



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-theses-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>



S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex



Laboratoire d'Etudes et de Recherches
sur le Matériau Bois
UMR INRA-ENGREF-UHP Nancy I n°1093

Thèse

pour obtenir le titre de
**DOCTEUR de l'Université Henri Poincaré
Nancy I**

(Spécialité Sciences et Technologies Industrielles)

présentée par
Nadia MOUCHOT

***Etude expérimentale et modélisation des transports
diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique
des bois de hêtre et d'épicéa***

Soutenue publiquement le 20 Septembre 2002 devant la
Commission d'examen :

Rapporteurs : M. J.R. PUIGGALI, Professeur, E.N.S.A.M. Bordeaux
M. G. ANTONINI, Professeur, U.T.C. Compiègne

Examineurs : M. X. DEGLISE, Professeur, U.H.P. Nancy I
M. P. PERRE, Professeur, E.N.G.R.E.F. Nancy
M. A. ZOULALIAN, Professeur, U.H.P. Nancy I

BRUNO, HENRI, JEAN, JACQUES
FRANCK, FRANCK, FRANCK, FRANCK
FRANCK, FRANCK, FRANCK, FRANCK
FRANCK, FRANCK, FRANCK, FRANCK

Je dédie ce travail à Franck

Remerciements

La thèse présentée dans ce mémoire est le résultat d'un long travail de recherches de quatre années. Il est probable que sans le soutien de mes proches et sans l'aide de certaines personnes, ce projet n'aurait pas abouti.

Je tiens tout d'abord à remercier **M. X. DEGLISE**, Directeur du L.E.R.M.A.B., de m'avoir permis d'effectuer une thèse au sein de son laboratoire, d'avoir pensé à l'"après-thèse".

Je remercie également **M. A. ZOULALIAN**, Directeur de Recherches, mon directeur de thèse, d'une part pour avoir sollicité une allocation de recherche pour que cette thèse se fasse dans de meilleures conditions, et d'autre part pour m'avoir prodiguée de nombreux conseils et pour m'avoir guidée pas à pas sur les bonnes voies de recherches.

Je remercie **M. P. PERRE**, Professeur à l'E.N.G.R.E.F., pour m'avoir permis de réaliser de nombreuses expériences à l'E.N.G.R.E.F., ainsi que pour tous ses conseils avisés.

Enfin, je tiens à remercier **M. G. ANTONINI**, Professeur à l'U.T.C. et **M. J.R. PUIGGALI**, Professeur à l'E.N.S.A.M., pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de juger mon travail de thèse.

Je n'oublierais pas non plus toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce que cette aventure soit plus agréable : Hubert François, Béatrice George et l'ensemble du personnel du L.E.R.M.A.B..

Table des matières

Remerciements

Table des matières 1-5

Introduction 6-7

Chapitre I : Généralités sur le matériau bois et l'eau dans le bois 8-59

I.1. Le matériau Bois 8-19

I.1.1. Les constituants du bois 8-14

- a) Introduction
- b) Constituants généraux de la paroi cellulaire
- c) Bois initial/Bois final – Aubier/Duramen – Bois juvénile – Bois de réaction
- d) Structure des résineux
- e) Structure des feuillus
- f) Irrégularités structurelles

I.1.2. Les propriétés physiques du bois 15-18

- a) Les propriétés directionnelles
- b) Stabilité dimensionnelle
- c) Dilatation thermique
- d) Propriétés pyrolytiques
- e) Masse volumique (ou densité)
- f) Propriétés électriques
- g) Comportement aux attaques biologiques et chimiques

I.1.3. Les propriétés mécaniques du bois 18-19

- a) Propriétés élastiques
- b) Propriétés de résistance mécanique

I.2. L'eau dans le Bois 19-33

I.2.1. Les différentes formes d'eau présentes dans le bois 19

I.2.2. Les différents types de transport de l'eau dans le bois	20-24
I.2.3. Les méthodes de détermination de l'humidité du bois	24-25
a) Méthode dite de la pesée	
b) Méthodes électriques	
I.2.4. Les équilibres d'adsorption - désorption d'eau dans le domaine hygroscopique	25-33
a) Isothermes d'adsorption	
b) Modèles mathématiques représentatifs des isothermes d'adsorption de l'eau dans le bois	
I.3. La perméabilité du Bois	33-44
I.3.1. Expression du flux convectif – Relation de Darcy	33-35
I.3.2. Modifications de la relation de Darcy	35-36
a) Prise en compte des dégradations d'énergie cinétique	
b) Prise en compte d'un écoulement moléculaire pour les écoulements gazeux	
I.3.3. Expression générale du flux convectif	36-38
I.3.4. Autres modèles morphologiques permettant d'évaluer le flux convectif	38-43
a) Modèle du faisceau de capillaires rectilignes parallèles indépendants	
b) Modèle du faisceau de capillaires rectilignes et distribués dans toutes les directions	
c) Modèle du faisceau de capillaires indépendants distribués dans toutes les directions et avec une distribution du rayon des capillaires	
d) Modèle de Kozeny	
e) Modèle du faisceau de fibres	
f) Modèles spécifiques pour le bois	
I.3.5. Paramètres influençant la perméabilité du bois	43-44
a) Effet du séchage	
b) Effet de l'humidité	
c) Effet de la longueur de l'échantillon	
d) Effet de la nature de l'essence et de la localisation de l'échantillon	
I.4. Les déterminations des coefficients de diffusion de l'eau au sein du bois	44-58
I.4.1. Introduction	44-45
I.4.2. Modèles décrivant le transport diffusionnel dans un milieu poreux	45-48

- a) Modèle du « dusty gas »
- b) Modèle du faisceau de capillaires cylindriques droits et indépendants
- c) Théorie du réseau de Bethe
- d) Théorie du milieu effectif
- e) Comparaison des méthodes et autres modélisations

I.4.3. Méthodes de détermination des coefficients de diffusion de l'eau dans l'échantillon de bois **48-55**

- a) Méthodes en régime permanent
- b) Méthodes en régime transitoire
 - Modélisation du transport diffusionnel en l'absence de résistance diffusionnelle externe
 - Modélisation du transport diffusionnel en présence de résistance diffusionnelle externe
- c) Autre méthode

I.4.4. Facteurs influençant le coefficient de diffusion de l'eau au sein du bois **55-58**

- a) Influence de la nature de l'essence
- b) Effet de la structure de l'essence
- c) Effet de l'humidité du bois
- d) Effet de la température

I.5. Objectifs de la recherche **58-59**

Chapitre II : Dispositifs et protocoles expérimentaux – Grandeurs mesurées et déduites **60-81**

II.1. Introduction	60
II.2. Premier dispositif expérimental : la cellule de diffusion de type Wicke et Kallenbach	60-71
II.2.1. Description des cellules de diffusion	61-64
a) La cellule en laiton	
b) La cellule en aluminium	
II.2.2. Protocole expérimental – Grandeurs mesurées	65-66
II.2.3. Grandeurs déduites	66-70

a) Exploitation des mesures réalisées en régime stationnaire en présence d'une différence de pression totale entre les deux compartiments	
b) Exploitation des expériences en régime transitoire	
II.3. Deuxième dispositif expérimental : le vaporimètre	71-76
II.3.1. Description du vaporimètre	71-74
a) Le vaporimètre	
b) L'enceinte climatique	
II.3.2. Protocole expérimental	74
II.3.3. Grandeurs déduites	74-76
II.4. Troisième dispositif expérimental : la double enceinte climatique	77-81
II.4.1. Description du dispositif	77-78
II.4.2. Protocole expérimental – Grandeurs mesurées	78-79
II.4.3. Grandeurs déduites	79-81
II.5. Conclusions	81
<u>Chapitre III : Résultats expérimentaux et discussion</u>	82-121
III.1. Présentation des échantillons de bois étudiés	82-84
III.1.1. Caractéristiques des échantillons de la première famille	
III.1.2. Caractéristiques des échantillons de la deuxième famille	
III.2. Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons de la première famille	85-98
III.2.1. Mesures des diffusivités apparentes dans les directions tangentielles et radiales des échantillons de la première famille	
III.2.2. Mesures des diffusivités apparentes et des perméabilités dans la direction longitudinale des échantillons de la première famille	
III.2.3. Mesures directes de la perméabilité des échantillons de hêtre	
III.3. Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons de la deuxième famille	98-128
III.3.1. Résultats obtenus dans la cellule de Wicke et Kallenbach en aluminium	98-107
a) Mesures des diffusivités apparentes dans les directions tangentielles et radiales	
b) Mesures des diffusivités apparentes et des perméabilités dans la direction longitudinale	
c) Mesure directe de la perméabilité	

d) Comparaison des diffusivités de l'eau en phase gazeuse déduites des mesures effectuées sur les deux cellules

III.3.2. Résultats obtenus à l'aide du vaporimètre 108-111

III.3.3. Résultats obtenus à l'aide de la double enceinte climatique 111-121

a) Résultats obtenus lors des mesures d'adsorption

b) Résultats obtenus lors des mesures de désorption

c) Comparaison des coefficients de diffusion D^{**} obtenus dans le vaporimètre aux coefficients de diffusion D_1^{**} , D_2^{**} , D_3^{**} , D_4^{**} déduits des expériences dans la double enceinte climatique

CONCLUSIONS 122-123

NOMENCLATURE 124-127

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 128-136

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX 137-139

LISTE DES ANNEXES 140

Introduction

La forêt française couvre en surface plus d'un quart du territoire avec un volume sur pied de 1,8 milliards de m³, soit une moyenne de 138 m³ sur pied par hectare. La France se situe largement au dessus de la moyenne européenne (88 m³/ha) et la récolte annuelle s'établit à environ 47 millions de m³ pour 35 essences commercialisées. Parmi ces essences, les trois principales sont une feuillue (chêne) et deux résineuses (sapin et pin maritime). Depuis Colbert, une gestion rigoureuse de ce patrimoine a été décidée, qui permet actuellement aux charpentiers de construire avec les chênes plantés au siècle dernier ; et nous plantons aujourd'hui les moyens de construire en bois demain.

L'industrie du bois emploie plus de 600000 personnes et les évolutions climatiques devraient contribuer au développement de certains secteurs d'activité. Le bois est un matériau renouvelable qui connaît de nombreux domaines d'application. En effet, on l'utilise pour des travaux de menuiserie, d'ameublement, de charpente, d'ébénisterie, pour la fabrication du papier mais aussi comme un moyen de chauffage. Sa croissance annuelle en France est estimée à 85 millions de m³, soit une valeur très supérieure à celle de sa récolte.

Toutefois, le bois ne devient un matériau qu'après un certain nombre d'opérations effectuées à l'issue de son débit en forêt puis en scierie. Parmi ces opérations, la première et une des plus importantes pour son devenir comme matériau est le séchage.

Le bois est un matériau hygroscopique et l'arbre sur pied ou fraîchement abattu et scié peut contenir de grandes quantités d'eau sous ses trois formes principales que sont l'eau libre (ou capillaire), l'eau liée (ou adsorbée) et l'eau vapeur. Le bois subissant des variations dimensionnelles en fonction de sa teneur en eau, l'usinage du bois massif et la réalisation d'objets en bois ne peuvent se concevoir sans un contrôle relativement précis de l'humidité, voisine de celle que l'on pourra trouver dans l'usage courant de l'objet fabriqué. Par suite, l'opération de séchage devra être conduite avec soin si l'on veut éviter l'apparition de défauts mécaniques (fissures, gauchissement,...) et esthétiques (phénomènes de discoloration,...).

Comme nous le rappellerons ci-après dans le premier chapitre, l'évacuation de l'eau lors des opérations de séchage se fait par des mécanismes de transport convectif et diffusif dont les paramètres caractéristiques sont respectivement les perméabilités et les diffusivités. Le bois étant un matériau anisotrope, ces caractéristiques ne sont pas identiques dans les trois directions spécifiques de celui-ci à savoir les directions axiale (ou longitudinale), radiale et tangentielle. Il existe dans la littérature (cf. chapitre I) un certain nombre de déterminations de ces caractéristiques de transport mais toutes n'ont pas été réalisées sur une même essence et sur les mêmes échantillons par la même personne.

C'est l'objectif que nous proposons de réaliser dans ce travail de thèse en essayant de distinguer dans le cas du bois de hêtre et de l'épicéa les caractéristiques diffusionnelles relatives à l'eau en phase gazeuse et à l'eau en phase adsorbée. Les méthodologies mises en œuvre pour ces deux types de déterminations sont classiques mais elles restent relativement originales dans le cas d'un support tel que le bois. De plus, les études dynamiques de désorption (séchage) et d'adsorption (humidification) d'eau dans les échantillons de bois de hêtre permettront d'apporter de nouvelles informations sur les transports diffusionnels isothermes de l'eau en phase gazeuse et de l'eau adsorbée dans le domaine hygroscopique du bois.

Avant d'aborder ces différents points, nous rappellerons dans le *premier chapitre* du mémoire certaines généralités sur les propriétés du bois, sur l'action et le comportement de l'eau au sein de ce matériau. Nous y détaillerons également les phénomènes d'absorption et

de désorption de l'eau entre la forme gazeuse et adsorbée et les transports de l'eau au sein du bois par diffusion et convection. Nous donnerons enfin quelques informations sur les différentes méthodologies utilisées et les études réalisées à ce jour pour caractériser les transports convectifs et diffusifs de l'eau au sein du bois.

Dans le *deuxième chapitre*, nous présenterons les trois dispositifs expérimentaux mis en œuvre pour caractériser les transports d'eau ainsi que ceux pour les études dynamiques d'absorption et de désorption isotherme d'eau au sein des divers échantillons de bois de hêtre et d'épicéa examinés. Nous indiquerons également les protocoles expérimentaux et les grandeurs mesurées et déduites issues des modélisations appropriées.

Le *troisième chapitre* est consacré aux déterminations expérimentales des différents coefficients de diffusion de l'eau en phase gazeuse et en phase adsorbée au sein des différents échantillons de hêtre et d'épicéa.

La *conclusion* du mémoire rappelle les points essentiels de cette recherche et suggère diverses perspectives, en particulier la validité du modèle préconisé pour d'autres essences ou des composites à base de bois.

Chapitre I

*Généralités sur le matériau
bois et l'eau dans le bois*

I.1. Le matériau Bois

I.1.1. Les constituants du bois

a) Introduction

Le bois est un matériau cellulaire dans sa structure, anisotrope et non homogène. Ceci se répercute sur ses propriétés physiques et sur ses caractéristiques mécaniques.

D'une manière générale, les bois de résineux (ou gymnospermes) ont une structure plus simple que les bois de feuillus (ou angiospermes).

b) Constituants généraux de la paroi cellulaire

Chaque cellule ligneuse comporte une cavité cellulaire (ou lumen) et des parois cellulaires composées de plusieurs couches arrangées de différentes manières. [cf. **Figure I.1**]

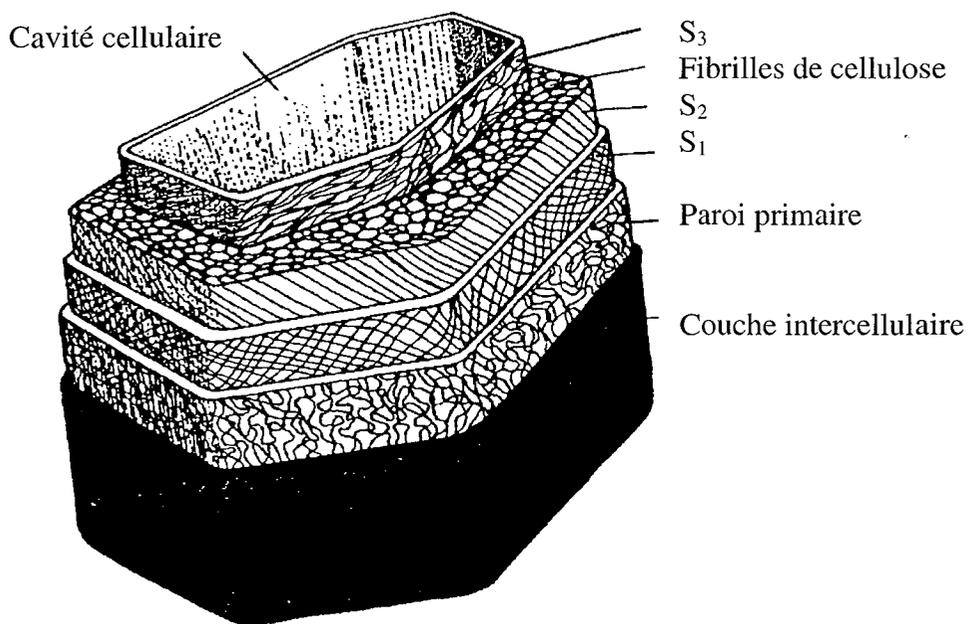


Figure I.1 : Les différentes parties d'une cellule ligneuse (Panshin [1980])

Les principaux composants intervenant dans la composition de la paroi cellulaire sont la *cellulose*, les *hémicelluloses* et la *lignine*. Leurs teneurs base sèche varient de 40 à 50 % pour la cellulose, 20 à 40 % pour les hémicelluloses et 20 à 35 % pour la lignine. A cela, on peut ajouter les extractibles dont le pourcentage se situe entre 0 et 25 %.

Nous omettrons volontairement ici les descriptions de la composition et de la structure chimique de ces molécules ; le lecteur pourra se référer aux articles de *Adler* [1977] et *Haluk* [1994].

c) Bois initial/bois final-Aubier/duramen-Bois juvénile-

Bois de réaction

Le bois initial, appelé également bois de printemps, est formé durant la première partie de chaque saison de végétation. Les cellules du bois initial ont généralement une section transversale plus grande et une paroi plus mince que celles formées plus tard dans la saison. En conséquence, le bois initial est plus tendre et généralement plus clair que le bois final (ou bois d'été).

Dans l'arbre vivant, l'aubier qui se situe près de l'écorce, contient beaucoup de cellules vivantes qui permettent principalement le transfert et le stockage de la sève. Certaines cellules servant au stockage sont associées à un colorant. Ces cellules restent vivantes après que l'arbre soit coupé et elles libèrent des enzymes qui convertissent les sucres en un produit chimique brunâtre. Cependant, la plupart des cellules d'aubier sont mortes et représentent seulement des canaux pour transporter la sève. La partie centrale du tronc est appelée duramen. Toutes les cellules du duramen sont mortes et leur fonction principale est de fournir la robustesse au tronc et de stocker des substances minérales.

Comme un arbre grandit en diamètre en ajoutant de nouvelles cellules d'aubier près de l'écorce, la zone de duramen grandit également à une vitesse quasi identique. Les cellules vivantes de l'aubier meurent et sont infiltrées par des gommés, des résines, des colorants et d'autres constituants. La circonférence du duramen peut être irrégulière et ne suit pas forcément de manière très proche les cernes annuels de croissance.

Les quantités relatives d'aubier et de duramen varient considérablement à la fois entre les espèces et au sein d'une même espèce.

En règle générale, le duramen est moins perméable aux liquides que l'aubier. Pour cette raison, le duramen sèche plus lentement que l'aubier. Pour les conifères, le duramen contient habituellement plus de résine que l'aubier.

En grandissant, l'arbre développe du bois avec des propriétés distinctes, dans les troncs frêles ou tordus et dans les branches. Ce bois est appelé bois de compression pour les conifères et bois de tension pour les feuillus.

Le bois de compression se produit dans les conifères dans la partie concave des troncs d'arbres courbés et sur le côté inférieur des branches. Les cernes d'accroissement annuel dans

le bois de compression sont généralement plus larges que les cernes normaux . Un manque de contraste de couleur entre le bois initial et le bois final donne une apparence sans style au bois de compression. Le bois de compression se rétrécit beaucoup plus dans la direction longitudinale que le bois normal et il peut causer des fissures lors du séchage.

Le bois de tension se produit dans les feuillus dans la partie convexe des troncs d'arbres courbés et sur le côté supérieur des branches. Il peut causer une condition de contrainte dans le rondin et il contribue plus tard au clivage des produits sciés.

d) Structure des résineux

Les gymnospermes présentent une organisation relativement simple [cf. **Figure I.2.**].

Trachéides et parenchyme suffisent à constituer les plans ligneux de tous les résineux. Dans le plan transversal, nous avons les rayons ligneux (parenchyme de rayons ligneux) et dans la direction longitudinale se situent les trachéides longitudinales.

Les *trachéides longitudinales* représentent environ 90% du plan ligneux des conifères et constituent donc le tissu conducteur majoritaire. Ce sont des éléments allongés de 1 à 8 mm de longueur, biseautés aux extrémités. Elles sont interconnectées par des paires de ponctuations aréolées.

Les *cellules de parenchyme radial* ou *rayons ligneux* ont un rôle de conduction radiale et de stockage des carbohydrates pour l'arbre vivant (amidon, graisses). Elles ont une épaisseur unicellulaire et une hauteur variable pouvant aller jusque 40 cellules.

Les pins, les épicéas, les mélèzes et les douglas contiennent en plus des autres conifères des *canaux résinifères*, constitués de groupes de cellules parenchymatiques (*Keller [1994]*).

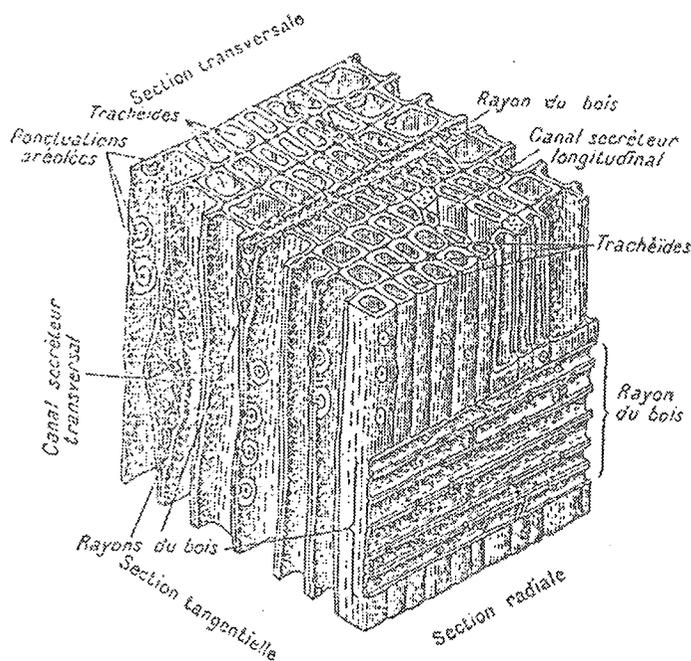


Figure I.2 : Plan ligneux des résineux (Panshin [1980])

Comme les rayons ligneux et les canaux de résine occupent une fraction de volume relativement petite, leur contribution au flux de fluides est relativement faible.

La majorité des ponctuations se situe sur les surfaces radiales des trachéides avec une plus grande concentration aux extrémités, qui sont en contact avec les cellules adjacentes. Le nombre de ponctuations par trachéide varie de 50 à 300 dans le bois initial et un peu moins dans le bois final. Les ponctuations étant essentiellement sur les faces radiales, la majorité du transport de fluides entre trachéides s'effectue dans la direction tangentielle.

Les différentes formes de ponctuations sont représentées sur la **Figure I.3**.

Remarque : nous pouvons noter également la présence de ponctuations d'un type un peu particulier : il existe des ouvertures spéciales entre trachéides longitudinales et parenchyme de rayons ligneux : ce sont les champs de croisement.

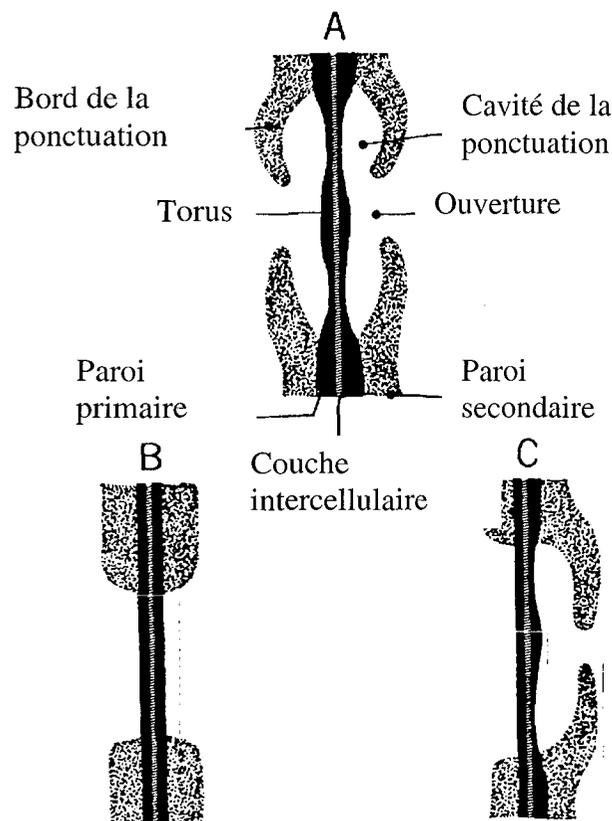


Figure I.3 : Coupes transversales de ponctuations (Panshin 1980) :

A : ponctuation aréolée

B : ponctuation simple

C : ponctuation semi-aréolée

e) Structure des feuillus

Le bois des feuillus dont les espèces sont plus évoluées du point de vue botanique, présente dans leur structure une diversité beaucoup plus grande que celle des résineux. [cf. **Figure I.4**]

Les éléments de base toujours présents sont la *fibres*, l'*élément de vaisseau* et le *parenchyme longitudinal* dans la direction longitudinale ainsi que le *parenchyme de rayons ligneux* dans la direction radiale.

Les *éléments de vaisseaux* communiquent entre eux par leurs perforations pour constituer le vaisseau. Les vaisseaux communiquent largement avec les éléments voisins (autres vaisseaux ou parenchyme) par leurs ponctuations latérales. Les éléments de vaisseaux ont une hauteur d'environ 1 mm pour un diamètre de quelques dizaines de μm à quelques centaines de μm . Comme ils ont un lumen large et une paroi généralement peu épaisse, ils constituent les pores des feuillus.

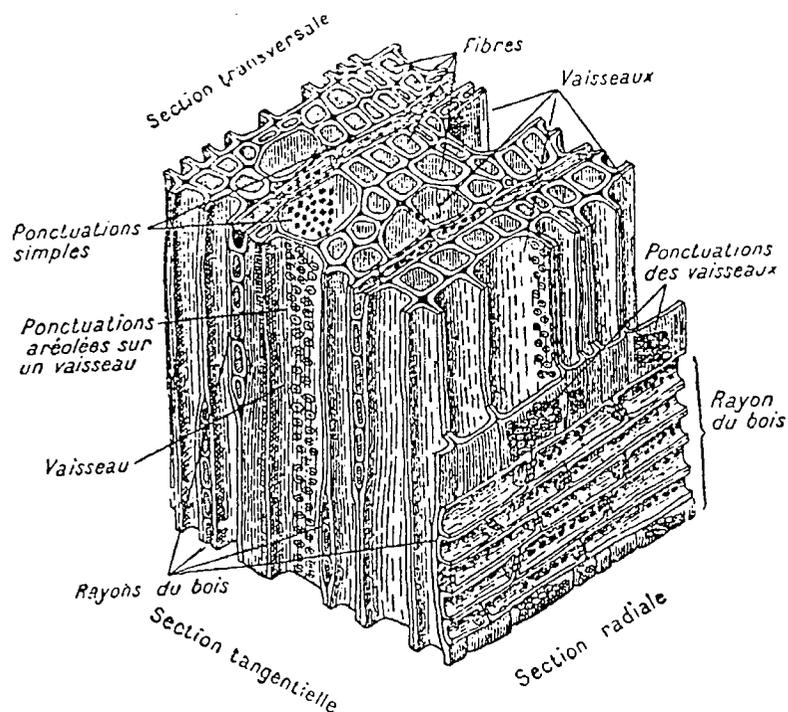


Figure I.4 : Plan ligneux des feuillus (Panshin [1980])

Les *fibres* sont des éléments allongés et effilés, à lumen peu important et portant peu de ponctuations simples. Elles constituent 50 à 60 % de la masse du bois et jouent essentiellement un rôle de structures aux bonnes propriétés mécaniques. Elles ont une hauteur d'environ 1 mm et un diamètre de quelques dizaines de μm (Keller [1994]).

