

**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).

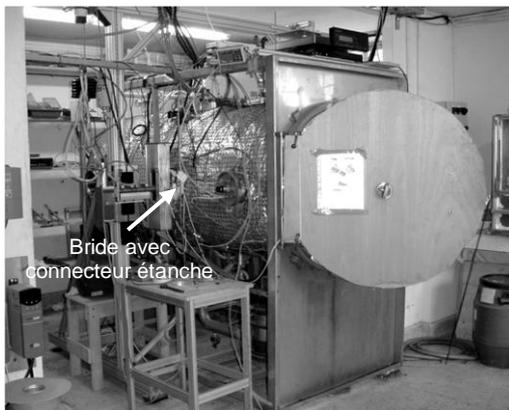
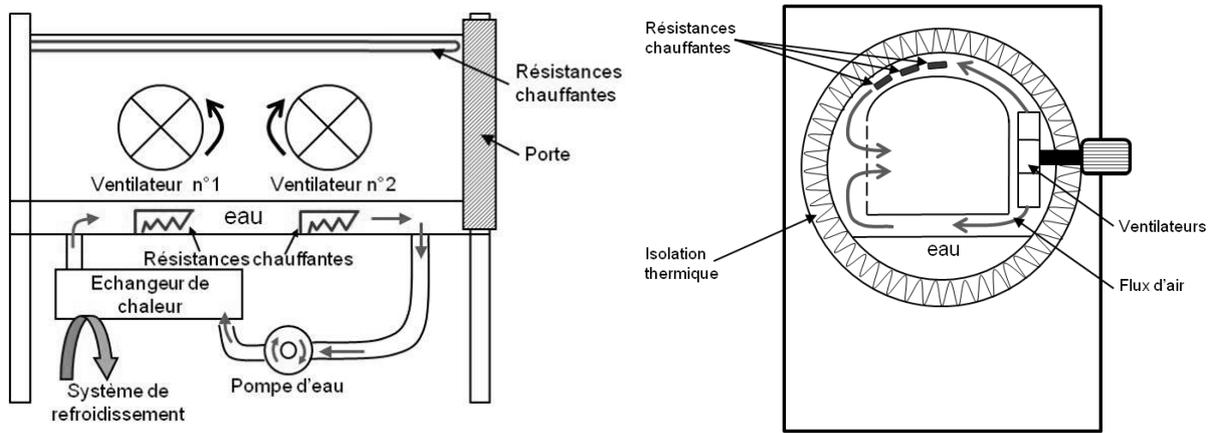
Les essais décrits dans ce chapitre ont été réalisés dans le séchoir de l'équipe Bois Biomatériaux Biomasse du Laboratoire d'Etudes des Ressources Forêt Bois (LERFoB) à AgroParisTech – Nancy. En cohérence avec les essais en configuration semi – industrielle présentés dans le chapitre 2, les essais ont 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

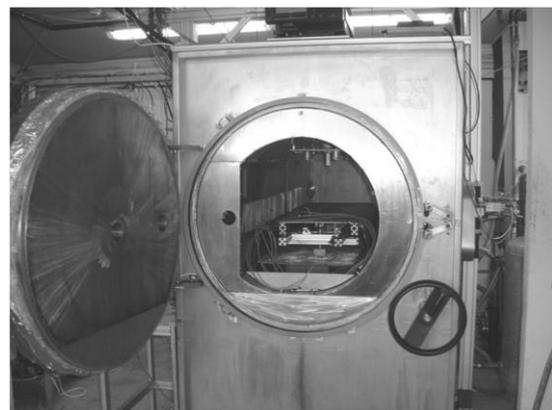
4.1.1. Séchoir

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 $-1,1^{\circ}\text{C}$ en crête supérieure et de $-0,4^{\circ}\text{C}$ 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 :

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

avec :

$$X_{PSF} = 0,58815 - 0,001 \times T \quad (4.2)$$

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.

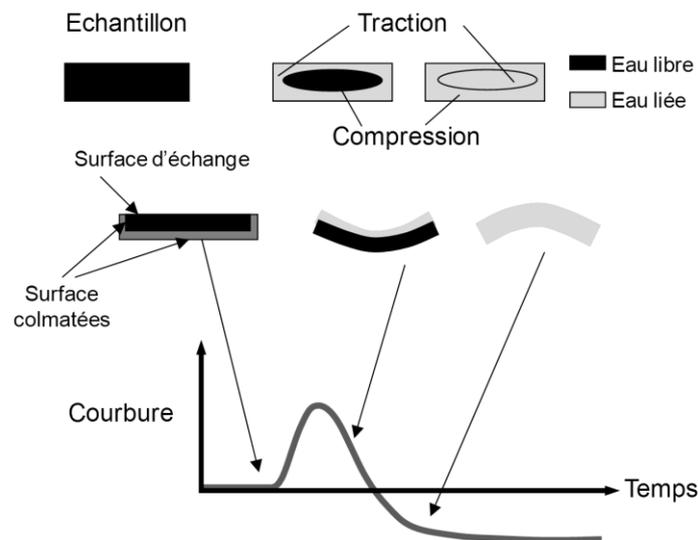


Figure 4.2. Principe de la technique « flying wood » (adapté de Perré, 2007).

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 provoquant 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 réglelet, lui-même encastré à son autre extrémité (Figure 4.3). Ces réglelets 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).

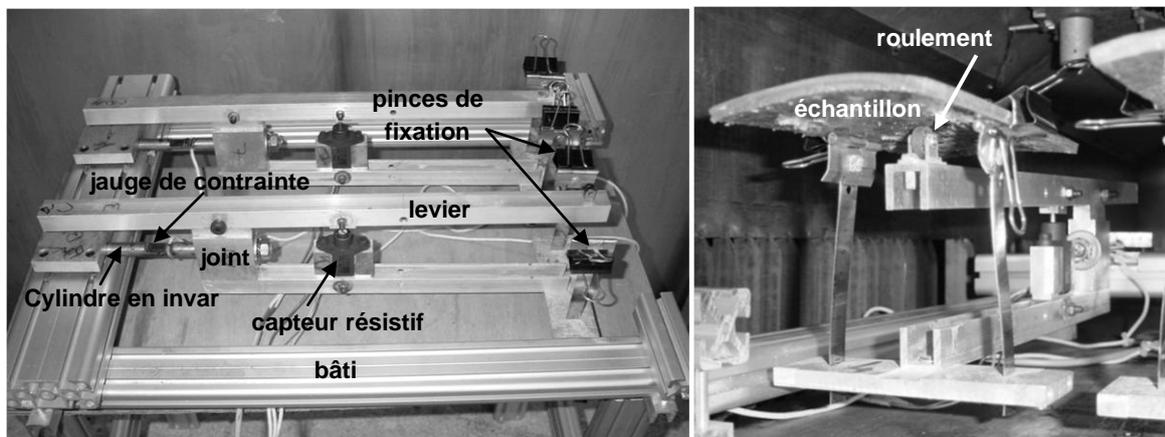


Figure 4.3. Dispositif « flying wood » pour les essais de séchage dissymétrique.

