique.

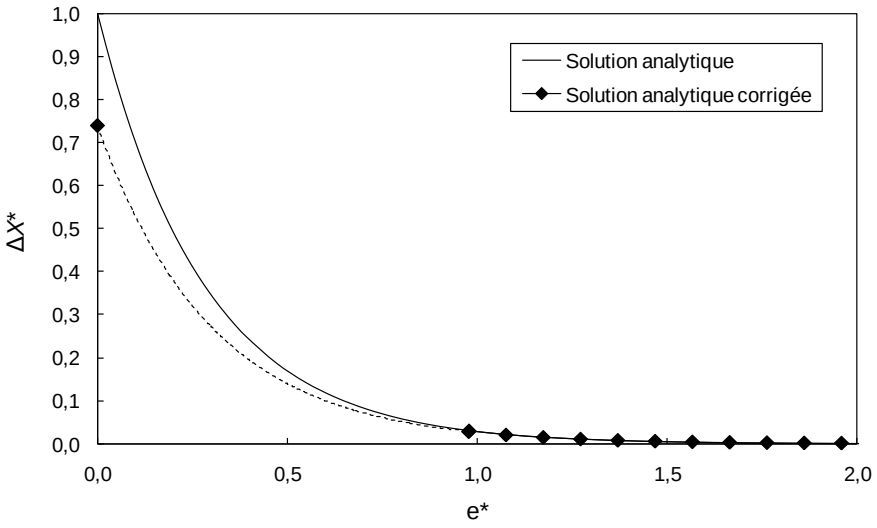


Figure 3.10. Solution analytique corrigée pour une planche de 20 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

Le modèle analytique est aussi restreint par les faibles épaisseurs adimensionnelles, puisqu'il échoue pour des petites épaisseurs de planches ou pour des oscillations avec de grandes périodes, cas dans lesquels le cœur est aussi perturbé par les oscillations de teneur en eau (Figure 3.8). Afin d'étendre son domaine de validité, nous proposons également un deuxième facteur de correction permettant de calculer la valeur de la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) à partir de laquelle la courbe numérique quitte la courbe analytique. Cette valeur, nommée demi-épaisseur adimensionnelle critique (e^*_{cr}), a été identifiée graphiquement pour chacune des courbes présentées dans la Figure 3.8. La relation de e^*_{cr} avec la valeur de e^* du cœur de la planche (dernier point de la courbe), illustré dans la Figure 3.11, donne une courbe qui a été interpolée ici par une fonction linéaire :

$$e^*_{cr} = 0,9891(e^*) - 0,1639 \tag{3.11}$$

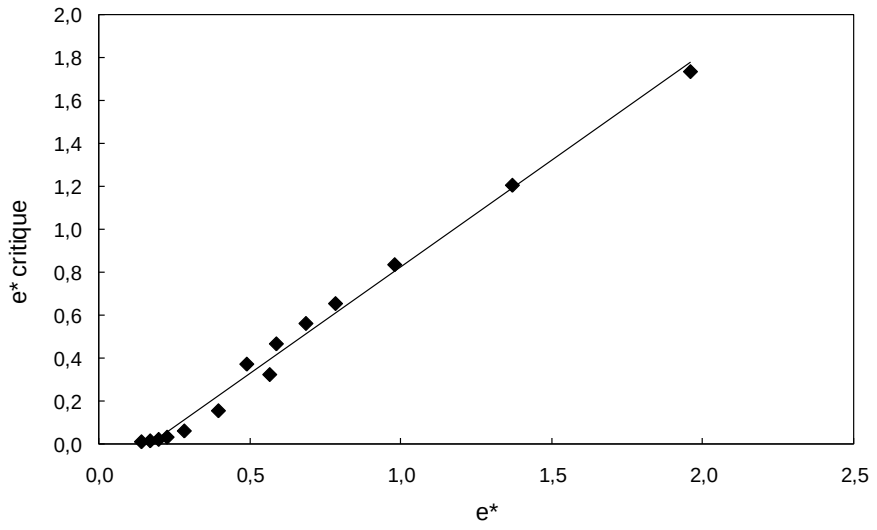


Figure 3.11. Relation entre la demi épaisseur adimensionnelle (e^*) et la demi épaisseur adimensionnelle critique (e^*_{cr}).

Ainsi, ce deuxième facteur de correction relatif à l'épaisseur de la planche peut être ajouté au facteur de correction au niveau de la surface d'échange (expressions 3.9 et 3.10). Pour illustrer cela nous allons reprendre l'exemple de la Figure 3.10 mais désormais pour une planche très fine, soit 2,5 mm d'épaisseur. A partir de la valeur de e^* obtenue avec l'expression 3.8 pour le cœur de la planche, il est possible de calculer la valeur de e^*_{cr} à partir de l'expression 3.11. Cette valeur calculée est placée dans la courbe analytique. Elle est reliée à la valeur de ΔX^* corrigée en surface par une courbe exponentielle et à la valeur de e^* du cœur par une droite à pente nulle. A continuation, nous résumons les équations permettant de retrouver la courbe complète présentée dans la Figure 3.12 :

$$\alpha^* = \frac{h_c \, \Delta T}{h_{vap}^o \, \rho \sqrt{\frac{1}{\tau}} \sqrt{D} \, \frac{\Delta X_{eq}}{2}}$$

$$\Delta X^*_{(x=0)\,corrigé} = a(\alpha^*)^d + b - \frac{c}{\alpha^*}$$

$$e^* = \frac{e\sqrt{1/\tau}}{\sqrt{4D}}$$

$$e^*_{cr} = 0,9891(e^*) - 0,1639$$

Avec cette deuxième correction le domaine de validité du modèle analytique peut être étendu aux faibles épaisseurs, cas où le centre de la planche est perturbé par les oscillations de teneur en eau.

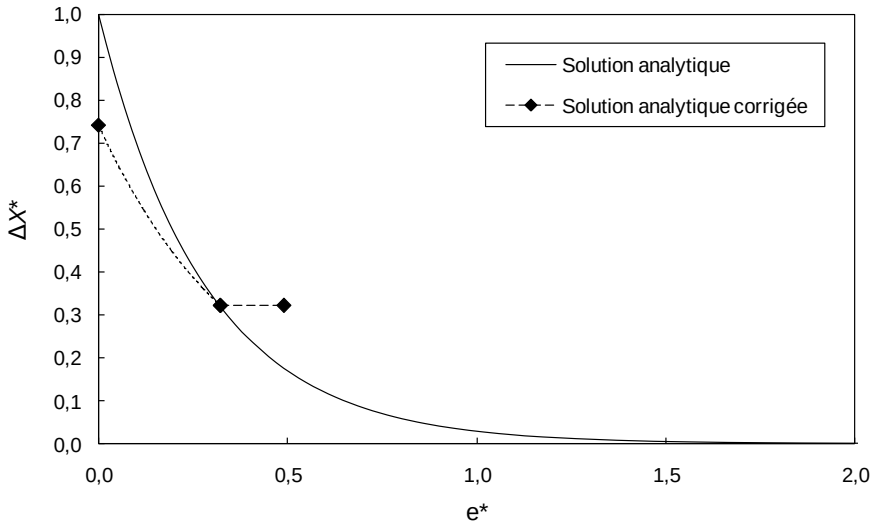
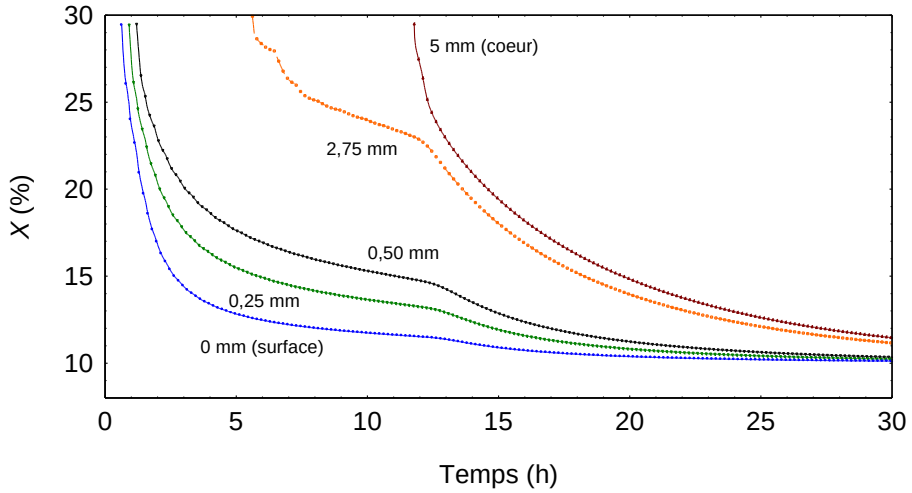


Figure 3.12. Solution analytique corrigée pour une planche de 2,5 mm d'épaisseur et période de 1 heure. [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 1%.]

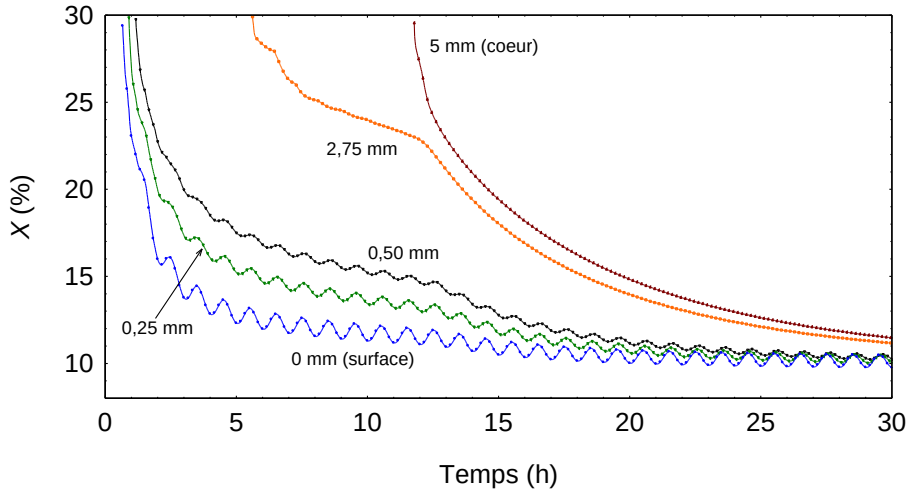
3.2.2. Etude des transferts internes en régime périodique non établi

Au cours de la première phase de séchage, l'eau libre migre du cœur vers la surface par migration capillaire et la température du produit tend vers la température humide de l'environnement. Les conditions climatiques oscillantes font varier les flux de masse et de chaleur échangés entre l'air et la planche. Ces variations de flux génèrent un champ de température et de teneur en eau fluctuant selon l'épaisseur de la planche mais sans générer de contraintes de séchage tant que le matériau reste dans le domaine de l'eau libre. En seconde phase de séchage, la périphérie de la planche entre dans le domaine hygroscopique et les contraintes de séchage apparaissent via le retrait différentiel selon l'épaisseur. L'évolution de la teneur en eau en quelques points de l'épaisseur a été tracée sur les figures ci-dessous dès lors qu'ils atteignent une teneur en eau en dessous du point de saturation des fibres. La Figure 3.13c représente l'écart entre la teneur en eau calculée à une position *x* de l'épaisseur lorsque la conduite est oscillante avec celle calculée à la même position mais avec la conduite constante.

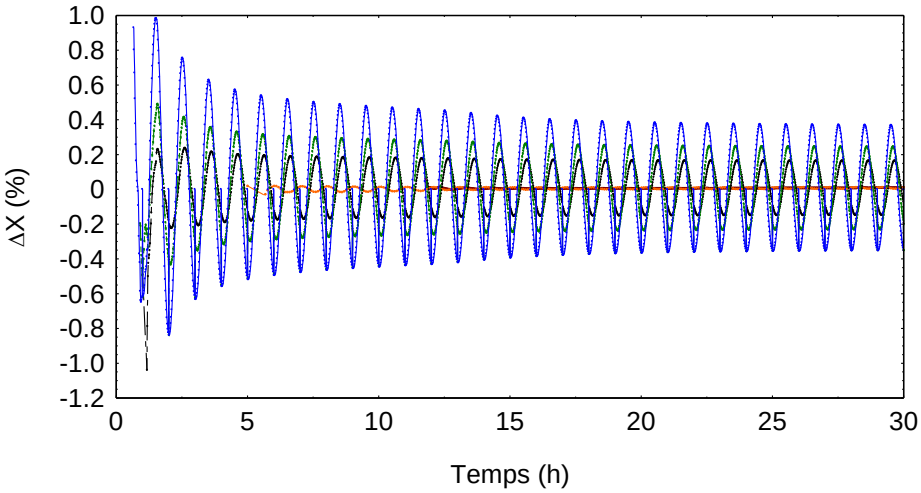
Au sein de la couche sèche périphérique en formation, la diffusion d'humidité est hydroactivée plus fortement au cours du régime transitoire qu'en régime établi. Un comportement proche de ce régime peut être observé dans la zone affectée par les oscillations à partir de 15 h de séchage (Figure 3.13c). Au cours de la phase transitoire, les oscillations atteignent des couches plus profondes de l'épaisseur de la planche. Notamment, la variation de la teneur en eau à 5 mm de la surface d'échange (cœur de la planche) a une amplitude supérieure à celle observée en régime établi, lorsque la teneur en eau oscille autour de la teneur en eau d'équilibre. Ainsi, l'hydroactivation de la diffusion se réduisant au cours du séchage, **l'amplitude et la profondeur atteinte par les oscillations de teneur en eau évoluent au cours du processus**.



a. Conduite constante



b. Conduite oscillante (ΔX_{eq} 1%, période 1h)



c. Ecart de la teneur en eau entre les deux conduites

Figure 3.13. Evolution de la teneur en eau en cinq points situés à différentes distances de la surface en mm (0 - 0,25 – 0,50 – 2,75 – 5,00) d'une planche de 10mm d'épaisseur séchée à X_{eq} 10%.

3.3. Approche numérique du comportement mécanique en conduite oscillante

Dans cette partie, nous présentons l'approche numérique du comportement mécanique d'une planche soumise à des conditions oscillantes. La simulation du champ de contraintes et de déformations au sein de la planche est possible au moyen d'une formulation mécanique greffée au code numérique *TransPore* (Rémond, 2004 ; Rémond et al. 2007). Ici, quelques éléments succincts y sont présentés.

3.3.1. Modèles de comportement mécanique utilisés dans le code

La formulation du modèle mécanique et sa résolution numérique sont présentées en détail dans Rémond (2004) et Rémond et al. (2007). Quelques modifications ont été apportées afin de simuler différentes configurations de séchage : séchage symétrique, dissymétrique et sous charge. Les éléments de la formulation sont présentés ci-après de façon succincte.

La formulation mécanique considère les hypothèses suivantes :

- Le système de coordonnées géométriques coïncide avec les directions d'anisotropie.
- Le système mécanique est supposé quasi statique (l'équilibre de la planche est vérifié à chaque instant et les termes d'inertie de l'équation dynamique sont négligeables).
- L'hypothèse des petites déformations est supposée et le problème mécanique est résolu en termes de déplacement.
- Le champ de contraintes en trois dimensions est réduit à une formulation mécanique monodimensionnelle estimant les contraintes loin des bords latéraux et des bouts de la planche.
- Les conditions aux limites dépendent de la configuration étudiée : dans le cas du séchage dissymétrique, la force externe appliquée est négligée alors que pour un séchage sous charge, un moment externe est appliqué pour imposer la forme et la courbure de la planche.
- Le champ de contraintes est supposé égal à zéro à l'état initial.

La déformation mécanique est constituée de la déformation élastique, liée aux contraintes par la loi de Hooke, de la déformation du retrait/gonflement libre et de la déformation différée associée à la viscoélasticité et à l'effet mécanosorptif du bois. La plasticité n'est pas prise en compte dans cette formulation :

$$\overset{=tot}{\varepsilon} = \overset{=r}{\varepsilon} + \overset{=e}{\varepsilon} + \overset{=ms}{\varepsilon} + \overset{=ve}{\varepsilon} \tag{3.12}$$

où $\overset{=tot}{\varepsilon}$ est la déformation totale, $\overset{=r}{\varepsilon}$ le retrait libre, $\overset{=e}{\varepsilon}$ la déformation élastique, $\overset{=ms}{\varepsilon}$ la déformation mécanosorptive et $\overset{=ve}{\varepsilon}$ la déformation viscoélastique.

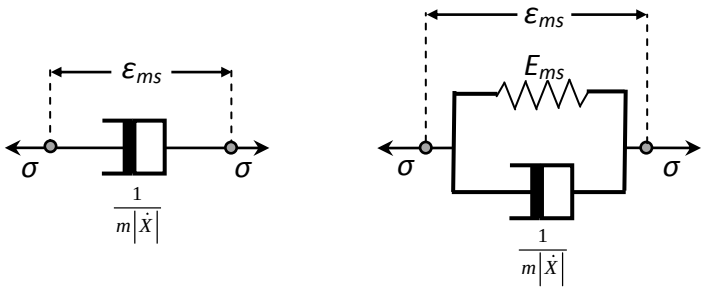
Le retrait libre ($\overset{=r}{\varepsilon}$) varie en fonction des variations de la teneur en eau liée. Le module d'élasticité est celui à l'état vert. L'expression viscoélastique utilise quatre éléments de Kelvin thermo-

hydroactivés. L'expression mécanosorptive utilise, au choix, le modèle de Ranta– Maunus (cité par Salin, 1992) ou celui de Salin (1992) initialement proposé pour prédire les contraintes de séchage. Ce deuxième comporte une limite mécanosorptive définie comme une constante liée à la déformation mécanosorptive maximale que le matériau peut atteindre pour un niveau de contrainte donné. D'après le modèle de Salin, le taux de fluage décroît en fonction de la déformation mécanosorptive déjà atteinte. Ainsi, la dérivée de la déformation mécanosorptive par rapport au temps est-il en fonction de la déformation mécanosorptive :

$$\frac{\partial \varepsilon_{ms}}{\partial t} = ms(\sigma - E_{ms}\varepsilon_{ms})\frac{\partial X}{\partial t} \tag{3.13}$$

où *ms* est le coefficient mécanosorptif, *σ* est la contrainte, E_{ms} est la limite mécanosorptive et *X* est la teneur en eau.

Dans cette formulation, lorsque E_{ms} est égal à zéro on retrouve la formulation de Ranta – Maunus. La Figure 3.14 donne la représentation schématique de deux modèles.



a. b.

Figure 3.14. Modèle rhéologiques représentant la déformation mécanosorptive : a) Modèle de Ranta – Maunus ; b) Modèle de Salin.

L'application du champ de contraintes aux équations constitutives de cette formulation donne un tenseur de contraintes diagonal dépendant de la distance à la surface de la planche et du temps. Pour clore cette présentation succincte de la formulation, l'équilibre mécanique de la planche à l'échelle locale et globale doit être respecté. Le système des équations constitutives et d'équilibre mécanique est résolu numériquement.

3.3.2. Quelques simulations en traction simple

Dans cette partie, nous allons présenter à travers quelques simulations la réponse du modèle mécanique. Nous avons étudié le comportement d'un échantillon d'une épaisseur très fine (de 0,5mm d'épaisseur selon la direction longitudinale), dont la teneur en eau s'équilibre pratiquement instantanément avec son environnement. De la sorte, les variations d'humidité n'engendrent pas de contraintes mécaniques dues au champ de retrait dans l'épaisseur. L'échantillon est sollicité en traction simple (2 MPa) pendant 12 heures, suivie d'une relaxation de 12 heures (ΔX_{eq} 2,4%, période 2h, sans séchage) (Figure 3.15). La contrainte reste constante durant les changements d'humidité.

Cette hypothèse théorique est en fait très difficile à réaliser expérimentalement étant données les variations de sections qui accompagnent les variations de teneur en eau. Dans cette formulation nous avons utilisé le modèle de Salin avec les paramètres présentés dans les Tableaux 3.1 et 3.2.

Tableau 3.1. Valeurs mécaniques utilisées dans le code numérique *TransPore*.

	Valeur			**Unités**
	Radial	**Tangentiel**	**Longitudinal**	
Coefficient de retrait	0,233	0,467	0,005	%/%MC
Module de Young à l'état vert	0,520	0,390	14,1	GPa
Coefficient de Poisson	$\upsilon_{RT}=0,73$, $\upsilon_{LR}=0,36$, $\upsilon_{TL}=0,03$			-
Complaisance viscoélastique (quatre éléments de Kelvin)	$a_1=2,82$ $a_2=8,00$ $a_3=18,86$ $a_4=51,28$	$a_1\cdot E_R/E_T$ $a_2\cdot E_R/E_T$ $a_3\cdot E_R/E_T$ $a_4\cdot E_R/E_T$	$a_1\cdot E_R/E_L$ $a_2\cdot E_R/E_L$ $a_3\cdot E_R/E_L$ $a_4\cdot E_R/E_L$	GPa^{-1}
Terme de retard associé à 20°C	$\tau_1=1,77$; $\tau_2=700,4$; $\tau_3=4,93\cdot10^8$; $\tau_4=2,49\cdot10^5$			heures
Energie d'activation	$\Delta W_1=44,2$; $\Delta W_2=120,8$; $\Delta W_3=270,9$; $\Delta W_4=111,1$			kJ/mol
Coefficient mécanosorptif	$ms=100$	$ms\cdot E_R/E_T$	$ms\cdot E_R/E_L$	GPa^{-1}
Limite mécanosorptive	$Ems=60$	$Ems\cdot E_T/E_R$	$Ems\cdot E_L/E_R$	MPa

Tableau 3.2. Valeurs caractéristiques du milieu poreux utilisées dans le code numérique *TransPore*.

	Valeur			**Unités**
Coefficient de transfert de chaleur	15			$W.m^{-2}.°C^{-1}$
Coefficient de transfert de masse	$15.\ 10^{-3}$			$m\ .\ s^{-1}$
Porosité	0,61			(-)
Masse volumique	600			kg/m^3
	Radial	**Tangentiel**	**Longitudinal**	
Perméabilité liquide	4×10^{-16}	3×10^{-17}	1.4×10^{-12}	m^2
Perméabilité gazeuse	4×10^{-16}	3×10^{-17}	1.4×10^{-12}	m^2
Perméabilité relative liquide	$k_{rl}=S_{fw}^{\ 3}$		$k_{rl}=S_{fw}^{\ 8}$	(-)
Perméabilité relative gazeuse	$k_{rg}=1+\left(2\cdot S_{fw}-3\right)\times S_{fw}^{\ 2}$		$k_{rg}=1+\left(4\cdot S_{fw}-5\right)$	(-)
Diffusion de l'eau liée	$D_b\left(T_K,X_{bnd}\right)=\exp\left(-a-\frac{b}{T_K}+c\cdot X_{bnd}\right)$			$m^2\ s^{-1}$
	$a=-9,996$ $b=4300$ $c=9,8$	$a=-9,59$ $b=4300$ $c=9,8$	$a=7,67$ $b=4300$ $c=9,8$	
Diffusion gazeuse	$D_{eff}=k_{rg}\cdot D_v\cdot2\cdot10^{-3}$	$D_{eff}/2$	$5\times D_{eff}$	$m^2\ s^{-1}$
Diffusion de la vapeur dans l'air	$D_v=2,26\times10^{-5}\cdot\left(T\ /273\right)^{1.81}\cdot P_{atm}/P$			$m^2\ s^{-1}$
Isotherme de sorption	$P_v/P_{vs}=1-exp\left(-0,76427A-3,6787\cdot\left(X_b/X_{fsp}\right)^2\right)$			(-)
Conductivité thermique	$\lambda_{eff}=0,14+0,3\cdot X$	λ_{eff}	$2\times\lambda_{eff}$	$W.m^{-1}.°C^{-1}$
Chaleur différentielle de sorption	$\Delta h_w=0,4\cdot h_{vap}\cdot\left[\left(X_{fsp}-X_b\right)/X_{fsp}\right]^2$			$J\ kg^{-1}$

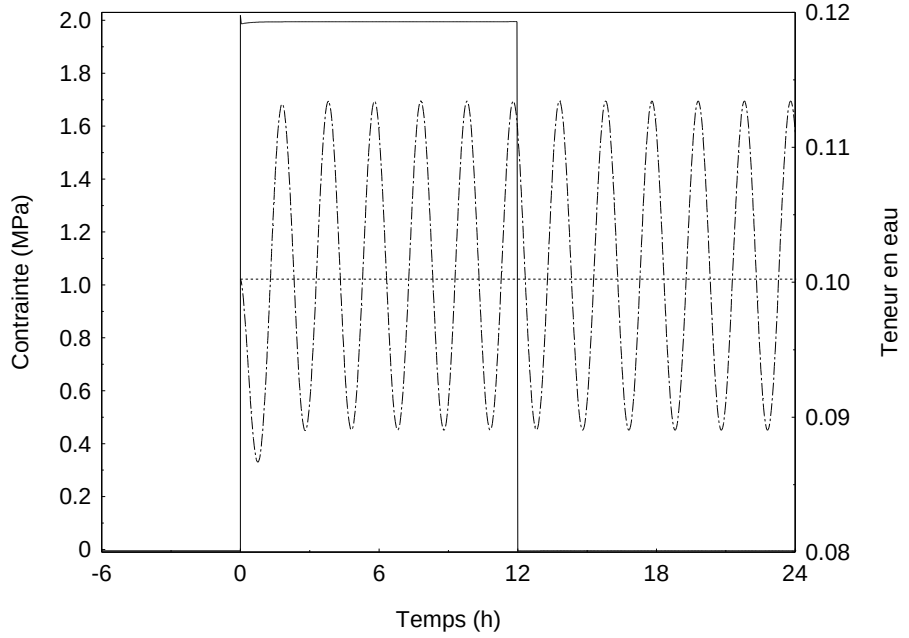


Figure 3.15. Contrainte et teneur en eau fonction du temps [ΔX_{eq} 2,4%, période : 2h]

La déformation totale de l'échantillon ainsi sollicité est présentée dans la Figure 3.16. En décomposant cette déformation, il est possible d'analyser la contribution de chacune des déformations individuelles. Le retrait libre oscille de façon homogène en fonction de la teneur en eau d'équilibre et du temps. On peut apprécier la déformation élastique qui apparait instantanément au moment de l'application de la charge, et intégralement récupérable au moment du retrait de la charge. L'application de la charge entraîne un fluage viscoélastique de l'échantillon au cours du temps. La faible teneur en eau de l'échantillon ne permet pas l'hydroactivation des propriétés viscoélastiques. Le fluage reste donc faible. En revanche, le matériau étant sous contrainte et subissant des variations de teneur en eau, une déformation mécanosorptive apparaît, beaucoup plus important que la déformation viscoélastique. Au bout de quelques cycles d'oscillation de teneur en eau, le fluage mécanosorptif continue sa progression mais semble tendre asymptotiquement vers une limite. Lors de la relaxation, les deux fluages diminuent, chacun étant respectivement activé par le temps et les oscillations d'humidité. La recouvrance est totale au-delà de 24h pour ce test fictif. D'après cette simulation, la déformation mécanosorptive participe considérablement dans la déformation totale et aussi dans la relaxation des contraintes.

La formulation mécanique de la mécanosorption de Salin diffère de celle de Ranta – Maunus car elle comporte une limite mécanosorptive et considère possible la recouvrance complète de cette déformation. Les valeurs des paramètres de cette formulation sont éparses dans la littérature et peuvent varier d'un ordre de grandeur (Mauget, 1996 ; Ranta – Maunus cité par Salin 1992). Nous allons dans les parties suivantes modifier les valeurs des paramètres de la formulation de Salin afin d'étudier leur contribution sur la déformation de l'échantillon.

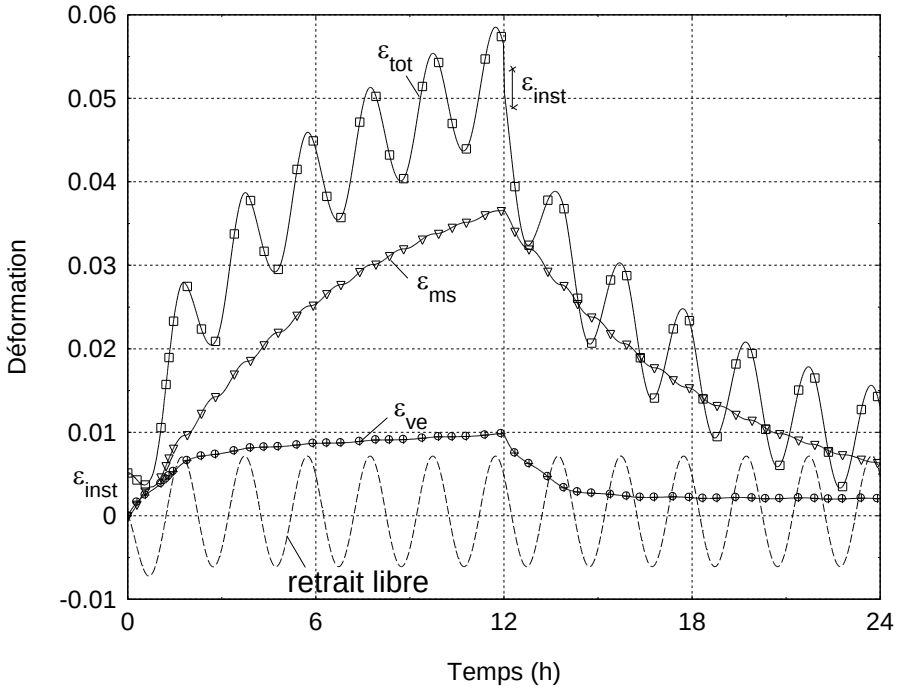


Figure 3.16. Déformation décomposée (selon la direction tangentielle du bois : *ms* = 135 GPa^{-1}, E_{ms} = 45 MPa).

3.3.2.1 Effet de la limite mécanosorptive dans la déformation totale

Nous avons simulé la déformation totale de la configuration précédente avec différentes limites mécanosorptives pour un coefficient mécanosorptif de 135 GPa^{-1} dans la direction tangentielle du matériau (Figure 3.17). Dans cette figure, le retrait libre a été soustrait de la déformation totale. La déformation corrigée intègre donc la déformation élastique et les déformations différées (viscoélastique et mécanosorptive). Une courbe de référence est tracée représentant la déformation totale corrigée du retrait lorsque la teneur en eau est constante durant l'essai. Elle permet de quantifier la contribution de la déformation élastique et viscoélastique dans la déformation observée avec des variations de teneur en eau. Sans oscillations de teneur en eau (courbe au-dessous) la déformation totale reste plus faible qu'avec les oscillations en raison de l'absence du fluage mécanosorptif. Avec un module mécanosortif égale à zéro, nous retrouvons le modèle de Ranta-Maunus (courbe du haut). Dans ce cas la déformation sous contrainte augmente linéairement avec les cycles d'humidité. Lorsque la charge est retirée, la recouvrance n'est que partielle, puisque seules les déformations élastique et viscoélastique sont relaxées. L'ajout d'un module mécanosorptif entraîne d'une part une diminution de la déformation sous contrainte qui tend de façon asymptotique vers une limite et d'autre part une recouvrance complète de cette déformation qui n'est pas toujours atteinte au bout des 6 cycles d'humidité après la décharge. Lorsque le module mécanosorptif (E_{ms}) augmente, la déformation mécanosorptive tend vers une limite plus basse en un nombre de cycles plus faible. Il en est de même pour atteindre la recouvrance complète au cours de la relaxation. En augmentant la limite mécanosorptive, le comportement de l'échantillon se rapproche du comportement sans fluage mécanosorptif.

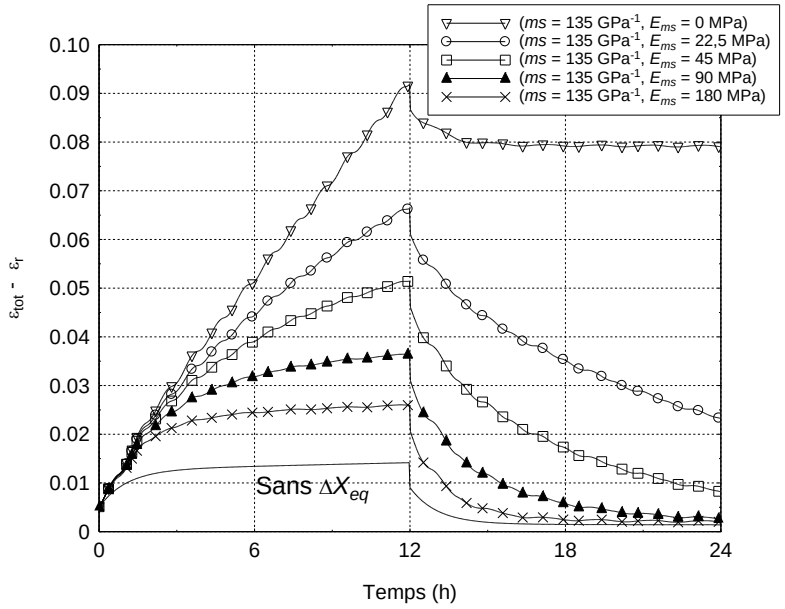


Figure 3.17. Effet de la limite mécanosorptive (E_{ms}) dans la déformation totale pour un coefficient mécanosorptif (*ms*) de 135 GPa^{-1}.

3.3.2.2 Effet du coefficient mécanosorptif sur la déformation totale

Nous avons étudié l'effet du coefficient mécanosorptif en présence d'un module mécanosorptif de 45 MPa (Figure 3.18). Plus le coefficient *ms* est faible, plus le nombre de cycle nécessaire pour atteindre la limite mécanosorptive est élevé, ou encore plus la déformation mécanosorptive sera petite pour un même nombre de cycle. De la même façon, au cours de la décharge, plus ce coefficient est faible et plus le nombre de cycle pour la recouvrance complète est grand. Ainsi, les coefficients mécanosorptifs élevés permettent-ils d'exprimer rapidement tout le potentiel mécanosorptif dans la limite de la valeur de E_{ms}. En d'autres termes, les valeurs élevées maximisent l'efficacité des oscillations par rapport aux variations de teneur en eau cumulées pour la relaxation des contraintes ou pour la recouvrance.

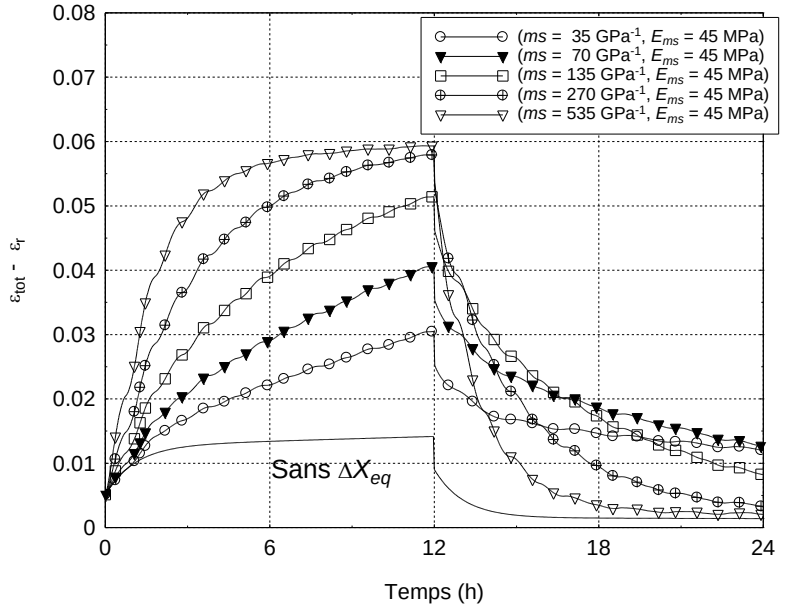


Figure 3.18. Effet coefficient mécanosorptif (*ms*) dans la déformation totale pour une limite mécanosorptive (E_{ms}) de 45 MPa.

3.3.2.3 Effet de l'amplitude des oscillations de la teneur en eau dans la déformation totale

A partir de ces deux dernières analyses, nous avons choisi un jeu de paramètres « intermédiaires », soit le coefficient *ms* égal à 135 GPa^{-1} et E_{ms} égale à 45 MPa, pour étudier l'effet de l'amplitude de la teneur en eau avec une période de 2 heures (Figure 3.19). En augmentant l'amplitude, la déformation sous contrainte augmente aussi et tend plus rapidement vers la limite mécanosorptive, ce qui est parfaitement cohérent avec l'équation 3.13. Les variations cumulées de teneur en eau étant plus importantes pour un même nombre de cycle l'activation de la mécanosorption est plus forte. Ainsi, plus l'amplitude des oscillations est élevée, plus la déformation mécanosorptive tend rapidement (en nombre de cycle) vers la limite définie par E_{ms} lorsque l'échantillon est sous charge, ou plus la recouvrance est rapide dans la phase de décharge.

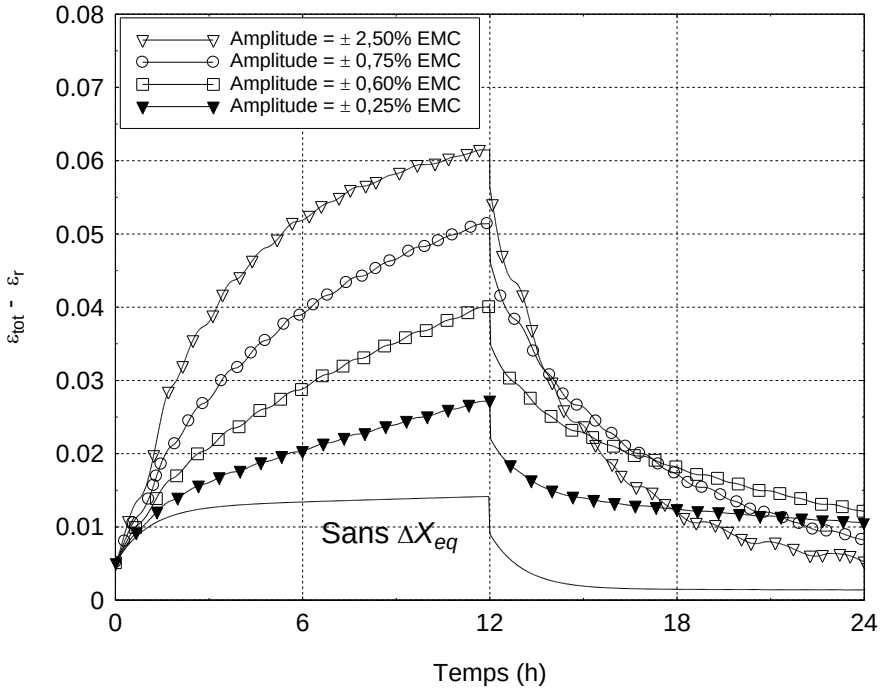


Figure 3.19. Effet de l'amplitude de la teneur en eau dans la déformation totale (période : 2 heures).

3.3.2.4 Effet de la période des oscillations dans la déformation totale

En ce qui concerne la période, plus elle est courte, plus le nombre de cycles par unité de temps est grande et plus le fluage mécanosorptif est activé. Inversement, au cours de la relaxation, plus la période est courte et plus la recouvrance sera rapide. Bien entendu, ce constat n'est valable que pour ce cas test avec un échantillon suffisamment fin pour garantir un champ de teneur en eau uniforme. Dans la Figure 3.20 la courbe correspondant à une période de 12 heures est à prendre avec précaution car dans notre simulation de 24 heures, seul deux cycles ont eu lieu, l'un pendant l'application de la contrainte et l'autre pendant la relaxation. Hormis cette courbe, on constate que la déformation maximale n'est pas inversement proportionnelle à la période.

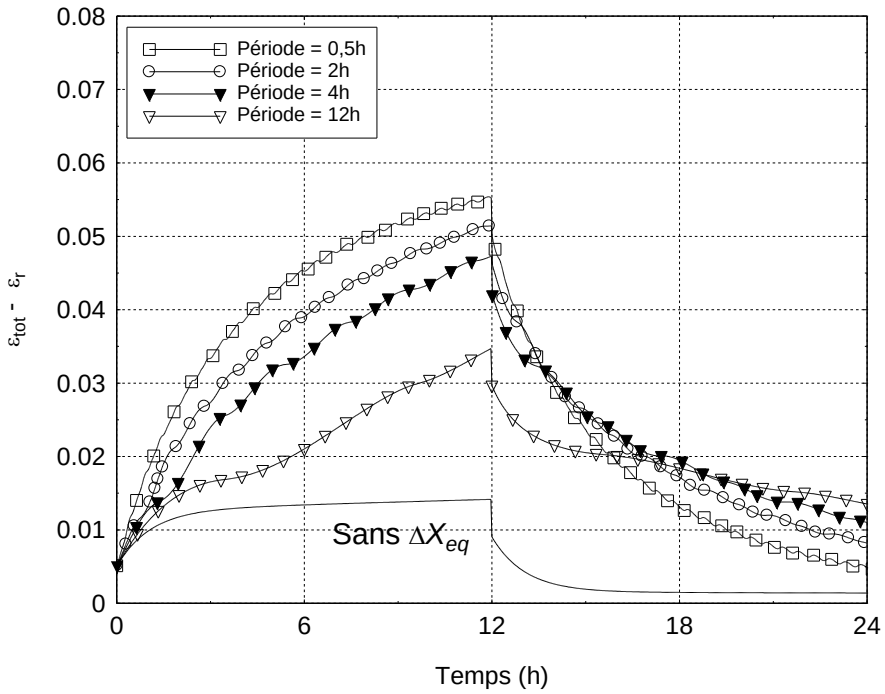


Figure 3.20. Effet de la période dans la déformation totale. (ΔX_{eq} = 0,75%)

Après avoir présenté la réponse du comportement mécanique pour cette configuration théorique simple, nous avons exploré le comportement mécanique d'un échantillon épais dont la teneur en eau initiale est éloignée de la teneur en eau d'équilibre de telle sorte qu'il sèche. En raison de la résistance aux transferts internes, un gradient de teneur en eau s'établit au sein de l'épaisseur ce qui induit des contraintes de séchage. Ce champ d'humidité variable et son histoire vont influer fortement l'évolution du comportement mécanique dans l'épaisseur de l'échantillon. L'étude présentée en détail dans l'Annexe B nous a permis d'isoler avec l'aide de l'outil numérique des configurations de séchage intéressantes pour tenter d'apprécier les bénéfices des conduites oscillantes. Ces configurations, étudiées préalablement avec le code numérique, ont été reproduites au niveau expérimental et présentées dans le chapitre 4. Chacune de ces trois configurations de séchage présente la même évolution du champ de teneur en eau mais est différente au niveau mécanique :

- Séchage symétrique : transferts de masse et de chaleur au niveau des deux surfaces d'échange de la planche
- Séchage dissymétrique : transferts de masse et de chaleur au niveau d'une seule des deux surfaces d'échange de la planche
- Séchage sous charge : séchage symétrique mais avec un moment fléchissant imposé à l'échantillon.

Chacune de ces configurations a été testée pour une conduite constante et une conduite oscillante.

Il ressort de l'ensemble de ces résultats que le comportement mécanique testé n'est pas réaliste. Le modèle de comportement de la mécanosorption est tel que toutes les contraintes résiduelles peuvent être relaxées aux temps longs par les oscillations de teneur en eau en surface:

- Avec le modèle de Salin, la seule présence du module mécanosorptif donne au matériau une mémoire de forme totale, qui peut être retrouvée par activation hydrique,
- Sans ce module (modèle de Ranta-Maunus), c'est le couplage entre les différentes parties de la section, via l'équilibre mécanique global, qui permet le recouvrement tant que le champ de contrainte n'est pas complètement équilibré.

Ce modèle ne permet donc pas de retrouver les déformations permanentes effectivement observées lors des essais expérimentaux (Svensson et Toratti, 2002 ; Hanijarvi et Hunt, 1998). La mise en place dans le modèle d'une déformation mecanosorptive irrécouvrable semble donc absolument nécessaire pour modéliser correctement la double exigence rencontrée en séchage oscillant (activation hydrique permanente et contraintes équilibrées sur la section).

Conclusions

Dans de ce chapitre nous avons étudié dans un premier temps l'évolution des oscillations de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche par une approche analytique et une approche numérique. Les deux approches rendent compte d'une diminution des oscillations de teneur en eau de la surface d'échange vers l'intérieur de la planche selon un taux dépendant de la période. Des périodes plus longues permettent aux oscillations de teneur en eau de se produire dans des zones plus profondes de la planche. L'approche numérique, développée avec l'outil de simulation *TransPore*, permet une étude plus réaliste du séchage. Nous avons vu, par exemple, que l'amplitude et la profondeur perturbée par les oscillations évoluent au cours du processus. Ceci permet de guider la réflexion dans le choix des paramètres pertinents des conduites de séchage oscillantes. La confrontation des deux approches a mis en évidence les limites du modèle analytique qui échoue au niveau de la surface d'échange et aussi pour les faibles épaisseurs. Pour contourner ce problème, le domaine de validité du modèle analytique a été étendu au moyen de deux facteurs de correction obtenus à l'aide de l'outil numérique *TransPore*. Cela permet à la formulation analytique de devenir un outil particulièrement intéressant pour les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué.

La troisième partie de ce chapitre a été consacrée à l'étude du comportement mécanique en conduite oscillante. Nous avons testé le module mécanique de *TransPore* dans une configuration mécanique simple d'un échantillon fin en traction soumis à des conditions climatiques oscillantes, puis il a été utilisé sur des échantillons plus épais pour isoler des configurations de séchage intéressantes pour tenter d'apprécier les bénéfices des conduites oscillantes. Le comportement mécanique s'avère très sensible aux valeurs des paramètres mécanosorptifs. La période et l'amplitude ont aussi un effet dans le comportement mécanique. Aussi, le modèle mécanique utilisé semble-t-il peu raisonnable car il ne permet pas d'intégrer les déformations permanentes observées dans les travaux expérimentaux publiés.

Finalement, les résultats de ce chapitre mettent en évidence la difficulté à choisir les caractéristiques des oscillations pouvant améliorer la qualité du séchage conventionnel (sans oscillations) du bois. Les simulations effectuées et présentées dans l'Annexe B montrent la complémentarité d'informations apportées par le séchage sous charge et le séchage dissymétrique, notamment en ce qui concerne l'analyse du couple des propriétés viscoélastiques/mécanosorptives.