Le *parenchyme longitudinal* peut permettre le contrôle de la duraminisation : le bois acquiert couleur, odeur et durabilité.

Quant au *parenchyme de rayon ligneux* (ou parenchyme radial), il peut être multisérié dans le cas des feuillus : ceci constitue une zone de fragilité du bois (exemple du chêne qui se fissure au niveau des rayons ligneux pendant le séchage).

Nous pouvons noter également la présence de *tyloses*, qui sont des membranes cellulaires qui entrent dans les vaisseaux à partir de cellules de parenchyme adjacentes de plusieurs espèces. Ils augmentent considérablement la résistance au flux et sont prédominants dans le duramen de certaines espèces. Leur présence rend compte de la perméabilité relativement faible des chênes blancs. Les vaisseaux peuvent également être obturés par des *gommes* (ébène et caroubier) (Siau [1971]).

Selon la répartition relative des fibres et des éléments de vaisseaux, on distingue trois grandes catégories de bois : les bois à zone initiale poreuse, les bois à pores diffus et les bois à zone semi-poreuse.

Les bois à pores diffus sont des bois homogènes où il n'existe pas de différences entre début et fin de cerne. Ils sont représentés par les peupliers, les hêtres, les bouleaux et les fruitiers.

Les bois à zone initiale poreuse sont des bois hétérogènes où l'on observe une accumulation de vaisseaux de grands diamètres au début de chaque cerne et des petits vaisseaux dans le bois final. Cette catégorie de bois est représentée par le chêne, le châtaignier, le frêne, l'orme.

Enfin, les bois à zone semi-poreuse représentent un compromis entre les deux catégories ci-dessus, c'est-à-dire que dans le bois initial et final, les diamètres des vaisseaux sont les mêmes mais ils s'accumulent en plus grande quantité au début de chaque cerne. C'est le cas typique du merisier.

f) Irrégularités structurelles

L'axe des cellules ligneuses est habituellement parallèle à l'axe du tronc de l'arbre. Quelquefois, l'axe de ces cellules forment un angle avec la hauteur de l'arbre. Si cette orientation des fibres continue tout autour de la circonférence et de manière ascensionnelle dans le tronc, il résulte un grain spiralé, le grain étant fonction du diamètre des vaisseaux.

Une autre cause pour un grain désorienté est une planche qui est coupée parallèlement à la moelle plutôt qu'à l'écorce. Par suite, ces planches ont un grain diagonal. Des angles du fil trop prononcés provoquent une faiblesse mécanique pour les avivés.

D'autres défauts peuvent apparaître au sein du bois et notamment les nœuds. Un nœud est révélé quand l'avivé est coupé à partir d'une portion d'un arbre contenant une branche encastrée. Les nœuds sont généralement indésirables car la distorsion et la discontinuité du fil autour des nœuds affaiblissent le bois. De plus, ils engendrent un retrait irrégulier. Les nœuds peuvent également représenter des parties perdues : c'est le cas notamment lorsque la matière ligneuse s'est développée autour d'une branche morte. Lors du sciage, le nœud mort présent dans l'avivé est désolidarisé et il peut être facilement extrait.

I.1.2. Les propriétés physiques du bois

Les propriétés physiques représentent les caractéristiques du bois et son comportement aux influences externes autres que les forces appliquées. Nous présenterons ici les propriétés directionnelles, dimensionnelles, thermiques, pyrolytiques et électriques, ainsi que le comportement du bois aux attaques des produits chimiques et des micro-organismes.

a) Les propriétés directionnelles

Le bois est un matériau orthotrope et anisotrope. A cause de l'orientation des fibres de bois et de la manière avec laquelle un arbre croît en diamètre, les propriétés varient le long de trois axes perpendiculaires : longitudinal, radial et tangentiel. (Figure I.5.)

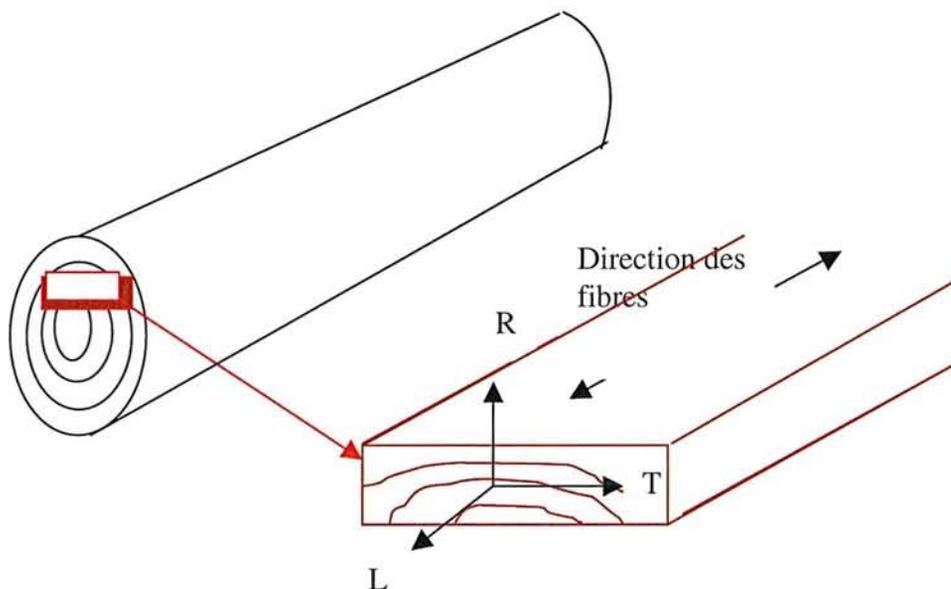


Figure I.5 : Les trois axes principaux du bois en accord avec la direction des fibres

L'axe longitudinal est parallèle à la direction des fibres (grain), l'axe radial est perpendiculaire à la direction du grain et l'axe tangentiel est perpendiculaire aux deux autres. Bien que les propriétés du bois diffèrent dans chacune des trois directions, les différences entre les axes R et T sont relativement minimales comparées aux différences entre les axes R et T avec l'axe L.

b) Stabilité dimensionnelle

Le bois est un matériau hygroscopique qui absorbe de l'eau dans un environnement humide et perd de l'eau dans un environnement sec. Nous définissons l'humidité du bois par le rapport

de la masse d'eau contenue dans le bois sur la masse sèche du bois. L'humidité du bois est fonction des conditions atmosphériques et dépend de l'humidité relative et de la température de l'air environnant (cf. I.2). Sous des conditions de température et d'humidité constantes, le bois atteint une humidité d'équilibre à laquelle le bois ne gagne ni ne perd d'eau. L'eau liquide dans la cavité cellulaire est appelée l'eau libre et celle dans les parois cellulaires est appelée l'eau liée (cf. I.2). Quand toute l'eau libre dans la cavité cellulaire est enlevée mais que la paroi cellulaire reste saturée en eau liée, l'état hygroscopique du bois correspond au point de saturation des fibres (psf). Très souvent, cet état est obtenu pour une humidité du bois proche de 30%, mais cette valeur au psf dépend de l'essence en question. Il existe plusieurs méthodes pour déterminer la valeur de l'humidité au psf mais le principe de base de ces mesures repose sur les changements des propriétés physiques et mécaniques qui sont corrélées avec l'humidité en dessous du psf et sont inchangées (théoriquement) au-dessus du psf.

* *Stamm* [1971] et *Ahmet* [1999] exposent différentes méthodes pour déterminer le point de saturation des fibres en étudiant l'influence de divers paramètres : effet de la taille de l'échantillon, influence de l'historique de séchage et influence de la taille de la chambre de conditionnement et déduisent que le psf déterminé par la méthode des propriétés mécaniques est la méthode la plus sûre.

* *Kolin* [1996] utilise la méthode de force de compression parallèle au grain (CSPG) et étudie l'effet de la température, de la densité et de la composition chimique du bois (l'humidité au psf diminue quand la température augmente ou quand la densité augmente). Il trouve une valeur pour le psf pour le hêtre de 28 % à 20°C et de 24 % à 35°C.

L'utilisation de la résonance magnétique nucléaire (R.M.N.) permet de valider les résultats obtenus *Hartley* [1994, 1996].

La stabilité dimensionnelle est une propriété qui diffère selon chacun des trois axes. Les changements dimensionnels dans la direction longitudinale entre le psf et l'état sec sont entre 0,1 et 0,2 % et ne sont donc pas significatifs. Les effets combinés du retrait dans les directions tangentielle et radiale peuvent déformer la forme des pièces de bois à cause de la différence entre le retrait et la courbure des cernes annuels. Généralement, le retrait tangentiel (variant de 4,4 à 7,8 %, selon les essences) est environ le double du retrait radial (de 2,2 à 5,6 %).

Le domaine hygroscopique du bois est relatif au domaine d'humidité du bois compris entre l'état sec (ou anhydre) et le point de saturation des fibres. C'est donc le domaine où l'on observe les variations dimensionnelles du bois en fonction de son humidité.

c) Dilatation thermique

L'expansion thermique du bois sec est positive dans toutes les directions. Le bois se dilate quand il est chauffé et se contracte quand il est refroidi. Le bois qui contient de l'eau réagit différemment aux changements de température par rapport au bois sec. Les coefficients d'expansion linéaire du bois sec parallèle au grain sont généralement indépendants de la densité et des espèces et leurs valeurs se situent entre 3.10^{-6} et $4,5.10^{-6}$ par °C. Les coefficients d'expansion linéaire perpendiculaires au grain (radial et tangentiel) sont environ cinq à dix fois plus grands que ceux parallèles au grain.

d) Propriétés pyrolytiques

Sous des conditions appropriées, le bois peut subir une dégradation thermique ou une pyrolyse. Les constructions lourdes en bois procurent une protection anti-feu favorable car elles ne produisent généralement pas de chaleur suffisante pour maintenir la combustion à moins qu'une source externe de chaleur soit présente.

e) Masse volumique

Pour un matériau hygroscopique tel que le bois, la masse volumique dépend de deux facteurs : la masse de structure ligneuse et la masse d'eau retenue dans le bois. Elle est calculée par le rapport de la masse par unité de volume. La densité spécifique fournit une mesure relative de la quantité de substance ligneuse contenue dans un échantillon de bois. C'est un rapport sans dimension de la masse d'un volume sec de bois sur la masse d'un volume identique d'eau. Pour la calculer, on se place généralement à une humidité de 12 %. La densité du bois est une caractéristique extrêmement importante car elle conditionne nombre de propriétés et aptitudes technologiques du matériau, notamment ses propriétés mécaniques. Sa facilité de mesure ou d'estimation en fait donc un critère qualitatif de choix.

L'infradensité du bois est le rapport entre la masse anhydre et le volume saturé, ou volume vert de l'échantillon.

f) Propriétés électriques

Le bois sec est un bon isolant électrique. Pourtant, des variations significatives de conductivité existent. Ces variations de résistance électrique peuvent être reliées aux

variations d'orientation du fil, de température et d'humidité. La conductivité du bois dans la direction longitudinale est environ deux fois celle dans les directions radiale et tangentielle.

La conductivité électrique du bois double généralement pour chaque élévation de température de 10° C, l'effet de l'humidité absolue du bois est cependant beaucoup plus prononcé.

g) Comportement aux attaques biologiques et chimiques

Les attaques biologiques et les organismes détruisant le bois ont besoin d'oxygène, d'une température appropriée, d'eau et d'une source de nourriture. Le bois ne se dégrade pas s'il est conservé à l'état sec (humidité inférieure à 20 %). D'un autre côté (l'extrême), le bois ne pourrit pas s'il est submergé dans l'eau à des profondeurs suffisantes. Si on se place entre ces deux cas extrêmes, le bois est attaqué par les micro-organismes et il faut alors utiliser des espèces durables naturellement ou traiter le bois.

Le bois est relativement résistant à de nombreux produits chimiques, notamment aux acides moyens (pH > 2), aux solutions salines acides et aux agents corrosifs. Le duramen est de loin plus durable que l'aubier vis-à-vis des attaques chimiques car le duramen est plus résistant à la pénétration des liquides.

I.1.3. Les propriétés mécaniques du bois

Les propriétés mécaniques sont les caractéristiques d'un matériau en réponse à des forces extérieures appliquées. Elles incluent les propriétés élastiques qui caractérisent la résistance à la déformation et à la distorsion, et les propriétés de « force » qui caractérisent la résistance aux charges appliquées. Les valeurs des propriétés mécaniques sont données en terme de contraintes (force par unité d'aire) et de déformations (résultantes de la contrainte appliquée).

a) Propriétés élastiques

Les propriétés élastiques relatent la résistance d'un matériau à la déformation sous une force appliquée à la capacité du matériau à revenir à ses dimensions d'origine quand la force est supprimée. Le bois n'est pas idéalement élastique mais plutôt viscoélastique.

b) Propriétés de résistance mécanique

Pour le bois, la résistance dépend significativement des essences, de la condition de charge et de sa durée et du nombre de facteurs environnementaux. Nous pouvons alors réaliser sur des échantillons de bois des tests de compression, de tension ou de mesure de flèche (charge appliquée au milieu de la planche). La compression parallèle au grain est toujours supérieure à la compression perpendiculaire au grain.

I.2. L'eau dans le Bois

Le liquide contenu dans un billon fraîchement coupé est souvent appelé sève. La sève est composée principalement d'eau avec des quantités variables d'autres produits (ou réactifs) dissous. L'eau est nécessaire au développement et à la croissance des arbres vivants et constitue une part majoritaire dans l'anatomie des arbres verts. Dans les arbres sur pied, le taux d'humidité dépend des espèces et du type de bois : il varie de 25 à 250 %. La masse du bois vivant peut être 2 à 3 fois celle du bois anhydre.

I.2.1. Les différentes formes d'eau présentes dans le bois

L'eau est présente dans le bois sous différentes formes. D'une part, l'eau adsorbée (ou liée) qui est liée par liaisons hydrogène ou liaisons de Van der Waals aux molécules de cellulose et d'hémicelluloses des parois cellulaires. Elle se situe dans le domaine hygroscopique, c'est-à-dire pour une humidité absolue du bois comprise entre 0 et 30 %, la valeur limite supérieure étant attribuée au point de saturation des fibres. Le mouvement de l'eau liée s'effectue par diffusion : il faut fournir la chaleur latente de vaporisation et la chaleur latente d'absorption (ou de mélange) pour l'éliminer.

Puis nous avons l'eau vapeur qui comme l'eau liée se situe dans le domaine hygroscopique mais dans les cavités cellulaires.

Enfin, il y a l'eau capillaire (ou eau libre) qui se trouve dans les cavités cellulaires. Le déplacement de l'eau libre à travers les capillaires se produit par force de succion. De nombreuses propriétés du bois sont insensibles (ou peu sensibles) à la quantité d'eau capillaire : dimensions, résistance mécanique, ... (*Perré [1994]*).

La vapeur en équilibre avec l'eau libre est en général différente de la pression de vapeur saturante à cause de l'influence des forces de capillarité.

I.2.2. Les différents types de transport de l'eau dans le bois

Lors du séchage du bois à l'air libre, l'eau à ou près de la surface de l'avivé s'évapore tout d'abord. Puis, l'eau plus profonde dans le bois se déplace des zones d'humidités élevées vers des zones d'humidités plus faibles dans le but d'atteindre une humidité d'équilibre dans le bois. Ainsi l'eau à l'intérieur d'une planche humide se déplace du centre vers les zones superficielles plus sèches.

L'eau se déplace dans le bois par l'intermédiaire de nombreux passages. Les principaux sont les cavités dans les cellules, les chambres de ponctuation et les ouvertures de membrane de ponctuation dans les parois cellulaires. Le mouvement de l'eau dans ces passages n'a pas seulement lieu longitudinalement dans les cellules mais également latéralement de cellule à cellule par l'intermédiaire des membranes de ponctuation.

Quand le bois sèche, diverses différences de potentiel peuvent être à l'origine du transport de l'eau. Celles-ci, qui peuvent agir en même temps, sont les suivantes *Stamm [1959]* :

* une différence de pression totale qui impose à l'eau libre de se déplacer dans les cavités cellulaires, les chambres de ponctuation, et les ouvertures de membrane de ponctuation (la même action qui se produit lorsqu'un liquide mouille une mèche). Cette différence de pression due aux forces de capillarité peut provoquer le mouvement de l'eau dans les capillaires cylindriques dont le rayon minimal R' est donné par la relation de Laplace:

$$\Delta P = -\frac{2\sigma}{R'} \cos\alpha \quad (I.1)$$

σ est la tension superficielle (N/m) de l'eau vis-à-vis du gaz et α , l'angle que fait le ménisque de liquide avec la surface latérale du capillaire. Dans le cas de l'eau et du bois, α est sensiblement égal à 0.

* une différence d'humidité relative de l'eau à l'état vapeur qui va se déplacer dans les cavités cellulaires, les chambres de ponctuation, les ouvertures de membrane de ponctuation et les espaces intercellulaires des régions d'humidité élevée vers celles de plus faible humidité. Il est admis que le mouvement de la vapeur d'eau a lieu par diffusion fickienne F_v sous l'influence d'un gradient de pression partielle P_e ou de concentration de la vapeur d'eau C_e dans l'air :

$$F_v = -\frac{D_{v,eff}}{RT} \nabla P_e = -D_{v,eff} \nabla C_e \quad (I.2)$$

$D_{v,eff}$ est le coefficient de diffusion apparent en phase vapeur. Il peut être relié au coefficient de diffusion de l'eau vapeur dans l'air, à la porosité ε et au facteur de tortuosité du bois τ . Il dépend de l'humidité et de la température. Une relation utilisée au niveau des milieux poreux conduit à :

$$D_{v,eff} = D_{v,air} \frac{\varepsilon}{\tau} \quad (I.3)$$

Selon *Stanish [1986]*, la diffusion de l'eau vapeur est due au gradient de la fraction molaire d'eau dans la phase gazeuse. La contribution de la diffusion en phase gazeuse est très importante sur la vitesse totale de migration de l'eau.

* *une différence d'humidité en phase adsorbée* qui suppose un mouvement de l'eau liée vers des régions de plus faibles humidités au sein des passages à l'intérieur des parois cellulaires. Le mouvement de l'eau liée s'effectue également par diffusion fickienne au travers des parois cellulaires, sous l'influence d'un gradient d'humidité :

$$F_m = -\rho_0 D_m \nabla x \quad (I.4)$$

où x est l'humidité absolue du bois.

Il est naturel d'admettre que le flux d'un constituant J est proportionnel au gradient de concentration, par analogie avec la loi de Fourier pour l'écoulement de la chaleur, ou la loi d'Ohm pour l'écoulement de l'électricité. On obtient ainsi la première loi de Fick. Adolph Fick en 1833 détermine les facteurs qui contrôlent le flux de diffusion en mesurant la vitesse de migration d'un sel à partir d'une solution concentrée dans une couche saturée d'eau pure. Ses expériences sont nécessairement isothermes pour éviter les courants de convection. Fick a montré expérimentalement à différentes températures que le flux est proportionnel au gradient de concentration.

Première loi de Fick $J = -D(\nabla C)$ (I.5)

Un bilan de matière dans un élément de volume en l'absence de flux convectif conduit à l'équation :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\text{div} J \quad (I.6)$$

Si on associe la première loi de Fick avec l'équation de bilan, on aboutit à :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \quad (I.7)$$

Seconde loi de Fick si D est constant dans l'élément de volume

La solution $C(y,t)$ va dépendre des conditions initiales et des conditions limites, qui sont imposées par l'expérience.

Les lois de Fick prédisent que flux de diffusion varie avec le gradient de concentration des molécules diffusantes alors que les scientifiques du bois utilisent en général le gradient de concentration de molécules non diffusantes : l'eau liée. On assiste alors à une divergence d'opinion : tout réside dans la force motrice de la diffusion de l'eau dans le bois.

♣ Concentration d'eau liée : cas des lois de Fick

♣ Gradient de pression d'eau vapeur :

L'équation de Clausius-Clapeyron montre que dans une vapeur saturée, la pression de vapeur d'eau augmente exponentiellement avec la température. Nous obtenons :

$$p = k \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (I.8)$$

où E_a est l'énergie d'activation du processus et k , une constante.

En suivant l'évolution des valeurs des coefficients de diffusion avec la température, **Stamm [1959]**, **Choong [1965]** et **Kang [1997]** trouvent que :

$$D = k \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (I.9)$$

L'équivalence de ces deux relations conduit à affirmer que D est proportionnel à la pression de vapeur et que les molécules vont dans la direction des humidités décroissantes.

Les lois de Fick sont restreintes à des conditions isothermes et pour une seule phase. En utilisant la pression de vapeur (ou pression partielle) comme force motrice, l'équation de la diffusion est ainsi plus universelle.

En revanche, **Bramhall [1995]** et **Hunter [1993]** montrent que quand la composante dépendant de la température du coefficient de diffusion est combinée au gradient de concentration des molécules diffusantes, la force motrice résultante est proportionnelle à la pression de vapeur, et le coefficient de diffusion est indépendant de la température.

* une différence de potentiel chimique : la diffusion de l'eau liée est due au gradient de potentiel chimique des molécules d'eau liée. L'eau liée est supposée être toujours en équilibre thermodynamique local. Une analyse mathématique originale basée sur les relations fondamentales de la thermodynamique est appliquée au potentiel chimique de l'eau liée dans le but d'exprimer le flux de diffusion de l'eau liée en termes de température locale et de pression d'eau vapeur .

* une différence de potentiel chimique + une différence de température : en considérant le cas de la migration de l'eau liée dans un milieu non isotherme, **Siau [1971, 1980, 1987]** pense

que la diffusion thermique, connue sous le nom d'effet Soret, doit contribuer au flux d'eau liée. Il écrit :

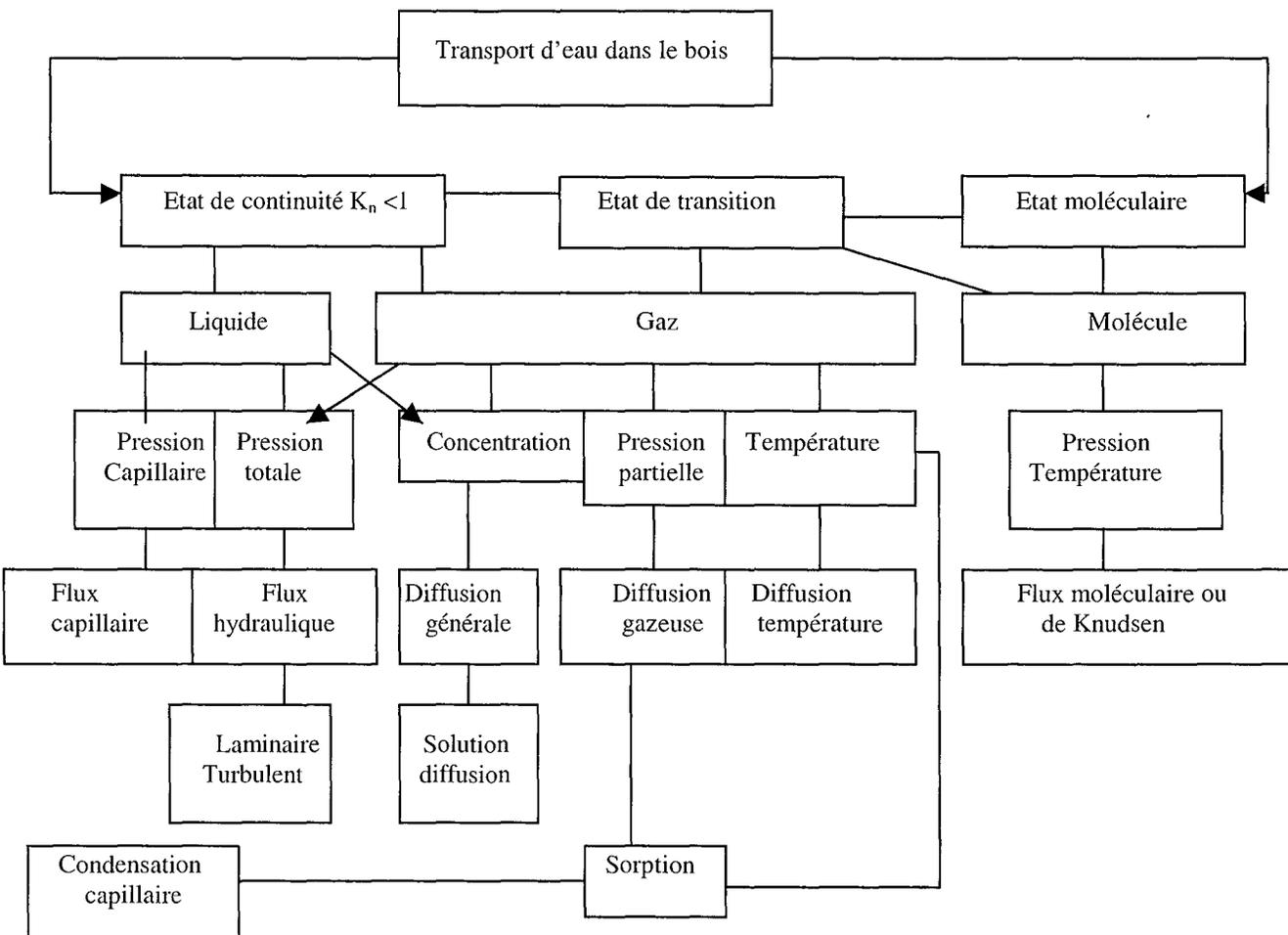
$$J = -K' \left(\frac{\partial \mu'}{\partial x} + \frac{Q^*}{T} \frac{dT}{dx} \right) \quad (I.10)$$

où Q^* est l'énergie thermique échangée en $J.mol^{-1}$, K' un coefficient en $mol.s.m^{-3}$ et μ' l'énergie libre ou le potentiel chimique de l'eau liée en $J.mol^{-1}$.

Skaar et *Siau* [1981] pensent que la diffusion d'eau liée est un processus activé : les molécules d'eau liée doivent atteindre un certain niveau d'énergie pour migrer d'un site de sorption à un autre. Ils supposent également que le flux d'eau liée est proportionnel au gradient de concentration des molécules activées et que la concentration suit une distribution en température du type Boltzmann.

Dans le tableau I.1 sont résumés les différents mécanismes de transport d'eau.

Tableau I : Mécanismes de transport de l'eau au sein du bois



Le transport de l'eau par diffusion au sein du bois fait apparaître une difficulté dans la mesure où le transport diffusionnel se fait à la fois dans le gaz pour l'eau sous forme vapeur et au niveau des fibres de bois pour l'eau adsorbée. Dans la plupart des modèles, ces deux types de transport ne sont pas différenciés. En effet, pour l'évaluation du coefficient de diffusion, une seule force motrice est proposée. A notre avis, cette approche n'est pas suffisante et l'objectif de notre recherche est de préciser séparément les deux types de transport diffusionnel.

I.2.3. Les méthodes de détermination de l'humidité du bois

Rappelons que l'humidité absolue du bois (ou humidité base sèche) est le rapport (ou le pourcentage) de la masse d'eau contenue dans le bois sur la masse du bois sec ou anhydre.