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 différencié 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 encasté 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 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).

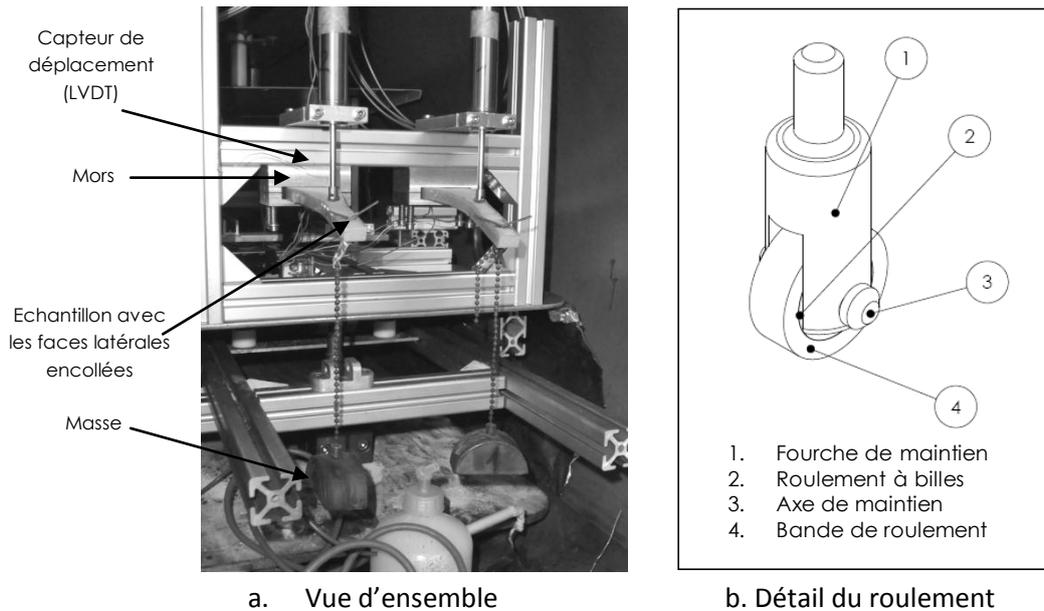


Figure 4.4. Dispositif « poutre cantilever » pour les essais de séchage sous charge.

A la fin du séchage, les échantillons sont pesés puis coupés en deux, l'encastrement étant séparé du reste. En effet, la partie encastree 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 encastree intérieure reste humide et que la partie encastree 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.

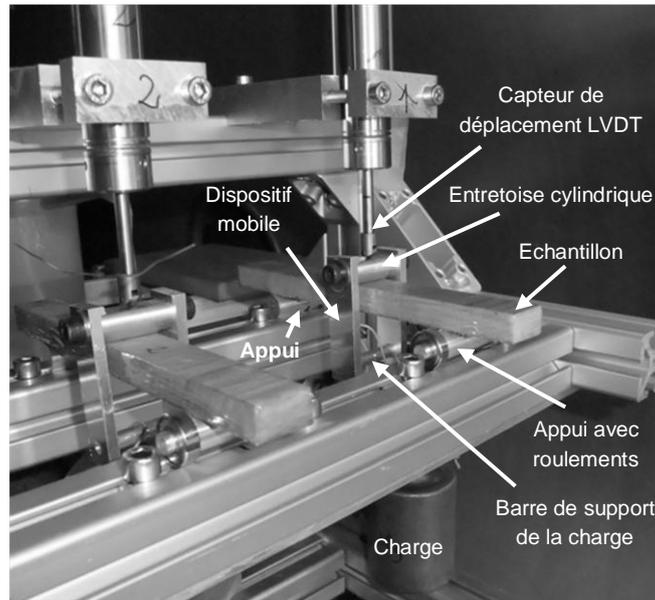


Figure 4.5. Dispositif expérimental pour les tests de flexion trois points.

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*) fraîchement 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 <i>(Chaque campagne est composée d'un séchage classique et un séchage oscillant)</i>	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
	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 <i>(Comporte seul un séchage oscillant, comparé au séchage classique de la campagne n°A.2)</i>	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 <i>(Chaque campagne est composée d'un séchage classique et deux séchages oscillants)</i>	2	D.4	D	10,0 et 20,0	60,0	48,0 (50,0 – 46,0)	49,2 (50,9 – 47,5)	8,2 (9,0 – 7,3)	2 et 8
	3		Q	5,0 et 10,0					
4. Essais complémentaires de séchage sous charge <i>(Campagne composée d'un séchage classique et un séchage oscillant)</i>	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).

