



AVERTISSEMENT

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

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

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

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Séchage des bois ronds à basse température

Rapport de stage de Master 2 FAGE



Baptiste GUERINEAU

Maître de stage : **Romain REMOND**

2013/2014

Sommaire

Introduction	1
1. Caractérisation de l'écorce	2
1.1. Matériel et méthode	3
1.1.1. Détermination des isothermes de sorption.....	3
a) Echantillonnage.....	3
b) Equipement de mesure.....	4
c) Méthode de mesure.....	4
1.1.2. Détermination des coefficients de diffusion	5
a) Echantillonnage.....	6
b) Equipement de mesure.....	6
c) Méthode de mesure.....	6
1.2. Résultats	9
1.2.1. Isothermes de sorption	9
1.2.2. Coefficient de diffusion	12
2. Expériences de séchage	153
2.1. Matériel et méthodes.....	153
2.1.1. Mise en place de l'enceinte	153
2.1.2. Préparation des échantillons	164
2.1.3. Sondes et thermocouples	187
2.2. Résultats	1918
2.2.1. Première expérience de séchage.....	1918
2.2.2. Deuxième expérience de séchage	210
3. Discussion	243
CONCLUSION	265
BIBLIOGRAPHIE	265

INTRODUCTION

Le laboratoire d'accueil de ce stage est le LERMaB (Laboratoire d'Etude et de Recherche sur le Matériau Bois) sur le campus de l'ENSTIB (Ecole Nationale Supérieure des Techniques et des Industries du Bois) d'Epinal. Ce laboratoire pluridisciplinaire relie le domaine de la recherche et les industries de la filière bois. De fait, il mobilise et développe des connaissances fondamentales et appliquées à des échelles allant de la molécule jusqu'à des structures bois.

Le stage dont il est question dans ce rapport s'inscrit dans le cadre du projet CoolWood qui vise à mettre en place un procédé innovant de préservation du matériau bois et du maintien de sa qualité par un stockage des grumes à une température et à une humidité relative maîtrisées. Plus précisément, les températures de stockage se situeraient autour de 10°C.

Cette technique innovante de préservation des grumes contre les attaques de pathogènes pourrait remplacer d'autres plus coûteuses en énergie, ou plus polluantes comme les méthodes de protection humide, d'ensilage et de traitements chimiques.

La possibilité de stockage des grumes a un intérêt dans la filière forêt-bois par exemple lors d'un rassemblement dans le temps et dans l'espace de productions de petits exploitants afin de les commercialiser en commun, ou bien pour un exploitant forestier voulant assurer un apport en grumes constant dans le temps aux scieries. Un tel stockage peut aussi intervenir lors de catastrophes comme une tempête ou une épidémie forestière, qui provoquent des chablis et une dégradation par les phytopathogènes des arbres à terre : un stockage est alors nécessaire afin d'éviter la chute de la valeur marchande des grumes et donc une baisse importante des prix.

Ainsi, les sous-tâches 1.2 et 1.3 du projet CoolWood qui font l'objet de ce stage, s'intéressent aux effets des basses températures sur la cinétique du séchage du bois. En effet, le stockage du bois tel que le projet CoolWood l'envisage, induit probablement le séchage des grumes.

Habituellement, dans la filière bois, le séchage est une étape indispensable lors de la première transformation en scierie, elle permet une mise à l'équilibre de la teneur en eau du bois avec son environnement. Cela permet d'éviter après la pose l'apparition de fentes, dues au retrait du bois. Ce séchage peut avoir lieu à une température ambiante, pour le séchage naturel (mis à l'extérieur), ou dans une fourchette de températures allant de 40°C, pour le séchage à basse température, à plus de 100°C, pour le séchage à haute température.

Lorsque le bois sèche de manière artificielle dans une enceinte, en plus de la température, il est très important de réguler l'humidité relative de cette enceinte pour maîtriser la teneur en eau d'équilibre du matériau. En raison de la résistance aux transferts internes, un gradient d'humidité apparaît dans l'épaisseur du matériau au cours de son séchage. Ce gradient d'humidité est responsable via le retrait du bois, de l'apparition des contraintes de séchage.

En règle générale, la migration de l'eau dans le bois est un phénomène complexe : on assiste à de la diffusion de la vapeur d'eau dans les lumens cellulaires, à la diffusion de l'eau liée au sein des parois cellulaires, et l'eau libre migre par convection sous l'effet de la pression

capillaire. Ces transferts de l'eau dans le bois sont fortement couplés avec les transferts de chaleur. Ces transferts ont lieu dans les trois directions du matériau : longitudinale, radiale et tangentielle. Toutefois la vitesse des transferts varie selon ces axes, du fait du caractère anisotrope du matériau, c'est-à-dire de la capacité de ses paramètres physiques à changer selon l'axe d'étude (perméabilité, coefficient de diffusion).

De fait, l'étude des transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux est nécessaire pour la compréhension de la cinétique du séchage du bois (Basilico and Martin, 1984 ; Perre and Degiovanni, 1990 ; Boukadida et al., 2000)

Toutefois, on trouve peu d'études sur le séchage de bois autour de températures aussi basses que 10°C. De plus, la plupart des études qui portent sur le séchage s'intéressent au bois déjà scié et non à la grume. Cette dernière est relativement cylindrique et dispose encore de son écorce, dont les propriétés de diffusion de l'eau et de perméabilité diffèrent du bois; il n'est donc pas possible de conclure sur le séchage de grume à basses températures avec une étude du séchage de bois sans écorce.

Dès lors, se posent les questions suivantes : quelles sont les propriétés de l'écorce en termes de migration de l'eau ? Sont-elles si différentes de celles du bois ? Quelles sont les cinétiques de séchage de billons avec et sans écorce ?

Pour répondre à ces interrogations, le stage s'est réalisé à travers deux phases :

- i) La caractérisation de l'écorce de trois essences : l'épicéa (*Picea abies*), le chêne (*Quercus* ???) et le hêtre (*Fagus sylvatica*). Plus précisément, deux paramètres physiques ont été mesurés : l'isotherme de sorption et le coefficient de diffusion de l'eau. Ces paramètres serviront à alimenter le code TransPore, code simulant les transferts couplés de masse et de chaleur en milieu poreux (Perré et Degiovanni 1990). Les expériences de séchage de billons d'épicéa avec ou sans écorce à basse température (10°C) dans une enceinte climatique. Les résultats obtenus seront comparés avec les simulations de séchage par le code TransPore.
- ii) Les expériences de séchage de petits billons d'épicéa avec ou sans écorce à basse température (10°C) dans une enceinte climatique. Les résultats obtenus seront comparés avec les simulations de séchage par le code TransPore. Lorsque le potentiel prédictif du code aura été validé pour ces petits billons, il sera alors utilisé pour extrapoler le séchage à basse température de grumes de grandes dimensions.

1. Caractérisation de l'écorce

Dans ce rapport, nous appellerons 'écorce' tous les tissus extérieurs au bois (xylème secondaire).

Durant cette tâche, deux caractéristiques physiques de l'écorce ont été mesurées : l'isotherme de sorption, mesuré à l'aide d'une machine DVS (Dynamique Vapor Sorption), et le coefficient de diffusion, obtenu grâce à une machine VGA (Versatile Gravimetric Analyser). L'isotherme de sorption a été déterminée pour les trois essences épicéa, chêne et hêtre.

Le coefficient de diffusion n'a été mesuré que sur l'épicéa et le chêne, mais l'échantillonnage de l'écorce de hêtre a été réalisé.

1.1. Matériel et méthode

1.1.1. Détermination des isothermes de sorption

Tout d'abord, la teneur en eau d'un matériau est définie par la masse d'eau qu'il contient sur sa masse anhydre. Pour le bois, cette teneur en eau varie selon son environnement car il est hygroscopique : il tend à se mettre en équilibre avec l'humidité relative de cet environnement. Il finit par atteindre une teneur en eau d'équilibre.

L'isotherme de sorption d'un tel matériau est la courbe représentant sa teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative de son environnement et à température constante (figure 1).

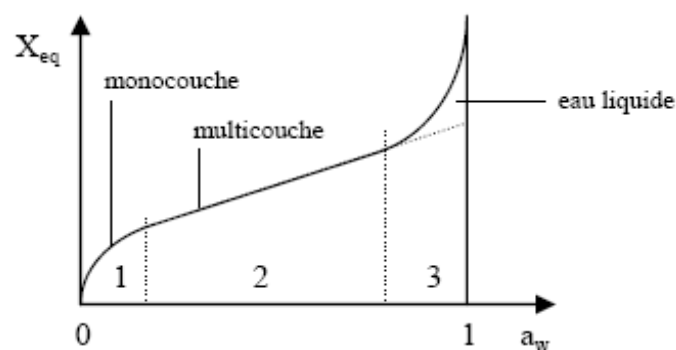


Figure 1 : les différentes phases de l'isotherme de sorption

On distingue différentes phases sur une isotherme de sorption :

- Phase 1 : la teneur en eau du matériau est très faible, l'eau est fortement liée à ses composants par des liaisons hydrogène et de Van der Waals. On dit qu'elle forme une monocouche d'eau.
- Phase 2 : la teneur en eau est moyenne, l'eau se lie faiblement aux composants du matériau et en quantité suffisante pour former une multicouche d'eau.
- Phase 3 : l'humidité relative est élevée, On peut alors observer de la condensation capillaire : des gouttes d'eau se forment à l'intérieur des cellules. L'eau est libre sous forme liquide ou gazeuse dans les lumens des cellules.

a) Echantillonnage

Nous avons utilisé l'écorce des trois différentes essences, épicéa, chêne et hêtre, pour ces expériences de mesure d'isotherme de sorption.