L'humidité du bois est déterminée essentiellement par la méthode dite de la pesée et par l'utilisation d'humidimètres électriques.

a) Méthode dite de la pesée

C'est la méthode la plus courante pour déterminer l'humidité du bois. Elle est généralement effectuée sur un prélèvement transversal du bois. La méthode comporte les étapes successives suivantes :

* immédiatement après la coupe, enlever tous les éclats de bois et peser le prélèvement. Soit m , la masse obtenue

* déposer le prélèvement dans un four maintenu à 105°C et le maintenir jusqu'à l'obtention d'une masse constante, atteinte, en général au bout de 24 heures

* peser pour obtenir la masse sèche, soit m_0

L'humidité absolue du bois est donnée par la relation suivante :

$$x = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (I.11)$$

Pour déterminer les masses, une balance automatique à lecture directe est très convenable quand plusieurs échantillons doivent être pesés.

b) Méthodes électriques

Les humidimètres électriques permettent une détermination de l'humidité sans couper ou endommager l'avivé. De tels humidimètres sont rapides et raisonnablement précis pour les humidités comprises entre 7 et 25 %. Il en existe deux types : un type résistif basé sur la relation existant entre l'humidité et la résistance électrique, et un type capacitif, qui utilise la

relation entre l'humidité et les propriétés diélectriques du bois humide. Les humidimètres résistifs sont plus fréquents dans la mesure où leur étalonnage est peu sensible à la nature de l'essence contrairement au cas des humidimètres capacitifs.

I.2.4. Les équilibres d'adsorption - désorption d'eau dans le domaine hygroscopique

Le phénomène d'adsorption dans un état d'équilibre, est généralement caractérisé par une isotherme d'adsorption. Elle représente la variation à une température T fixée de la quantité adsorbée de soluté q par un solide en fonction de la pression partielle P du soluté à adsorber en phase fluide. $q = f(P)$ est une courbe monotone continûment croissante. L'aspect et l'interprétation des isothermes sont développés plus loin. Pour plus de détails, on pourra consulter l'ouvrage de *L.Schuffenecker* [1991].

Dans ce qui suit, nous allons rappeler quelques notions générales sur le phénomène d'adsorption d'un soluté gazeux sur un solide, puis nous présenterons certaines théories et les relations semi-empiriques proposées par différents auteurs pour représenter les isothermes d'adsorption de l'eau vapeur au sein du bois.

a) Isothermes d'adsorption

*** Isotherme de Langmuir**

Le modèle d'isotherme d'adsorption le plus simple est celui proposé par Langmuir. Les hypothèses à la base de ce modèle sont les suivantes :

- * la surface est uniforme
- * une molécule du gaz heurtant la surface nue peut être adsorbée avec la probabilité s_0 quel que soit le recouvrement (pas d'interactions latérales des molécules adsorbées)
- * une molécule heurtant une molécule déjà adsorbée rebondit simplement sans adsorption

Considérons la surface S du solide et la fraction θ recouverte par adsorption. A l'équilibre, sous une pression P , les vitesses d'adsorption et de désorption r_a et r_d sont égales. Ces vitesses peuvent s'écrire :

$$r_a = k_a(1-\theta)P \quad (I.12)$$

$$r_d = k_d\theta$$

L'égalité de ces deux vitesses à l'équilibre conduit à l'expression analytique de la fraction couverte (et donc, à un facteur près, de la quantité adsorbée q) :

$$\theta = \frac{bP}{1+bP} \quad (\text{I.13})$$

avec $b = k_a/k_d$.

Remarquons que l'égalité peut également s'écrire sous la forme :

$$\theta^* = 1 - \theta \quad (\text{I.14})$$

où θ^* est le taux de non recouvrement.

Cette relation exprime la loi d'action des masses de la réaction équilibrée d'adsorption de la molécule X :

$$X + \text{site}^* = X^* \quad (\text{I.15})$$

où θ/θ^* est le rapport des concentrations $[X^*]$ et $[X]$. Le terme b est donc la constante d'équilibre de la réaction d'adsorption.

A faible recouvrement, la quantité adsorbée q est sensiblement proportionnelle à P , alors que lorsque P augmente, q tend vers une valeur limite q_m , correspondant au recouvrement du solide par une monocouche ($\theta = 1$).

La variation de la grandeur q peut être exprimée en remplaçant θ par q/q_m dans l'expression de $\theta(P)$; la représentation de $1/q$ en fonction de $1/P$ permet, si elle est linéaire, de valider le modèle et donne par extrapolation la valeur q_m :

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m} \left(1 + \frac{1}{bP} \right) \quad (\text{I.16})$$

* Isothermes expérimentales de physisorption

Les isothermes expérimentales de physisorption peuvent être tracées jusqu'à la pression limite de vapeur saturante P_s à laquelle la condensation apparaît. Il est donc usuel de porter en abscisse la pression relative P/P_s . Ces isothermes sont de formes diverses et classées en cinq types principaux dont on peut trouver les représentations sur la figure I.6.

L'isotherme de type I est l'isotherme de Langmuir, la plus fréquemment rencontrée.

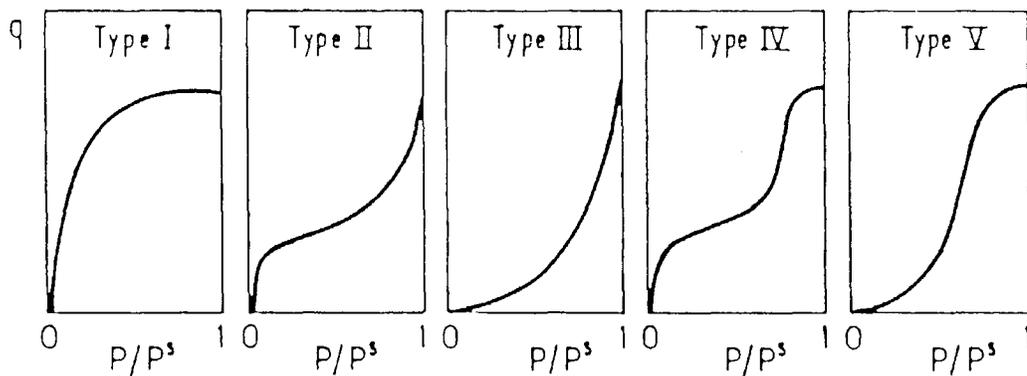


Figure 1.6 : Types fondamentaux d'isothermes de physisorption gaz-solide

Brunauer, Emmett et Teller se sont attachés à décrire l'isotherme de type II par une théorie dite « BET ». Cette isotherme ressemble à celle de type I aux faibles pressions puis, au lieu de tendre vers l'adsorption limite, un excès d'absorption apparaît et se développe jusqu'au moment où l'on atteint la condensation. Ceci conduit à penser qu'il ne se forme pas uniquement une monocouche mais que des molécules peuvent s'adsorber sur cette monocouche et ainsi de suite. Il se forme ainsi des multicouches, stade précurseur de la condensation.

Une hypothèse complémentaire est que l'adsorption sur les couches déjà formées a lieu comme sur l'adsorbant à l'état liquide. Seule l'adsorption sur la surface du solide est différente. Dans ces conditions, on obtient l'expression classique de l'**isotherme BET** reliant la quantité adsorbée q à la pression P sous la forme :

$$\frac{P}{q(P_s - P)} = \frac{1}{q_m C} + \frac{C-1}{q_m C} \frac{P}{P_s} \quad (\text{I.17})$$

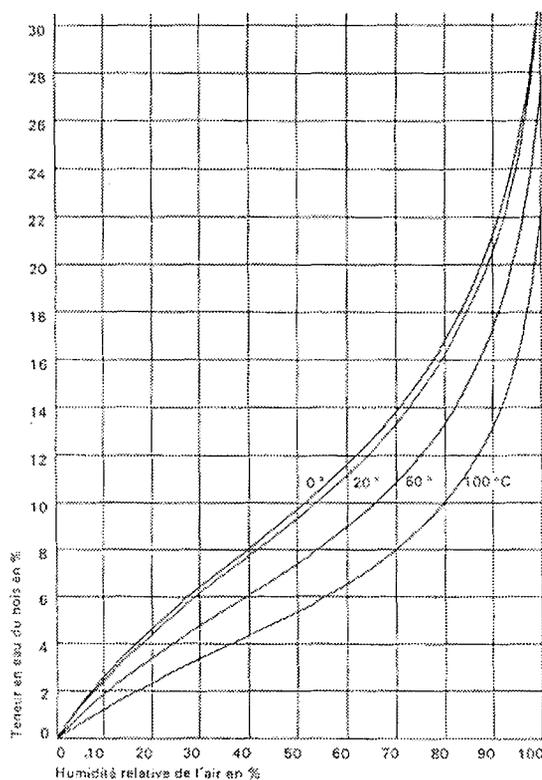
avec P_s , la pression de vapeur saturante, q_m , la quantité correspondant à une monocouche
 C , le rapport de la constante d'équilibre d'adsorption sur le solide à celle d'adsorption sur l'adsorbant à l'état liquide (généralement largement supérieure à 1).

La pression P_s étant connue, la variation du terme de gauche en fonction de P/P_s permet, si elle est linéaire, de valider le modèle et de déterminer q_m . De la valeur de q_m , on obtient l'aire du solide en faisant une estimation de l'aire élémentaire occupée par une molécule d'adsorbant.

* Isothermes d'adsorption de l'eau sur le bois

Comme l'indique la figure I.7, les courbes d'équilibre entre l'eau vapeur et l'eau adsorbée sur le bois sont du type II. Elles dépendent peu de l'essence. En revanche, la cinétique d'atteinte de l'équilibre est très tributaire de la masse volumique de l'essence, de sa structure anatomique et le cas échéant, des traitements hydrofuges effectués sur le matériau.

L'isotherme d'adsorption dépend de la température et lorsque l'on augmente celle-ci, l'humidité du bois en équilibre avec une valeur fixée de l'humidité relative diminue, d'où l'effet très bénéfique de la température dans une opération de séchage. Malgré l'accroissement de la fraction massique d'eau dans la phase gazeuse, la fraction massique d'eau fixée dans le bois diminue.



***Figure I.7 : Isothermes d'adsorption de l'eau sur l'épicéa à différentes températures
d'après Lignum [1960]***

La détermination expérimentale de l'équilibre d'absorption se fait en général en plaçant les échantillons dans des enceintes à température fixée et à humidité croissante et en suivant leur variation de masse en fonction du temps. Lorsque celle-ci devient constante, on considère que l'équilibre hygroscopique est atteint. A la place d'enceintes climatiques, on peut utiliser des récipients où l'air est au contact d'une solution aqueuse saturée par un sel approprié ou une

solution aqueuse d'acide sulfurique de concentration variable. A une température fixée, il existe dans la littérature des tableaux donnant la pression partielle de vapeur d'eau en équilibre avec la solution.

L'isotherme d'adsorption peut être obtenue en plaçant les échantillons de bois sous des atmosphères à humidités relatives croissantes mais aussi en partant de l'état saturé en plaçant les échantillons sous des atmosphères où l'humidité relative diminue.

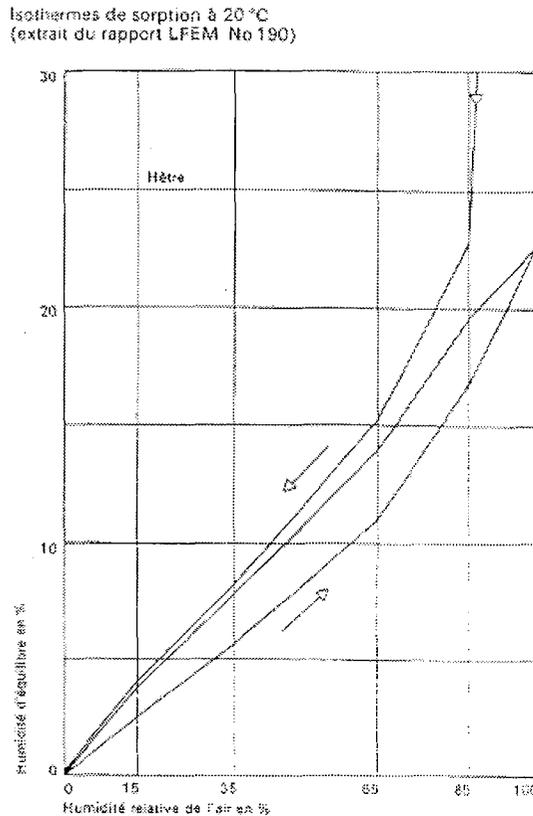


Figure I.8 : Isothermes de sorption du hêtre à 20°C d'après Lignum [1960]

Comme pour de nombreux supports solides microporeux, on constate que l'isotherme dit de désorption est différente de l'isotherme d'adsorption (Figure I.8). Si on opère différents cycles consécutifs d'adsorption et de désorption, on met en évidence un phénomène d'hystérésis. L'isotherme de désorption est située au-dessus de celle d'adsorption.

D'après certains auteurs (*Stamm [1964], Hartley [1993]*), le cycle d'hystérèse est dû à une réhydratation incomplète des sites d'adsorption de la cellulose après une adsorption ou à des forces de gonflement qui entraînent une déformation mécanique irréversible lors de la désorption. Une autre raison peut être comme dans le cas des supports microporeux le phénomène de condensation capillaire.

b) Modèles mathématiques représentatifs des isothermes d'adsorption de l'eau dans le bois

* Modèle B.E.T.

Brunauer, Emmett et Teller [1938] se sont attachés à décrire l'isotherme de type II par une théorie dite "B.E.T.". Cette isotherme ressemble à celle de type I aux faibles pressions, puis au lieu de tendre vers l'adsorption limite, un excès d'absorption apparaît et se développe jusqu'au moment où l'on atteint la condensation. Ceci conduit à penser qu'il ne se forme pas uniquement une monocouche mais que des molécules peuvent s'adsorber sur cette monocouche et ainsi de suite. Il se forme ainsi des multicouches, stade précurseur de la condensation, le nombre maximum de couches serait de 6 ou 7.

Si on introduit le nombre n de couches adsorbées, l'humidité du bois à l'équilibre x est donnée en fonction de l'humidité relative H_R de l'air par la relation :

$$x = \frac{x_0 b H_R}{1-b} \frac{1-(n+1)b^n + n H_R^{n+1}}{1+(b-1)H_R + b H_R^{n+1}} \quad (I.18)$$

x_0 désigne l'humidité du bois correspondant à la première couche, b est une constante reliée à l'énergie de liaison des molécules d'eau avec le support.

L'isotherme de sorption décrite par ce modèle est en accord avec l'expérience pour des humidités relatives comprises entre 0 et 50%.

Le modèle B.E.T. pose l'hypothèse que les propriétés thermodynamiques de l'eau adsorbée sur les couches secondaires sont identiques à celles de l'eau libre, c'est-à-dire que l'apport de la chaleur latente de vaporisation est suffisant pour évaporer les molécules d'eau des couches secondaires.

* Modèle de Dent [1977]

Ce modèle correspond à une amélioration du modèle B.E.T., en considérant que l'eau adsorbée sur les couches secondaires n'a pas les mêmes propriétés thermodynamiques que l'eau libre.

L'humidité du bois à l'équilibre est donné par la relation :

$$x = \frac{x_0 b_1 H_R}{[(1-b_2 H_R)(1+b_1 H_R - b_2 H_R)]} \quad (I.19)$$

où b_1 et b_2 sont des constantes d'équilibre liées respectivement à l'énergie de liaison des couches primaires et secondaires.

✱ **Théorie d'Hailwood –Horrobin [1946]**

Cette théorie a été appliquée au bois et aux textiles qui ont des isothermes de sorption ayant la forme d'une sigmoïde. Elle fait intervenir les équilibres entre l'eau vapeur et l'eau liquide et l'eau liquide et l'eau intégrée au support (appelée hydrate).

L'humidité du bois à l'équilibre est donnée en fonction de l'humidité relative de l'air par la relation :

$$x = \frac{18}{M_P} \left[\frac{K H_R + \sum_{i=1}^n i (K H_R)^i \prod_{i=1}^n K_i}{1 - K H_R + \sum_{i=1}^n (K H_R)^i \prod_{i=1}^n K_i} \right] \quad (I.20)$$

M_P est la masse molaire de l'unité de polymère formant les hydrates, K est la constante d'équilibre entre l'eau vapeur et l'eau liquide, K_i est la constante d'équilibre entre l'eau liquide et l'hydrate de la couche i et n , le nombre de couches.

L'isotherme d'adsorption obtenue par la relation précédente est assez proche de celle donnée par le modèle de *Dent*.

✱ **Théorie d'Anderson-Mc Carthy et modèles dérivés**

Cette théorie semi-empirique a été proposée à l'origine par *Anderson* et *Mac Carthy* en 1963. Dans cette théorie, l'humidité du bois à l'équilibre est liée à l'énergie de liaison de la molécule d'eau adsorbée dont la valeur dépend de l'humidité relative de l'air. En 1983, *Nelson* a relié l'humidité du bois à l'enthalpie libre du phénomène d'adsorption. Plus précisément, l'humidité du bois à l'équilibre est liée à l'humidité relative de l'air par la relation :

$$\frac{H_R}{100} = \exp \left\{ - \left[\frac{M_e \Delta G_0}{RT} \right]^{1 - \frac{x}{x_{PSF}}} \right\} \quad (I.21)$$

où M_e est la masse molaire de l'eau

ΔG_0 est l'enthalpie libre de l'adsorption à $x \rightarrow 0$

x_{PSF} est l'humidité du bois au point de saturation des fibres ($H_R = 100\%$).

Babiak en 1950 a utilisé la relation précédente sous la forme :

$$\ln \left(\ln \frac{100}{H_R} \right) = \ln A - Bx \quad (I.22)$$

A et B sont des constantes qui dépendent de la température :

$$A = 7,730 - 0,0143T \quad (I.23)$$

$$B = 0,875 + 0,0567T$$

* Modèle de Lartigue et Puiggali [1981]

Il s'agit d'une relation semi-empirique permettant de représenter les isothermes d'adsorption mesurées dans le cas d'échantillons de Pin des Landes. La relation donnant l'humidité du bois à l'équilibre en fonction de l'humidité relative de l'air est telle que :

$$x = \frac{\text{Ln}Q}{100\text{Ln}B'} \quad \text{avec} \quad Q = \frac{C'}{A'} - \text{Ln}H_R \quad (\text{I.24})$$

Les coefficients A', B' et C' dépendent de la température et sont donnés par les relations suivantes :

$$\begin{aligned} A' &= -2,86 \cdot 10^{-5} T^2 - 1,075 \cdot 10^{-2} T + 10,238 \\ B' &= -5,414 \cdot 10^{-4} T + 1,0134 \\ C' &= 4,97 \cdot 10^{-6} T^2 - 2,667 \cdot 10^{-3} T + 0,3546 \end{aligned} \quad (\text{I.25})$$

La température doit être exprimée en K.

Cette relation établie dans le cas du Pin des Landes peut être utilisée pour l'ensemble des résineux.

* Autres modèles et relations

Hunter [1996], contrairement aux théories qui distinguent l'adsorption sur un support de l'adsorption sur les molécules d'eau adsorbées, explique l'isotherme d'adsorption de l'eau sur le bois par un seul mécanisme de condensation capillaire. Il aboutit à la relation d'équilibre suivante :

$$\frac{x}{x_{\text{PSF}}} = \frac{2}{3 \left(\frac{2-H_R}{H_R} \right)^{1/2} - 1} \quad (\text{I.26})$$

Hunter montre que cette relation représente bien les données expérimentales obtenues sur le pin à 25°C.

Malmquist [1995, 1996] utilise une théorie de sorption basée sur une distribution spatiale des molécules d'eau le long des molécules de cellulose à une dimension et principalement sur les parties amorphes des parois cellulaires. Cette théorie a été appliquée pour des isothermes d'adsorption mesurées sur des échantillons de bois initialement à l'état vert (*Spalt [1957, 1958]*). La relation d'équilibre s'écrit sous la forme :

$$\frac{x}{x_{\text{PSF}}} - 1 = \left(\frac{1}{H_R} - 1 \right)^{1/3} \quad (\text{I.27})$$

Signalons enfin qu'il existe dans la littérature un certain nombre de diagrammes basés sur différentes déterminations expérimentales qui permettent d'obtenir très rapidement la valeur de l'humidité du bois en équilibre avec un air humide dont on connaît la température et

l'humidité relative. Ces diagrammes peuvent être utilisés pour la plupart des essences de bois courantes. On peut citer à cet effet les courbes d'équilibre publiées par le Laboratoire des Produits Forestiers du Département Américain de l'Agriculture [1974] dont une formulation mathématique a été proposée par *Nadler et coll.* en 1985.

I.3. La perméabilité du bois

L'objectif de ce travail de recherche est de préciser les transports diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique du bois. Toutefois, certaines des méthodes utilisées pour atteindre le coefficient de diffusion font apparaître un écoulement convectif qui permet d'obtenir la perméabilité de l'échantillon. Aussi, dans ce paragraphe, nous allons rappeler la loi de Darcy qui gouverne généralement le transport convectif au sein d'un milieu poreux, puis quelques théories proposées ces dernières années pour relier le flux convectif au gradient de pression totale. Pour finir, nous indiquerons les paramètres pouvant influencer la perméabilité du matériau bois.

Le transport convectif d'un fluide au sein du bois ne peut exister que si les espaces vides sont interconnectés par des ouvertures. Le transport des fluides dans les feuillus consiste en un flux au sein des paires de ponctuations et des perforations. Le transport au travers des parois des cellules par d'autres voies est négligeable par comparaison (*Wiedenbeck [1990]*).

Pour les résineux, les flux existent dans les trachéides, mais les canaux résinifères peuvent être la voie principale du flux pour le bois séché. De même, pour l'ensemble des essences, le flux convectif longitudinal est limité par la taille et le nombre des paires inter-vaisseaux ou inter-trachéides et la fermeture des paires de ponctuations pendant le séchage.

I.3.1. Expression du flux convectif – Relation de Darcy

L'expression du flux convectif dans un milieu poreux a été donnée par Darcy en 1856, lors d'une expérience effectuée dans un lit de sable dont la représentation schématique est rapportée dans un ouvrage de *Scheidegger [1974]*.

Les hypothèses pour lesquelles s'applique la relation de Darcy sont les suivantes :

- * le fluide est homogène et incompressible
- * le milieu poreux est isotrope
- * il n'y a pas d'interaction entre le fluide et le substrat

Dans ces conditions, le flux convectif est proportionnel au gradient de pression totale dans la direction de l'écoulement, soit :

$$u = \frac{B \Delta P}{\mu \Delta y} \quad (\text{I.28})$$

u est la vitesse moyenne du fluide calculée sur la section droite totale de l'écoulement

μ est la viscosité du fluide

$\frac{\Delta P}{\Delta y}$ est le gradient de pression totale dans la direction y de l'écoulement

B est la perméabilité du milieu poreux exprimée en m^2 .

Pour les liquides, la relation (I.28) est assez bien vérifiée car les liquides sont incompressibles.

En revanche, pour les gaz, la variation de pression totale peut devenir importante même pour des épaisseurs faibles du milieu poreux. Pour un écoulement isotherme et stationnaire, on a :

$$\begin{cases} \frac{P}{\rho} = \text{cste} \\ \rho u = \text{cste} \end{cases} \quad \text{d'où } Pu = \text{cste} \quad (\text{I.29})$$

Dans ces conditions,

$$u = \frac{1}{P} \frac{B \Delta P \bar{P}}{\mu \Delta y} \quad (\text{I.30})$$

La vitesse u est calculée à la pression P et \bar{P} représente la valeur moyenne arithmétique de P sur la distance Δy .

Lorsque la loi de Darcy est appliquée au bois, on observe des écarts car les hypothèses de la loi ne sont pas nécessairement vérifiées.

La relation entre la vitesse et le gradient de pression n'est pas toujours observée car les pores dans lesquels circule le fluide ne sont pas rectilignes et indépendants. Ils sont tortueux, interconnectés et la présence de ces singularités augmente le gradient de pression nécessaire pour assurer l'écoulement du fluide avec une vitesse donnée. Les liquides dans le bois sont incompressibles, mais en revanche la compressibilité des gaz doit être prise en considération si les variations de pression totale ne sont pas négligeables. Le bois n'est pas isotrope et il faut distinguer les perméabilités dans les trois directions orthotropiques du matériau.

Enfin, en présence d'eau, l'absorption des groupements hydroxyles sur le bois peut modifier la géométrie des cavités et des ponctuations et donc la migration de la phase gazeuse dans le domaine hygroscopique.

Pour certains auteurs, la loi de Darcy est bien vérifiée dans le cas du bois (*Sucoff [1965], Resch et Ecklund [1964]*). En revanche, *Bramhall [1971a, 1971b]* indique que la loi ne s'applique qu'aux essences très perméables.

Nous allons dans ce qui suit, rappeler quelques particularités qui conduisent à modifier l'expression générale de la relation de Darcy.

I.3.2. Modifications de la relation de Darcy

a) Prise en compte des dégradations d'énergie cinétique

Les zones dans lesquelles circule le fluide n'étant pas linéaires ou rectilignes (coudes, rétrécissements, élargissements,...), la dégradation d'énergie cinétique va conduire à une différence de pression totale proportionnelle au carré de la vitesse (*Siau et Petty [1979]*). Au niveau des éléments structuraux du bois où le fluide pénètre par les ouvertures des ponctuations, les lumens des vaisseaux ou des trachéides, la dégradation d'énergie cinétique devient notable pour des ouvertures allant de 0,005 à 2 μm (*Perng [1980a, 1980b]*). La prise en compte de cette dégradation d'énergie dans les ponctuations est importante et elle peut représenter près de 90% de la résistance de l'écoulement dans le cas de l'épicéa Sitka séché à l'air (*Erickson [1969]*).

L'influence du terme de dégradation cinétique a été précisée par *Kuroda et Siau [1988]* pour le pin loblolly, le douglas et l'épicéa. Des études similaires ont été effectuées par *Lu et Avramidis [1999a]* dans le cas du douglas, du pin, du chêne rouge, les bois étant verts et prélevés dans le duramen. La variation non linéaire de la perte de charge en fonction du débit n'est observée que dans le cas du duramen de chêne rouge.

b) Prise en compte d'un écoulement moléculaire pour les écoulements gazeux

Quand les dimensions des capillaires sont du même ordre de grandeur ou plus petites que le libre parcours moyen des molécules de gaz, le flux transféré devient moléculaire. Les collisions molécule-molécule deviennent négligeables devant les collisions molécule-paroi. Dans ces conditions, la viscosité ne joue pas directement sur le flux de molécules qualifié de Knudsen par *Carman [1956]*. D'après la théorie cinétique des gaz, le libre parcours moyen peut être évalué par la relation :

$$\lambda = \frac{2\mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (\text{I.31})$$

μ est la viscosité du gaz et P , la pression totale. A la température ordinaire et à la pression atmosphérique, le libre parcours moyen pour l'air est de l'ordre de 0,1 μm .

Pour des capillaires cylindriques de rayon r , le flux moléculaire peut être évalué par la relation de Knudsen :

$$u = \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2RT}{M\pi}} \frac{Ar \Delta P}{P \Delta y} \quad (\text{I.32})$$

où A est la constante d'Adzumi égale à 0,9 pour les gaz monomoléculaires.

Le flux moléculaire est négligeable dans le cas des liquides (λ petit). Par suite, la perméabilité du bois mesurée à l'aide d'un gaz sera plus élevée que celle mesurée à l'aide d'un liquide.

Pour les feuillus dont les ouvertures de vaisseaux sont larges, le flux moléculaire est négligeable (*Lu et Avramidis [1999b]*). Ainsi, *Smith et Lee [1958]* n'ont pas observé de flux moléculaire dans le cas du hêtre où les diamètres des vaisseaux sont de l'ordre de 60 μm . *Comstock [1967]* a introduit un paramètre permettant de préciser le domaine d'existence du flux moléculaire, soit :

$$X = \frac{\lambda}{2r} \sqrt{\frac{8}{\pi}} \quad (\text{I.33})$$

A un coefficient près, ce paramètre est similaire au nombre de Knudsen :

$$\text{Kn} = \frac{\lambda}{r} \quad (\text{I.34})$$

Lorsque X est supérieur à 1, le flux est moléculaire. Pour X inférieur à 0,014, le flux convectif est uniquement visqueux. D'après *Vásquez [1997]*, le rayon limite à partir duquel le flux devient moléculaire est de 0,025 μm (0,028 μm pour *Comstock [1967]*).

