

**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 présentée 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		Humidité relative de l'air (%)	Teneur en eau d'équilibre (X _{eq}) (%)	Gradient de séchage*
	sèche (°C)	humide (°C)			
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

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

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

Palier	Temps ¹ (h)	TS ² (°C)	TR ³ (°C)	Classique			Oscillants	
				TH ⁴ (°C)	X _{eq} (%)	ΔTH (°C)	ΔTR (°C)	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.

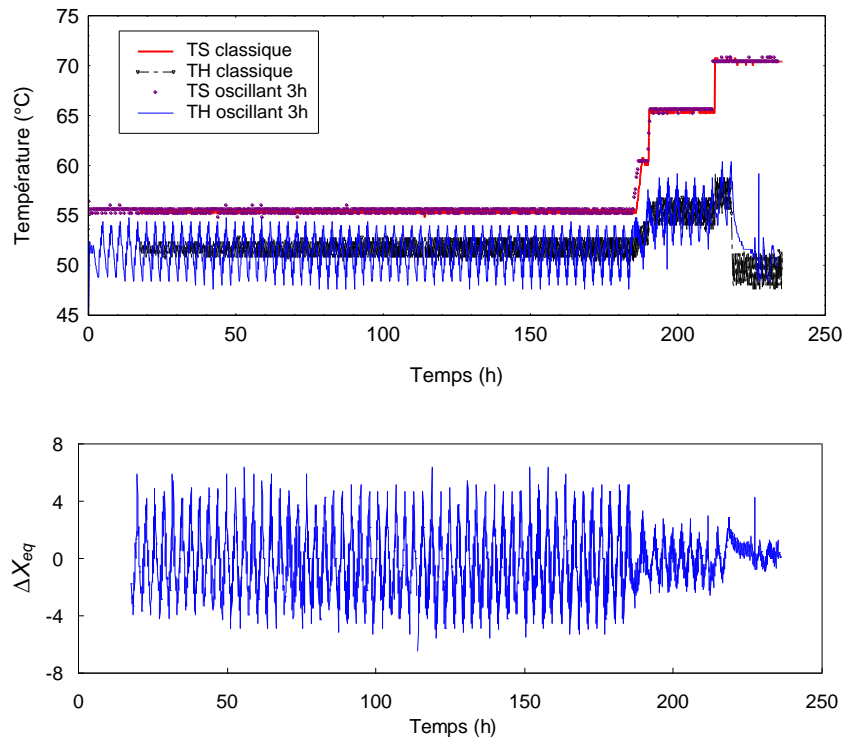


Figure 2.1. Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

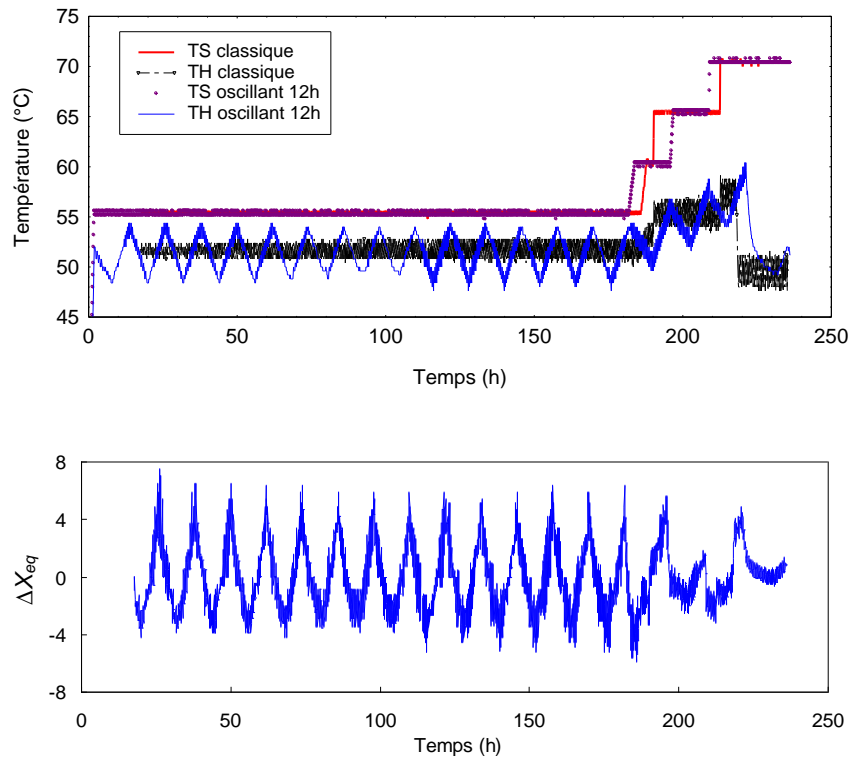


Figure 2.2. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 1. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

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.

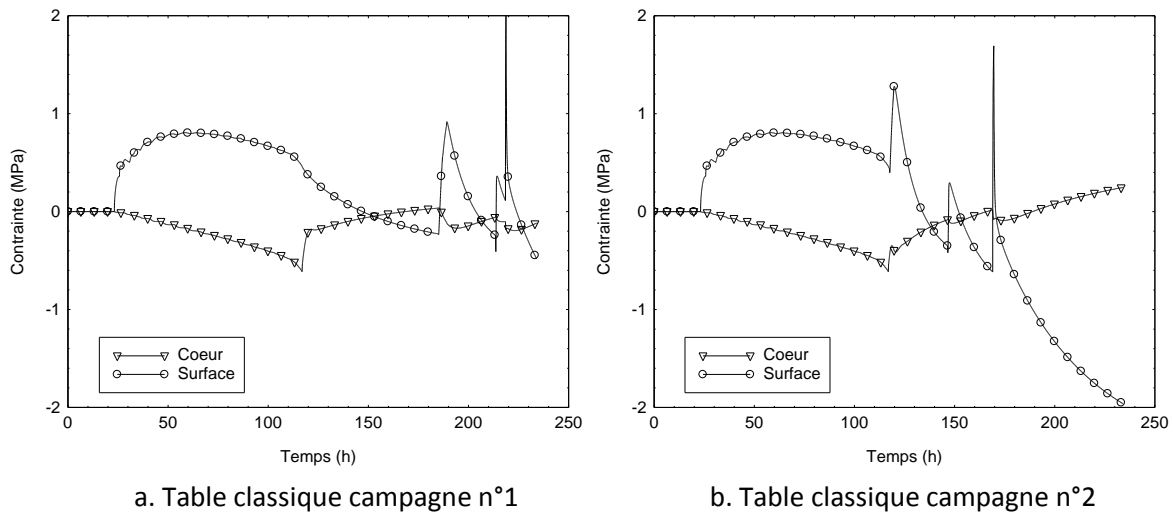


Figure 2.3. Evolution des contraintes à la surface et au cœur de la planche obtenue par simulation numérique (*TransPore*).