L'écorce des différentes essences a été prélevée sur le billon encore vert, car plus facile à découper sans séparer les différents tissus de l'écorce.

L'écorce a ensuite été découpée de façon à obtenir des morceaux de dimension relativement semblable pour chaque essence, tout en veillant à garder la cohésion entre les différentes couches de l'écorce afin de ne pas biaiser la vitesse d'adsorption de l'eau par celle-ci.

Les échantillons d'écorce d'épicéa de la première et de la deuxième expérience avaient pour dimensions environ $2*1*1\text{mm}^3$, pour une masse anhydre de 32,86mg et de 36,44mg respectivement.

Les échantillons d'écorce de chêne de la première et de la deuxième expérience avaient pour dimensions environ $2*2*3\text{mm}^3$, pour une masse anhydre de 57,57mg et de 32,09mg respectivement.

Les échantillons d'écorce de hêtre de la première et de la deuxième expérience avaient pour dimensions environ $2*1*1\text{mm}^3$, pour une masse anhydre de 22,62mg et de 34,49mg respectivement.

b) Equipement de mesure

La DVS utilise une technique gravimétrique qui permet de mesurer des variations de masse d'un échantillon tout en contrôlant différents paramètres de la chambre d'essai comme la température, le taux d'humidité relative et le flux d'air.

La machine est pilotée par ordinateur sur lequel on peut définir une méthode d'analyse précise pour une expérience : une succession de « paliers » caractérisés par une température et une humidité relative précises. Le passage d'un palier au suivant peut être piloté par un temps maximum de palier ou par un équilibre de la masse (dm/dt) de l'échantillon.



Figure 2 : Machine DVS

c) Méthode de mesure

➤ Méthode de sorption

Le premier palier des expériences est souvent un séchage de l'échantillon ; on impose une humidité relative de 0% dans la chambre d'essai afin d'obtenir une masse anhydre (M_0) de l'échantillon qui nous permet de calculer la teneur en eau d'équilibre de celui-ci aux différents paliers de l'expérience.

Dans les expériences que nous avons menées, seule l'humidité relative varie dans la chambre d'essai, les autres paramètres tels que la température et le flux d'air restent constants. Cela nous permet de tracer l'isotherme de sorption de l'échantillon, c'est-à-dire la courbe de la teneur en eau d'équilibre de l'échantillon en fonction de l'humidité relative de son environnement.

Seule la phase d'adsorption a été réalisée pour les échantillons : l'humidité relative varie selon 7 paliers successifs de 0 à 90% avec une augmentation de 15% par palier. La température est constante tout le long de l'expérience : la consigne est de 20°C.

Nous avons répété une nouvelle fois l'expérience pour chacune des essences.

➤ Détermination des isothermes de sorption

Comme les expériences d'adsorption avec la DVS ne se font qu'avec un nombre limité de paliers d'humidité relative, nous ne disposons pour chaque échantillon que de l'évolution de

la teneur en eau moyenne en fonction du temps et des conditions climatiques mesurées autour de l'échantillon (température et humidité relative).

Or, nous nous sommes intéressés à la courbe de la teneur en eau d'équilibre en fonction de l'humidité relative et à température constante, pour chacun des échantillons. Cette courbe, ou isotherme de sorption, a pu être estimée grâce au modèle Hailwood et Horrobin (HH) (Hailwood and Horrobin, 1946), qui se présente sous la forme de l'équation (1) suivante :

$$u = \frac{\phi}{A + B \cdot \phi - C \cdot \phi^2} \quad (1)$$

Avec u : la teneur en eau de l'échantillon

A, B et C : des constantes

ϕ : l'humidité relative de l'enceinte

Un programme a été utilisé pour estimer les trois constantes A, B et C pour chacun des échantillons afin d'interpoler les points expérimentaux et ainsi obtenir les courbes recherchées.

1.1.2. Détermination des coefficients de diffusion

La diffusion d'un fluide est un écoulement résultant du gradient de concentration de ce fluide (Fick 1885). Dans le bois, l'eau migre soit sous forme gazeuse dans le lumen des cellules, soit sous forme d'eau liée aux parois des cellules.

Cette diffusion est supposée obéir à la loi de Fick qui exprime le flux de masse résultant du gradient de teneur en eau (eq. 2) :

$$\overrightarrow{Jm} = -D \cdot \rho_o \cdot \overrightarrow{grad} X \quad (2)$$

Avec \overrightarrow{Jm} : densité de flux massique (en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

Avec D : coefficient de diffusion de l'eau à travers le matériau (en $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

ρ_o : masse volumique du matériau

$\overrightarrow{grad} X$: gradient de la teneur en eau au sein du matériau

Ici, la force motrice utilisée est le gradient de teneur en eau, mais il est possible d'utiliser d'autres forces motrices comme le gradient de fraction massique de vapeur (eq.3), le potentiel chimique, etc. avec les coefficients de diffusion associés. On peut retrouver une équivalence entre ces différentes expressions de la densité de flux lorsque l'on se situe en régime isotherme.

$$\overrightarrow{Jm} = -f \cdot Dv \cdot \overrightarrow{grad} Wv \quad (3)$$

Avec Dv : coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$)

$\overrightarrow{grad} Wv$: gradient de la fraction massique de vapeur d'eau dans le matériau

f : diffusivité réduite

La diffusivité réduite « f » peut s'écrire selon l'équation (4):

$$f = \frac{\text{Coeff. de diffusion de la vapeur d'eau dans le bois}}{\text{Coeff. de diffusion de la vapeur d'eau dans l'air}} \quad (4)$$

La diffusivité réduite est adimensionnelle et toujours comprise entre 0 et 1, puisque le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau dans le bois est toujours inférieur à celui de la vapeur d'eau dans l'air. Plus f est proche de 1, plus le matériau est perméable à la vapeur d'eau.

a) Echantillonnage

Nous avons utilisé des morceaux d'écorce de 88*45*1.5mm³ pour l'épicéa, de 68*60*4mm³ pour le chêne.

Chacun des échantillons a sa face intérieure recouverte de colle époxy et de papier aluminium afin de rendre la migration de l'eau possible uniquement depuis la face intérieure vers l'extérieur de l'écorce, et ce pour simuler le fait que l'écorce soit encore sur le billon (figures 3 et 4).



Figure 3 : échantillons d'écorce d'épicéa, chêne et de hêtre (de gauche à droite) ; face libre



Figure 4 : échantillons d'écorce de d'épicéa, de chêne et de hêtre ; face recouverte

b) Equipement de mesure

La VGA (figure 5), comme la DVS, utilise la gravimétrie pour mesurer des variations de masse d'un échantillon tout en contrôlant les différents paramètres physiques de la chambre d'essai : la température, l'humidité relative et le flux d'air. Les expériences se déroulent à pression atmosphérique.

Les expériences menées sur cette machine ont eu pour but de mesurer le coefficient de diffusion de l'écorce des différentes essences.



Figure 5 : machine VGA

c) Méthode de mesure

La méthode est la même pour les deux essences testées : après une phase de séchage de 12h à 45°C et 0% d'humidité relative dans la chambre d'essai, un premier palier est imposé

pendant 6h à 25°C et 0% d'humidité relative, suivi d'un deuxième de 6 jours à 25°C et 40% d'humidité relative, et d'un dernier palier de 6 jours à 25°C et 80% d'humidité.

De la même façon que pour les expériences de sorption, l'étude de la diffusion de l'eau à travers l'écorce des différentes essences ne s'est réalisée qu'avec 3 paliers d'humidité relative et avec le système VGA, les courbes obtenues ne montrent que la teneur en eau moyenne de l'échantillon au cours du temps.

Il est toutefois possible d'exploiter ces courbes pour en extraire la diffusivité réduite de chaque échantillon.

Pour cela, deux méthodes analytiques ont été utilisées pour déterminer le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau pour chaque échantillon d'écorce. En effet, plusieurs méthodes sont nécessaires sachant que la valeur du coefficient de diffusion obtenue peut varier jusqu'à 50% entre chaque méthode (Agoua et al., 2001).

Le programme utilisé déduit de ses résultats la diffusivité réduite f pour chaque méthode.

➤ Hypothèse du milieu semi-infini et méthode de la pente

Cette méthode fait l'hypothèse que l'échantillon représente un milieu semi-infini, c'est-à-dire que l'on considère que son épaisseur est suffisamment grande pour qu'une variation d'un paramètre physique, comme une élévation de la température, sur une des deux faces dans l'axe de l'épaisseur n'ait pas d'influence sur la face opposée. Cette hypothèse n'est valable seulement que sur des temps courts.

Dès lors, on définit la masse adimensionnelle « m^* » suivant l'équation (5) suivante :

$$m^* = \frac{\Delta m}{[\Delta m]_{max}} \quad (5)$$

Avec Δm : la différence entre la masse au temps t et la masse initiale.

$[\Delta m]_{max}$: la différence entre la masse à l'équilibre et la masse initiale.

La masse adimensionnelle est donc définie entre 0 et 1.

On trace alors la courbe de m^* en fonction de la racine carrée du temps (figure 6), et on mesure la pente de la partie linéaire de cette courbe. A l'aide d'un calcul non décrit dans ce rapport, on en déduit le coefficient de diffusion D .