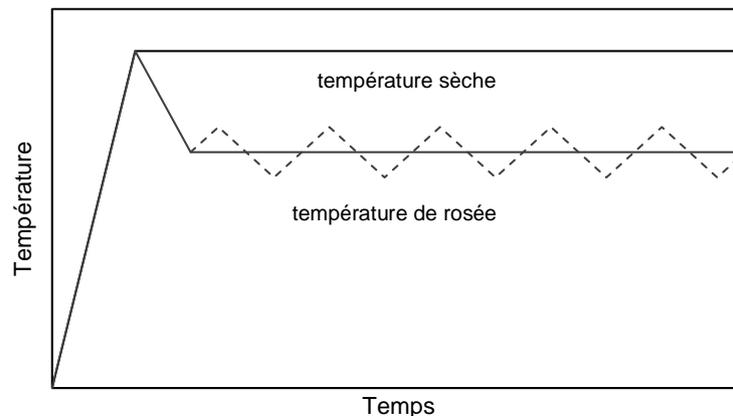
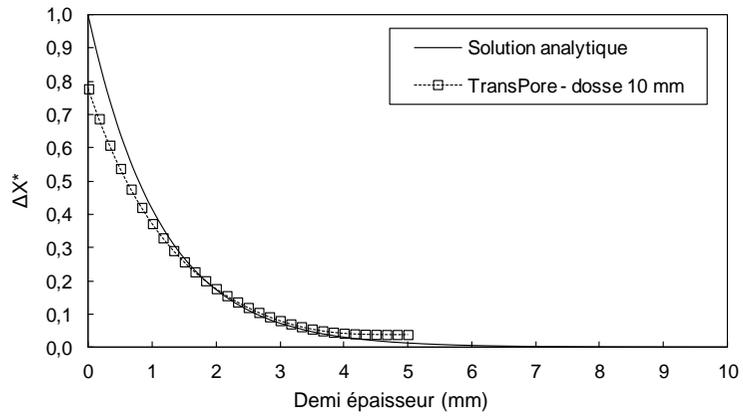


Figure 4.6. Schéma des tables de séchage utilisées.

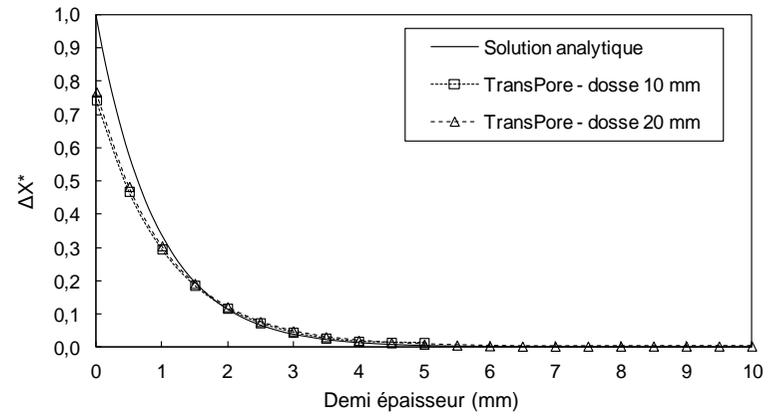
L'oscillation de la teneur en eau d'équilibre a été effectuée au moyen de la température de rosée en concordance avec les essais en configuration semi – industrielle (chapitre 2). Ainsi, la température de rosée (courbe en pointillé dans la Figure 4.6) oscille-t-elle autour du palier suivi lors du séchage 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.

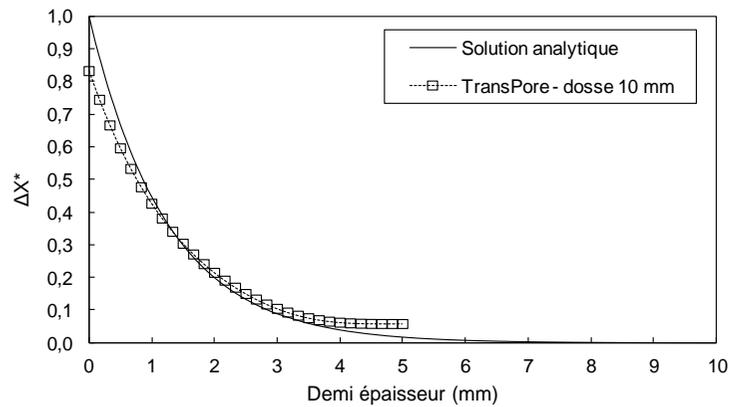
Selon la Figure 4.7a (campagnes n°1 et 4), avec un échantillon de 10 mm d'épaisseur, le fluage mécanosorptif devrait être sensiblement activé de la surface à 1 mm de profondeur ($\Delta X^* > 0,4$). Ensuite, les oscillations s'atténueront progressivement et au cœur celles-ci seront pratiquement nulles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



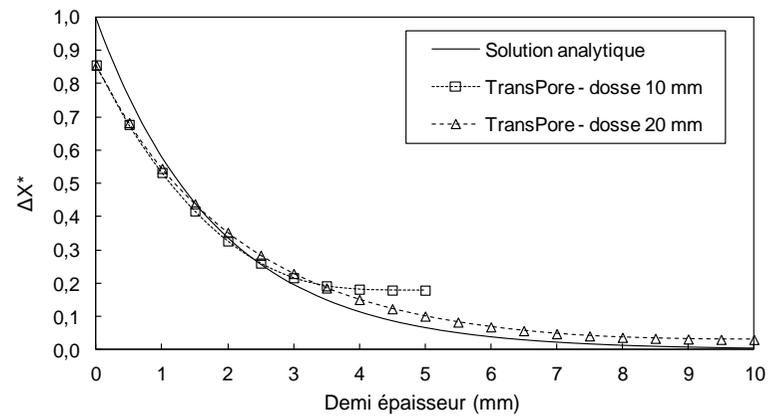
a. Campagnes n°1 et 4 [X_{eq} 8%, ΔX_{eq} 3%, période 3 heures]