I.3.3. Expression générale du flux convectif

La perte de charge totale dans un capillaire de rayon r et de longueur L associant un écoulement laminaire et des pertes de charge singulières s'écrit :

$$\Delta P = \Delta P_L + \Delta P_s = \frac{8\mu u L}{r^2} + \beta \rho u^2 \quad (\text{I.35})$$

Dans cette relation proposée par *Tompkins [1974]*, β est un coefficient de pertes d'énergie cinétique dues aux singularités et aux effets de bout. *Lu et Avramidis [1999a]* donnent pour β la valeur 1,19.

La relation (I.35) peut être écrite :

$$\Delta P = \frac{8\mu u L}{r^2} (1 + 0,074 \text{Re}(\frac{r}{L})) \quad (\text{I.36})$$

où le nombre de Reynolds Re est tel que :

$$\text{Re} = \frac{2\rho u r}{\mu} \quad (\text{I.37})$$

Si on intègre le fait que la longueur L des capillaires est supérieure à la distance droite entre les extrémités L' (correction de Couette pour les petits capillaires $L/r < 100$), soit $L = \tau L'$ (τ est un facteur de tortuosité) et qu'en présence d'un gaz, le fluide est compressible, on aboutit à la relation :

$$\frac{\Delta P}{L'} = \frac{8\mu u \tau P}{r^2 P} \left[(1 + 0,074 \text{Re}(\frac{r}{L'}) \frac{\bar{P}}{P\tau}) \right] \quad (\text{I.38})$$

Si nous posons :

$$\frac{\Delta P}{L'} = \frac{1}{B'} \frac{\mu u P}{P} \quad (\text{I.39})$$

Alors la perméabilité B' est égale à :

$$B' = \frac{r^2}{8\tau \left[(1 + 0,074 \text{Re}(\frac{r}{L'}) \frac{\bar{P}}{P\tau}) \right]} \quad (\text{I.40})$$

La relation (I.40) a été proposée par *Kuroda et Siau [1988]* pour évaluer la perméabilité d'un gaz dans un capillaire de rayon r .

Dans le cas du bois, un flux moléculaire peut coexister avec le flux visqueux. Dans ces conditions, la vitesse u est :

$$u = \frac{r^2}{8\mu} \frac{\Delta P \bar{P}}{\Delta y P} + \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{Ar}{P} \quad \text{équation d'Adzumi [1937]} \quad (\text{I.41})$$

Si on pose $u = \frac{B''}{\mu} \frac{\Delta P \bar{P}}{\Delta y P}$, on obtient pour la perméabilité B'' la valeur :

$$B'' = \frac{r^2}{8} \left(1 + \frac{4}{3} \sqrt{\frac{2RT}{\pi M}} \frac{A\mu}{Pr} \right) \quad (\text{I.42})$$

En introduisant le libre parcours moyen :

$$B'' = \frac{r^2}{8} \left(1 + \frac{16\sqrt{2}A}{3\sqrt{\pi}} \lambda \right) \quad (\text{I.43})$$

Si on prend pour A la valeur 0,9, on aboutit à :

$$B'' = \frac{r^2}{8} \left(1 + 3,8 \frac{\lambda}{r} \right) \quad \text{équation de Klinkenberg} \quad (\text{I.44})$$

La relation donnant $u \frac{\Delta y}{\Delta P} P$ en fonction de \bar{P} permet de préciser la contribution du flux moléculaire. *Perng [1980a, 1980b]* trouve que le rapport $\frac{B''8}{r^2}$ est égal à 1,308 pour le frêne, l'érable, le bouleau et le hêtre et 1,503 pour les conifères. D'après *Petty [1970]*, le flux moléculaire donné par la relation d'Adzumi n'est plus valable pour les capillaires où les rapports rayon du pore/ longueur du pore sont supérieurs à 1 (cas des membranes de

ponctuations ou des ouvertures de ponctuations). Il propose d'évaluer le flux convectif par la relation suivante (équation d'Adzumi modifiée):

$$u = \frac{Kc r^2}{8} \frac{1}{\mu} \frac{\Delta P}{\Delta y} \frac{1}{P} + \frac{Kc}{\sqrt{2\pi r P}} \Delta P \quad (I.45)$$

Kc est le facteur de Clausing égal à :

$$Kc = \left(1 + \left(\frac{3L}{8r}\right)^{-1}\right)^{-1} \quad (I.46)$$

L désignant la longueur du capillaire.

$$\text{Si } \frac{L}{r} \rightarrow \infty \quad Kc \rightarrow 1$$

$$\text{Si } \frac{L}{r} \rightarrow 0 \quad Kc \rightarrow 0$$

Pour toutes les essences étudiées par *Kumar* [1979], à savoir "kaim", marronnier d'Inde, "toon", "udal", le flux visqueux est accompagné d'un flux moléculaire en dépit des grands diamètres des vaisseaux.

I.3.4. Autres modèles morphologiques permettant d'évaluer le flux convectif

Dans le paragraphe précédent, nous avons supposé que l'écoulement se faisait dans un capillaire cylindrique de rayon r et de longueur L sans donner de précisions sur les agencements possibles entre les différents capillaires. Nous rappelons dans ce paragraphe quelques modèles morphologiques envisagés pour représenter un milieu poreux qui peuvent être utilisés pour prédire la perméabilité de ce milieu.

a) Modèle du faisceau de capillaires rectilignes parallèles indépendants

C'est le modèle le plus simple dont la représentation schématique est donnée en figure I.9.

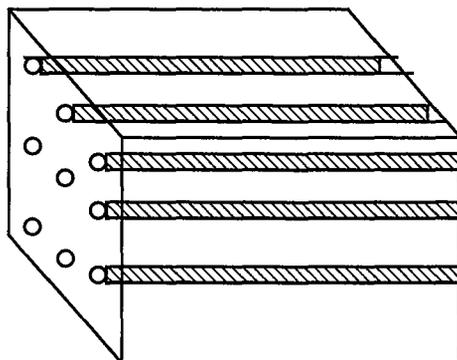


Figure I.9 : Modèle du faisceau de capillaires parallèles et indépendants

En admettant que l'écoulement dans les capillaires est laminaire et en supposant que l'hypothèse de Dupuit-Forscheimer s'applique (la fraction de surface occupée par les bouches des capillaires dans la section droite est égale à la fraction de volume occupée par les capillaires dans le milieu, à savoir la porosité du milieu), on aboutit à :

$$u_m = \frac{r^2}{8\mu} \varepsilon \frac{dP}{dy} \quad (I.47)$$

u_m est la vitesse moyenne du fluide en fût vide

$$u_m = \frac{Q}{\Omega} \quad (I.48)$$

Q est le débit volumique du fluide et Ω la section droite du milieu.

La relation (I.47) peut être écrite en introduisant la surface par unité de volume de fluide au contact du fluide, soit σ' . On a :

$$\sigma' = \frac{2}{r} \quad (I.49)$$

D'où :

$$u_m = \frac{\varepsilon}{2\sigma\sigma'\mu} \frac{dP}{dy} \quad (I.50)$$

Soit pour l'expression de la perméabilité, la relation :

$$B = \frac{\varepsilon}{2\sigma\sigma'} \quad (I.51)$$

b) Modèle du faisceau de capillaires rectilignes et indépendants distribués dans toutes les directions

Par rapport au modèle précédent, les capillaires font un angle α par rapport à la direction moyenne de l'écoulement (Figure I.10)

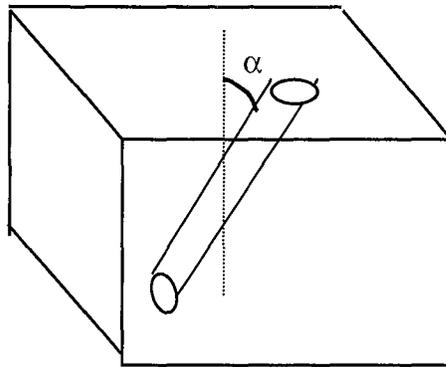


Figure I.10 : Modèle du faisceau de capillaires rectilignes indépendants

Par rapport au modèle précédent, on obtient :

$$u_m = \frac{r^2}{8\mu} \varepsilon (\cos\alpha)^3 \frac{dP}{dy} \quad (I.52)$$

$1/\cos\alpha$ représente la longueur des capillaires sur la distance droite entre les extrémités. C'est l'équivalent du facteur de tortuosité τ . Par suite, en introduisant la surface par unité de volume au contact du fluide, la perméabilité B est égale à :

$$B = \frac{\varepsilon}{2\sigma\tau^3} \quad (I.53)$$

c) Modèle du faisceau de capillaires indépendants distribués dans toutes les directions et avec une distribution du rayon des capillaires

On suppose que les capillaires ont tous la même longueur moyenne, et on postule l'existence d'une distribution des rayons des capillaires. Soit $f(r)$ la fraction de volume occupée par les capillaires dont le rayon est compris entre r et $r + dr$.

On peut montrer que dans ces conditions, la perméabilité est donnée par la relation :

$$B = \frac{\varepsilon}{8\tau^3} \frac{\int_0^{\infty} r^4 f(r) dr}{\int_0^{\infty} r^2 f(r) dr} \quad (I.54)$$

d) Modèle de Kozeny

Au lieu de raisonner par rapport au rayon du capillaire, on introduit la surface spécifique a_g du milieu poreux égale à la surface mouillée par le fluide sur le volume occupé par le solide.

Dans ces conditions, la perméabilité B est telle que :

$$B = \frac{\varepsilon^3}{2\tau^3(1-\varepsilon)^2} \frac{1}{a_g} \quad (I.55)$$

La quantité $2\tau^3$ est appelée la constante de Kozeny et elle est voisine de 4,15 dans le cas d'un milieu poreux isotrope constitué de grains isométriques.

e) Modèle du faisceau de fibres

Dans les modèles précédents, la phase fluide est représentée sous forme de capillaires cylindriques et la phase solide située entre ces capillaires n'a pas de forme géométrique bien définie.

Inversement, on peut imposer à la phase solide une forme géométrique donnée et supposer un écoulement de la phase fluide à l'extérieur de ces obstacles. Avec certaines hypothèses simplificatrices, il est possible dans le cas de particules sous forme de fibres cylindriques de faible rayon par rapport à leur longueur et de particules sphériques, d'évaluer la perméabilité du milieu poreux. On pourra consulter à ce propos l'ouvrage de *Scheidegger* [1974].

f) Modèles spécifiques pour le bois

L'écoulement convectif dans le bois associe en série des zones perméables et des zones moins perméables (par exemple les trachéides et les ouvertures de ponctuations pour les résineux et les vaisseaux et les ponctuations inter-vaisseaux pour les feuillus). Par suite, la résistance globale à l'écoulement pour un résineux est la somme de la résistance caractéristique des trachéides et de la résistance caractéristique des ponctuations (*Petty* [1970]), soit :

$$\frac{1}{g} = \frac{1}{g_t} + \frac{1}{g_p} \quad (I.56)$$

Les conductances g sont proportionnelles aux perméabilités et inversement proportionnelles à la longueur, d'où :

$$\frac{L}{B} = \frac{L_t}{B_t} + \frac{L_p}{B_p} \quad (I.57)$$

Comme la membrane des ponctuations est très mince, on a :

$$L_p \ll L_t \text{ et } L_t \approx L$$

$$\text{d'où} \quad \frac{1}{B} = \frac{1}{B_t} + \frac{L_p}{L B_p} \quad (I.58)$$

$$\text{soit} \quad B = \frac{B_t B_p L}{L B_p + L_p B_t} \quad (I.59)$$

Comstock [1967] a présenté un modèle pour les résineux où la résistance au flux convectif est gouvernée par le nombre et la position des ouvertures de ponctuations (Figure I.11). Il suppose que les ponctuations sont sur les surfaces radiales en bout de cellules. Connaissant le rayon des trachéides, r_t , la longueur des trachéides L_t et la fraction de chevauchement α entre deux trachéides, les perméabilités longitudinales et radiales sont telles que :

$$B_L \propto \frac{L_t(1-\alpha)}{2r_t^2}$$

$$B_T \propto \frac{1}{2L_t(1-\alpha)}$$

d'où

$$\frac{B_L}{B_T} = \frac{L_t^2(1-\alpha)^2}{r_t^2} \quad (I.60)$$

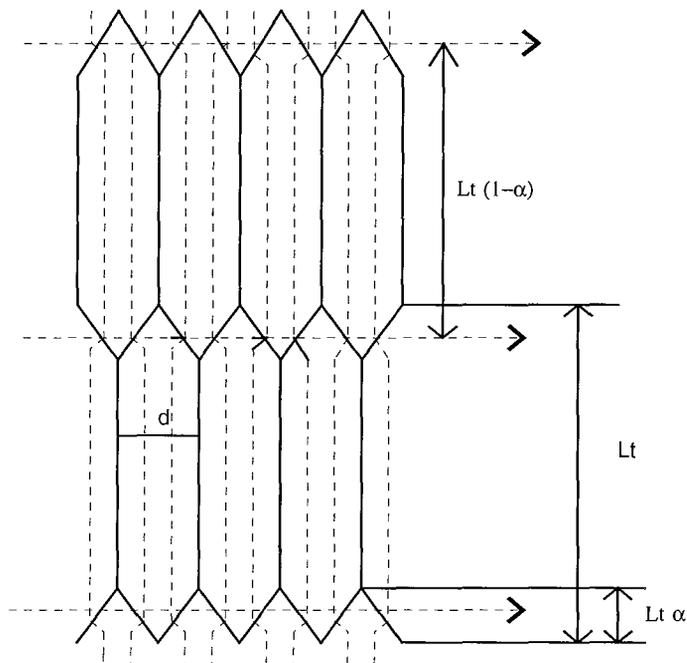


Figure I.11 : Modèle de flux dans les conifères d'après Comstock [1967]

Pour les résineux, le rapport $\frac{L_t}{n}$ est voisin de 200. Par suite,

$$\frac{B_L}{B_T} = 40000(1-\alpha)^2 \quad (I.61)$$

I.3.5. Paramètres influençant la perméabilité du bois

a) Effet du séchage

Lors du séchage du bois vert, les forces capillaires sont importantes et elles obligent la membrane des ponctuations à se déplacer dans une position aspirée réduisant le flux convectif et donc la perméabilité. Ce phénomène a été souligné par *Perré [1987]* et mis en évidence par *Matsumura [1995]* dans le cas du mélèze et par *Fujii [1997]* dans le cas du *Cryptomeria japonica*. Pour d'autres résineux (juniperus, séquoia, thuja) et pour tous les feuillus qui n'ont pas de torus, la variation de la perméabilité n'est pas observée. On peut même constater un accroissement de la perméabilité du au déplacement des extractibles lors du séchage (*Choong [1988]*). De même, un séchage à froid ou par solvant conduit à des perméabilités plus élevées qu'un séchage traditionnel. Ceci est observé dans le cas de l'aubier mais pas dans le duramen (*Bramhall [1971a]*, *Fujii [1997]*).

b) Effet de l'humidité

Au point de saturation des fibres, la perméabilité est la même que celle mesurée pour le bois sec avec un gaz. En revanche, au-delà du point de saturation des fibres, la perméabilité diminue à cause des forces capillaires élevées. Dans le domaine hygroscopique, *Comstock [1968]* montre que la perméabilité des résineux diminue avec l'humidité. A plus faible humidité, l'augmentation de perméabilité est attribuée au retrait des microfibrilles dans les membranes des ponctuations. En revanche, pour de nombreux feuillus, l'effet observé est inversé (*Choong [1988]*).

c) Effet de la longueur de l'échantillon

Dans la littérature, certains auteurs signalent que la perméabilité devient constante au-delà d'une certaine longueur critique (*Perng [1980b]*, *Lu [1997]*). Toutefois, pour des longueurs inférieures à la valeur critique, on observe une diminution généralement exponentielle de la perméabilité en fonction de la longueur de l'échantillon.

d) Effet de la nature de l'essence et de la localisation de l'échantillon

De manière générale, la perméabilité de l'aubier est plus élevée que celle du duramen (*Bramhall [1971a]*, *Chen [1991]*). D'après *Chen [1998]*, la sylviculture a une influence sur la

perméabilité. Une croissance en diamètre plus rapide produit un aubier plus perméable dans le sens longitudinal pour le peuplier mais pas pour le chêne et le noyer. En revanche, la vitesse de croissance de l'aubier n'a aucune influence sur la perméabilité radiale pour les trois essences étudiées. Lorsque l'aubier est converti en duramen, on n'observe plus de différences. La perméabilité peut être différente en fonction de la hauteur de l'arbre et dans les directions radiales au niveau du duramen (*Isaacs [1971]*). Enfin, *Milota [1995]* a montré dans le cas de plantations de pins loblolly que la perméabilité n'est pas statistiquement différente d'arbre en arbre, mais elle dépend de la hauteur dans l'arbre et qu'elle est plus faible dans le bois juvénile que dans le bois adulte.

En définitive, la perméabilité est une caractéristique de transport difficile à connaître a priori, et seule des études morphologiques associées à des modèles d'écoulement appropriés permettront de l'estimer sans avoir recours à une mesure directe. C'est la direction de recherche à privilégier pour un matériau poreux comme le bois.

I.4. Les déterminations des coefficients de diffusion de l'eau au sein du bois

I.4.1. Introduction

Nous avons déjà indiqué que, dans le domaine hygroscopique du bois, le transport de l'eau au sein du matériau (eau vapeur et eau liée) se fait essentiellement par diffusion. Aussi, les connaissances des coefficients de diffusion pour l'eau vapeur et l'eau liée sont nécessaires pour préciser par exemple, le flux d'eau évacué lors d'une opération de séchage. Certes, le flux d'eau éliminé peut être aussi influencé par le transport diffusionnel du côté de la phase gazeuse externe mais en dehors du séchage d'avivés de faible épaisseur avec une vitesse d'air faible, la résistance diffusionnelle externe n'est pas très importante devant la résistance diffusionnelle interne dans les conditions usuelles de séchage (*Söderström [1993]*).

De nombreux auteurs ne différencient pas au niveau interne les transports diffusionnels de l'eau vapeur et de l'eau liée. Cette distinction a tout de même été effectuée par *Liu [1989]*.

D'une manière générale, les coefficients de diffusion de l'eau au sein du bois dépendent de la température, de l'humidité et de la masse volumique du matériau. Actuellement, il existe deux principales méthodes de détermination des coefficients de diffusion de l'eau au sein du bois. La première est l'étude d'un transfert stationnaire de l'eau dans un échantillon de bois placé dans un dispositif dénommé généralement vaporimètre (*Siau et Babiak [1983]*, *Choong [1965]*, *Perré [1996a, 1996b]*). La deuxième est l'étude transitoire des transferts de l'eau dans

un échantillon de bois dans une enceinte climatique dont l'humidité relative est différente de l'humidité pour laquelle l'échantillon de bois était en équilibre thermodynamique dans son état initial. L'étape transitoire peut correspondre à une absorption d'eau (l'humidité de l'enceinte est supérieure à celle de l'enceinte dans laquelle le bois était en équilibre hygroscopique) ou à une désorption d'eau (l'humidité de l'enceinte est inférieure à celle de l'enceinte dans laquelle le bois était en équilibre hygroscopique).

Avant de présenter les deux méthodes de déterminations et les principales mesures rapportées dans la littérature, nous allons indiquer brièvement quelques modèles introduits actuellement permettant de décrire le transport diffusionnel dans un milieu poreux.

I.4.2. Modèles décrivant le transport diffusionnel dans un milieu poreux

Il existe dans la littérature plusieurs modèles et nous allons nous limiter dans ce qui suit à une présentation succincte du travail de synthèse effectué par *Haugaard* [1998].

a) Modèle du « dusty gas »

Dans le modèle, la phase solide est considérée comme le $(n + 1)^{\text{ème}}$ composant d'un gaz formé de n constituants. La phase solide est constituée de molécules géantes, uniformément distribuées et mobiles dans l'espace (*Mason* [1967], *Zhdanov* [1996], *Youngquist* [1970]).

Le transport diffusionnel résulte de l'analyse statistique des chocs entre molécules de gaz et entre molécules de gaz et les macromolécules représentatives du solide. Le flux diffusionnel de la phase gazeuse est évaluable à l'aide de la relation de Stefan-Maxwell, soit :

$$-\frac{1}{RT} \frac{dP_A}{dy} = \left(\frac{N_A}{D_{kA}^e} + \frac{x_B N_A - x_A N_B}{D_{AB}^e} \right) \quad (\text{I.62})$$

où P_A , la pression partielle de la phase gazeuse (Pa)
 N_A et N_B représentent les flux molaires des deux constituants (mol/s/m²)
 D_{kA}^e est le coefficient de diffusion effectif de Knudsen de la phase gazeuse (m²/s)
 x_A et x_B sont les titres molaires des constituants A et B
 D_{AB}^e est le coefficient de diffusion moléculaire effectif de la phase gazeuse (m²/s).

Les coefficients de diffusion effectifs sont liés aux coefficients de diffusion vrais par l'intermédiaire de coefficients qui dépendent de la géométrie de la structure poreuse, soit :

$$D_{kA}^e = K_0 \sqrt{\frac{T}{M_A}} \quad (\text{I.63})$$

$$D_{AB}^c = K_1 D_{AB} \quad (I.64)$$

A pression constante, les flux de diffusion en régime moléculaire stationnaire vérifient la relation de Graham :

$$\sqrt{M_A} N_A = -\sqrt{M_B} N_B \quad (I.65)$$

M_A et M_B représentent les masses molaires des constituants A et B.

En posant $\alpha = 1 - \sqrt{\frac{M_A}{M_B}}$ et en introduisant la concentration totale C de la phase gazeuse, en

régime stationnaire le flux diffusionnel N_A s'écrit :

$$N_A = \frac{CD_{AB}^c}{e\alpha} \ln \left[\frac{1 - x_A(e)\alpha + D_{AB}^c/D_{kA}^c}{1 - x_A(0)\alpha + D_{AB}^c/D_{kA}^c} \right] \quad (I.66)$$

Le flux diffusionnel N_A constant est intégré sur l'épaisseur e. $x_A(0)$ et $x_A(e)$ représentent les fractions molaires de la phase gazeuse aux deux extrémités de l'échantillon.

b) Modèle du faisceau de capillaires cylindriques droits et indépendants

La diffusion a lieu dans un faisceau de capillaires rectilignes de rayons différents distribués aléatoirement dans l'espace (*Feng [1973]*).

La longueur des capillaires est supérieure à la distance droite entre deux surfaces parallèles du milieu poreux et le rapport entre la longueur du capillaire et cette distance représente le facteur de tortuosité du capillaire supposé identique pour l'ensemble des capillaires.

Dans le cas de la diffusion d'un système binaire isobare dans le milieu poreux, le flux diffusionnel du constituant A est donné par la relation :

$$N_A = \frac{C\rho_P}{\tau} \left[\int_0^{+\infty} \left(\frac{1 - \alpha x_A}{D_{AB}} + \frac{1}{D_{kA}} \right)^{-1} f(r) dr \right] \frac{dx_A}{dy} \quad (I.67)$$

La grandeur $f(r)dr$ représente la fraction de volume occupée par les capillaires de rayons compris entre r et $r+dr$ par unité de masse du milieu poreux, ρ_P est la masse volumique apparente du milieu poreux, τ est le facteur de tortuosité, D_{kA} et D_{AB} sont les coefficients de diffusion de Knudsen et moléculaire du constituant A dans le mélange binaire A+B.

Le coefficient de diffusion de Knudsen du constituant A dépend du rayon du capillaire et il est donné par la relation :

$$D_{kA} = 9700r \sqrt{\frac{T}{M_A}} \quad (I.68)$$

Dans un milieu poreux isobare d'épaisseur e , le flux diffusionnel en régime stationnaire est constant et égal à :

$$N_A = \frac{C_{\rho P} D_{AB}}{\alpha \tau e} \int_0^{\infty} \ln \left[\frac{1 - \alpha X_A(e) + D_{AB}/D_{kA}}{1 - \alpha X_A(0) + D_{AB}/D_{kA}} \right] f(r) dr \quad (I.69)$$

c) Théorie du réseau de Bethe

Ce modèle conçu initialement pour les conducteurs électriques a été adapté à la diffusion dans les solides poreux par *Jensen [1985]*. Il est caractérisé par le nombre de coordination Z qui représente le nombre de conducteurs connectés à chaque nœud du réseau. Chaque conducteur a une conductance diffusive. Les distributions des segments poreux et des conductances sont reliées à la distribution du volume poreux.

Finalement, le flux de diffusion du constituant A est donné par la relation :

$$N_A = -D_{Ae} \frac{dC_A}{dy} = \frac{(Z-1) C}{(Z-2) e} \int_{x_A(0)}^{x_A(e)} C'_A(y) dx_A \quad (I.70)$$

où C'_A est la dérivée par rapport à la variable d'espace y de la concentration C_A .

d) Théorie du milieu effectif

C'est un autre modèle de réseaux électriques qui a été adapté au transport diffusif dans les milieux poreux par *Burganos [1987]*.

Le coefficient de diffusion effectif est donné par la relation :

$$D_A^e = \frac{\varepsilon g_e L}{\tau \pi r^2} \quad (I.71)$$

ε est la porosité totale du milieu poreux

L est la longueur des segments poreux supposée unique

τ est le facteur de tortuosité

g_e est la conductance d'un segment représentatif d'un pore

$\overline{r^2}$ est la moyenne du carré des rayons des segments poreux

$$\overline{r^2} = \frac{\rho P}{\varepsilon} \int_0^{\infty} r^2 f(r) dr \quad (I.72)$$

e) Comparaison des méthodes et autres modélisations

Haugaard [1998] a comparé les quatre modèles précédents et a montré que le modèle de faisceau de capillaires cylindriques droits est le plus simple sur le plan de la modélisation mathématique. De plus, les autres modèles nécessitent des mesures complémentaires en dehors de la connaissance de la distribution poreuse.

Signalons que le transport diffusionnel dans un milieu poreux peut être également représenté par une simulation du type Monte-Carlo (*Abbasi [1983], Suh [1998]*). Le modèle est constitué d'un assemblage de sphères rigides au travers desquelles se déplacent les molécules de gaz. La simulation peut représenter simultanément les régimes de diffusion moléculaire et de Knudsen selon la taille moyenne des pores.

La représentation du milieu poreux par un réseau de conducteurs électriques permet de prendre en compte l'anisotropie du milieu. *Stamm [1960a,b]* a montré que le rapport des conductivités dans deux directions est égal au rapport des diffusivités dans ces deux mêmes directions. Il existe dans la littérature d'autres modèles qui semblent plus difficiles à appliquer. Pour plus de détails, on pourra consulter, à ce propos, l'article de *Suh [1998]*.

I.4.3. Méthodes de détermination des coefficients de diffusion de l'eau dans un échantillon de bois

a) Méthodes en régime permanent

Le principe de la mesure est simple. L'échantillon de bois sépare deux milieux généralement à la même température mais où les humidités relatives de la phase gazeuse sont différentes et maintenues constantes. Après une période transitoire (établissement d'un état stationnaire au sein de l'échantillon de bois), on observe un flux constant de vapeur d'eau transféré entre les deux milieux. La connaissance de ce flux associé à une modélisation du transport de l'eau au sein de l'échantillon permet d'estimer le coefficient de diffusion de l'eau dans le matériau.

Tel est le principe du vaporimètre dont un schéma de principe est représenté sur la figure I.12.