Ceci nous donne le fil directeur des essais à réaliser pour tester un modèle mécanosorptif et mieux comprendre l'effet des conduites oscillantes sur l'état des contraintes dans la planche. Le chapitre suivant présente des dispositifs et des résultats expérimentaux mis en place dans ce but.

Chapitre 4: Effet de conduites oscillantes sur les contraintes de séchage

Suite à l'étude théorique sur les transferts de masse et le comportement mécanique de planches séchées en conditions oscillantes, il est nécessaire de mener des essais expérimentaux à l'échelle d'une planche pour observer l'effet de conduites oscillantes sur les contraintes de séchage et étudier la capacité du code à prédire les comportements observés. Pour ce faire, des configurations particulières de séchage ont été retenues, telles que le séchage sous charge (poutre cantilever et flexion trois points) et le séchage dissymétrique (flying wood), afin de révéler à travers la courbure de l'échantillon l'état des contraintes internes. Ces configurations particulières de séchage apportent des informations complémentaires sur l'expression des propriétés différées du bois au cours du séchage (Mauget, 1996).

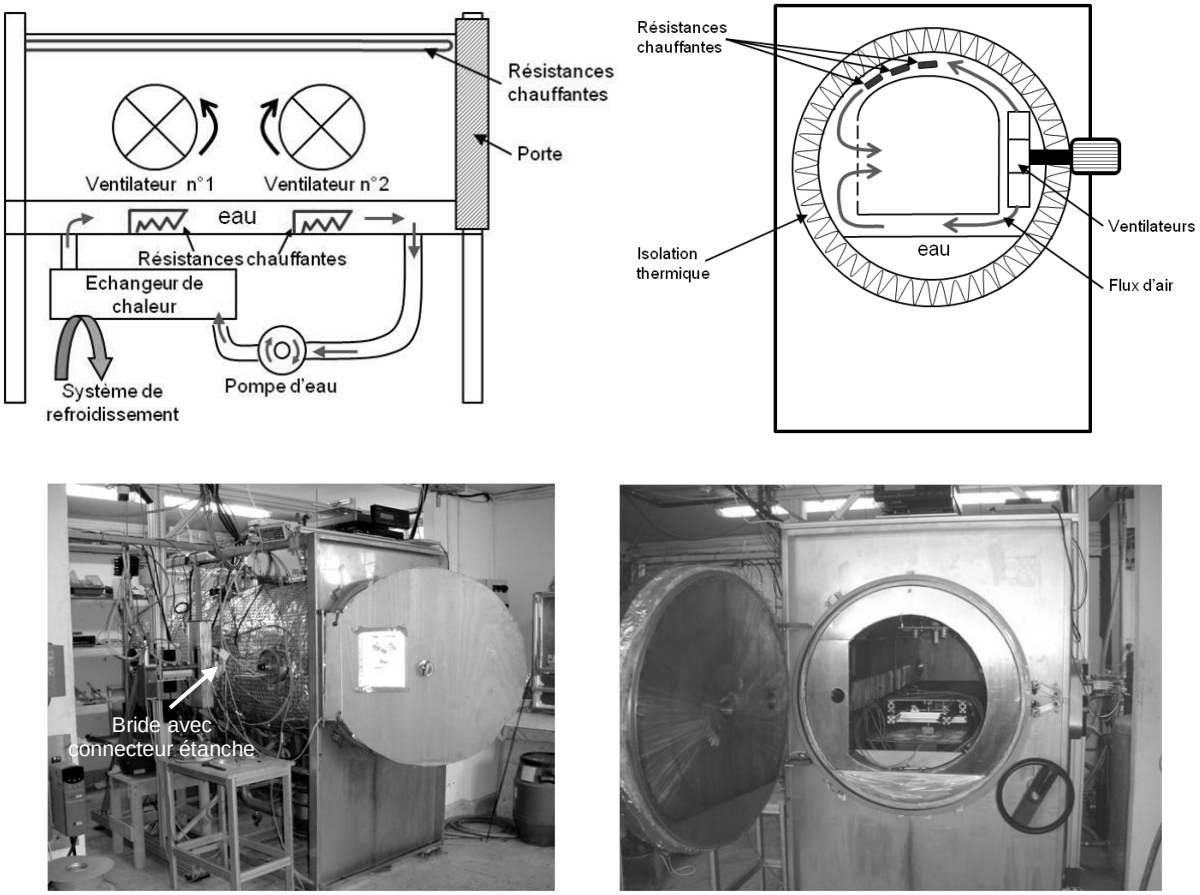
Les essais décrits dans ce chapitre ont été réalisés dans le séchoir de l'équipe Bois Biomatériaux Biomasse du Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt Bois (LERFoB) à AgroParisTech – Nancy. En cohérence avec les essais en configuration semi – industrielle présentés dans le chapitre 2, les essais ont été réalisés sur des échantillons de hêtre (*Fagus sylvatica*) orientés dans les directions radiale et tangentielle. Les conditions d'essai ont été choisies à l'aide de l'outil numérique *TransPore*. Ce chapitre débute par une description des dispositifs expérimentaux, et ensuite nous présentons les principaux résultats obtenus pour les différentes campagnes d'essais. Pour plus de détails, le lecteur pourra se reporter aux annexes en fin du manuscrit.

4.1. Dispositifs expérimentaux

4.1.1. Séchoir

Le séchoir employé est un prototype polyvalent conçu par notre équipe (Perré et al. 2000) permettant de sécher en mode convectif, en pression, sous vide et même en haute fréquence (Bucki, 2004 ; Rémond et Perré, 2008). L'enceinte du séchoir est un cylindre de 0,9 m de diamètre et 2 m de long construit en inox de 2 mm d'épaisseur (Figure 4.1). Pour l'isoler thermiquement une couche de 10 cm de laine de roche enveloppe l'ensemble. Ce séchoir peut être utilisé dans une large gamme de températures (de 30°C à 150°C en température sèche et de 20°C à 130°C en température de rosée), pouvant supporter jusqu'à 3 bar de pression.

L'humidité relative est contrôlée par la température de l'eau se trouvant dans la partie inférieure de l'enceinte cylindrique. Deux ventilateurs centrifuges homogénéisent les conditions climatiques dans l'enceinte et assurent l'écoulement d'air humide au niveau des surfaces de la planche. Le séchoir est piloté par un contrôleur PID à double boucle relié à un ordinateur. Les tables de séchage peuvent être programmées directement sur le contrôleur ou via un logiciel. En outre, le passage des câbles des différents capteurs de l'intérieur du séchoir vers l'extérieur est possible grâce à huit brides amovibles de 15 cm de diamètre. Pour cette étude, les câbles de tous les capteurs utilisés passaient à travers un connecteur multibroche étanche installé dans une des brides. A l'extérieur, ces câbles étaient connectés à une centrale d'acquisition Agilent 34970A reliée à un ordinateur. Un programme écrit en langage Visual Basic permettait l'enregistrement des données.



a. Vue de côté b. Vue de front

Figure 4.1. Schémas et photos du séchoir utilisé pour les essais.

Parmi les capteurs installés à l'intérieur du séchoir, des thermocouples ont été employés pour l'enregistrement de la température sèche et de la température de rosée au niveau du bac d'eau. Après la première campagne d'essais, deux thermocouples ont été ajoutés afin d'enregistrer la température humide et la température sèche tout près des échantillons. A partir des enregistrements de la température humide nous avons calculé la température de rosée près des échantillons, qui pouvait avoir un écart de -1,1°C en crête supérieure et de -0,4°C en crête inférieure avec la température de rosée au niveau du bac d'eau. Avec cette température de rosée calculée et la température sèche nous avons calculé la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) obtenue dans le séchoir, via l'expression approchée de l'isotherme de sorption du bois :

$$X_{eq} = \frac{X_{PSF}\sqrt{\left(0,764269^2 - 4\times 3,67872\times \log\left(1-HR\right)\right)} - 0,764269}{2\times 3,67872} \tag{4.1}$$

avec :

$$X_{PSF} = 0,58815 - 0,001\times T \tag{4.2}$$

où T est la température exprimée en degrés Kelvin.

Notez, que la teneur en eau d'équilibre calculée n'est qu'une valeur approchée de la réalité car l'expression ci-dessus ne tient pas compte de l'histoire des variations climatiques qui s'expriment normalement sur les isothermes de sorption par une hystérésis.

Les valeurs ainsi obtenues sont indiquées dans la présentation de résultats et dans les fiches complètes des annexes. A ne pas confondre avec les valeurs de teneur en eau moyenne des échantillons, avant, pendant ou après le séchage, obtenues par pesées.

4.1.2. Séchage dissymétrique : flying wood

Le séchage dissymétrique a été réalisé à l'aide de la technique appelée « flying wood » conçue par Brandao et Perré (1996) et utilisée depuis dans d'autres travaux (Aguiar et Perré, 2000 ; Allegretti et al., 2003 ; Allegretti, 2004 ; Uetimane Junior et al., 2010). Cette technique consiste à sécher un échantillon dont cinq des six faces ont été colmatées afin de bloquer les transferts de masse. Ainsi, les transferts d'humidité se font sur une seule face avec des transferts quasi-monodimensionnels selon l'épaisseur. L'asymétrie du champ d'humidité se formant au cours du séchage génère de fortes déformations de l'échantillon via le retrait.

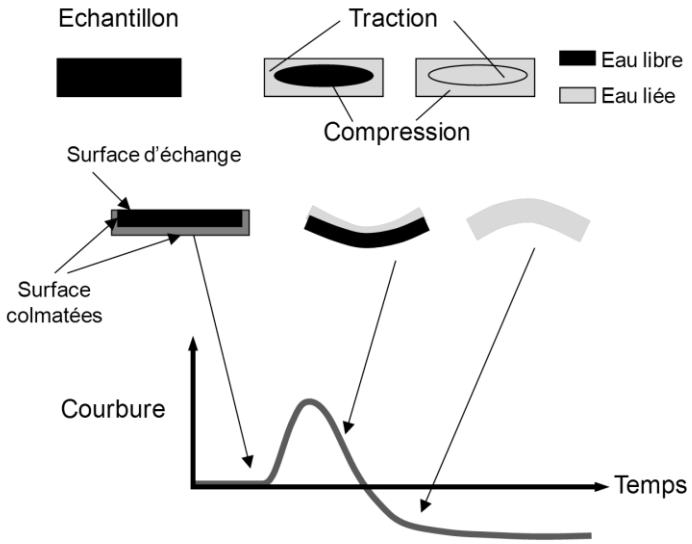


Figure 4.2. Principe de la technique « flying wood » (adapté de Perré, 2007).

La Figure 4.2 illustre le principe de cette technique. Au début du séchage, et en présence d'eau libre dans toute l'épaisseur, l'échantillon reste plat. Ensuite, la surface d'échange entre dans le domaine hygroscopique provocant le retrait. Cela produit une courbure positive. Au fur et à mesure que le retrait a lieu dans des couches plus profondes, l'échantillon reprend sa forme originale. En fin de séchage, la courbure devient négative en raison de l'inversion des contraintes due à l'effet mémoire du bois. La durée de chaque phase et l'amplitude des courbures (positive et négative) donnent des informations sur les propriétés des transferts couplés de masse et de chaleur, sur le retrait et sur le comportement mécanique du bois. Quelques simulations de la cinétique et le comportement mécanique d'un échantillon séché avec cette configuration particulière de séchage sont présentées

dans le chapitre précédent (Annexe B2). Ici, le but était d'étudier expérimentalement l'effet des oscillations sur les contraintes produites lors du séchage.

Le dispositif de flying wood utilisé pour cette étude permet de tester deux échantillons simultanément. Il a été développé au cours de la thèse de Aguiar (2001). Il permet de suivre la masse de l'échantillon au cours de son séchage et de suivre la déformation de l'échantillon. Cette dernière est mesurée à l'aide d'un capteur de position (capteur résistif) monté en pont diviseur de tension afin d'éviter l'effet de la température sur la résistance électrique. Un levier (barre en forme de U sur la photo) est utilisé pour amplifier l'intervalle de mesure de la flèche et diminuer l'effort du ressort sur l'échantillon. L'échantillon est fixé aux supports par deux pinces, chacun étant relié par une liaison pivot à un réglet, lui-même encastré à son autre extrémité (Figure 4.3). Ces réglets permettent de suivre les variations d'écartement imposées par l'échantillon lorsqu'il se déforme. L'ensemble échantillon/porte échantillon/dispositif de mesure de déformation est monté sur un cylindre en invar encastré sur le bâti du dispositif. Des jauges de contraintes sont collées sur ce cylindre pour suivre la masse de l'ensemble, via le moment imposé à la barre par le poids de l'échantillon. Une description plus détaillée est disponible dans la thèse de Aguiar (2001).

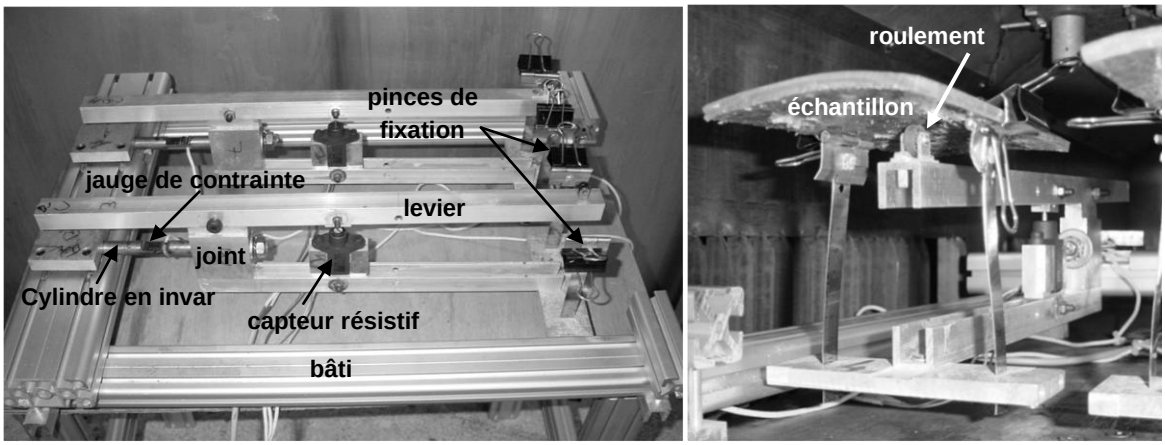


Figure 4.3. Dispositif « flying wood » pour les essais de séchage dissymétrique.

Dans nos échantillons, les transferts de masse ont lieu dans la direction radiale ou tangentielle selon le débit de l'échantillon (Figure 4.8). Les faces sont colmatées avec une colle bi – composant Epoxy à prise rapide (environ 5 minutes). Avant l'application de la colle, les échantillons sont pesés et l'épaisseur mesurée à deux endroits différents. Pour cela nous avons utilisé une balance Sartorius de 0,1 mg de précision et un pied à coulisse d'une précision de 0,01 mm respectivement. Afin d'éviter tout séchage prématuré de la surface d'échange, elle est humidifiée avant l'application de la colle, et pendant le séchage de cette dernière l'échantillon est maintenu au dessus d'un bac d'eau, la surface d'échange du côté de l'eau. Une fois la colle sèche, l'échantillon est pesé à nouveau pour obtenir la masse de la colle. Ensuite, l'échantillon est fixé au dispositif à l'aide des pinces, la surface d'échange étant placée au-dessus. Cette surface est humidifiée périodiquement pour éviter tout séchage le temps d'installer les autres échantillons et de lancer le test. La durée de l'ensemble de ces opérations de préparation des échantillons et le début de l'essai est d'environ une heure. A la fin de chaque séchage, les échantillons sont retirés soigneusement du dispositif, mis dans un sac en plastique pour éviter toute reprise d'humidité, puis pesés. Ensuite ils sont placés dans une étuve de déshydratation à 103°C pendant 24 heures pour l'obtention de la masse anhydre.

4.1.3. Séchage sous charge

4.1.3.1 Poutre cantilever

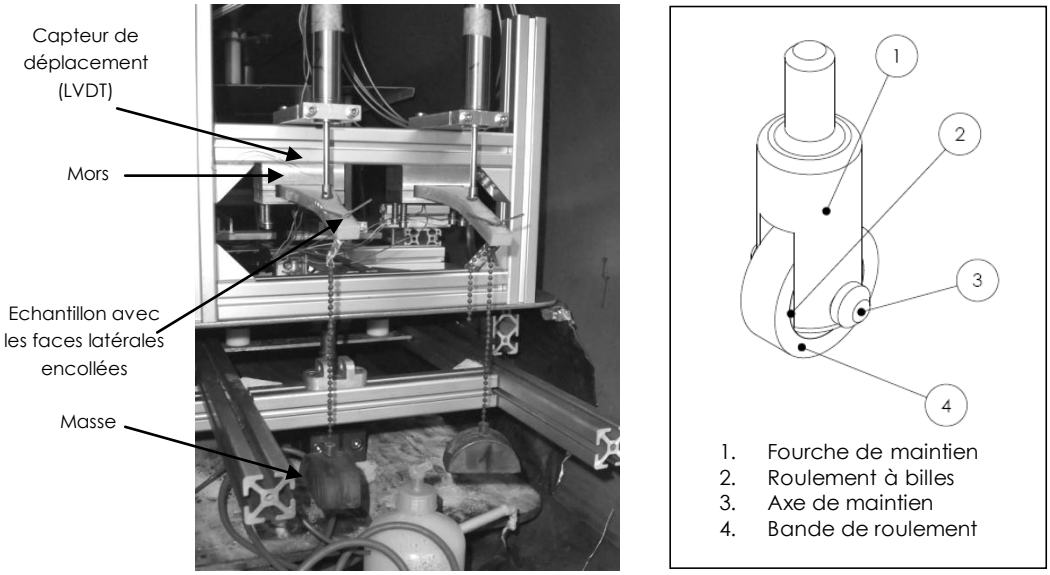
Pour le séchage sous charge, le dispositif expérimental utilisé est une poutre cantilever chargée à son extrémité libre. Comme il a été mentionné dans le chapitre précédent (Annexe B3), le séchage sous charge est un séchage symétrique auquel on ajoute une contrainte supplémentaire. Cette configuration met en évidence le comportement différé du bois et fournit des informations complémentaires au séchage dissymétrique sur le couplage entre les propriétés viscoélastiques et mécanosorptives (Mauget, 1996). L'annexe 3C montre quelques simulations de la cinétique et l'évolution des contraintes pour un séchage sous charge.

La particularité de nos essais est la géométrie particulière des échantillons. Au lieu d'utiliser un échantillon parallélépipédique où la contrainte évolue en fonction de la longueur, nous avons choisi un échantillon iso-contraint pour faciliter l'interprétation des résultats. Dans ce type d'échantillon, l'inertie de la poutre diminue linéairement à partir du point d'encastrement, tout comme le moment de la force appliquée. Cette géométrie particulière a été employée avec succès lors des travaux précédents de notre laboratoire (Perré et Aguiar, 1999). Aussi, afin de forcer les transferts de masse dans une seule direction, soit l'épaisseur, les faces latérales ont été colmatées. Cela a été fait dans le but de pouvoir apporter des informations complémentaires avec celles obtenues lors du flying wood.

Le dispositif de poutre cantilever a été développé au cours de cette thèse. Il permet de tester deux échantillons simultanément (Figure 4.4). Chaque échantillon est encastré dans un mors composé d'une partie fixée au gabarit et d'une partie à ajuster à l'aide de quatre vis avec des ressorts. Les ressorts permettent une fixation capable de suivre le retrait de l'échantillon. La déformation de l'échantillon est mesurée par un capteur de déplacement par contact de type LVDT (RDP Electronics ACW500A/5/3M). Le ressort intérieur du LVDT, assurant normalement le contact palpeur/échantillon, a été retiré afin de limiter l'action de cet élément sur la déformation de l'échantillon. Le contact est maintenu simplement par gravité avec le poids propre de la tige du LVDT. Le palpeur du capteur a été remplacé par un roulement pour éviter les efforts latéraux dus au retrait (Figure 4.4). Les LVDT sont fixés au gabarit à l'aide d'une plaque de fixation. A l'extrémité libre de l'échantillon était placée une masse de 3 N ou 20 N pour les échantillons de 20 mm d'épaisseur débités sur quartier.

La manipulation des échantillons est similaire à celle des échantillons du flying wood. D'abord, ils sont pesés avec une balance Sartorius de 0,1mg de précision. L'épaisseur est mesurée à trois endroits différents à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0,01mm. Ensuite, une colle bi – composant est appliquée sur toutes les faces latérales (Figure 4.4) de telle sorte que les transferts de masse aient lieu dans une seule direction, soit l'épaisseur. Dans nos échantillons, cela correspond à la direction radiale ou tangentielle selon le débit de l'échantillon (Figure 4.8). Pour éviter tout séchage, les surfaces d'échange sont humidifiées avant l'application de la colle, et pendant la prise de cette dernière, les échantillons sont maintenus au-dessus d'un bac d'eau. Après environ après 20 minutes, les échantillons sont à nouveau pesés pour déterminer le poids de la colle. Ensuite, ils sont fixés aux mors du dispositif. Les masses sont suspendues aux extrémités, mais avant de les relâcher, l'acquisition des données est lancée. Après quelques acquisitions, les masses sont relâchées et le

séchage commence. Le fait de lancer l'acquisition avant le chargement a pour objectif de mesurer la déformation élastique et calculer par la suite le module d'élasticité (E).



a. Vue d'ensemble b. Détail du roulement

Figure 4.4. Dispositif « poutre cantilever » pour les essais de séchage sous charge.

A la fin du séchage, les échantillons sont pesés puis coupés en deux, l'encastrement étant séparé du reste. En effet, la partie encastrée dans les mors peut avoir une teneur en eau finale différente de celle du reste de l'échantillon. Les deux morceaux sont pesés et déshydratés à l'étuve à 103°C pendant 24 heures pour obtention de la masse anhydre.

4.1.3.2 Flexion trois points

Quelques difficultés expérimentales rencontrées avec le dispositif de poutre cantilever nous ont conduit à réaliser une campagne d'essais complémentaire avec un nouveau dispositif expérimentale : la flexion trois points. Ce dispositif permet de s'affranchir d'une éventuelle rotation au niveau de l'encastrement, lorsque la partie encastrée intérieure reste humide et que la partie encastrée proche de la zone libre commence à sécher.

Un nouveau dispositif en aluminium a été développé pour ces essais. Les échantillons sont sollicités dans la direction tangentielle ou radiale. La flèche est mesurée par l'intermédiaire d'un capteur de déplacement de type LVDT, le même que celui utilisé pour les tests de poutre cantilever. Les dimensions des échantillons sont calculées en tenant compte du retrait apparaissant au cours de l'essai, du module de rigidité apparent en fin d'essai et de la charge appliquée. Une section de 10mm x 18mm a été retenue pour une longueur totale de 160 mm et un entraxe de 100 mm. L'échantillon était posé sur deux appuis cylindriques, l'un fixe et l'autre en rotation libre afin d'annuler les efforts axiaux. Ce dernier était composé d'un cylindre appuyé sur des roulements de diamètre très légèrement supérieur placés à ses extrémités (Figure 4.5). Au milieu de l'échantillon, un dispositif mobile est utilisé pour supporter la charge et l'appliquer sur l'échantillon. Son entretoise cylindrique assure un contact linéique avec l'échantillon, et le méplat sur son côté opposé (voir figure ci –

dessous) offre une surface sur laquelle peut reposer le palpeur. Les charges utilisées étaient de 9,48 N pour les échantillons débités sur dosse et 9,85 N pour les échantillons débités sur quartier.

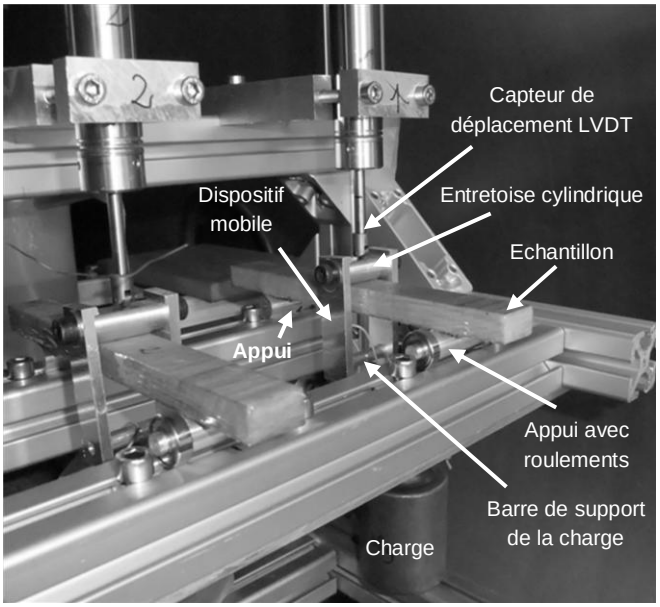


Figure 4.5. Dispositif expérimental pour les tests de flexion trois points.

Le protocole expérimental est similaire à celui utilisé pour les autres dispositifs. Les échantillons sont d'abord pesés avec une balance Sartorius de 0,1 mg de précision et l'épaisseur est mesurée à trois endroits différents à l'aide d'un pied à coulisse d'une précision de 0,01 mm. Ensuite, une colle bi – composant est appliquée sur toutes les faces latérales de telle sorte que les transferts de masse aient lieu dans une seule direction, soit l'épaisseur (direction radiale ou tangentielle selon le débit de l'échantillon). Comme pour les autres échantillons, le séchage prématuré est évité en humidifiant les surfaces d'échange avant l'application de la colle et en plaçant les échantillons sur des supports au dessus d'un bac d'eau pendant la polymérisation de la résine. Une fois la résine durcie, les échantillons sont pesés à nouveau pour déterminer le poids de la colle. Finalement ils sont installés dans le dispositif expérimental tout en veillant à placer la charge au milieu de l'échantillon. L'acquisition des données est lancée avant d'appliquer les charges afin de mesurer la déformation élastique. A la fin du séchage les échantillons sont pesés puis déshydratés à l'étuve à 103°C pendant 24 heures pour l'obtention de la masse anhydre.

4.2. Conditions d'essais et échantillonnage

Nous présentons ici les méthodes (conditions d'essai et échantillonnage) de différentes campagnes d'essais réalisées dont l'objectif est d'étudier expérimentalement l'effet des oscillations des conditions climatiques sur la relaxation de contraintes de séchage.

Dans une première partie, nous avons conçu des **conditions d'essais** afin de dresser des observations générales de l'effet des oscillations sur les contraintes de séchage. Ensuite dans une seconde partie, des essais spécifiques ont été réalisés pour étudier l'effet de la courbure de cernes sur la déformation mesurée de nos échantillons. Suite à ces essais, tout comme ceux du chapitre 2 et l'étude théorique du chapitre 3, nous nous sommes intéressés dans une troisième partie à étudier l'effet de la période des oscillations et l'effet de l'épaisseur de l'échantillon sur la déformation mesurée. Enfin, dans une dernière partie nous utilisons le dispositif de flexion trois points pour le séchage sous charge avec le but de clarifier les résultats obtenus par le dispositif de poutre cantilever. Les conditions d'essais sont synthétisées dans le Tableau 4.1. et présentées en détail dans l'Annexe D.

Pour l'ensemble de ces essais, le **matériel végétal utilisé** a été prélevé dans des billons de hêtre (*Fagus sylvatica*) fraichement abattus provenant du département de Meurthe et Moselle (54). Pour les trois premières parties le matériel végétal a été prélevé dans la forêt de Brin, alors que pour la quatrième partie il a été fourni par la scierie *Bois et Performances*, située dans les Vosges (88).

Tableau 4.1. Synthèse de conditions d'essais

Partie	N° de campagne	Annexe	Débit	Epaisseur (mm)	T° sèche (°C)	T° rosée (°C)	T° humide (°C)	X_{eq} (%)	Période (heures)
1. Observations générales de l'effet des oscillations sur les contraintes de séchage	1	D.1	Q[1] et D[2]	10,0[3] 5,0[4]	60,0	48,0 (51,0 – 45,0)[5]	49,2 (51,8 – 46,7)	8,2 (9,6 – 6,9)	3
(Chaque campagne est composée d'un séchage classique et un séchage oscillant)	A.1 A.2	D.2	Q et D	10,0 5,0	60,0	45,0 (48,0 – 42,0)	46,7 (49,2 – 44,3)	7,0 (8,2 – 6,1)	4
2. Effet de la courbure de cernes *(Comporte seul un séchage oscillant, comparé au séchage classique de la campagne n°A.2)*	A.2bis	D.3	D	10,0 5,0	60,0	45,0 (48,0 – 42,0)	46,7 (49,2 – 44,3)	7,0 (8,2 – 6,1)	4
3. Effet de la période et de l'épaisseur *(Chaque campagne est composée d'un séchage classique et deux séchages oscillants)*	2 3	D.4	D Q	10,0 et 20,0 5,0 et 10,0	60,0	48,0 (50,0 – 46,0)	49,2 (50,9 – 47,5)	8,2 (9,0 – 7,3)	2 et 8
4. Essais complémentaires de séchage sous charge *(Campagne composée d'un séchage classique et un séchage oscillant)*	4	D.5	Q D	10,0[6] 5,0[6]	60,0	48,0 (51,0 – 45,0)	49,2 (51,8 – 46,7)	8,2 (9,6 – 6,9)	3

1. quartier
2. dosse
3. séchage sous charge (poutre cantilever)
4. séchage dissymétrique (flying wood)
5. valeurs pour la conduite oscillante
6. séchage sous charge (flexion trois points)

4.2.1. Utilisation de *TransPore* pour le choix de conditions d'essais

La **conduite de séchage** adoptée commence par une montée simultanée de la température sèche et de la température de rosée pour maintenir une ambiance proche de la saturation dans l'enceinte, évitant ainsi le séchage de l'échantillon. Ensuite, pour la conduite de séchage classique de référence, la température sèche est maintenue constante, alors que la température de rosée diminue selon une rampe jusqu'à atteindre la valeur de consigne maintenue jusqu'à la fin du séchage (Figure 4.6).

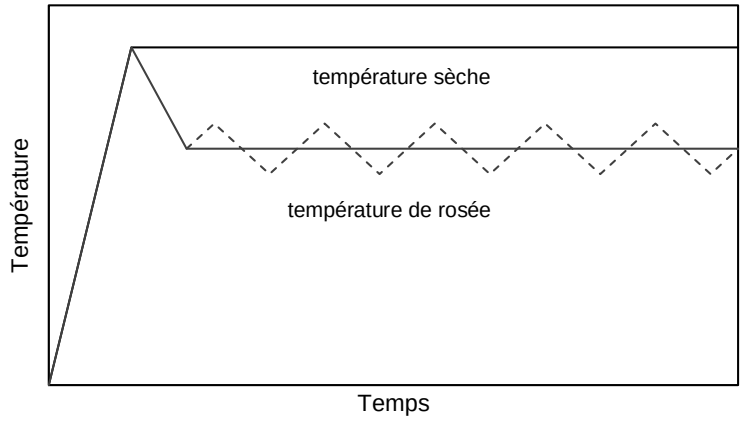
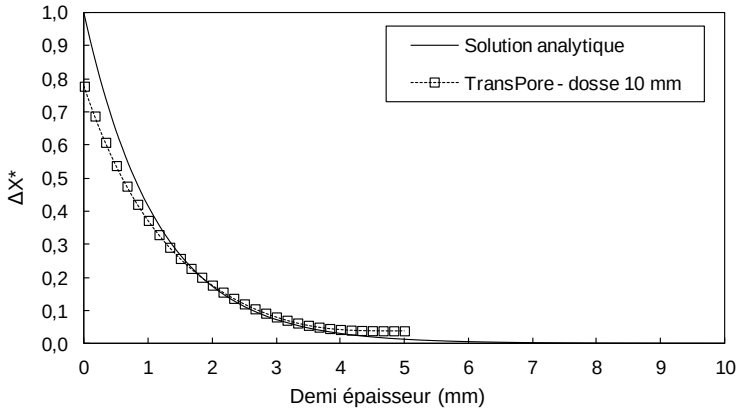


Figure 4.6. Schéma des tables de séchage utilisées.

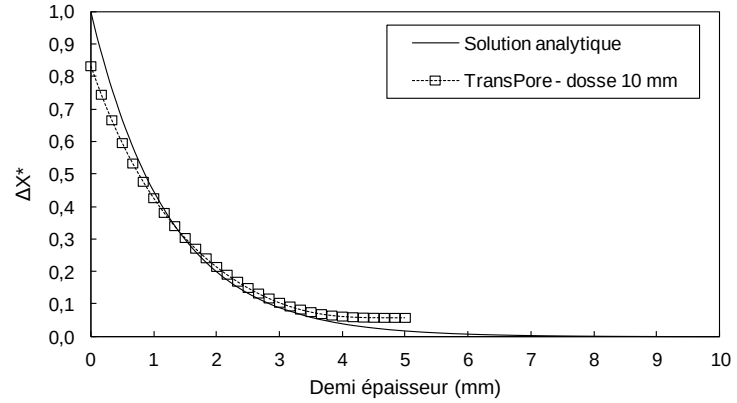
L'oscillation de la teneur en eau d'équilibre a été effectuée au moyen de la température de rosée en concordance avec les essais en configuration semi – industrielle (chapitre 2). Ainsi, la température de rosée (courbe en pointillé dans la Figure 4.6) oscille-t-elle autour du palier suivi lors du séchage classique de référence. Les oscillations peuvent commencer par une phase d'adsorption (comme illustré dans la Figure 4.6) ou de désorption. Le choix de l'amplitude et de la période des oscillations s'est fait à l'aide de l'outil numérique *TransPore*. La formulation mécanosorptive de *TransPore* n'étant pas encore fiable pour les conditions oscillantes, **nous avons basé le choix uniquement sur les transferts de masse**. La simulation numérique a aussi servi au choix de l'épaisseur de l'échantillon, tout en prenant en compte les dispositifs expérimentaux à utiliser.

La Figure 4.7 présente l'évolution des oscillations dans l'épaisseur de l'échantillon pour toutes les campagnes d'essais. Ces figures sont issues de la simulation numérique pour des échantillons débités sur dosse. La solution analytique sans facteurs correctifs est donnée ici à titre comparatif. Ces configurations devraient conduire à une relaxation supplémentaire des contraintes de séchage par l'activation du fluage mécanosorptif. Il convient de signaler que ces conditions ont aussi tenu compte des caractéristiques du séchoir, les oscillations devant être techniquement possibles avec ce matériel. Dans ces figures, le dernier point de la courbe représente le cœur de la planche.

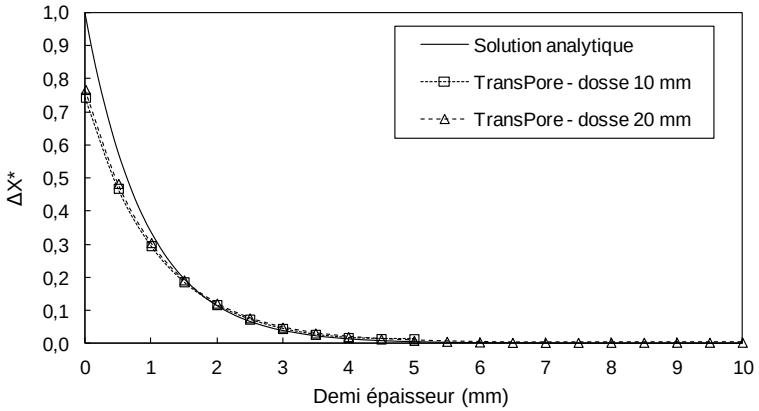
Selon la Figure 4.7a (campagnes n°1 et 4), avec un échantillon de 10 mm d'épaisseur, le fluage mécanosorptif devrait être sensiblement activé de la surface à 1 mm de profondeur (ΔX^{*}>0,4). Ensuite, les oscillations s'atténueront progressivement et au cœur celles-ci seront pratiquement nulles puisque la courbe de variation d'humidité rejoint la valeur zéro. Il n'y aura donc plus d'activation mécanosorptive au cœur.



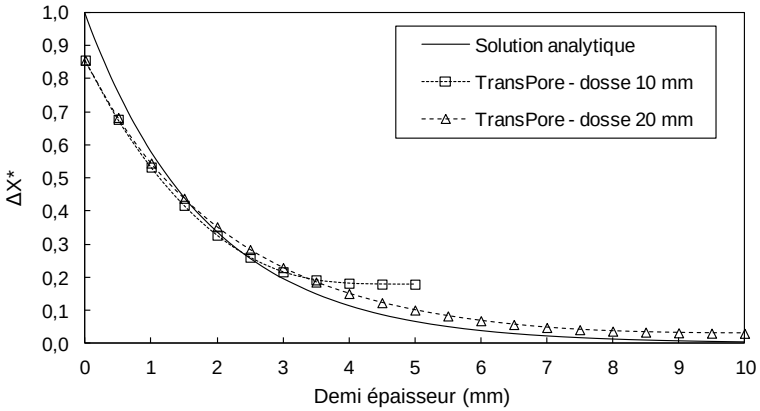
a. Campagnes n°1 et 4 [X_{eq} 8%, ΔX_{eq} 3%, période 3 heures]



b. Campagnes n°A.1, A.2 et A.2bis [X_{eq} 7%, ΔX_{eq} 2%, période 4 heures]



c. Campagnes n°2 et 3 [X_{eq} 8%, ΔX_{eq} 2%, période 2 heures]



d. Campagnes n°2 et 3 [X_{eq} 8%, ΔX_{eq} 2%, période 8 heures]

Figure 4.7. Variation adimensionnelle de teneur en eau en fonction de la demi-épaisseur pour différents séchages oscillants à 60°C de température sèche.

Pour les campagnes n°A.1, A.2 et A.2bis, la table de séchage classique de référence utilisée dans la première configuration a été durcie afin d'avoir une courbure plus importante pour les essais de *flying wood*. D'après la simulation numérique de la Figure 4.7b, la période étant un peu plus longue, toute l'épaisseur de l'échantillon est désormais perturbée par les oscillations, mais au cœur celles-ci sont bien atténuées.

Dans le chapitre précédent, nous avons observé que l'atténuation des oscillations de teneur en eau dans l'épaisseur de l'échantillon est affectée par la période. Néanmoins, les résultats présentés dans le Chapitre 2 n'ont pas révélé des différences marquantes entre les deux périodes au sein de chaque campagne. Afin de valider cette observation, les campagnes n°2 et 3 ont été réalisées. Tel qu'on observe dans les Figure 4.7c et 4.7d, les deux périodes choisies, soit 2 et 8 heures, devaient induire des effets suffisamment contrastées, la plus longue devant activer le fluage mécanosorptif dans des zones plus profondes de l'épaisseur de la planche. Nous avons également décidé de tester deux épaisseurs différentes, soit 10 mm et 20 mm. L'idée initiale était d'obtenir avec la période courte et l'épaisseur fine une valeur de ΔX^* au cœur similaire à celle obtenue avec la période longue et l'épaisseur forte. Cela s'entend en termes adimensionnels.

Avec une période de 8 heures, les échantillons de faible épaisseur (10 mm) auront des oscillations de la teneur en eau même au cœur, alors que pour les échantillons de forte épaisseur (20 mm) celles – ci n'affecteront pas la zone centrale de l'échantillon. Pour la période de 2 heures, le cœur des échantillons ne sera pas perturbé par les oscillations et ceci pour les deux épaisseurs. Néanmoins, la proportion de l'épaisseur affectée par les oscillations sera bien plus importante pour les échantillons de faible épaisseur. Les zones affectées par les oscillations étant contrastées, le comportement mécanique devrait également être contrasté. Les configurations permettant des oscillations de teneur en eau, et donc l'activation du fluage mécanosorptif, sur une plus grande proportion de l'épaisseur devraient réduire davantage les contraintes produites pendant le séchage.

4.2.2. Echantillonnage

L'échantillonnage devait minimiser la variabilité entre les échantillons de deux dispositifs prévus ainsi que la variabilité entre le séchage classique de référence et le séchage oscillant. Le bois étant un matériau d'origine biologique, sa variabilité est très importante entre essences, à l'intérieur d'une même essence et à l'intérieur d'un même arbre. L'échantillonnage est défini afin de tenter de minimiser cette variabilité naturelle.

Les échantillons pour ces essais ont été prélevés dans des billons d'un diamètre d'environ 35 cm, à l'exception de la campagne n°4 pour laquelle le diamètre a été de 60 cm. Des planches de 20 à 35 mm d'épaisseur selon les campagnes, débitées sur dosse et sur quartier, ont été découpées. Ensuite elles ont été rabotées jusqu'à une épaisseur de 10 mm. Les échantillons de séchage sous charge et de séchage dissymétrique ont été découpés selon les plans présentés dans l'Annexe C.

Les dimensions finales des échantillons sont présentées dans la Figure 4.8. En outre, il faut faire une précision par rapport à l'encastrement des échantillons poutre cantilever débités sur quartier, la disposition des cernes n'étant pas la même. L'encastrement de type « a » a été utilisé pour les trois

campagnes de la première partie (n°1, A.1 et A.2), alors que le type « b » a été utilisé pour les essais ultérieures, sur l'effet combiné de la période et de l'épaisseur. En effet, le billon pour la campagne n°1 étant d'un diamètre relativement petit (environ 30 cm), il a été difficile d'obtenir des échantillons de 170 mm de longueur. En conséquence, quelques échantillons pouvaient comporter une partie de moelle que nous avons préféré placer au niveau de l'encastrement pour éviter de fragiliser l'extrémité supportant la charge.

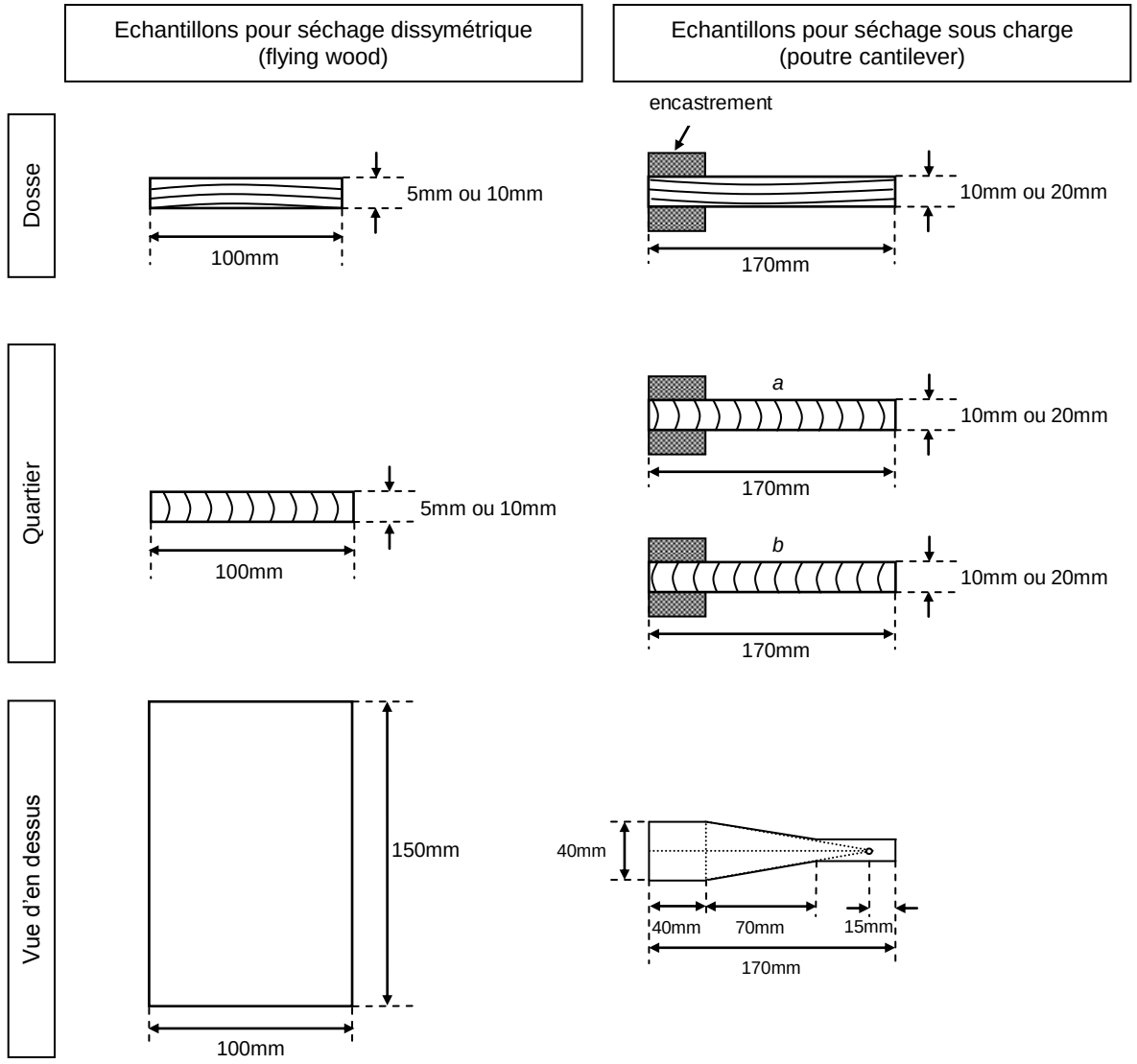


Figure 4.8. Géométrie des échantillons pour les dispositifs expérimentaux de séchage dissymétrique (flying wood) et séchage sous charge (poutre cantilever).

Pour chaque campagne d'essais, les échantillons étaient coupés juste avant le premier séchage, soit le séchage classique de référence. Les échantillons pour le séchage oscillant ont été stockés dans un sac plastique dans un réfrigérateur pour éviter tout séchage et développement de moisissures.

4.2.3. Effet de la courbure de cernes sur la déformation mesurée

Tenant compte de l'anisotropie du retrait dans le cadre d'une orthotropie cylindrique, la courbure de cernes peut avoir un effet non négligeable sur la déformation des échantillons soumis au séchage (Figure 4.9). Le retrait tangentiel étant plus important que le retrait radial, nous nous intéressons particulièrement au débit sur dosse. En effet, lors du séchage, l'échantillon sur dosse se tuile naturellement puisque le retrait côté écorce est plus fort que côté cœur. Cela est très important pour interpréter nos résultats, compte tenu des dimensions de nos échantillons où la courbure de cernes pouvait être bien différente d'une surface à l'autre.