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 (h)	TS ² (°C)	TR ³ (°C)	Classique			Oscillants	
				TH ⁴ (°C)	X_{eq} (%)	ΔTH (°C)	ΔTR (°C)	ΔX_{eq} ⁵ (%)
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

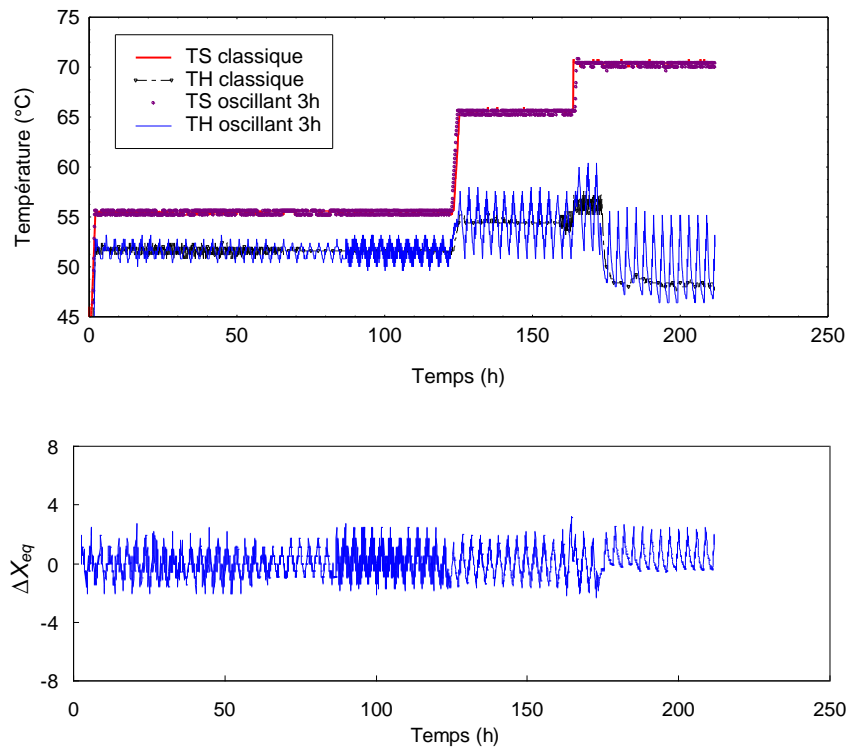


Figure 2.4. Tables des séchages classique et oscillant 1 (période de 3h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

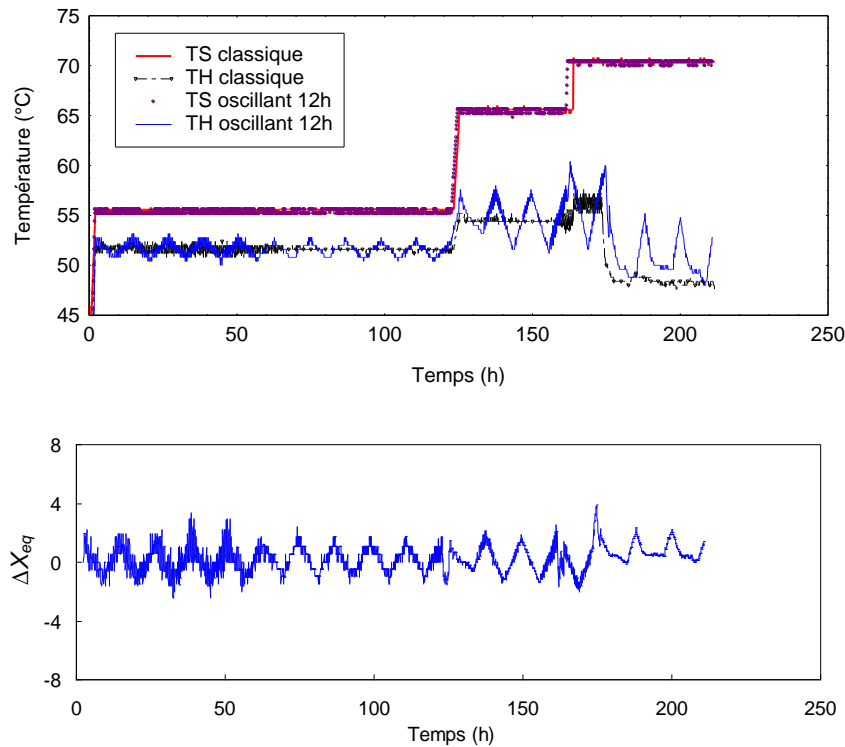


Figure 2.5. Tables des séchages classique et oscillant 2 (période de 12h) – campagne 2. En haut : température sèche et humide mesurées. En bas : Oscillation de X_{eq} calculée à partir de la température sèche et humide mesurées.

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.

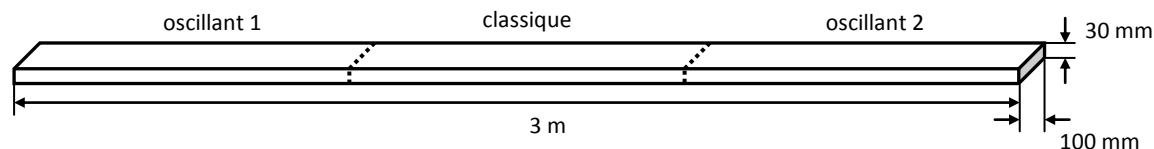


Figure 2.6. Schéma d'échantillonnage à partir de planches de 3 m de long et de 30 mm x 100 mm de section.

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				Total
	Dosse	Quartier	Faux quartier	Mixte	
<i>Première campagne</i>					
Classique	15	-	11	6	32
Oscillant 1 (3h)	20	-	8	4	32
Oscillant 2 (12h)	23	-	7	2	32
<i>Deuxième campagne</i>					
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 $0,1\text{m}^3$ 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 était 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 $2,5\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. 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.