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



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

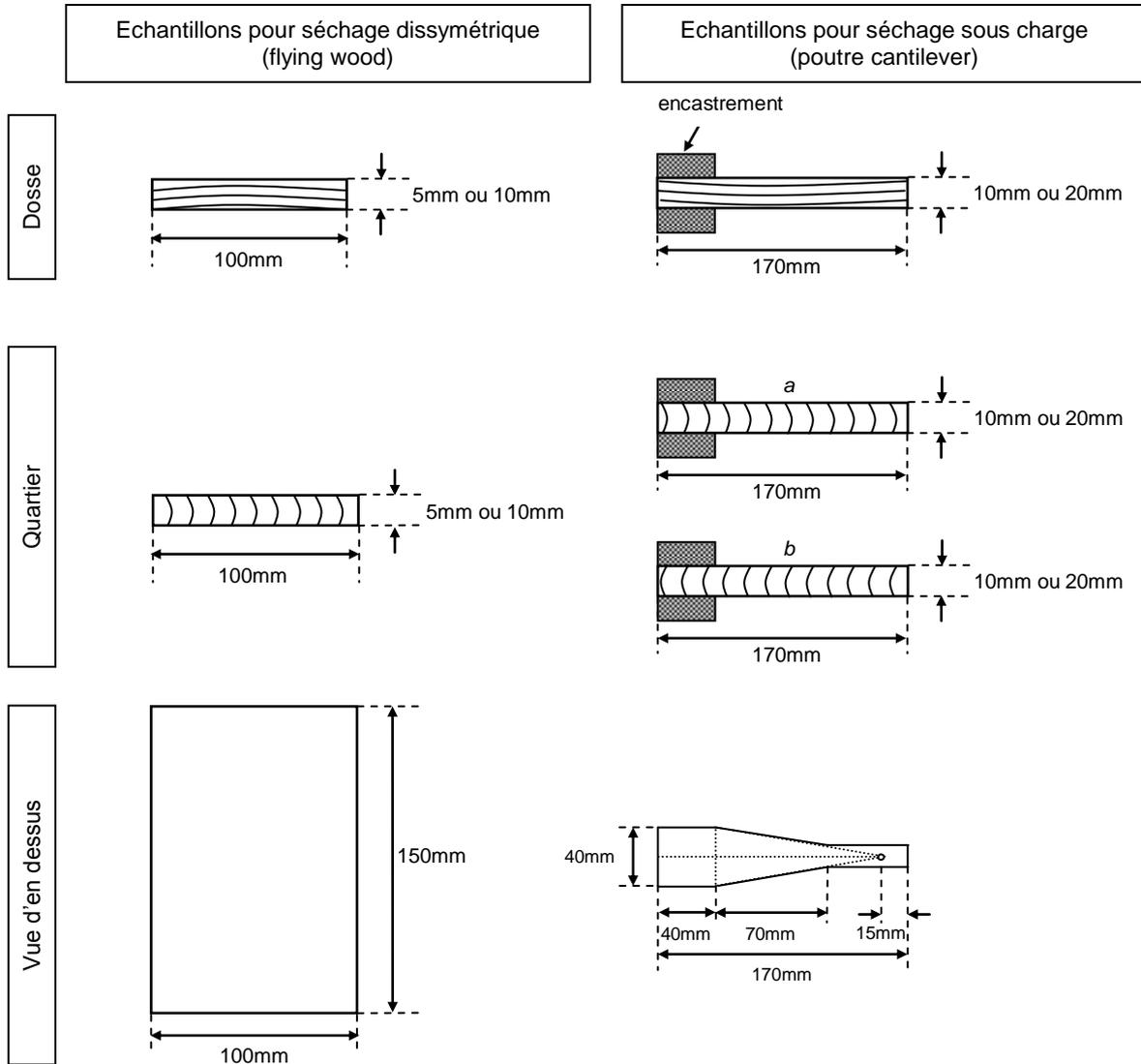


Figure 4.8. Géométrie des échantillons pour les dispositifs expérimentaux de séchage dissymétrique (flying wood) et séchage sous charge (poutre cantilever).

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.

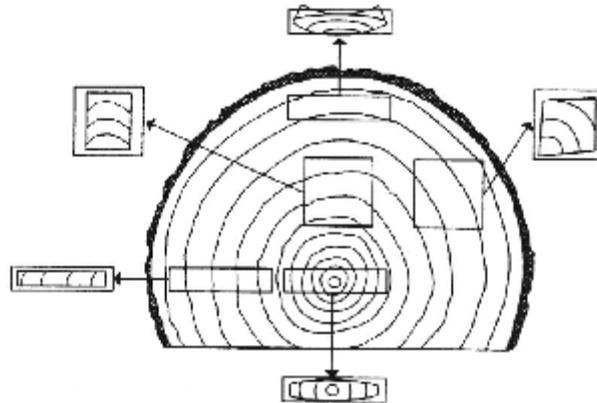


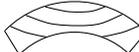
Figure 4.9. Déformation des planches en fonction de leur position dans la grume (d'après Aléon et al., 2001).

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
			2 ^{ème} phase	3 ^{ème} phase	
« plus »					?
« moins »					

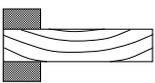
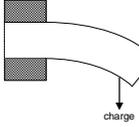
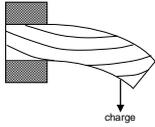
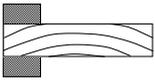
SECHAGE SOUS CHARGE (poutre cantilever)				
Position	A l'état vert (état initial)	Déformation due à l'anisotropie du retrait	Déformation due au gradient de contraintes supplémentaire	Etat final
« plus »				
« moins »				?

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 où 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, ces deux essais seront appelés par la suite campagne n°A.2bis.

4.3. Présentation et discussion de résultats

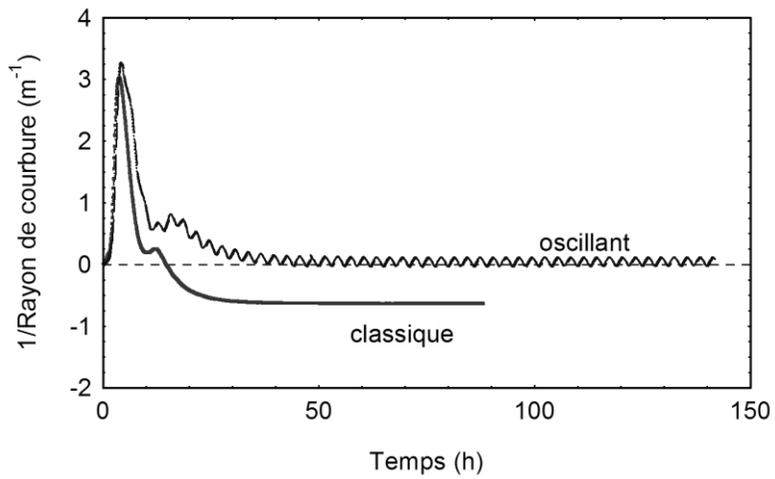
Les résultats sont présentés en détail dans l'Annexe D sous forme d'une fiche sur deux pages pour chaque campagne, accompagnée de quelques commentaires sur le déroulement des essais. Pour mieux orienter le lecteur, le Tableau 4.2 donne l'organisation de l'annexe D. Ici, nous décrivons et discuterons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

Tableau 4.2. Organisation des résultats.