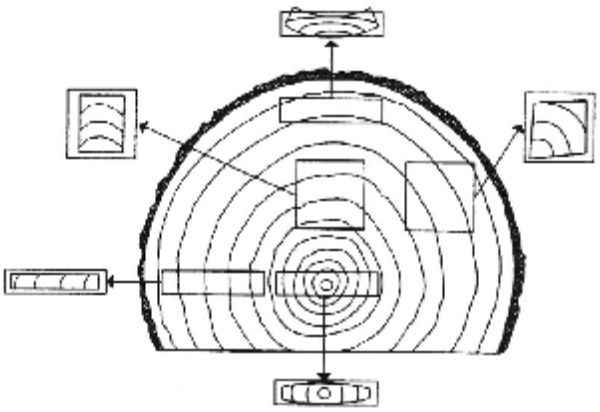


Figure 4.9. Déformation des planches en fonction de leur position dans la grume (d'après Aléon et al., 2001).

A l'anisotropie du retrait s'ajoutent dans notre cas d'autres facteurs. En séchage dissymétrique (flying wood), s'ajoute le gradient de la teneur en eau qui induit un gradient de retrait entre la surface d'échange et la surface colmatée. Et en séchage sous charge (poutre cantilever), outre le gradient de teneur en eau entre la surface et le cœur, s'ajoute un gradient de contrainte imposée avec l'application d'une charge à l'extrémité libre. Chacun de ces facteurs contribue à la déformation globale de l'échantillon. La Figure 4.10 propose une synthèse qualitative des déformations, inspirée des travaux de Colmars (2011), selon la position de cernes dans l'épaisseur de l'échantillon.

Selon la position de cernes dans l'échantillon de **séchage dissymétrique (flying wood)**, on distingue la déformation due uniquement à l'anisotropie du retrait et la déformation due au gradient de teneur en eau (qui produit un gradient de retrait en lien avec l'effet mémoire du bois). Pour cette dernière on y trouve un état transitoire correspondant à la deuxième phase de séchage, et un état d'équilibre correspondant à la troisième phase de séchage. Chacune des déformations contribue à la déformation globale par superposition (Colmars, 2011).

Pour un échantillon dont la surface d'échange est la plus proche de l'écorce (tel que dans nos essais), pendant la deuxième phase de séchage, les deux déformations vont dans le même sens. Par contre, pendant la troisième phase la déformation due au gradient de teneur en eau change de signe. Il est difficile de se prononcer sur l'allure de la courbure à l'état d'équilibre total. Toutefois, puisque les deux déformations ont le même signe dans un premier temps, nous avons appelé « plus » ce positionnement de cernes. Dans le cas contraire, lorsque la surface d'échange est celle la plus proche

du cœur, les deux déformations s'opposent en signe (deuxième phase), puis elles vont dans le même sens (troisième phase). Etant donné que dans un premier temps les déformations s'opposent, nous avons appelé ce positionnement de cernes « moins ».

SECHAGE DISSYMETRIQUE (flying wood)					
Position	A l'état vert (état initial)	Déformation due à l'anisotropie du retrait	Déformation due au gradient de teneur en eau		Etat final
			2ème phase	3ème phase	
« plus »					?
« moins »					

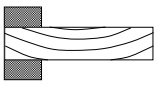
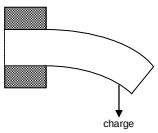
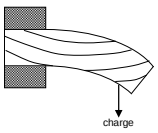
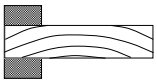
SECHAGE SOUS CHARGE (poutre cantilever)				
Position	A l'état vert (état initial)	Déformation due à l'anisotropie du retrait	Déformation due au gradient de contraintes supplémentaire	Etat final
« plus »				
« moins »				?

Figure 4.10. Synthèse des déformations des échantillons sur dosse en fonction de la position des cernes.

Dans le cas du **séchage sous charge (poutre cantilever)**, on distingue la déformation due uniquement à l'anisotropie du retrait et la déformation due au gradient de contraintes supplémentaire provoqué par la charge. S'agissant d'un séchage symétrique, les contraintes induites par le gradient de teneur en eau s'équilibrent. Si le côté cœur est placé au-dessus (tel que dans nos essais), les deux déformations ont le même signe. Ce positionnement a ainsi été appelé « plus ». Au contraire, le positionnement dit « moins » est celui ou le côté écorce est placé au-dessus, les deux déformations s'opposant en signe.

Pour vérifier l'effet de la courbure de cernes, nous avons réalisé un nouveau séchage oscillant avec des échantillons provenant du même arbre et de la même génératrice que ceux de la campagne n°A.2 et avec les mêmes conditions d'essai. Les résultats de ce nouveau séchage oscillant ont été comparés à ceux du séchage classique de la campagne n°A.2. Pour éviter toute confusion, ce deux essais seront appelés par la suite campagne n°A.2bis.

4.3. Présentation et discussion de résultats

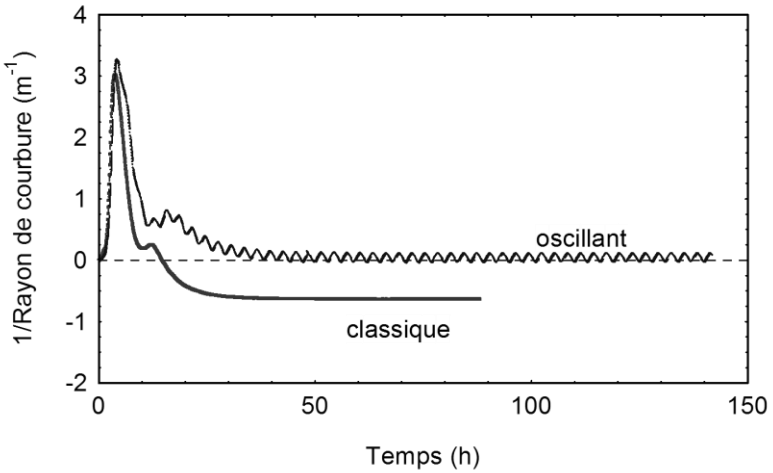
Les résultats sont présentés en détail dans l'Annexe D sous forme d'une fiche sur deux pages pour chaque campagne, accompagnée de quelques commentaires sur le déroulement des essais. Pour mieux orienter le lecteur, le Tableau 4.2 donne l'organisation de l'annexe D. Ici, nous décrirons et discuterons les tendances générales observées à l'appui de quelques figures.

Tableau 4.2. Organisation des résultats.

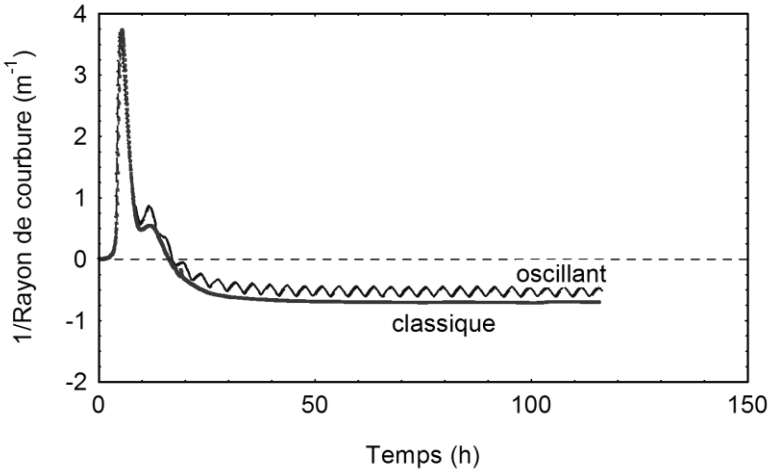
1ère partie (Observations générales)	Campagne n°1	Annexe D.1
	Campagne n°A.1 Campagne n°A.2	Annexe D.2
2ème partie (Effet de la courbure de cernes)	Campagne n°A.2bis	Annexe D.3
3ème partie (Effet de la période et de l'épaisseur)	Campagne n°2 Campagne n°3	Annexe D.4
4ème partie (Essais complémentaires de séchage sous charge)	Campagne n°4	Annexe D.5

4.3.1. Séchage dissymétrique

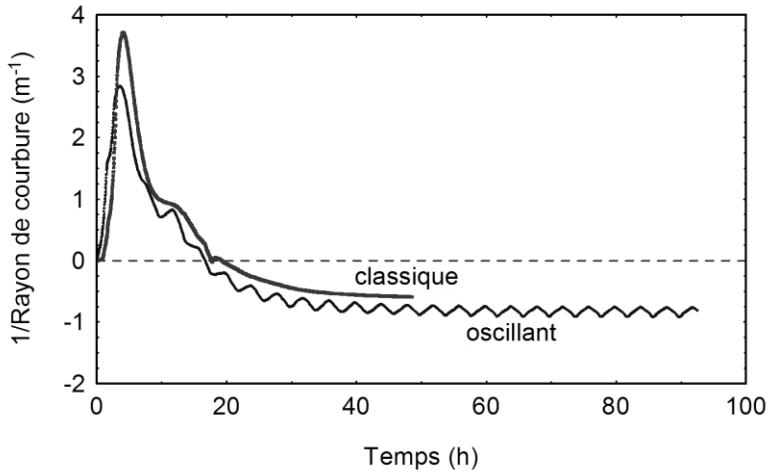
D'après les simulations du chapitre précédent (Annexe B2) et les simulations de transferts de masse présentées dans *Conditions d'essais*, en séchage dissymétrique, l'activation mécanosorptive obtenue avec les oscillations devait se traduire par une courbure finale plus faible pour les séchages oscillants puisque celle-ci est l'expression de contraintes subies pendant le séchage. Toutefois, nos résultats mettent en évidence que cela n'est pas toujours le cas. Cela peut être apprécié dans la Figure 4.11 où quelques résultats sont présentés.



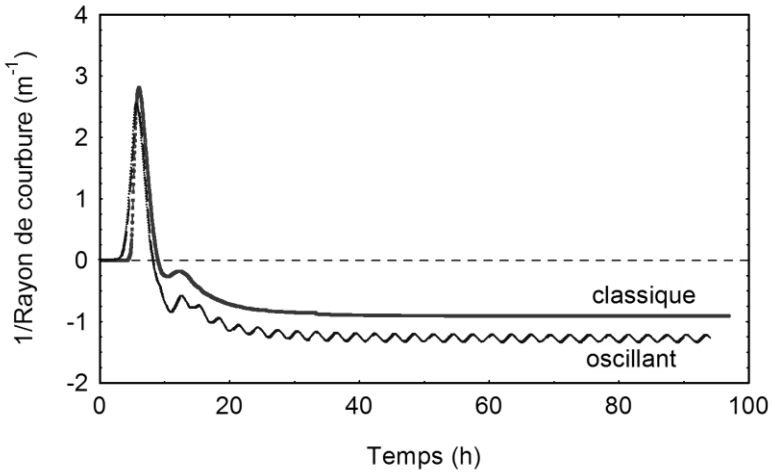
a. Campagne n°1



b. Campagne n°A.1



c. Campagne n°A.2



d. Campagne n°4

Figure 4.11. Quelques résultats du séchage dissymétrique (flying wood) pour les échantillons débités sur dosse et d'une épaisseur de 5 mm.

En général, on observe une inversion de contraintes de séchage traduite par une inversion, plus ou moins importante selon le cas, de la courbure de l'échantillon. La courbure finale de l'échantillon peut être plus accentué pour le séchage oscillant (campagne n°4), voire équivalente (campagne n°A.1 et A.2), mais peut aussi être plus faible (campagne n°1). Le résultat plutôt favorable constaté lors de la campagne n°1 n'a pas été confirmé par la campagne n°4. Pourtant, les conditions d'essais étaient les mêmes.

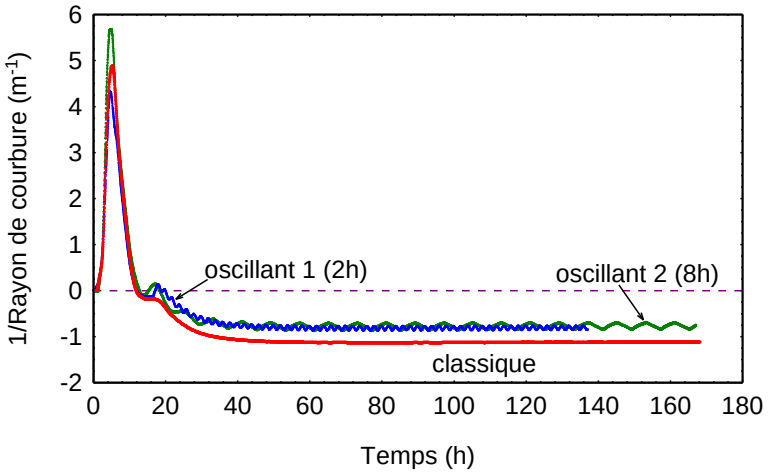
Ces résultats nous permettent de dire que les conditions d'essai ici testées n'apportent pas de relaxation supplémentaire de contraintes de séchage. Les contraintes en séchage oscillant, exprimées par la courbure finale de l'échantillon, ne sont pas systématiquement diminuées par l'oscillation des conditions climatiques.

A continuation, nous discuterons sur l'effet de la période des oscillations et l'épaisseur de l'échantillon sur la déformation mesurée (campagnes n°2 et 3 pour des échantillons sur dosse et sur quartier respectivement). La Figure 4.12 synthétise les résultats obtenus. Pour ces campagnes, les séchages ont été menés débit par débit afin de sécher les deux épaisseurs simultanément. Pour rappel, deux périodes ont été testées (2 heures et 8 heures), et deux épaisseurs (5 mm et 10 mm).

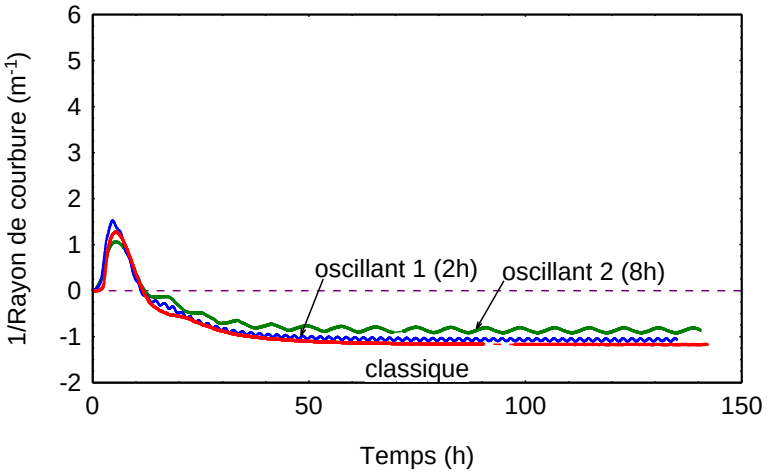
Pour les *échantillons sur dosse*, les résultats dépendent de l'épaisseur de l'échantillon. Ainsi, pour les échantillons fins, la courbure finale diminue avec les oscillations sans différence entre les deux périodes étudiées (Figure 4.12a). Le fluage mécanosorptif semble avoir diminué les contraintes dans l'épaisseur des échantillons donnant ainsi une courbure plus faible. Aussi, il est intéressant de constater qu'à la différence de la campagne n°1 (échantillon débité sur dosse) la déflexion finale des essais oscillants est négative. Ainsi, malgré l'activation de la mécanosorption par les oscillations, la recouvrance des déformations différées apparues au début du séchage n'est pas complète. En revanche, pour les échantillons épais, les résultats ne sont pas ceux attendus (Figure 4.12b). Les oscillations produisent une courbure finale plus prononcée que celle du séchage classique. Pour le séchage oscillant de 8 heures, le rayon est légèrement plus faible que pour le séchage oscillant de 2 heures mais la différence n'est pas marquante.

En ce qui concerne les *échantillons sur quartier*, nous observons pour les échantillons fins que les oscillations produisent un rayon de courbure finale plus important (courbure plus faible) que celui produit par le séchage classique (Figure 4.12c). Ce résultat vient corroborer les résultats obtenus dans les campagnes n°1 et n°2 (échantillon fin) ou ceux obtenus avec le code numérique dans le chapitre 3. De plus, le rayon est moins prononcé pour le séchage oscillant de 8 heures. Ce résultat semble indiquer qu'une plus grande recouvrance des déformations mécanosorptives apparues au début du séchage est possible lorsque la période est longue. Toutefois, pour les échantillons épais, les résultats indiquent une courbure finale un peu plus faible pour le séchage oscillant de 2 heures, et en revanche plus forte pour le séchage oscillant de 8 heures (Figure 4.12d).

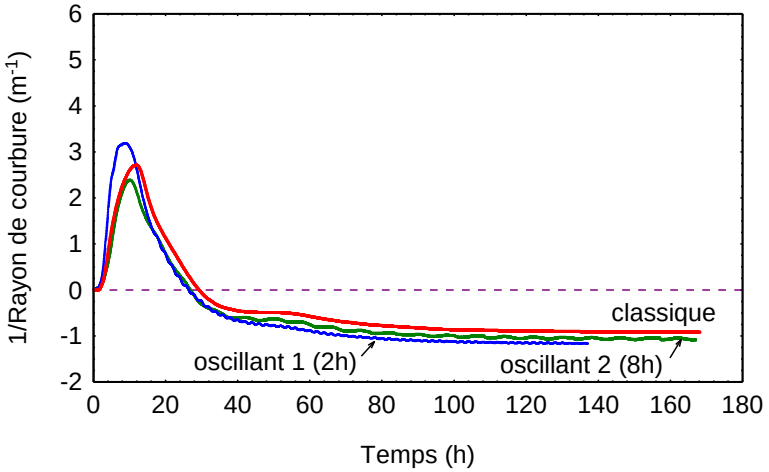
Nous pouvons ainsi conclure que la courbure finale en séchage dissymétrique semble être affectée uniquement par l'épaisseur. La courbure finale a ainsi été diminuée seulement pour les échantillons fins. Toutefois, aucune différence marquante entre les deux périodes n'a été constatée quelle que soit l'épaisseur concernée.



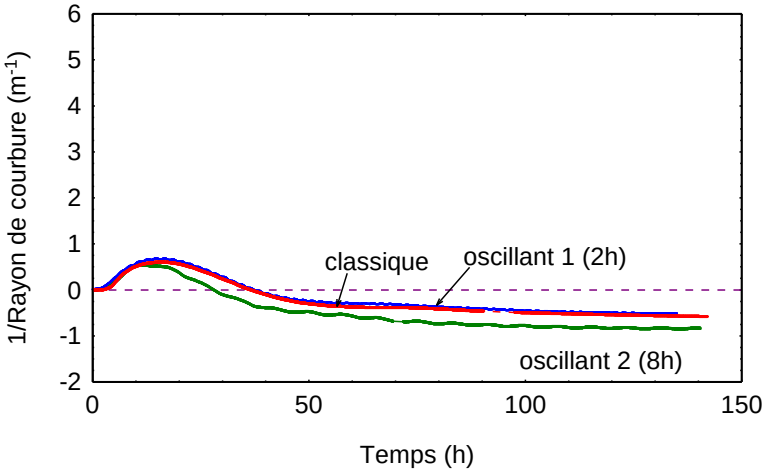
a. Campagne n°2: échantillon sur dosse de 5 mm d'épaisseur (fin)



c. Campagne n°3: échantillon sur quartier de 5 mm d'épaisseur (fin)



b. Campagne n°2: échantillon sur dosse de 10 mm d'épaisseur (épais)



d. Campagne n°3: échantillon sur quartier de 10 mm d'épaisseur (épa

Figure 4.12. Séchage dissymétrique : effet de la période des oscillations et de l'épaisseur des échantillons (campagnes n°2 et n°3).

Avant de dresser une synthèse des résultats présentés jusqu'ici, nous discuterons sur l'effet de l'orientation des accroissements annuels sur la déformation (campagne n°A.2bis) à l'appui de la Figure 4.13. Pour interpréter cette figure on doit se concentrer sur le gradient de retrait dans l'épaisseur de la planche en supposant le gradient d'humidité indifférent à la disposition de cernes. Le pic initial du rayon de l'échantillon en position « plus » est plus fort que celui en position « moins ». Cela est logique, car pendant la deuxième phase de séchage les deux déformations en jeu vont dans le même sens pour la position « plus » (Figure 4.10). Toutefois, le pic obtenu en conduite classique est supérieur. Ensuite, les contraintes de séchage s'inversent et en fin de séchage, le rayon est plus prononcé pour les échantillons séchés en conduite oscillante. L'échantillon en position « plus » présente le rayon le plus prononcé. Il semblerait que les oscillations n'arrivent pas à réduire les déformations différées apparues au début du séchage. En outre, la position de cernes « plus » qui accentue la déformation en deuxième phase, l'accentue également lors de la troisième phase.

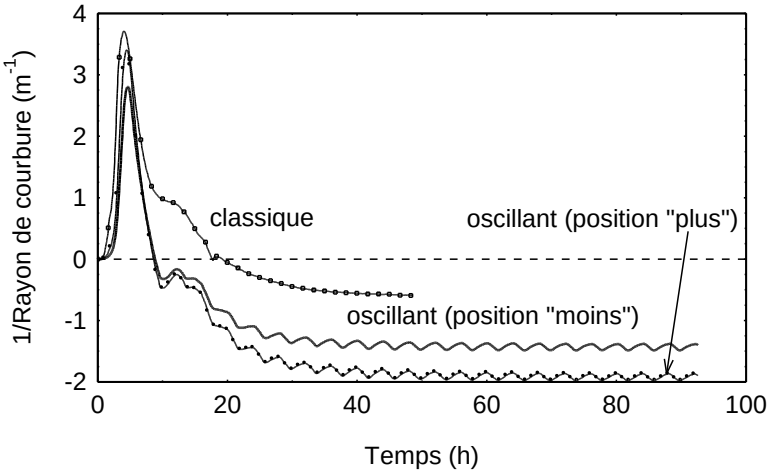


Figure 4.13. Séchage dissymétrique : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 5 mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis).

D'après ces résultats, l'orientation des cernes a un effet non négligeable sur la déformation globale de l'échantillon. La position que nous avons appelée « plus », et qui est celle que nous utilisons habituellement dans nos essais, produit effectivement des déformations plus accentuées. L'explication que nous avançons au moyen d'une analyse synthétique (Figure 4.10), distingue la contribution de la déformation due uniquement à l'anisotropie du retrait et celle de la déformation due à l'histoire d'humidité, en lien avec l'effet mémoire du bois. Alors que pour le séchage sous charge, le rôle de chacune des contributions est clair, en séchage dissymétrique la distinction entre les deux contributions est plus complexe.

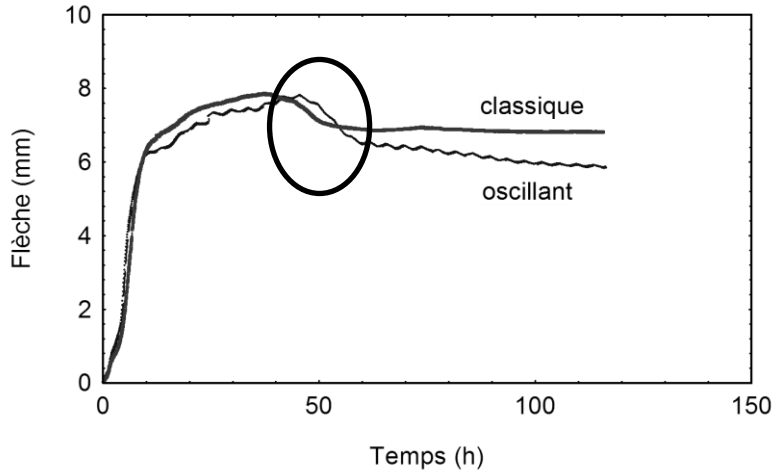
Nous pouvons synthétiser les tendances qui ressortent de nos essais de séchage dissymétrique ainsi:

- La courbure finale n'est pas toujours diminuée par l'oscillation des conditions climatiques.
- La courbure finale semble être affectée uniquement par l'épaisseur. Elle a ainsi été diminuée seulement pour les échantillons fins. Toutefois, aucune différence marquante entre les deux périodes n'a été constatée quelle que soit l'épaisseur concernée.

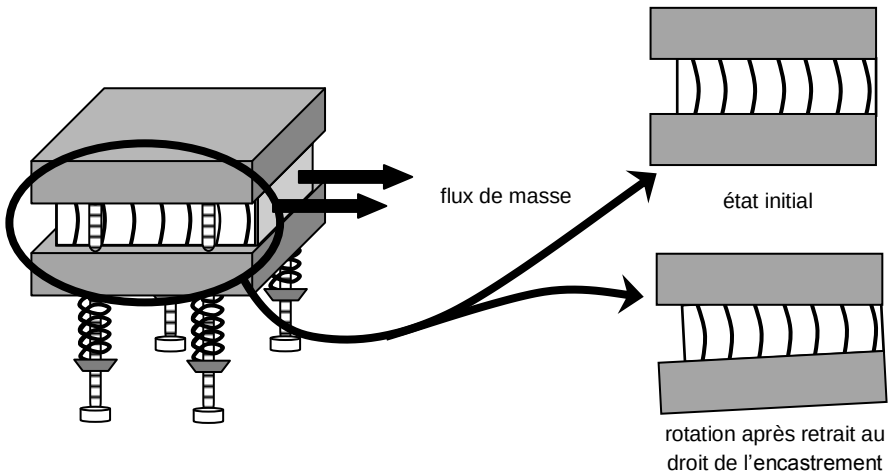
En outre, nous pouvons ajouter que la cinétique de séchage n'est pas affectée par les oscillations. Aucune différence entre les deux périodes et les deux épaisseurs étudiées n'a été observé.

4.3.2. Séchage sous charge

Les essais de séchage sous charge devaient apporter des explications supplémentaires à celles fournies par le séchage dissymétrique. L'activation du fluage mécanosorptif devait se traduire par une flèche supplémentaire avec les oscillations. Toutefois, quelques essais ont été perturbés par un problème au niveau de l'encastrement des échantillons débités sur quartier, en nous privant ainsi des nombreuses données. En effet, pour quelques essais, nous avons observé une diminution de la flèche, comme si l'échantillon se redressait (Figure 4.14.). Il est probable que la partie encastrée, subissant un retard au séchage, soit à l'origine d'un retrait au droit de l'encastrement. Cela est susceptible de faire pivoter l'échantillon autour de la face d'appui, donc vers le haut, en raison des ressorts des mors utilisés justement pour assurer un encastrement correct.



a. Exemple de « redressement » d'un échantillon poutre cantilever



b. Détail de l'encastrement

Figure 4.14. Explication du problème de pivot autour de la face d'appui à l'encastrement du dispositif poutre cantilever.

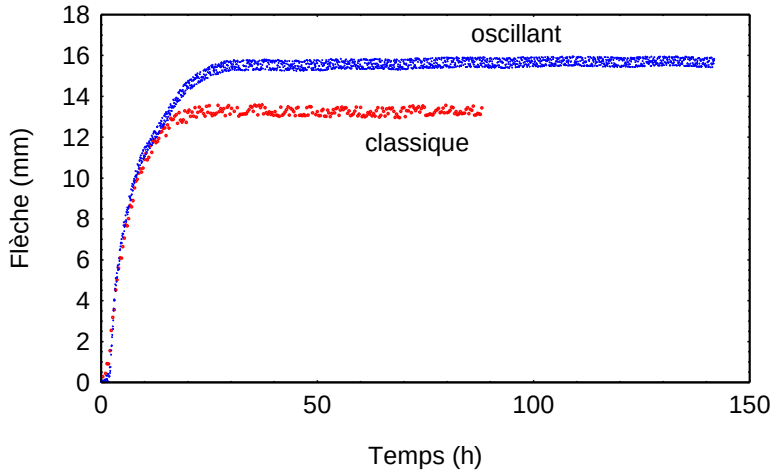
Malgré la rareté des résultats exploitables en raison des difficultés expérimentales, la Figure 4.15 présente quelques résultats à partir desquels certaines tendances ressortent. On y aperçoit notamment l'activation de la mécanosorption. La flèche obtenue en séchage oscillant est généralement supérieure à celle du séchage classique comme nous pouvions l'attendre à l'issue des simulations (Figure 4.7). De plus, le plafonnement de la flèche au bout de quelques cycles

d'oscillation, met en évidence l'existence d'une limite mécanosorptive. Le modèle de Ranta – Maunus, évoqué dans le chapitre précédent, serait donc à écarter.

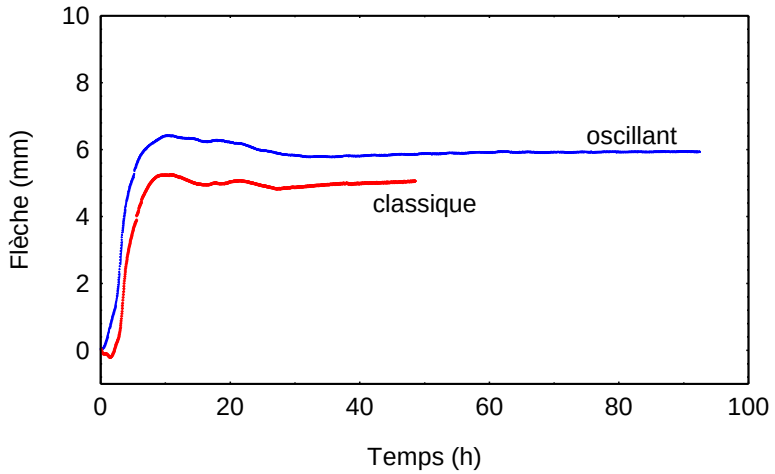
Bien qu'il soit difficile de conclure sur l'effet de la période et de l'épaisseur, les Figures 4.15c et 4.15d méritent quelques remarques. La Figure 4.15c, concernant les *échantillons sur dosse fins*, montre une flèche plus importante pour le séchage oscillant de 8 heures. Avec une période plus longue, le fluage mécanosorptif devrait se produire dans des couches plus profondes de l'échantillon. Ce résultat semble donc cohérent. Néanmoins, le séchage oscillant de 2 heures donne une flèche égale à celle du séchage classique en début de séchage, puis inférieure dans la plage de 20 à 70 heures pour ensuite rattraper la flèche du séchage classique. Ce résultat est intéressant, puisque en séchage dissymétrique (Figure 4.12a) la période longue ne semblait pas apporter de relaxation supplémentaire en comparaison avec la période courte. Cela montre la complémentarité des deux types de configuration de séchage. De leur côté, les échantillons sur quartier épais (Figure 4.15d), montrent une flèche similaire pour les trois séchages.

En raison des difficultés expérimentales rencontrées lors de plusieurs essais, nous ne pouvons pas dresser une conclusion concernant la poutre cantilever. Néanmoins, les rares résultats exploitables indiqueraient que, pour une épaisseur donnée, la période n'a pas d'effet sur la flèche. Aussi, l'existence d'une limite mécanosorptive est mise en évidence par une stabilisation assez rapide de la flèche.

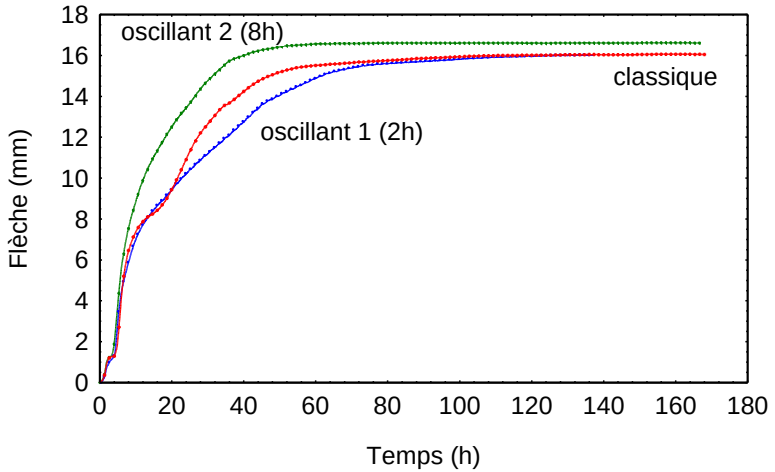
Puisque les données issues de tests de poutre cantilever ne peuvent pas apporter les informations nécessaires pour la validation du modèle de comportement mécanique proposé dans le chapitre 3, une modification du dispositif expérimental de séchage sous charge a été effectuée (flexion trois points).



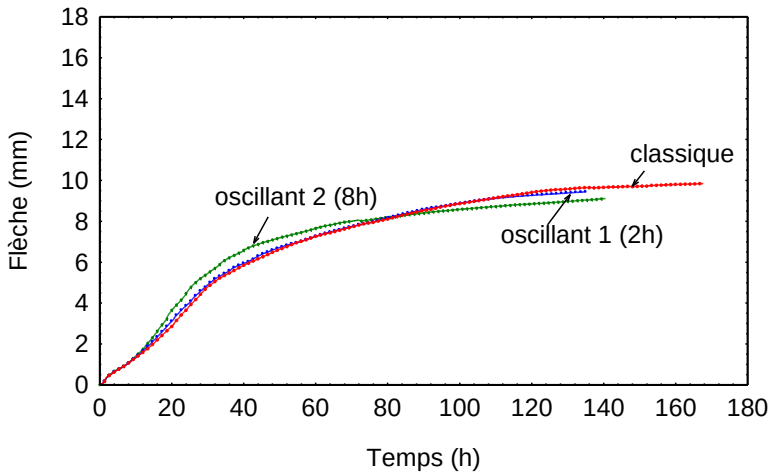
a. Campagne n°1 – échantillon sur dosse de 10 mm d'épaisseur



b. Campagne n°A.2 – échantillon sur dosse de 10 mm d'épaisseur



c. Campagne n°2 – échantillon sur dosse de 10 mm d'épaisseur



d. Campagne n°3 – échantillon sur quartier de 20 mm d'épaisseur

Figure 4.15. Quelques résultats du séchage sous charge (poutre cantilever).

Mais avant de présenter ces résultats, nous allons discuter brièvement sur l'effet de l'orientation des accroissements annuels sur la déformation mesurée à l'aide de la Figure 4.16. Les flèches obtenues sont supérieures à celle du séchage classique. En position « plus », la flèche évolue lentement et dépasse la flèche de l'échantillon en position « moins ». Cela semble cohérent avec l'analyse de la Figure 4.10. Tel qu'observé pour le séchage dissymétrique (Figure 4.13), l'orientation des cernes a un effet non négligeable sur la déformation globale de l'échantillon. La position que nous utilisons habituellement dans nos essais, produit effectivement des déformations plus accentuées (positions « plus »). La contribution de la déformation due à l'anisotropie du retrait allant dans le même sens que celle due au gradient de contraintes supplémentaires explique ce comportement.

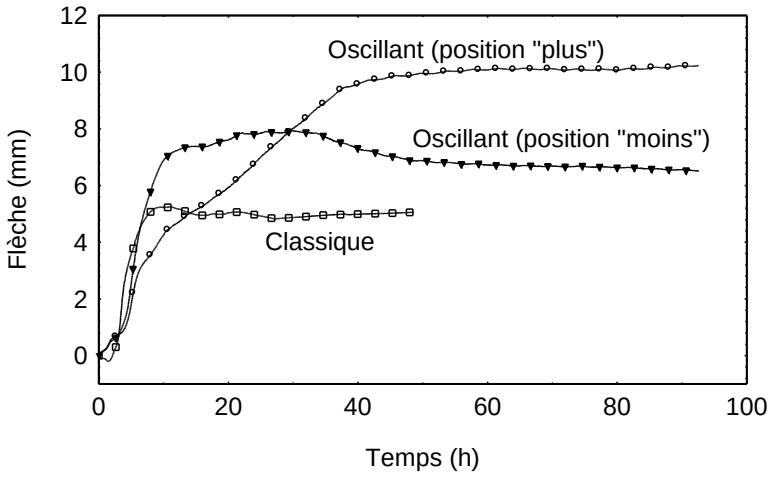
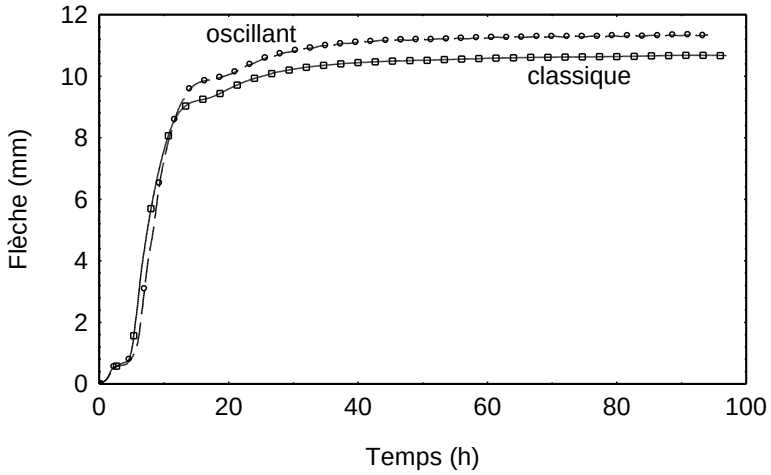


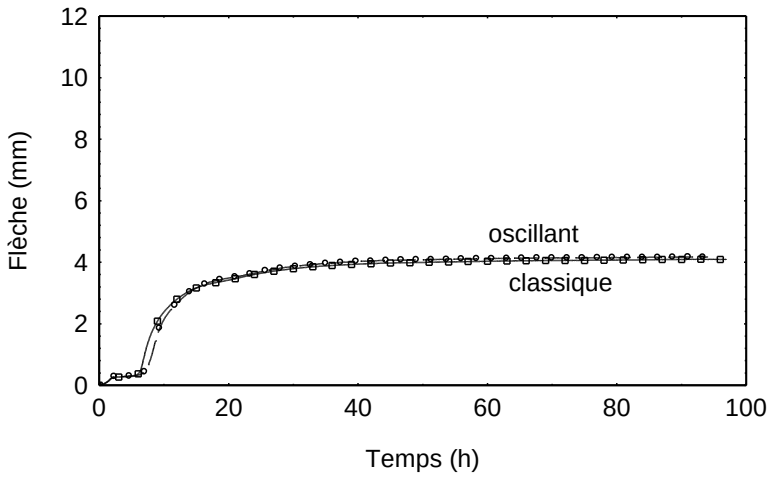
Figure 4.16. Séchage sous charge : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 10 mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis).

Nous pouvons désormais discuter sur les résultats obtenus avec le dispositif de flexion trois points, dont les résultats sont présentés dans la Figure 4.17. La première remarque concerne la petite augmentation de la flèche en début du séchage. Elle correspond à l'activation thermique du fluage viscoélastique par la montée en température, ce fluage étant par ailleurs hygro-activé par la forte teneur en eau initiale de l'échantillon. Une fois la température de consigne atteinte, le fluage viscoélastique continue avec un taux de variation de la flèche plus faible. Quelques heures après, les contraintes de séchage apparaissent via le retrait périphérique et le fluage mécanosorptif contribue à l'augmentation de la flèche. Ensuite, la flèche plafonne n'évoluant plus jusqu'à la fin de séchage, confirmant encore l'existence d'une limite mécanosorptive. La flèche finale du séchage oscillant est supérieure à celle du séchage classique, avec une différence plus importante pour l'échantillon débité sur dosse. Cette observation avait été faite précédemment pour les essais de la campagne n°1.

Le séchage sous charge utilisant la flexion trois points met en évidence l'activation thermique du fluage viscoélastique en début de séchage, ce qui n'est pas décelable en séchage dissymétrique. Cette activation thermique a été observée, bien que moins flagrante, dans quelques essais de poutre cantilever (dosses de 10 mm dans la campagne n°2, et quartiers de 20 mm dans la campagne n°3). Il est probable que la teneur en eau plus élevée des échantillons utilisés en flexion trois points ait hygro – activé pus longuement le fluage viscoélastique en début de séchage.



a. Echantillon sur dosse (épaisseur : 10 mm)



b. Echantillon sur quartier (épaisseur : 10 mm)

Figure 4.17. Résultats de séchage sous charge pour le dispositif de flexion trois points (campagne n°4).

A partir de l'ensemble des résultats des essais de séchage sous charge, il en ressort quelques tendances:

- La flèche en séchage sous charge est légèrement supérieure en séchage oscillant.
- Pour une épaisseur donnée, la période n'a pas d'effet sur la flèche.
- L'existence d'une limite mécanosorptive semble être confirmée par des déflexions qui tendent de façon asymptotique vers une limite malgré l'activation du fluage mécanosorptif par les oscillations.

L'ensemble des résultats présentés jusqu'ici met en évidence la difficulté à expliquer l'effet des oscillations sur les contraintes produites lors du séchage. Bien que quelques essais oscillants aient permis une réduction des contraintes au vu de la flèche finale du flying wood, cela n'a pas été confirmé pour les échantillons épais. De tels résultats expérimentaux dévoilent également la difficulté à identifier des paramètres mécanosorptifs par méthode inverse, à l'aide du code numérique *TransPore*, comme nous aurions pu l'espérer initialement. Tout cela nous évoque les

résultats présentés dans le chapitre 2 sur les essais en configuration semi – industrielle, où on signalait que les oscillations peuvent donner des résultats tout à fait contradictoires. Ici, on retrouve les tendances des travaux cités dans la littérature (Chadwick, et Langrish, 1996 ; Terziev et al, 2002 ; Sackey et al, 2004 ; Welling et Riehl, 2004 ; Herritsch, 2008 ; Milić et Kolin, 2008) rendant compte des résultats parfois favorables, parfois équivalents et parfois défavorables.

Conclusion

Dans ce chapitre, l'outil numérique *TransPore* a été utilisé pour choisir différentes configurations d'essai à être testées pour un séchage dissymétrique (au moyen de la technique du flying wood) et un séchage sous charge (au moyen d'un dispositif de poutre cantilever). La formulation mécanosorptive de *TransPore* n'étant pas encore fiable pour les conditions oscillantes, nous avons basé le choix uniquement sur les transferts de masse.

Plusieurs configurations utilisant des échantillons de 10 mm d'épaisseur pour le séchage sous charge et 5 mm pour le séchage dissymétrique ont été conçues (campagnes n°1, A.1 et A.2), ainsi qu'une configuration permettant d'étudier l'effet combiné de la période des oscillations et de l'épaisseur des échantillons (campagnes n°2 et 3). *TransPore* a ainsi été utilisé pour choisir deux périodes et deux épaisseurs permettant une activation du fluage mécanosorptif suffisamment contrastée.

Outre ces essais, nous avons étudié **l'effet de la courbure de cernes sur des échantillons débités sur dosse** et tout particulièrement l'effet de la position de cernes par rapport à l'épaisseur de l'échantillon (campagne n°A.2bis). La déformation globale est le résultat de la superposition de plusieurs facteurs : l'anisotropie du retrait, le gradient de teneur en eau et dans le cas du séchage sous charge, le gradient de contraintes supplémentaire produit par la charge. Les résultats ont montré l'effet non négligeable de l'orientation des cernes sur la déformation globale de l'échantillon. La position appelée « plus », et utilisée dans nos essais, produit effectivement des déformations plus accentuées.

A l'issue des campagnes n°1, A.1, A.2, 2 et 3, les informations sur le séchage sous charge se sont avérées insuffisantes pour compléter celles recueillies par le séchage dissymétrique. Le dispositif de poutre cantilever n'ayant pas fonctionné correctement en raison d'un problème de rotation autour de l'encastrement, une nouvelle campagne (n°4) a été réalisé utilisant un dispositif de flexion trois points pour le séchage sous charge.

A partir de l'ensemble des résultats, nous pouvons dresser une **synthétise des tendances** les plus marquantes :

- La cinétique de séchage n'est pas affecté par les oscillations, quelques soient le débit, la période et l'épaisseur.
- La courbure en séchage dissymétrique peut être considérée équivalente entre un séchage classique et un séchage oscillant, tant dans la forme que pour la courbure finale. Cependant, cette dernière est sensible à l'épaisseur, les échantillons fins étant généralement moins déformés en séchage oscillant.

- La flèche en séchage sous charge est légèrement supérieure en séchage oscillant, de l'ordre de 10% à 15%. L'absence d'effet de la période (nombre de cycles) est cohérente avec la stabilisation très rapide du fluage sous charge. Cette stabilisation met également en évidence l'existence d'une limite mécanosorptive.

Le comportement mécanosorptif observé dans ces essais semble ainsi plus complexe que ce qui était prévu à partir des simulations des transferts de masse, et confirme la disparité des résultats évoqués dans la littérature sur les conduites oscillantes (Chadwick, et Langrish, 1996 ; Terziev et al, 2002 ; Sackey et al, 2004 ; Welling et Riehl, 2004 ; Herritsch, 2008 ; Milić et Kolin, 2008). L'oscillation de la teneur en eau étant le moteur de l'activation mécanosorptive, on espérait que le comportement mécanique soit fonction de la proportion de l'épaisseur perturbée par les oscillations. Pourtant, une partie des déformations différées apparues au début du séchage semble irrécouvrable malgré l'activation périphérique de la mécanosorption tout au long de l'essai.

Enfin, il en ressort que le fluage mécanosorptif induit par les oscillations est très limité par rapport au fluage viscoélastique et au fluage mécanosorptif d'un séchage classique. Cela nous mène à une question cruciale concernant la régulation du séchoir : sait-on vraiment faire du séchage sans oscillations ? Pour répondre à cette question, dans la conclusion générale de cette thèse nous confrontons les résultats expérimentaux à la simulation numérique au moyen de l'outil *TransPore*. Le modèle de comportement mécanique sera capable de reproduire les tendances expérimentales ? Où faudra-t-il des éventuelles modifications ?

Conclusions et perspectives

Bilan du travail réalisé

Les résultats et les observations de cette thèse, au niveau expérimental à l'échelle de la pile (chapitre 2) et de la planche (chapitre 4) ou au niveau théorique (chapitre 3), apportent des éléments de réponse importants concernant l'effet des oscillations sur la cinétique de séchage et sur les contraintes de séchage.