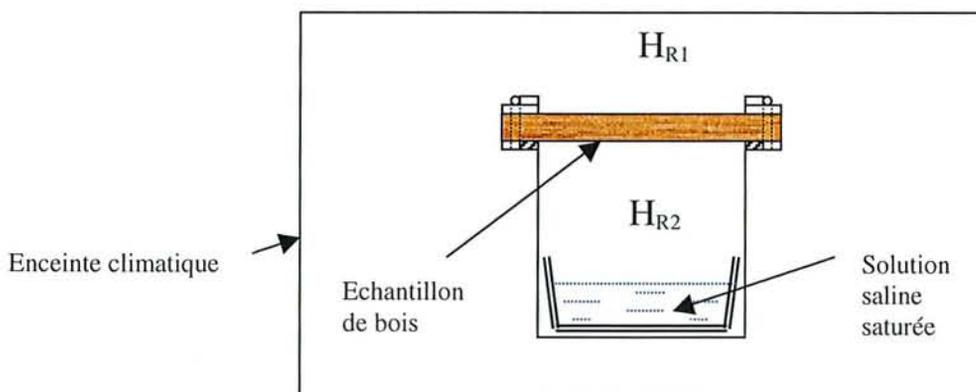


Figure I.12 : Schéma de principe d'un vaporimètre

L'humidité de l'air d'un côté de l'échantillon est imposée en plaçant au fond du vaporimètre une solution saline saturée. Le tableau I.2 donne à 25°C l'humidité relative de la phase gazeuse en fonction de la nature de la solution saline.

Tableau I.2. : Humidités relatives en équilibre avec des solutions salines

Nature de la solution saline	Humidité relative
LiCl	0,1115
CH ₃ COOK	0,2260
KF	0,3085
MgCl ₂	0,3273
K ₂ CO ₃	0,4386
Mg(NO ₃) ₂	0,5286
NaBr	0,5770
KI	0,6876
SrCl ₂	0,7083
NaCl	0,7532
KCl	0,8432
BaCl ₂	0,9086
K ₂ SO ₄	0,9730

La valeur de l'humidité relative de l'autre côté de l'échantillon de bois est modifiée en jouant sur la température d'un volume d'eau au contact de la phase gazeuse. Ce type de dispositif est celui mis au point par **Perré [1996a, 1996b]** que nous détaillerons ci-après dans la mesure où nous l'avons utilisé pour les déterminations de coefficients de diffusion de nos échantillons de bois en régime stationnaire. La connaissance du flux de vapeur d'eau transféré entre les deux milieux gazeux permet d'évaluer le rapport entre le coefficient de diffusion effectif de l'eau sous forme gazeuse au sein du bois au coefficient de diffusion moléculaire de l'eau vapeur en phase gazeuse, soit :

$$f = \frac{D_A^c}{D_{AB}} = \frac{\Phi R T e}{S D_{AB} (H_{R1} - H_{R2}) P_S(T) M} \quad (I.73)$$

Φ est le débit massique d'eau vapeur transféré

S est la surface droite de l'échantillon de bois d'épaisseur e

D_{AB} est le coefficient de diffusion moléculaire de la vapeur d'eau en phase gazeuse

$P_S(T)$ est la pression de vapeur saturante de l'eau liquide à la température T

H_{R1} et H_{R2} sont les humidités relatives des phases gazeuses situées de part et d'autre de l'échantillon.

En dehors de *Perré et coll.* [1996a, 1996b], les mesures des coefficients de diffusion en régime stationnaire à l'aide de dispositifs du type vaporimètre ont été effectuées par *Choong* [1965], *Siau et Babiak* [1983].

b) Méthodes en régime transitoire

Le principe de la méthode est similaire dans toutes les études. On part d'un échantillon de bois en équilibre hygroscopique avec une phase gazeuse dont la température et l'humidité sont fixées (par exemple T et H_{R1}). A un instant donné pris comme origine du temps, on place l'échantillon dans une autre phase gazeuse dont la température est T mais où l'humidité fixée H_{R2} est différente de H_{R1} . L'échantillon de bois n'est plus en équilibre hygroscopique et on va observer soit une absorption de vapeur d'eau ($H_{R2} > H_{R1}$), soit une désorption de vapeur d'eau ($H_{R2} < H_{R1}$). Par suite, la masse de l'échantillon va augmenter (absorption) ou diminuer (désorption). (Figures I.13.)

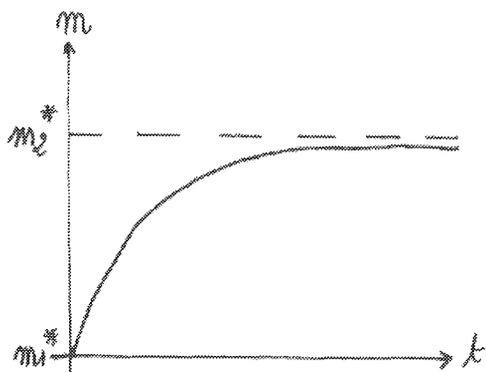


Figure I.13a : Variation de la masse de l'échantillon au cours d'une absorption

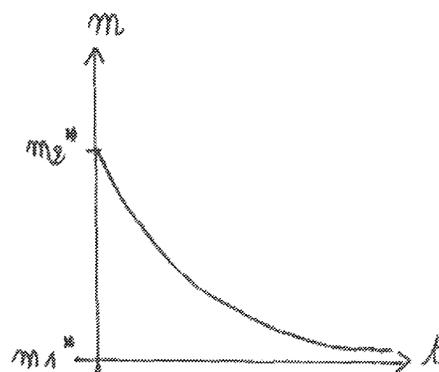


Figure I.13b : Variation de la masse de l'échantillon au cours d'une désorption

La modélisation des variations de masse de l'échantillon permet de remonter aux coefficients de diffusion de l'eau dans l'échantillon.

Nous allons dans ce qui suit rappeler les modélisations des transports diffusionnels utilisées ainsi que les principales relations permettant l'évaluation des coefficients de diffusion à partir des courbes expérimentales.

*** Modélisation du transport diffusionnel transitoire en l'absence de résistance diffusionnelle externe**

Nous supposons que l'échantillon a été conditionné pour que le transport diffusionnel de l'eau ne se déroule que dans une seule direction. Dans ces conditions, la géométrie de l'échantillon est du type feuillet de surface droite S et d'épaisseur e (Figure I.14). L'échantillon présente une symétrie par rapport au plan médian perpendiculaire à la direction y et son étude peut donc se limiter aux valeurs positives de la variable y .

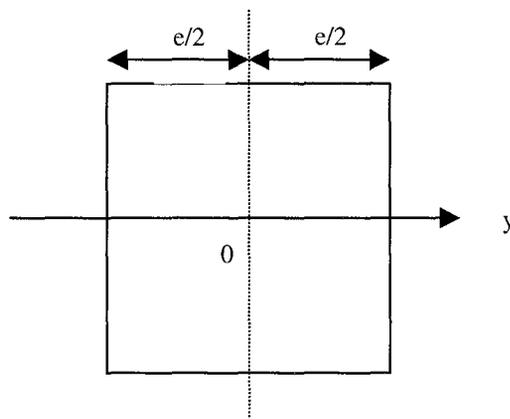


Figure I.14 : Représentation de l'échantillon

x désignant l'humidité absolue du bois dans le plan d'abscisse y , à l'instant initial, on a :

$$x = x_1^* \quad (I.74)$$

x_1^* représente l'humidité du bois en équilibre hygroscopique avec la phase gazeuse dont l'humidité relative est H_{R1} .

A partir du temps origine, nous supposons qu'à $y = e/2$, l'humidité du bois est égale à x_2^* , x_2^* représentant l'humidité du bois en équilibre hygroscopique avec la phase gazeuse dont l'humidité relative est H_{R2} . Cette condition limite suppose donc que la résistance de transfert en phase gazeuse au contact de l'échantillon est négligeable.

Le bilan de matière de l'eau au sein du bois, le transport de l'eau étant limité à un transport diffusionnel à vitesse d'ensemble nulle, s'écrit :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \quad (I.75)$$

La condition initiale et les conditions aux limites du bilan différentiel (I.75) sont :

$$\text{à } t = 0 \quad x = x_1^* \quad \forall 0 < y < e/2$$

$$\begin{aligned} \text{à } t > 0 \quad \frac{\partial x}{\partial y} = 0 \quad \text{à } y = 0 \quad (I.76) \\ x = x_2^* \quad \text{à } y = e/2 \end{aligned}$$

L'équation aux dérivées partielles (I.75) peut être résolue analytiquement par la méthode de séparation des variables. On aboutit à :

$$\frac{x - x_1^*}{x_2^* - x_1^*} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4(-1)^n}{(2n+1)\pi} \exp\left[-\left(\frac{(2n+1)\pi}{e}\right)^2 Dt\right] \cos\left(\frac{(2n+1)\pi y}{e}\right) \quad (I.77)$$

Par intégration de la relation (I.77) sur la demi-épaisseur de l'échantillon et en tenant compte de la définition de l'humidité absolue du bois, on obtient :

$$\frac{m - m_1^*}{m_2^* - m_1^*} = 1 - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 Dt}{e^2}\right] \quad (I.78)$$

ou

$$\frac{m_2^* - m}{m_2^* - m_1^*} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 Dt}{e^2}\right] \quad (I.79)$$

Si nous appelons E la quantité $\frac{m_2^* - m}{m_2^* - m_1^*}$, E varie entre 1 et 0 entre l'état initial et l'état final. E

est la somme d'un nombre infini de termes mais compte-tenu de la décroissance des termes due à la fonction exponentielle du temps, pour des temps différents de zéro, la série entière pourra être limitée au premier terme du développement. On peut en déduire les relations approchées suivantes :

$$\text{Ln} \frac{\pi^2 E}{8} = -\frac{\pi^2}{e^2} Dt \quad (I.80)$$

soit

$$D = -\frac{e^2}{\pi^2 t} \text{Ln} \frac{\pi^2 E}{8} \quad (I.81)$$

D'après *Liu et Simpson [1999]*, cette relation est bien vérifiée pour des valeurs de E inférieures à 0,48.

La relation linéaire entre $\text{Ln} \frac{\pi^2 E}{8}$ et D peut être utilisée pour les valeurs de E voisines de zéro sous la forme :

$$D = -\frac{e^2}{\pi^2} \frac{d \text{Ln} E}{dt} \quad (I.82)$$

Le tracé de LnE en fonction du temps permet à partir de la pente de la partie linéaire d'évaluer le coefficient de diffusion D. Cette évaluation de D a été préconisée par *Crank [1975]*.

La relation (I.81) peut être appliquée pour E = 0,5. On a alors :

$$D = -\frac{1}{\pi^2} \text{Ln} \left(\frac{\pi^2}{8}, 0,5 \right) \frac{e^2}{t_{0,5}} = 0,0489 \frac{e^2}{t_{0,5}} \quad (I.83)$$

Pour les valeurs de E supérieures à 0,48, *Liu et Simpson [1999]* ont montré que le coefficient de diffusion peut être évalué par la relation :

$$D = \frac{\pi e^2 (1-E)^2}{16t} \quad (\text{I.84})$$

Cette relation a été utilisée par *Wadsó [1993a, 1993b]* et *Peralta [1995a]*.

Nous pouvons également modéliser l'absorption en utilisant la relation suivante t en l'appliquant pour des temps courts :

$$E' = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D^{**} t}{e^2} \right] \quad (\text{I.85})$$

Pour les petites valeurs du temps, l'expression précédente peut être approchée par la relation :

$$E' = 4 \sqrt{\frac{D^{**}}{\pi e^2} t}^{1/2} \quad (\text{I.86})$$

La relation (I.86) montre que le rapport E' doit varier linéairement en fonction de \sqrt{t} .

Les relations (I.81) à (I.86) peuvent être utilisées pour évaluer le coefficient de diffusion à partir des courbes expérimentales. Bien entendu, la totalité de la courbe d'absorption ou de désorption peut être utilisée en cherchant le coefficient de diffusion optimal permettant de minimiser une fonction d'écart entre les valeurs expérimentales de E et les valeurs théoriques calculées pour un nombre de valeurs du temps permettant de représenter correctement l'ensemble de la courbe expérimentale.

Nous indiquerons dans le chapitre d'interprétation des résultats expérimentaux une autre méthode de détermination basée sur la résolution de l'équation aux dérivées partielles dans le domaine transformée de Laplace.

*** Modélisation du transport diffusionnel transitoire en présence de résistance diffusionnelle externe**

Pour une géométrie unidirectionnelle, le bilan de matière est identique au cas précédent, soit :

$$\frac{\partial x}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} \quad (\text{I.87})$$

La condition initiale et les conditions aux limites sont les suivantes :

$$\text{à } t = 0 \quad x = x_1^* \quad \forall 0 < y < e/2 \quad (\text{I.88})$$

$$\text{à } t > 0 \quad \frac{\partial x}{\partial y} = 0 \quad \text{à } y = 0 \quad (\text{I.89})$$

$$-D \rho_0 \frac{\partial x}{\partial y} = k_c (C - C_2) \quad \text{à } y = e/2 \quad (\text{I.90})$$

Seule la condition à $y = e/2$ a été changée. Dans cette condition aux limites, le flux de vapeur d'eau transféré est exprimé en fonction d'un coefficient de transfert de matière convectif k_c et d'une force motrice égale à la différence de concentration massique de vapeur d'eau au contact de l'échantillon solide et au sein de la phase gazeuse. La concentration au contact de l'échantillon est supposée en équilibre thermodynamique avec l'humidité du bois à la surface extérieure de l'échantillon. Ainsi si $C = f(x)$ représente la relation d'équilibre entre la concentration de vapeur d'eau de la phase gazeuse et l'humidité du bois, on a :

$$\text{A } t = 0, \quad C_1 = f(x_1^*) \quad (\text{I.91})$$

$$\text{de même à } t > 0 \quad C_2 = f(x_2^*) \quad (\text{I.92})$$

Dans les analyses précédentes, on suppose que le transfert d'eau à la surface de l'échantillon se fait de manière isotherme, ce qui est globalement vérifié tant que les flux d'eau transférés restent très faibles.

La condition aux limites (I.88) peut donc être écrite :

$$-D\rho_0 \frac{\partial x}{\partial y} = k_c [f(x) - f(x_2^*)] \quad \text{à } y = e/2 \quad (\text{I.93})$$

Dans le cas particulier où la fonction $f(x)$ est linéaire et proportionnelle à x , on peut obtenir une solution analytique de l'équation aux dérivées partielles. On pourra trouver dans l'article de *Liu et Simpson [1999]* les expressions permettant d'évaluer dans ce cas le coefficient de diffusion.

c) Autre méthode

Dans le domaine hygroscopique du bois, l'eau apparaît sous forme de vapeur en phase gazeuse et sous forme d'eau liée en phase adsorbée sur les fibres du bois.

Avec les méthodes précédentes qu'elles soient en régime permanent ou en régime transitoire, les deux types d'eau interviennent dans le transfert de l'eau au sein du bois. Si l'on souhaite mesurer seulement le transport diffusionnel de l'eau vapeur en phase gazeuse, il est nécessaire d'utiliser un soluté gazeux non adsorbable sur l'échantillon de bois. Dans ces conditions, les caractéristiques du transport diffusionnel peuvent être atteintes dans les dispositifs utilisés classiquement pour les mesures de coefficient de diffusion effectif dans les solides poreux comme les catalyseurs. Ainsi, on peut utiliser une cellule de diffusion du type Wicke et Kallenbach (*Youngquist G.R. [1970], Haugaard J. [1998]*) ou un lit fixe rempli de particules solides, le diamètre du tube étant voisin de celui du diamètre des particules, afin de minimiser l'influence de la dispersion axiale de l'écoulement sur la mesure du coefficient de diffusion.

Nous reviendrons plus en détails sur la cellule de diffusion de type Wicke et Kallenbach car nous la mettrons en œuvre pour estimer de manière indirecte le coefficient de diffusion de l'eau vapeur dans la phase gazeuse interne du bois.

I.4.4. Facteurs influençant le coefficient de diffusion de l'eau au sein du bois

Les valeurs de la diffusivité de l'eau au sein du bois dépendent de la nature de l'essence, de la structure non isotrope, de l'humidité et de la température. Nous allons dans ce qui suit rappeler les résultats de la littérature relatifs à l'influence de ces quatre paramètres.

a) Influence de la nature de l'essence

L'influence de l'anatomie a été peu étudiée. En revanche, on trouve dans la littérature de grandes variations du coefficient de diffusion en fonction de la masse volumique. Certaines de ces variations sont dues à des erreurs expérimentales et aux méthodes employées pour leur mesure, mais elles peuvent être liées aussi à la structure inhérente du bois. En effet, il n'y a aucun doute qu'il existe des différences entre l'aubier et le duramen d'un arbre. Lorsque la densité du bois augmente, l'accroissement de la matière ligneuse accroît la diffusion d'eau liée mais la diminution de porosité gêne la diffusion en phase gazeuse. Ces deux effets sont contradictoires et seule l'expérience permet de préciser l'effet prédominant. Ainsi, *Stamm et Nelson* [1961] ont montré par une analyse des chemins par lesquels se déplace l'eau dans le bois que la diffusivité doit diminuer avec l'augmentation de densité. Ceci a été confirmé par les résultats expérimentaux de *Choong* [1965]. Les coefficients de diffusion transversaux et longitudinaux décroissent avec la densité et l'influence de la densité est identique sur l'ensemble des coefficients de diffusion.

b) Effet de la structure de l'essence

Une description schématique du transport de l'eau au sein du bois, due à *Stamm et Nelson* [1961], fait apparaître quatre chemins parallèles représentés sur la figure I.15.

Le **chemin n°1** est relatif à la diffusion de l'eau liée dans la paroi cellulaire. Son importance est faible à faible humidité mais elle augmente au fur et à mesure de l'accroissement de l'humidité. Cette variation est plus sensible dans la direction longitudinale que dans les directions transversales. A faible humidité, le rôle de ce transport est négligeable.

Le **chemin n°2** combine un transport par diffusion au sein de la phase gazeuse et un transport par diffusion sous forme adsorbée. C'est le chemin qui gouverne la majeure partie du mouvement de l'eau dans le bois, à la fois aux humidités faibles et élevées. Aux humidités élevées, la contribution du chemin n°2 augmente car la conductance de la paroi cellulaire augmente.

Le **chemin n°3** associe au transport en phase gazeuse et adsorbée un transport d'eau liée dans la membrane d'une ponctuation. L'importance de ce transport reste plus ou moins constante en fonction de l'humidité car l'épaisseur de la membrane de ponctuation est si faible que sa modification n'affecte pas l'ensemble du transport.

Le **chemin n°4** correspond au transport d'eau sous forme gazeuse dans les cavités et les ponctuations associées. Ce transport est fortement diminué aux humidités élevées et l'effet est plus prononcé dans la direction longitudinale que dans les directions transversales.

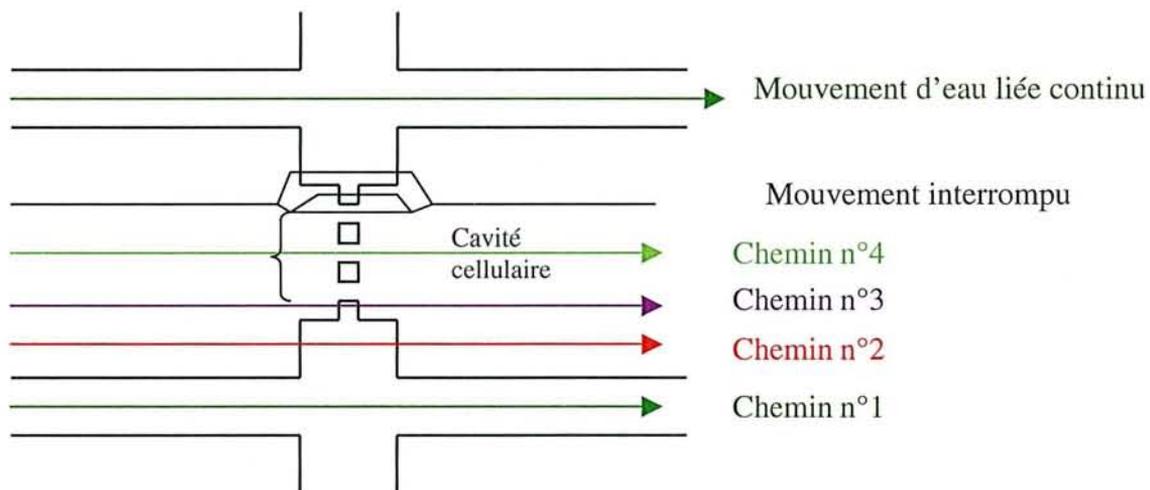


Figure I.15 : Représentation schématique des différents chemins possibles pour le transfert de l'eau au sein de la structure

Lorsque la masse volumique augmente, l'importance du chemin n°2 diminue alors que celle des chemins n°1, 3 et 4 augmente. L'influence de l'humidité et/ou de la température semble similaire quelle que soit la densité de l'essence.

Le rôle de la taille des ponctuations sur la valeur du coefficient de diffusion se fait sentir surtout aux faibles humidités. Pour les humidités supérieures à 15%, l'influence de la dimension des ponctuations est négligeable.

c) Effet de l'humidité du bois

La relation entre le coefficient de diffusion de l'eau et l'humidité du bois est loin d'être définitivement établie. *Stamm* [1959, 1980] indique que le coefficient de diffusion, calculé à partir des données d'absorption, augmente approximativement de façon exponentielle avec l'humidité. *Skaar* [1958], *Simpson* [1991] confirment l'accroissement exponentiel pour le coefficient de diffusion radial. En revanche, dans la direction tangentielle, le coefficient de diffusion est peu sensible à l'humidité du bois.

En posant a priori une loi du type $D=D_0\exp\beta x$ où x est l'humidité absolue du bois, *Rosen* [1976] montre que β est positif dans les directions radiales et tangentielles et négatif dans la direction longitudinale. Cette variation exponentielle a été également confirmée par *Bramhall* [1979b], *Simpson* [1993], *Nakao* [1998] et *Liu and Simpson* [1999]. Signalons toutefois que la variation exponentielle n'est pas toujours observée. Ainsi *Choong* [1963] a trouvé une relation linéaire entre le coefficient de diffusion et l'humidité dans le cas de la direction tangentielle du sapin. De même, d'autres auteurs concluent dans différentes études que le coefficient de diffusion est indépendant de l'humidité du bois (*Skaar* [1958], *Choong and Skaar* [1972], *Avramidis and Siau* [1987], *Soderström and Salin* [1993]).

Certaines théories ont été présentées pour rendre compte de l'accroissement du coefficient de diffusion avec l'humidité (*Stamm* [1959], *Choong* [1965]). Elles sont partielles et quelquefois contradictoires. Ainsi pour *Stamm*, l'accroissement de la diffusivité est lié à la diminution des liaisons d'adsorption au fur et à mesure de l'accroissement du nombre de couches de molécules d'eau adsorbées. Pour *Choong*, l'accroissement du coefficient de diffusion est dû aux variations dimensionnelles et à l'accroissement des espaces libres par lesquels l'eau vapeur peut diffuser.

d) Effet de la température

Les mesures relatives à l'influence de la température sont relativement anciennes et elles sont largement utilisées pour rendre compte de la diffusion de l'eau dans le bois (*Siau* [1983]).

D'une manière générale, le coefficient de diffusion augmente avec la température selon une loi du type Arrhénius, soit :

$$D = D_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (\text{I.94})$$

Cette loi de variation est similaire à celle donnant la pression de vapeur d'eau en fonction de la température, ce qui a conduit certains auteurs à affirmer que le coefficient de diffusion est

proportionnel à la pression de vapeur de l'eau (*Stamm [1959], Choong [1965], Jones [1995]*). Cette loi de variation a été confirmée par d'autres auteurs dont *Bramhall [1979a]*. L'énergie d'activation E comprise entre 29000 et 50000 J.mol⁻¹ est inférieure à l'énergie des liaisons hydrogène entre molécules d'eau. La valeur de l'énergie d'activation est également différente de la chaleur d'adsorption des molécules d'eau (*Bramhall [1979a], Nelson [1991]*). L'énergie d'activation semble dépendre de l'humidité. Elle est plus élevée aux faibles humidités qu'aux humidités élevées (*Kang and Hart [1997]*). L'énergie minimale est obtenue au point de saturation des fibres alors que la valeur maximale est trouvée pour une humidité voisine de zéro. D'après *Koponen [1986]*, les valeurs maximales se situent entre 30500 et 40000 J.mol⁻¹ alors que les valeurs minimales sont comprises entre 17000 et 33500 J.mol⁻¹.

I.5. Objectifs de la recherche

Dans le domaine hygroscopique du bois, le transport de l'eau à basse température se fait essentiellement par diffusion. L'eau dans le bois se trouve alors sous forme gazeuse (vapeur d'eau) et sous forme liée (ou adsorbée). En présence d'un gradient de concentration de vapeur d'eau et d'eau liée, les transports se font par diffusion. Soient D_V et D_A les coefficients de diffusion caractéristiques de ces transports. De plus, il existe entre l'eau sous forme vapeur et l'eau liée un équilibre hygroscopique qui peut ou non être satisfait lors du transport des deux types d'eau. En définitive, on peut dans une direction donnée, y , caractériser le mouvement de l'eau par les trois flux suivants :

- le *flux diffusionnel en phase gazeuse* : $\varphi_V = -D_V \frac{dC}{dy}$
- le *flux diffusionnel en phase adsorbée* : $\varphi_A = -D_A \rho_0 \frac{dx}{dy}$
- le *flux d'échange entre la phase gazeuse et la phase adsorbée* : $\varphi_E = k(C - f(x))$

Dans les relations précédentes, C est la concentration massique de l'eau vapeur au sein de la phase gazeuse, x est l'humidité absolue du bois, ρ_0 est la masse volumique du bois anhydre et $f(x)$ représente à une température donnée la relation d'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase gazeuse et l'eau fixée par adsorption sur le bois. C 'est une fonction que nous avons présentée dans le paragraphe I.3.

Ainsi, pour exprimer les trois flux φ_V , φ_A , φ_E il est nécessaire pour une direction de transfert donnée de connaître les trois paramètres de transfert D_V , D_A et k .

L'objectif de notre recherche est une estimation des coefficients de diffusion D_V et D_A et du coefficient de transfert k dans le cas où l'équilibre entre les deux phases n'est pas réalisé (l'équilibre thermodynamique correspond à $k \rightarrow \infty$).

Pour ce faire, nous allons mettre en œuvre trois types de mesures expérimentales que nous allons décrire dans le chapitre suivant. Ces mesures vont nous permettre d'accéder successivement aux trois paramètres caractéristiques des flux transférés.

Les mesures seront réalisées sur deux essences, une de type feuillu à savoir le hêtre et l'autre du type résineux à savoir l'épicéa.

Certes les trois types de déterminations ne concerneront que quelques échantillons de hêtre mais comme nous l'indiquerons dans la conclusion de notre mémoire, les méthodologies proposées pourront être mises en œuvre sur n'importe quel type d'essences ou matériaux composites à base de bois et probablement pour tout milieu poreux en présence d'un soluté gazeux adsorbable.

Chapitre II

*Dispositifs et protocoles
expérimentaux*



*Grandeurs mesurées et
dédiuées*

II.1. Introduction

Pour atteindre les coefficients de diffusion de l'eau en phase gazeuse et en phase adsorbée et le coefficient de transfert caractéristique de l'échange d'eau entre la phase gazeuse et la phase adsorbée, nous avons envisagé trois types d'expériences. Chacune est réalisée dans un dispositif particulier que nous allons décrire en indiquant pour chacun le protocole expérimental, les grandeurs mesurées et les grandeurs déduites à partir de la modélisation du dispositif.