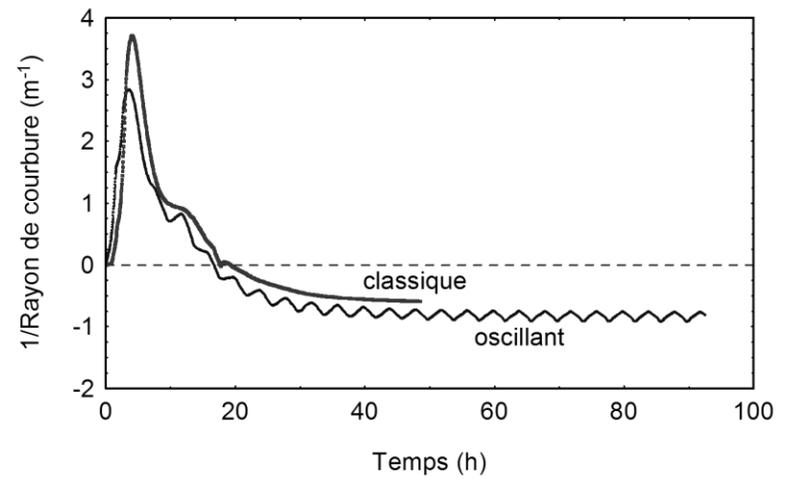
1 ^{ère} partie (Observations générales)	Campagne n°1	Annexe D.1
	Campagne n°A.1 Campagne n°A.2	Annexe D.2
2 ^{ème} partie (Effet de la courbure de cernes)	Campagne n°A.2bis	Annexe D.3
3 ^{ème} partie (Effet de la période et de l'épaisseur)	Campagne n°2 Campagne n°3	Annexe D.4
4 ^{ème} partie (Essais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

4.3.1. Séchage dissymétrique

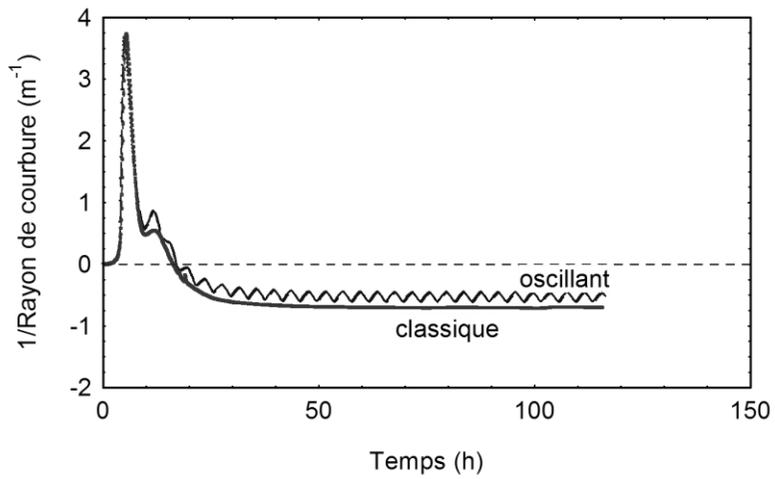
D'après les simulations du chapitre précédent (Annexe B2) et les simulations de transferts de masse présentées dans *Conditions d'essais*, en séchage dissymétrique, l'activation mécanosorptive obtenue avec les oscillations devait se traduire par une courbure finale plus faible pour les séchages oscillants 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.



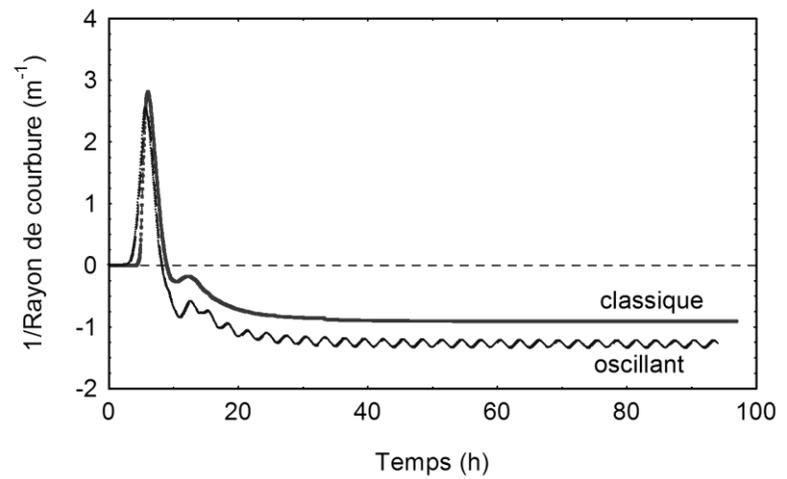
a. Campagne n°1



c. Campagne n°A.2



b. Campagne n°A.1



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.

Chapitre 4

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 accentuée 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.

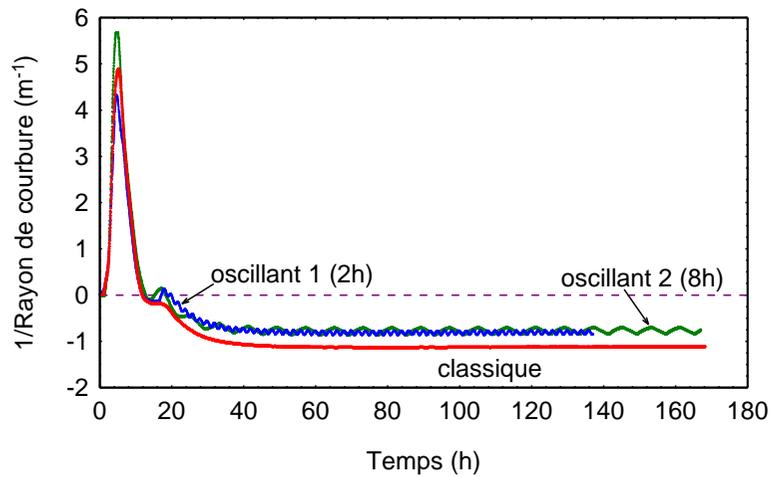
Ces résultats nous permettent de dire que les conditions d'essai ici testées n'apportent pas de relaxation supplémentaire de contraintes de séchage. Les contraintes en séchage oscillant, exprimées par la courbure finale de l'échantillon, ne sont pas systématiquement diminuées par l'oscillation des conditions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