A partir des résultats expérimentaux des chapitres 2 et 4, plusieurs remarques peuvent être faites :

- A l'échelle de la pile, les conduites oscillantes présentent un intérêt avéré pour l'amélioration de la qualité du bois séché : meilleure homogénéité de la teneur en eau finale, diminution du gradient de la teneur en eau finale dans l'épaisseur, diminution des déformations globales et diminution des contraintes résiduelles exprimées par le gap.
- La cinétique moyenne d'une planche n'est pas affectée par les oscillations de teneur en eau d'équilibre. A l'échelle de la pile, nous avons même constaté pour plusieurs essais une accélération de la cinétique de séchage, qui pour le moment n'a pas pu être expliquée.
- Les résultats du séchage sous charge du chapitre 4 montrent clairement la présence d'un plafonnement du fluage mécanosorptif, même avec une activation continue des propriétés mécanosorptives. L'activation par les oscillations dans la gamme de fréquence étudiée n'a pas été suffisante pour recouvrir complètement la courbure des échantillons du séchage dissymétrique.
- Il est en revanche très difficile de conclure simplement sur l'effet des oscillations sur la relaxation des contraintes de séchage en raison du manque de répétabilité des tendances expérimentales.

En ce qui concerne l'apport de l'étude théorique du chapitre 3 pour prédire les effets des conduites oscillantes, différentes remarques peuvent être faites :

- L'approche analytique et l'approche numérique effectuées permettent de quantifier l'atténuation des oscillations de teneur en eau dans l'épaisseur de la planche selon un taux dépendant de la période. Aussi, nous avons vu que l'amplitude et la profondeur perturbée par les oscillations évoluent au cours du processus. La formulation analytique et son facteur de correction permettent d'obtenir un outil particulièrement intéressant pour les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué.
- L'utilisation du modèle de comportement mécanosorptif de Salin (1992) ne semble pas raisonnable pour les conduites oscillantes car il ne permet pas d'intégrer les déformations permanentes observées dans les travaux expérimentaux publiés dans la littérature.
- Les simulations présentées dans de l'Annexe B, montrent l'intérêt d'étudier conjointement le séchage dissymétrique et le séchage sous charge pour l'identification des paramètres mécanosorptifs. Ils apportent en effet des informations complémentaires pour dissocier l'effet des propriétés viscoélastiques et des propriétés mécanosorptives sur l'évolution de la déflexion.

Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique

Pour confronter les résultats expérimentaux avec la simulation numérique, nous avons retenu une formulation simple, adoptée antérieurement par Leicester (1971) puis par Toratti et Svensson (1992), qui intègre un terme mécanosorptif irrécouvrable. Il s'agit d'un élément de Kelvin (partie recouvrable) et un amortisseur (partie irrécouvrable) en série :

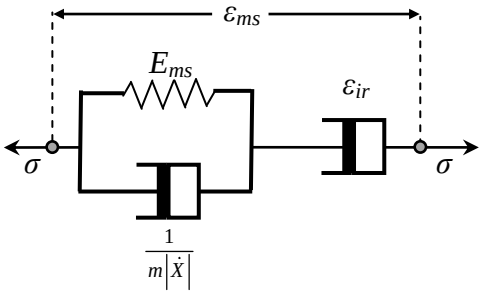


Figure a. Modèle de comportement mécanosorptif adopté pour la confrontation expérimentale – simulation.

L'Annexe E présente la formulation de ce modèle.

La Figure b présente la confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique. Cette confrontation a été réalisée pour des échantillons de 5 mm d'épaisseur débités sur dosse et ayant été testés dans les campagnes n°2 (séchage dissymétrique) et n°4 (séchage dissymétrique et séchage sous charge). Pour la simulation nous avons retenu un coefficient mécanosorptif (*ms*) égal à 100GPa^{-1}, un module mécanosorptif (E_{ms}) égale à 60MPa et un coefficient du terme irrécouvrable (ε_{ir}) égale à 50GPa^{-1}.

Cette confrontation montre que la formulation adoptée (Figure a) ne permet pas de capturer toute la complexité des phénomènes observés. En effet, l'évolution des contraintes de séchage avec une activation continue du fluage mécanosorptif en surface est très exigeante pour le modèle de comportement adopté. Par exemple, l'élément de Kelvin du modèle mécanosorptif (Figure a) permet de tenir compte de la limite mécanosorptive observée dans nos essais de séchage sous charge.

En revanche, l'utilisation seule de cet élément n'est pas suffisante puisque la déformation de cet élément est totalement recouvrable lorsque les contraintes sont nulles et l'activation mécanosorptive est maintenue à la périphérie (chapitre 3). L'ajout d'un terme visqueux ε_{ir} en série devait permettre de remédier à ce problème en permettant d'intégrer une déformation qui n'est pas recouvrable lorsque les contraintes sont nulles.

Toutefois, l'action combinée de l'inversion des contraintes et de l'activation mécanosorptive en surface conduit la déformation de cet élément visqueux à se recouvrir. Selon la valeur du coefficient mécanosorptif de cet élément et les caractéristiques des oscillations, sa recouvrance est plus ou moins rapide. Le terme irrécouvrable n'en étant finalement pas vraiment un pour une conduite oscillante.

En conséquence, le maintien de l'activation mécanosorptive en surface amène le modèle complet de la Figure a à prédire une solution non réaliste à la fin du séchage: les contraintes à la périphérie sont proches de zéro relaxant également les couches plus profondes en traction (Annexe B). Ceci conduit la courbure de la planche de séchage dissymétrique (flying wood) à tendre vers zéro (limite atteinte au-delà de la durée représentée sur la Figure b, ce qui n'a pas été observé au niveau des essais expérimentaux.

Par ailleurs, dans la configuration du séchage sous charge (flexion trois points) l'activation continue de la mécanosorption en surface conduit la planche chargée à fluer continuellement sans limite mécanosorptive en raison de la présence du terme visqueux isolé (Figure b).

A travers la confrontation des courbures expérimentale – simulée du flying wood, l'échantillon semble plus rigide au niveau expérimental car les résultats expérimentaux montrent que la courbure maximale et l'amplitude des oscillations de la courbure (cas des conduites oscillantes) sont plus faibles. Nous pourrions craindre que la colle époxy utilisée pour colmater cinq des six faces des échantillons ait contribué à rigidifier l'échantillon limitant ainsi sa courbure. Néanmoins, la rigidité de la colle indiquée par le fabricant (14 MPa) est trop faible pour expliquer ceci. Pour plus de détail sur
Pour plus d'information, l'Annexe F présente des essais au DMA effectués sur un barreau de colle époxy.

Aussi, la version actuelle du code permet d'expliquer la différence marquante des résultats de la campagne n°1 avec les suivantes. Pour rappel, seule cette campagne avait permis de diminuer la courbure finale des échantillons flying wood avec les oscillations tout en produisant une courbure supplémentaire dans les échantillons poutre cantilever. En outre, l'échantillon sur dosse séché en conduite oscillante n'avait pas subi l'inversion de contraintes, la courbure finale étant proche de zéro. La similitude des résultats expérimentaux entre les conduites constante/oscillante des campagnes qui ont suivi la campagne n°1 peut s'expliquer par la régulation des conditions climatiques dans le séchoir. En effet, nous avions indiqué dans le chapitre 4 que le régulateur du séchoir avait été changé après la campagne n°1 en raison d'un problème technique. Les paramètres d'asservissement PID du nouveau régulateur se sont avérés moins bien adaptés au séchoir, conduisant l'humidité d'équilibre à osciller de ± 0,1% avec une fréquence d'environ 0,002Hz. Pour voir l'effet de ces variations autour de la consigne, les données climatiques expérimentales ont été lissées, et l'essai a été simulé à nouveau (Figure b).

Une distinction beaucoup plus marquée apparait désormais dans la courbure du flying wood entre la conduite oscillante et la conduite constante. En effet, les petites variations autour des valeurs de consigne conduisent à une activation continue tout au long du séchage du fluage mécanosorptif d'une fine couche à la périphérie de la planche, y compris pour la conduite constante. Les simulations pour les échantillons sur dosse de la campagne n°1 (Annexe G) confirment cela. La simulation avec les données climatiques expérimentales donne une différence plus marquée entre la courbure finale de la conduite constante et la conduite oscillante. Bien que cet écart augmente avec le lissage des données, la différence entre les deux simulations est nettement moins marquée qu'auparavant (Figure b). Ainsi, la grande disparité des résultats que l'on observe dans la littérature sur ce sujet et la difficulté de prouver clairement l'effet des conduites oscillantes sur la relaxation des contraintes de séchage pourraient venir des problèmes de régulation des conditions climatiques.

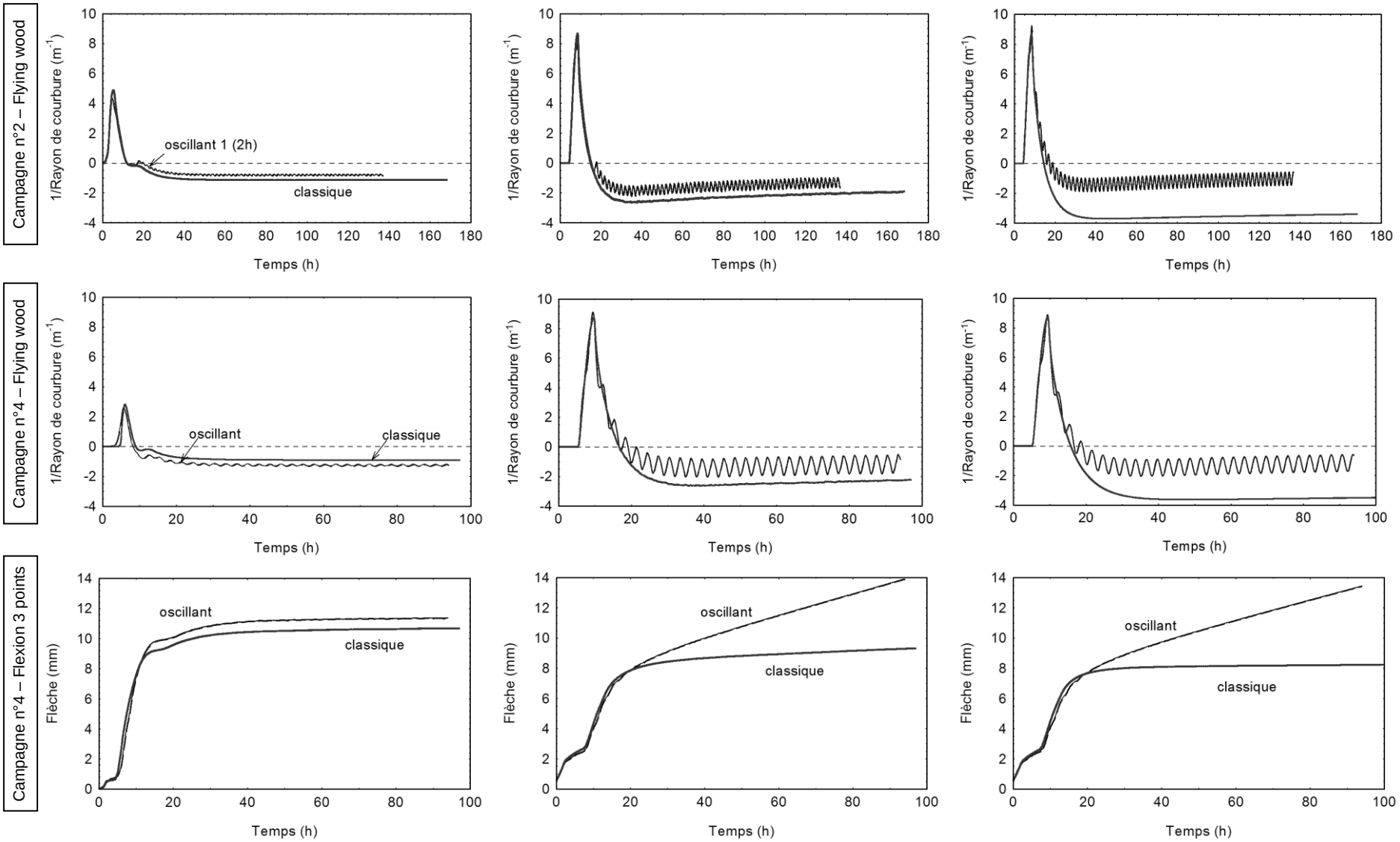


Figure b. Confrontation expérimentale – simulation avec *ms* =100GPa^{-1}, E_{ms} = 60MPa, ε_{ir} = 50GPa^{-1}. A gauche : résultats expérimentaux ; au centre : simulation (données climatiques expérimentales) ; à droite : simulation (données climatiques lissées).

Perspectives

La formulation mécanique adoptée précédemment n'étant pas satisfaisante, les travaux de modélisations futures sur ce sujet devraient intégrer dans le modèle mécanosorptif un terme non linéaire tel qu'un patin. Cet élément représente un frottement solide, glissant au-delà d'un seuil de contrainte. La contrainte reste alors constante et égale à la valeur seuil. Cet assemblage d'éléments de base (Figure c) pourrait être mieux adapté pour la modélisation du comportement mécanosorptif dans le cadre des conduites oscillantes, puisqu'il introduit une déformation mécanosorptive irrécouvrable lorsque la contrainte seuil est atteinte. Celle-ci sera atteinte plutôt au début du séchage en surface lorsque le gradient d'humidité dans l'épaisseur est le plus fort. La déformation liée au glissement du patin ne pourrait plus se recouvrir ensuite puisque le niveau de contrainte ne peut plus dépasser la contrainte seuil sur le restant du cycle.

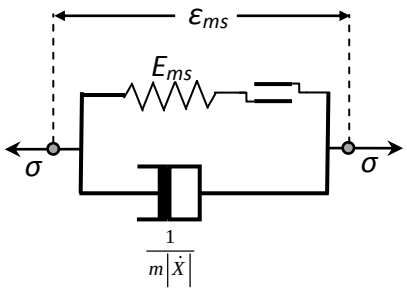


Figure c. Modèle mécanosorptif introduisant un élément non linéaire (patin).

Aussi, le glissement du patin peut conduire à une déformation infinie si la contrainte seuil est atteinte et maintenue (cas pouvant être atteint lors du séchage sous charge), s'opposant ainsi au concept de limite mécanosorptive. Toutefois, plusieurs travaux de caractérisation du comportement mécanosorptif (Hearmon et Paton 1964, Gril 1988) ont montré que lorsque la contrainte au sein du matériau dépasse 20 à 30% de la contrainte de rupture il n'y a plus de limite mécanosorptive et le fluage continue jusqu'à la ruine de l'élément.

Egalement, les simulations réalisées avec les données climatiques lissées nous mènent à imaginer la nécessité d'ajouter l'effet ++ et -- (Ranta – Maunus, 1975) au modèle mécanosorptif pour les conduites oscillantes. Il semblerait que l'activation des propriétés mécanosorptives s'atténue si la teneur en eau d'équilibre cycle au même endroit.

Ce nouveau modèle mécanosorptif doit nécessairement être alimenté par des paramètres mécanosorptifs identifiés expérimentalement. Dans le cas des conduites oscillantes, les différents paramètres pourraient être identifiés à partir des échantillons de faible épaisseur sollicités en traction et en compression et séchés en conduite oscillante. Conscients de l'importance d'une telle caractérisation expérimentale, quelques pistes ont été explorées au cours de cette thèse (Annexe H). Rapidement, nous avons été confrontés aux trois principales difficultés dans la conception d'une platine d'essai :

- les conditions climatiques drastiques des essais imposant de placer l'électronique des appareils de mesure en dehors de l'enceinte climatique,
- la quantité d'informations à collecter en parallèle sur l'échantillon : sollicitation mécanique, mesure de déplacement, mesure des variations de la section de l'échantillon liée aux hygrovariations, suivi de la teneur en eau moyenne de l'échantillon, etc.,
- préserver des conditions aux limites homogènes autour de l'échantillon imposant plusieurs mesures à effectuer sans contact ou sur des échantillons « jumeaux ».

Une platine d'essai polyvalente a été conçue et dans un avenir proche pourrait servir à la caractérisation expérimentale des paramètres à insérer dans le module mécanique de notre code numérique *TransPore*. Pour la validation du modèle, les prédictions du code pourraient être confrontées aux essais présentés dans le chapitre 4 de cette thèse. Une bonne cohérence entre les simulations numériques et les résultats expérimentaux, permettrait par la suite d'utiliser le code numérique *TransPore* dans l'élaboration de tables de conduites oscillantes pour le bois de hêtre. Cela serait d'une grande utilité pour les industriels de la filière bois en France.

Annexes

A. Analyse de corrélation de variables

Cette analyse se limite à l'identification seule d'une corrélation entre deux variables, et en aucun cas à l'établissement de modèles de prédiction. Elle se limite aussi aux corrélations linéaires entre variables continues. Ainsi, 18 variables ont été prise en compte, soit :

gapI : gap inmédiat
gap48 : gap à 48 heures
gaps4s : gap à 4 semaines
FFI : flèche face initiale
FFF : flèche face finale
FFs : flèche face due au séchage
FCI : flèche chant initiale
FCF : flèche chant finale
FCs : flèche chant due au séchage
TI : tuilage initial
TF : tuilage final
Ts : tuilage dû au séchage
GI : gauchissement initial
GF : gauchissement final
Gs : gauchissement dû au séchage
Xi : teneur en eau initiale
Xf : teneur en eau finale
gradX : gradient de teneur en eau finale

Le débit de l'échantillon et la position dans la pile, étant des variables discrètes, n'ont pas été considérées.

L'analyse de corrélation a été réalisée à l'aide du logiciel SAS avec la procédure CORR (Correlation Analysis). La corrélation linéaire entre deux variables a été mesurée par le coefficient de corrélation de Pearson pour un niveau de probabilité de 95%. La valeur du coefficient de corrélation, r, est comprise entre -1 et 1. Plus est-elle proche de -1 ou 1, plus la corrélation entre les variables est forte. Pourtant, l'analyse du coefficient doit tenir compte de degrés de liberté (υ) calculés selon :

$$\upsilon = n - 2$$

où *n* représente le nombre d'échantillons. En effet, le coefficient r diminue avec le nombre de répétitions même si la probabilité est très significative ($p < 0{,}001$). Dans notre étude, le nombre d'échantillons était de 192 et de 96 dans certains cas. Ainsi, pour un niveau de probabilité de 95%, la valeur critique du coefficient r est de 0,1417 et 0,2006 respectivement (Saporta, 1990). Il n'est pas surprenant donc d'observer des corrélations significatives pour des coefficients r lointains de la valeur idéale de ±1.

La matrice de corrélation issue du logiciel SAS est présentée dans l'annexe A. La matrice étant symétrique, seules les valeurs en dessous de la diagonale y sont représentées. La première ligne indique le coefficient r, la deuxième ligne indique la probabilité p et la troisième ligne indique le nombre d'échantillons n. De 153 cas possibles de corrélation, 53 se sont avérés significatifs ($p < 0{,}05$). Ils sont indiqués en gras. Néanmoins, après vérification graphique seuls 15 cas remplissaient la

condition de linéarité (indiqués en gras et surlignés). Dans les autres cas, aucun type de corrélation outre que linéaire était présente. Les cas remplissant la condition de linéarité sont représentés dans la figure A.1.

Nous discuterons ici uniquement de cas ayant un coefficient r supérieur à 0,70 et un niveau très élevé de probabilité ($p<0,0001$). Le premier cas réunissant ces conditions concerne le gap à 48 heures et le gap à 4 semaines, ayant une corrélation presque parfaite ($r = 0,97$). Il s'agit, de plus, de la corrélation la plus nette. Dans le paragraphe 2.4.4.1 (Evolution du gap du *slicing test* dans le temps) on indiquait que le délai de 4 semaines permettrait l'annulation complète du gradient de teneur en eau finale et donc l'expression totale du gap. Une équation de régression linéaire permettrait le calcul du gap à 4 semaines à partir du gap à 48 heures. Puisque l'établissement d'équations sur la base d'une étude statistique n'est pas le but de ce travail, nous n'indiquerons pas une telle régression. Le gap à 48 heures est aussi fortement corrélé avec l'humidité finale ($r = 0,72$) et avec le gradient de teneur en eau finale ($r = 0,76$). Plus l'humidité finale et son gradient sont élevés, plus le gap est élevé. Nous discuterons de ce sujet quelques lignes plus bas. Le gap à 4 semaines est aussi fortement corrélé avec l'humidité finale ($r = 0,83$) et avec le gradient de teneur en eau finale ($r = 0,82$). On peut même constater que l'humidité finale et le gradient de teneur en eau finale sont mieux corrélés avec le gap à 4 semaines qu'avec le gap à 48 heures, en raison d'une dispersion de données plus faibles tel qu'on peut observer graphiquement (figure A.1). La bonne corrélation entre le gap et le gradient de teneur en eau finale a été déjà constatée auparavant (Ranta – Maunus, 2001).

En ce qui concerne les déformations, quatre cas se sont avérés fortement et significativement corrélés. Les déformations finales, soit la flèche face, la flèche chant, le tuilage et le gauchissement, sont corrélées aux déformations qui se sont produites au cours du séchage, à valeur de r étant respectivement de 0,96, 0,87, 0,99 et 0,996. Il est à noter que la corrélation entre la flèche face finale et la flèche face due au séchage comprend deux données extrêmes. Il est important de le signaler car un des inconvénients du coefficient de Pearson est qu'il est fortement influencé par les données aberrantes. Mais dans notre cas, les données semblent bien suivre un comportement linéaire même si l'on retire les deux données en question. Celles-ci correspondent respectivement à une dosse du séchage classique, campagne n°1 et à un faux quartier du séchage oscillant 1, campagne n°2. Toutefois, les corrélations entre les déformations finales et celles apparues lors du séchage semblent évidentes à première vue, mais cela met aussi en évidence l'inexistence de tout lien entre les déformations présentes avant le séchage et celles produites lors du séchage.

Enfin, on retrouve des évidences, avec par exemple la très significative et forte corrélation observée entre la teneur en eau finale et son gradient ($r = 0,91$). Des teneurs en eau finales plus élevées mènent à des gradients également plus élevés. Bien entendu, si l'humidité moyenne à la fin du séchage est élevée, le gradient sera plus important puisque l'humidité de surface est proche de l'humidité d'équilibre. Cela explique aussi la bonne corrélation entre le gradient et le gap à 48 heures et à 4 semaines.

Bien qu'intéressante, cette analyse n'a mis en évidence aucune corrélation linéaire significative entre le gap et les déformations, ou entre les déformations et la teneur en eau. Les corrélations avérées sont restreintes aux variables fortement liées à la teneur en eau.

Tableau A.1. Matrice de corrélation linéaire entre les variables mesurées.

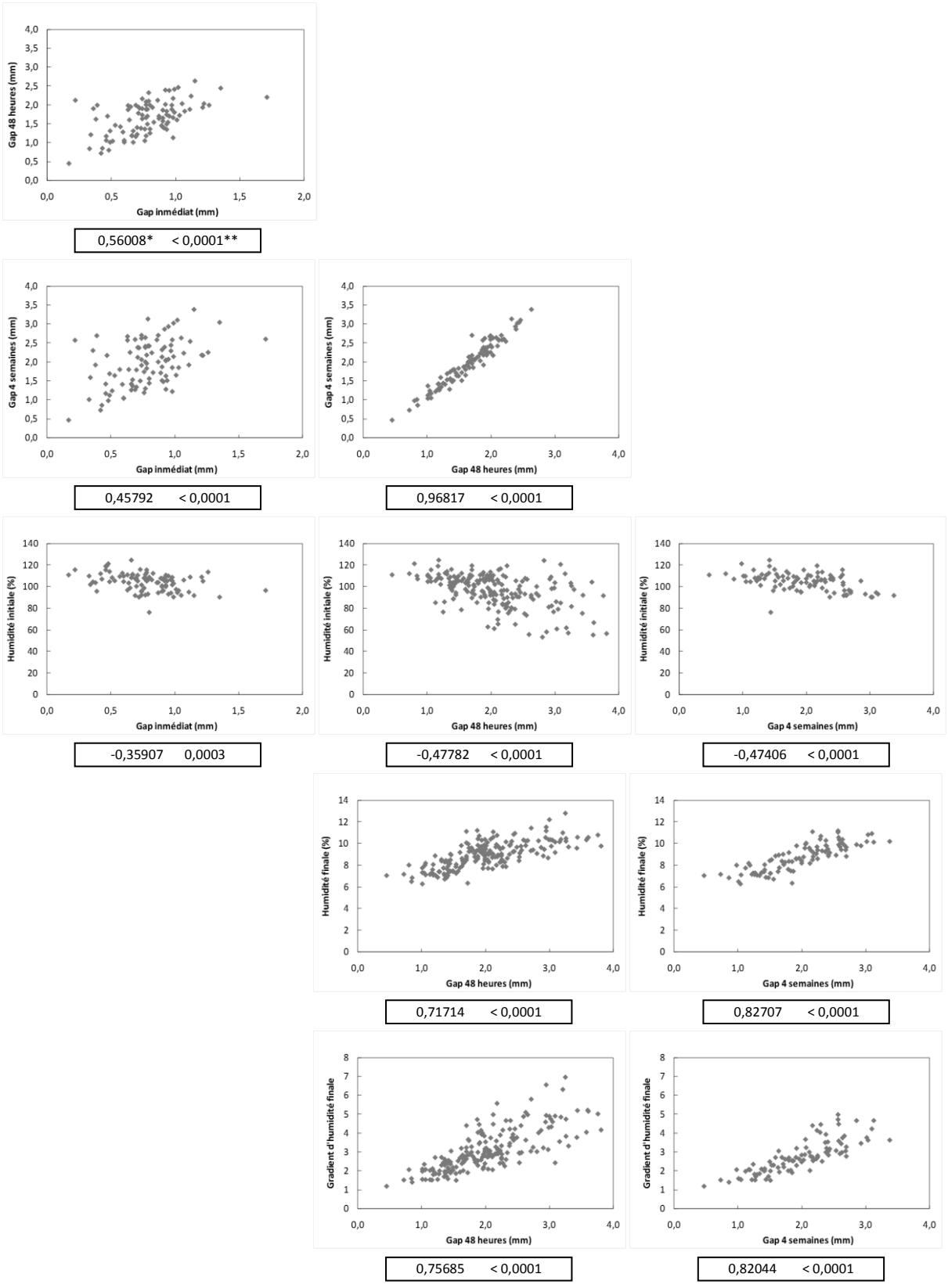
	gapI	gap48	gap4s	FFI	FFF	FFs	FCI	FCF	FCs	TI	TF	Ts	GI	GF	Gs	Xi	Xf	gr
gapI	1																	
	96																	
gap48	**0.56008***	1																
	<.0001**																	
	96***	192																
gap4s	**0.45792**	**0.96817**	1															
	<.0001	**<.0001**																
	96	**96**	96															
FFI	-0.11514	**0.38773**	**-0.20511**	1														
	0.264	**<.0001**	**0.045**															
	96	**192**	**96**	192														
FFF	-0.13566	**0.26546**	0.02057	**0.62155**	1													
	0.1875	**0.0002**	0.8424	**<.0001**														
	96	**192**	96	**192**	192													
FFs	-0.12181	**0.1816**	0.03667	**0.38326**	**0.95857**	1												
	0.2371	**0.0117**	0.7228	**<.0001**	**<.0001**													
	96	**192**	96	**192**	**192**	192												
FCI	0.15565	**-0.2349**	0.04882	-0.13336	-0.0999	-0.07738	1											
	0.1299	**0.001**	0.6367	0.0652	0.168	0.286												
	96	**192**	96	192	192	192	192											
FCF	0.11887	**0.16106**	**-0.20599**	**0.24878**	**0.3464**	**0.31823**	**0.22665**	1										
	0.2487	**0.0256**	**0.0441**	**0.0005**	**<.0001**	**<.0001**	**0.0016**											
	96	**192**	**96**	**192**	**192**	**192**	**192**	**192**										
FCs	-0.00866	**0.27557**	**-0.26841**	**0.30955**	**0.39411**	**0.35644**	**-0.27016**	**0.87171**	1									
	0.9333	**0.0001**	**0.0082**	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	**0.0002**	**<.0001**										
	96	**192**	**96**	**192**	**192**	**192**	**192**	**192**	192									
TI	0.01079	**0.18501**	0.10144	-0.07469	-0.10249	-0.09354	-0.00727	0.03515	0.03784	1								
	0.9169	**0.0102**	0.3254	0.3032	0.1572	0.1969	0.9203	0.6283	0.6023									
	96	**192**	96	192	192	192	192	192	192	192								
TF	0.05513	**0.23378**	-0.18452	**0.3476**	**0.33068**	**0.27014**	-0.13471	**0.44398**	**0.50156**	0.04663	1							
	0.5937	**0.0011**	0.0719	**<.0001**	**<.0001**	**0.0002**	0.0625	**<.0001**	**<.0001**	0.5207								
	96	**192**	96	**192**	**192**	**192**	192	**192**	**192**	192	192							
Ts	0.05364	**0.20799**	-0.19931	**0.35672**	**0.34363**	**0.28205**	-0.13333	**0.43792**	**0.49497**	-0.08924	**0.99077**	1						
	0.6037	**0.0038**	0.0516	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	0.0652	**<.0001**	**<.0001**	0.2184	**<.0001**							
	96	**192**	96	**192**	**192**	**192**	192	**192**	**192**	192	**192**	192						

* r; ** p ; *** nombre d'échantillons (n).

Tableau A.1. (suite). Matrice de corrélation linéaire entre les variables mesurées.

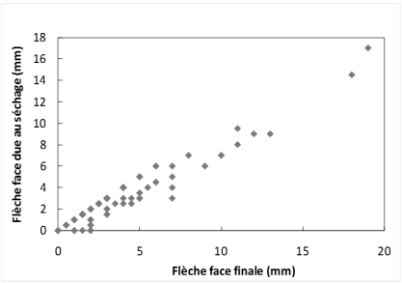
	gapI	gap48	gap4s	FFI	FFF	FFs	FCI	FCF	FCs	TI	TF	Ts	GI	GF	Gs	Xi	Xf	gradX
GI	.	**0.3324**	.	**0.14812**	0.09169	0.05945	-0.0842	0.03728	0.07813	**0.1692**	0.09342	0.07018	1					
	.	**<.0001**	.	**0.0403**	0.2059	0.4128	0.2456	0.6077	0.2814	**0.019**	0.1975	0.3334						
	96	**192**	96	**192**	192	192	192	192	192	**192**	192	192	192					
GF	0.05709*	**0.15157**	-0.16061	**0.2293**	**0.21213**	**0.16692**	**-0.19645**	0.06034	**0.15196**	0.03353	**0.18358**	**0.1785**	**0.21732**	1				
	0.5806**	**0.0359**	0.118	**0.0014**	**0.0031**	**0.0207**	**0.0063**	0.4057	**0.0354**	0.6443	**0.0108**	**0.0132**	**0.0025**					
	96***	**192**	96	**192**	**192**	**192**	**192**	192	**192**	192	**192**	**192**	**192**	192				
Gs	0.05709	0.12402	-0.16061	**0.22227**	**0.20673**	**0.16293**	**-0.19249**	0.05649	**0.14612**	0.01951	**0.17715**	**0.17399**	0.13041	**0.996**	1			
	0.5806	0.0866	0.118	**0.0019**	**0.004**	**0.0239**	**0.0075**	0.4364	**0.0431**	0.7882	**0.014**	**0.0158**	0.0714	**<.0001**				
	96	192	96	**192**	**192**	**192**	**192**	192	**192**	192	**192**	**192**	192	**192**	192			
Xi	**-0.35907**	**-0.47782**	**-0.47406**	**-0.54291**	**-0.56564**	**-0.47211**	**0.22118**	**-0.20189**	**-0.30952**	0.04633	**-0.35229**	**-0.35755**	**-0.23588**	**-0.20919**	**-0.1914**	1		
	0.0003	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	**0.002**	**0.005**	**<.0001**	0.5234	**<.0001**	**<.0001**	**0.001**	**0.0036**	**0.0078**			
	96	**192**	**96**	**192**	**192**	**192**	**192**	**192**	**192**	192	**192**	**192**	**192**	**192**	**192**	192		
Xf	0.17346	**0.71714**	**0.82707**	**0.20107**	**0.14245**	0.1057	-0.05876	-0.01722	0.01147	0.06938	-0.08807	-0.09724	**0.15981**	-0.02974	-0.0432	**-0.19497**	1	
	0.091	**<.0001**	**<.0001**	**0.0052**	**0.0487**	0.1445	0.4182	0.8127	0.8745	0.339	0.2244	0.1797	**0.0268**	0.6822	0.5519	**0.0067**		
	96	**192**	**96**	**192**	**192**	192	192	192	192	192	192	192	**192**	192	192	**192**	192	
gradX	0.10495	**0.75685**	**0.82044**	**0.31312**	**0.22688**	**0.16853**	-0.1198	0.05595	0.11362	0.11662	0.00847	-0.00732	**0.21317**	-0.00772	-0.02472	**-0.33439**	**0.90581**	1
	0.3115	**<.0001**	**<.0001**	**<.0001**	**0.0016**	**0.0201**	0.0997	0.4433	0.1186	0.1091	0.9077	0.9202	**0.0031**	0.9158	0.735	**<.0001**	**<.0001**	
	95	**190**	**95**	**190**	**190**	**190**	190	190	190	190	190	190	**190**	190	190	**190**	**190**	190

* r; ** p ; *** nombre d'échantillons (n).



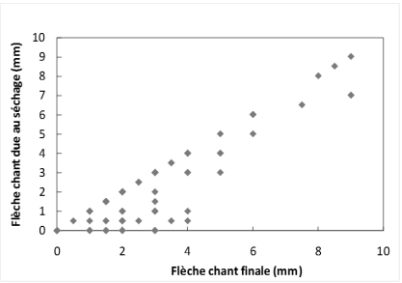
a. Gap immédiat b. Gap à 48 heures c. Gap à 4 semaines

Figure A.1. Courbes de corrélations linéaires, significatives et avec r > 0,35. * r ; ** p.



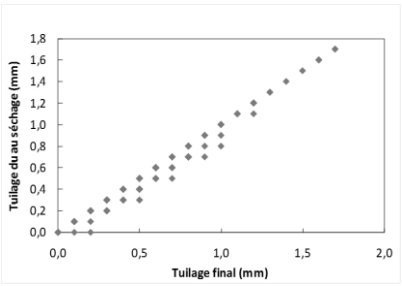
0,95857* < 0,0001**

d. Flèche face finale



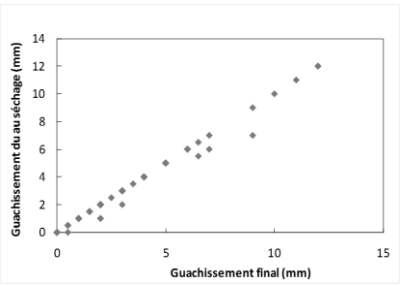
0,87171 < 0,0001

e. Flèche chant finale



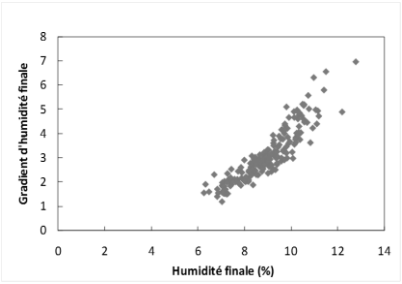
0,99077 < 0,0001

f. Tuilage final



0,996 < 0,0001

g. Gauchissement final



0,90581 < 0,0001

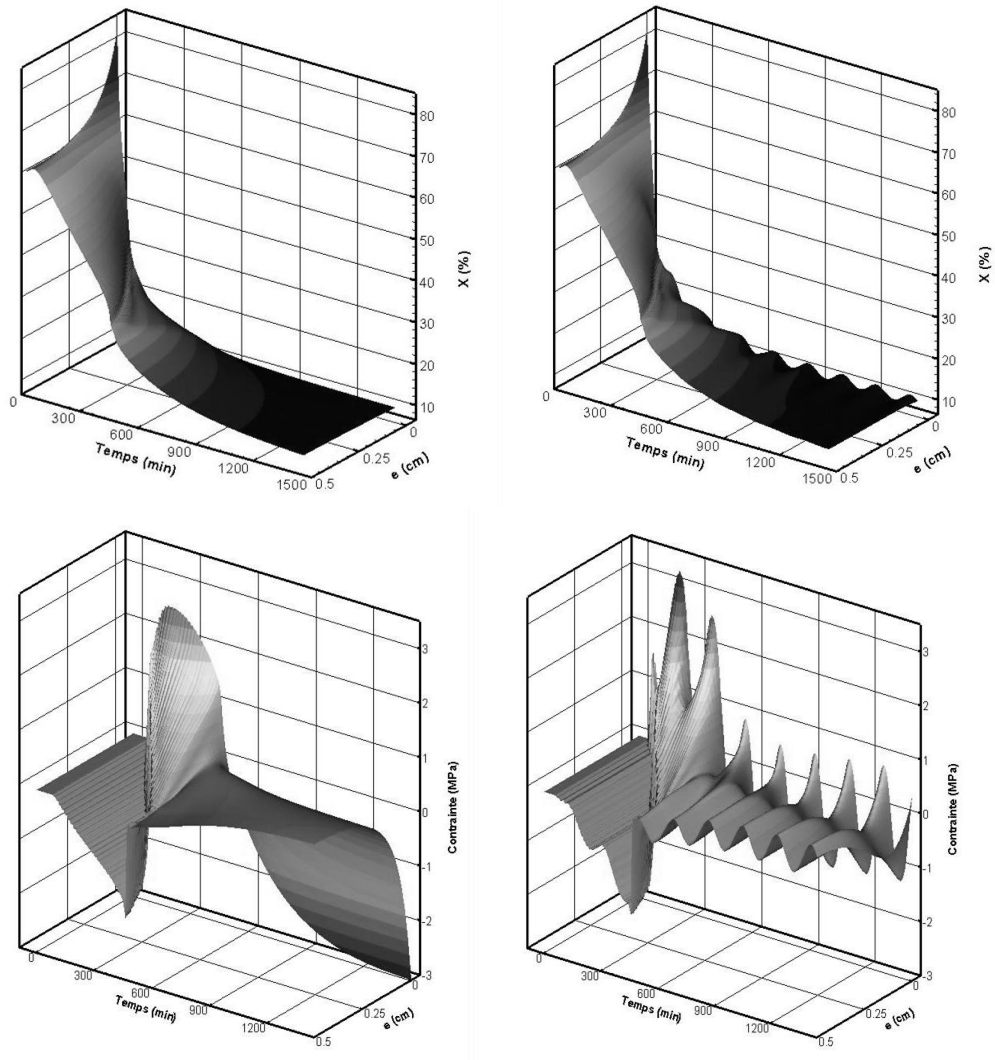
h. Humidité finale

Figure A.1 (suite). Courbes de corrélations linéaires, significatives et avec r > 0,35. * r ; ** p.

B. Comportement mécanique d'un échantillon épais pour trois configurations de séchage

B.1. Séchage symétrique

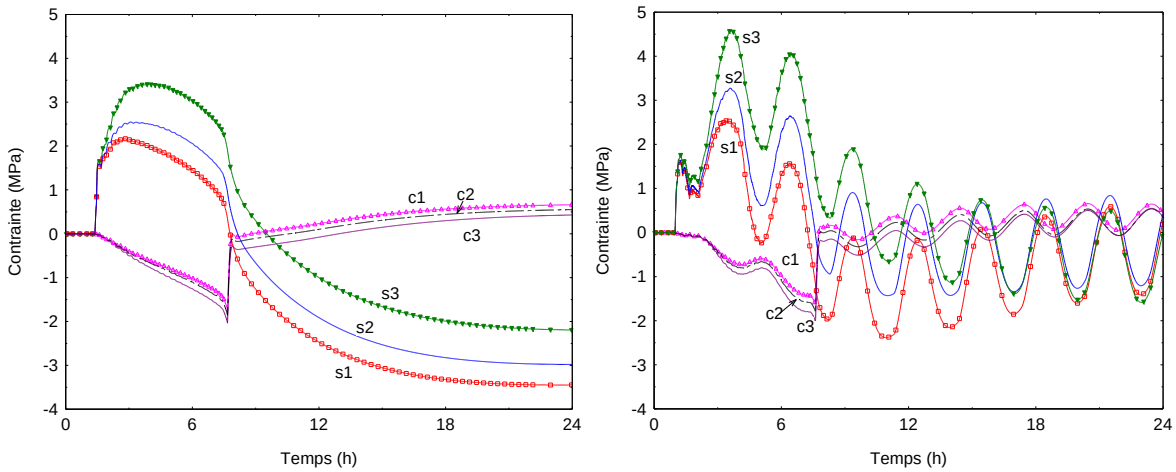
La Figure B.1 montre la cinétique de séchage et l'évolution des contraintes au sein de la planche. Qu'il s'agisse de la conduite constante ou oscillante, une reprise d'humidité peut être observée à la périphérie de la planche au cours des premières minutes car la température initiale de celle – ci est inférieure à la température de rosée de l'air environnant. Ensuite la périphérie sèche et tend rapidement vers l'humidité d'équilibre tandis que la résistance aux transferts internes conduit à l'établissement d'un gradient d'humidité dans l'épaisseur de la planche.



a. Constante b. Oscillant

Figure B.1. Cinétique de séchage (au-dessus) et évolution de contraintes (au-dessous) en fonction du temps et de la demi-épaisseur pour un séchage symétrique en conduite constante et oscillante [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 3%, période : 3h]

Pour la conduite constante, lorsque la périphérie entre dans le domaine hygroscopique les hygrovariations conduisent la périphérie à entrer en traction, et par équilibre mécanique, la partie centrale de la planche entre en compression. Puis, conformément au processus d'inversion des contraintes, le cœur entre en traction et la surface en compression. Avec la conduite oscillante on remarque que la cinétique du cœur de la planche n'est pas affectée par les oscillations de teneur en eau d'équilibre à la surface. Au niveau mécanique, la périphérie entre en traction puis la contrainte oscille avec les variations des hygrovariations en surface. Par équilibre mécanique, le cœur entre en compression et oscille avec la contrainte périphérique. Les propriétés différées du matériau (viscoélasticité et mécanosorption) génèrent le phénomène d'inversion des contraintes, mais ici celui-ci est fortement atténué. Périphérie et cœur présentent une succession d'alternance de traction et de compression. Grâce aux oscillations, le gradient de contraintes entre le cœur et la périphérie est nettement diminué.



Configuration		*ms* (GPa^{-1})	E_{ms} (MPa)
s1	c1	135	0
s2	c2	135	45
s3	c3	135	180

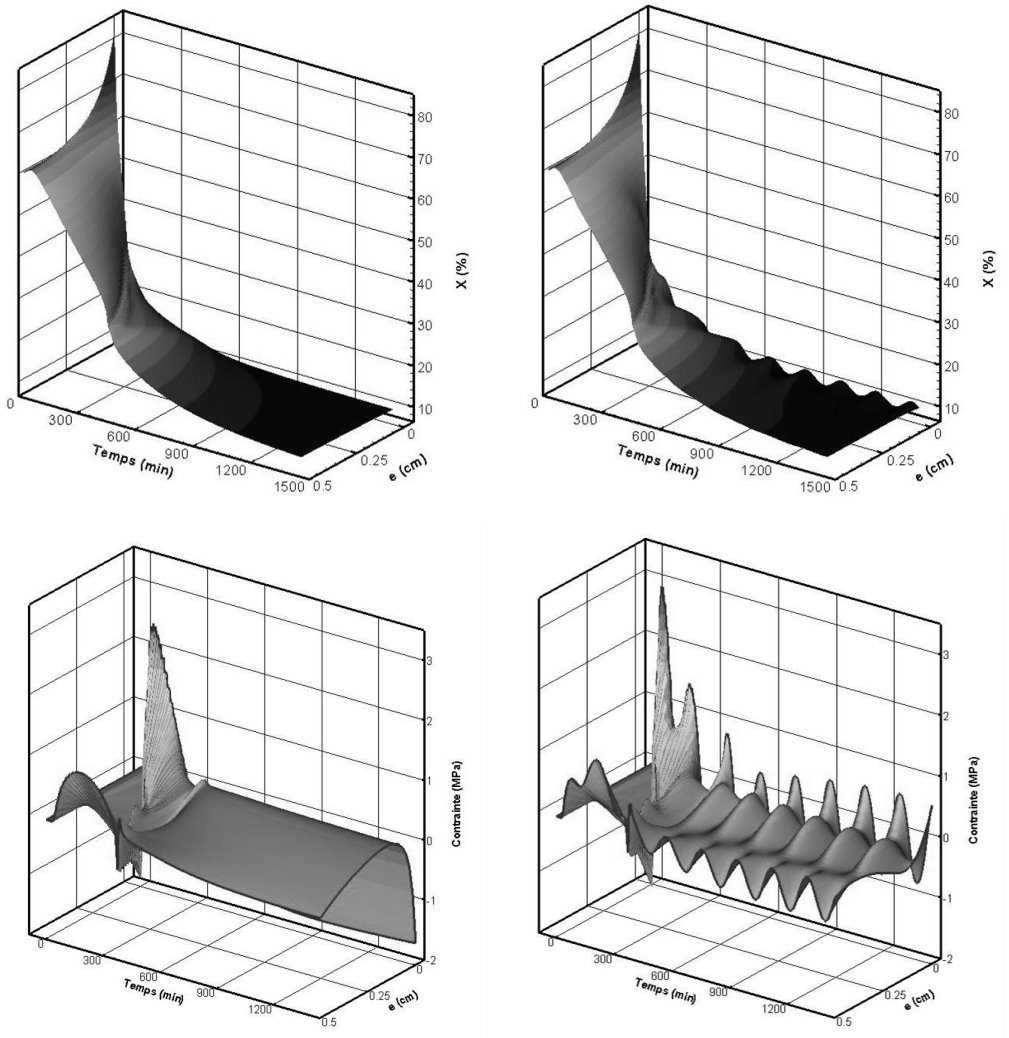
Figure B.2. Profil de contraintes en surface (s) et au cœur (c) en fonction du temps pour un séchage symétrique en conduite constante et oscillante avec trois configurations de paramètres mécanosorptifs.

Dans la Figure B.2, trois configurations de paramètres mécanosorptifs sont testés. La configuration s2/c2 est celle utilisée dans la figure précédente. En conduite constante, la mécanosorption est activée par la variation de la teneur en eau de la planche. La contrainte à la surface semble très influencée par les paramètres mécanosorptifs, pendant que la contrainte au cœur varie peu. Après 24 heures de séchage, l'écart le plus fort entre les contraintes du cœur et de la surface correspond au modèle de Ranta – Maunus (courbes s1 et c1) pour lequel les déformations mécanosorptives, figées en fin de séchage, sont maximales. En conduite oscillante et avec ce même modèle, la relaxation des contraintes est forte dès le début du séchage. L'ajout d'une limite mécanosorptive diminue le potentiel de relaxation des contraintes par la mécanosorption. Indépendamment de la valeur de la limite mécanosorptive, les contraintes convergent en fin de séchage vers une limite commune en surface. Le même constat peut-être fait pour le cœur. La relaxation est en effet complète en raison de l'absence de déformation permanente.