II.2. Premier dispositif expérimental : la cellule de diffusion du type Wicke et Kallenbach

L'objectif de ce dispositif est de réaliser une mesure indirecte du coefficient de diffusion de l'eau en phase gazeuse. La cellule de diffusion de Wicke et Kallenbach est utilisée depuis très longtemps pour mesurer la diffusivité apparente des réactifs au sein de milieux poreux comme les catalyseurs solides (*Wicke [1941]*). Au niveau du laboratoire, elle a été utilisée ces dernières années pour déterminer la diffusivité apparente d'un inerte dans un joint de colle urée-formol (*Na [1994]*) et dans un milieu poreux synthétique (*Charlier [1997]*).

Elle est constituée de deux compartiments entre lesquels est placé de manière étanche l'échantillon à étudier. Les deux compartiments sont alimentés par des gaz de nature différente et l'évolution du dispositif peut être étudiée en régime stationnaire ou en régime transitoire. En régime stationnaire, les débits d'alimentation et de sortie des deux cellules sont maintenus constants et on mesure les concentrations des réactifs dans les débits de sortie. En régime transitoire, l'un des deux compartiments évolue en système fermé et l'autre en système ouvert ou fermé. Dans ces conditions, on peut donc étudier l'évolution du système réactionnel dans les trois configurations représentées sur la figure II.1.

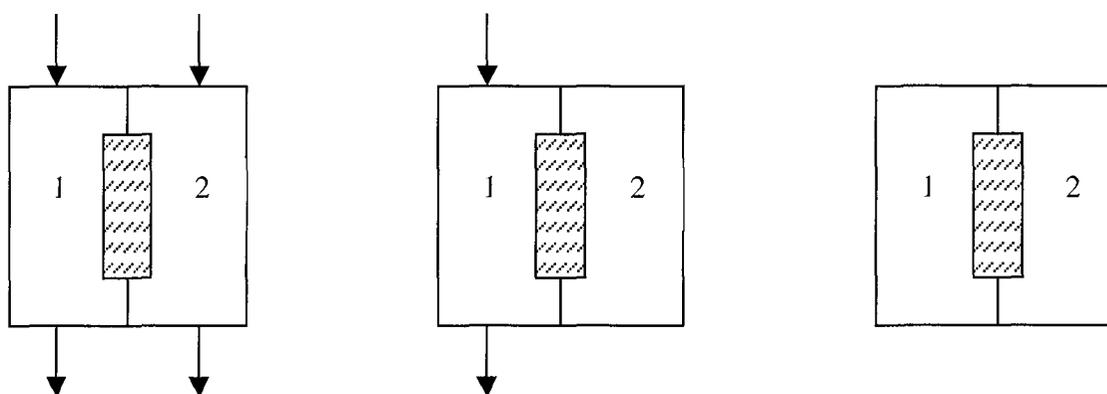


Figure II.1 : Différentes configurations d'utilisation de la cellule de diffusion

- a) Compartiments 1 et 2 ouverts
- b) Compartiment 1 ouvert, compartiment 2 fermé
- c) Compartiments 1 et 2 fermés

Dans le cas des échantillons de bois, l'eau en phase gazeuse étant adsorbable par les fibres du bois, le coefficient de diffusion de l'eau vapeur dans le bois ne peut être mesuré directement. Nous proposons de le déterminer de manière indirecte en mesurant tout d'abord le coefficient de diffusion effectif d'un système binaire de gaz inertes au sein du bois (solutés non adsorbables sur le bois), puis en admettant que la diffusivité apparente est proportionnelle au coefficient de diffusion moléculaire, le coefficient de proportionnalité ne dépendant pas de la nature du soluté mais uniquement de la morphologie du milieu poreux. Le couple de gaz inertes choisi est constitué d'azote et d'hélium.

II.2.1. Description des cellules de diffusion

Les mesures du coefficient de diffusion sont réalisées sur des échantillons cylindriques de différentes diamètres et épaisseurs (voir chapitre III, tableaux III.1 et III.2).

Une cellule en laiton a été réalisée pour des échantillons de diamètre 34mm et une cellule en aluminium pour des échantillons dont le diamètre est de 71mm. Nous décrivons ci-après les deux cellules qui se différencient seulement par la méthode choisie pour assurer une étanchéité parfaite entre les bords extérieurs de l'échantillon et le compartiment (absence de passage direct entre les deux compartiments).

a) La cellule en laiton

Elle a été réalisée au laboratoire et les figures II.2 et II.3 représentent un schéma simplifié de la cellule et une photographie de celle-ci respectivement.

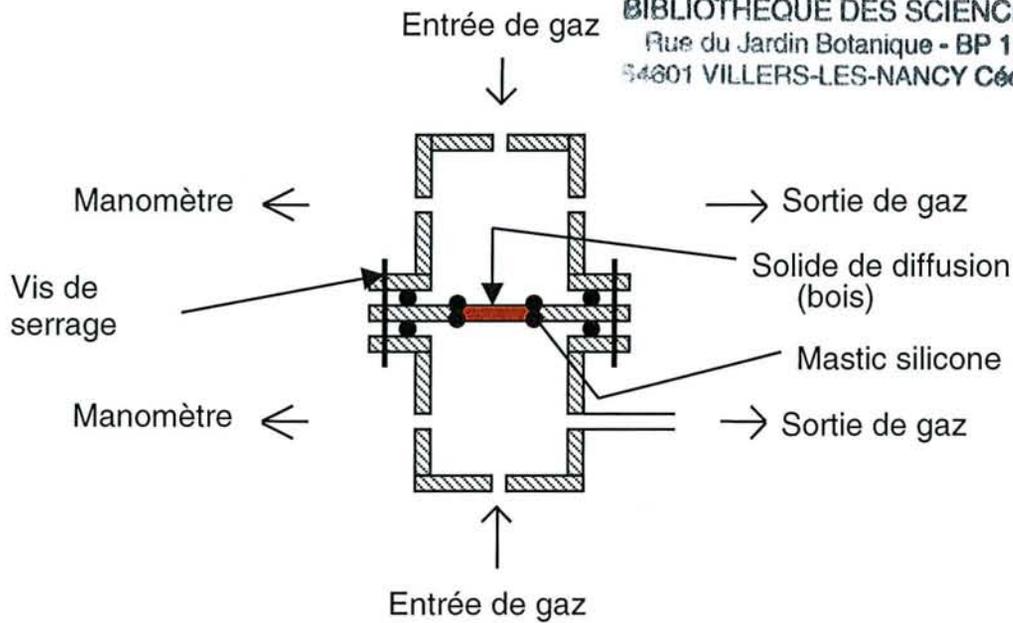


Figure II.2 : Schéma simplifié de la cellule de diffusion en laiton

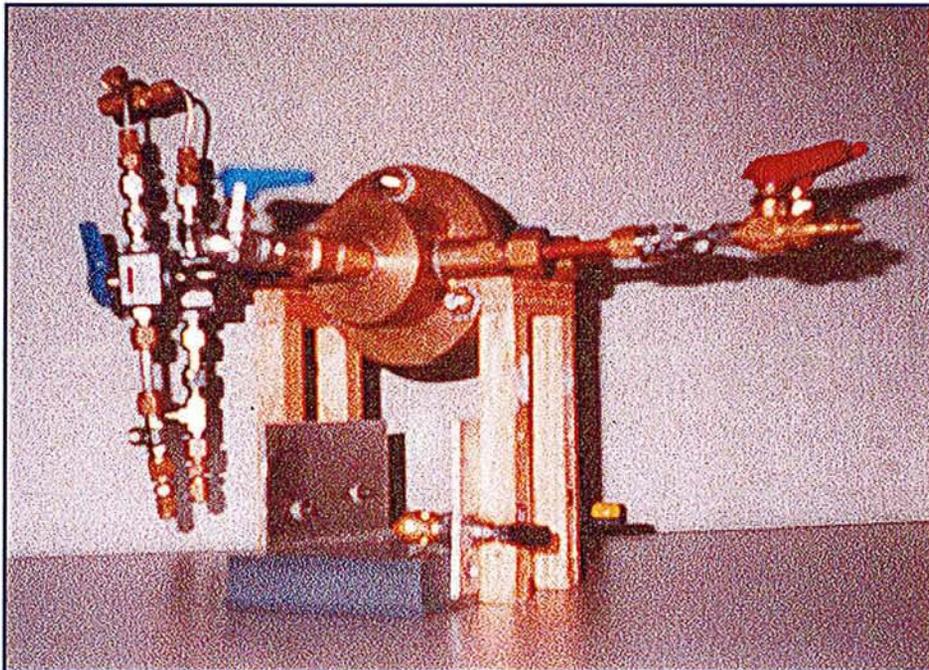


Figure II.3 : Photographie de la cellule en laiton

Elle est constituée de deux compartiments cylindriques de diamètres intérieurs 40 mm, chacun ayant un volume identique en l'absence d'échantillon égal à 63 cm^3 .

L'échantillon de bois est maintenu sur une rondelle métallique séparant les deux compartiments à l'aide d'une colle au silicone suffisamment élastique pour supporter les variations dimensionnelles de l'échantillon tout en assurant une bonne étanchéité. Nous avons vérifié cette étanchéité du joint en mesurant la perméabilité à l'hélium et à l'azote du joint,

l'échantillon de bois étant remplacé par une rondelle métallique. L'étanchéité entre les deux compartiments et la rondelle porte-échantillon est assurée par des joints toriques et des vis de serrage rendant solidaire l'ensemble.

Au niveau de chaque compartiment, on observe trois orifices : un sert à l'alimentation, un à l'évacuation et le dernier pour une prise de pression. L'alimentation des gaz se fait par un tube de 4mm de diamètre percé de 1 à 3 orifices de diamètre inférieur à 1mm. L'objectif du diffuseur est d'homogénéiser la phase gazeuse au sein de chaque compartiment.

Les deux courants gazeux peuvent être humidifiés à une humidité fixée en faisant traverser les gaz dans des barboteurs remplis d'eau et portés à une température inférieure ou égale à la température de fonctionnement de la cellule. Les mesures ont été effectuées à la température ambiante et à 30°C. Lorsque les gaz sont humides, les humidités des deux gaz dans les deux compartiments sont choisies égales afin que l'échantillon de bois soit en équilibre hygroscopique uniforme sur tout le volume de l'échantillon.

Dans cette cellule, les mesures ont été effectuées sur des échantillons de bois de hêtre découpés dans un même avivé de 50mm d'épaisseur. Les épaisseurs des échantillons sont comprises entre 1 et 4mm dans les directions radiale et tangentielle et entre 10 et 25mm dans la direction longitudinale. Le diamètre des disques est de 34mm et la surface des échantillons non recouverte de silicone est estimée à $S = 9,08 \text{ cm}^2$.

b) La cellule en aluminium

Elle a été conçue à l'E.N.G.R.E.F. au sein de l'Equipe Produits Forestiers du L.E.R.M.A.B. dirigée par le Professeur P.PERRE. Elle permet de mesurer les coefficients de diffusion d'échantillons de bois de plus grands diamètres (71mm pour une surface d'échange effective de $38,50 \text{ cm}^2$). La surface externe des échantillons est recouverte de deux couches d'araldite. L'échantillon de bois est pris entre les deux couvercles de la cellule dont un schéma et une photographie sont donnés dans les figures II.4 et II.5.

L'étanchéité entre l'échantillon de bois et les deux couvercles est obtenue à l'aide d'une membrane en latex gonflée par de l'air comprimé. Nous avons vérifié que la perméabilité de la membrane à l'hélium et à l'azote est négligeable.

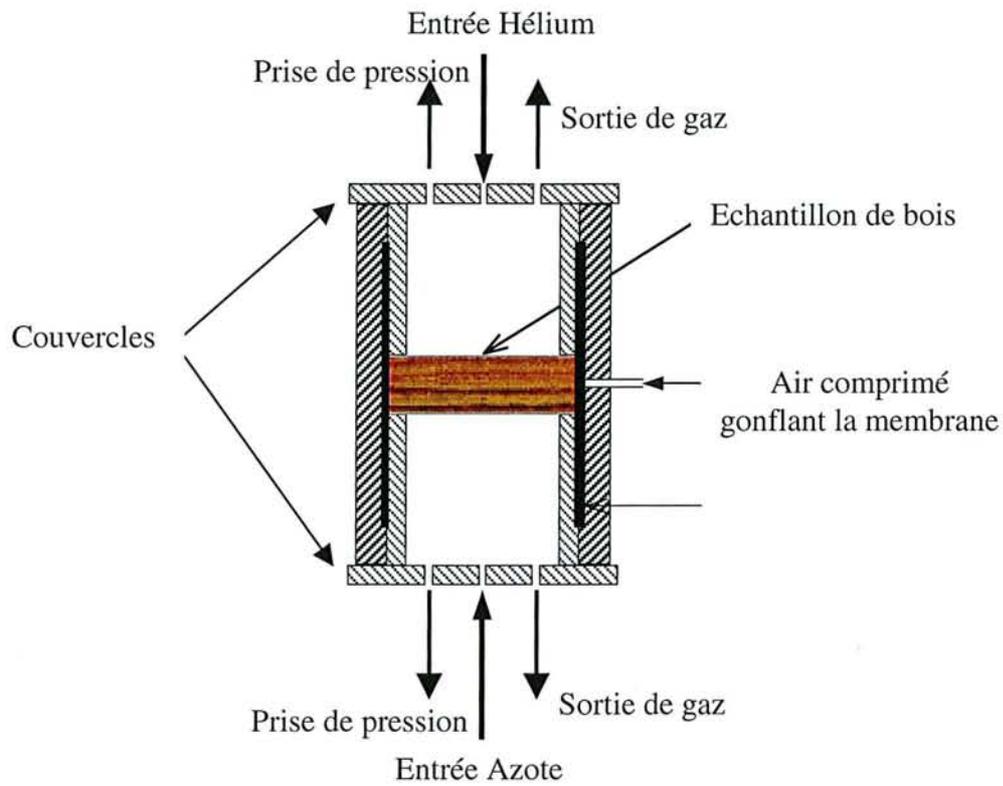


Figure II.4 : Schéma de la cellule en aluminium

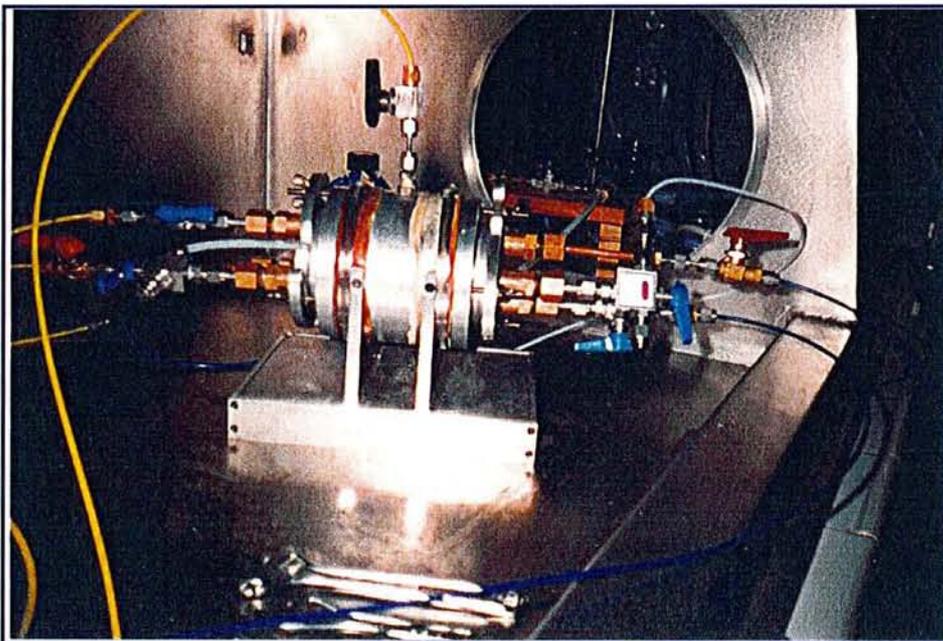


Figure II.5 : Photographie de la cellule en aluminium

Les deux couvercles sont munis de trois orifices par lesquels se font l'alimentation et l'évacuation de la phase gazeuse ainsi que la mesure de la pression statique.

II.2.2. Protocole expérimental : grandeurs mesurées

Des trois types de fonctionnement de la cellule de diffusion, nous n'avons utilisé que le fonctionnement stationnaire et le fonctionnement transitoire, les deux compartiments évoluant en système fermé.

Pour le fonctionnement stationnaire, l'un des compartiments est alimenté par un courant d'azote pur, l'autre par un courant d'hélium pur. Les gaz peuvent être secs ou humides. Les débits sont choisis pour que la différence de pression totale entre les deux compartiments soit nulle ou fixée. Dans la mesure où il est difficile d'avoir une différence de pression strictement nulle, nous avons préféré choisir et maintenir constante une différence de pression entre les deux compartiments. Nous verrons ci-après que ces expériences nous permettent de mesurer simultanément le coefficient de diffusion et la perméabilité du mélange gazeux au sein de l'échantillon. Lorsque le régime stationnaire est établi, on mesure la concentration des réactifs dans les débits de sortie des deux compartiments. Seule la concentration d'hélium a été déterminée dans les deux débits de sortie. Le fonctionnement stationnaire de la cellule a été utilisé pour la détermination du coefficient de diffusion et la perméabilité dans la direction axiale. En effet, dans le cas du hêtre, en système fermé l'égalisation des concentrations dans les deux compartiments est trop rapide.

Pour le fonctionnement transitoire de la cellule, on part d'un état stationnaire avec une différence de pression totale entre les deux compartiments la plus proche possible de zéro. A un instant donné pris comme origine du temps, on coupe simultanément l'alimentation et l'évacuation des débits gazeux au niveau des deux compartiments. On suit alors au cours du temps la variation de la concentration en hélium au sein des deux compartiments. Le fonctionnement transitoire a été utilisé pour mesurer les coefficients de diffusion dans les directions radiale et tangentielle. (*Mouchot [1998]*)

Les concentrations d'hélium au sein des compartiments dans les débits de sortie sont mesurés à l'aide d'un détecteur catharométrique d'un chromatographe Vega GC 6000 (figure II.6). Le mode opératoire de ces analyses pour les mesures en régime stationnaire et en régime transitoire est donné en **annexe 1**.

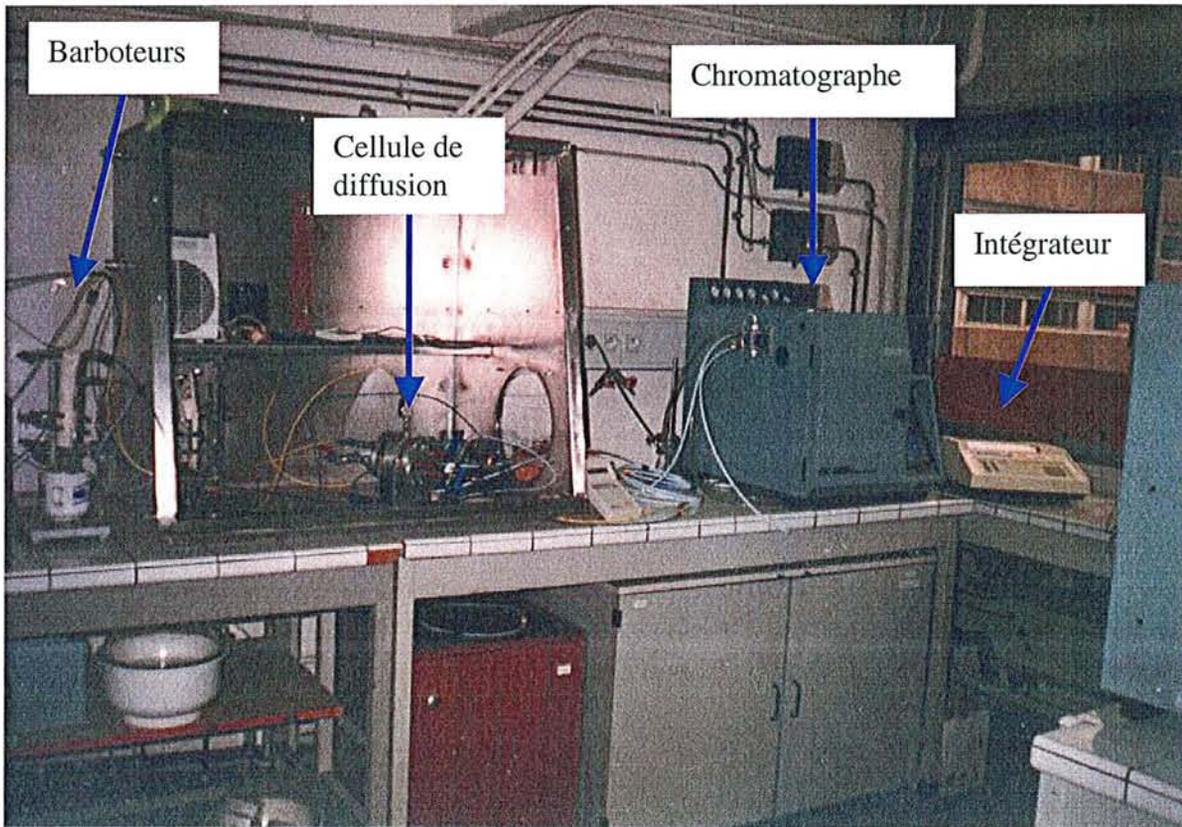


Figure II.6 : Photographie de l'ensemble du dispositif expérimental

Indiquons désormais comment, à partir des grandeurs mesurées, il est possible de déterminer la diffusivité apparente du système binaire azote-hélium puis celle du système vapeur d'eau-azote au sein des échantillons de bois.

II.2.3. Grandeurs déduites

L'exploitation est différente selon que les mesures sont effectuées en régime stationnaire ou en régime transitoire.

a) Exploitation des expériences réalisées en régime stationnaire en présence d'une différence de pression totale entre les deux compartiments

L'évolution du système réactionnel est représentée sur la figure II.7.

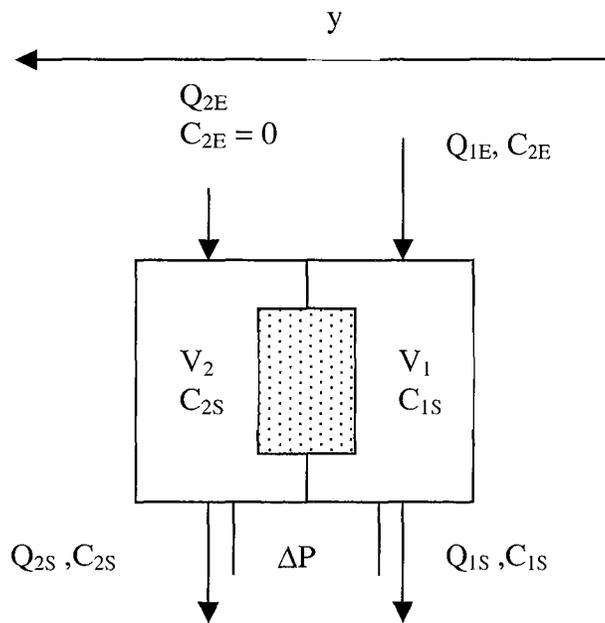


Figure II.7 : Caractéristiques de la cellule lors d'une mesure en régime stationnaire

Nous désignons par V_1 , C_1 , Q_1 , le volume, la concentration d'hélium et le débit d'hélium du compartiment alimenté par le courant d'hélium pur.

De même, nous désignons par V_2 , C_2 , Q_2 , le volume, la concentration d'hélium et le débit du compartiment alimenté par le courant d'azote pur.

Les indices E et S sont relatifs à l'entrée et à la sortie des compartiments supposés homogènes.

ΔP est telle que la pression totale du compartiment 2 est supérieure à celle du compartiment 1.

En régime stationnaire, le débit d'hélium transféré dans l'échantillon de bois est constant et égal à :

$$\Phi = (-uC' - D \frac{dC'}{dy})S \quad (\text{II.1})$$

où C' est la concentration en hélium au sein du bois à l'épaisseur y , l'axe des y étant orienté positivement du compartiment 1 vers le compartiment 2.

La vitesse u et le coefficient de diffusion D étant supposés constants, l'intégration de la relation (II.1) sur l'épaisseur y de l'échantillon conduit à :

$$C' = A \exp\left(-\frac{uy}{D}\right) - \frac{\Phi/S}{u} \quad (\text{II.2})$$

C' vérifie les conditions aux limites suivantes :

$$\text{à } y = 0 \quad C_1 = A - \frac{\Phi/S}{u}$$

$$\text{à } y = e \quad C_2 = A \exp\left(-\frac{ue}{D}\right) - \frac{\Phi/S}{u} \quad (\text{II.3})$$

En tenant compte des conditions aux limites, on en déduit que :

$$\frac{\Phi/S}{u} = \frac{C_1 \exp(-\frac{ue}{D}) - C_2}{1 - \exp(-\frac{ue}{D})} \quad (\text{II.4})$$

De plus, le débit Φ et la vitesse u peuvent être évalués par les relations suivantes :

$$\Phi = Q_{1E}C_{1E} - Q_{1S}C_{1S} = Q_{2S}C_{2S} \quad (\text{II.5})$$

$$u = \frac{Q_{1S} - Q_{1E}}{S} = \frac{Q_{2E} - Q_{2S}}{S} \quad (\text{II.6})$$

On en déduit que :

$$\frac{Q_{1E}C_{1E} - Q_{1S}C_{1S}}{Q_{1S} - Q_{1E}} = \frac{C_1 \exp(-\frac{(Q_{1S} - Q_{1E})e}{SD}) - C_2}{1 - \exp(-\frac{(Q_{1S} - Q_{1E})e}{SD})} \quad (\text{II.7})$$

Si l'on admet que les résistances de transfert en phase gazeuse au contact de l'échantillon pour chacun des deux compartiments sont négligeables, on a :

$$C_1 = C_{1S} \quad \text{et} \quad C_2 = C_{2S} \quad (\text{II.8})$$

d'où :

$$\exp(-\frac{(Q_{1S} - Q_{1E})e}{SD}) = \frac{Q_{1S}(C_{2S} - C_{1S}) + Q_{1E}(C_{1E} - C_{2S})}{Q_{1E}C_{1E} - Q_{1E}C_{1S}} \quad (\text{II.9})$$

que nous pouvons écrire :

$$-\text{Ln} \frac{Q_{1S}(C_{2S} - C_{1S}) + Q_{1E}(C_{1E} - C_{2S})}{Q_{1E}(C_{1E} - C_{1S})} = \frac{e}{SD} (Q_{1S} - Q_{1E}) = \text{Ln}[A] \quad (\text{II.10})$$

De même, si l'on introduit la perméabilité B de l'échantillon, on a d'après la relation de Darcy :

$$u = \frac{Q_{1S} - Q_{1E}}{S} = \frac{B \Delta P}{\mu e} \quad (\text{II.11})$$

Les relations (II.10) et (II.11) permettent, connaissant les débits volumiques Q_{1E} et Q_{1S} et les concentrations C_{1E} , C_{1S} , C_{2S} , d'estimer le coefficient de diffusion D et la perméabilité B .

Dans cette analyse, nous n'avons pas tenu compte des résistances externes pouvant apparaître à la surface externe de l'échantillon. Si nous voulons en tenir compte, il faut introduire les coefficients de transfert k_{g1} et k_{g2} tel que :

$$\Phi/S = k_{g1}(C_{1S} - C_1) = k_{g2}(C_2 - C_{2S}) \quad (\text{II.12})$$

Si nous admettons que les deux coefficients de transfert sont égaux à k_g , on aboutit à :

$$\exp\left[\frac{-(Q_{IS}-Q_{IE})}{SD}\right]e = \frac{Q_{IS}(C_{2S}-C_{1S})+Q_{IE}(C_{1E}-C_{2S})+(Q_{IE}C_{1E}-Q_{IS}C_{1S})/k_gS}{Q_{IE}(C_{1E}-C_{1S})-(Q_{IE}C_{1E}-Q_{IS}C_{1S})/k_gS} \quad (\text{II.13})$$

La résistance externe accroît le deuxième membre de la relation (II.13) par rapport au deuxième membre de la relation (II.9). Par suite, la valeur de la diffusivité sera plus grande que celle trouvée en supposant que les résistances de transfert externes sont négligeables. La prise en compte directe des résistances externes est délicate car il faut connaître les coefficients de transfert. Nous verrons ci-après une autre manière de prendre en compte ces résistances dans le cas où l'on dispose d'échantillons de différentes épaisseurs.

c) Exploitation des expériences en régime transitoire

L'évolution du système réactionnel est représentée sur le schéma de la figure II.8.