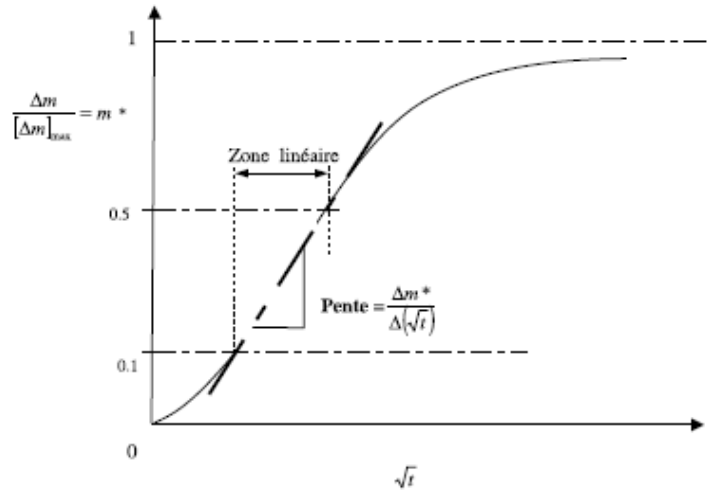


Figure 6 : courbe de m^* en fonction du temps et identification de la pente

➤ Hypothèse du milieu fini et méthode de la demi-adsorption

L'hypothèse du milieu fini considère que l'échantillon a une épaisseur finie et donc que des changements physiques sur une face affectent l'autre.

Le calcul du coefficient de diffusion se fait à partir de la même courbe que pour la méthode précédente (Figure 7) et à l'aide l'équation (6) :

$$D \approx 0,049 \frac{e^2}{t_{0,5}} \quad (6)$$

Avec D : coefficient de diffusion de l'eau dans l'échantillon

e : épaisseur de l'échantillon

$t_{0,5}$: temps de demi-adsorption ou $t(m^*=0.5)$

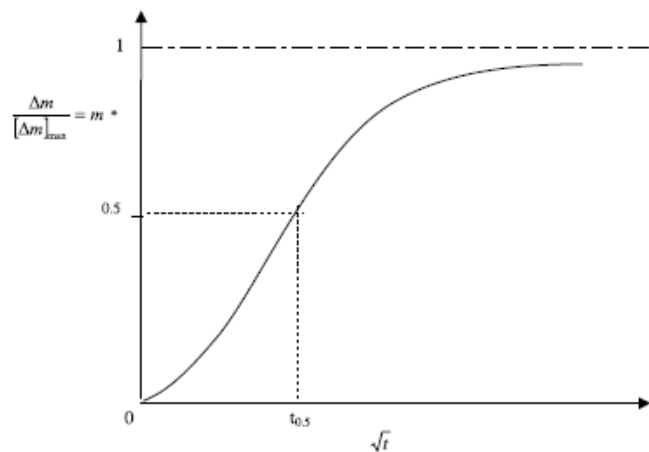


Figure 7 : courbe de m^* en fonction du temps et identification du temps de demi-adsorption

Le coefficient de diffusion de l'écorce d'épicéa ainsi que sa diffusivité réduite ont été estimés en appliquant ces deux méthodes de calcul sur le palier de 40 à 80% d'humidité relative.

De la même façon pour l'écorce de chêne, nous nous sommes servis du palier de 0 à 40% d'humidité relative.

I.2. Résultats

I.2.1. Isothermes de sorption

➤ Ecorce d'épicéa

Les résultats d'adsorption des échantillons d'écorce d'épicéa réalisés grâce à la machine DVS sont donnés dans les tableaux 1 et 2. Ceux-ci présentent la consigne d'humidité relative de l'enceinte, la teneur en eau d'équilibre de l'échantillon et son gain de masse pour chacune de ces consignes.

Tableau 1 : résultats de l'expérience pour le premier échantillon d'épicéa

Sample RH (%)	Mass change (%)
0	0
12,6	2,63
27,7	4,48
42,2	6,52
56	9,05
69,3	12,79
82,1	20,07

Tableau 2 : résultats de l'expérience d'adsorption pour le deuxième échantillon d'écorce d'épicéa

Sample RH (%)	Mass change (%)
0	0
12,7	3,7
27,8	5,85
42,2	7,78
56,4	10,12
70,1	14,09
83,2	22,17

D'après ces résultats, nous avons estimé les 3 constantes A, B et C (tableau 3) qui permettent de tracer l'isotherme de sorption des échantillons d'écorce d'épicéa (Figure 8).

Tableau 3 : valeur des constantes A, B et C ainsi que les pourcentages d'erreur correspondant pour les échantillons d'écorce d'épicéa

	Valeur	Erreur
A	2.999	5.000E-003
B	13.339	0.5000
C	13.238	0.5000
	Erreur globale	9.732E-002 %

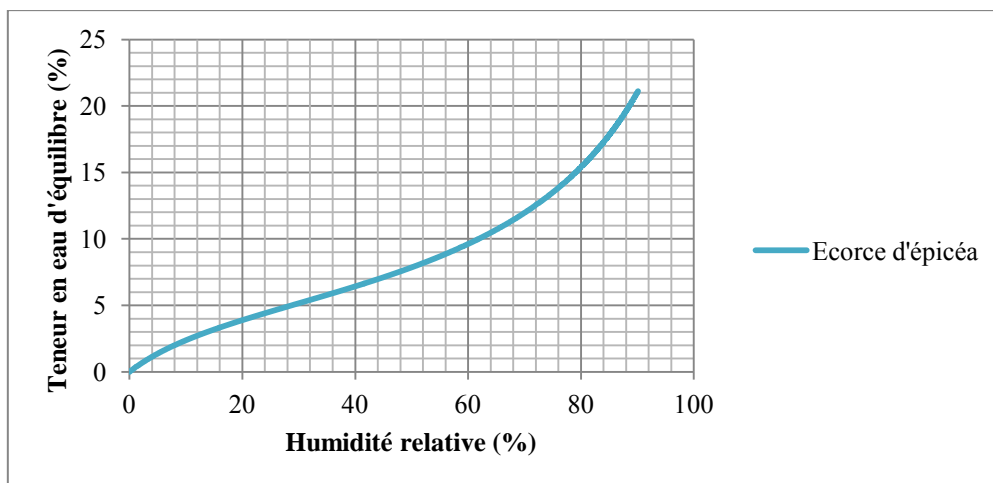


Figure 8 : isotherme d'adsorption pour les échantillons d'écorce d'érable

➤ Ecorce de chêne

Les résultats d'adsorption des échantillons d'écorce de chêne sont présentés tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : résultats de l'expérience d'adsorption pour le premier d'écorce de chêne

Mass change (%)
0
2,85
4,79
6,79
9,03
11,72
15,85

Tableau 5 : résultats de l'expérience d'adsorption pour le deuxième échantillon d'écorce de échantillon chêne

Sample RH (%)	Mass change (%)
0	0
12,8	3,39
29	5,71
44,5	7,96
58,1	10,43
69,9	13,47
81,4	18,66

L'exécutable a permis l'estimation des trois constantes A, B et C pour les échantillons d'écorce de chêne (tableau 6).

Tableau 6 : valeur des constantes A, B et C ainsi que les pourcentages d'erreur correspondant pour les échantillons d'écorce de chêne

	Valeur	Erreur
A	3.646	5.000E-003
B	9.232	0.5000
C	8,298	0.5000
	Erreur globale	0.180 %

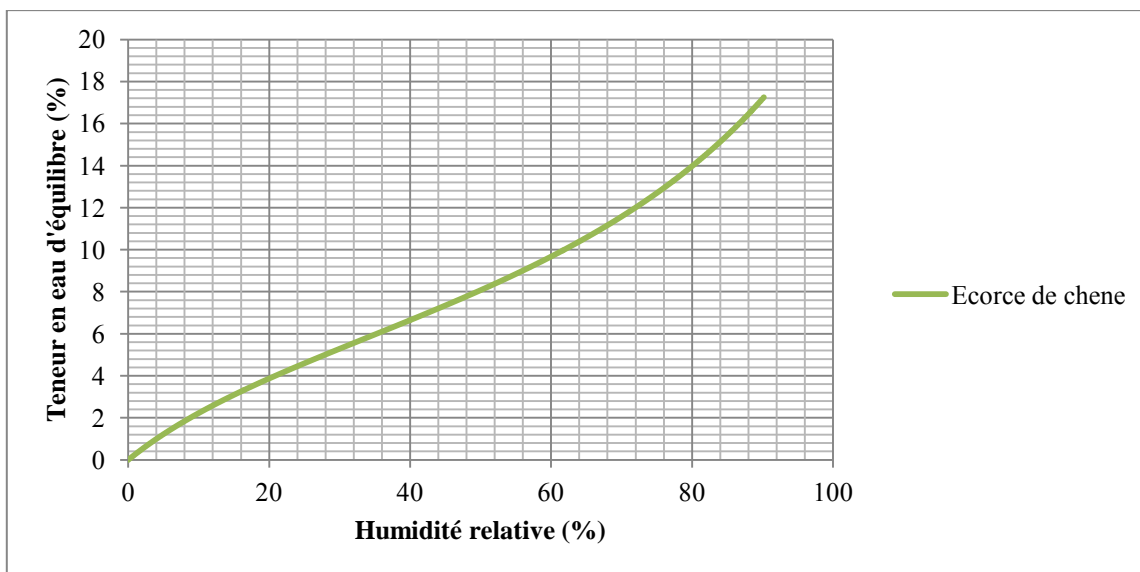


Figure 9 : isotherme d'adsorption pour les échantillons d'écorce de chêne

➤ Ecorce de hêtre

Les résultats des expériences d'adsorption sur les échantillons d'écorce de hêtre sont présentés dans les tableaux 6 et 7.