B.2. Séchage dissymétrique

- **Conduite constante et conduite oscillante**

Le séchage dissymétrique est un séchage où les transferts de masse se font par une seule face de l'échantillon. Toutes les autres faces sont colmatées pour bloquer les transferts de masse. Par conséquent, le champ d'humidité dans l'épaisseur de la planche n'est pas symétrique. En revanche, les transferts de chaleur se font par toutes les faces. Ce type particulier de séchage, bien que peu naturel, peut provoquer de grandes déformations en raison du retrait. On peut ainsi visualiser l'inversion de contraintes au cours du séchage traduite par l'évolution de la courbure de l'échantillon. Dans cette partie, les simulations ont été faites sur un échantillon dont l'épaisseur (5mm) est la moitié de celle de l'échantillon simulé en séchage symétrique (10mm).



a. Constante b. Oscillant

Figure B.3. Cinétique de séchage (au-dessus) et évolution de contraintes (au-dessous) en fonction du temps et de l'épaisseur pour un séchage dissymétrique en conduite constante et oscillante [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 3%, période : 3h]

Les cinétiques présentées dans la Figure B.3 sont similaires à celles de la Figure B.1, cependant ici elles concernent toute l'épaisseur de l'échantillon. On observe que les oscillations de teneur en eau perturbent surtout la surface d'échange de l'échantillon. La perturbation de teneur en eau décroît au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la surface d'échange, la surface isolée n'étant pas du tout perturbée. Le retrait au niveau de la surface d'échange conduit la planche à se courber. Ce champ de déformation va relaxer une partie des contraintes de séchage. Sous l'effet de cette courbure, la surface opposée (isolée) entre en traction. L'écart final des contraintes entre les deux surfaces (d'échange et isolée) est nettement diminué par rapport au séchage symétrique. En conduite oscillante on peut constater une dissymétrie au niveau de l'évolution des contraintes sur les deux surfaces en raison de la courbure possible de l'échantillon et le champ non symétrique de la teneur en eau. Tel que constaté pour le séchage symétrique, les oscillations permettent de diminuer le gradient de contraintes entre les deux surfaces.

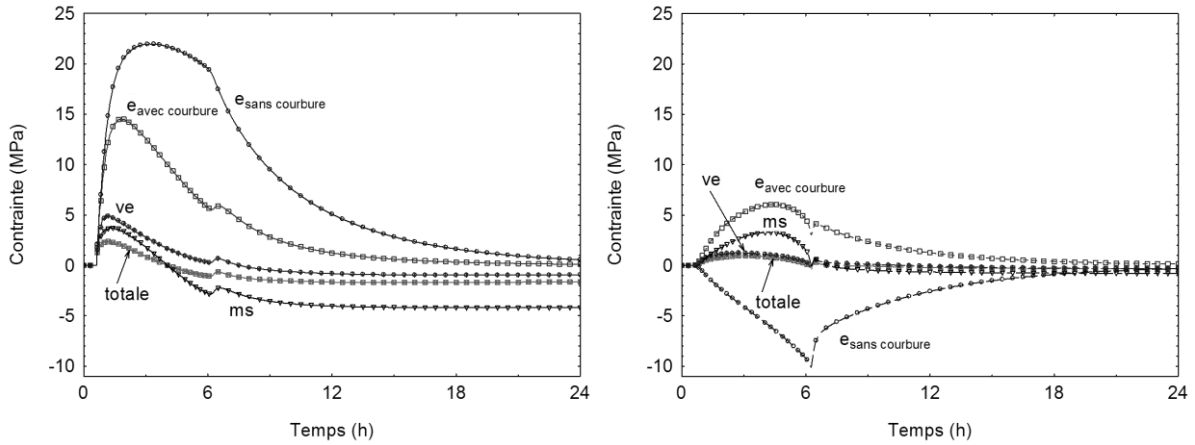
- **Contribution de l'effet différé sur la contrainte et la courbure**

Après avoir vu l'effet des oscillations sur la contrainte globale, il était intéressant d'observer la contribution des différentes propriétés du matériau (élasticité, viscoélasticité, mécanosorption) sur l'évolution des contraintes périphériques dans le cas d'une conduite constante. Les figures suivantes présentent l'évolution de la contrainte, la déformation différée et le rayon de courbure pour différents modèles de comportement mécanique. La première simulation est effectuée en élastique pure avec une courbure bloquée. Les niveaux des contraintes de compression atteints au niveau de la face isolée (-11 MPa) et de traction au niveau de la surface d'échange (22 MPa) sont très élevés (Figure B.4). Lorsque l'humidité est homogène dans l'échantillon, la contrainte finale au niveau des deux faces tend vers zéro. La seconde simulation laisse libre la courbure de l'échantillon. Nous observons une relaxation de la traction en surface et la traction de la surface isolée. Toutefois, le niveau de contrainte atteint reste très supérieur à la résistance à la rupture du matériau en traction transversale.

L'intégration des propriétés viscoélastiques du matériau dans le modèle de comportement mécanique, permet de relaxer significativement les tractions périphériques (Figure B.4). En effet, le fluage viscoélastique sur la face isolée (Figure B.5a), hydroactivé au début du séchage, permet de relaxer également cette zone. L'inversion des contraintes en fin de séchage apparait, mais reste faible (Figure B.4). Ceci induit que la courbure finale reste très proche de zéro. En effet, les déformations viscoélastiques apparues au début du séchage se recouvrent partiellement (Figure B.5a). Il est intéressant de constater sur la Figure B.5b que les **propriétés viscoélastiques ont peu d'effets sur la courbure de l'échantillon en séchage dissymétrique** malgré leurs effets sur l'état des contraintes internes. En effet, le fluage viscoélastique agit à la fois sur le moteur de la courbure, en relaxant la traction au niveau de la surface d'échange, mais aussi sur le frein de la courbure, en relaxant la traction sur la face isolée.

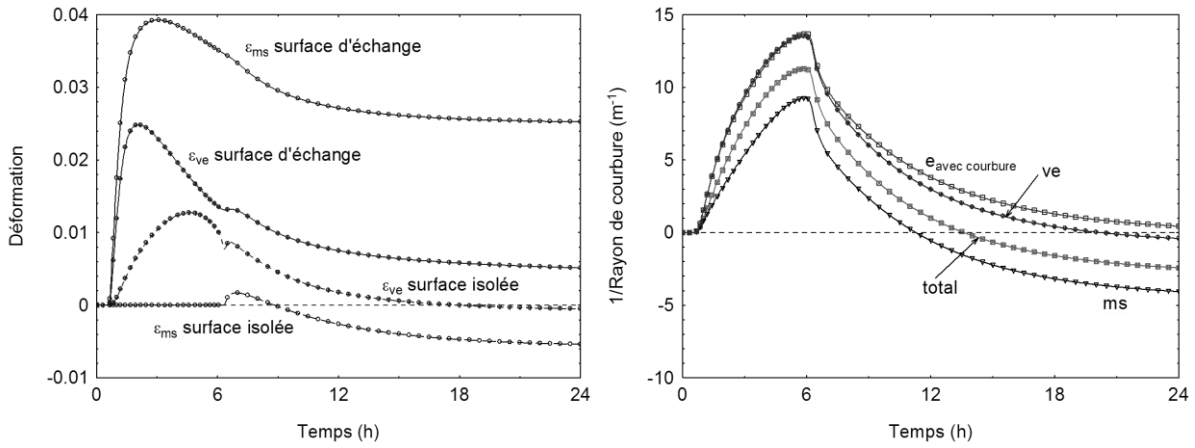
L'ajout du comportement mécanosorptif à la loi de comportement élastique (coefficient *ms* de 135 GPa^{-1} et une limite E_{ms} de 45 MPa) permet de relaxer la traction au niveau de la surface d'échange et dans une moindre mesure celle de la surface isolée (Figure B.4). En effet, on peut observer que le fluage mécanosorptif s'exprime surtout sur la surface d'échange, la déformation de la surface isolée se déclenchant plus tard au moment du passage dans le domaine hygroscopique, soit après 6h de

séchage. En relaxant seulement la traction au niveau de la surface d'échange, **le fluage mécanosorptif réduit la courbure de la planche au début du séchage. Aussi, il induit une courbure finale importante** (Figure B.5b). En effet, la déformation mécanosorptive au niveau de la surface d'échange ou au niveau de la surface isolée restent figées dans le temps dès lors qu'elles tendent vers la teneur en eau d'équilibre (Figure B.5a). Ceci induit une inversion des contraintes en fin de séchage plus importante (Figure B.4) et une inversion de la courbure de l'échantillon plus marquée que dans le cas précédent (Figure B.5b).



a. Surface d'échange b. Surface isolée

Figure B.4. Contrainte décomposée à la surface d'échange et à la surface isolée.



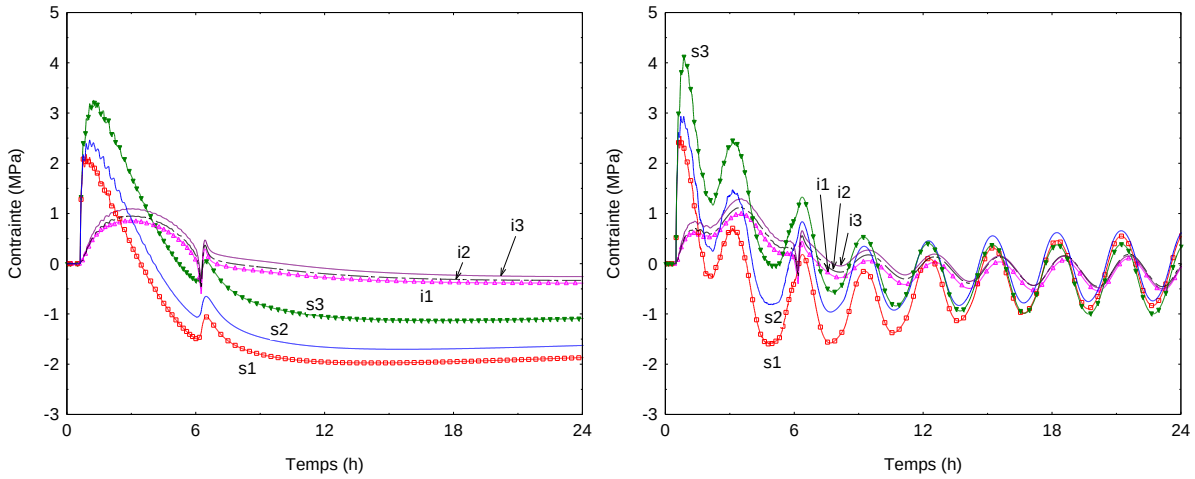
a. Déformation différée b. Rayon de courbure

Figure B.5. Déformation mécanosorptive (ε_{ms}) et viscoélastique (ε_{ve}) à la surface d'échange et à la surface isolée et rayon de courbure.

- **Effet des paramètres mécanosorptifs sur la contrainte et la courbure**

Dans la Figure B.6 l'évolution des contraintes est présentée pour trois configurations de paramètres mécanosorptifs. Au début du séchage, la limite mécanosorptive (E_{ms}) croissante diminue la relaxation des contraintes. Après 24 heures de séchage, l'écart des contraintes entre les deux surfaces en conduite constante est important particulièrement pour le modèle de Ranta – Maunus où les déformations mécanosorptives activées au début du séchage sont plus importantes. Par contre, en

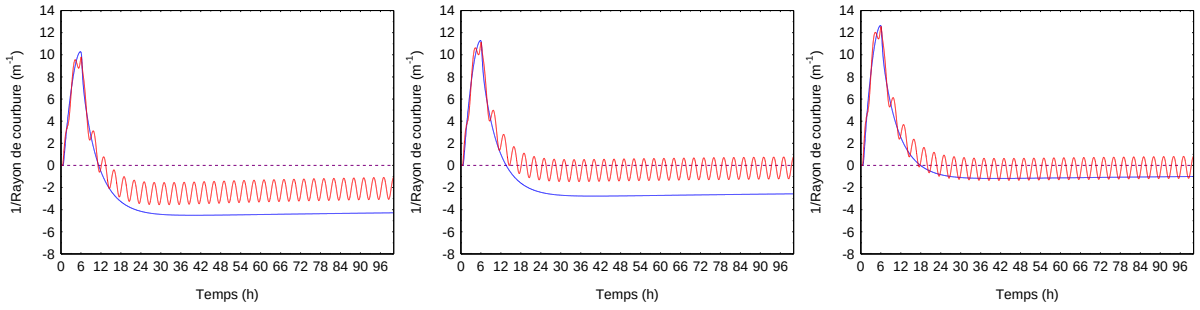
conduite oscillante les champs de contraintes résiduelles sont assez similaires d'une configuration à l'autre. Indépendamment des valeurs de E_{ms} les courbes se rejoignent au bout de 24 heures pour la contrainte de surface d'échange mais aussi pour la contrainte en surface isolée. Cela en raison de l'activation de la mécanosorption par les oscillations de teneur en eau et l'absence de déformation permanente. Cependant, lorsque la limite mécanosorptive est atteinte, l'activation est moins efficace (en termes de variations de teneur en eau cumulées) pour la relaxation.



a. Constante b. Oscillant

Configuration		*ms* (GPa^{-1})	E_{ms} (MPa)
s1	i1	135	0
s2	i2	135	45
s3	i3	135	180

Figure B.6. Profil de contraintes en surface d'échange (s) et en surface isolée pour les transferts de masse (i) en fonction du temps pour un séchage dissymétrique en conduite constante et oscillante avec trois configurations de paramètres mécanosorptifs.



ms = 135 GPa^{-1} ; E_{ms} = 0 *ms* = 135 GPa^{-1} ; E_{ms} = 45 MPa *ms* = 135 GPa^{-1} ; E_{ms} = 180 MPa

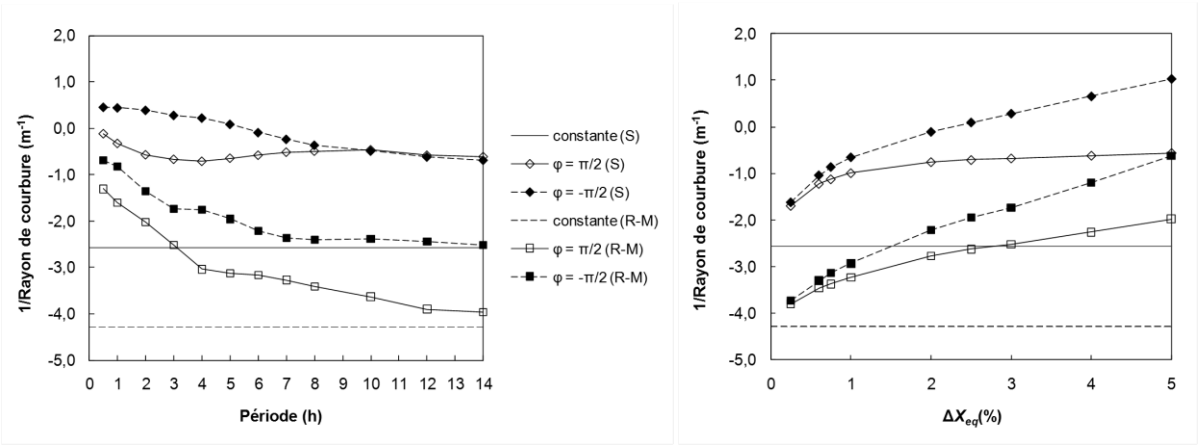
Figure B.7. Rayon de courbure en fonction du temps pour trois configurations de paramètres mécanosorptifs. Courbes bleues obtenues avec la conduite constante et courbes rouge avec la conduite oscillante. [ΔX_{eq} 3%, période 3h].

Pour compléter cette analyse des contraintes, la Figure B.7 montre la courbure de l'échantillon pour les trois configurations étudiées mais pour un temps plus long, soit 100 heures. L'évolution du rayon de courbure accompagne l'évolution des contraintes. Ainsi, on peut observer que pour une limite mécanosorptive croissante le pic initial au début du séchage sera plus élevé, en raison du niveau de

contrainte plus important. En revanche, **la courbure finale diminue significativement avec la valeur de paramètres mécanosorptifs**. On notera aussi qu'une fois la limite mécanosorptive atteinte, la diminution de la courbure finale s'arrête.

- **Effet de la période et de l'amplitude sur la courbure en fonction du déphasage**

La courbure finale intègre toute l'histoire des contraintes vue par la planche. Elle permet de quantifier l'état des contraintes résiduelles dans la planche à la fin du séchage. Aussi, nous pouvons nous demander quelle est l'importance de l'amorçage des oscillations (adsorption ou désorption) au cours du premier cycle sur la courbure finale ? Ainsi, l'effet de la période et de l'amplitude sur la courbure finale a été étudié en fonction du déphasage (Figure B.8). Par déphasage (angle φ), on comprend la nature du premier cycle d'oscillation de teneur en eau, soit le cycle commence par une phase de désorption ($\varphi = \pi/2$) soit par une phase d'absorption ($\varphi = -\pi/2$). Deux jeux de paramètres mécanosorptifs ont été testés, le premier avec le modèle de Ranta – Maunus (ms = 135 GPa^{-1} ; E_{ms} = 0) et le deuxième avec le modèle de Salin (ms = 135 GPa^{-1} ; E_{ms} = 45MPa). Pour étudier l'effet de la période les simulations ont été faites avec une amplitude (ΔX_{eq}) de 3%, alors que pour l'étude de l'effet de l'amplitude une période de 3h a été utilisée.



a. ΔX_{eq} 3% b. Période 3 heures

Figure B.8. Effet de la période et de l'amplitude dans le rayon de courbure finale en fonction du déphasage (angle φ) selon le modèle de Salin(S) et de Ranta-Maunus (R-M).

La période affecte sensiblement la courbure finale de l'échantillon. D'une manière générale, les périodes longues amplifient la courbure finale, la rapprochant de celle obtenue en conduite constante. La répétition successive des cycles en augmentant la valeur des variations de teneur en eau cumulées (fréquence plus grande, amplitude plus forte) favorise l'activation mécanosorptive et la relaxation de contraintes. Le déphasage joue un rôle important mais celle-ci diffère selon la période, l'amplitude et le modèle mécanosorptif adopté pour le décrire :

- Pour le modèle de Salin (courbes aux losanges) le rayon obtenu lorsque les cycles commencent par une phase d'adsorption ($\varphi = -\pi/2$) rattrape celui obtenu en commençant par une phase de désorption ($\varphi = \pi/2$) pour des périodes supérieures à 10 heures. En revanche, pour le modèle de Ranta – Maunus (courbes en carrés), le fait de commencer par une phase d'adsorption ($\varphi = -\pi/2$) donnera une courbure finale plus petite et donc plus loin

de la courbure obtenue en conduite constante. Aussi, la sensibilité à la période est plus importante pour le modèle de Ranta – Maunus.

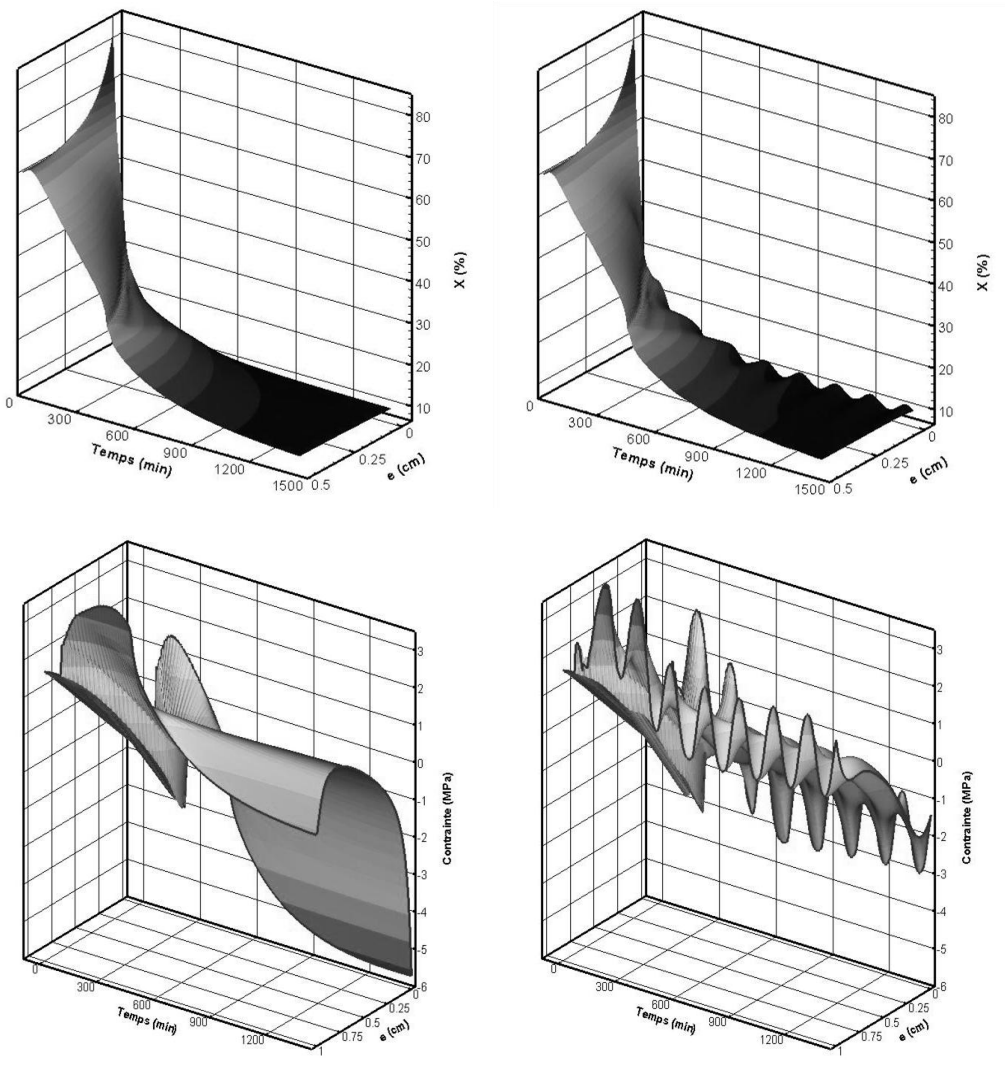
- D'autre part, lorsque le premier cycle commence par une adsorption ($\varphi = -\pi/2$), la courbure finale est plus faible et cela d'autant plus que l'amplitude de la variation de teneur en eau est grande. En effet, lorsque le cycle commence par une adsorption la périphérie commence à sécher avec des contraintes de traction plus faibles puisque l'humidité d'équilibre est en relatif plus grande. L'effet du déphasage est similaire pour les deux modèles. L'écart entre les deux déphasages augmente au fur et à mesure que l'amplitude augmente.

B.3. Séchage sous charge

- **Conduite constante et conduite oscillante**

Le séchage sous charge est un séchage symétrique d'un échantillon auquel on ajoute une charge qui génère un champ de déformations et de contraintes supplémentaire. Dans l'exemple traité ci-dessous, il s'agit d'une poutre cantilever chargée dans son extrémité libre. Cette configuration, tout comme celle du séchage dissymétrique, met en évidence le comportement différé du bois en entraînant de grandes déformations. Des travaux précédents (Mauget, 1996) ont montré la complémentarité d'information fournie par un séchage sous charge et un séchage dissymétrique, notamment en ce qui concerne l'analyse du couple des propriétés viscoélastiques/mécanosorptives. Dans la partie précédente, les propriétés mécanosorptives ont un effet significatif sur l'évolution de la courbure de l'échantillon séchant de façon dissymétrique.

Pour cette partie, nous avons simulé le séchage d'un échantillon de 10 mm d'épaisseur avec une charge de 10 N, séché aux mêmes conditions que précédemment. La cinétique montrée dans la Figure B.9 est la même que celle du séchage symétrique, seule la demi – épaisseur étant représentée. Par contre, pour analyser l'évolution des contraintes il est nécessaire de regarder toute l'épaisseur. La charge appliquée induit un champ de contrainte propre : tension dans la partie supérieure de l'échantillon et compression dans la partie inférieure. Ce champ vient s'ajouter au champ du au retrait qui apparaît lorsque la périphérie entre dans le domaine hygroscopique. Des contraintes de traction apparaissent dans la périphérie et la partie centrale entre en compression. Au début du séchage, en raison du champ de contraintes liées à la charge, la tension est plus faible sur la face inférieure que sur la face supérieure. Lorsque les couches plus profondes commencent à se rétracter, la surface inférieure entre davantage en compression que la face supérieure. Compte tenu des propriétés différées du matériau, l'inversion des contraintes accentue la compression sur la face inférieure. En activant la mécanosorption par les oscillations, les contraintes résiduelles de séchage sont relaxées ainsi qu'une partie des contraintes liées à la charge. L'écart de contraintes entre la face inférieure et supérieure est clairement diminué.



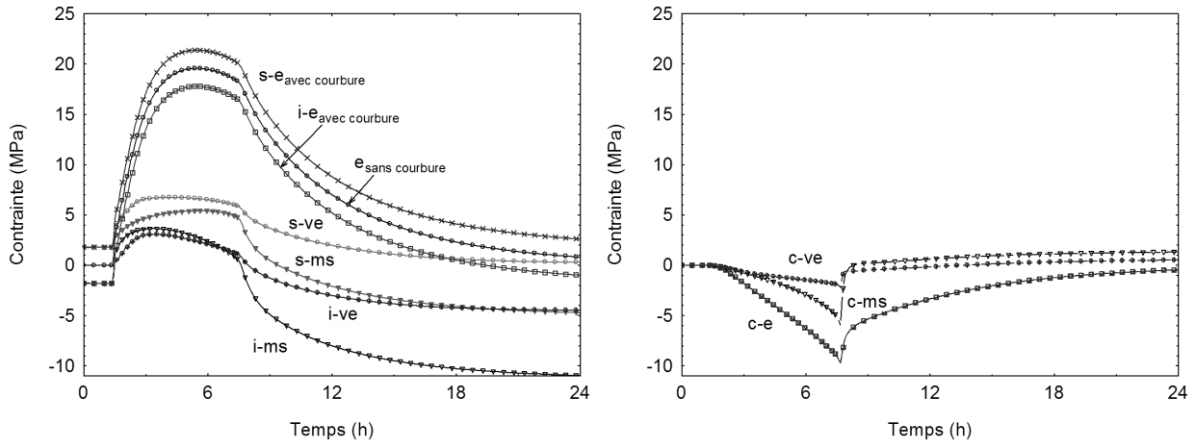
a. Constante b. Oscillant

Figure B.9. Cinétique de séchage en fonction du temps et de la demi-épaisseur (au-dessus) et évolution de contraintes en fonction du temps et de l'épaisseur (au-dessous) pour un séchage sous charge en conduite constante et oscillante [60°C, X_{eq} 10%, ΔX_{eq} 3%, période : 3h]

- **Contribution de l'effet différé sur la contrainte et la courbure**

Afin de mieux apprécier l'effet différé, nous avons simulé le séchage sous charge d'un échantillon en conduite classique avec différentes lois de comportement mécanique. Dans la Figure B.10 nous avons représenté les contraintes à la surface supérieure (s), à la surface inférieure (i) et au cœur (c) de la planche. La première simulation, effectuée en élastique pure avec une courbure bloquée ($e_{sans\ courbure}$), permet de suivre l'évolution des contraintes de séchage identiques pour les deux surfaces. Dès que la planche entre dans le domaine hygroscopique le retrait met la surface de la planche en traction. Par équilibre mécanique, le cœur entre en compression. Au fur et à mesure que le séchage avance, les contraintes diminuent et tendent vers zéro. Lorsque la courbure est libérée, la contrainte élastique de la surface supérieure (s-e) est en traction au cours de la première phase de séchage alors que celle de la surface inférieure (i-e) est en compression. Néanmoins, dès que le retrait s'exprime les deux surfaces sont en traction. Celle-ci est plus importante à la surface supérieure et plus faible à la face inférieure en raison de la courbure générée par la charge. Au cœur, la contrainte

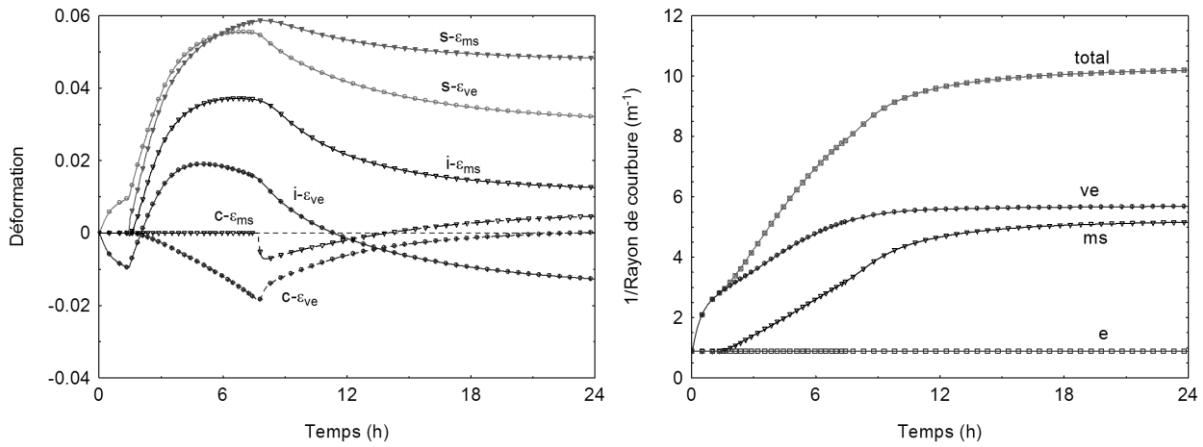
élastique (c-e) est la même que sans courbure possible. Lorsque les propriétés viscoélastiques ou mécanosorptives du matériau sont intégrées dans le modèle de comportement mécanique, les contraintes au sein de l'échantillon sont fortement relaxées.



a. Surface supérieure (s) et inférieure (i) b. Cœur

Figure B.10. Contrainte décomposée à la surface supérieure (s) et inférieure (i) et au cœur.

Dans la Figure B.11 on observe que la déformation viscoélastique en surface (s-ε_{ve}) s'exprime dès le début du séchage (hydroactivation en première phase de séchage), alors que la mécanosorption s'active seulement lors du passage dans le domaine hygroscopique. A la surface supérieure, la déformation mécanosorptive (s-ε_{ms}) augmente rapidement et surpasse la déformation viscoélastique. Pour les deux types de fluages, la déformation est plus importante dans la surface supérieure qui cumule la traction liée à la charge et la traction liée au retrait. Au cœur, on observe également que la déformation viscoélastique s'exprime plus tôt que la déformation mécanosorptive. Dans cette configuration **de séchage sous charge, le fluage mécanosorptif et le fluage viscoélastique contribuent ensemble à augmenter la courbure de l'échantillon par rapport à celle obtenu en élastique pur**. Le rayon de courbure totale sera une addition de chacun d'eux plus la partie due à l'élasticité.

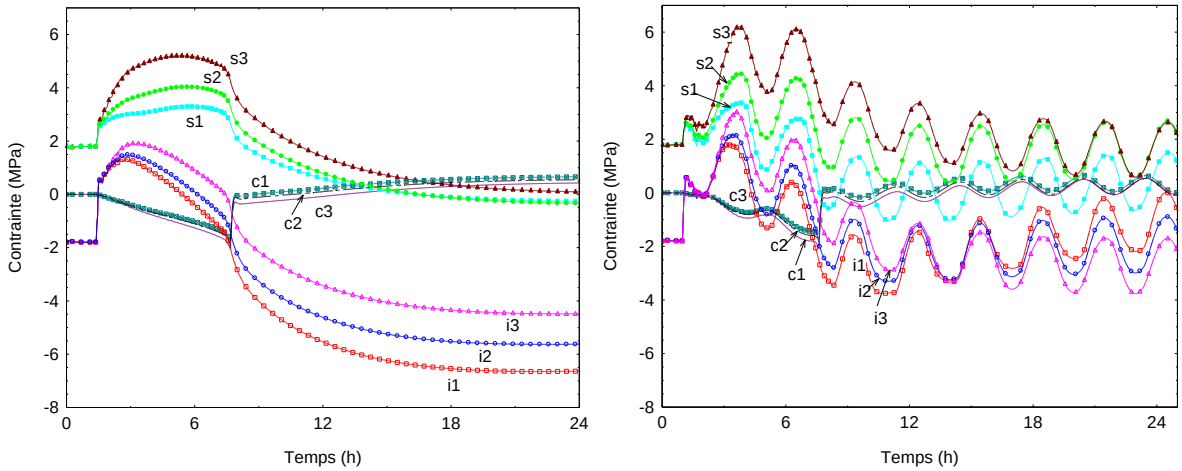


a. Déformation différée b. Rayon de courbure

Figure B.11. Déformation mécanosorptive (ε_{ms}) et viscoélastique (ε_{ve}) à la surface supérieure (s), à la surface inférieure (i) et au cœur (c) et rayon de courbure.

- **Effet des paramètres mécanosorptifs sur la contrainte et la courbure**

Les trois jeux des paramètres mécanosorptifs testés (Figure B.12) permettent de diminuer l'écart de contraintes entre les deux surfaces. Ceci est d'autant plus rapide que E_{ms} est faible. Les contraintes résiduelles en fin de séchage oscillant ou constant diffèrent selon la valeur des coefficients mécanosorptifs. Plus E_{ms} est faible et plus les contraintes résiduelles seront grandes en fin de séchage pour la conduite constante, car les déformations mécanosorptives apparues au début du séchage restent figées lorsque la teneur en eau d'équilibre est atteinte. A l'inverse pour la conduite oscillante, plus E_{ms} est faible et plus les contraintes résiduelles seront faibles car le potentiel de relaxation avec les oscillations est plus grand. Dans cette dernière configuration, la mécanosorption permet de relaxer les contraintes de séchage mais également une partie des contraintes dues à la charge.



a. Constante b. Oscillant

Configuration			*ms* (GPa^{-1})	E_{ms} (MPa)
s1	c1	i1	135	0
s2	c2	i2	135	45
s3	c3	i3	135	180

Figure B.12. Profil de contraintes en surface supérieure (s), inférieure (i) et au cœur (c) en fonction du temps pour un séchage dissymétrique en conduite constante et oscillante avec trois jeux de paramètres mécanosorptifs.

La courbure finale dans le cas d'un séchage sous charge est très sensible aux paramètres mécanosorptifs et notamment à la valeur de E_{ms}. Avec les oscillations de teneur en eau, la courbure finale de l'échantillon devrait augmenter en raison de l'activation du fluage mécanosorptif. Cela peut être observé dans la Figure B.13. Dans cette figure l'effet de la limite mécanosorptif est évident. La limite mécanosorptif fait plafonner la courbure alors qu'avec le modèle de Ranta – Maunus chaque oscillation fait augmenter la courbure. Une limite trop forte annule ainsi l'effet des oscillations puisque la courbure finale se rapproche de celle obtenue en conduite constante.

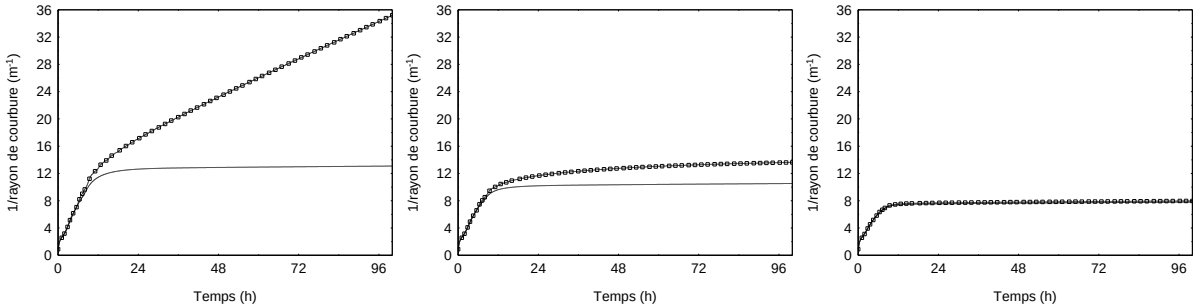


Figure B.13. Rayon de courbure en fonction du temps pour trois configurations de paramètres mécanosorptifs. [ΔX_{eq} 3%, période 3h]

- **Effet de la période et de l'amplitude sur la courbure en fonction du déphasage**

L'effet de la période et de l'amplitude dans la courbure finale est très sensible au modèle pris en compte. En revanche, le déphasage n'a pas d'effet. Les deux figures suivantes illustrent l'effet de la période et de l'amplitude. Le rôle de la limite mécanosorptif, prise en compte par le modèle de Salin, est évident. Avec le modèle de Salin, la courbure finale ne semble pas affectée par la période, car la limite de déformation mécanosorptive est atteinte après quelques cycles, alors qu'elle diminue au fur et à mesure que la période augmente avec le modèle de Ranta – Maunus. Il faut quand même noter que la courbure semble atteindre une valeur maximale pour une période proche de 1h et elle décroit lorsque la période diminue en dessous de cette période. En effet avec le modèle de Ranta-Maunus, plus la période est courte, et plus la valeur des variations de teneur en eau cumulées est grande et plus le fluage mécanosorptif est activé. Les contraintes liées à la charge vont pouvoir être totalement relaxées par le fluage mécanosorptif. A partir de cet instant, une recouvrance partielle de la courbure est alors possible.

En ce qui concerne l'amplitude, on observe pour la même raison que précédemment qu'avec le modèle de Salin la courbure est peu influencée par la période, elle augmente légèrement avec des amplitudes croissantes. Avec le modèle de Ranta – Maunus la courbure est de plus en plus importante, s'éloignant ainsi de la courbure obtenue en conduite constante.

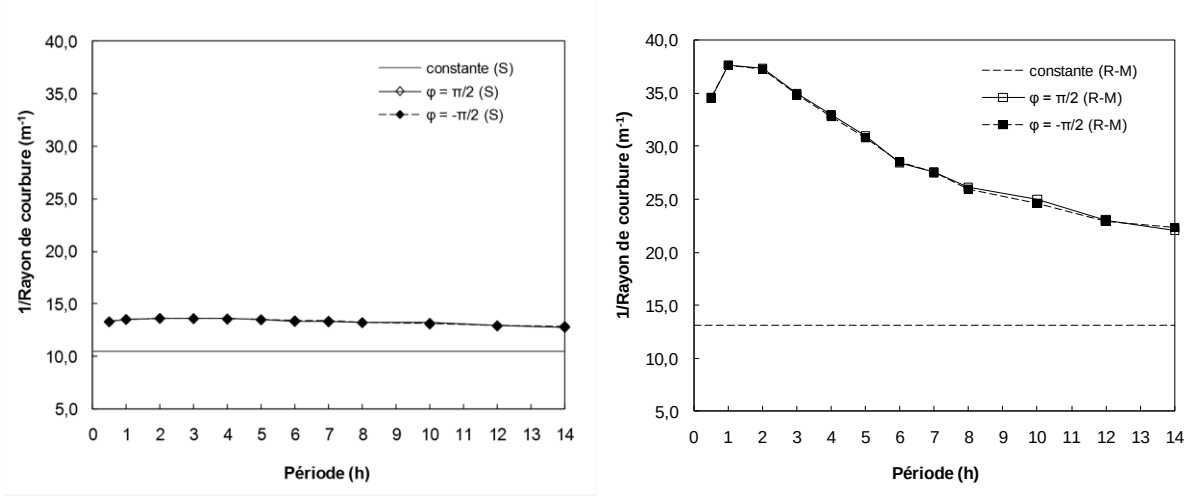


Figure B.14. Effet de la période dans le rayon de courbure finale en fonction du déphasage (angle φ) selon le modèle de Salin (S) à gauche et de Ranta-Maunus (R-M) à droite. [ΔX_{eq} 3%]

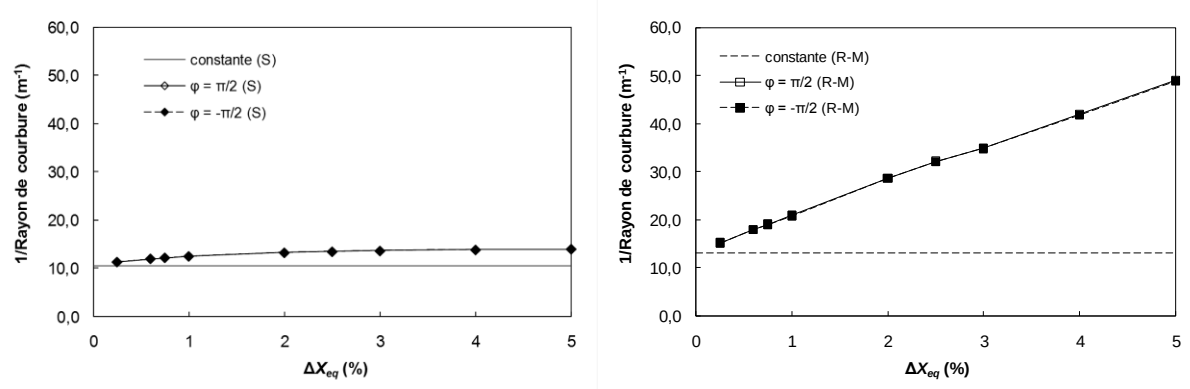


Figure B.15. Effet de l'amplitude dans le rayon de courbure finale en fonction du déphasage (angle φ) selon le modèle de Salin (S) à gauche et de Ranta-Maunus (R-M) à droite. [Période : 3h]

C. Plan de découpe des échantillons

C.1. Etude de l'effet de conduites oscillantes sur les contraintes de séchage

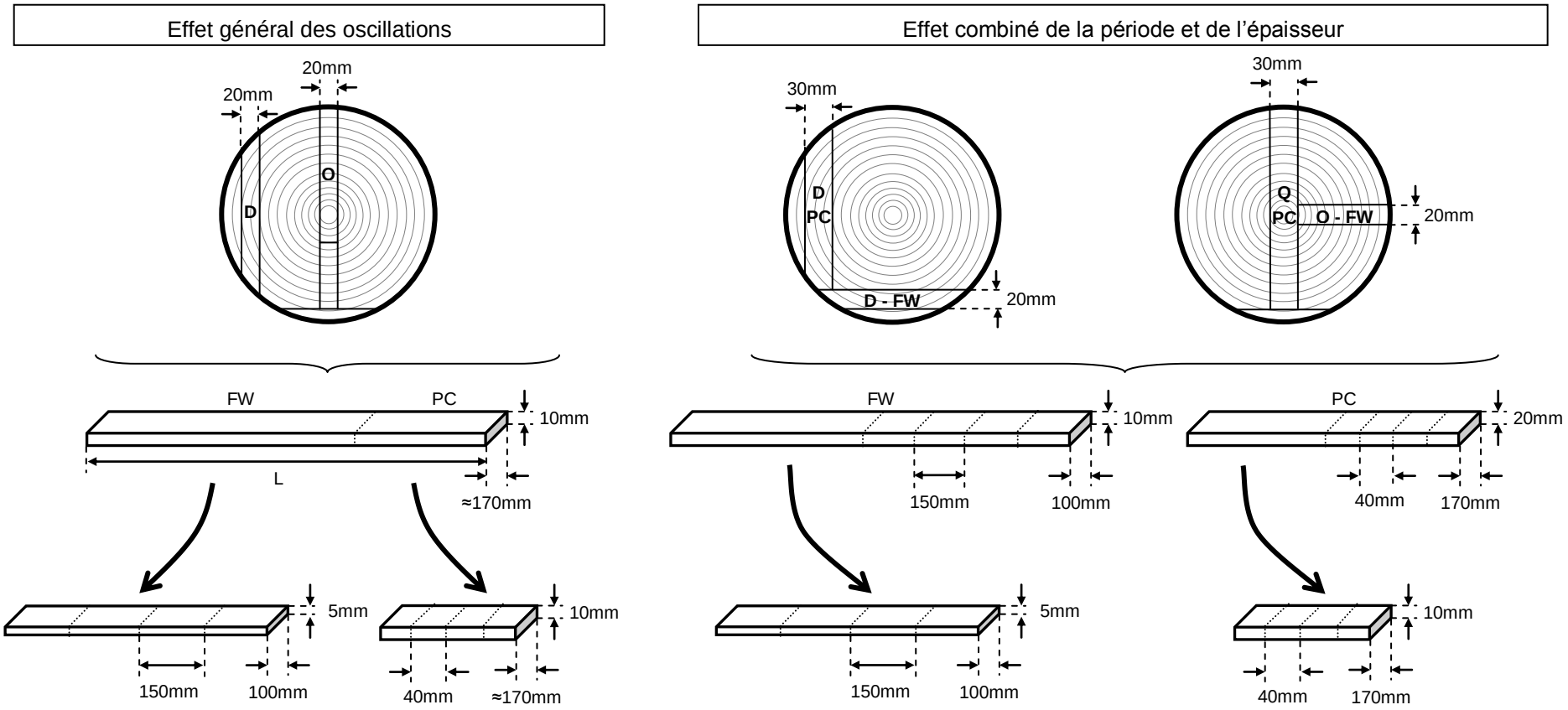


Schéma d'échantillonnage des planches sur dosse (D) et sur quartier (Q) pour la découpe des échantillons pour les deux dispositifs expérimentaux : flying wood (FW) pour le séchage dissymétrique et poutre cantilever (PC) pour le séchage sous charge.