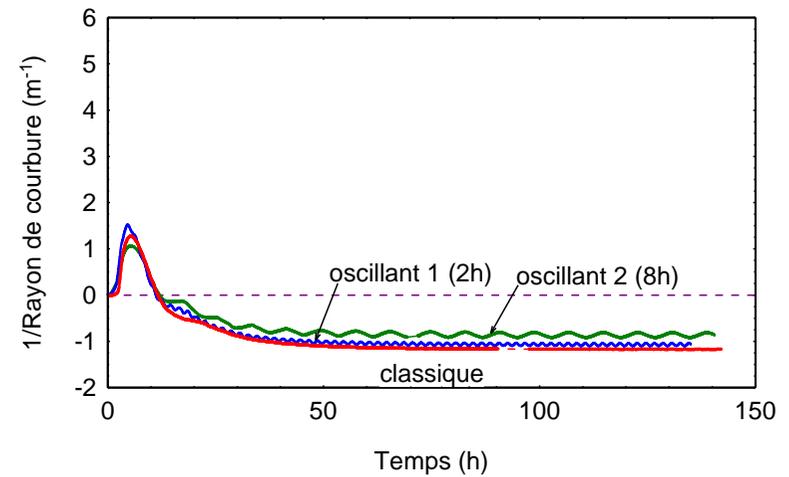
Pour les *échantillons sur dosse*, les résultats dépendent de l'épaisseur de l'échantillon. Ainsi, pour les échantillons fins, la courbure finale diminue avec les oscillations sans différence entre les deux périodes étudiées (Figure 4.12a). Le fluage mécanosorptif semble avoir diminué les contraintes 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).

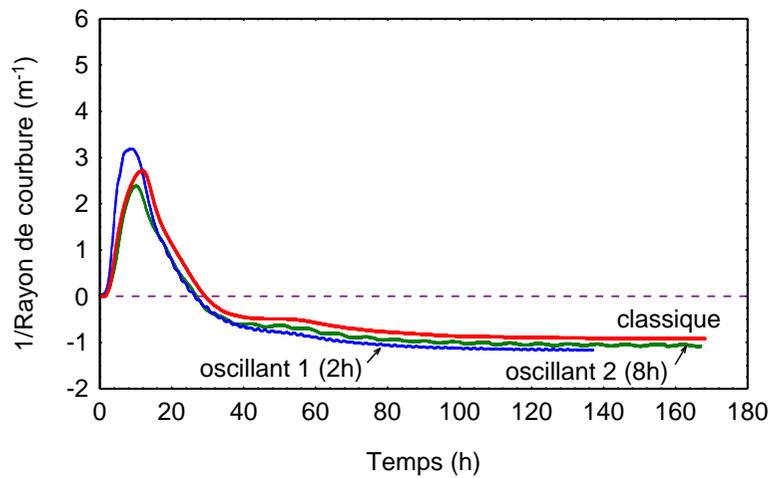
Nous pouvons ainsi conclure que la courbure finale en séchage dissymétrique semble être affectée uniquement par l'épaisseur. La courbure finale a ainsi été diminuée seulement pour les échantillons fins. Toutefois, aucune différence marquante entre les deux périodes n'a été constatée quelle que soit l'épaisseur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



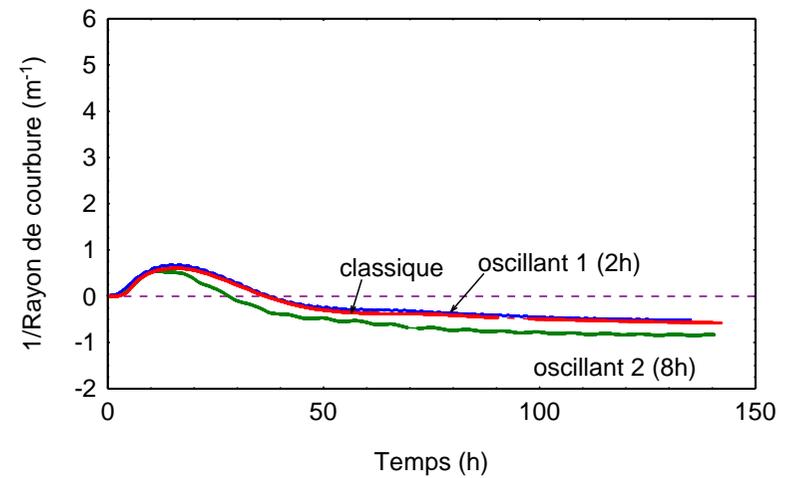
a. Campagne n°2: échantillon sur dosse de 5 mm d'épaisseur (fin)



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'accroît également lors de la troisième phase.

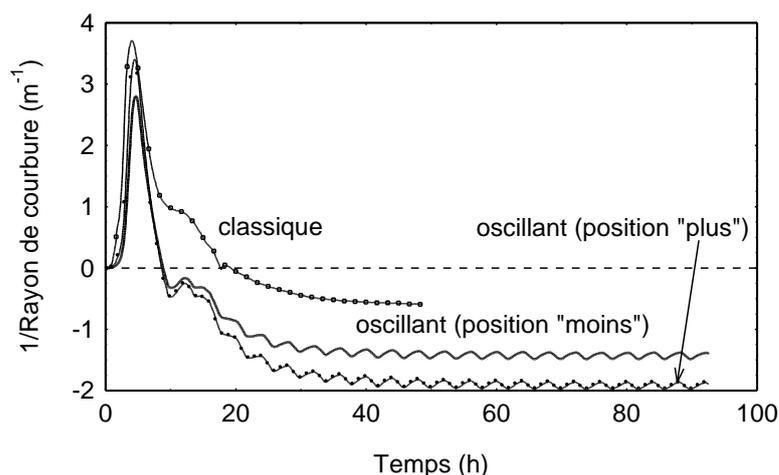


Figure 4.13. Séchage dissymétrique : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 5 mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis).

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.