Tableau 7 : résultats de l'expérience pour le premier échantillon

Sample RH (%)	Mass change (%)
0	0
12,6	3,3
27,7	5,3
42	7,34
56	10,04
69,6	13,5
82,7	19,48

Tableau 8 : résultats de l'expérience d'adsorption pour le deuxième échantillon d'écorce de hêtre

Sample RH (%)	Mass change (%)
0	0
12,7	3,12
28	5,26
42,5	7,42
56,5	9,89
69,7	13,15
82,3	19,05

L'exécutable a permis l'estimation des trois constantes A, B et C pour les échantillons d'écorce de hêtre (tableau 9), afin de tracer l'isotherme de sorption pour ces échantillons (figure 10).

Tableau 9 : valeur des constantes A, B et C ainsi que les pourcentages d'erreur correspondant pour les échantillons d'écorce de hêtre

	Valeur	Erreur
A	3.386	5.000E-003
B	10,554	0.5000
C	10,138	0.5000
	Erreur globale	0.172 %

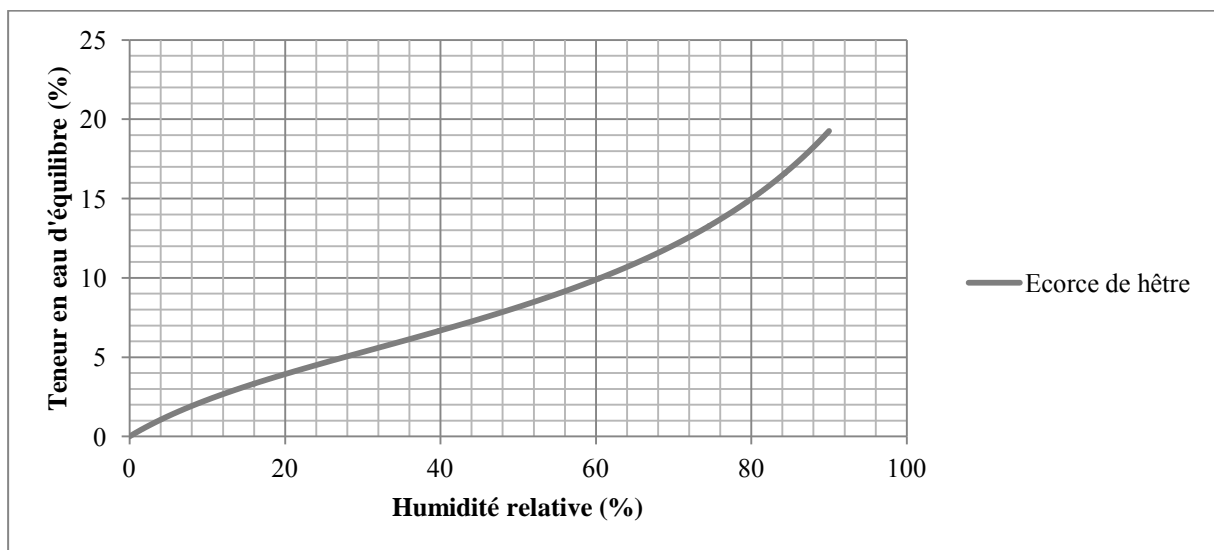


Figure 10 : isotherme d'adsorption pour les échantillons d'écorce de hêtre

1.2.2. Coefficient de diffusion

Les coefficients de diffusion des échantillons d'écorce d'épicéa obtenus grâce aux deux méthodes de calculs ainsi que les diffusivités réduites sont présentés dans les figures 11 et 12. Ces figures contiennent aussi le coefficient de diffusion et la diffusivité réduite moyens du bois d'épicéa (Zohoun and Perre, 1998).

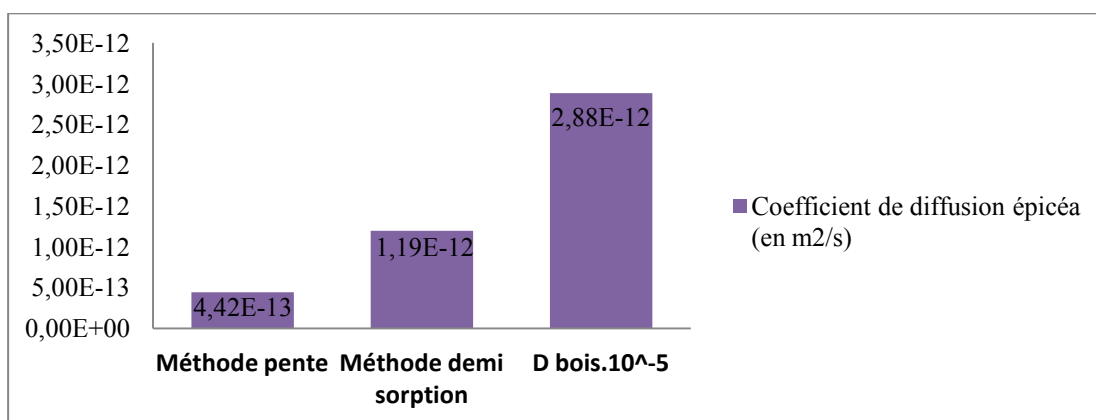


Figure 11 : coefficients de diffusion des échantillons d'écorce et du bois d'épicéa

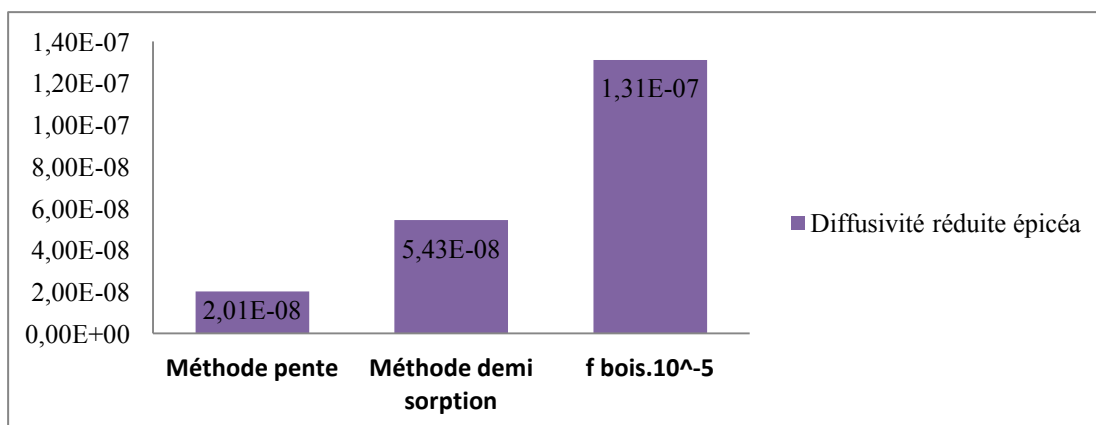


Figure 12 : diffusivité réduite des échantillons d'écorce et du bois d'épicéa

Les coefficients de diffusion des échantillons d'écorce de chêne obtenus grâce aux deux méthodes de calculs ainsi que les diffusivités réduites sont présentés dans les figures 13 et 14. Ces figures contiennent aussi le coefficient de diffusion et la diffusivité réduite moyens du bois de chêne (Zohoun and Perre, 1998).

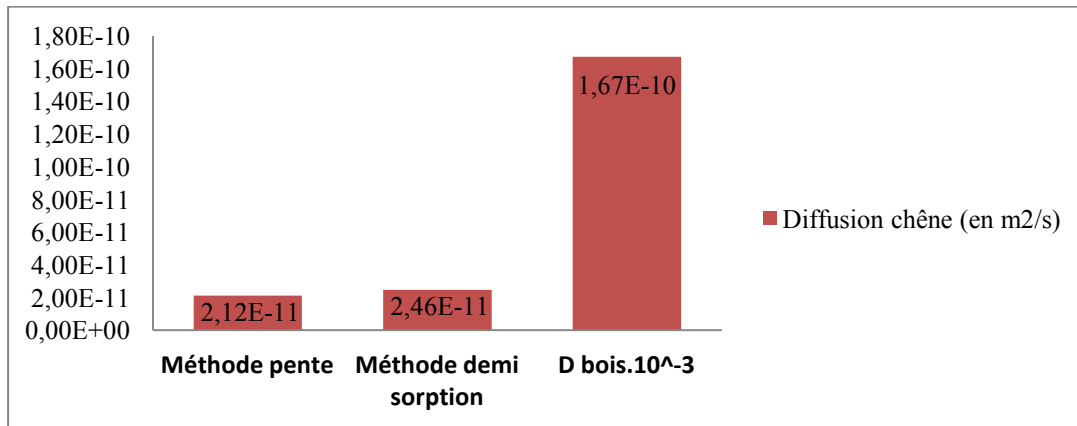


Figure 13 : coefficients de diffusion des échantillons d'écorce et du bois de chêne

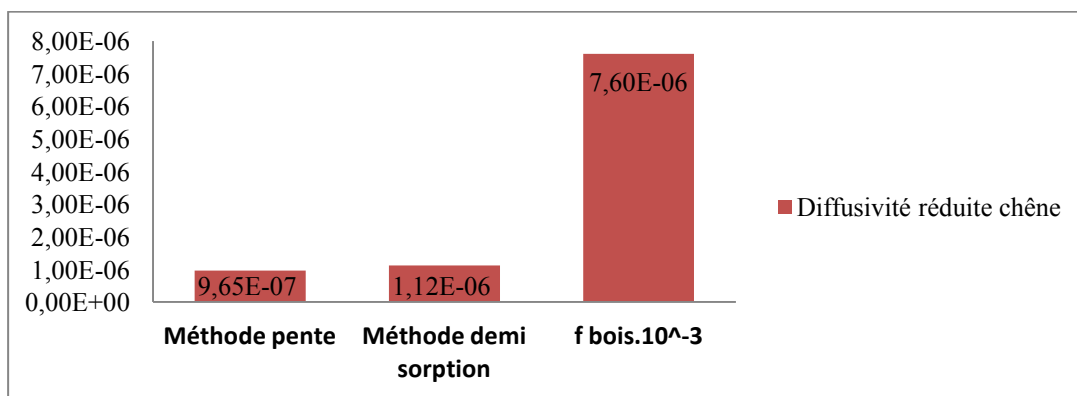


Figure 14 : diffusivité réduite des échantillons d'écorce et du bois de chêne

2. Expériences de séchage

2.1. Matériel et méthodes

2.1.1. Mise en place de l'enceinte

Les expériences de séchage ont eu lieu dans un container frigorifique de 1m³.