C.2. Essais complémentaires de séchage sous charge

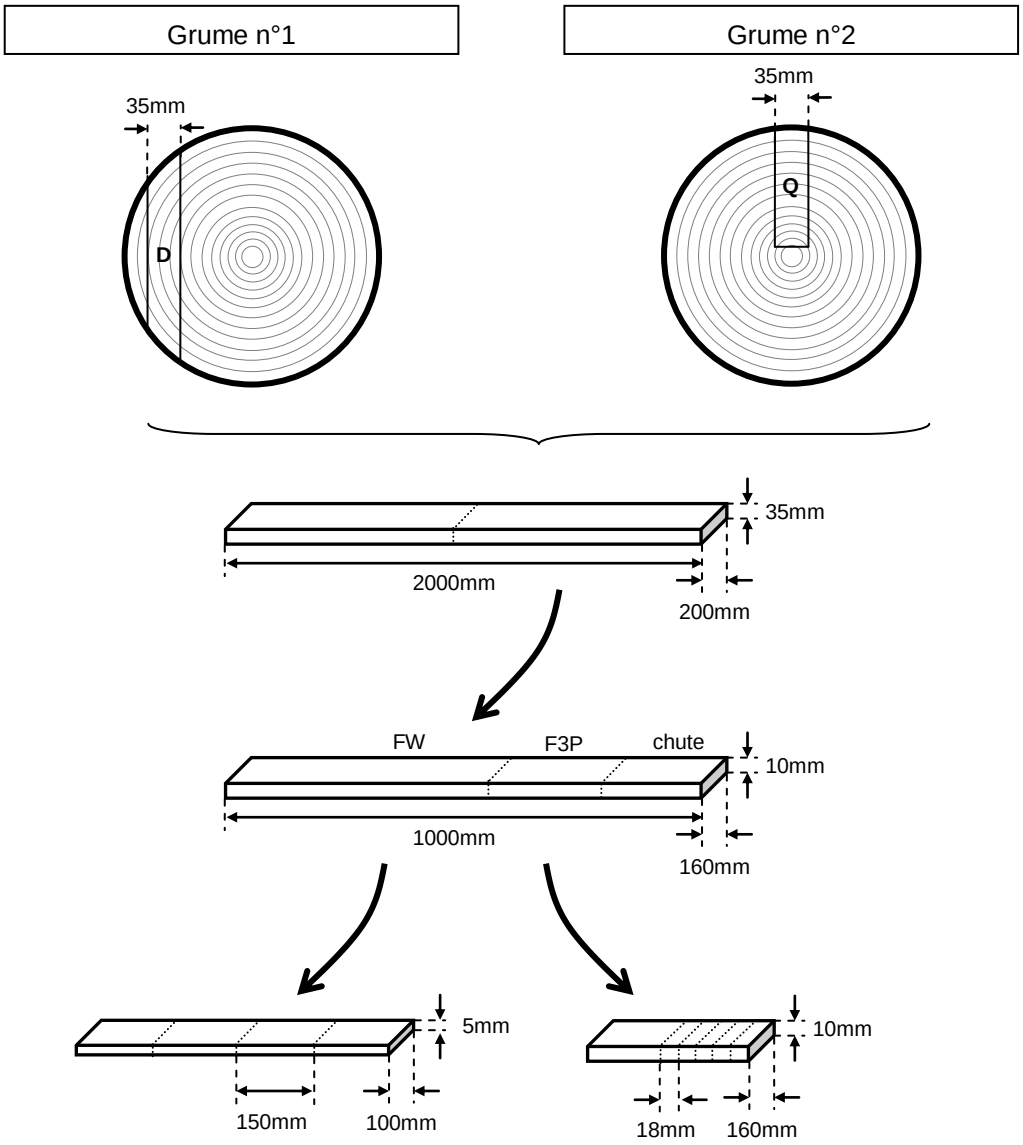


Schéma d'échantillonnage des planches sur dosse (D) et sur quartier (Q) pour la découpe des échantillons pour les dispositifs expérimentaux de la campagne n°4 : flying wood (FW) pour le séchage dissymétrique et flexion trois points (F3P) pour le séchage sous charge.

D. Fiches complètes de conditions d'essai et résultats

Dans cette annexe concernant les essais réalises pour étudier l'effet de conduites oscillantes sur les contraintes de séchage, des informations supplémentaires sur les conditions d'essais sont présentées, ainsi que les résultats complets organisés ainsi :

- Un tableau récapitulatif des conditions expérimentales (température sèche, température de rosée calculée à partir de la température humide, X_{eq}, ΔX_{eq}) ainsi que les teneurs en eau initiale (X_i) et finale (X_f) de chaque échantillon obtenues par pesées.
- Les conditions expérimentales représentées graphiquement.
- La cinétique de séchage des échantillons du dispositif flying wood.
- Le rayon de courbure obtenu en flying wood.
- La flèche obtenue en poutre cantilever.

D.1. Campagne n°1

Pour cette campagne la température sèche a été fixée à 60°C et la température de rosée à 48°C pour obtenir une teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) de 8%. Le tableau D.1a présente en détail la table utilisée pour cette conduite classique de référence.

Tableau D.1a. Table de séchage pour la conduite classique de référence n°1.

Etape	Durée (h)	T° sèche (°C)	T° rosée (°C)	T° humide (°C)	X_{eq} (%)
1	Rampe de 1,5	60,0	59,5	59,5	22,5
2	Rampe de 0,5	60,0	48,0	49,2	8,2
3	Palier jusqu'à la fin du séchage	60,0	48,0 (51,0 – 45,0)*	49,2 (51,8 – 46,7)*	8,2 (9,6 – 6,9)*

*valeurs pour la conduite oscillante

Cette configuration (configuration n°1) devrait conduire à une relaxation supplémentaire des contraintes de séchage par l'activation du fluage mécanosorptif, grâce aux oscillations de la teneur d'eau d'équilibre. Nous avons choisi également de commencer les oscillations par une phase de désorption pour endurcir les conditions en début de séchage. Le code numérique *TransPore* a été utilisé pour choisir l'épaisseur de l'échantillon d'une part, et d'autre part l'amplitude et la période des oscillations. La Figure 4.7a montre l'atténuation des oscillations dans la demi – épaisseur pour les conditions retenues, soit 10 mm d'épaisseur, ΔX_{eq} de 3% et période de 3 heures. L'amplitude de X_{eq} a été obtenue grâce à l'oscillation de la température de rosée de ±3°C autour du palier utilisé dans la conduite classique de référence. Il convient de signaler que ces conditions ont aussi tenu compte des caractéristiques du séchoir, les oscillations devant être techniquement possibles avec ce matériel. Selon la Figure 4.7a, avec un échantillon de 10 mm d'épaisseur, le fluage mécanosorptif devrait être sensiblement activé de la surface à 1 mm de profondeur (ΔX^*>0,4). Ensuite, les oscillations

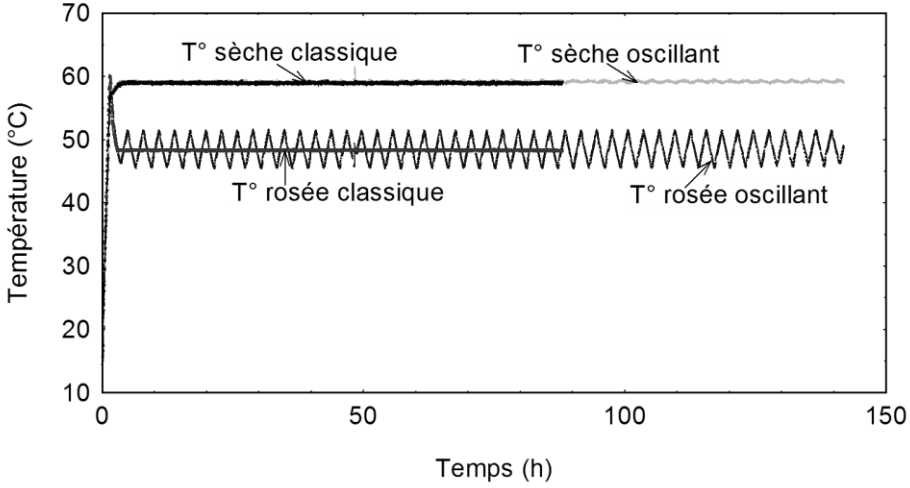
s'atténueront progressivement et au cœur celles-ci seront pratiquement nulles puisque la courbe de variation d'humidité rejoint la valeur zéro. Il n'y aura donc plus d'activation mécanosorptive au cœur. Aussi, cette figure est valide pour toute amplitude de X_{eq} puisqu'elle considère la variation adimensionnelle de la teneur en eau (ΔX^*).

Durant cette campagne, quelques difficultés expérimentales ont été rencontrées. En raison du faible diamètre du billon (30 cm), nous avons été obligés de réduire la taille des échantillons sur dosse destinés au dispositif poutre cantilever. La longueur des échantillons a été de 13 cm au lieu de 17 cm. Néanmoins, la géométrie iso-contrainte a été respectée. Aussi, les deux thermocouples placés près des échantillons poutre cantilever pour mesurer la température sèche et la température humide près des échantillons n'étaient pas encore installés pour cette première campagne. Par conséquent, la température de rosée affichée pour cette campagne est celle du thermocouple situé en bas du séchoir, au niveau du bac d'eau. Pour les campagnes suivantes, la température de rosée a été calculée à partir de la température humide mesurée près des échantillons. Nous avons constaté par la suite qu'une légère différence de -1,1°C en crête supérieure et de -0,4°C en crête inférieure pouvait exister entre la température de rosée réellement vue par l'échantillon et celle du bac d'eau. Cette différence conduit à tronquer les crêtes de descente/remontée de la température rosée. Enfin, il faut une dernière remarque concernant une de jauges de contraintes du dispositif flying wood. Celle utilisée pour les échantillons sur quartier s'est avéré plus sensible aux oscillations que celle de l'échantillon sur dosse. Après vérification, nous avons constaté que l'amplitude de teneur en eau obtenue avec la jauge de l'échantillon sur quartier était supérieure à l'amplitude de consigne. Ainsi, les données fournies par cette jauge en particulier doivent être prises avec précaution. Les valeurs de la teneur en eau initiale et finale affichées dans le tableau récapitulatif sont celles obtenues par pesées et non pas par les jauges.

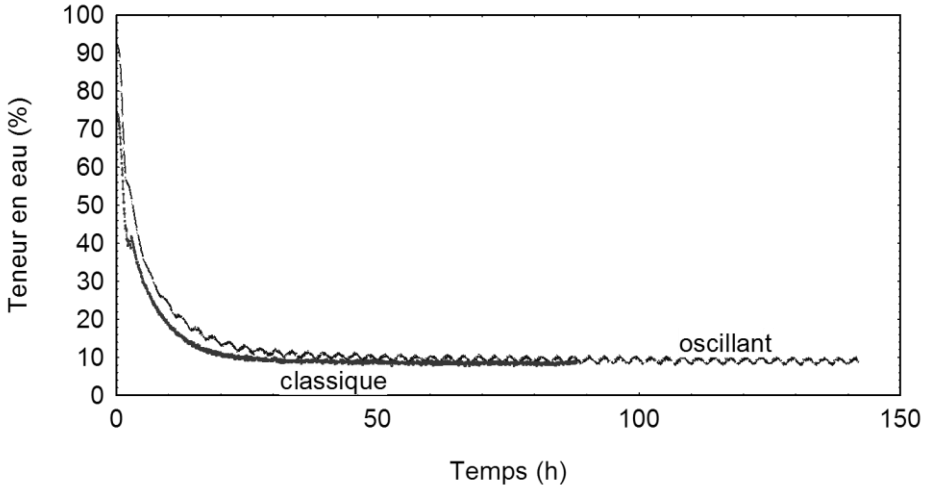
Dans le tableau des **conditions d'essais et teneurs en eau** (Figure D.1a) on constate que les températures obtenues ne sont pas tout à fait celles des consignes (Tableau 4.1). En séchage classique, la température sèche est à 59°C au lieu de 60°C, et la température de rosée est légèrement supérieure à celle de consigne (48,3°C au lieu de 48°C). La teneur en eau d'équilibre est donc légèrement supérieure à la consigne (8,8% au lieu de 8,2% prévu). Au début de séchage les échantillons avaient une teneur en eau moyenne de 45,3%, et de 8,9% en fin de séchage. En séchage oscillant, la teneur en eau d'équilibre est à 9,2% en moyenne, valeur proche de celle obtenue en séchage classique. D'après les valeurs de température de rosée, l'amplitude des oscillations est égale à 3,2%. Ce séchage a été arrêté à une teneur en eau d'équilibre similaire à celle du séchage classique, au milieu d'une phase d'adsorption. La teneur en eau moyenne est à 57,1% en début de séchage, et 8,8% en fin de séchage. La **cinétique de séchage** ne semble pas être affectée par les oscillations de teneur en eau, ce qui confirme les cinétiques obtenues par simulation de l'Annexe B (chapitre 3).

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%) dosse	X_i(%) quartier	X_f(%) dosse	X_f(%) quartier
Séchage classique							
59,0	48,3	8,8		FW[3]:46,59	45,40	8,65	8,53
				PC[4]: 46,02	43,23	9,10[5]	9,49[5]
Séchage oscillant (période 3 heures)							
59,0	51,4 - 45,5	9,2	3,2	FW : 59,42	55,85	8,90	8,68
				PC : 57,76	55,52	8,91[5]	8,83[5]

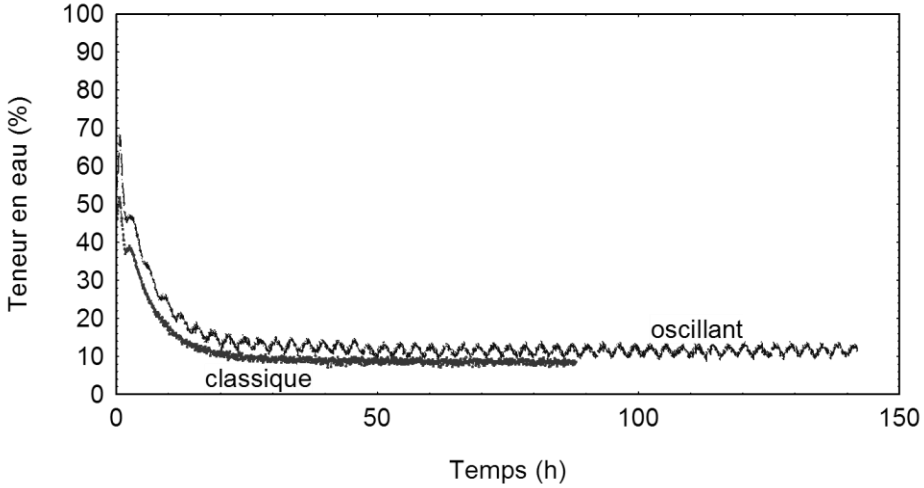
1 : température sèche ; 2 : température de rosée (en bas du séchoir) ; 3 : flying wood ;
4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau moyenne de tout l'échantillon



Conditions expérimentales

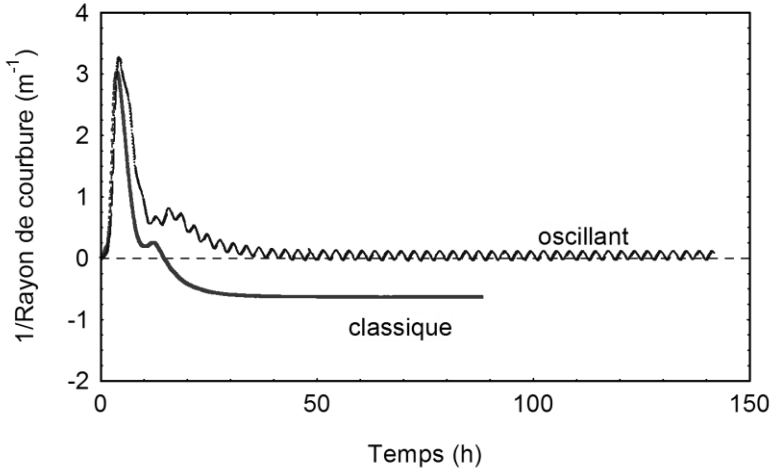


Cinétique de séchage – dosse

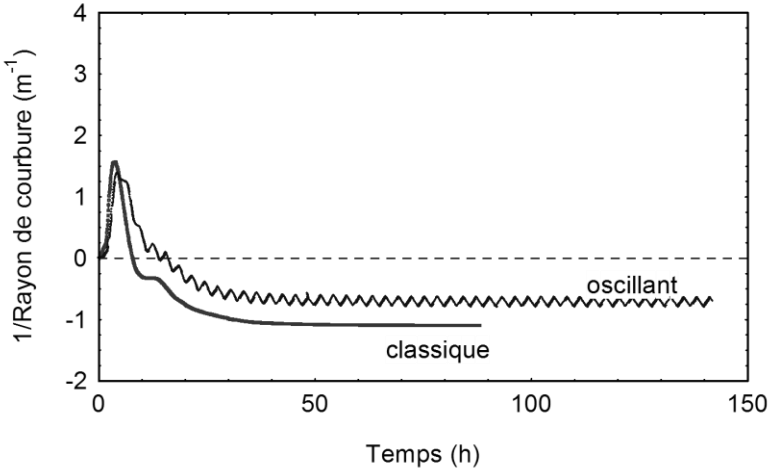


Cinétique de séchage - quartier

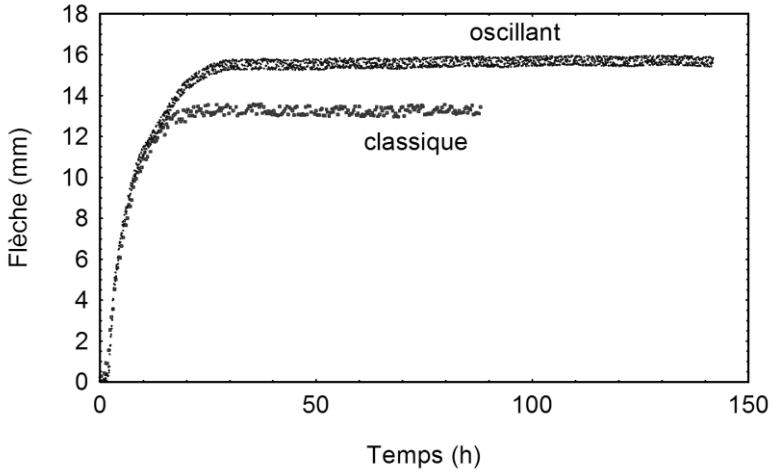
Figure D.1a. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°1. [Séchage classique : T° sèche = 59°C, X_{eq} = 8,8% ; séchage oscillant : T° sèche =59°C, X_{eq}=9,2%, ΔX_{eq}= 3,2%, période = 3 heures].



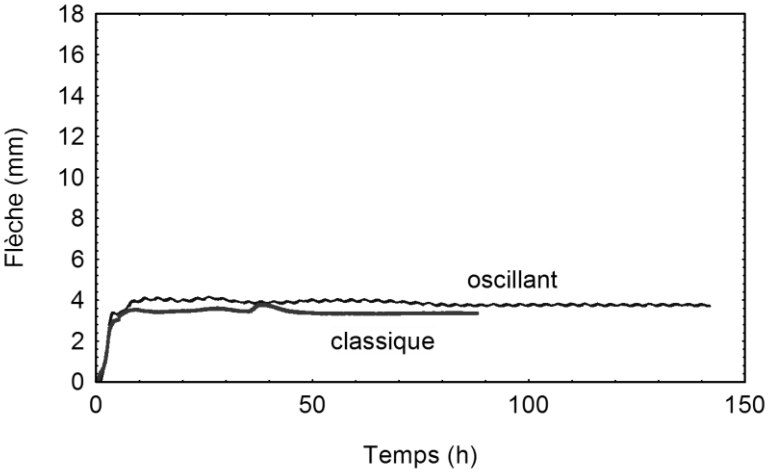
Flying wood – dosse (5mm)



Flying wood –quartier (5mm)



Poutre cantilever – dosse (10mm)



Poutre cantilever – quartier (10mm)

: D.1b. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°1. [Séchage classique : T° sèche = 59°C, X_{eq} = 8,8% ; séchage oscillant : T° sèche = 59°C, X_{eq} = 9,2%, ΔX_{eq} = 3,2%, période = 3 heures].

D.2. Campagnes n°A.1 et n°A.2

Pour ces campagnes nous avons conçu une configuration légèrement différente (configuration n°2) à celle de la campagne n°1. La table de séchage classique de référence utilisée dans la première configuration a été durcie afin d'avoir une courbure plus importante pour les essais de *flying wood*. Le bois devait sécher désormais jusqu'à un X_{eq} de 7% (tableau D.2a) au lieu de 8%. Tenant compte des limitations du matériel, il était difficile d'utiliser la même amplitude de X_{eq} de la campagne n°1, soit 3%. En conséquence, ΔX_{eq} a été diminué à 2% de crête à crête. Aussi, la période a dû être rallongée à 4 heures afin de permettre au matériel d'atteindre les valeurs de consigne pour la température de rosée.

Tableau D.2a. Table de séchage pour la conduite classique de référence n°A.1 et n°A.2.

Etape	Durée (h)	T° sèche (°C)	T° rosée (°C)	T° humide (°C)	X_{eq} (%)
1	Rampe de 1,5	60,0	59,5	59,5	22,6
2	Rampe de 0,5	60,0	45,0	46,7	7,0
3	Palier jusqu'à la fin du séchage	60,0	45,0 (48,0 – 42,0)*	46,7 (49,2 – 44,3)*	7,0 (8,2 – 6,1)*

*valeurs pour la conduite oscillante

D'après la simulation numérique de la Figure 4.7b, la période étant un peu plus longue, toute l'épaisseur de l'échantillon est désormais perturbée par les oscillations, mais au cœur celles-ci sont bien atténuées.

Campagne n°A.1

Nous devons signaler quelques difficultés expérimentales qui ont perturbée ces essais. La consigne pour le séchage oscillant prévoyait de commencer les oscillations par une phase de désorption. Dans les faits, en raison des limites du matériel, les oscillations ont commencé par une phase d'adsorption. Pour le séchage classique, au bout de 18 heures d'essai, il y a eu quelques perturbations de la température dans le séchoir. Cela explique le petit « saut » observé dans le flying wood. De plus, le suivi de la cinétique de séchage pour l'échantillon sur quartier a été interrompu quelques heures pendant le séchage oscillant. Après 75 heures d'essai, le signal est devenu aberrant pour redevenir normal vers la fin de l'essai. La difficulté la plus sérieuse concerne le LVDT utilisé pour l'échantillon sur quartier, ce qui a rendu les résultats du séchage oscillant inexploitables.

La fiche complète des résultats est présentée dans les Figures D.2a et D.2b. On observe dans le tableau de **conditions expérimentales et teneurs en eau** que les températures de consigne n'ont pas été parfaitement respectées. Pourtant, la teneur en eau d'équilibre obtenue est proche de la consigne et, ce qui est important, sans écart entre le séchage classique (7,4%) et oscillant (7,6%). Ce dernier a été arrêté au milieu d'une phase d'adsorption ce qui correspond à une teneur en eau

similaire à celle du séchage classique. L'amplitude des oscillations de teneur en eau d'équilibre obtenue, soit 1,9%, a été légèrement inférieure au 2% de la consigne. En ce qui concerne la teneur en eau des échantillons, les valeurs initiales étaient bien au dessus du point de saturation de fibres (en moyenne 75,3% pour le séchage classique et 75,8% pour le séchage oscillant) et les valeurs finales étaient proches (en moyenne 7,1% pour le séchage classique et 7,4% pour le séchage oscillant).

La **cinétique de séchage** de l'échantillon sur dosse est la même pour les deux séchages, alors que pour l'échantillon sur quartier le séchage oscillant semble plus lent jusqu'au moment où le signal de la jauge de contraintes est devenu aberrant.

La **réponse mécanique aux oscillations de teneur en eau** est similaire au comportement obtenu en séchage classique. Les différences nettes observées entre les deux conduites dans la campagne n°1, autant pour le flying wood que pour la poutre cantilever, n'ont pas été retrouvées. A cela, il faut ajouter les difficultés expérimentales déjà évoquées. Pour le flying wood et en séchage classique, l'inversion de contraintes est clairement exprimée par l'inversion de la courbure de l'échantillon d'une part, et par la courbure finale d'autre part. Cela est particulièrement évident pour l'échantillon débité sur quartier, pour lequel le ratio entre le pic initial et la courbure finale est proche de 1. En séchage oscillant la courbure finale obtenue peut être considérée équivalente à celle du séchage classique, même si pour l'échantillon sur dosse elle semble légèrement diminuée. L'inversion de contraintes, traduite par l'inversion de la courbure et subie avec les oscillations, est bien plus forte pour l'échantillon sur quartier.

Puisque les courbures des échantillons sur quartier étaient quand même assez proches, on espérait trouver des explications supplémentaires avec les résultats de la poutre cantilever. Pour les échantillons sur quartier, cela n'a pas été possible pour les raisons déjà mentionnées. De leur côté, le comportement des échantillons sur dosse s'est révélé complexe. Dans les deux séchages, au bout de 40 heures la flèche décroit, celle du séchage oscillant étant la plus petite à la fin du séchage. D'après ces courbes, au bout de 40 heures, lorsque la teneur en eau des échantillons avoisine 10%, surviendrait un redressement des échantillons. Cela peut s'expliquer par un problème de rotation autour de la face d'appui de l'encastrement, comme mentionné dans la section 4.2.1.3.

Tenant compte des difficultés expérimentales rencontrées pendant ces essais, nous avons décidé de réaliser une nouvelle campagne avec les mêmes conditions.

Campagne n°A.2

Avant de commencer cette nouvelle campagne, le contrôleur Eurotherm du séchoir a été remplacé en raison d'une panne. Par la suite, nous avons constaté des différences dans la régulation par rapport à l'ancien contrôleur. Pour la consigne du séchage oscillant, nous avons tenu compte des limitations du matériel constatées précédemment. La consigne a ainsi été modifiée pour obtenir, en début de séchage, les mêmes conditions que lors du séchage oscillant précédent. Comme dans les autres campagnes, quelques événements ont perturbée le bon déroulement des essais. Pendant le séchage classique, au bout de 17 heures d'essai, la pompe à eau a été accidentellement arrêtée durant 1 heure, entraînant une augmentation progressive de la température de rosée de 5°C. En

outre, les problèmes rencontrés auparavant avec la jauge de contrainte pour l'échantillon sur quartier se sont accentués, nous privant ainsi des données sur la cinétique. Pour l'échantillon sur dosse en séchage oscillant, on a aussi constaté une différence importante entre la teneur en eau initiale donnée par la jauge et celle obtenue par pesée. Il est donc difficile de dresser des conclusions sur la cinétique.

Les Figures D.2c et D.2d présentent la fiche complète des résultats de cette campagne. Le tableau des **conditions expérimentales et teneurs en eau** dévoile des valeurs de température plus proches de la consigne par rapport aux campagnes précédentes, probablement en raison du changement du contrôleur. Quoi qu'il en soit, la teneur en eau d'équilibre du séchage classique a été similaire à celle du séchage oscillant (7,0% et 7,3% respectivement), rendant ainsi la comparaison entre les deux séchages possible. Le séchage oscillant a été arrêté au milieu d'une phase d'adsorption à une teneur en eau d'équilibre similaire à celle du séchage classique, de la même façon que pour les campagnes précédentes. Au début du séchage les échantillons avaient une teneur en eau supérieure au point de saturation des fibres (en moyenne 44,7% pour le séchage classique et 44,3% pour le séchage oscillant) et en fin de séchage la teneur en eau était en moyenne 8,6% pour le séchage classique et 8,1% pour le séchage oscillant.

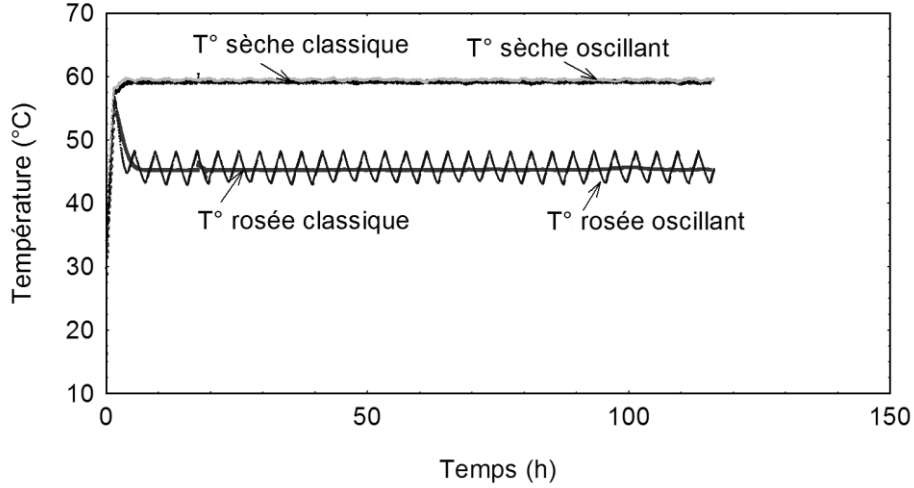
En ce qui concerne la **réponse mécanique aux oscillations de teneur en eau**, il en ressort qu'en flying wood, la courbure finale est plus prononcée pour le séchage oscillant quel que soit le débit de l'échantillon. Vu le rapprochement entre les courbures finales de deux types de séchages, on peut les considérer équivalentes comme observé lors de la campagne n°A.1. Peut-être que les conditions ici testées (X_{eq} = 7%) sont trop drastiques pour permettre une réduction de contraintes de séchage par les oscillations, tel qu'observé dans la campagne n°1 où les conditions climatiques étaient plus douces (X_{eq} = 8%). On remarque aussi, l'absence d'une courbure initiale égale à zéro en début de séchage (correspondant à la première phase de séchage). Cela peut s'expliquer par la teneur en eau initiale des échantillons (44,3%), plus faible que celle de la campagne A.1 (75,8%).

Dans les résultats de la poutre cantilever, l'échantillon sur dosse présente une flèche supérieure pour le séchage oscillant et un plafonnement témoin de l'existence de la limite mécanosorptive. On retrouve ici ce qui avait été observé dans la campagne n°1. En revanche, pour l'échantillon sur quartier, le comportement au début de séchage est difficile à interpréter particulièrement pour le séchage classique. Il est possible que le problème de rotation autour de l'encastrement déjà évoqué en soit la cause. Néanmoins, dès 20 heures les deux séchages semblent suivre la même tendance. A la fin du séchage classique les deux flèches se rattrapent. La flèche du séchage oscillant progresse lentement jusqu'à la fin du séchage.

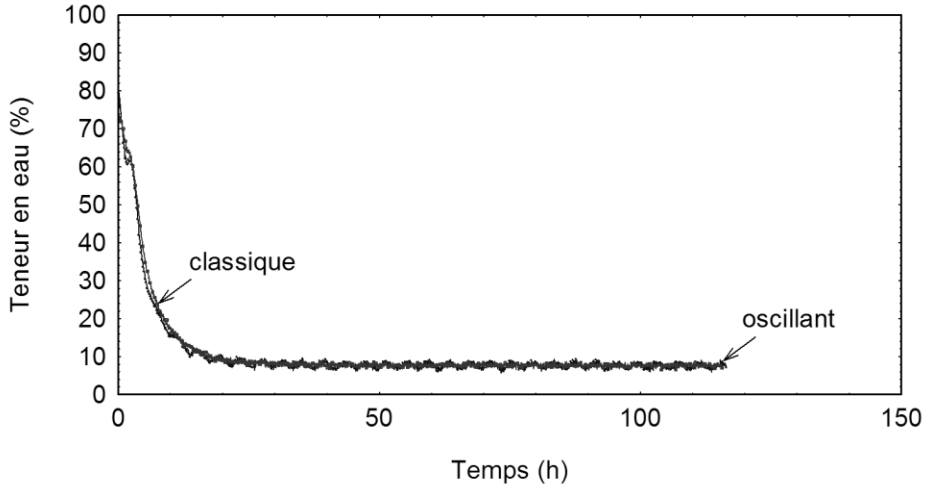
Pour **synthétiser les résultats de ces deux campagnes**, nous pouvons dire que les conditions d'essai ici testées n'apportent pas de relaxation supplémentaire de contraintes de séchage. En séchage dissymétrique, les contraintes en séchage oscillant sont équivalentes à celles du séchage classique. En séchage sous charge, l'existence d'une limite mécanosorptive a été avérée par la stabilisation de la flèche.

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%) dosse	X_i(%) quartier	X_f(%) dosse	X_f(%) quartier
Séchage classique							
59,2	45,3	7,4		FW[3]: 72,73 PC[4]: 75,80	74,39 78,19	7,06 7,28[5]	6,99 7,14[5]
Séchage oscillant (période 4 heures)							
59,4	48,2 - 43,3	7,6	1,9	FW : 79,40 PC : 72,23	75,34 76,17	7,10 7,58[5]	7,35 7,66[5]

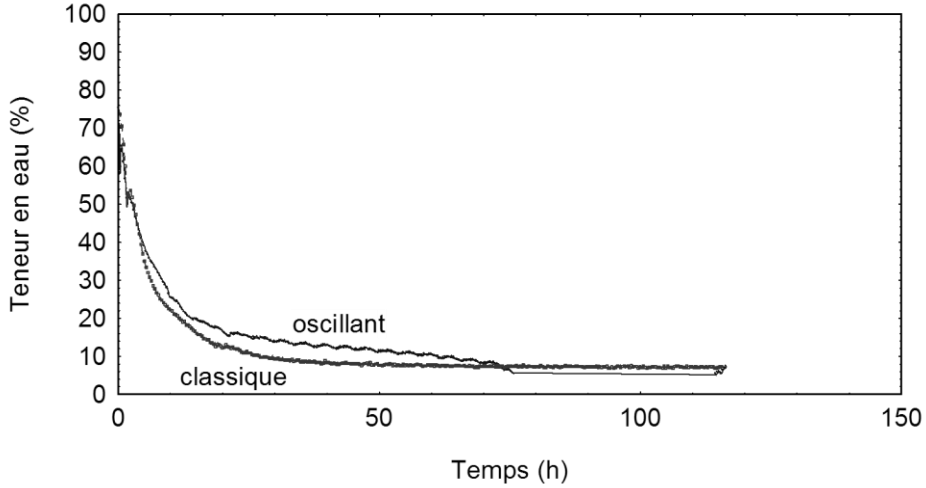
1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ; 4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau hors encastrement



Conditions expérimentales

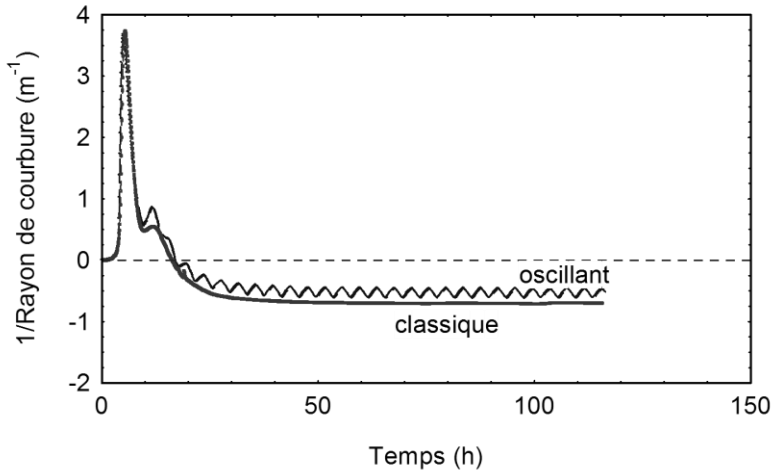


Cinétique de séchage – dosse

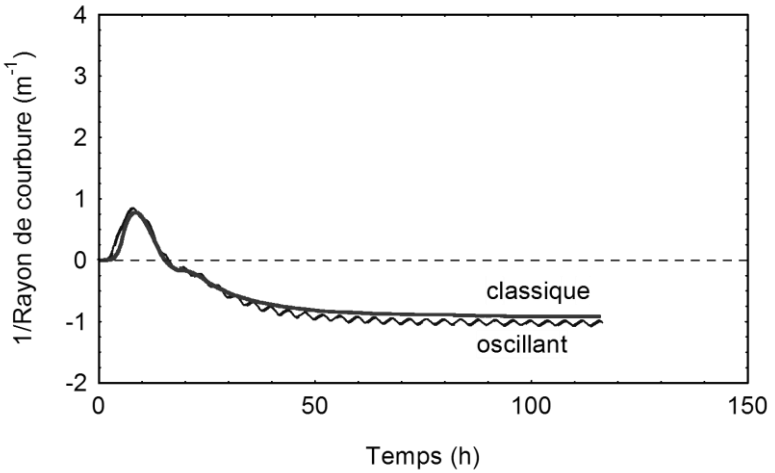


Cinétique de séchage –quartier

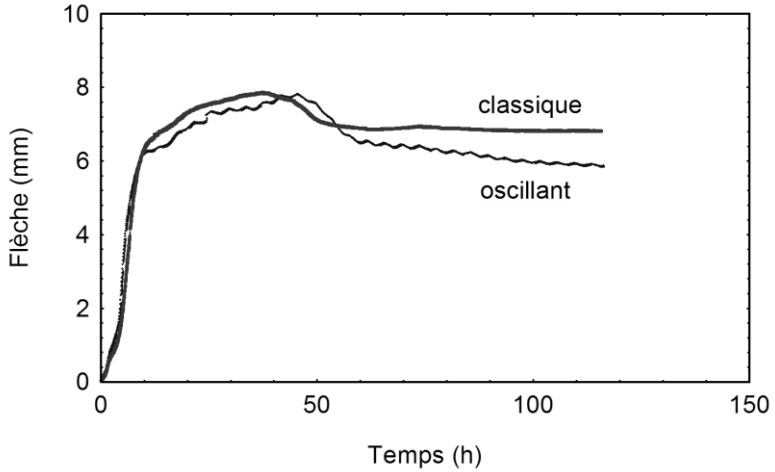
Figure D.2a. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°A.1. [Séchage classique : T° sèche = 59,2°C, X_{eq} = 7,4% ; séchage oscillant : T° sèche = 59,4°C, X_{eq} = 7,6%, ΔX_{eq} = 1,9%, période = 4 heures].



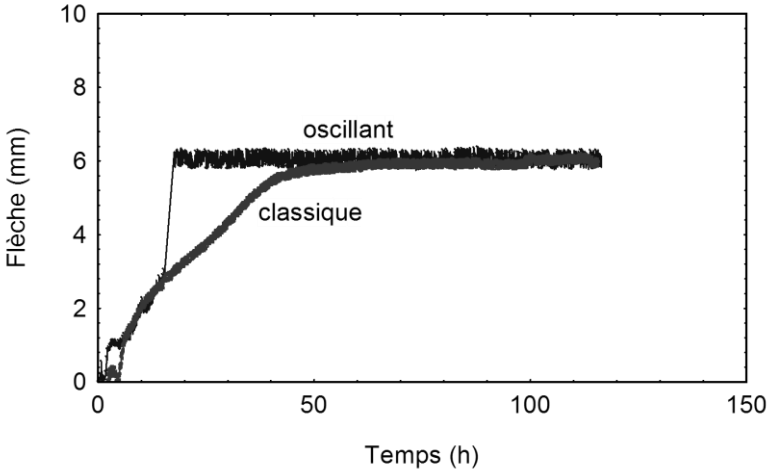
Flying wood – dosse (5mm)



Flying wood –quartier (5mm)



Poutre cantilever – dosse (10mm)

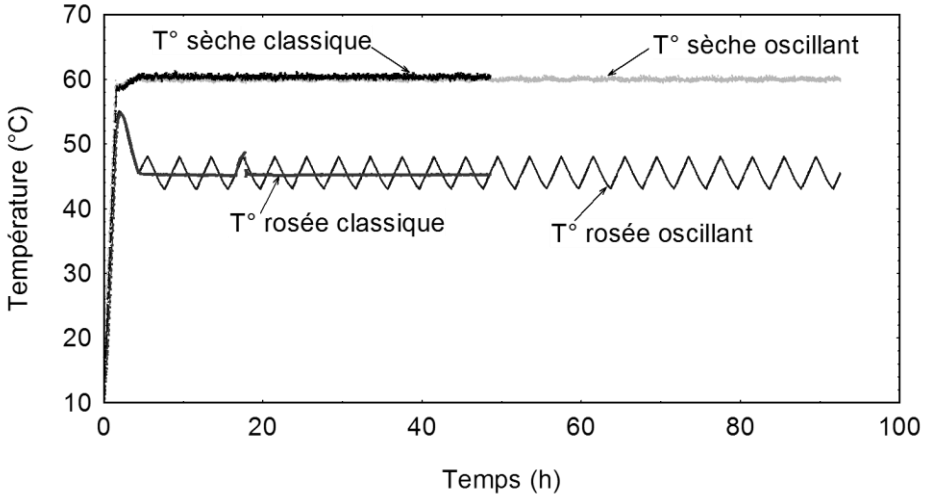


Poutre cantilever – quartier (10mm)

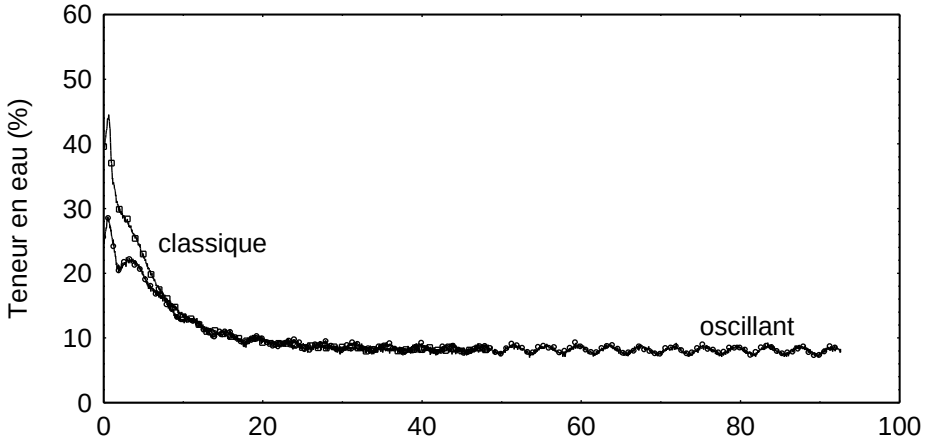
Figure D.2b. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°A.1. [Séchage classique : T° sèche = 59,2°C, X_{eq} = 7,4% ; séchage oscillant : T° sèche = 59,4°C, X_{eq} = 7,6%, ΔX_{eq} = 1,9%, période = 4 heures].

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%) dosse	X_i(%) quartier	X_f(%) dosse	X_f(%) quartier
Séchage classique							
60,3	45,2	7,0		FW[3]: 45,97	42,84	8,01	8,41
				PC[4]: 43,47	46,61	8,78[5]	9,41[5]
Séchage oscillant (période 4 heures)							
60,0	48,0 - 43,0	7,3	1,8	FW : 44,66	41,52	7,77	7,73
				PC : 43,87	47,24	8,36[5]	8,48[5]

1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ; 4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau hors encastrement

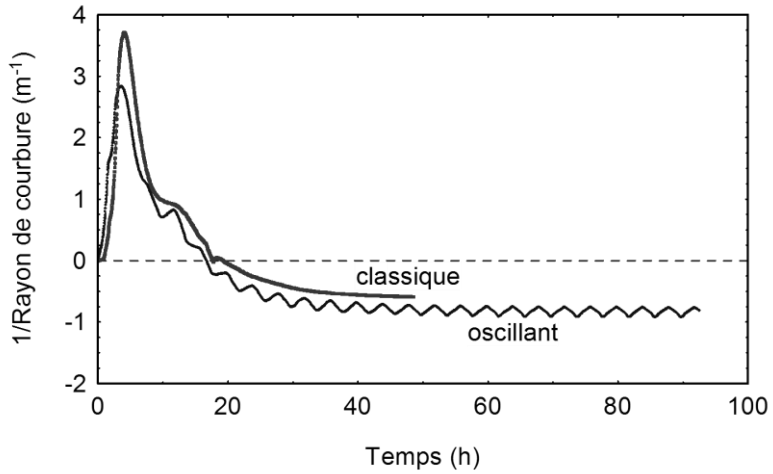


Conditions expérimentales

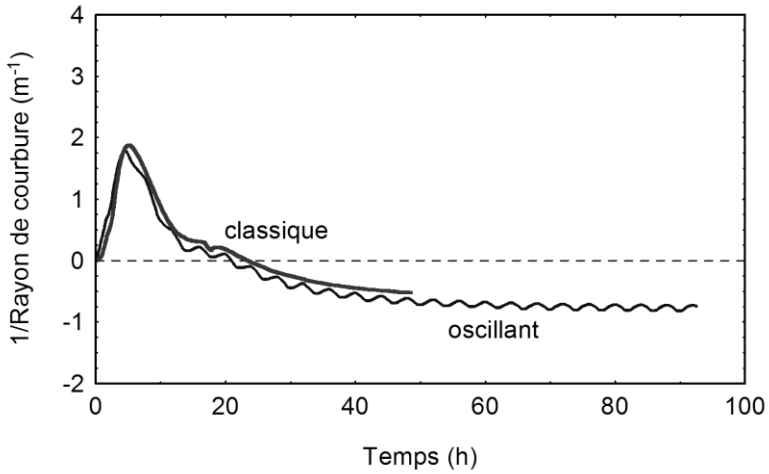


Cinétique de séchage – dosse

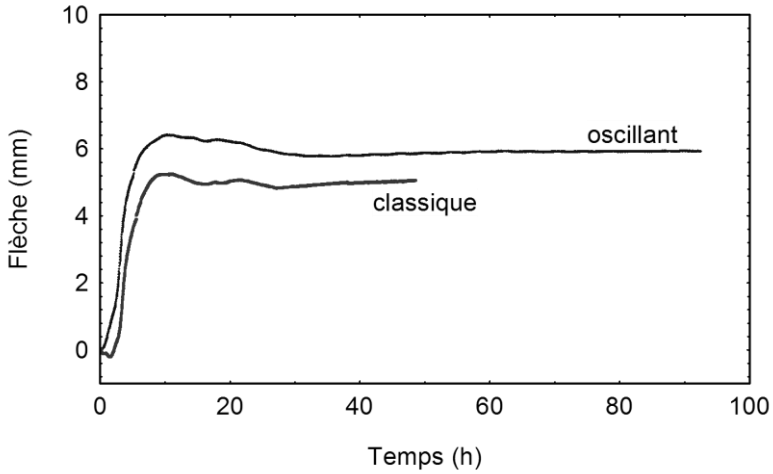
Figure D.2c. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°A.2. [Séchage classique : T° sèche = 60,3°C, X_{eq} = 7,0% ; séchage oscillant : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 7,3%, ΔX_{eq} = 1,8%, période = 4 heures].