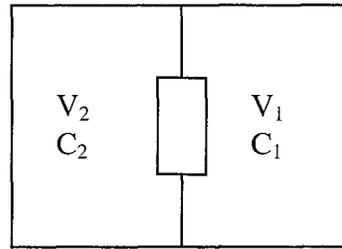


Figure II.8 : Caractéristiques de la cellule lors d'une mesure en régime transitoire

Nous désignons par V_1 et C_1 le volume et la concentration d'hélium du compartiment 1 balayé initialement par le courant d'hélium pur.

De même, nous désignons par V_2 et C_2 le volume et la concentration d'hélium du compartiment 2 balayé initialement par le courant d'azote pur.

A un instant donné, les bilans de matière de l'hélium dans les compartiments 1 et 2 s'écrivent :

$$V_1 \frac{dC_1}{dt} + KS(C_1 - C_2) = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$V_2 \frac{dC_2}{dt} + KS(C_2 - C_1) = 0 \quad (\text{II.15})$$

avec les conditions initiales suivantes :

$$\text{à } t = 0 \quad C_1 = C_{10} \quad \text{et} \quad C_2 = C_{20} \quad (\text{II.16})$$

La résolution des deux bilans différentiels en tenant compte des conditions initiales conduit à :

$$C_1 = \frac{V_2}{V_1 + V_2} (C_{10} - C_{20}) \exp\left[-\frac{KS(V_1 + V_2)}{V_1 V_2} t\right] + \frac{C_{10} V_1 + C_{20} V_2}{V_1 + V_2} \quad (\text{II.17})$$

$$C_2 = \frac{V_1}{V_1 + V_2} (C_{20} - C_{10}) \exp\left[-\frac{KS(V_1 + V_2)}{V_1 V_2} t\right] + \frac{C_{10} V_1 + C_{20} V_2}{V_1 + V_2} \quad (\text{II.18})$$

que nous pouvons écrire :

$$-\text{Ln} \frac{(V_1+V_2)C_1 - C_{10}V_1 - C_{20}V_2}{V_2(C_{10} - C_{20})} = \frac{KS(V_1+V_2)}{V_1V_2} t = -\text{Ln}[A_1] \quad (\text{II.19})$$

$$-\text{Ln} \frac{(V_1+V_2)C_2 - C_{10}V_1 - C_{20}V_2}{V_1(C_{20} - C_{10})} = \frac{KS(V_1+V_2)}{V_1V_2} t = -\text{Ln}[A_2] \quad (\text{II.20})$$

Le tracé des premiers membres des relations (II.19) et (II.20) en fonction du temps permet de vérifier la validité de la modélisation et de déduire à partir de pente de la relation linéaire le coefficient de transfert global K.

Le coefficient global K intègre les résistances externes à la surface de l'échantillon et la résistance interne de l'échantillon qui peut être posée égale à $\frac{e}{D}$. Si nous admettons que les coefficients de transfert externe des deux côtés de l'échantillon sont égaux, on a :

$$\frac{1}{K} = \frac{2}{k_g} + \frac{e}{D} \quad (\text{II.21})$$

Si nous disposons d'échantillons de bois de plusieurs épaisseurs, l'application de la relation (II.21) permet d'estimer la résistance externe et le coefficient de diffusion D.

Rappelons qu'avec la cellule de diffusion de Wicke et Kallenbach, nous ne déterminons directement que le coefficient de diffusion apparent du mélange azote-hélium au sein du bois. Pour l'estimation du coefficient de diffusion apparent de la vapeur d'eau au sein du bois, nous utiliserons la propriété selon laquelle les coefficients de diffusion apparents sont proportionnels aux coefficients de diffusion moléculaire en phase gazeuse, calculables par diverses relations déduites de la théorie cinétique des gaz (*Perry [1984], Reid [1977]*).

Si D_I et D_V désignent respectivement les coefficients de diffusion apparents du couple azote-hélium et azote-vapeur d'eau au sein du bois, nous aurons :

$$\frac{D_V}{D_I} = \frac{\mathcal{D}_V}{\mathcal{D}_I} \quad (\text{II.22})$$

où \mathcal{D}_I et \mathcal{D}_V désignent respectivement les coefficients de diffusion moléculaires de l'hélium et de la vapeur d'eau dans une phase gazeuse où le binaire associé est l'azote. Lors du calcul du coefficient de diffusion moléculaire, il faudra probablement dans le cas du bois tenir compte de la contribution du transport diffusionnel du type Knudsen, le diamètre de certains pores étant inférieur au libre parcours moyen des molécules en phase gazeuse.

II.3. Deuxième dispositif expérimental : le vaporimètre

II.3.1. Description du vaporimètre

Ce dispositif est classiquement utilisé pour mesurer le coefficient de diffusion apparent de l'eau dans le bois en régime permanent. Le dispositif mis à notre disposition est celui réalisé par l'équipe du Professeur P.PERRE du L.E.R.M.A.B.. Il est constitué de trois principaux éléments, à savoir le vaporimètre, une enceinte climatique et une balance électronique.

a) Le vaporimètre

Le vaporimètre (schéma de la figure II.9 et photographie de la figure II.10) est composé d'un récipient en verre (du type verre à whisky) et d'autre part, du système de liaison récipient-échantillon dénommé PVC-CHA. Ce système est constitué d'un petit cylindre en PVC de diamètre 80mm et de longueur 65mm percé d'un orifice d'environ 5mm de diamètre. Sur ce cylindre, on dispose un morceau de chambre à air de diamètre 65 à 75mm et de longueur 130mm. La partie débouchante de la chambre à air est repliée sur la surface latérale extérieure du cylindre en PVC et maintenu fortement sur ce cylindre à l'aide d'un collier en plastique. L'orifice dans le PVC ne doit pas être obturé par la chambre à air car celui-ci va servir à créer un vide partiel entre les deux matériaux, afin d'emboîter ce système sur le récipient en verre. Le système PVC-CHA est un dispositif original car il permet d'assurer l'étanchéité vaporimètre-échantillon et de compenser les variations dimensionnelles des échantillons lors des essais. A l'intérieur du récipient de verre est placée une solution saturée de chlorure de sodium. A l'intérieur du récipient de verre est placée une solution saturée de chlorure de sodium.

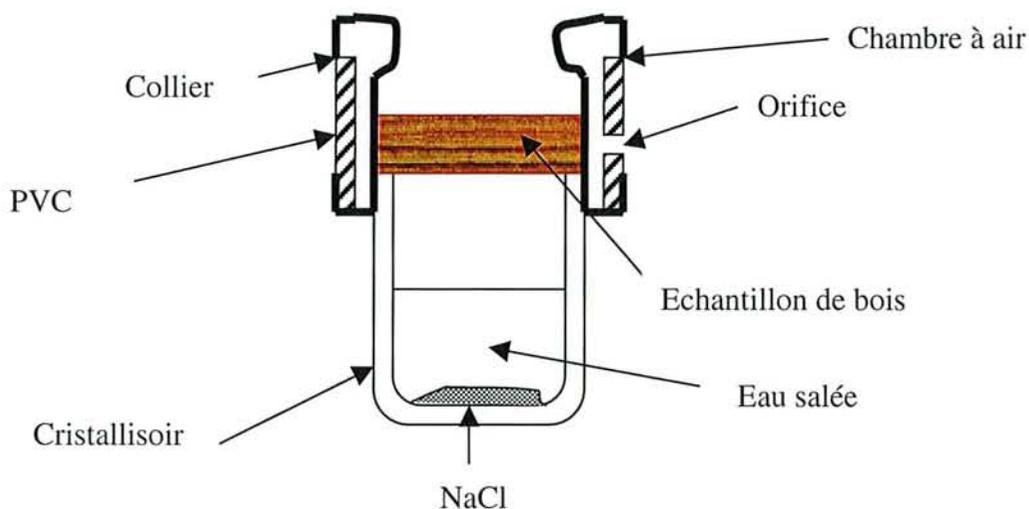


Figure II.9 : Schéma du vaporimètre

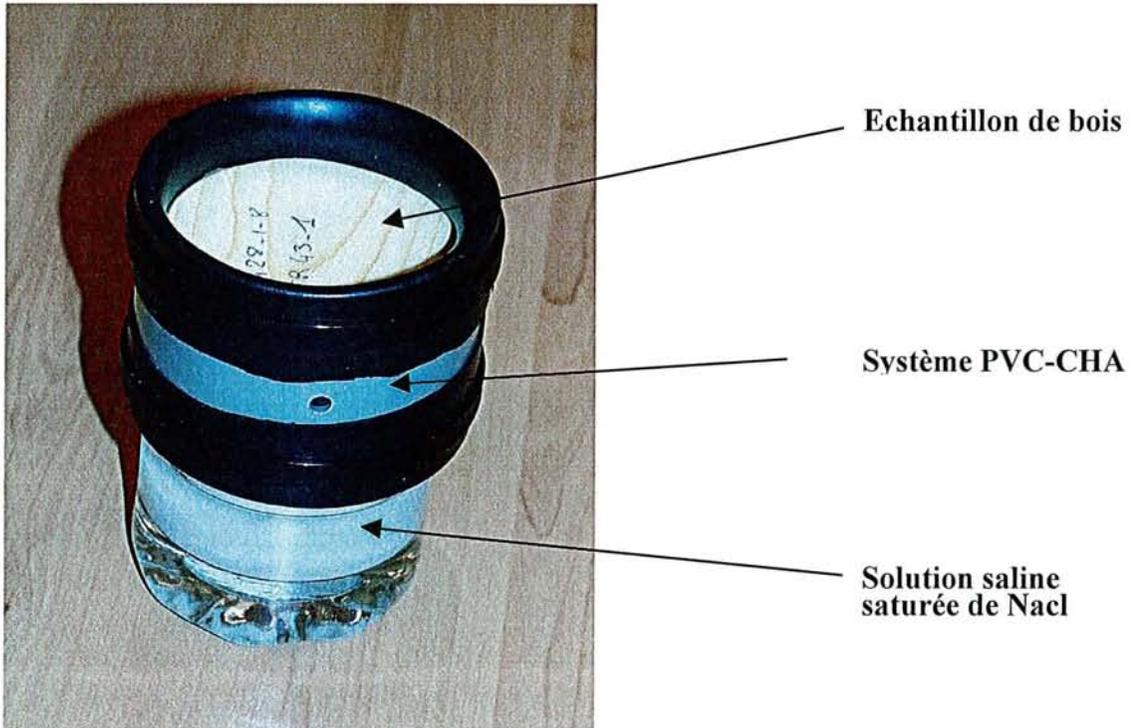


Figure II.10 : Photographie du vaporimètre

b) L'enceinte climatique

Réalisée également par l'équipe, elle permet de maintenir, sans perturbation, les conditions de température et d'humidité relative et cela quelle que soit la durée des essais (Figure II.11).

Elle est constituée d'une enceinte en aluminium de 5 mm d'épaisseur, comportant deux chambres superposées et séparées l'une de l'autre par une plaque également en aluminium. La façade avant de l'enceinte est en plexiglas et le plafond en verre. Les dimensions sont de 1000 x 675 x 750 mm, soit un volume total de 506,25 l. Sur la plaque séparant les deux chambres sont déposés la balance électronique et les vaporimètres. On peut disposer une vingtaine de vaporimètres. Dans la deuxième chambre est fixé sur la paroi latérale droite un ventilateur.

La plate-forme séparant les deux compartiments comporte deux ouvertures (Figure II.12) :

- l'une est située au-dessus de l'aspiration du ventilateur, permettant le refoulement de l'air de la première chambre vers la deuxième chambre
- l'autre ouverture permet à l'air aspiré d'être évacué vers la chambre où est situé le bac à eau

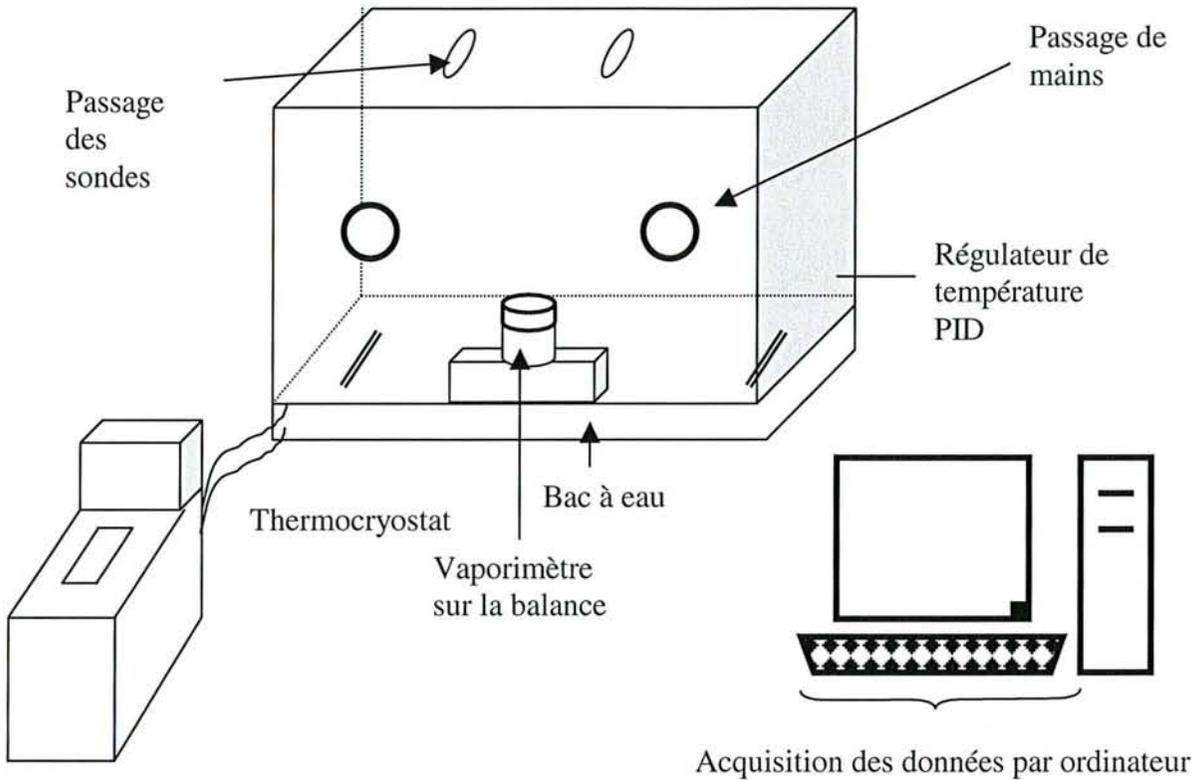


Figure II.11 : Schéma de l'enceinte climatique

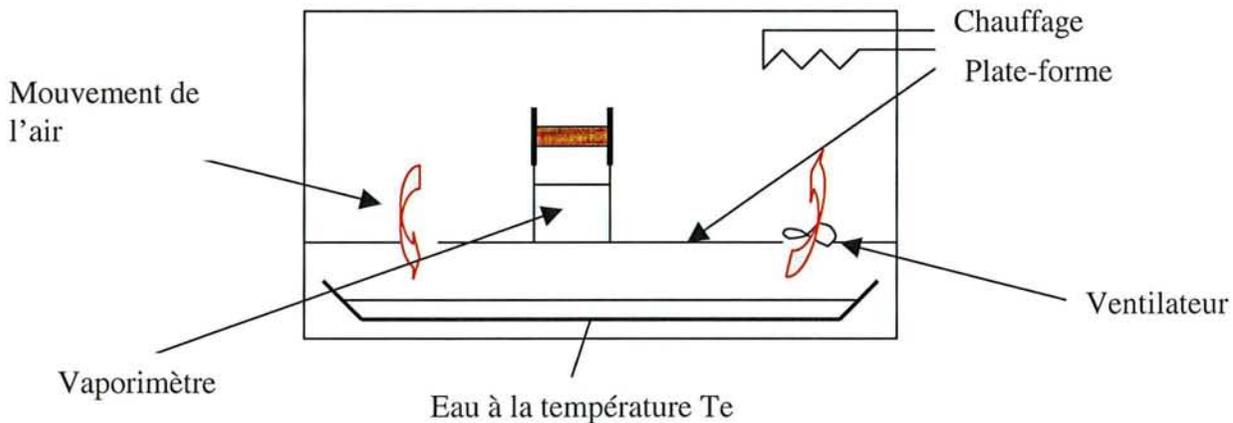


Figure II.12 : Schéma de fonctionnement de l'enceinte climatique

Le bac à eau, placé dans la première chambre, reçoit l'eau d'un thermocryostat dont la température est contrôlée. La surface libre de l'eau dans la cuve est d'environ 252 cm². L'air venant de la chambre supérieure et refoulé par le ventilateur lèche continuellement la surface libre de l'eau et la température de l'eau correspond à la température de rosée de l'air. La température sèche de l'air humide de la chambre supérieure est contrôlée par l'intermédiaire

d'un régulateur PID associé à une résistance électrique chauffante, la température de contrôle étant suivie par l'utilisation d'une sonde Pt 100.

Dans le plafond en verre sont percés deux orifices de 30 mm de diamètre en prévision d'éventuels dispositifs de contrôle. Enfin, sur la face avant de l'enceinte climatique sont situés deux passages de main pour manipuler l'un ou l'autre des vaporimètres sans trop perturber les mesures lors de ces opérations.

II.3.2. Protocole expérimental

Le récipient en verre contient une solution aqueuse saturée en NaCl. A 35°C, l'humidité relative de l'air sur la face inférieure de l'échantillon de bois est de 75%. La température de l'eau dans le bac est fixée à 19,5°C. Pour une température sèche de 35°C, l'humidité relative de l'air dans la partie supérieure de l'enceinte est de 40%. Avec une pompe à vide, on réalise un vide partiel entre la chambre à air et le PVC ; ce vide permet d'insérer l'échantillon de bois sur le récipient en verre. Après avoir ajusté tous les éléments, le vide est rompu et la chambre à air se rabat sur l'ensemble récipient-échantillon. On place alors l'ensemble dans la chambre supérieure de l'enceinte climatique où se trouve la balance électronique qui est utilisée pour les pesées. Ce protocole est à respecter pour chaque échantillon de bois. Les passages de main permettent de réaliser les pesées des vaporimètres sans perturber les conditions hygrométriques. Lors des pesées, il convient de couper le fonctionnement du ventilateur pour éviter les éventuelles fluctuations de la masse lue.

On suit ensuite au cours du temps la variation de la masse du récipient. Au bout d'un certain temps, on observe une variation linéaire de la masse qui correspond au débit d'eau transféré au travers de l'échantillon. Seule la partie linéaire de la courbe donnant la variation de masse en fonction du temps est exploitée.

II.3.3. Grandeur déduite

A partir de la variation de masse en fonction du temps, on peut déduire le débit d'eau transféré, soit :

$$\Phi = -\frac{dm}{dt} \quad (\text{II.23})$$

En admettant que le transfert de l'eau ne se fait que dans une seule direction par diffusion et si on ne différencie pas les transports diffusionnels en phase vapeur et en phase adsorbée, on

peut définir deux coefficients de diffusion apparents globaux selon la force motrice considérée.

En admettant que les résistances diffusionnelles externes sont négligeables (hypothèse plus vraisemblable du côté de l'enceinte que du côté du vaporimètre) et en connaissant les humidités relatives H_{R1} et H_{R2} , on peut évaluer les humidités du bois en équilibre thermique et thermodynamique avec l'air humide, soit :

$$\begin{aligned}x_1 &= f(H_{R1}, T) \\ x_2 &= f(H_{R2}, T)\end{aligned}\quad (\text{II.24})$$

Le flux diffusionnel est exprimé localement par les relations :

$$\varphi' = -D^* \frac{d\rho_e}{dy} \quad (\text{II.25})$$

$$\varphi = -D^{**} \rho_0 \frac{dx}{dy} \quad (\text{II.26})$$

où ρ_e est la masse volumique de l'eau sous forme vapeur
 x est l'humidité absolue du bois
 ρ_0 est la masse volumique du bois anhydre

En régime permanent, le débit d'eau transféré est constant. Par suite, par intégration des relations (II.25) et (II.26) sur l'épaisseur de l'échantillon, nous obtenons :

$$\Phi = \frac{D^*}{e} (\rho_{e1} - \rho_{e2}) S \quad (\text{II.27})$$

$$\Phi = \frac{D^{**}}{e} (x_1 - x_2) \rho_0 S \quad (\text{II.28})$$

La masse volumique de l'eau vapeur ρ_e peut être reliée à l'humidité de l'air par la relation :

$$\rho_e = \frac{P_e M}{RT} = \frac{H_R P_s(T) M}{RT} \quad (\text{II.29})$$

Dans la relation (II.29), P_s est la pression de vapeur saturante de l'eau à la température T et M est la masse molaire de l'eau vapeur. Par suite, les coefficients de diffusion D^* et D^{**} peuvent être évalués par les relations suivantes :

$$D^* = \frac{\Phi e R T}{S P_s(T) M (H_{R1} - H_{R2})} \quad (\text{II.30})$$

$$D^{**} = \frac{\Phi e}{S \rho_0 [f(H_{R1}, T) - f(H_{R2}, T)]} \quad (\text{II.31})$$

Selon les auteurs, les mesures effectuées à l'aide d'un vaporimètre permettent d'accéder aux coefficients de diffusion D^* et D^{**} .

En réalité, le transport de l'eau au sein du bois se fait à la fois sous forme gazeuse et sous forme adsorbée.

Pour un système à une direction principale, les équations de bilan à résoudre en régime stationnaire sont :

$$\text{Pour la phase vapeur : } -D_v \frac{d^2 \rho_e}{dy^2} + ka(f(\rho_e, T) - x) = 0 \quad (\text{II.32})$$

$$\text{Pour la phase adsorbée : } -D_A \rho_0 \frac{d^2 x}{dy^2} - ka(f(\rho_e, T) - x) = 0 \quad (\text{II.33})$$

$f(\rho_e, T)$ représente l'humidité du bois qui serait en équilibre avec un air humide dont la concentration en eau vapeur est ρ_e . k représente un coefficient de transfert global qui traduit une cinétique d'atteinte de l'équilibre thermodynamique, a est la surface d'échange par unité de volume entre la phase gazeuse et la phase solide.

Des deux équations de bilan, nous pouvons déduire :

$$-D_v \frac{d^2 \rho_e}{dy^2} - \rho_0 D_A \frac{d^2 x}{dy^2} = 0 \quad (\text{II.34})$$

L'équation (II.34) traduit le fait que le débit d'eau transféré est constant et égal à :

$$\Phi = \frac{D_v S}{e} (\rho_1 - \rho_2) + \frac{\rho_0 D_A S}{e} (x_1 - x_2) \quad (\text{II.35})$$

que l'on peut écrire en fonction des humidités relatives H_{R1} et H_{R2} , soit :

$$\Phi = \frac{D_v S}{e} \frac{P_s(T) M}{RT} (H_{R1} - H_{R2}) + \frac{\rho_0 D_A S}{e} [f(H_{R1}, T) - f(H_{R2}, T)] \quad (\text{II.36})$$

Les mesures effectuées au niveau de la cellule de diffusion de Wicke et Kallenbach permettent d'estimer indirectement le coefficient de diffusion D_v . Par suite, les expériences réalisées dans le vaporimètre peuvent permettre d'estimer le coefficient de diffusion D_A par l'utilisation de la relation (II.36).

En définitive, pour les échantillons étudiés simultanément dans le premier et le deuxième dispositif, il est possible de préciser les valeurs des quatre coefficients de diffusion apparents D_v , D^* , D^{**} et D_A .

II.4. Troisième dispositif expérimental : la double enceinte climatique

Dans le troisième dispositif, on cherche à réaliser des expériences transitoires d'absorption et de désorption d'eau.

II.4.1. Description du dispositif

Nous disposons de deux enceintes climatiques similaires à celle décrite dans le deuxième dispositif expérimental, reliées entre elles par un sas à deux vantaux fermés hermétiquement (Figures II.13 et II.14). Le sas permet de faire passer un échantillon de la première enceinte vers la deuxième enceinte.

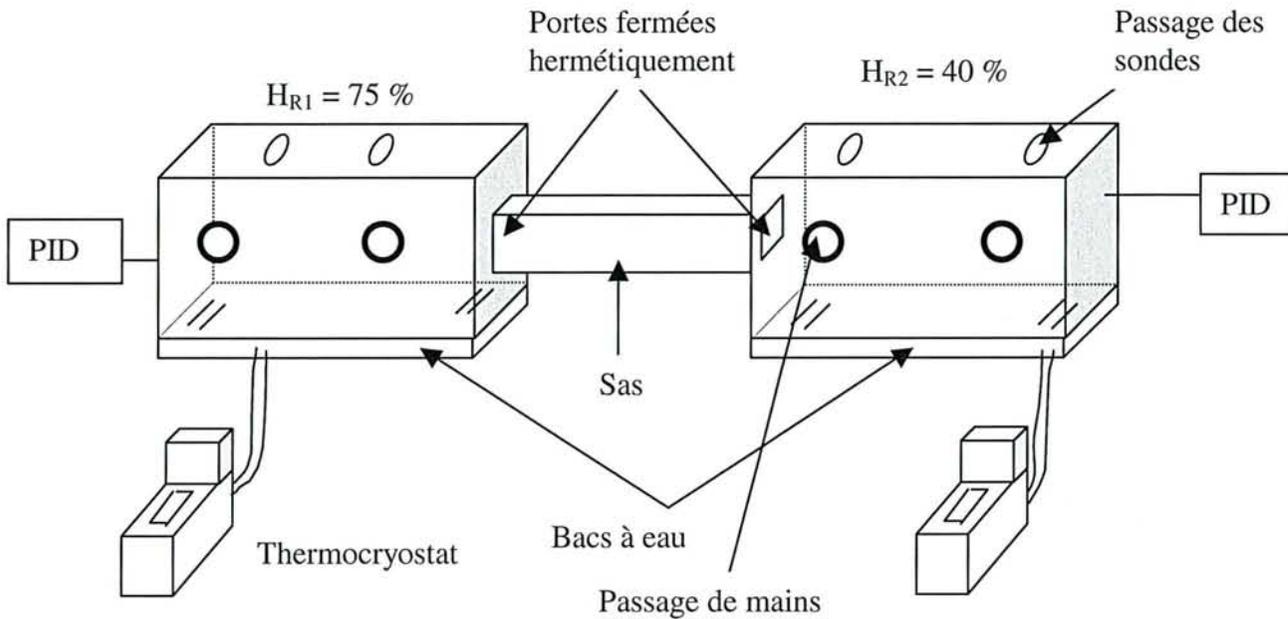


Figure II.13 : Schéma simplifié des deux enceintes climatiques

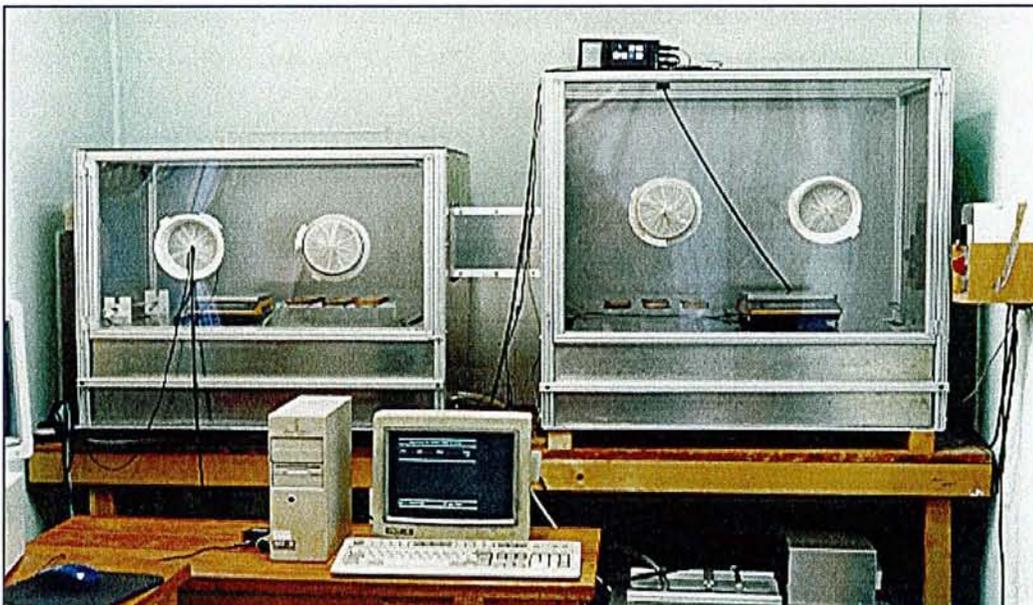


Figure II.14 : Photographie des deux enceintes climatiques

II.4.2. Protocole expérimental – Grandeurs mesurées

Dans la première enceinte, l'eau du bac est à 19,4°C et la température sèche est de 35°C, ce qui correspond à une humidité relative de l'air de 40%.