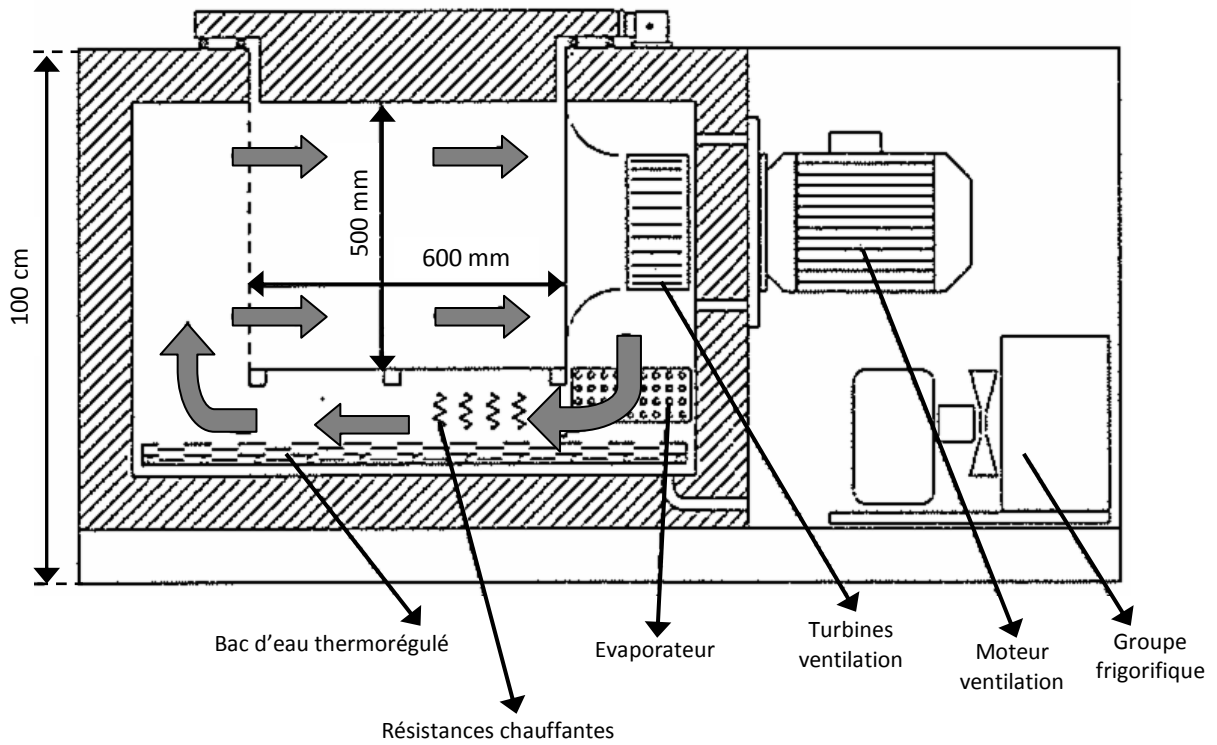


Figure 2.7. Schéma du séchoir Froilabo de l'Institut Technologique FCBA. Les flèches bleues représentent le flux d'air.

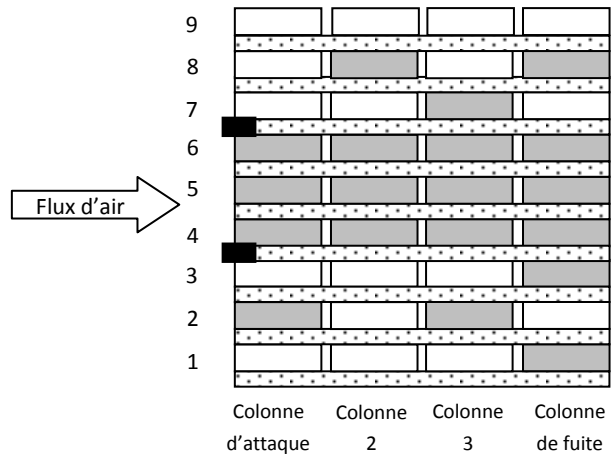


Figure 2.8. Empilage. A gauche : pile dans le séchoir avec les sondes de teneur en eau des échantillons témoins ; à droite : schéma de la pile, en gris les échantillons sur lesquels la teneur en eau à cœur a été mesurée au cours du séchage et en noir l'emplacement des anémomètres pour ajustement de la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

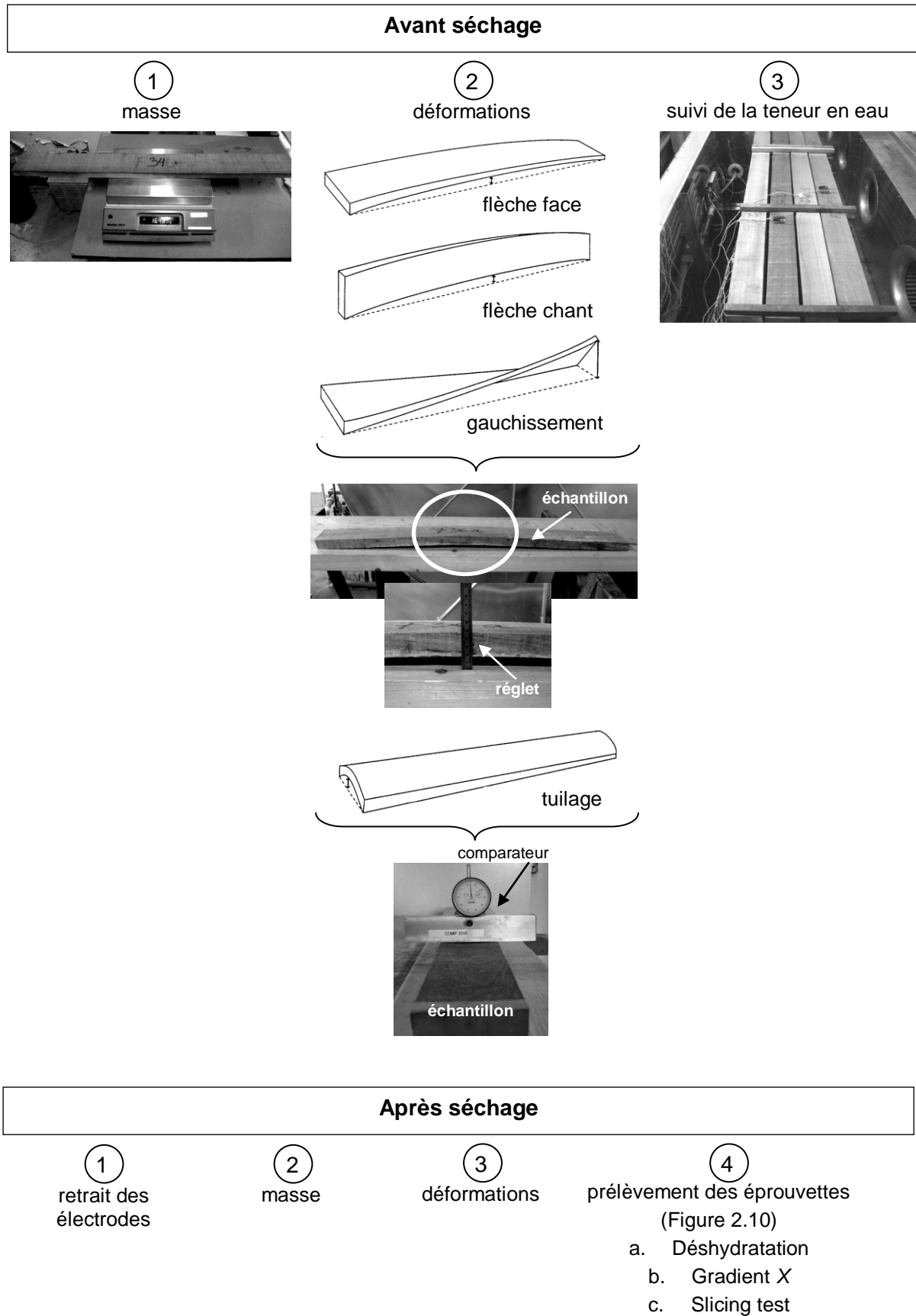


Figure 2.9. Schéma des mesures réalisées lors de chaque séchage pour chaque planche.