Un humidificateur a été construit et installé dans cette enceinte afin de réguler l'humidité relative : une boîte de plexiglas de 62*41*23cm³ renfermant une plaque de plexiglas inclinée sur laquelle coule un rideau d'eau régulée en température. L'air se refroidit et s'humidifie le long du rideau d'eau. A la sortie, il s'approche d'un état saturé en vapeur d'eau. Une résistance chauffante, non installée actuellement, devra élever la température de l'écoulement d'air à sa sortie pour atteindre la température de consigne dans l'enceinte. Ainsi, la température du rideau d'eau est proche de la température de rosée de l'air dans l'enceinte. L'installation de cet élément chauffant n'a pas été nécessaire en raison de la température basse des essais et du flux de chaleur à travers les parois de l'enceinte de l'extérieur vers l'intérieur.

Afin de réguler l'humidité de l'ensemble de l'air de l'enceinte, un renouvellement d'air en circuit fermé a été mis en place grâce à 3 ventilateurs, situés sur le haut de la plaque de devant. Ils attirent l'air de l'enceinte depuis une ouverture en bas de cette même plaque. L'air vient lécher la surface du rideau d'eau à l'intérieur de la boîte.

L'humidificateur est alimenté en eau par un cryothermostat Huber modèle Ministat 230 dont la température de consigne est toujours inférieure à celle du groupe froid de l'enceinte : pour les expériences de séchage la consigne du cryothermostat est de 3,00°C pour une température du réfrigérateur de 10°C.

Les variations de masse ont été mesurées par un capteur de force, situé dans l'enceinte et relié à un boîtier interface-indicateur pour cellule de charge modèle alpha-C, et par une balance Ohaus modèle Adventurer pro AV4101C, posée au-dessus de l'enceinte et dont les mesures s'effectuent à l'aide d'un plateau porte-échantillon communiquant avec la balance par un orifice pratiqué dans l'enceinte sous la balance. L'organisation de l'enceinte est montrée figure 15.



Figure 15 : photo de l'installation du matériel dans l'enceinte réfrigérante

2.1.2. Préparation des échantillons

Pour les expériences de séchage, une seule essence a été testée : l'épicéa.

A chaque expérience de séchage, deux billons sont placés dans l'enceinte frigorifique. L'un des deux est écorcé, l'autre non. On suppose qu'à chaque fois ces deux billons ont la même teneur en eau puisqu'ils ont été découpés à la suite l'un de l'autre dans la même grume.

Pour mesurer la teneur en eau des échantillons, une lamelle a été sciée dans la grume à la suite des deux billons, puis coupée de façon à obtenir un quartier contenant le centre du billon. Ce quartier a ensuite été découpé en morceaux classés selon leur distance par rapport au centre de la lamelle. Ces morceaux ont été séchés à l'étuve jusqu'à atteindre l'état anhydre. On détermine alors la teneur en eau des morceaux de la lamelle, et donc des échantillons, en fonction de la distance au centre du billon.

Nous avons évidés les échantillons à la scie cloche pour que leur séchage dure moins longtemps.

Durant le premier essai de séchage, des fentes sont apparues sur les billons (figure 16), dues à l'anisotropie du retrait dans la section transversale du billon, faussant l'expérience puisque ces fentes permettent à l'eau de migrer hors des billons sans résistance aux transferts. Pour les essais suivants, une fente de décharge de 2cm de large a été sciée de façon radiale dans chaque billon pour éviter l'apparition de fente.



Figure 16 : photo des billons fendus durant le séchage

Pour la première expérience de séchage, des feuilles d'aluminium ont été collées avec de la colle époxy sur l'intérieur et les extrémités longitudinales des échantillons (figure 17). Pour la seconde expérience, les feuilles d'aluminium recouvrent l'intérieur et une seule des extrémités longitudinales des échantillons (figure 18).



Figure 17 : photo des billons dont les deux extrémités longitudinales sont recouvertes de colle époxy et de papier aluminium



Figure 18 : photo du billon avec écorce dont une seule des extrémités longitudinales est recouverte de colle époxy et de papier aluminium ; face libre visible

Les dimensions et masses des billons de la première et de la deuxième expérience sont disposées dans les tableaux 10 et 11.

Tableau 10 : dimension et masse des deux billons de la première expérience

Billons 1ère expérience	Avec écorce	Sans écorce
Longueur (mm)	92	93
Diamètre (mm)	117,5	121
Epaisseur (mm)	24 (dont 1mm d'écorce)	22
Masse avant colle et aluminium (g)	547	487
Masse après colle et aluminium (g)	579	516

Tableau 11 : dimension et masse des deux billons de la deuxième expérience

Billons 2e expérience	Avec écorce	Sans écorce
Longueur (mm)	92	91,5
Diamètre (mm)	113	113
Epaisseur (mm)	26 (dont 1mm d'écorce)	25
Masse avant colle et aluminium (g)	557	503
Masse après colle et aluminium (g)	590	535

2.1.3. Sondes et thermocouples

Des sondes de température et de d'humidité relative ont été installées dans l'enceinte pour rendre compte des conditions de séchage. De même, 4 thermocouples ont servi pour les mesures de températures à l'intérieur des billons (figure 19) : pour chacun des deux billons placés dans l'enceinte, 2 thermocouples viennent s'enfoncer selon l'axe longitudinal selon l'organisation suivante :

- Billon sans écorce
 - Thermocouple 104 : à 4.5mm de la face interne
 - Thermocouple 105 : à 2.5mm de la face externe
- Billon avec écorce
 - Thermocouple 106 : à 4mm de la face interne
 - Thermocouple 107 : à 2mm de la face externe

Les thermocouples s'enfoncent jusqu'à la moitié de la longueur des billons.



Figure 19 : photo du billon sans écorce dont une seule des extrémités longitudinales est recouverte de colle époxy et de papier aluminium ; thermocouples 104 et 105 visibles

Les différentes sondes, thermocouples et balances sont reliés à une centrale d'acquisition Agilent 34970A pilotée par ordinateur grâce à un programme mis au point sur le logiciel Visual Basics 6.0.

2.2. Résultats

2.2.1. Première expérience de séchage

La première expérience porte sur des billons d'épicéa évidés et rendus hermétiques sur leurs extrémités longitudinales ainsi que sur leur face interne, les pertes d'eau ne peuvent donc se faire que de façon transversale, à travers l'écorce pour l'échantillon non écorcé et à travers le bois pour celui écorcé.

➤ Teneur en eau

La courbe de la teneur en eau des morceaux issus du quartier tranché dans la grume en fonction de la distance au centre est présentée dans la figure 20.

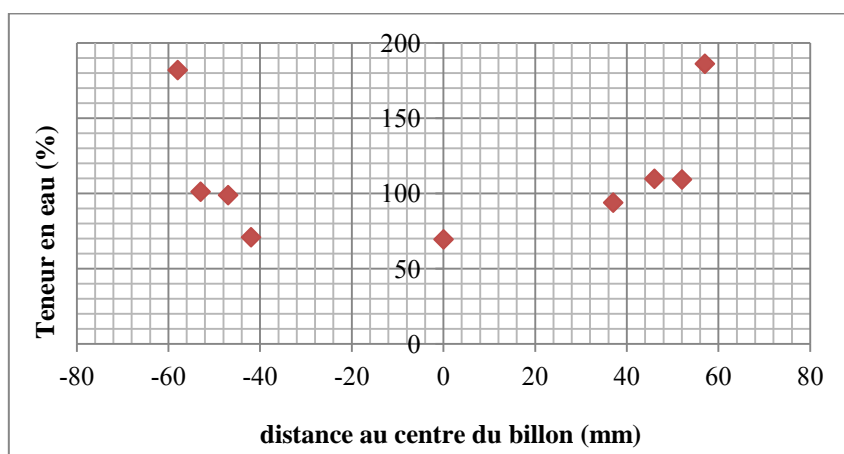


Figure 20 : Teneur en eau des différents morceaux issus de la coupe en quartier d'une tranche de grume d'épicéa

Il est à noter que les deux points les plus éloignés du centre du quartier représentent les deux morceaux d'écorce seule.

➤ Température et humidité relative

La température moyenne durant cette première expérience était de 10,64°C et l'humidité relative moyenne était de 66.99%.

Les courbes des températures relevées par les différents thermocouples placés ans les billons sans écorce ou avec écorce sont présentées respectivement dans les figures 21 et 22.