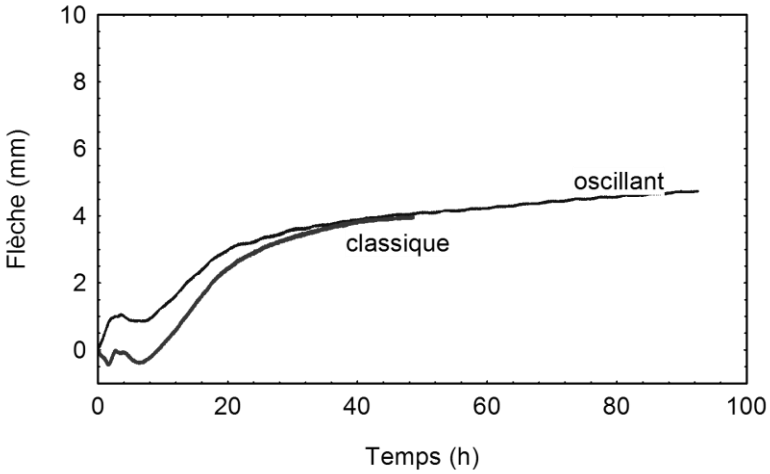
Flying wood – dosse (5mm)



Flying wood –quartier (5mm)



Poutre cantilever – dosse (10mm)



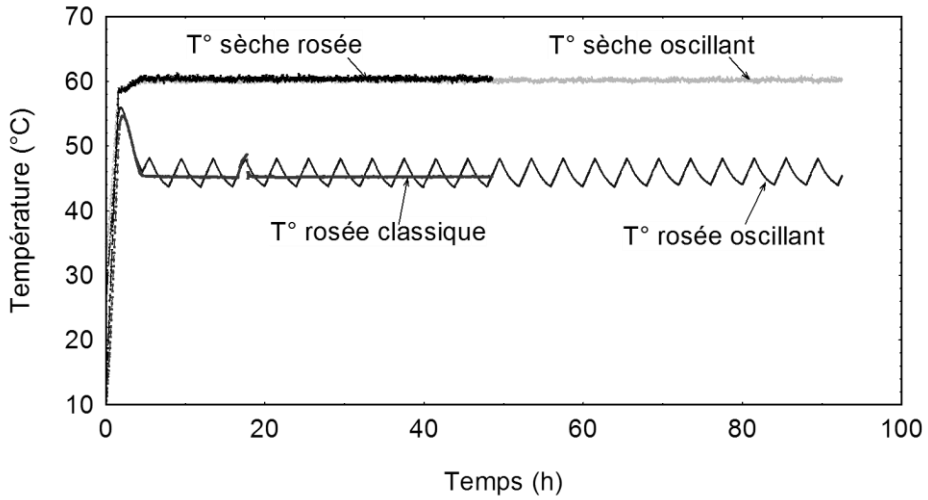
Poutre cantilever – quartier (10mm)

Figure D.2d. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°A.2. [Séchage classique : T° sèche = 60,3°C, X_{eq} = 7,0% ; séchage oscillant : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 7,3%, ΔX_{eq} = 1,8%, période = 4 heures].

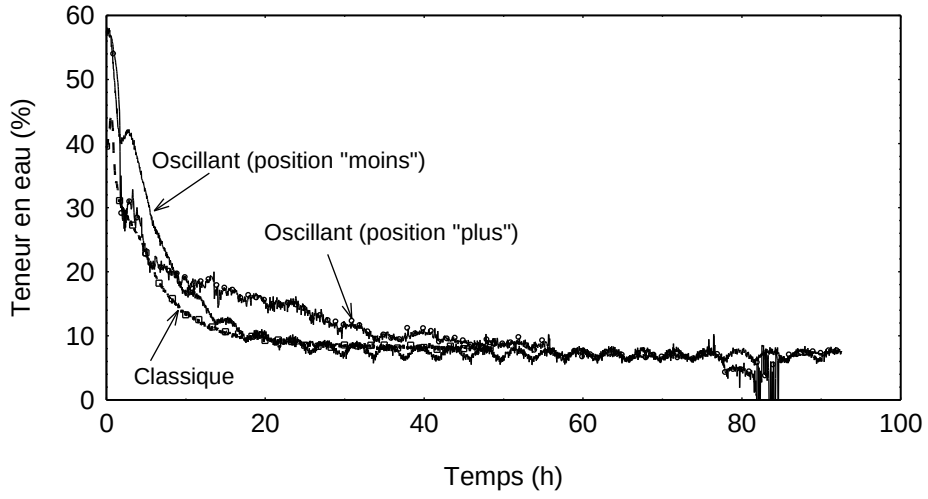
D.3. Campagne n°A.2bis

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%) « moins »[6]	X_i(%) « plus »[7]	X_f(%) « moins »[6]	X_f(%) « plus »[7]
Séchage classique							
60,3	45,2	7,0		FW[3]:	45,97		8,01
				PC[4]:	43,47		8,78[5]
Séchage oscillant (période 4 heures)							
60,1	47,9 - 43,7	7,4	1,5	FW : 56,79	57,55	7,38	7,46
				PC : 62,59	60,62	7,95[5]	7,99[5]

1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ; 4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau hors encastrement ; 6 : échantillon en position « moins »;7 : échantillon en position « plus » (habituelle)



Conditions expérimentales



Cinétique de séchage – dosse 5 mm

Figure D.3a. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – effet de la courbure de cernes pour un échantillon sur dosse. [Séchage classique : T° sèche = 60,3°C, X_{eq} = 7,0% ; séchage oscillant : T° sèche = 60,1°C, X_{eq} = 7,4%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 4 heures].

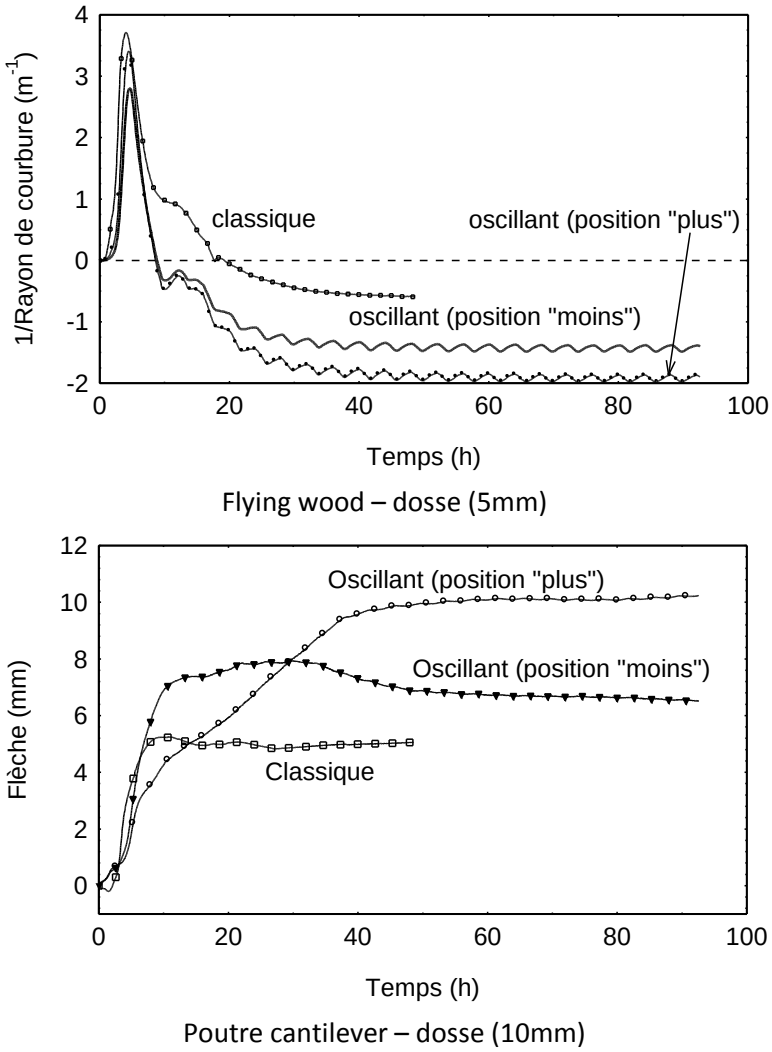


Figure D.3b. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – effetde la courbure de cernes pour un échantillon sur dosse. [Séchage classique : T° sèche = 60,3°C, X_{eq} = 7,0% ; séchage oscillant : T° sèche = 60,1°C, X_{eq} = 7,4%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 4 heures].

Cette campagne a été destinée à étudier l'effet de la courbure de cernes sur des échantillons sur dosse. La consigne du séchage oscillant ici testé a été la même que celle du séchage oscillant de la campagne n°A.2. En conduite oscillante, deux positions de cernes dans l'épaisseur des échantillons ont été testées : la position « plus » (habituelle) et la position « moins », tel qu'illustré dans la Figure 4.10. Le séchage oscillant a été perturbé par quelques difficultés avec une des jauges de contrainte, nous privant de certaines données de cinétique pour l'échantillon du flying wood en position « plus ».

La **teneur en eau** d'équilibre pour le séchage oscillant a été de 7,4%. L'amplitude des oscillations de teneur en eau a été de 1,5% alors que la consigne indiquait 2%. Au début du séchage oscillant la teneur en eau moyenne était de 59,4% et en fin de séchage elle était de 7,7%. Les échantillons du séchage classique avaient une teneur en eau initiale moyenne plus faible (44,7%). En conséquence, la **cinétique de séchage** est plus lente en séchage oscillant. L'échantillon en position « moins » semble entrer en seconde phase de séchage plus tardivement que celui de la conduite constante. Cela se manifeste également sur l'évolution de la courbure du flying wood (Figure 4.16a), l'échantillon de la conduite constante se courbant avant ceux de la conduite oscillante.

D.4. Campagnes n°2 et n°3

La **table de séchage** classique de référence est similaire à celle de la campagne n°1, mais la durée du deuxième segment a été triplée passant de 0,5 heure à 1,5 heure (tableau D.4a), cela pour permettre au matériel de mieux respecter la consigne. Avec ces conditions, la teneur en eau d'équilibre (X_{eq}) visée était de 8%.

Tableau D.4a. Table de séchage pour la conduite classique de référence n°2.

Etape	Durée (h)	T° sèche (°C)	T° rosée (°C)	T° humide (°C)	X_{eq} (%)
1	Rampe de 1,5	60,0	59,5	59,5	22,5
2	Rampe de 1,5	60,0	48,0	49,2	8,2
3	Palier jusqu'à la fin du séchage	60,0	48,0 (50,0 – 46,0)*	49,2 (50,9 – 47,5)*	8,2 (9,0 – 7,3)*

*valeurs pour la conduite oscillante

Chaque campagne comportait trois séchages, soit un séchage classique de référence, un séchage oscillant avec une période de 2 heures et un séchage oscillant avec une période de 8 heures. Une campagne a été consacrée aux échantillons sur dosse (campagne n°2) et l'autre aux échantillons sur quartier (campagne n°3). Dans chaque séchage, les deux épaisseurs ont été testées simultanément.

Grâce à l'outil numérique *TransPore* différentes configurations de conduites oscillantes ont pu être testées tout en prenant compte des limitations du matériel à utiliser pour les essais. Il a été décidé de commencer les oscillations par une phase d'adsorption. En effet, lors des premiers tests commençant par une phase de désorption nous avons constaté une cinétique de séchage très rapide des échantillons. Afin de préserver le potentiel hydrique, la cinétique a été freinée par une phase d'adsorption. Les conduites oscillantes proposées ont une amplitude ΔX_{eq} de 2%. Les Figure 4.7c et 4.7d décrivent l'atténuation des oscillations de la teneur en eau pour les deux périodes et les deux épaisseurs retenues, soit 2 et 8 heures, et 10 mm et 20 mm.

Pour ces essais, il fallait un **échantillonnage** plus large puisque l'on étudiait deux périodes et deux épaisseurs différents. En raison de la longueur des billons (environ 1,2 m), deux planches de chaque débit ont été découpées, l'une de 30 mm d'épaisseur pour les échantillons de séchage sous charge et l'autre de 20 mm d'épaisseur pour les échantillons de séchage dissymétrique. L'annexe C.1 montre le plan de découpe des échantillons.

Campagne n°2 – échantillons sur dosse

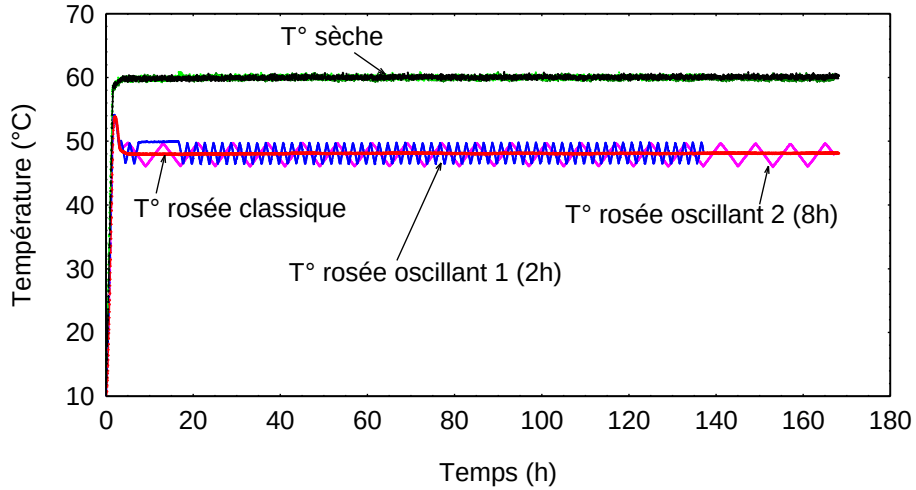
Cette campagne n'aura pas été épargnée de quelques difficultés expérimentales. Pendant le séchage oscillant de 2 heures, un problème de régulation s'est produit après 7,5 heures de séchage, soit après 2 cycles d'oscillations. La température de rosée est restée à 49,7°C pendant 9 heures. Le problème a été réglé et les oscillations ont pu continuer. Nous avons également constaté une teneur en eau initiale plus faible pour le séchage oscillant de 8 heures. Entre celui-ci et le séchage classique il pouvait y avoir deux semaines de décalage, ce qui explique cette perte d'humidité malgré les soins apportés pour le stockage des échantillons. Il convient aussi de signaler quelques problèmes avec les jauges de contrainte. La jauge de contrainte utilisée pour les échantillons fins (5 mm en flying wood) donne des oscillations supérieures à celle de la consigne, raison pour laquelle les courbes de cinétiques respectives sont à prendre avec précaution. Pour l'échantillon épais (10 mm en flying wood) séché avec des oscillations de 8 heures, les données sont inexploitables car il y a eu un dysfonctionnement de la jauge de contrainte. Par conséquent, il est difficile d'avancer de conclusions sur l'effet de ces oscillations sur la cinétique pour ce type d'échantillon. Enfin, les résultats de la poutre cantilever pour les échantillons épais (20 mm) sont surprenants. D'après les courbes, au bout de 10 heures de séchage les échantillons se redressent, la flèche diminuant, puis à partir de 40 heures les flèches augmentent à nouveau. Le comportement des premières 40 heures reste difficilement explicable. Cela nous empêche de dresser de conclusions sur l'effet de la période pour le séchage sous charge pour ce type d'échantillon.

Le tableau de **conditions expérimentales et teneurs en eau** montre que la teneur en eau d'équilibre moyenne obtenue dans les trois séchages (8,2%, 8,4% et 8,2% respectivement) est très proche de la consigne (8,1%). L'amplitude des oscillations de la teneur en eau (1,5% et 1,6% respectivement) est plus faible que celle de la consigne (2%). La teneur en eau initiale des échantillons est en moyenne 77,2% pour le séchage classique, 75,9% pour le séchage oscillant de 2 heures et 70,5% pour le séchage oscillant de 8 heures. A la fin du séchage, les échantillons ont une teneur en eau moyenne de 8,5%, 9,1% et 8,6% respectivement. Les séchages oscillants ont été arrêtés au milieu d'une phase de désorption à une teneur en eau d'équilibre égale à celle du séchage classique.

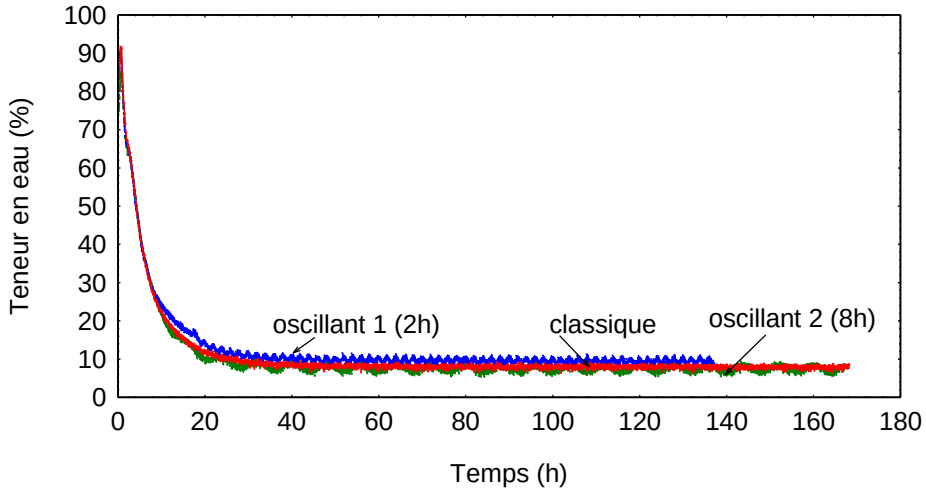
La **cinétique de séchage** de l'échantillon fin (5 mm en flying wood) ne semble pas affectée par les oscillations de teneur en eau. La cinétique de l'échantillon épais (10 mm en flying wood) est évidemment plus lente. Nous ne pouvons pas avancer de conclusions sur l'effet de la période, mais un léger ralentissement a été constaté pour les oscillations de 2 heures par rapport au séchage classique.

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%)		X_f(%)	
				épais	fin	épais	fin
Séchage classique							
60,0	48,1	8,2		FW[3]: 78,53	81,73	8,32	8,58
				PC[4]: 74,14	74,41	8,50[5]	8,52[5]
Séchage oscillant n°1 (période 2 heures)							
59,9	49,7– 46,4	8,4	1,5	FW : 72,36	80,49	8,60	8,90
				PC : 78,04	72,64	9,46[5]	9,28[5]
Séchage oscillant n°2 (période 8 heures)							
60,0	49,7 - 46,1	8,2	1,6	FW : 75,99	75,15	8,41	8,48
				PC : 67,01	63,94	8,73[5]	8,76[5]

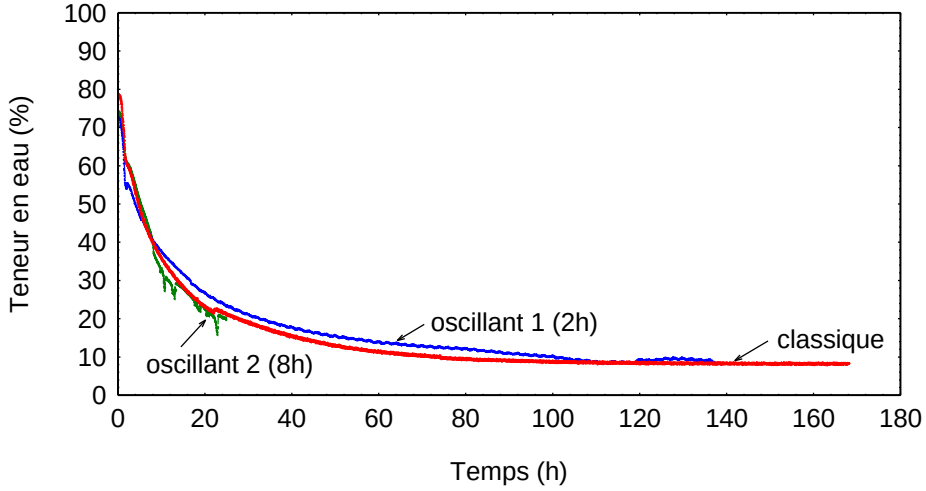
1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ;
4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau hors encastrement



Conditions expérimentales

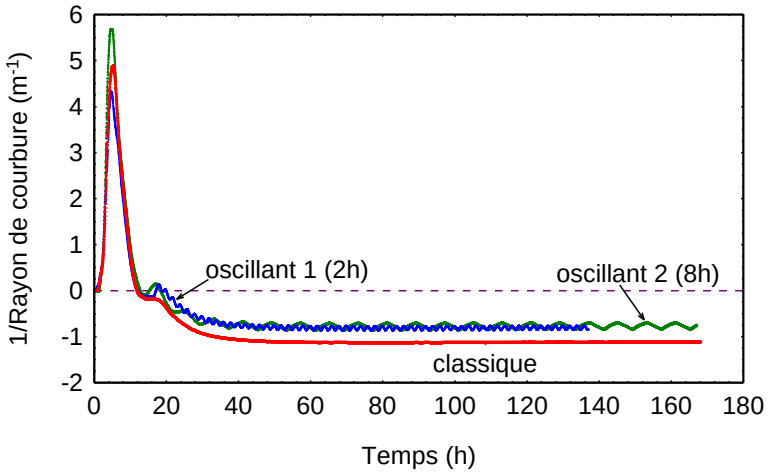


Cinétique de séchage – dosse 5 mm

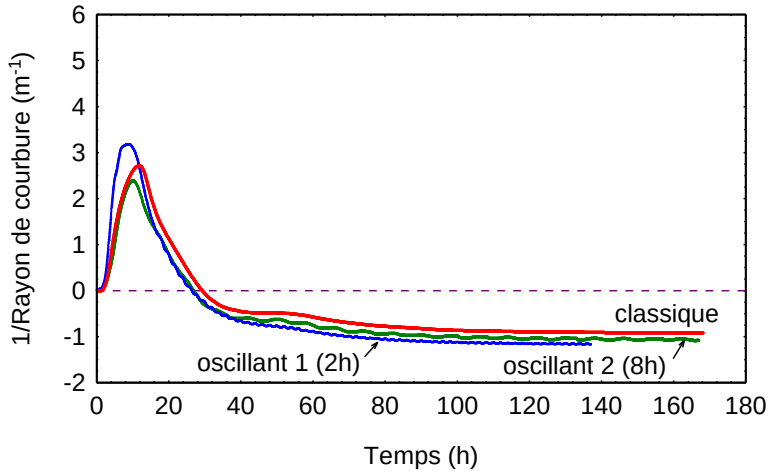


Cinétique de séchage – dosse 10 mm

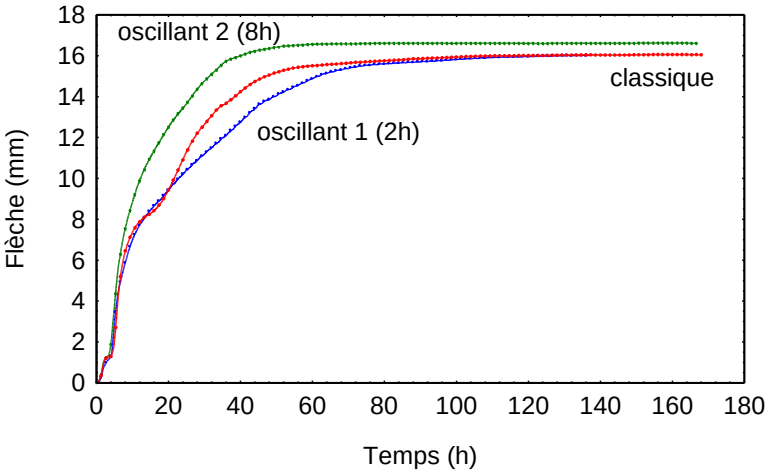
Figure D.4a. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°2. [Séchage classique : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,2% ; séchage oscillant 1 : T° sèche = 59,9°C, X_{eq} = 8,4%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 2 heures ; séchage oscillant 2 : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,2%, ΔX_{eq} = 1,6%, période = 8 heures].



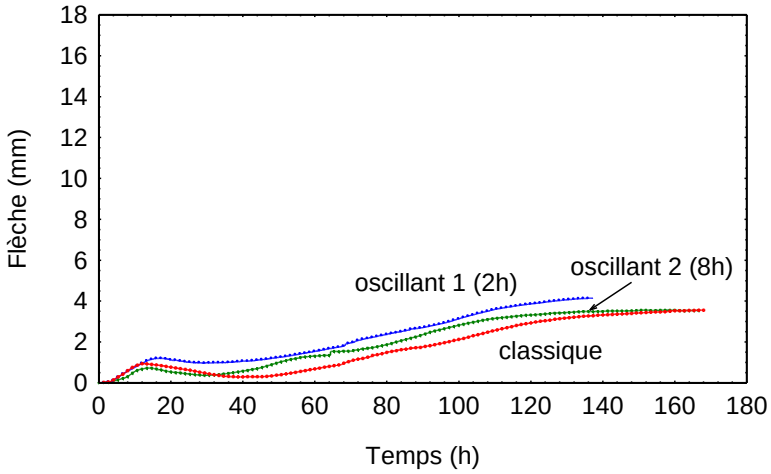
Flying wood – dosse (5 mm)



Flying wood – dosse (10 mm)



Poutre cantilever – dosse (10 mm)



Poutre cantilever – dosse (20 mm)

Figure D.4b. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°2. [Séchage classique : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,2% ; séchage oscillant 1 : T° sèche = 59,9°C, X_{eq} = 8,4%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 2 heures ; séchage oscillant 2 : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,2%, ΔX_{eq} = 1,6%, période = 8 heures].

- **Campagne n°3 – échantillons sur quartier**

Cette campagne comporte exceptionnellement deux séchages classiques. Un problème de fixation des échantillons poutre cantilever nous a en effet obligé à répéter l'essai uniquement pour ce dispositif. A partir de ce nouveau séchage l'encastrement type b (Figure 4.8) a été utilisé, la charge étant appliquée côté cœur et non plus côté écorce. Cela devait limiter le problème de rotation autour de l'encastrement évoqué auparavant.

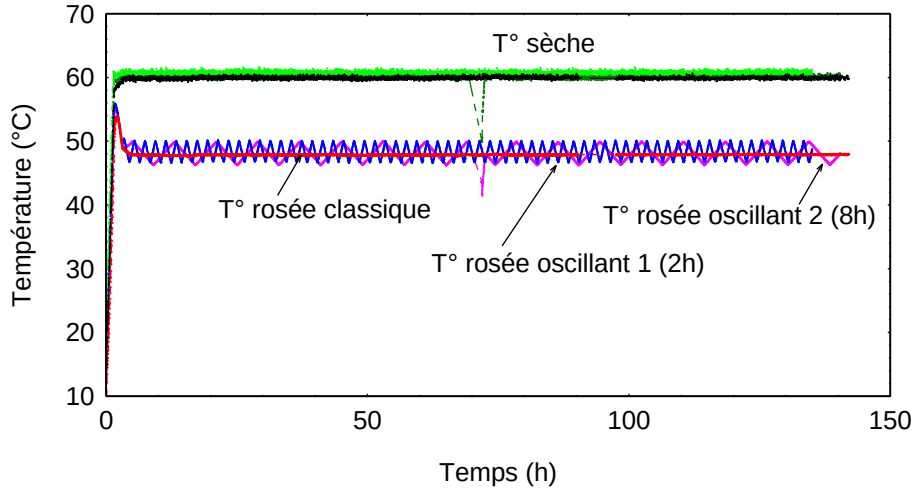
Malgré le soin apporté pendant les essais, quelques difficultés expérimentales ont été rencontrées. Pendant le séchage oscillant de 8 heures, une coupure d'électricité s'est produite au bout de 70 heures d'essai. Le contrôleur du séchoir s'est arrêté pendant 2,5 heures provoquant une chute de température (la température sèche est tombée à 50°C et la température de rosée à 41,3°C). L'acquisition des données s'est aussi interrompue pendant ce laps de temps. Le contrôleur a été reprogrammé pour atteindre 60°C de température sèche et 48°C de température de rosée et reprendre les oscillations.

La **teneur en eau** d'équilibre pour les séchages classiques est égale à 8,2% (flying wood) et 8,5% (poutre cantilever). Pour les séchages oscillants elle s'établit à 8,0% et 8,3% respectivement, avec une amplitude d'oscillation de la teneur en eau de 1,5% et 1,6%, valeurs en-dessous des 2% de consigne. La teneur en eau initiale moyenne est égale à 56,3% et 53,4% pour les séchages classiques, 58,2% pour le séchage oscillant de 2 heures, et 59,9% pour le séchage oscillant de 8 heures. A la fin de séchage, la teneur en eau moyenne était de 9,1% pour les deux séchages classiques, 9,5% et 9,4% pour les séchages oscillants de 2 et 8 heures respectivement. Les séchages oscillants ont été arrêtés au milieu d'une phase d'adsorption à une teneur en eau d'équilibre égale à celle du séchage classique.

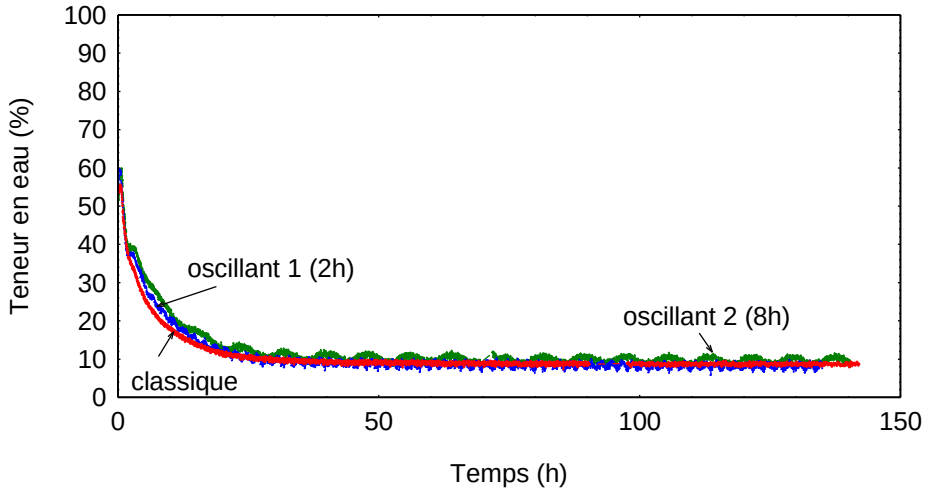
Les **cinétiques de séchage** sont très similaires pour les conduites oscillantes/classique. Bien que de petites différences de cinétique s'expriment d'un échantillon à l'autre, il est difficile de dire si celles-ci viennent du type de conduite (oscillante/classique), d'une imprécision de la mesure de la masse, ou de la variabilité des propriétés de transfert d'un matériau d'origine biologique.

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%)		X_f(%)	
				épais	fin	épais	fin
Séchage classique							
59,9	47,9	8,2		FW[3]: 57,49	55,06	9,44	8,75
59,5	48,2	8,5		PC[4]: 53,89	52,86	8,89[5]	9,26[5]
Séchage oscillant n°1 (période 2 heures)							
60,7	50,0 – 46,6	8,0	1,5	FW : 61,52	56,21	9,31	8,51
				PC : 59,79	55,24	10,85[5]	9,27[5]
Séchage oscillantn°2 (période 8 heures)							
60,0	49,9 - 46,3	8,3	1,6	FW : 56,40	53,34	9,07	8,62
				PC : 58,85	59,22	10,34[5]	9,54[5]

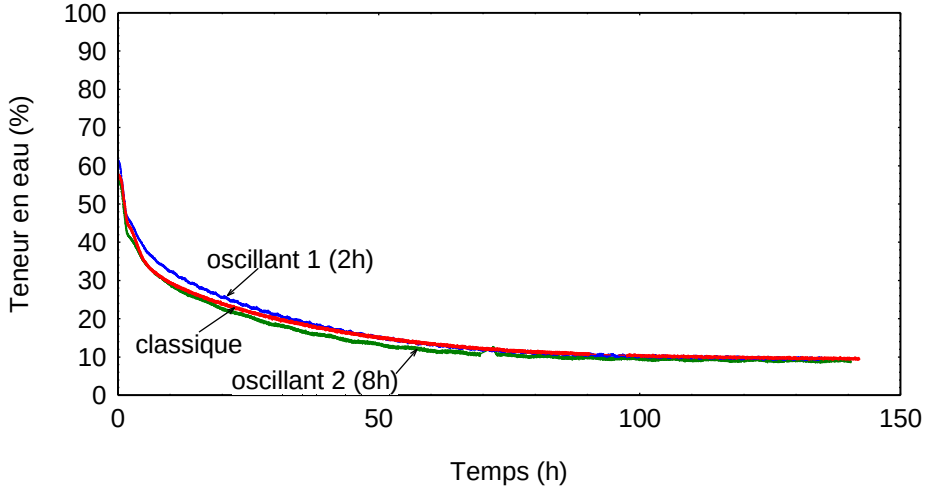
1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ;
4 : poutre cantilever ; 5 : teneur en eau hors encastrement



Conditions expérimentales

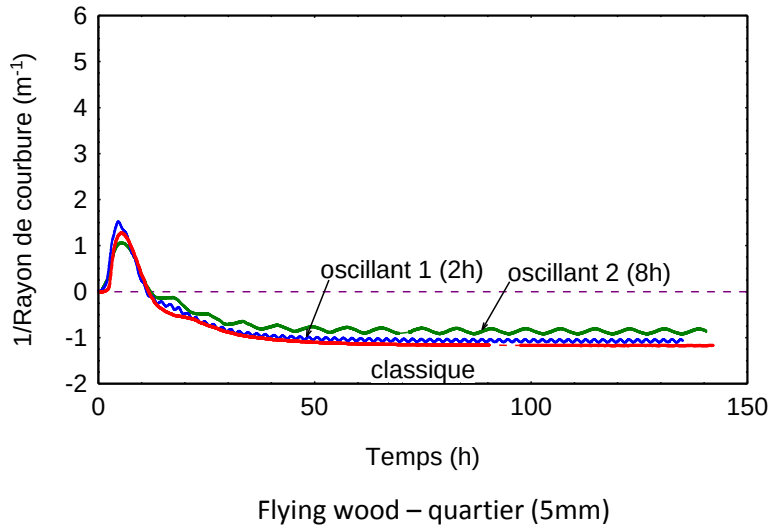


Cinétique de séchage – quartier 5 mm

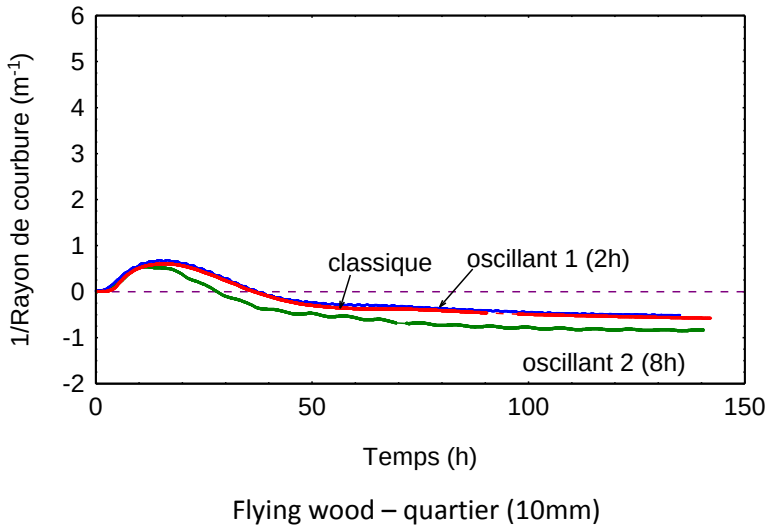


Cinétique de séchage – quartier 10 mm

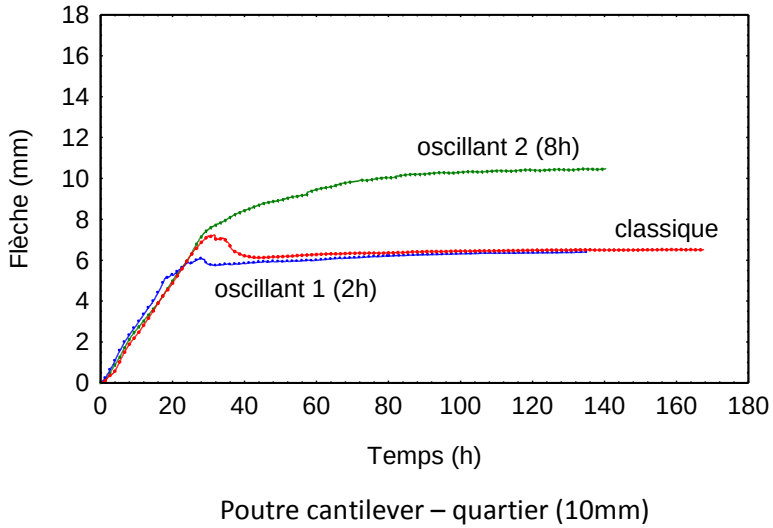
Figure D.4c. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°3. [Séchage classique : T° sèche = 59,9°C, X_{eq} = 8,2% ; séchage oscillant 1 : T° sèche = 60,7°C, X_{eq} = 8,0%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 2 heures ; séchage oscillant 2 : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,3%, ΔX_{eq} = 1,6%, période = 8 heures].



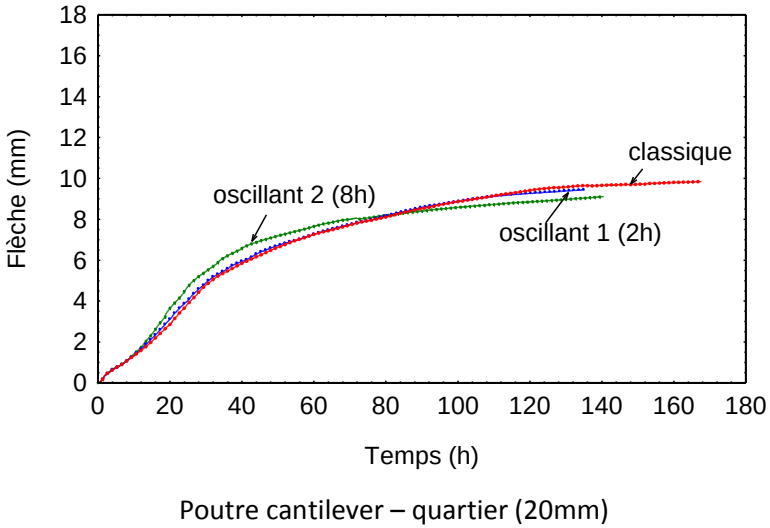
Flying wood – quartier (5mm)



Flying wood – quartier (10mm)



Poutre cantilever – quartier (10mm)



Poutre cantilever – quartier (20mm)

Figure D.4d. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°3. [Séchage classique : T° sèche = 59,5°C, X_{eq} = 8,5% ; séchage oscillant 1 : T° sèche = 60,7°C, X_{eq} = 8,0%, ΔX_{eq} = 1,5%, période = 2 heures ; séchage oscillant 2 : T° sèche = 60°C, X_{eq} = 8,3%, ΔX_{eq} = 1,6%, période = 8 heures].

D.5. Campagne n°4 – essais complémentaires de séchage sous charge

Afin de compléter les résultats de flying wood, nous avons décidé de mener une nouvelle campagne d'essais avec un autre dispositif pour le séchage sous charge, soit la flexion trois points. Cette nouvelle campagne n°4 a été réalisée selon les conditions de la campagne n°1 afin de mieux comprendre les bons résultats obtenus. Ainsi, la teneur en eau d'équilibre doit être proche de 8,1%, avec une amplitude de 3% et une période de 3 heures pour le séchage oscillant.

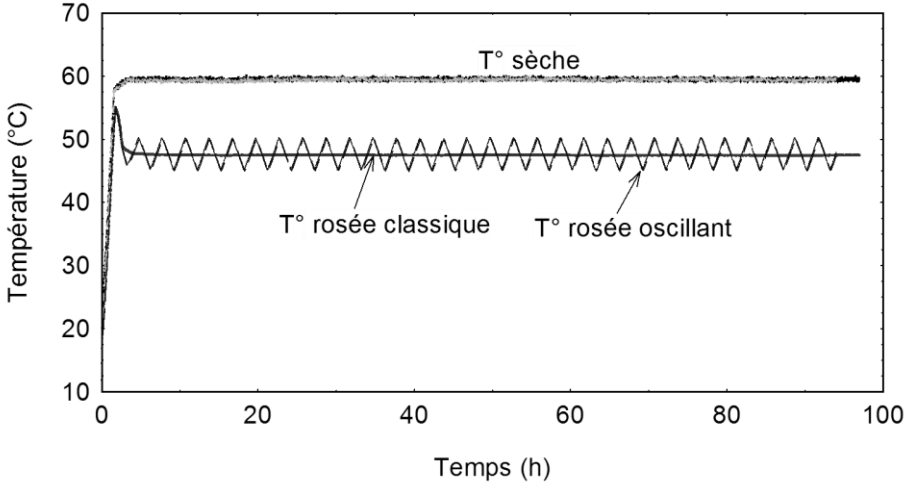
Le **matériel végétal** utilisé dans cette partie a été fourni par une scierie (*Bois et Performances*), situé dans les Vosges (88). Cela a été décidé afin d'obtenir des planches découpées dans des billons à fort diamètre (au dessus de 60 cm), et par conséquent des échantillons bien orientés, notamment ceux sur dosse pour lesquels on cherchait une faible courbure de cernes. Deux planches, l'une débitée sur dosse et l'autre débitée sur quartier, ont été découpées dans deux grumes différentes de 60 cm de diamètre et 2 m de longueur provenant d'arbres fraîchement abattus dans le département de Meurthe et Moselle (54).Les planches faisant 35 mm d'épaisseur et 200 mm de largeur ont été coupées en deux morceaux de 1 m de long et enveloppés dans une bâche plastique pour éviter qu'elles ne sèchent. Des échantillons pour le flying wood et pour la flexion trois points ont été découpés selon le schéma présenté dans l'Annexe C.2. Une fois découpés, les échantillons ont été mis dans des sacs en plastique et placés dans un réfrigérateur jusqu'au moment de l'essai.

La **teneur en eau** d'équilibre est de 8,1% pour le séchage classique et de 8,4% pour le séchage oscillant. L'amplitude de la teneur en eau d'équilibre est de 2,3%, valeur au-dessous de la consigne (3%). Il est probable qu'une différence similaire ait pu être observée pour la campagne n°1, car le thermocouple mesurant la température humide auprès des échantillons n'était pas encore en place. La teneur en eau initiale est de 84,3% pour le séchage classique et 86,0% pour le séchage oscillant. En fin de séchage, la teneur en eau est de 9,2% et 9,4% respectivement.

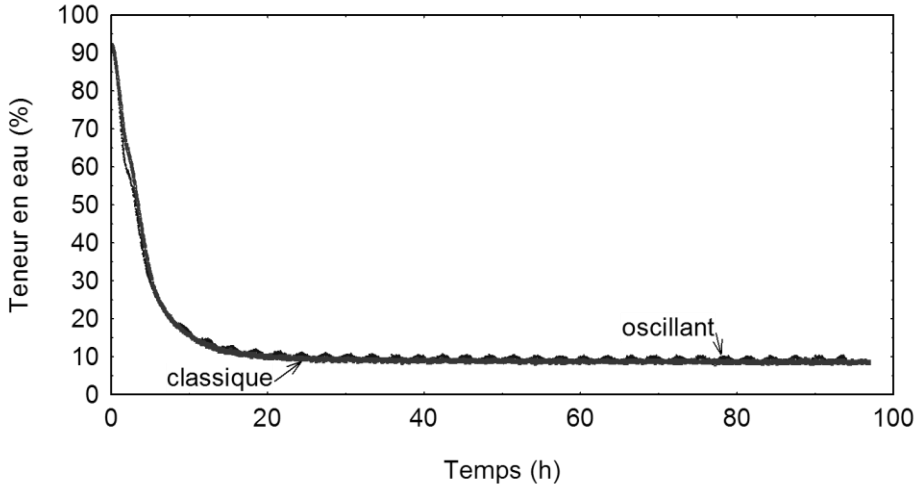
La **réponse mécanique aux oscillations en teneur en eau** est très intéressante. En flying wood l'amélioration, exprimée par une courbure finale moins prononcée qu'en séchage classique, est obtenue uniquement pour l'échantillon sur quartier. Pour l'échantillon sur dosse, la courbure est plus prononcée pour le séchage oscillant. Dans les deux cas et pour les deux séchages on observe clairement une inversion de contraintes exprimée par l'inversion de la courbure, alors que lors de la campagne n°1 (Figure 4.11a) l'échantillon sur dosse ayant subi un séchage oscillant ne présentait pas d'inversion de sa courbure. La teneur en eau initiale étant très élevée, la première phase de séchage est très visible (courbure nulle en début de séchage).