Chapitre 2

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.

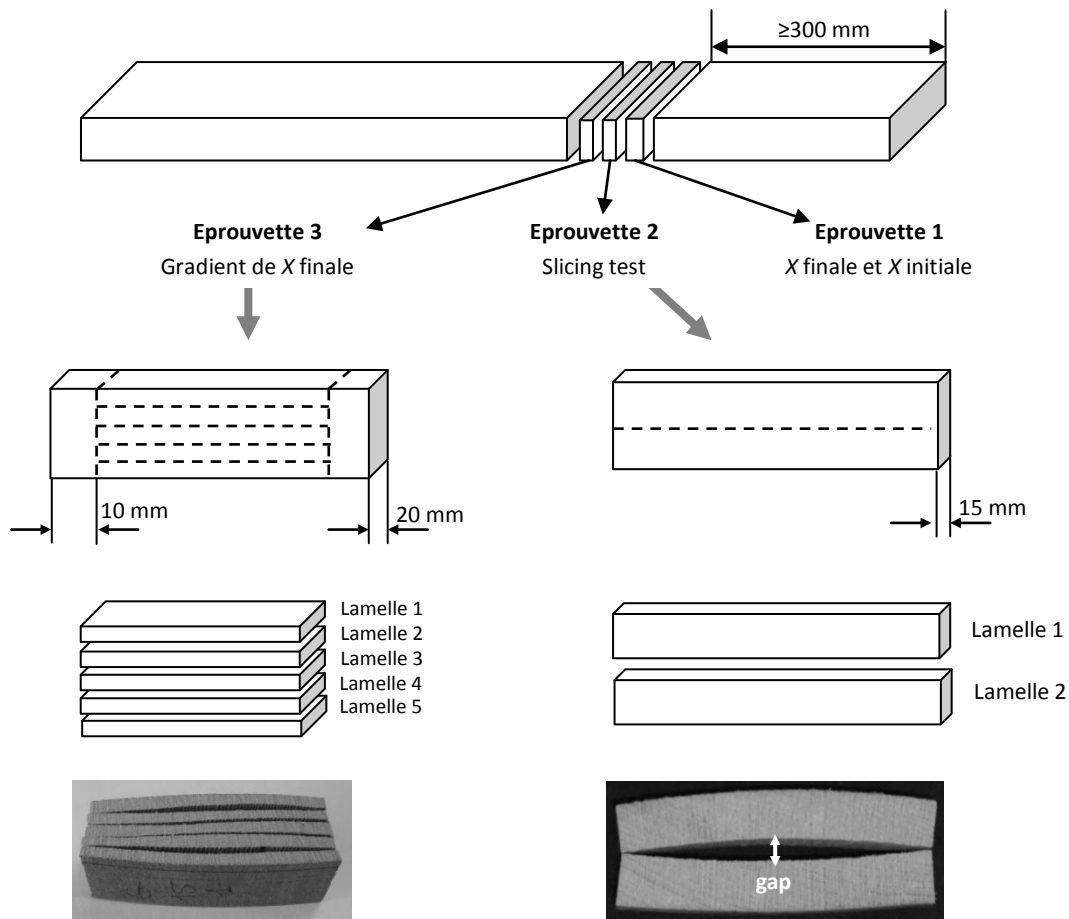


Figure 2.10. Plan de découpe à la fin du séchage pour la mesure des teneur en eau (X) finale et initiale, le slicing test et le gradient de teneur en eau finale. Les traits pointillés représentent les traits de coupe. En dessous, à gauche, lamelles pour le gradient après 24 heures dans l'étuve à 103°C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

2.4. Présentation et discussion des résultats

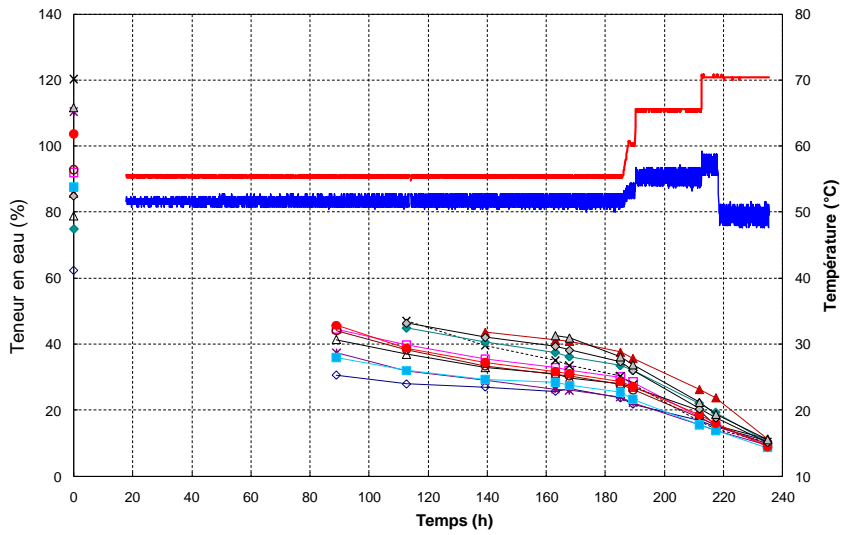
Les résultats de cette partie de l'étude comprennent la cinétique de séchage, l'homogénéité de la teneur en eau finale au sein de la pile, le gradient de teneur en eau finale au sein des planches, les déformations, et l'état des contraintes à la fin du séchage exprimé par le gap. Ces paramètres sont 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

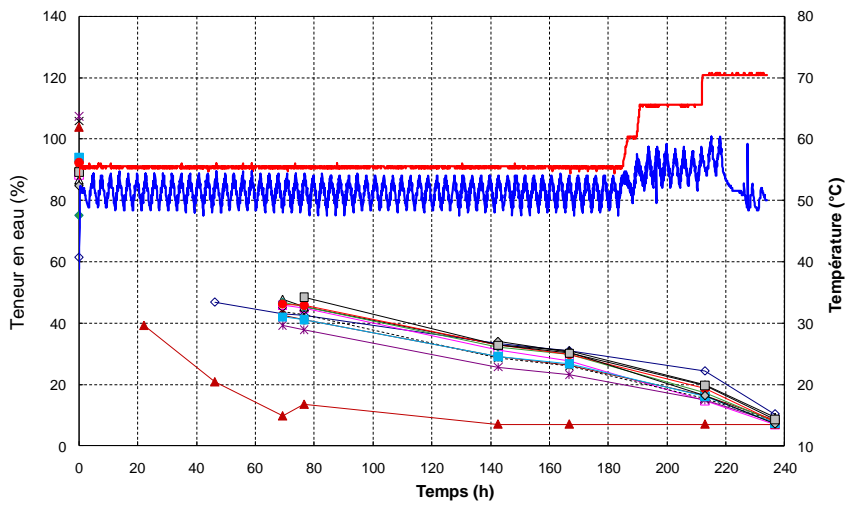
La cinétique de séchage a été tracée avec les valeurs de teneur en eau des planches témoins relevées avec l'humidimètre électrique. Cette mesure étant manuelle, les courbes sont constituées de peu de points. Dans les graphiques suivants, les teneurs en eau initiale et finale représentées sont celles 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 disposons 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.