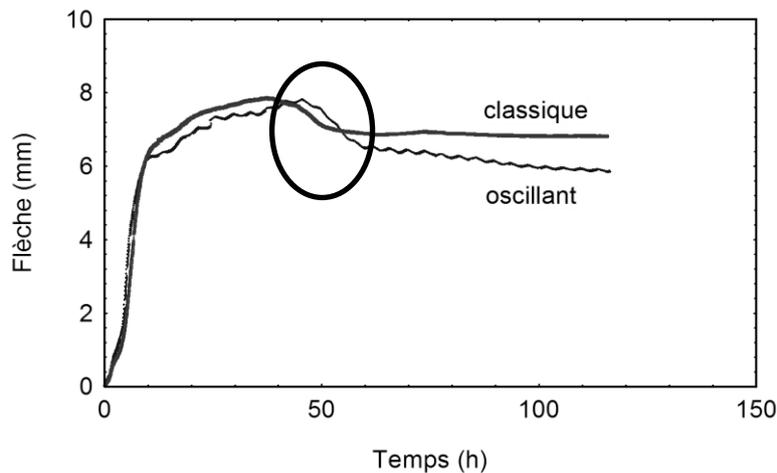
Nous pouvons synthétiser les tendances qui ressortent de nos essais de séchage dissymétrique ainsi:

- 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.

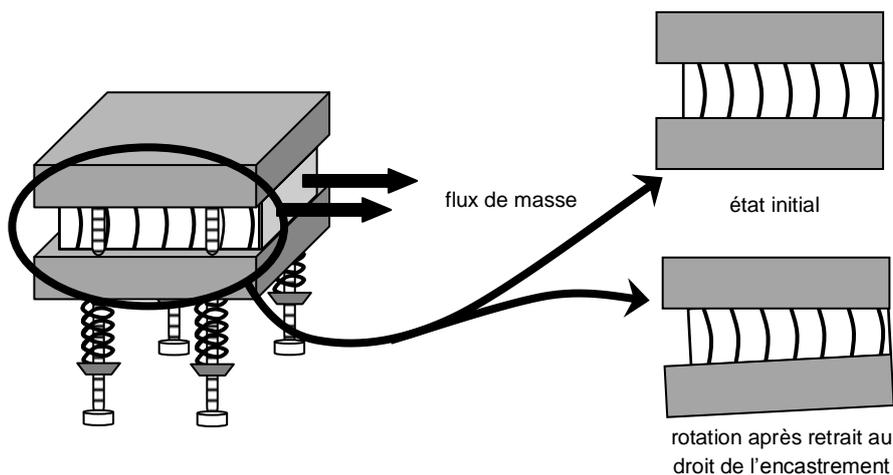
En outre, nous pouvons ajouter que la cinétique de séchage n'est pas affectée par les oscillations. Aucune différence entre les deux périodes et les deux épaisseurs étudiées n'a été observé.

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 encastree, 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.

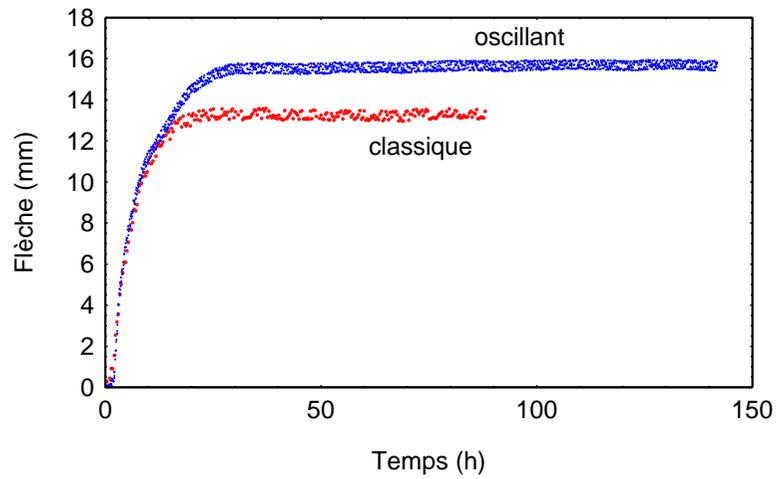
Malgré la rareté des résultats exploitables en raison des difficultés expérimentales, la Figure 4.15 présente quelques résultats à partir desquels certaines tendances ressortent. On y aperçoit notamment l'activation de la mécanosorption. La flèche obtenue en séchage oscillant est généralement supérieure 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.

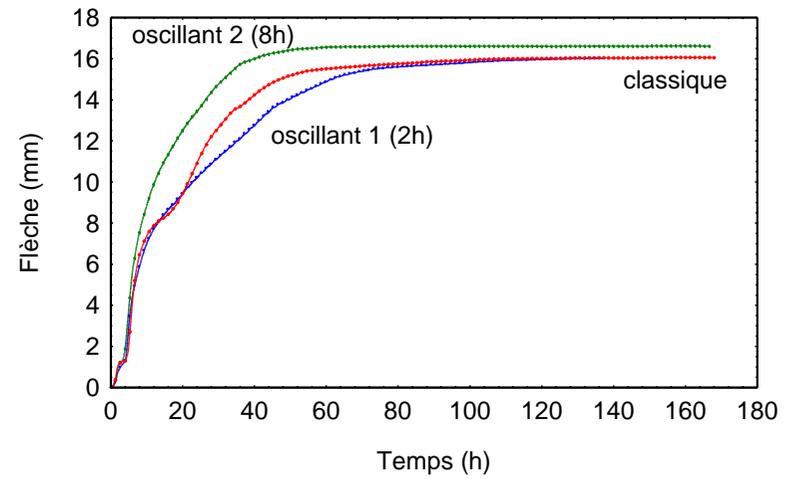
Bien qu'il soit difficile de conclure sur l'effet de la période et de l'épaisseur, les Figures 4.15c et 4.15d méritent quelques remarques. La Figure 4.15c, concernant les *échantillons sur dosse fins*, montre une flèche plus importante pour le séchage oscillant de 8 heures. Avec une période plus longue, 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.