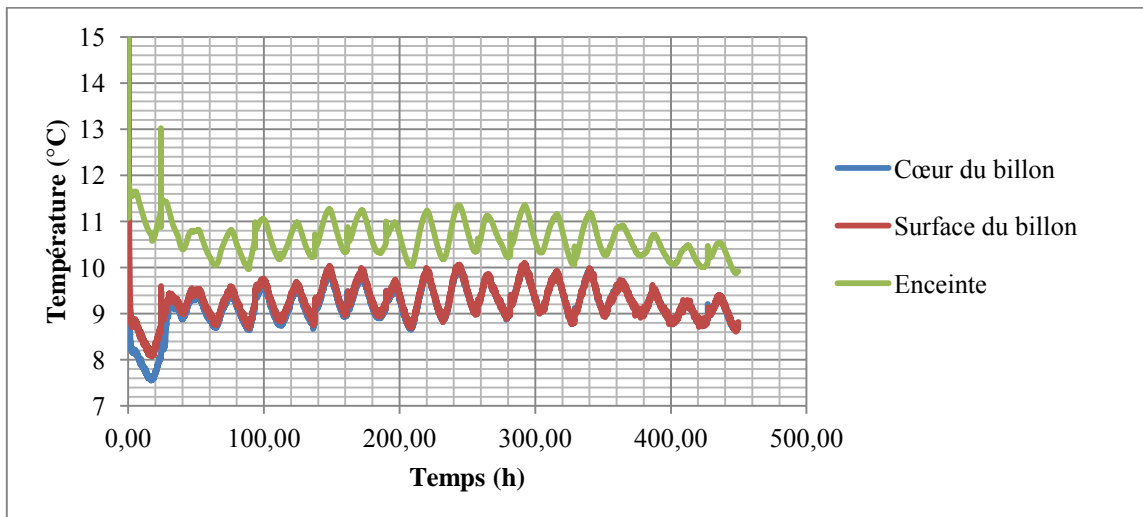


Figure 21 : relevés de températures par les thermocouples dans le **billon écorcé** et par la sonde placée dans l'enceinte

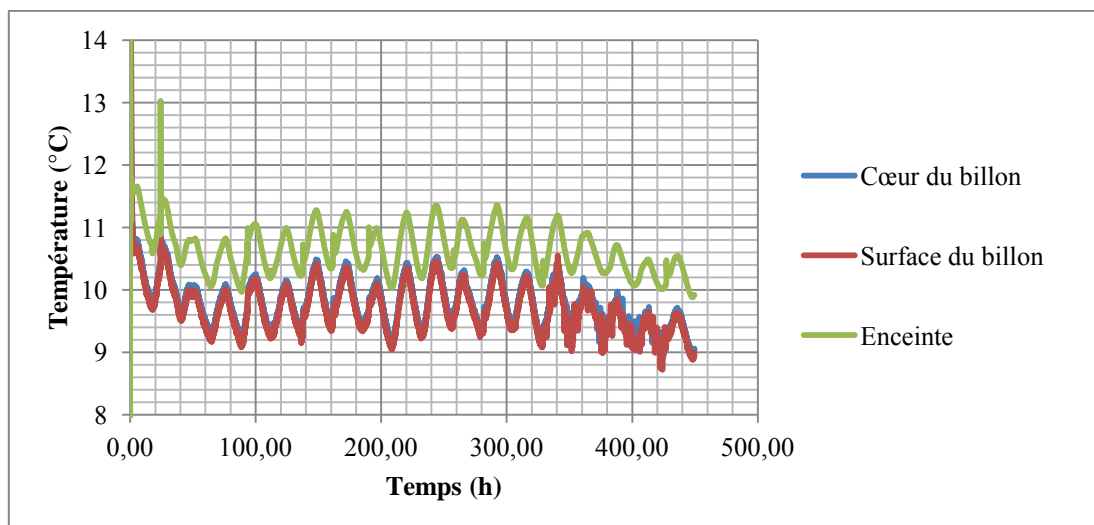


Figure 22 : relevés de températures par les thermocouples dans le **billon avec écorce** et par la sonde placée dans l'enceinte

➤ Evolution de la masse lors du séchage

Les variations de masse des billons d'épicéa écorcé ou non sont présentées respectivement dans les figures 23 et 24.

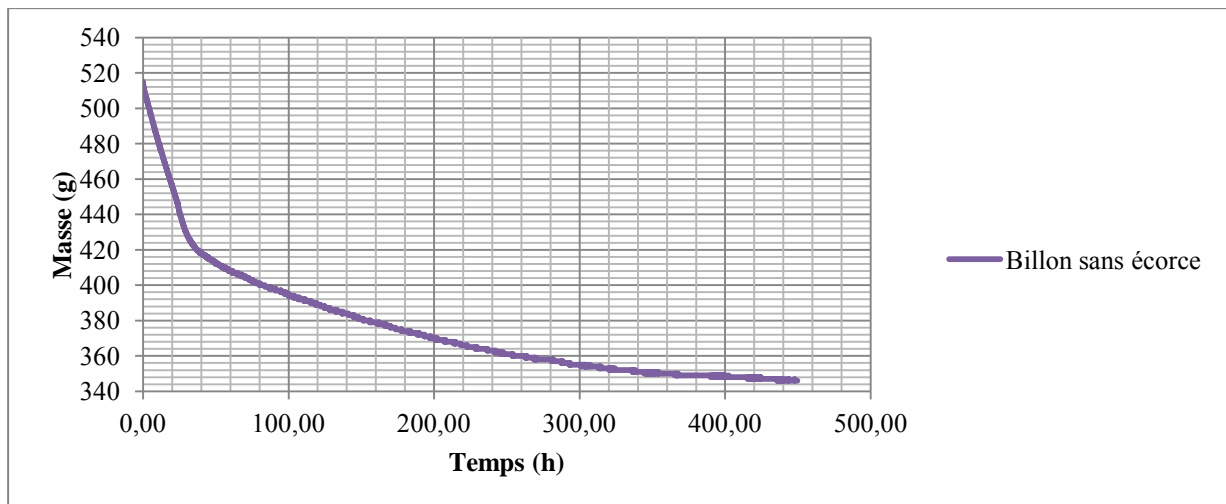


Figure 23 : variation de la masse du billon d'épicéa **sans écorce** au cours du temps pendant la première expérience

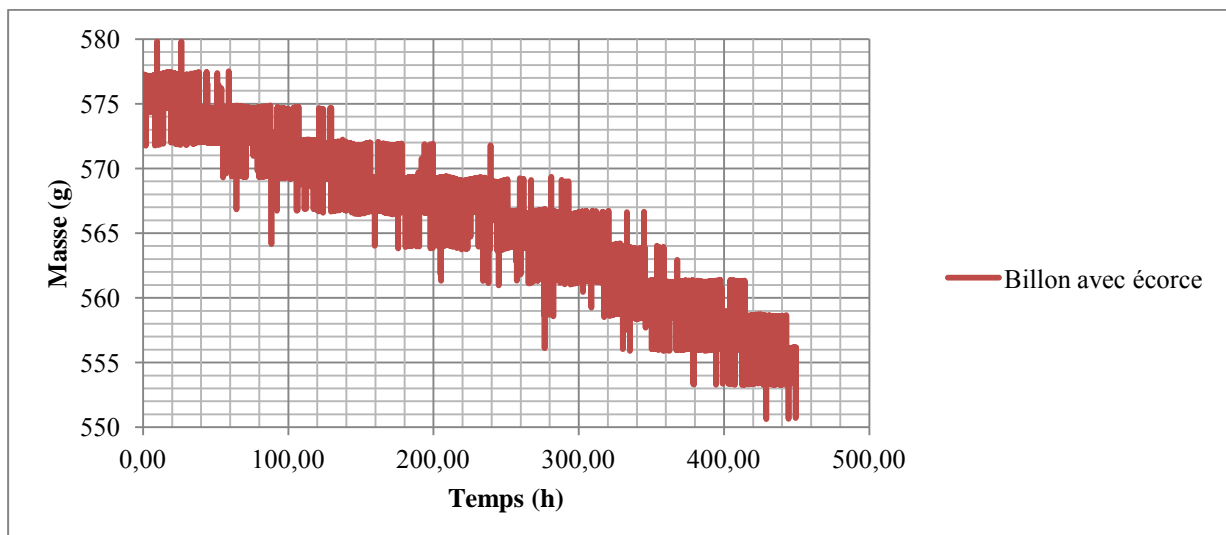


Figure 24 : variation de la masse du billon d'épicéa **avec écorce** en fonction du temps pendant la première expérience

2.2.2. Deuxième expérience de séchage

Pour la seconde expérience, les billons d'épicéa utilisés sont évidés, ont une fente de décharge et sont recouverts de colle époxy et de papier aluminium sur leur face interne et sur une seule de leurs extrémités longitudinales, permettant à l'eau de migrer de façon transversale et longitudinale.

➤ Teneur en eau

La courbe de la teneur en eau des morceaux issus du quartier tranché dans la grume en fonction de la distance au centre est présentée dans la figure 25.

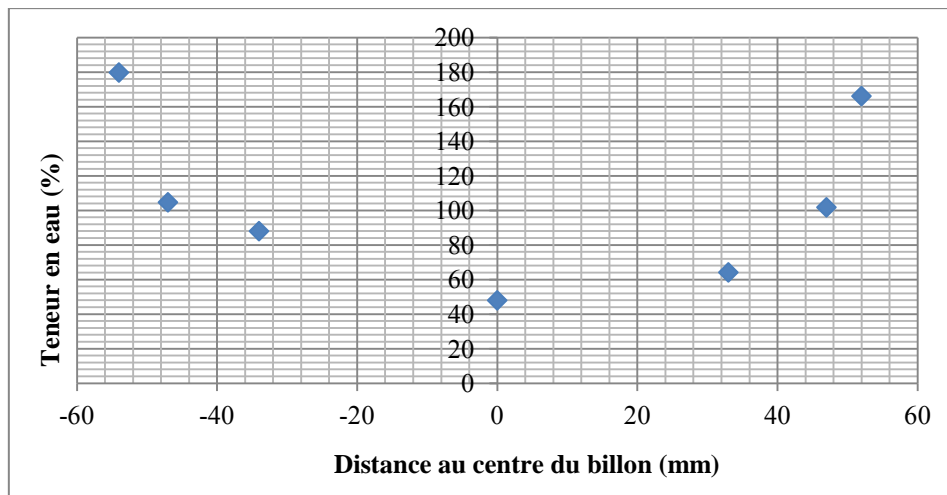


Figure 25 : Teneur en eau des différents morceaux issus de la coupe en quartier d'une tranche de grume d'épicéa

Cette fois-ci encore, les deux points les plus éloignés du centre représentent les morceaux d'écorce seule.