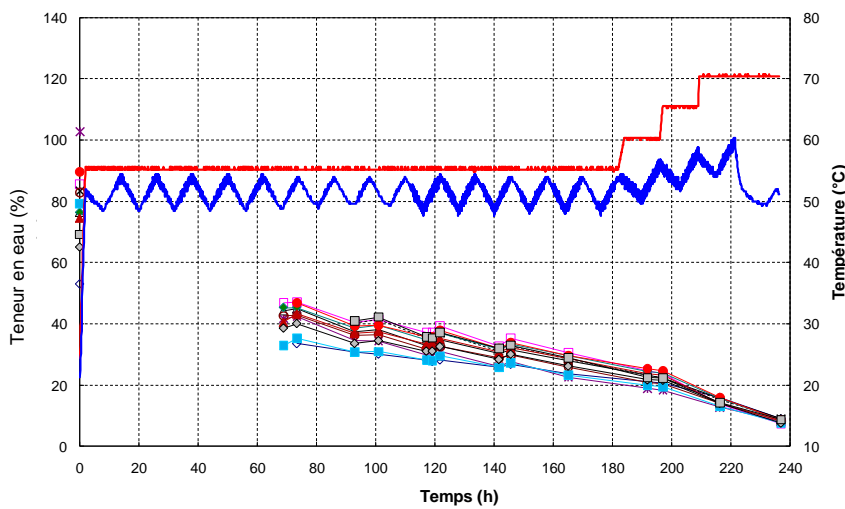
Pour la **première campagne**, la teneur en eau initiale de la pile était de 93,0% (classique), 89,3% (oscillant 1) et 83,2% (oscillant 2). A la fin du séchage, d'une durée de 237 heures, la teneur en eau était de 9,6% (classique), 9,0 (oscillant 1) et 8,9 (oscillant 2). D'après la Figure 2.11, relative à cette campagne, on peut constater que la teneur en eau atteint des valeurs lisibles par l'appareil ($\leq 47\%$) 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

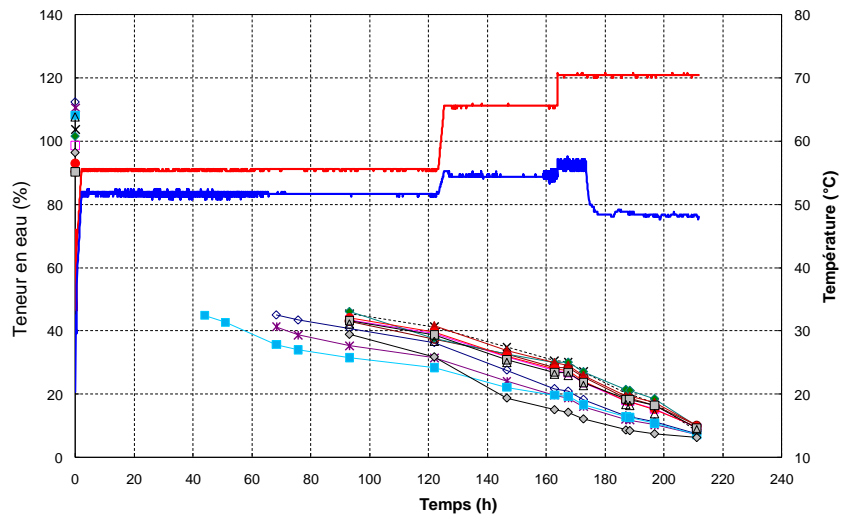


b. Séchage oscillant 1 (3h)

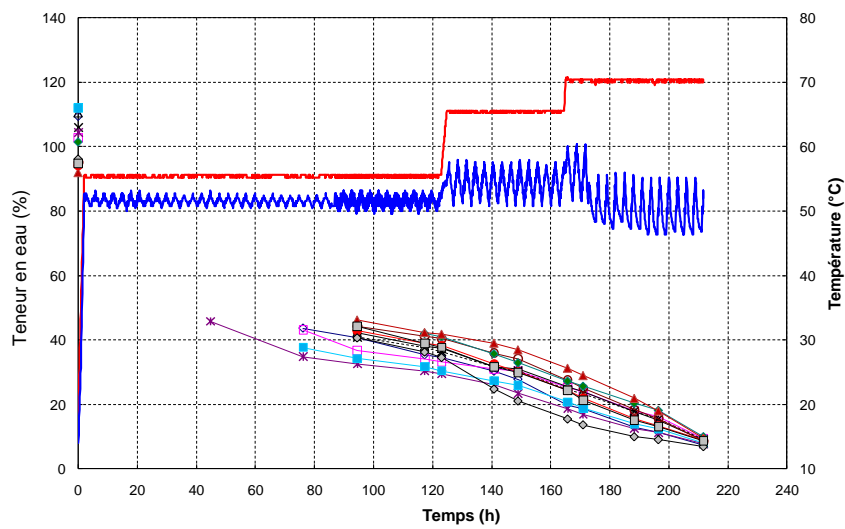


c. Séchage oscillant 2 (12h)

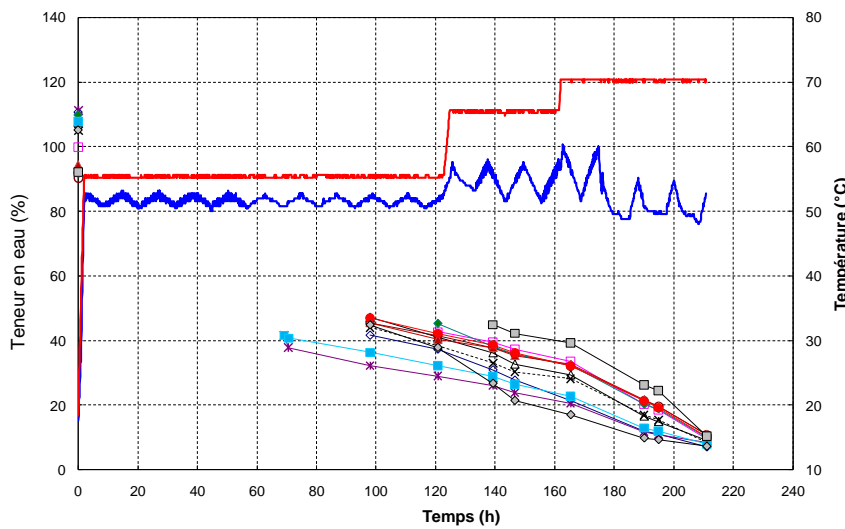
Figure 2.11. Cinétiques de séchage pour la première campagne pour douze témoins et conditions de séchage. En rouge, température sèche ; en bleu, température humide.