TS[1] (°C)	TR[2] (°C)	X_{eq} (%)	ΔX_{eq} (%)	X_i(%)		X_f(%)	
				dosse	quartier	dosse	quartier
Séchage classique							
59,6	47,4	8,1		FW[3]: 92,19	80,38	8,78	8,65
				F3P[4]: 82,96	81,77	9,60	9,67
Séchage oscillant (période 3 heures)							
59,4	50,1 – 45,0	8,4	2,3	FW : 91,39	87,63	9,09	8,95
				F3P : 82,81	82,27	9,77	9,73

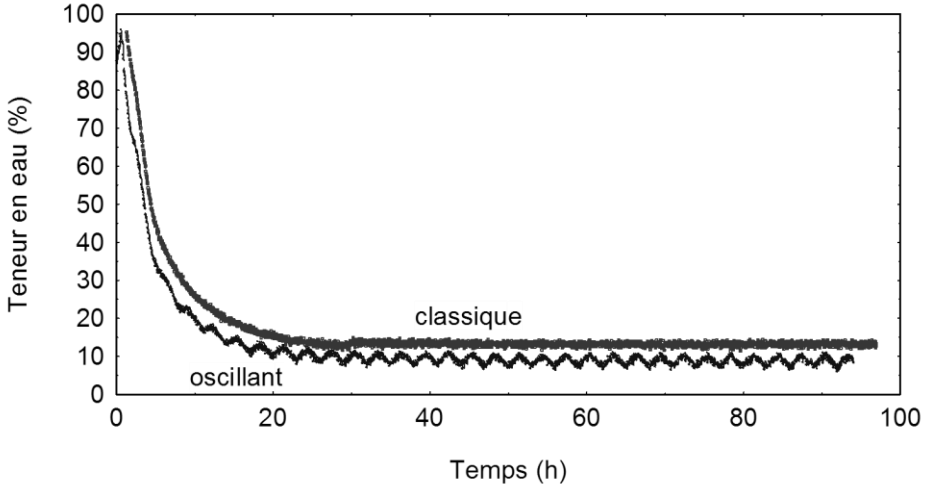
1 : température sèche ; 2 : température de rosée (à côté de l'échantillon) ; 3 : flying wood ; 4 : flexion trois points



Conditions expérimentales

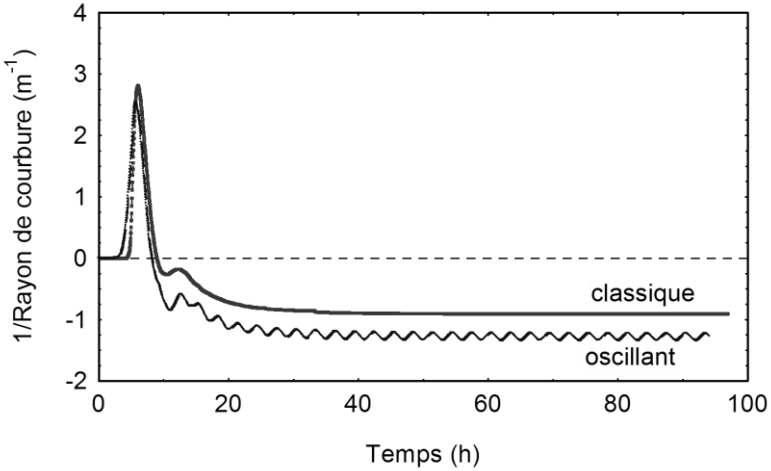


Cinétique de séchage – dosse

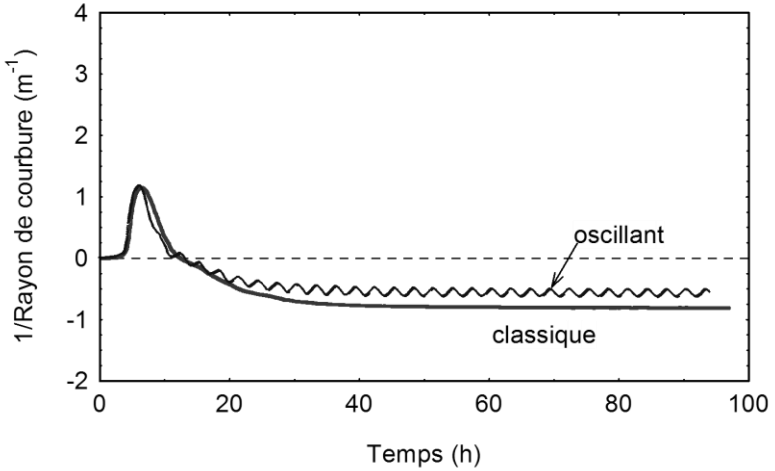


Cinétique de séchage – quartier

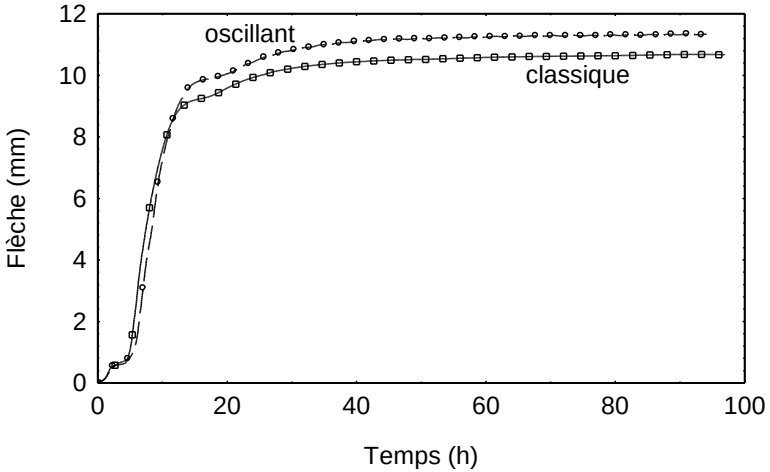
Figure D.5a. Conditions de séchage et cinétiques de séchage – campagne n°4. [Séchage classique : T° sèche = 59,6°C, X_{eq} = 8,1% ; séchage oscillant : T° sèche = 59,4°C, X_{eq} = 8,4%, ΔX_{eq} = 2,3%, période = 3 heures].



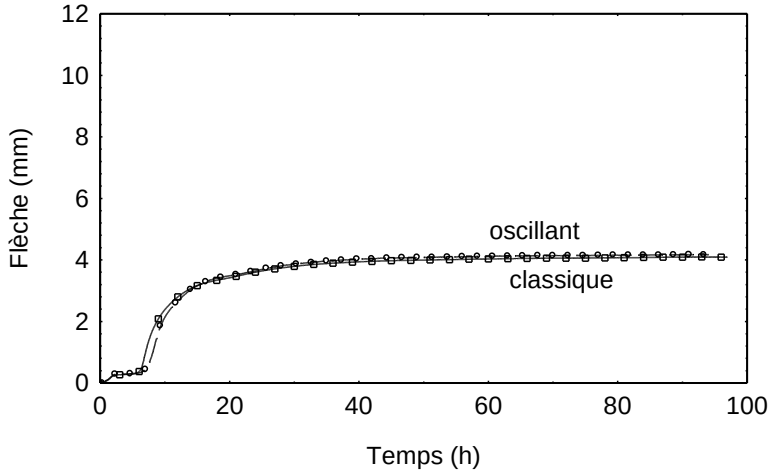
Flying wood – dosse (5mm)



Flying wood –quartier (5mm)



Flexion trois points – dosse (10mm)



Flexion trois points – quartier (10mm)

Figure D.5b. Réponse mécanique aux oscillations de la teneur en eau – campagne n°4. [Séchage classique : T° sèche = 59,6°C, X_{eq} = 8,1% ; séchage oscillant : T° sèche = 59,4°C, X_{eq} = 8,4%, ΔX_{eq} = 2,3%, période = 3 heures].

E. Modification du modèle de comportement mécanosorptif

Devant la difficulté d'identifier les paramètres du modèle mécanosorptif nous proposons une formulation simple faisant intervenir seulement trois paramètres phénoménologiques, à travers un élément de Kelvin (partie recouvrable) et un amortisseur (partie irrécouvrable) placés en série :

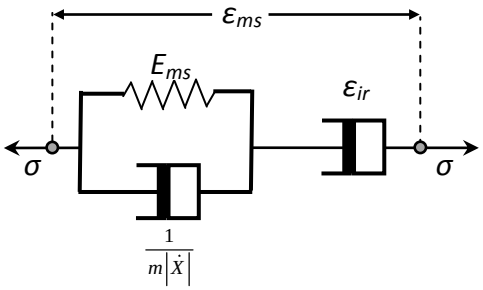


Figure E.1. Modèle de comportement mécanosorptif avec un élément de Kelvin (partie recouvrable) et un amortisseur (partie irrécouvrable) en série.

La formulation de ces deux éléments s'écrit de la façon suivante :

$$\dot{\varepsilon}_{ms} = \left(\left(m_1 + m_2\right)\sigma - m_2 E_{ms}\left(\varepsilon_{ms} - \varepsilon_{ir}\right)\right)\cdot\left|\dot{X}\right|$$

où $\dot{\varepsilon}_{ms}$ est le taux de déformation mécanosorptive, m_1 et m_2 sont des coefficients mécanosorptifs, σ est la contrainte, E_{ms} la limite mécanosorptive, ε_{ms} la déformation mécanosorptive, ε_{ir} la déformation irrécouvrable et $\dot{X}$ le taux de variation de la teneur en eau. Avec :

$$\dot{\varepsilon}_{ir} = m_1 \cdot \sigma \cdot \left|\dot{X}\right|$$

F. Essais au DMA sur un barreau de colle époxy bi – composant

Identification de la température de transition vitreuse

- Dimensions du barreau : 48,95 mm x 3,79 mm x 2,48 mm
- Mode de fixation : poutre cantilever
- Fréquence : 1 Hz
- Température : 35°C à 100°C
- Taux d'augmentation de la température : 1°C/min

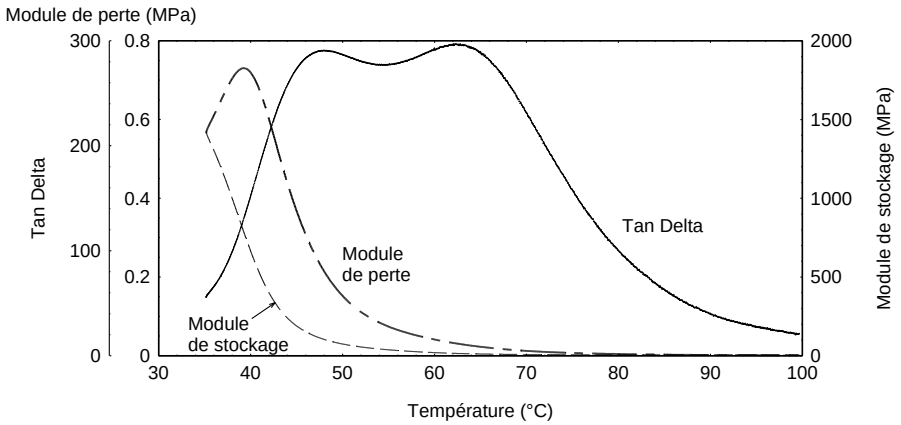
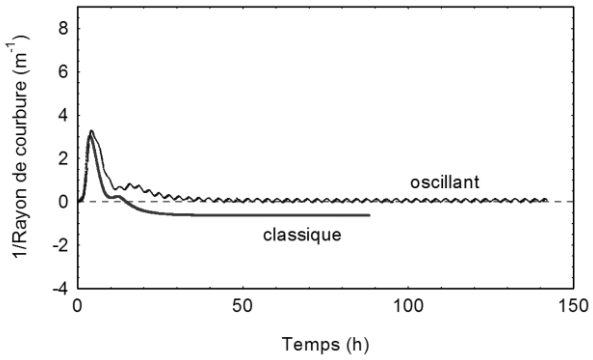


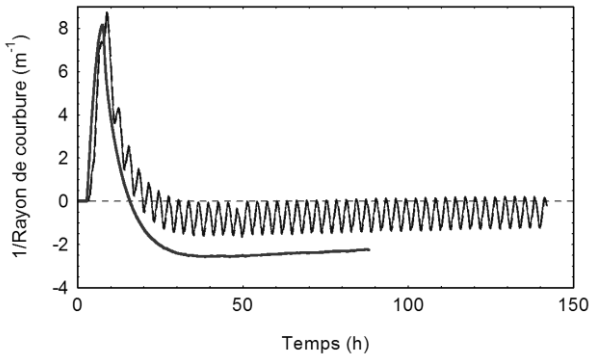
Figure E.1. Température de transition vitreuse pour une colle bi – composant.

Dans la Figure E.1. on y aperçoit clairement deux pics de transition vitreuse car il s'agit d'une colle bi – composant, le pic à 48°C correspond au durcisseur tandis que celui à 62°C correspond à la résine époxydique (bisphenol-A-épichlorhydrine). Nos essais ont été réalisés à 60°C, cela étant suffisant pour qu'une partie du mélange résine – durcisseur atteint la température de transition vitreuse (à 48°C) mais pas le reste (à 62°C). Toutefois, la rigidité de la colle indiquée par le fabricant est de 14 MPa (à 21°C), valeur trop faible pour avoir un effet significatif sur la rigidité de l'échantillon (>300 MPa).

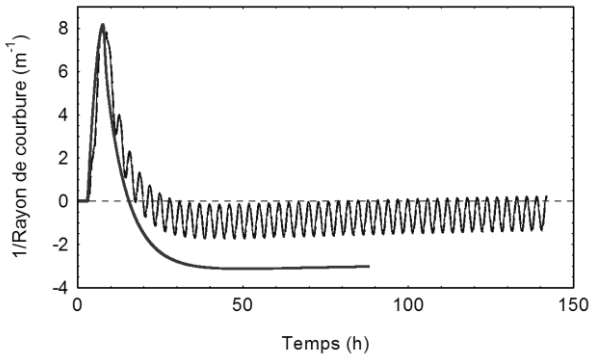
G. Confrontation des résultats expérimentaux avec la simulation numérique – campagne n°1



Résultats expérimentaux



Simulation avec données climatiques expérimentales



Simulation avec données climatiques lissées

Figure F.1. Confrontation expérimentale – simulation avec *ms* =100GPa^{-1}, E_{ms} = 60MPa, ε_{ir} = 50GPa^{-1} – campagne n°1.

H. Caractérisation expérimentale des paramètres mécanosorptifs – méthodologies explorées

Pour la caractérisation expérimentale des paramètres mécanosorptifs, nous avons envisagé d'utiliser un jeu de trois échantillons de faible épaisseur (selon la direction longitudinale) afin de minimiser le gradient d'humidité et de retrait, et provenant d'une même génératrice. Ces échantillons devaient être séchés en conduite oscillante. Parmi les trois échantillons, le premier serait dédié à la mesure du retrait libre tandis que les autres seraient sollicités : un en traction et l'autre en compression. Un quatrième échantillon pourrait s'ajouter pour suivre la cinétique de séchage.

Nos efforts se sont concentrés dans la conception d'une platine d'essai de traction et compression pouvant opérer à l'intérieur du séchoir de AgroParisTech – Engref. En raison des conditions climatiques dans le séchoir particulièrement au début du séchage (humidité relative de l'air très élevée et température sèche égale à 60°C°) et l'ordre de grandeur de déplacements à mesurer, le choix des capteurs de déplacement était assez restreint.

Dans un premier temps nous nous sommes intéressés à la **mesure du déplacement sans contact**, pour éviter des perturbations dues au frottement et préserver l'homogénéité des conditions climatiques autour de l'échantillon. Deux capteurs numériques à fibre optique ont été testés sans résultats concluants. Le premier était un capteur Keyence Série FS-V30 muni de deux fibres optiques : l'une émet un rayon de lumière sur une cible et l'autre reçoit la lumière réfléchie par la cible. Ici, l'idée était de placer deux cibles réfléchissantes sur un échantillon sollicité en traction ou en compression. Le balayage de l'échantillon donne deux pics d'intensité lumineuse correspondant aux cibles réfléchissantes. Une succession de balayages tout au long du séchage devait permettre de mesurer l'écartement ou rapprochement des cibles, et ainsi calculer les déformations (Figure G.1). Toutefois, la précision attendue pour mesurer l'élongation de l'échantillon ne pouvait pas être atteinte avec ce dispositif dont la précision était de l'ordre de 10 µ.

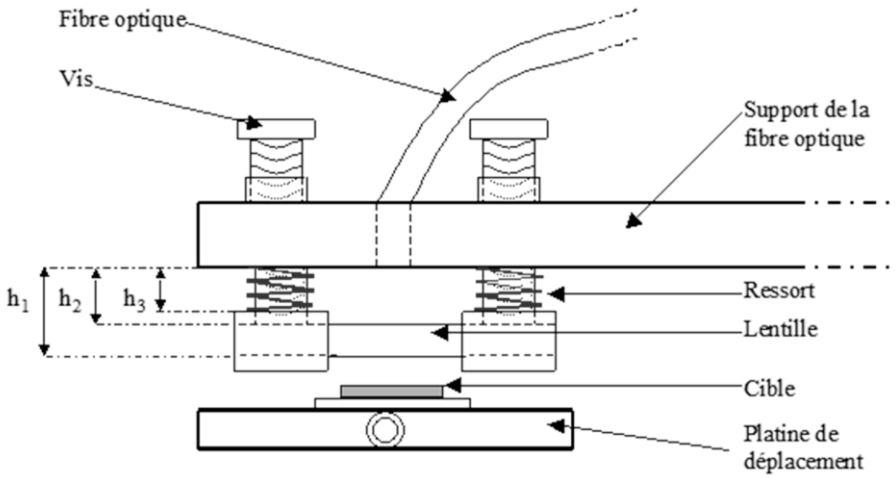
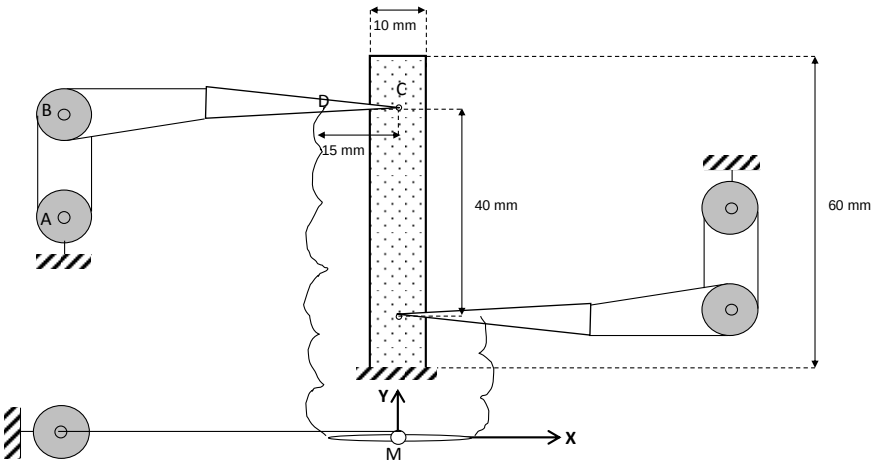
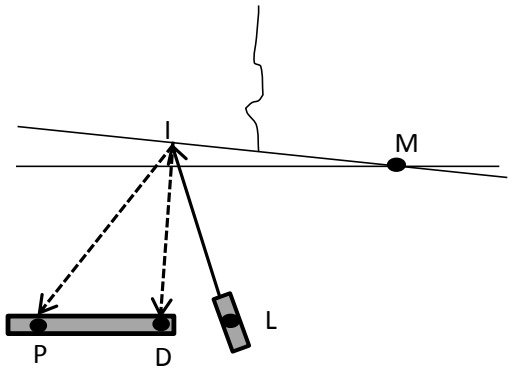


Figure G.1. Dispositif expérimentale pour mesurer la déformation à l'aide du capteur numérique à fibre optique Keyence Série FS-V30

Ensuite, nous avons testé un deuxième capteur. Il s'agissait d'un capteur numérique de positionnement (PSD) 1D Hamamatsu S1352 accompagné d'une diode laser Edmund Optics 59-084. Le principe retenu ici consistait à déporter la déformation de l'échantillon à une cible réfléchissante pivotante, elle-même balayée par la diode laser. Deux pinces souples fixées à l'échantillon, devaient transmettre la déformation de celui-ci par des fils d'invar à la cible réfléchissante pivotante (un miroir). La déformation de l'échantillon devait se calculer en fonction de l'angle de rotation de la cible, mesuré selon la position du rayon lumineux réfléchi (Figure G.2)



Vue d'ensemble



Rotation du miroir (M) et changement de position du rayon réfléchi dans le capteur numérique

Figure G.2. Dispositif expérimentale pour mesurer la déformation à l'aide du capteur numérique de positionnement (PSD) 1D Hamamatsu S1352.

La troisième piste explorée comportait l'utilisation des **capteurs de déplacement de contact** de type LVDT. Ainsi, une platine d'essai polyvalente a été conçue, permettant de tester des échantillons en traction ou en compression (toutefois, le capteur de force est toujours sollicité en traction). L'échantillon est fixé à deux mors, dont l'un est mobile. La sollicitation en traction ou en compression est réalisée par la rotation de deux tiges filetées parallèles commandées par un moteur placé à l'extérieur du séchoir. En compression le capteur LVDT est solidaire des mors, alors qu'en traction il mesure le déplacement de deux pinces souples fixées à l'échantillon (Figure G.3). Ce dernier dispositif a commencé à être préparé dans notre laboratoire. Les phases de conception, dimensionnement, usinage et montage ayant été faites à ce jour.

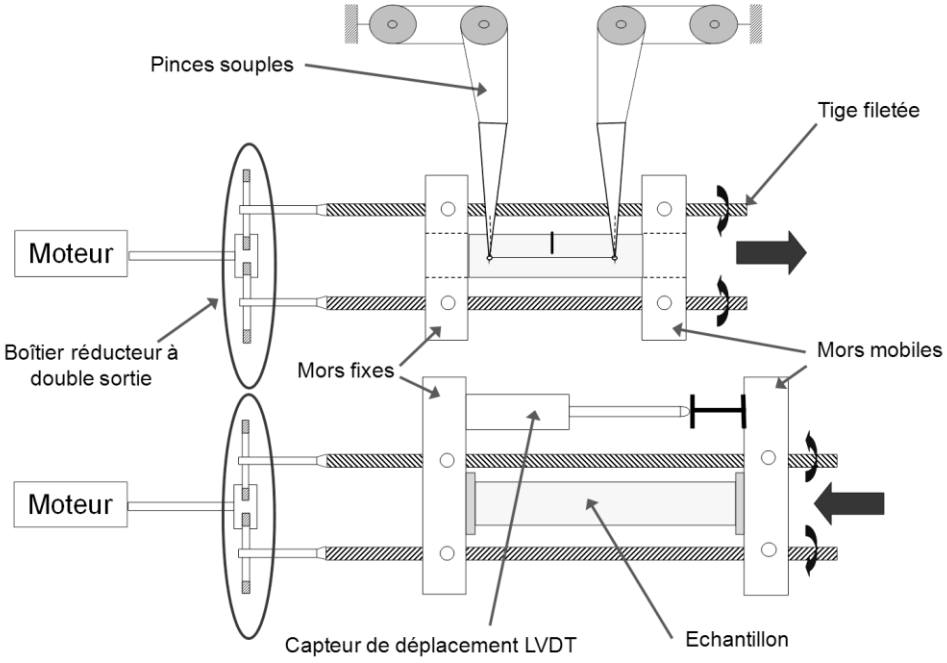


Figure G.3. Dispositif expérimentale pour mesurer la déformation à l'aide d'un capteur de contact type LVDT.

Bibliographie

1. **Aguiar, O.** 2001. Le procédé EMBRAPA/ENGREF de séchage industriel accéléré du bois : séchage à transition vitreuse. Thèse. Ecole Nationale du Génie Rurale, des Eaux et des Forêts (ENGREF). 60p.

2. **Aguiar, O. et Perré, P.** 2002. Wood accelerating drying process based on its rheological properties. United States Patent Application 20030099275.

3. **Aguiar, O. et Perré, P.** 2000. The « flying wood » test used to study the variability of drying behaviour of oak. Proceedings of COST Action E15 2nd Workshop on Quality Drying of Hardwood. Sopron, Hungary. September 11-13.

4. **Agreste.** 2010. Récolte de bois et production de sciages.

5. **Aléon, D., Chanrion, P., Négrié, G., Perez, J. et Snieg, O.** 2001. Séchage du bois, guide pratique. CTBA. 126p.

6. **Allegretti, O., Rémond, P. et Perré, P.**2003. A new experimental device for non symmetrical drying tests – experimental and numerical results for free and constrained samples. Proceedings of 8th International IUFRO Wood Drying Conference.Brasov, Romania. August 24-29. pp: 65-72.

7. **Allegretti, O.** 2004. Non symmetrical drying test – experimental results for free and constrained samples of beech wood. Proceedings of COST Action E15 5th Workshop. Athens, Greece. April 22-24.

8. **Ananias, R.** 2004. Fisica de la madera. Notas de curso. Universidad del Bio – Bio. 41p.

9. **Armand, G. et Ningre, F.** 2002. Qualités et utilisations du bois de hêtre aujourd'hui. En G. Armand (Ed.), *Le hêtre autrement – Les guides du sylviculteur*. Institut pour le Développement Forestier. pp: 33-60.

10. **Armstrong, L. D.** 1972: Deformation of wood in compression during moisture movement. Wood Science. Vol 5(2). pp: 81-86.

11. **Armstrong, L. D. et Christensen, G. N.** 1961. Influence of moisture changes on deformation of wood under stress. Nature. Vol 191(4797). pp: 869-870.

12. **Armstrong, L.D. et Kingston, R.S.T.** 1962. The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress. Australian Journal of Applied Science. Vol 13(4). pp: 257-276.

13. **Armstrong, L.D. et Kingston, R.S.T.** 1960. Effect of moisture content changes on creep of wood. Nature. Vol 185(4716). pp: 862-863.

14. **Bažant, Z. P.** 1985. Constitutive equation of wood at variable humidity and temperature. Wood Science and Technology. Vol. 19. pp: 159-177.

15. **Bengtsson, C.** 2001. "Short-term" mechano – sorptive creep of well-defined spruce timber. Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 59. pp: 117-128.

16. **Bethe, E.** 1969. Strength properties of construction wood stored under changing climates and mechanical load (in german). Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 27(8). pp: 291-303.

17. **Bodig, J. et Jayne, B.** 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold Company. 15th edition. New York. 712p.

18. **Boone, R. S.; Kozlik, C. J.; Bois, P. J. et Wengert, E. M.** 1993. Dry Kiln Schedules for Commercial Woods – Temperate and Tropical. Forest Products Laboratory. 158p.

19. **Brandao, A. et Perré, P.** 1996. The « flying wood » – a quick test to characterise the drying behaviour of tropical woods.Proceedings of 5th International IUFRO Wood Drying Conference. Québec, Canada. August 13- 17. pp: 315-324.

20. **Bucki, M.** 2004. Etude expérimentale et simulation numérique d'un procédé de séchage couple vide et hautes fréquences: Application au bois de chêne. Thèse. Ecole Nationale du Génie Rurale, des Eaux et des Forêts (ENGREF). 135p.

21. **Chadwick, W.B. and Langrish, T.A.G.** 1996. A comparison of drying time and timber quality in the continuous and cyclic drying of Australian turpentine timber. Drying Technology: Vol. 14 (3&4), pp: 895-906.

22. **Chafe, S. C.** 1995. Preheating and continuous and intermittent drying in boards of *Eucalyptus regnans* F. Muell. Part I: Effect on internal checking, shrinkage and collapse. Holzforschung. Vol 49. pp: 227-233.

23. **Chanrion, P.** 2006. La problématique et l'avenir du séchage en Europe. 7ème Séminaire sur le séchage des bois d'apparence. Drummonville, Québec. 21 novembre.

24. **Colmars, J.** 2011. Hygromécanique du matériau bois appliquée à la conservation du patromoine culturel: Etude sur la courbure des panneaux peints. Thèse. Université de Montpellier 2. 156p.

25. **Crank, J**. 1975. The mathematics of diffusion. Oxford University Press.

26. **Crank, J. et Park, G.S.** 1968. Diffusion in polymers. Academic Press.

27. **Felix, S. et Morlier, P.** 1992. Modeling of stresses and strains in a piece of wood under drying. Holzforschung. Vol 46(5). pp: 369-378.

28. **Gerhards, C.C.** 1982. Effect of moisture content and temperature on the mechanical properties of wood: an analysis of immediate effects. Wood and Fiber Science. Vol 14(1). pp: 4-36.

29. **Goulet, M. et Ouellet, E.** 1968. Effet de la teneur en humidité du bois sur sa résistance à la traction transversale. Notes de recherches N°1. Faculté de Foresterie et Géodésie. Université Laval, Québec. 17p.

30. **Gril, J.** 1997. Couplages et blocages en rhéologie du bois. Habilitation à diriger des recherches. Université Sciences et Techniques du Languedoc. 88p.

31. **Gril, J.** 1988. Une modélisation du comportement hygro – rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Thèse. Université de Paris VI. 268p.

32. **Grossmann, P. U. A.** 1976. Requirements for a model that exhibits mechano-sorptive behaviour. Wood Science and Technology. Vol. 10. pp: 163-168.

33. **Guitard, D.** 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues Editions. 238p.

34. **Hanhijärvi, A.** 2000. Deformation properties of Finish spruce and pine wood in tangential and radial directions in association to high temperature drying. Part IV: Modeling. Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 58. pp: 211-216.

35. **Hanhijärvi, A., Helnwein, P. et Ranta – Maunus, A.** 2001. Two – dimensional material model for structural analysis of drying wood as viscoelastic – mechanosorptive – plastic material. Proceedings of COST Action E15 3rd Workshop. Helsinki, Finland. June 11-13.

36. **Hanhijärvi, A. et Hunt D.** 1998. Experimental indication of interaction between viscoelastic and mechano-sorptive creep. Wood Science and Technology. Vol. 32. pp: 57-70.

37. **Haque, M. N., Langrish, T. A. G., Keep, L-B. et Keey, R. B.** 2000. Model fitting for visco-elastic creep of *Pinus radiata* during kiln drying. Wood Science and Technology. Vol. 34. pp: 447-457.

38. **Haygreen, J.G.** 1965. Status of drying research and practice. Forest Products Journal. Vol 15(1). pp: 1-7.

39. **Hearmon, R. F. S. et Paton, J. M.** 1964. Moisture content changes and creep of wood. Forest Products Journal. Vol 14. pp: 357-359.

40. **Hernández, R. E. et M. Bizoň.** 1994. Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber saturation point. Wood and Fiber Science. Vol 26(3). pp: 360-369.

41. **Herritsch, A., Dronfield, J. et Nidjam, J.** 2008. Intermittent and continuous drying of red-beech timber from the green condition. Proceedings of 16th International Drying Symposyum. Hyderabad, India. 9-12 November. pp: 1114-1121.

42. **Hoffmeyer, P. et Davidson, R.W.** 1989. Mechano-sorptive creep mechanism of wood in compression and bending. Wood Science and Technology. Vol. 23. pp: 215-227.

43. **Hunt, D. G.** 1997. Dimensional changes and creep of spruce, and consequent model requirements. Wood Science and Technology. Vol 31. pp: 3-16.

44. **Hunt, D. G.** 1989. Linearity and non-linearity in mechano-sorptive creep of softwood in compression and bending. Wood Science and Technology. Vol. 23. pp: 323-333.

45. **Hunt, D. G.** 1986. The mechano-sorptive creep susceptibility of two softwoods and its relation to some other material properties. Journal of Materials Science. Vol 21. pp: 2088-2096.

46. **Hunt, D. G.** 1984. Creep trajectories for beech during moisture changes under load. Journal of Materials Sciences. Vol 19. pp: 1456-1467.

47. **Hunt, D. G.** 1982. Limited mechano-sorptive creep of beech wood. Journal of the Institute of Wood Science. Vol 9, n°3 (51). pp: 136-138.

48. **Hunt, D. G.** 1979. A preliminary study of tensile creep of beech with concurrent moisture changes. Proceedings of the 3rd International Conference on Mechanical Behaviour of Materials ICM – 3. Cambridge, England. August. pp: 299-308.

49. **Hunt, D. G. et Shelton, C. F.** 1988. Longitudinal moisture – shrinkage coefficients of softwoods at the mechano – sorptive creep limit. Wood Science and Technology. Vol. 22. pp: 199-210.

50. **Janssen, H.** 2011. Thermal diffusion of water vapour in porous materials: Fact or fiction? International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 54. pp: 1548-1562.

51. **Joly, P. et More-Chevalier, F.** 1980. Théorie, Pratique et Economie du Séchage des Bois. Editions H. Vial. Dourdan, France. 203p.

52. **Kollmann, F. et Côté, W.** 1968. Principles of wood science and technology. Volume I: Solid wood. Springer – Verlag, New York. 592p.

53. **Kouchade, A. C.** 2004. Détermination en routine de la diffusivité massique dans le bois par méthode inverse à partir de la mesure électrique en régime transitoire. Thèse. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF). 137p.

54. **Langrish, T.A.G., Keey, R. B. et Kumar, M.** 1992. Improving the quality of timber from red beech (N. fusca) by intermittent drying. Drying Technology. Vol. 10 (4). pp: 947-960.

55. **Leicester, R. H.** 1971. A rheological model for mechano-sorptive deflections of beams. Wood Science and Technology. Vol 5. pp: 211-220.

56. **Mårtensson, A. et Svensson, S.** 1997a. Stress – strain relationship of drying wood. Part 1 : Development of a constituve model. Holzforschung. Vol 51. pp: 472-478.

57. **Mårtensson, A. et Svensson, S.** 1997b. Stress – strain relatioship of drying wood. Part 2 : verification of a one – dimensional model and development of a two – dimensional model. Holzforschung. Vol 51. pp: 565-570.

58. **Mauget, B.** 1996. Simulation en grand déplacements du comportement mécanique du bois – Application au séchage dissymétrique et séchage sous charge. Thèse. Institut National Polytechnique de Lorraine. 154p.

59. **Milić, G. et Kolin, B.** 2008. Oscillation drying of beech timber – initial experiments. COST E53 Conference Proceedings. Delft, The Netherlands. 29-30 October. pp: 115-124.

60. **Mingazov, M. G.** (1973). Some physical and mechanical properties of wood dried by oscillating schedules. Lesnoi Zhurnal. Vol 16 (5). pp: 89-92.

61. **Mingazov, M. G. et Kachalin, N. V.** 1975. Oscillating schedules for drying lumber. Lesnoi Zhurnal. Vol (4). pp: 81-86.

62. **Montero, C., Clair, B. et Gril, J.** 2011. Interaction between long term viscoelastic and mechanosorptive response of wood. Proceedings of COST FP0904 « Thermo-hydro-mechanical wood behaviour and processing ». Biel, Switzerland. 16-18 February.

63. **Moutee, M.** 2006. Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. Thèse. Université Laval. 173p.

64. **Mukudai, J. et Yata, S.** 1986. Modeling and simulation of viscoelastic behavior (tensile strain) of wood under moisture change. Wood Science and Technology. Vol. 20. pp: 335-348.

65. **Muszyński, L., Lagana, R., Shaler, S. M. et Davids, W.** 2005. Comments on the experimental methodology for determination of the hygro-mechanical properties of wood. Holzforschung. Vol 59. pp: 232-239.

66. **Muszyński, L., Lagana, R. et Shaler, S. M.** 2002. Optical measurements of wood deformations in changing climate. Proceedings of SEM IX, International Congress on Experimental Mechanics. Milwaukee, USA. June, 10-12.

67. **Navi, P. et Heger, F.** 2005. Comportement thermo – hydromécanique du bois. Presses polytechniques et universitaires romandes. 298p.

68. **Navi, P., Pittet, C. et Plummer, J.G.** 2002. Transient moisture effects on wood creep. Wood Science and Technology. Vol 36. pp: 447-462.

69. **Panshin, A.J. et de Zeeuw, C.** 1980. Textbook of wood technology: structure, identification, properties, and uses of the commercial woods of the United States and Canada. 4th Edition. USA. 722p.

70. **Perkitny, T.** 1965. On interactions between sorption, desorption and rheology of wood (in german). Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 23(5). pp: 173-182.

71. **Perkitny, T., Hruzik, G. et Perkitny, J.** 1972. Free and restrained warping of beech boards during drying and re-moistening (in german). Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 30(8). pp: 309-315.

72. **Perré, P.** 2007. Fundamentals of wood drying. ARBOLOR. 366p.

73. **Perré, P.** 1999. How to get a good material model for wood drying simulation? Proceedings of COST Action E15 1st Workshop. Edinburgh, Scotland. October 13-14.

74. **Perré, P. et Aguiar, O.** 1999. Fluage du bois vert à haute température (120°C) : expérimentation et modélisation à l'aide d'éléments de Kelvin thermo – activés. Annals of Forest Sciences. Vol. 56. pp: 403-416.

75. **Perré, P. et Degiovanni, A.** 1990. Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. International Journal of Heat and Mass Transfer.Vol.33(11). pp: 2463-2478.

76. **Perré, P. et Passard, J.** 2004. A physical and mechanical model able to predict the stress field in wood over a wide range of drying conditions. Drying Technology. Vol 22. pp: 27–44.

77. **Perré, P., Thiercelin, F. et Aguiar, O.** 2000. A new laboratory prototype designed to test innovative drying schedules. Proceedings of 6th International IUFRO Wood Drying Conference. January 25-28. Stellenbosch, South Africa. pp: 121-128.

78. **Perré, P. et Turner, I. W.** 1996. Using a set of macroscopic equations to simulate heat and mass transfer in porous media: some possibilities illustrated by a wide range of configurations that emphasize the role of internal pressure. Numerical methods and mathematical modelling of the drying process, edited by I.W. Turner, A.Mujumdar and Marcel Dekker, pp: 83-156.

79. **Perré, P. et Turner, I. W.** 1999. A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. International Journal of Heat and Mass Transfer. Vol. 42. pp: 4501-4521.

80. **Pluvinage, G.** 1992. La rupture du bois et de ses composites. Cepaudes Editions. Toulouse. 319p.

81. **Raczkowski, J.** 1969. Effect of moisture content changes on the creep behaviour of wood (in german). Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 27(6). pp: 232-237.

82. **Randriambololona, H.** 2003. Modélisation du comportement différé du bois en environnement variable. Thèse. Université de Limoges. 143p.

83. **Ranta – Maunus, A.** 1975. The viscoelasticity of wood at varying moisture content. Wood Science and Technology. Vol 9. pp: 189-205

84. **Ranta – Maunus, A.** 1973: Theory for creep of wood. Espoo: VTT Publications 4.

85. **Ranta – Maunus, A., Forsén, H. et Tarvainen, V.** 2001. Analysis of case hardening. Proceedings of 3rd Workshop of COST Action E15 on Softwood drying to specific end – uses. Helsinki, Finland. June 11-13.

86. **Rémond, R.** 2004. Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. Thèse. Ecole Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts (ENGREF).204p.

87. **Rémond, R. et Perré, P.** 2008. High – frequency heating controlled by convective hot air: toward a solution for on – line drying of softwoods (résumé). Drying Technology. Vol. 26 (5). pp: 530-536.

88. **Rémond, R., Passard, J. et Perré, P.** 2007. The effect of temperature and moisture content on the mechanical behaviour of wood: a comprehensive model applied to drying and bending. European Journal of Mechanics A/Solids. Vol. 26. pp: 558-572.

89. **Rice, R.W. et Youngs, R. L.** 1990. The mechanism and development of creep during drying of red oak. Holz als Roh - und Werkstoff. Vol 48. pp: 73-79.

90. **Riehl, T. et Welling, J.** 2003. Taking advantage from oscillating climate conditions in industrial timber drying processes. Proceedings of 8th International IUFRO Wood Drying Conference. Brasov, Romania. 24-29 August. pp: 171-177.

91. **Sales, C.** 1984. Contribution à l'analyse des contraintes de séchage dans le bois. These. Institute National Polytechnique de Lorraine. 140p.

92. **Sackey, E., Avramidis, S. et Oliveira, L.C.** 2004. Exploratory evaluation of oscillation drying for thick hemlock timbers. Holzforschung. Vol 58. pp 428-433.

93. **Salin, J.G.** 2003. A Theorical Analysis of Timber Drying in Oscillating Climates. Holzforschung. Vol 57. pp 427-432.

94. **Salin, J.-G.** 1992. Numerical prediction of checking during timber drying and a new mechano – sorptive creep model. Holz als Roh – und Werkstoff. Vol 50. pp: 195-200.

95. **Sandland, K.M.** 2010. Communication personnelle.

96. **Sandland, K.M., Horn, H. et Steiner, Y.** 2010. The effect of an equalizing phase due to reduction of casehardening. Proceedings of 11th International IUFRO Wood Drying Conference. Skellefteå, Sweden. 18-22 January. pp: 381-385.

97. **Saporta, G.** 1990. Probabilités, analyse des données et statistique. Editions TECHNIP. Paris.

98. **SAS Institute**. 2002. SAS 9 Ed. SAS Institute, Inc., Cary, NC.

99. **Schniewind, A.** 1968. Recent progress in the study of the rheology of wood. Wood Science and Technology. Vol 2. pp: 188–206.

100. **Schniewind, A.** 1966. On the influence of moisture content changes on the creep of beech wood perpendicular to the grain including the effects of temperature and temperature changes (in german). Holz als Roh – und Werkstoff. Vol. 24(3). pp: 87-98.

101. **Siau, J.F.** 1984. Transport processes in wood. Berlin: Springer-Verlag, 245p.

102. **Siimes, F.E.** 1967. The effect of specific gravity, moisture content, temperature and heating time on the tension and compression strength and elasticity properties perpendicular to the grain of Finnish pine spruce and birch wood and the significance of these factors on the checking of timber at kiln drying. The State Institute for Technical Research. Finland. 86p.

103. **Svensson, S.** 1995. Strain and shrinkage force in wood under kiln drying conditions. Part I : Measuring strain and shrinkage under controlled climate conditions – Equipment and preliminary results. Holzforschung. Vol 49. pp: 363-368.

104. **Svensson, S. et Toratti, T.** 2002. Mechanical response of wood perpendicular to grain when subjected to changes of humidity. Wood Science and Technology. Vol 36. pp: 145-156.

105. **Tarvainen, V., Ranta – Maunus, A., Hanhijärvi, A. et Forsén, H.** 2006. The effect of drying and storage conditions on case hardening of Scots pine and Norway spruce timber. Maderas, Ciencia y Tecnología. Vol 8 (1). pp: 3-14.

106. **Terziev, N., Salin, J.G., Söderström, O., Forsen, H., Rosenkilde, A. et Temnerud, E.** 2002. Oscillating drying of Scots pine timber. Proceedings of 4th European COST E15 Worshop "Methods for Improving Drying Quality of Wood". Santiago de Compostela, Spain. 30-31 May.

107. **Toratti, T. et Svensson, S.** 2000. Mechano – sorptive experiments perpendicular to grain under tensile and compressive loads. Wood Science and Technology. Vol. 34. pp: 317-326.

108. **Tsoumis, G.** 1991. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. Van Nostrand Reinhold, New York. 494p.

109. **Uetimane Junior, E., Allegretti, O., Terziev, N. et Söderström, O.** 2010. Application of non – symmetrical drying tests for assessment of drying behavior of ntholo (*Pseudolachnostylis maprounaefolia* PAX). Holzforschung. Vol 64. pp: 363-368.

110. **Vansteenkiste, D., Stevens, M. and Van Acker, J.** 1997. High temperature drying of fresh sawn poplar wood in an experimental convective dryer. Holz als Roh – und Werkstoff. Vol 55(5). pp: 307-314.

111. **Venet, J. et Keller, R.** 1986. Identification et classement des bois français. 2ème édition. ENGREF, Nancy. 308p.

112. **Welling, J. et Riehl, T.** 2004. Oscillating drying schedules. In V. Tarvainen (Ed.), Measures for improving quality and shape stability of swan softwood timber during drying and under service conditions – Best practice manual to improve straightness of sawn timber. pp: 101-111. Espoo: VTT Publications 584.

113. **Wu, Q. et Milota, M. R.** 1994. Effect of creep and mechano – sorptive effect on stress development during drying. Drying Technology. Vol. 12(8). pp: 2057-2085.

114. **Wu, Q. et Milota, M. R.** 1995. Rheological behavior of Douglas-fir at elevated temperature. Wood and Fiber Science. Vol 27(3). pp: 285-295.

115. **Wu, Q. et Milota, M. R.** 1996. Mechano – sorptive deformation of Douglas-fir specimens under tangential tensile stress during moisture adsorption. Wood and Fiber Science. Vol 28(1). pp: 128-132.

116. **XP ENV 14464.** 2003. Sawn timber – Method for assessment of case-hardening. 6p.

UTILISATION DE CONDUITES DE SECHAGE OSCILLANTES
POUR REDUIRE LES CONTRAINTES LIEES AU RETRAIT DU BOIS

La maîtrise du procédé séchage, étape essentielle dans la transformation du bois, est devenue incontournable pour la filière bois. Cette thèse propose l'utilisation de conduites de séchage oscillantes pour réduire les contraintes de séchage liées au retrait par l'activation du fluage mécanosorptif. A ce jour, la meilleure façon d'appliquer les conduites oscillantes représente un défi pour la communauté scientifique. Dans ce travail, nous avons choisi comme matériel d'étude une essence feuillue fortement utilisée dans la filière et très susceptible aux déformations lors du séchage : le hêtre (*Fagus sylvatica*). L'effet des conduites oscillantes sur les contraintes de séchage est étudié par une approche expérimentale et par une approche théorique, articulées en trois parties :

- Un premier volet expérimental sur un séchoir semi – industriel pour saisir l'effet global des conduites oscillantes à l'échelle d'une pile de planches. L'amélioration de la qualité du bois séché s'est avérée par : une meilleure homogénéité de la teneur en eau finale inter et intra-planche, la diminution des déformations globales et la diminution des contraintes résiduelles exprimées par le gap du « slicing test ».
- Ensuite, nous avons développé un volet théorique sur la base de modélisations analytique et numérique pour étudier l'évolution des champs de teneur en eau et de contraintes mécaniques au sein d'une planche lorsque les conditions climatiques oscillent. Une formulation analytique simple, adaptée aux conduites oscillantes, est proposée pour les utilisateurs de séchoirs n'ayant pas accès à un outil numérique sophistiqué. L'approche numérique effectuée avec l'outil de simulation *TransPore* permet une étude plus réaliste du séchage oscillant. Ainsi, le module mécanique de *TransPore* a été utilisé pour dégager des configurations pertinentes de séchage permettant d'étudier l'effet des conduites oscillantes sur la relaxation des contraintes.
- Enfin, un second volet expérimental a été réalisé sur un séchoir de laboratoire, à l'échelle d'une planche, pour tester les informations issues du volet théorique. Un dispositif de séchage dissymétrique (flying wood) et deux dispositifs de séchage sous charge (poutre cantilever et flexion trois points) ont été utilisés pour étudier l'effet des oscillations. Toutefois, ces essais ne permettent pas de montrer clairement l'effet des oscillations sur la relaxation des contraintes.

La confrontation entre les résultats expérimentaux à l'échelle d'une planche et la simulation numérique a mis en évidence l'effet conséquent des oscillations parasites de faibles période et amplitude sur les résultats expérimentaux, provoquées par la régulation du séchoir. Des modifications du modèle de comportement mécanique différé ont été proposées en perspectives de ce travail afin de mieux saisir le comportement observé expérimentalement.

Mots clefs : *séchage du bois, conduite oscillante, mécanosorption, comportement différé, transferts de masse et de chaleur, séchage dissymétrique, séchage sous charge, hêtre.*