➤ Température et humidité relative

La température moyenne durant cette deuxième expérience était de 10,28°C et l'humidité relative moyenne était de 72.16%.

Les courbes des températures relevées par les différents thermocouples placés dans les billons écorcé ou non écorcé sont présentées respectivement dans les figures 26 et 27.

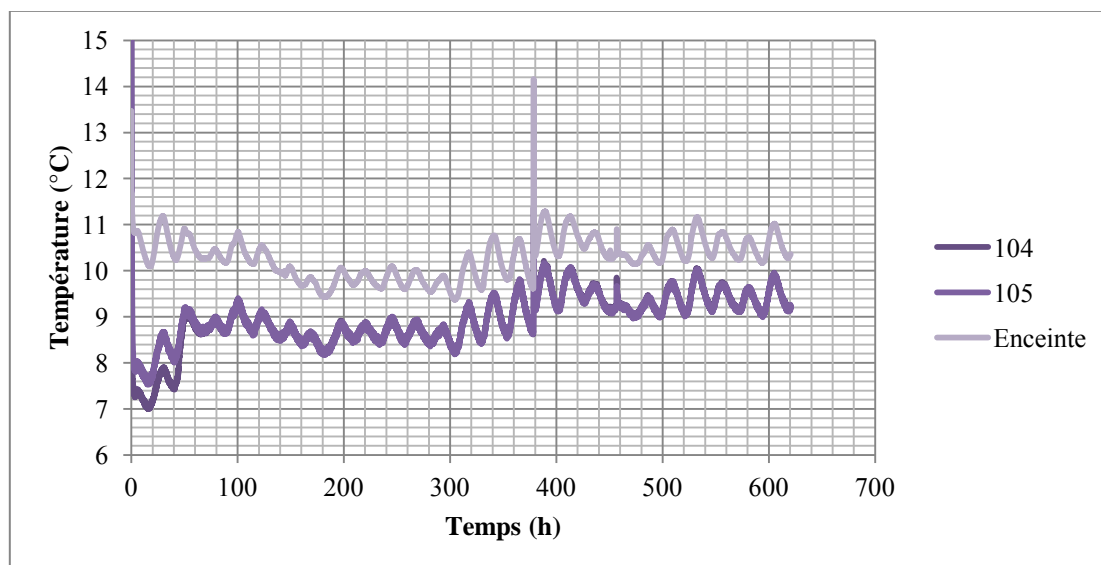


Figure 26 : relevés de températures par les thermocouples dans le **billon écorcé** et par la sonde placées dans l'enceinte

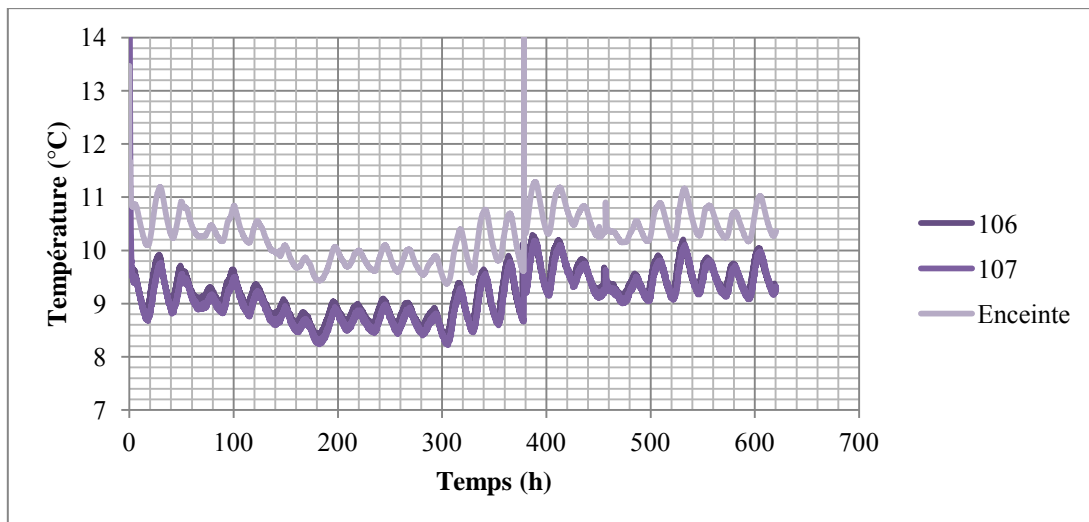


Figure 27 : relevés de températures par les thermocouples dans le **billon avec écorce** et par la sonde placées dans l'enceinte

➤ Evolution de la masse lors du séchage

Les variations de masse des billons d'épicéa écorcé ou non écorcé durant la deuxième expérience sont présentées respectivement dans les figures 28 et 29.

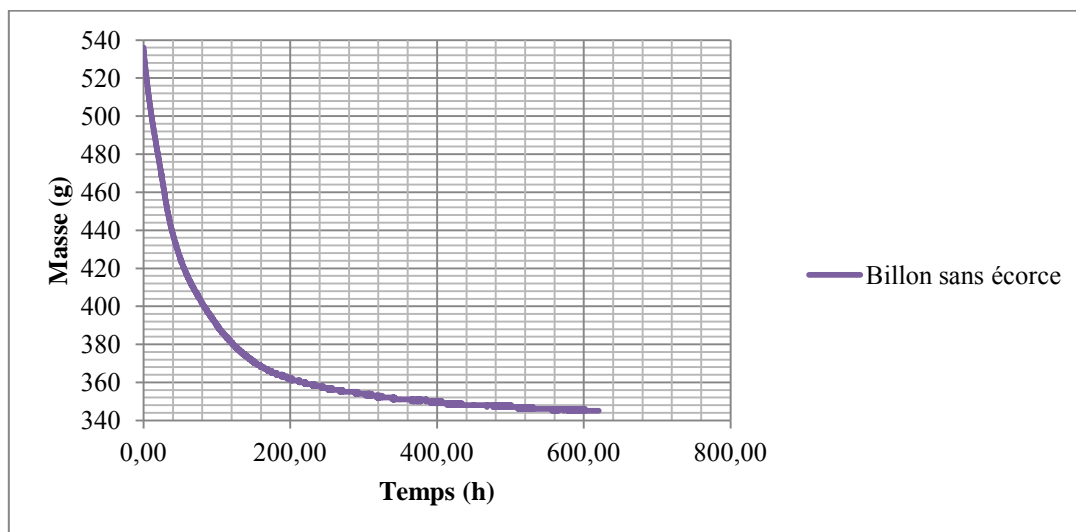


Figure 28 : variation de la masse du billon d'épicéa **sans écorce** en fonction du temps pendant la deuxième expérience

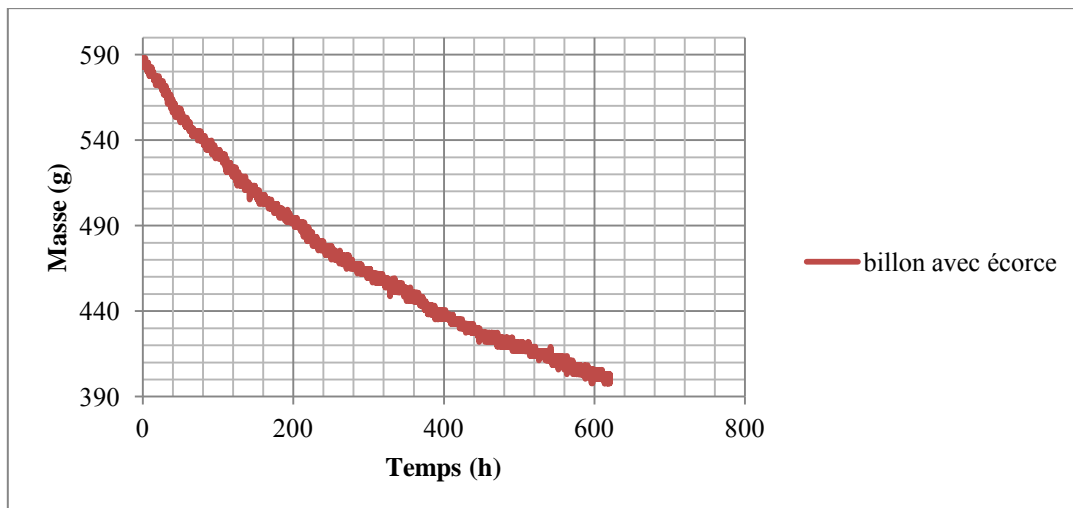


Figure 29 : variation de la masse du billon d'épicéa **avec écorce** en fonction du temps pendant la deuxième expérience

3. Discussion

Les différentes isothermes de sorption obtenues sont très similaires, dû aux constantes A, B et C qui restent sensiblement proches d'un échantillon d'écorce à l'autre. La sorption de l'écorce des différentes essences testées serait donc semblable.

Les estimations du coefficient de diffusion et de la diffusivité réduite de l'écorce des deux essences testées sont relativement proches selon la méthode de calcul employée.

Le coefficient de diffusion de la vapeur d'eau de l'écorce de chêne est environ dix mille fois moins élevé que celui du bois de la même essence. La diffusivité réduite de cette écorce est près de mille fois plus faible que celle du bois.