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 diminuée 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 PSF et X_f	X_f (%)
	PSF ¹	X_f ²		
<i>Première campagne</i>				
Classique	185	235	50	9,6
Oscillant 1 (3h)	142	237	95	9,1
Oscillant 2 (12h)	142	237	95	8,9
<i>Deuxième campagne</i>				
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.

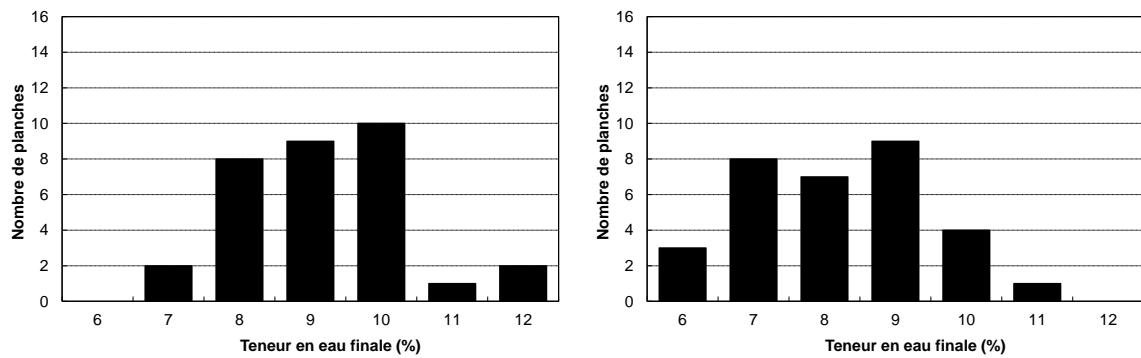
Séchage	X_i^1 (%)	X_f^2 (%)	X_f cœur (%)	X_f surface (%)	Gradient X_f (%)
<i>Première campagne</i>					
Classique	93,04 (17,50) ³	9,62 (1,20)	11,78 (1,94)	8,14 (0,82)	3,64
Oscillant 1 (3h)	89,33 (14,29)	9,05 (1,26)	10,76 (2,03)	7,21 (0,80)	3,55
Oscillant 2 (12h)	83,19 (15,93)	8,89 (0,80)	10,56 (1,32)	7,44 (0,54)	3,13
<i>Deuxième campagne</i>					
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

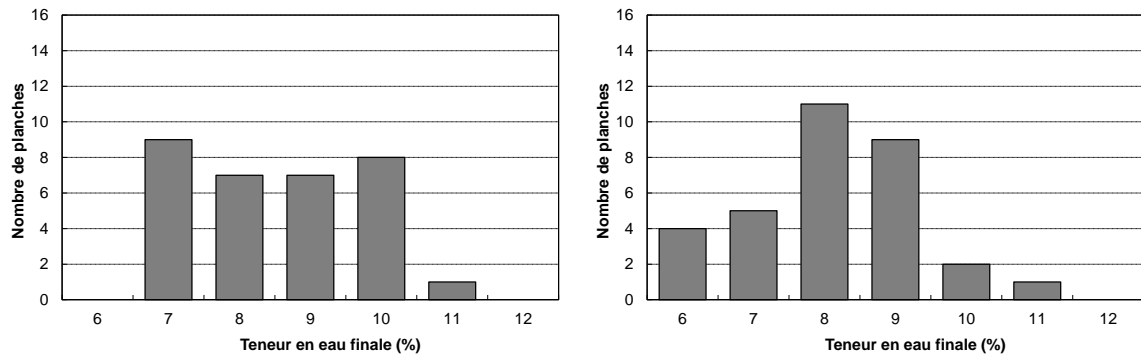
2 Teneur en eau finale

3 Ecart – type

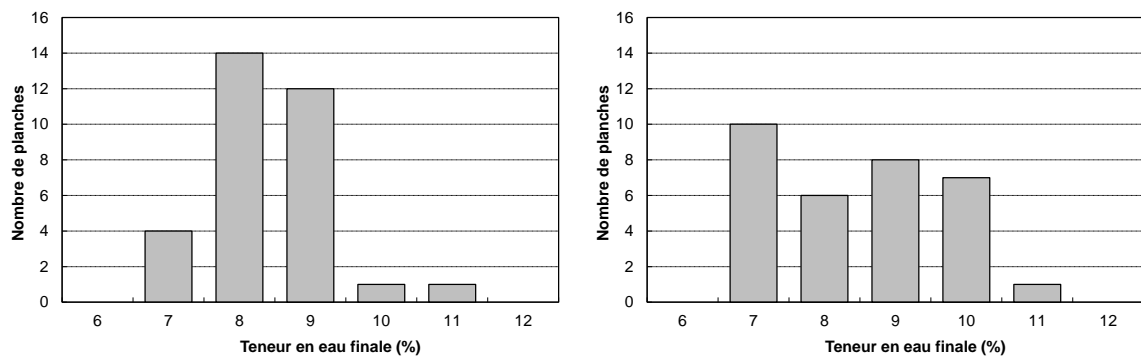
La Figure 2.13 donne des éléments complémentaires pour **l'analyse de l'homogénéité de la teneur en eau finale au sein de la pile**. La distribution de la teneur en eau finale est représentée sous forme d'histogrammes. Pour tous les séchages le faible écart – type indiqué dans le tableau 2.6 indique 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.



Séchages classiques



Séchages oscillants 1 (3h)



Séchages oscillants 2 (12h)

a. Première campagne

b. Deuxième campagne

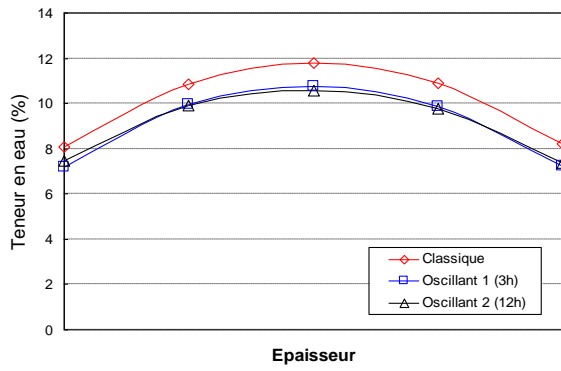
Figure 2.13. Distribution de la teneur en eau finale.