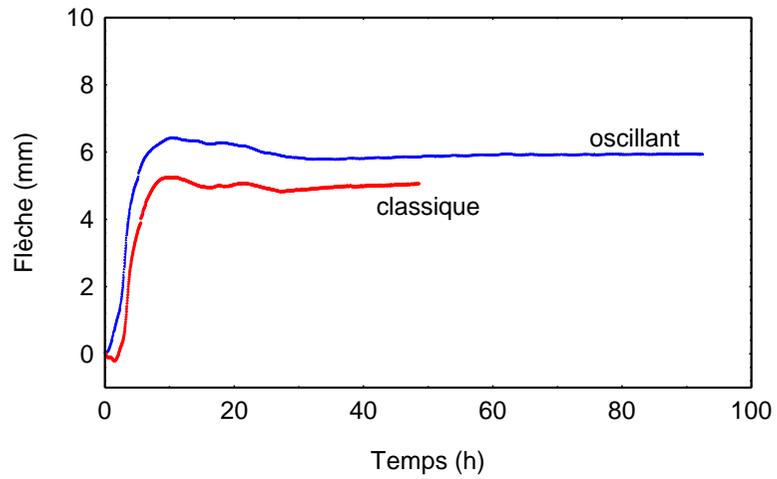
Puisque les données issues de tests de poutre cantilever ne peuvent pas apporter les informations nécessaires pour la validation du modèle de comportement mécanique proposé dans le chapitre 3, une modification du dispositif expérimental de séchage sous charge a été effectuée (flexion trois points).



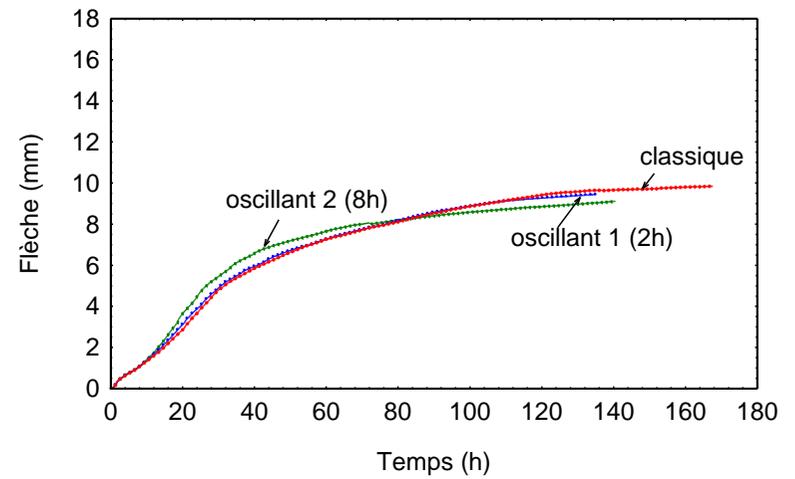
a. Campagne n°1 – échantillon sur dosse de 10 mm d'épaisseur



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



b. Campagne n°A.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.

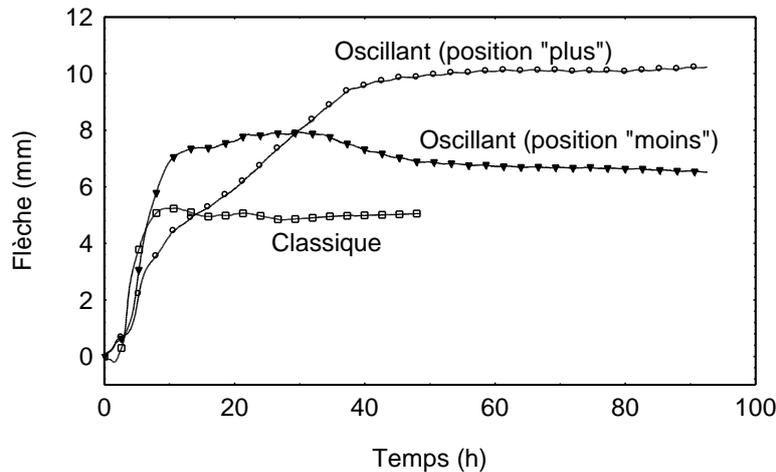
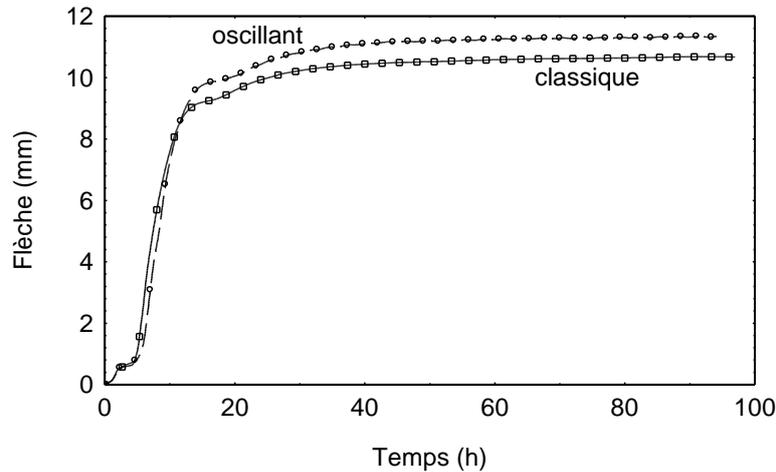


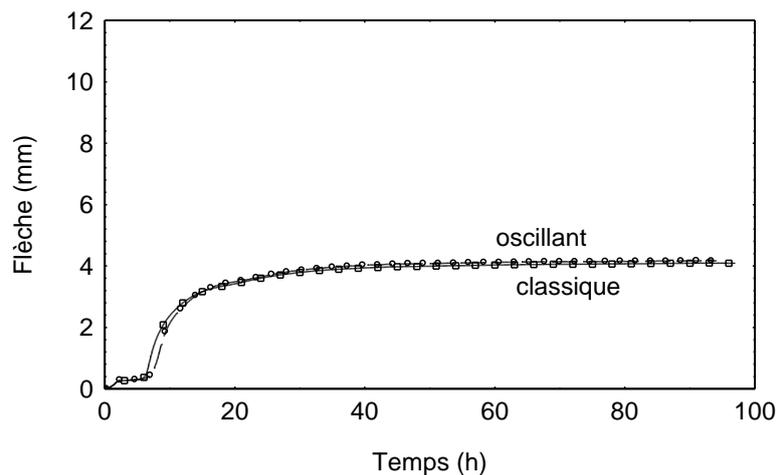
Figure 4.16. Séchage sous charge : effet de la courbure de cernes pour des échantillons sur dosse de 10 mm d'épaisseur (campagne n°A.2bis).

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 plus longtemps 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 réalisée utilisant un dispositif de flexion trois points pour le séchage sous charge.

A partir de l'ensemble des résultats, nous pouvons dresser une **synthèse 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 ?