On retrouve des différences similaires avec les échantillons d'écorce d'épicéa : un facteur cent mille entre le coefficient de diffusion de l'écorce et celui du bois, et un facteur d'un million entre la diffusivité réduite de l'écorce et celle du bois.

L'eau sous forme de vapeur diffuse donc beaucoup moins vite dans l'écorce que dans le bois massif. Comme attendu, l'écorce va permettre de maintenir l'humidité présente dans la grume au cours de la vie de l'arbre.

Il est à noter que la méthode du temps de demi-sorption doit être biaisée ici pour le calcul du coefficient de diffusion de l'écorce de chêne, qui utilisait la courbe de variation de masse en fonction du temps du palier à 0% HR à celui à 40% HR. En effet, ce calcul nécessite une courbe de sorption complète depuis la masse anhydre de l'échantillon jusqu'à la masse d'équilibre au palier d'humidité relative de fin. Or, aucune des méthodes employées n'a donné un séchage suffisant des échantillons et aucun d'entre eux n'a atteint une masse anhydre. Il faudrait réitérer les expériences avec un séchage complet des échantillons.

D'autre part, les expériences de diffusion sur l'échantillon d'écorce de hêtre devront être menées dans l'avenir, puisque non réalisées durant ce stage.

La cinétique du séchage des billons est supposée se dérouler selon trois phases successives : une première phase durant laquelle la perte de masse est très élevée et la vitesse de

séchage du billon maximale, une deuxième phase où cette perte de masse diminue progressivement, et une troisième phase qui correspond à l'arrêt de perte de masse, ce qui signifie que le billon est en équilibre avec les conditions de son environnement.

Lors de la première expérience de séchage, le billon écorcé est presque parvenu à cet équilibre (Figure 19), avec une perte de masse de 169g. En effet, la vitesse de perte de masse en fonction du temps diminue fortement vers la fin de l'expérience mais n'atteint pas tout à fait un plateau.

Le billon avec écorce n'a pas atteint cet équilibre : il est toujours situé dans la première phase même à la fin de l'expérience. Sa perte de masse n'est que de 18g environ.

L'eau ne pouvait migrer hors de ces billons que de façon transversale, on constate donc que l'écorce est un frein à cette migration.

A la fin de la deuxième expérience de séchage, la perte de masse du billon écorcé est quasiment nulle, celui-ci a presque atteint l'équilibre avec une perte de masse de 191g.

Le billon avec écorce n'a atteint que la deuxième phase de sa cinétique de séchage, avec une perte de masse de 188g.

Ces billons avaient une extrémité longitudinale non recouverte de colle et d'aluminium, ce qui permettait une migration de l'eau dans la direction longitudinale, en plus de la transversale. Cela a permis au billon avec écorce de sécher beaucoup plus vite que celui de la première expérience.

Il n'y a cependant pas une telle différence de séchage entre les billons écorcés de la première et de la deuxième expérience. La vitesse de séchage maximale du billon dans ces conditions était donc quasiment atteinte dès la première expérience, simplement en écorçant l'échantillon.

Les relevés de température par les thermocouples se superposent pour chaque échantillon. Ils diffèrent néanmoins des relevés de la température de l'enceinte climatique ; cela est certainement dû à la nature différente des sondes, qui provoquerait une variation de 1°C entre les relevés des thermocouples et ceux de la sonde de l'enceinte.

Par faute de temps nous n'avons pas pu alimenter le code TransPore avec les différentes caractéristiques de l'écorce d'épicéa pour simuler le séchage de grumes à basses températures. Nous aurions pu alors les comparer avec les résultats des expériences de séchage de cette essence effectuées dans l'enceinte réfrigérante et les extrapoler pour simuler le séchage de grumes entières à basses températures.

Des tests visant à juger l'efficacité de l'humidificateur construit devraient être menés dans l'avenir. L'humidité relative de l'enceinte serait mesurée à des températures différentes, en présence de l'humidificateur, puis en faisant un apport d'humidité complémentaire par exemple en plaçant une bassine d'eau sur la balance (pour reproduire l'apport d'eau dans l'enceinte par le bois en train de sécher), et enfin sans aucun récipient d'eau dans l'enceinte.

CONCLUSION

Le séchage des bois ronds autour de 10°C est possible quoique lent. La vitesse de séchage peut être augmentée en écorçant l'échantillon, puisque les pertes d'eau dans le sens transversal du billon sont non négligeables.

Cette accélération du séchage par écorçage peut être expliquée par le fait que l'écorce des essences étudiées a un coefficient de diffusion de l'eau et une diffusivité réduite plus faible que le bois. L'écorce représente donc une barrière à la migration de la vapeur d'eau.

D'autre part, les isothermes de sorption des écorces d'épicéa, de chêne et de hêtre sont relativement similaires : ces écorces atteignent donc sensiblement la même teneur en eau d'équilibre à une humidité relative donnée indépendamment de l'essence considérée.

L'ensemble des mesures collectées dans l'enceinte climatique sont des données indispensables pour valider un modèle numérique. Par ailleurs, devant le manque de données dans la littérature sur les propriétés de l'écorce, les résultats obtenus sur le coefficient de diffusion et les isothermes de sorption de l'écorce de chêne et de l'épicéa sont précieuses pour alimenter un modèle en paramètres physiques.

BIBLIOGRAPHIE

Agoua, E., Zohoun, S., and Perré, P. (2001). Utilisation d'une double enceinte pour déterminer le coefficient de diffusion d'eau liée dans le bois en régime transitoire: recours à la simulation numérique pour valider la méthode d'identification. *Int. J. Heat Mass Transf.* 44, 3731–3744.

Basilico, C., and Martin, M. (1984). Approche expérimentale des mécanismes de transfert au cours du séchage convectif à haute température d'un bois résineux. *Int. J. Heat Mass Transf.* 27, 657–668.

BOUKADIDA, N., BEN NASRALLAH, S., and PERRE, P. (2000). Mechanism of Two-Dimensional Heat and Mass Transfer During Convective Drying of Porous Media Under Different Drying Conditions. *Dry. Technol.* 18, 1367–1388.

Hailwood, A.J., and Horrobin, S. (1946). Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. *Trans. Faraday Soc.* 42, B084–B092.

Perre, P., and Degiovanni, A. (1990). Simulation par volumes finis des transferts couplés en milieux poreux anisotropes: séchage du bois à basse et à haute température. *Int. J. Heat Mass Transf.* 33, 2463–2478.

Zohoun, S., and Perre, P. (1998). Détermination de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique du bois: comparaison des mesure en régimes permanent et transitoire", Thèse: Mécanique et énergétique, Institut National Polytechnique Lorraine, Nancy. 110 p.

Résumé

Ce stage a été réalisé au sein du LERMaB et s'inscrit dans le projet CoolWood qui vise à développer un procédé innovant de préservation des grumes à basses températures. Or, il existe très peu d'études sur le séchage du bois à de telles températures. Le but de ce stage était la caractérisation de la migration de la vapeur d'eau au travers de l'écorce de trois essences : l'épicéa (*Picea abies*), le chêne (*Quercus*) et le hêtre (*Fagus sylvatica*), ainsi que l'étude de la cinétique de séchage de petits billons d'épicéa avec ou sans écorce à des températures autour de 10°C. Une enceinte réfrigérante de 1m³ pourvue d'un humidificateur construit durant ce stage a été utilisée pour les expériences de séchage.

Les isothermes de sorption de l'écorce de chacune des trois essences testées sont relativement similaires. Les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans l'écorce sont d'un ordre de grandeur de 10⁻¹³m²/s pour l'épicéa et de 10⁻¹¹m²/s pour le chêne. L'ordre de grandeur des diffusivités réduites sont de 10⁻⁸ pour l'épicéa et de 10⁻⁶ pour le chêne. Ces coefficients n'ont pas été estimés pour l'écorce de hêtre. Le séchage des billons d'épicéa est possible, quoique lent; il peut être accéléré en écorçant l'échantillon. L'extrapolation des résultats afin de simuler le séchage de grumes entières pourra se faire grâce au code TransPore.

Mots-clefs : séchage, basse température, transferts couplés masse/chaleur, hêtre, épicéa, chêne, isotherme de sorption, coefficient de diffusion.

Abstract

This stage took place in the LERMaB and among the CoolWood project that aims to develop an innovative process of log preservation at low temperatures. Yet, there are only few studies on drying wood at such temperatures. This internship aimed to characterize the migration of vapor water among the bark of three trees : spruce (*Picea abies*), oak (*Quercus*) and beech (*Fagus sylvatica*), and also to study the drying of little spruce logs with or without bark at temperatures around 10°C. A 1m³ cooling chamber has been used, a humidifier built during this study within, for the drying experiments.

The sorption isotherms of each species' bark are relatively close. The diffusion coefficients of water vapor in the bark are in the order of 10⁻¹³m²/s for spruce, and 10⁻¹¹m²/s for oak. The reduced diffusivities of bark are in order of 10⁻⁸ for spruce and for 10⁻⁶ oak. Those coefficients have not been estimated for beech bark. The drying of spruce logs is possible yet slow; it can be accelerated if the bark is removed. The extrapolation of the results to simulate drying of entire logs could be done with the TransPore code.

Key words : drying, low temperatures, coupled transfers mass/heat, beech, spruce, oak, sorption isotherms, diffusion coefficient.

Remerciements

A Romain, tout d'abord, pour sa patience et sa clarté tout au long de ce stage.

A Tristan, pour son aide précieuse et son dos inaltérable.

A Clément, pour son fond d'écran, ses conseils footballistiques et ses boutades si subtiles.

Remerciements aussi à Gaétan², Michael, Thouraya, Helisoa, Eric, Arnaud et Tatave qui ont rendu ce séjour en contrées perdues encore plus sympathique.