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

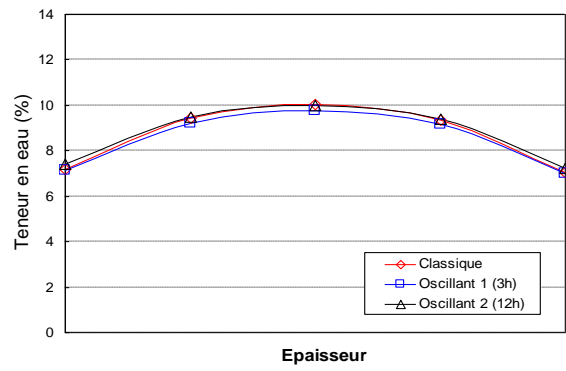
légèrement plus élevée. En revanche, les teneurs en eau finales des trois séchages de la campagne n°2 sont similaires.

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.

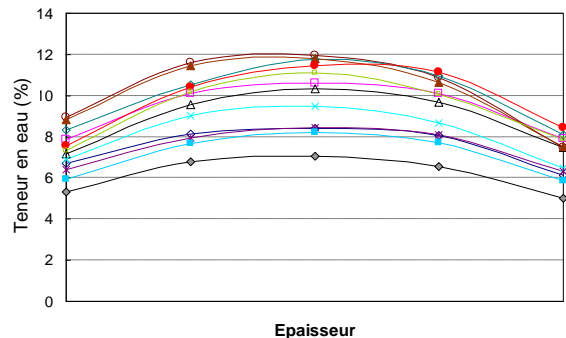
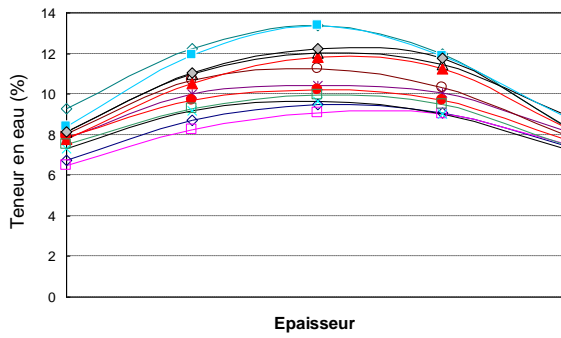


a. Première campagne

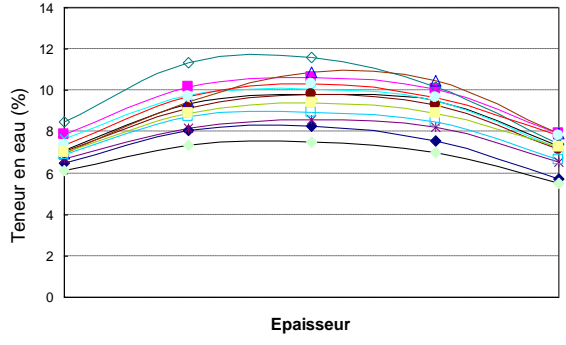
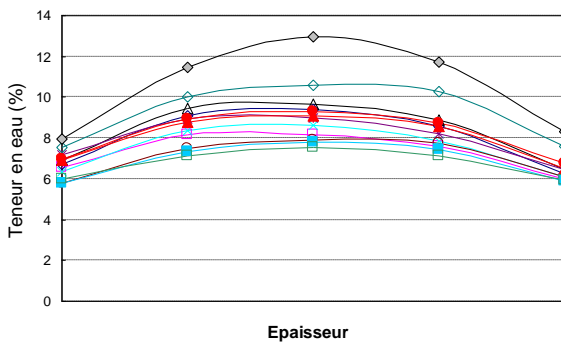


b. Deuxième campagne

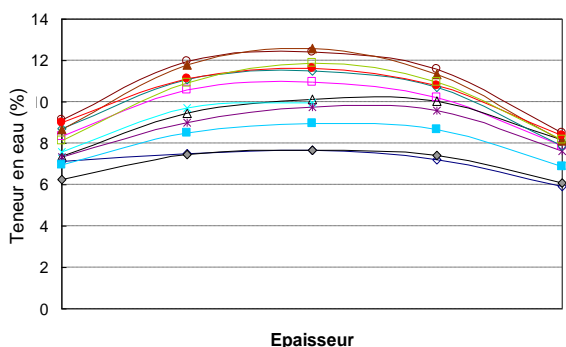
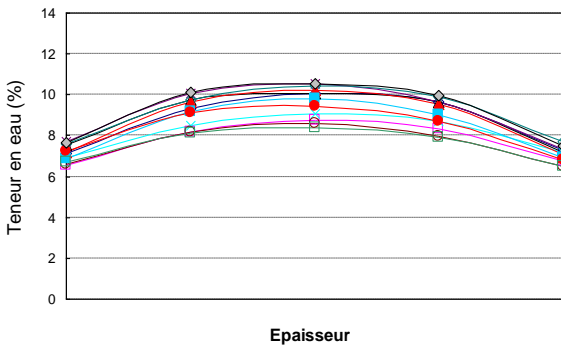
Figure 2.14. Profil de la teneur en eau finale dans l'épaisseur – valeurs moyennes de la pile.



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.

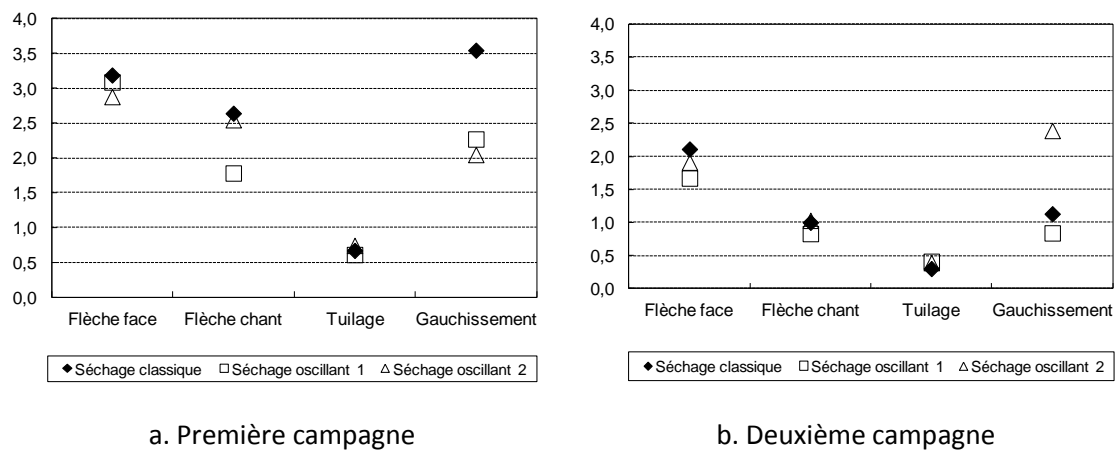


Figure 2.16. Déformations moyennes (axe des ordonnées en mm) produites pendant le séchage pour les deux campagnes.

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 notable 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.

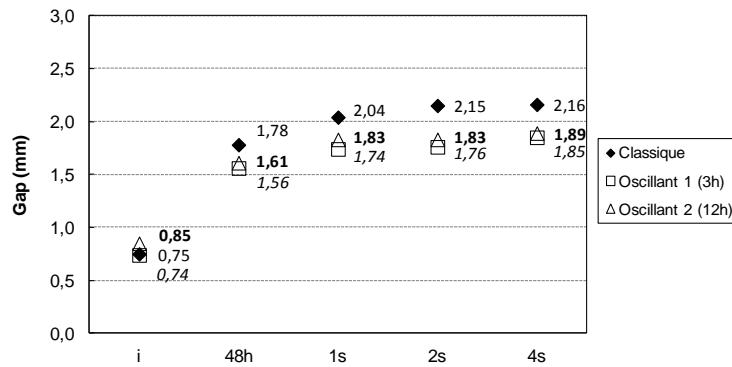


Figure 2.17. Evolution des contraintes résiduelles dans le temps.

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.

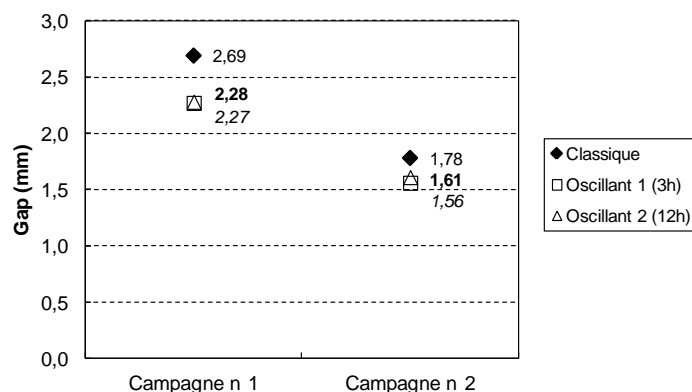


Figure 2.18. Récapitulatif des résultats du *slicing test* exprimés par le gap (mm) mesuré 48 heures après la fin de séchage.

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 entre 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			
<i>Comparaison entre classique et oscillants</i>								
	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
<i>Comparaison entre oscillants</i>								
	Oscillant 1		Oscillant 2		Oscillant 1		Oscillant 2	
	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%	Nombre échant.	%
oscillant 2 > oscillant 1	15	47	18	56	15	47	18	56
oscillant 2 ≈ oscillant 1	1	3	1	3	1	3	1	3
oscillant 2 < oscillant 1	16	50	13	41	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 2,30	D 2,25	D 3,81	M 3,58	M 1,41	D 2,63	D 3,03	M 2,49	D 2,05 ↑	FQ 2,27 ↓	D 2,60 ↓	D 2,57 ↑
7	FQ 3,60	FQ 3,61	FQ 3,30	FQ 2,94	FQ 3,21	FQ 2,38	FQ 2,20	FQ 1,63	M 2,87 ↓	D 2,23 ↓	FQ 2,19 ≈	FQ 2,45 ↑
6	D 1,95	D 1,45	D 3,05	D 3,09	D 3,18	D 1,41	D 2,07	D 1,97	D 2,81 ↓	D 1,27 ↓	D 2,12 ↑	D 2,05 ↑
5	D 1,99	D 2,53	D 3,43	FQ 3,02	D 1,34	D 1,84	D 2,27	D 1,36	D 1,44 ↑	D 2,23 ↑	D 2,98 ↑	D 2,53 ↑
4	D 2,04	D 1,41	M 1,78	D 3,16	D 1,45	D 2,17	D 1,13	D 2,34	D 1,96 ↑	D 2,26 ↑	M 2,11 ↑	D 2,11 ↓
3	M 1,37	D 2,43	M 3,76	M 2,83	FQ 1,70	D 3,09	D 3,26	D 1,67	D 1,54 ↓	D 2,05 ↓	FQ 2,56 ↓	D 2,15 ↑
2	M 2,99	FQ 2,25	FQ 2,95	FQ 3,25	D 3,44	FQ 2,19	M 2,95	D 3,26	D 2,75 ↓	D 2,54 ↑	FQ 2,25 ↓	D 2,72 ↓
1	FQ 2,06	D 2,32	FQ 2,71	FQ 3,00	D 2,92	D 2,66	FQ 1,74	FQ 2,18	FQ 1,97 ↓	D 2,91 ↑	D 2,38 ↑	FQ 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
	4 ¹	6	3	2		5	5	5	5		6	7	4	6	
Dosse	2,07 ² (0,21) ³	2,07 (0,52)	3,43 (0,38)	3,13 (0,05)	15 2,48 (0,70)	2,47 (1,00)	2,23 (0,66)	2,35 (0,85)	2,12 (0,73)	20 2,29 (0,76)	2,09 (0,58)	2,21 (0,50)	2,52 (0,37)	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 1,17	FQ 1,40	FQ 1,49	Q 1,88	Q 1,18	FQ 1,41	M 1,01	M 1,18	FQ 0,72 ↓	FQ 1,16 ↓	FQ 1,35 ↑	Q 1,46 ↑
7	FQ 0,84	Q 2,23	FQ 1,65	FQ 1,36	FQ 0,85	Q 1,99	FQ 1,36	FQ 1,42	FQ 1,06 ↑	Q 1,93 ↓	FQ 1,60 ↑	FQ 1,66 ↑
6	M 1,28	Q 1,95	Q 1,99	Q 1,64	Q 1,49	Q 1,80	Q 1,83	Q 1,83	FQ 0,45 ↓	FQ 1,74 ↓	Q 1,45 ↓	Q 2,03 ↑
5	Q 1,01	Q 2,41	Q 2,17	Q 2,63	M 1,01	Q 1,63	M 1,73	Q 1,90	Q 1,31 ↑	Q 2,44 ↑	Q 1,70 ↓	Q 2,46 ↑
4	Q 1,04	Q 2,38	D 1,72	Q 1,91	Q 1,54	Q 1,70	D 1,39	M 1,88	M 1,05 ↓	Q 2,03	D 1,54 ↑	M 2,08 ↑
3	Q 1,70	FQ 1,99	Q 2,12	FQ 2,32	Q 1,21	M 1,98	Q 1,70	FQ 1,99	M 0,80 ↓	FQ 1,99 ≈	Q 1,66 ↓	FQ 1,86 ↑
2	FQ 1,22	FQ 2,01	Q 1,94	Q 2,39	FQ 1,19	FQ 1,60	M 1,62	Q 1,90	FQ 1,13 ↓	FQ 1,78 ↑	FQ 1,87 ↑	Q 2,12 ↑
1	FQ 1,57	Q 2,00	FQ 2,16	FQ 1,31	FQ 1,88	Q 1,93	FQ 1,25	FQ 1,38	FQ 2,10 ↑	Q 1,88 ↓	FQ 2,20 ↑	FQ 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 1,72	-	-	1	-	1 1,39	-	-	1	-	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 paraître 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'aéroulque 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,

Chapitre 2

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.