Dans la deuxième enceinte, l'eau du bac est à 30°C et la température sèche est de 35°C, ce qui correspond à une humidité relative de l'air de 75%.

Dans les expériences d'absorption, les échantillons de bois, stabilisés à 40% d'humidité relative, sont transférés par le sas dans l'enceinte à 75% d'humidité relative. Les pesées des échantillons sont réalisées tout d'abord toutes les 10 secondes (30 points), puis toutes les 30 secondes (30 points), puis toutes les 2 minutes (30 points), puis toutes les 5 minutes (110 points) puis 10 minutes pour tous les autres points. Après 24 heures, les masses sont mesurées chaque jour jusqu'à l'obtention d'une masse constante correspondant à l'équilibre thermodynamique de la deuxième enceinte.

Pour une bonne accessibilité des deux surfaces d'échange, les échantillons sont déposés sur des glissières constituées de deux rails parallèles. La grandeur mesurée est donc la masse de l'échantillon en fonction du temps.

Pour les expériences de désorption, le déroulement opératoire est inversé. Les échantillons stabilisés dans la deuxième enceinte sont introduits dans la première enceinte à l'humidité relative plus faible. Nous observons une diminution de la masse des échantillons en fonction du temps.

II.4.3. Grandeurs déduites

En admettant que le transport diffusionnel de l'eau se fait dans une seule direction principale, le bilan de matière de l'eau en se limitant à l'eau adsorbée s'écrit :

$$-D \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.37})$$

Avec comme condition initiale :

$$\text{à } t = 0 \quad x = x_i \quad \forall 0 < y < \frac{e}{2} \quad (\text{II.38})$$

et comme conditions aux limites :

$$\begin{aligned} \forall t > 0 \quad \text{à } y = 0 \quad \frac{\partial x}{\partial y} = 0 \\ \text{à } y = e/2 \quad x = x_f \end{aligned} \quad (\text{II.39})$$

x_i et x_f représentent les humidités du bois à l'équilibre à l'état initial et final. Pour une absorption, $x_i = x_1$ et $x_f = x_2$ et pour une désorption $x_i = x_2$ et $x_f = x_1$.

Les conditions aux limites (II.39) sont telles que l'on suppose que les résistances diffusionnelles externes à la surface des échantillons est négligeable.

L'équation aux dérivées partielles (II.37) avec la condition initiale (II.38) et les conditions aux limites (II.39) peut être résolue analytiquement. La solution a déjà été donnée dans le chapitre I. A partir de cette solution, il est possible d'évaluer la masse d'eau au sein de l'échantillon à l'instant t et la grandeur $E = \frac{m_f - m_i}{m_f - m_i}$, où m_i et m_f représentent les masses de l'échantillon en

équilibre dans l'enceinte initiale et l'enceinte finale. On obtient :

$$E = \frac{m_f - m_i}{m_f - m_i} = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{8}{(2n+1)^2 \pi} \exp \left[- \left(\frac{2n+1}{2} \right)^2 \frac{4\pi^2 t}{e^2} \right] \quad (\text{II.40})$$

D'après cette modélisation, l'exploitation des expériences d'adsorption et de désorption doit conduire à la même valeur du coefficient de diffusion D^{**} , qui doit être également le même que celui obtenu par la relation (II.31) à partir des expériences réalisées dans le vaporimètre.

La modélisation précédente ne prend en compte que le transport diffusionnel en phase adsorbée et fait donc apparaître deux hypothèses, à savoir que l'on néglige le transport diffusionnel de l'eau en phase gazeuse et que l'on admet que l'équilibre d'adsorption est réalisé entre l'eau vapeur et l'eau adsorbée. Si ces deux hypothèses ne sont pas vérifiées, les bilans de matière de l'eau vapeur et de l'eau adsorbée à résoudre s'écrivent alors respectivement :

$$-D_v \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial y^2} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + ka[f(\rho_e, T) - x] = 0 \quad (\text{II.41})$$

$$-D_A \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \frac{\partial x}{\partial t} - \frac{ka}{\rho_0} [f(\rho_e, T) - x] = 0 \quad (\text{II.42})$$

avec comme conditions initiales :

$$\begin{aligned} \text{à } t = 0 \quad \rho_e &= \rho_{ei} & \text{avec } x_i &= f(\rho_{ei}, T) \\ x &= x_i \end{aligned} \quad (\text{II.43})$$

et comme conditions aux limites :

$$\begin{aligned} \text{à } t > 0 \quad \text{à } x = 0 \quad & \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_e}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial x}{\partial y} = 0 \end{array} \right. \end{aligned} \quad (\text{II.44})$$

$$\begin{aligned} \text{à } x = e/2 \quad & \left\{ \begin{array}{l} \rho_e = \rho_{ef} \\ x = x_f \text{ avec } x_f = f(\rho_{ef}, T) \end{array} \right. \end{aligned} \quad (\text{II.45})$$

Dans la mesure où la relation d'équilibre entre l'eau vapeur et l'eau adsorbée n'est pas linéaire, la résolution des équations aux dérivées partielles (II.41) et (II.42) ne peut être que numérique.

Nous pouvons cependant avoir une relation approchée dans le cas de nos expériences d'absorption et de désorption. En effet, les valeurs de ρ_e et x en équilibre pour les deux enceintes climatiques sont telles que :

* pour l'enceinte à 35°C et 40% d'humidité relative :

$$\rho_e = 0,01579 \text{ kg.m}^{-3} \quad x = 0,073 \quad x/\rho_e = 4,62$$

* pour l'enceinte à 35°C et 75% d'humidité relative :

$$\rho_e = 0,02961 \text{ kg.m}^{-3} \quad x = 0,140 \quad x/\rho_e = 4,73$$

Dans le cas de nos expériences, nous pouvons donc supposer en première approximation qu'à l'équilibre, le rapport entre la masse volumique de l'eau en phase gazeuse et de l'eau adsorbée

$$\text{est constant avec une valeur du rapport } K = \left(\frac{x}{\rho_e} \right)_{\text{équilibre}} = 4,675 .$$

Avec cette hypothèse, les équations aux dérivées partielles deviennent linéaires. De plus, si nous supposons que le transport diffusionnel de l'eau en phase gazeuse est plus rapide que celui en phase adsorbée (la masse volumique de l'eau en phase gazeuse est constante et égale à ρ_{ef} , nous pouvons alors résoudre l'équation de bilan (II.42) dans le domaine de la transformée de Laplace. Cette analyse est réalisée dans l'**Annexe 2**.

E désignant la grandeur $\frac{m_f - m}{m_f - m_i}$, nous pouvons obtenir les expressions des transformées de

Laplace de la grandeur E, soit $\bar{E}(s)$, en l'absence ou en présence de résistance de transfert à la surface externe des échantillons. En l'absence de celle-ci, les grandeurs D_A et ka sont reliées à $\bar{E}(s)$ qui n'est rien d'autre que le moment d'ordre zéro de E (t), soit :

$$\bar{E}(0) = \frac{\rho_0}{ka} \left[1 - \frac{\text{th} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2\sqrt{D_A \rho_0}}} \right] = \int_0^{\infty} E(t) dt \quad (\text{II.46})$$

De plus, dans le cas où ka est supposé nul (le transfert diffusionnel se produit uniquement en phase adsorbée), le coefficient de diffusion D^{**} peut être obtenu à partir des courbes d'absorption et de désorption par la relation :

$$D^{**} = \frac{e^2}{12\bar{E}(0)} = \frac{e^2}{12 \int_0^{\infty} E(t) dt} \quad (\text{II.47})$$

Cette valeur du coefficient de diffusion pourra être aussi comparée à celle obtenue en régime stationnaire dans le deuxième dispositif expérimental.

II.5. Conclusions

Nous disposons de trois dispositifs expérimentaux qui peuvent permettre de déterminer différents coefficients de diffusion sur un même échantillon de bois à une direction principale. La cellule de Wicke et Kallenbach permet d'obtenir de manière indirecte le coefficient de diffusion en phase gazeuse, soit D_V .

Le vaporimètre permet de mesurer directement les coefficients de diffusion D^* et D^{**} mais aussi le coefficient de diffusion de l'eau en phase adsorbée, soit D_A .

Enfin, les mesures transitoires d'absorption et de désorption permettent d'atteindre directement le coefficient de diffusion D^{**} si l'équilibre d'adsorption entre l'eau vapeur et l'eau liée est réalisé instantanément, ou la conductance de transfert k_a dans le cas où l'équilibre thermodynamique n'est pas instantané.

Les trois dispositifs n'ont été envisagés que pour certains des échantillons de hêtre et d'épicéa pour lesquels nous avons effectué des mesures de coefficient de diffusion. Cependant, le nombre d'échantillons étudiés est suffisant pour montrer l'apport et l'intérêt de ces trois types de mesures.

Le chapitre suivant rapporte les différents résultats expérimentaux ainsi que les interprétations que nous avons pu déduire.

Chapitre III

Résultats expérimentaux
&
Discussion

Avant de présenter et de discuter les résultats expérimentaux obtenus dans les trois dispositifs introduits précédemment, nous allons passer en revue l'ensemble des échantillons de bois sur lesquels ont été effectuées les mesures.

III.1. Présentation des échantillons de bois étudiés

Les échantillons sont répartis en deux grandes familles. Pour la première famille, les déterminations du coefficient de diffusion ne sont effectuées qu'avec le premier dispositif expérimental (cellule de Wicke et Kallenbach en laiton). Pour les échantillons de la deuxième famille, les mesures des coefficients de diffusion ont été envisagées sur deux au moins des trois dispositifs.

Si pour la première famille, nous ne pourrions déduire que le coefficient de diffusion en phase gazeuse, nous pourrions dans le cas des échantillons de la deuxième famille obtenir les différents coefficients de diffusion introduits dans le chapitre précédent.

II.1.1. Caractéristiques des échantillons de la première famille

Les échantillons étudiés appartiennent essentiellement à une seule essence (hêtre). Quelques mesures ont été réalisées sur des échantillons de chêne, de pin et d'épicéa mais ces mesures ne seront pas présentées dans ce mémoire.

Les échantillons ont été découpés dans un avivé de 50mm d'épaisseur prélevé dans le duramen d'un arbre. Les mesures ont porté sur des échantillons se présentant sous la forme d'un cylindre de diamètre initial 34mm et d'épaisseur variable et orientée dans une des trois directions orthotropiques du bois. Plus précisément, des mesures dans la direction tangentielle ont porté sur 6 échantillons avec 2 échantillons pour chacune des trois épaisseurs (1, 2 et 4mm). Dans la direction radiale, les mesures ont été limitées à un échantillon pour chacune des trois épaisseurs (1, 2 et 4mm). Enfin, dans la direction longitudinale, pour chacune des trois épaisseurs (10, 18 et 25mm), les mesures ont été réalisées sur trois échantillons.

Lors de la fixation des échantillons sur la rondelle en laiton à l'aide de la colle silicone, la surface d'échange entre les deux compartiments est réduite à celle d'un disque de 27mm de diamètre, soit $S = 5,72 \text{ cm}^2$.

L'identification et certaines caractéristiques des échantillons de bois de la première famille sont données dans le tableau III.1.

Tableau III.1. : Identification et caractéristiques des échantillons de la première famille

Identification des échantillons de bois	Direction du transfert T = tangentielle R = radiale L = longitudinale	Epaisseur (mm)
hT1	T	1
hT2	T	1
hT3	T	2
hT4	T	2
hT5	T	4
hT6	T	4
hR1	R	1
hR2	R	2
hR3	R	4
hL1	L	10
hL2	L	10
hL3	L	10
hL4	L	18
hL5	L	18
hL6	L	18
hL7	L	25
hL8	L	25
hL9	L	25

III.1.2. Caractéristiques des échantillons de la deuxième famille

Les échantillons de bois examinés appartiennent à deux essences (hêtre et épicéa). Des mesures ont été également réalisées sur des échantillons de panneaux de fibres à moyenne densité (MDF), mais les résultats obtenus ne seront pas présentés dans ce mémoire. Rappelons que pour la plupart de ces échantillons, les mesures sont réalisées dans les trois types de dispositifs. Ces échantillons proposés par l'équipe du Professeur P. PERRE ont été prélevés

dans le duramen de l'arbre (à l'exception de l'échantillon EL6 qui est prélevé dans l'aubier). Ils sont sensiblement cylindriques avec un diamètre compris entre 67 et 74,5mm. Leur épaisseur dans une des trois directions orthotropiques du bois reste comprise entre 9,2 et 29,4mm. L'identification et les principales caractéristiques de ces échantillons sont données dans le tableau III.2. Pour les mesures effectuées dans le premier dispositif (cellule de Wicke et Kallenbach en aluminium), la surface d'échange entre les deux compartiments sera prise identique pour tous les échantillons et égale à $S = 38,50 \text{ cm}^2$. L'identification des échantillons est similaire à celle utilisée par P. PERRE dans la mesure où d'autres caractéristiques de ces échantillons ont été mesurées au sein du laboratoire.

Tableau III.2. : Identification et caractéristiques des échantillons de la deuxième famille

Identification des échantillons	Direction du transfert	Diamètre minimal (mm)	Diamètre maximal (mm)	Epaisseur (mm)	Surface d'échange (mm ²)
H7T	T	72	73	12,6	4128,1
H8T	T	71,5	73	13,9	4099,4
HT21	T	71,5	73	11,5	4099,4
H11R	R	69	73	14,1	3956,1
H13R	R	70	74,5	15,0	4095,9
HR22	R	68	72	11,9	3845,3
H1L	L	71	72,5	15,9	4071,3
HL11	L	71,5	72	19,0	4043,2
HL21	L	71	71	9,2	3959,2
ET4	T	71	72	9,9	4015,0
ET6	T	71	72	9,85	4015,0
ET8	T	71	72	9,9	4015,0
ER4	R	70	72	10	3958,4
ER6	R	70	72	9,85	3958,4
ER7	R	69	72	9,85	3901,9
3338B	L	70	71	29,4	3903,4
3352B	L	69	70,5	29,0	3820,6
EL6	L	67	69	11,5	3630,9
EL39	L	67	68,5	11,5	3604,6

III.2. Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons de la première famille

La mesure des coefficients de diffusion n'a été réalisée que dans le premier dispositif, à savoir la cellule de Wicke et Kallenbach en laiton.

L'objectif de ces mesures est une mesure indirecte des coefficients de diffusion de l'eau vapeur au sein du bois, les coefficients de diffusion étant déduits de ceux obtenus pour un soluté non adsorbable (hélium) en admettant que les coefficients de diffusion effectifs de l'eau vapeur et de l'hélium au sein du bois sont proportionnels aux coefficients de diffusion moléculaire des deux constituants.

Les mesures dans la cellule de diffusion peuvent être envisagées en régime transitoire ou en régime permanent. Pour les transferts en direction tangentielle et radiale, les coefficients de diffusion sont trop petits pour pouvoir effectuer les mesures en régime permanent. Inversement, dans le cas de la direction longitudinale, pour les épaisseurs choisies, le transfert au sein de l'échantillon est trop rapide pour pouvoir réaliser une mesure en système fermé et seul un fonctionnement en régime stationnaire peut être envisagé. Par suite, nous allons distinguer les mesures dans les directions tangentielles et radiales des mesures dans la direction longitudinale.

III.2.1. Mesures des diffusivités apparentes dans les directions tangentielles et radiales des échantillons de la première famille

Ces mesures expérimentales ont fait l'objet d'un mémoire de DEA (*Mouchot [1998]*) et d'une publication (*Mouchot et coll. [2000]*).

Les mesures ont été réalisées en régime transitoire, les deux compartiments de la cellule évoluant en système fermé. Connaissant les concentrations d'hélium dans les deux compartiments à l'instant t , soient respectivement C_1 pour le compartiment 1 et C_2 pour le compartiment 2, la modélisation de l'évolution de l'hélium dans la cellule conduit aux relations :

$$-\text{Ln} \frac{(V_1+V_2)C_1 - C_{10}V_1 - C_{20}V_2}{V_2(C_{10} - C_{20})} = \frac{KS(V_1+V_2)}{V_1V_2} t = -\text{Ln}[A_1] \quad (\text{III.1})$$

$$-\text{Ln} \frac{(V_1+V_2)C_2 - C_{10}V_1 - C_{20}V_2}{V_1(C_{20} - C_{10})} = \frac{KS(V_1+V_2)}{V_1V_2} t = -\text{Ln}[A_2] \quad (\text{III.2})$$

Par suite, si nous portons le premier membre des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps, nous devons obtenir une relation linéaire dont la pente permet d'évaluer le coefficient de transfert global K.

A titre d'exemple, nous portons sur les figures III.1a et III.1b les points expérimentaux donnant les premiers membres des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps dans le cas de l'échantillon hT5 pour trois valeurs de l'humidité relative ($H_R = 0, 50$ et 95%). Pour ces humidités relatives, l'humidité du bois en équilibre peut être estimée à $0, 8,5$ et 23% .

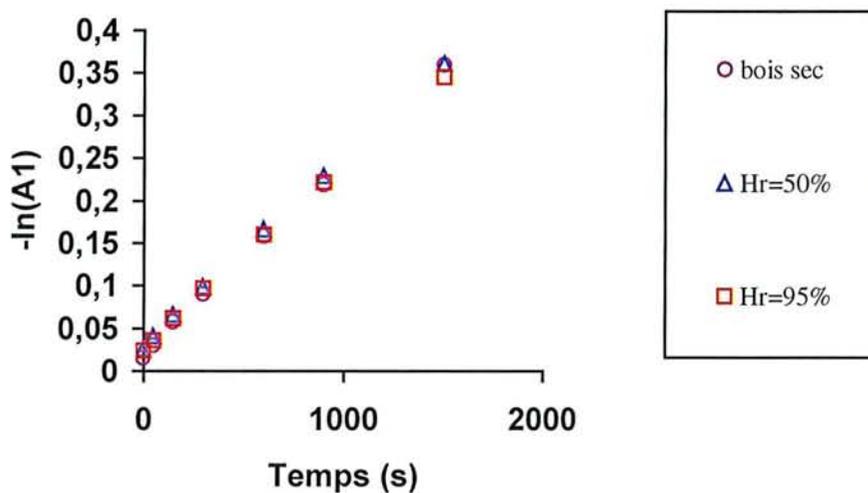


Figure III.1a : Variation des premiers membres de la relation (III.1) en fonction du temps pour l'échantillon hT5

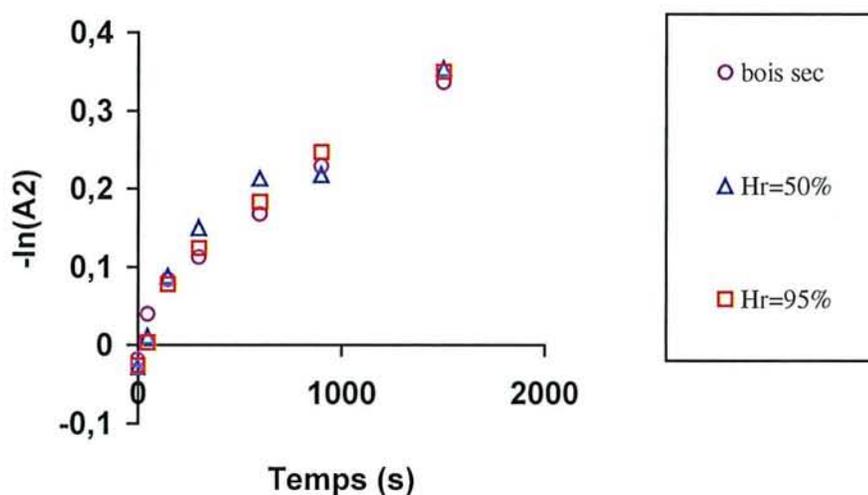
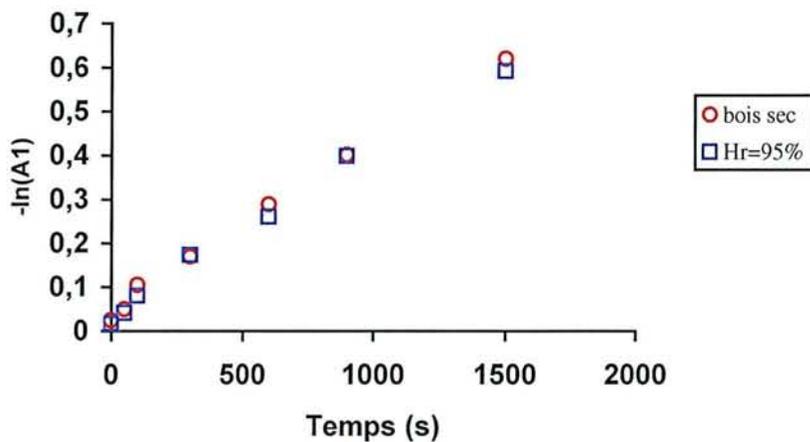


Figure III.1b : Variation des premiers membres de la relation (III.2) en fonction du temps pour l'échantillon hT5

Les résultats confirment la relation linéaire et mettent en évidence une indépendance du coefficient global de transfert de matière avec l'humidité du bois dans le domaine

hygroscopique. Nous constatons également que les courbes obtenues pour chacun des compartiments sont similaires.

Des résultats similaires obtenus pour les autres échantillons sont donnés dans l'Annexe 3. De même, nous portons à titre d'exemple sur les figures III.2a et III.2b les points expérimentaux donnant les premiers membres des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps dans le cas



de l'échantillon hR3 sec et pour une humidité relative des phases de 95%.

Figure III.2a : Variation des premiers membres de la relation (III.1) en fonction du temps pour l'échantillon hR3

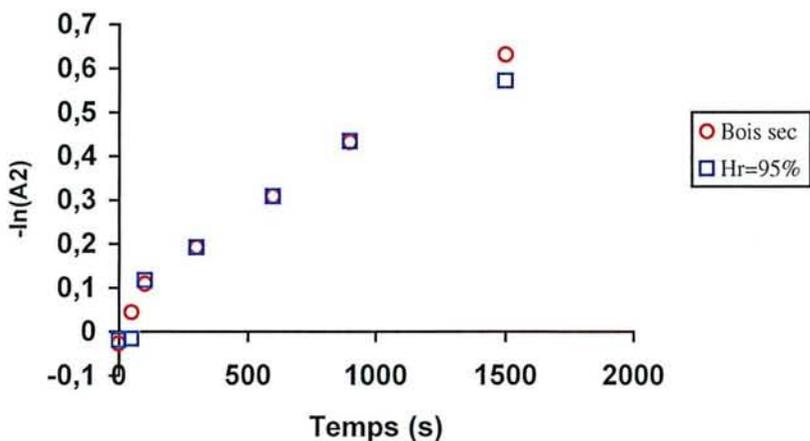


Figure III.2b : Variation des premiers membres de la relation (III.2) en fonction du temps pour l'échantillon hR3

Ici encore, les points expérimentaux sont relativement bien alignés. Des résultats similaires sont obtenus pour les deux autres échantillons. Les courbes correspondantes sont données en Annexe 3.

A partir des valeurs du coefficient global K résumées dans le tableau III.3, nous pouvons évaluer la résistance globale $\frac{1}{K}$ que nous pouvons poser égale à :

$$\frac{1}{K} = \frac{e}{D} + \frac{2}{k} \quad (\text{III.3})$$

Tableau III.3 : Valeurs du coefficient global obtenues pour les échantillons de hêtre dans les cas des transferts tangentiels et radiaux

Echantillon	Humidité relative (%)	K (*10 ⁵ m/s) Compartiment 1	K (*10 ⁵ m/s) Compartiment 2
hT1	0	9,730	7,652
	40	9,840	9,512
	80	9,735	9,426
	95	10,990	7,710
hT2	80	11,866	11,147
	95	11,966	10,796
hT3	0	2,808	2,965
	40	2,414	2,703
	80	2,147	2,451
	95	2,099	2,304
hT4	0	1,585	1,517
	50	1,574	1,742
	95	1,632	1,763
hT5	0	1,312	1,475
	50	1,375	1,816
	95	1,286	1,438
hT6	0	1,223	1,296
	95	1,134	1,197
hR1	0	9,804	7,180
	95	7,988	7,075
hR2	0	2,724	3,117
	95	3,149	3,301
hR3	0	2,157	2,362
	95	2,204	2,545

L'évolution de $\frac{1}{K}$ en fonction de e doit être linéaire. Les résultats obtenus dans le cas des mesures tangentielles et radiales sont reportés respectivement sur les figures III.3 et III.4.

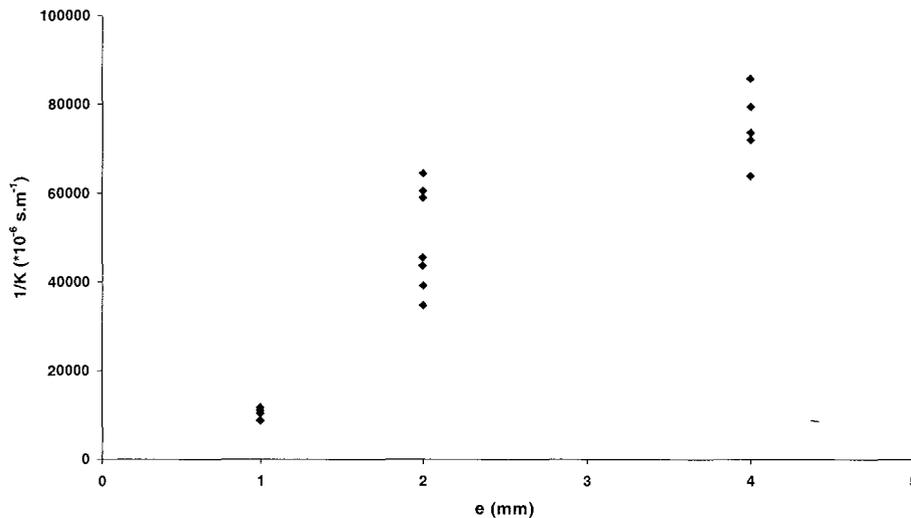


Figure III.3 : Variation de $1/K$ en fonction de e dans le cas des mesures tangentielles

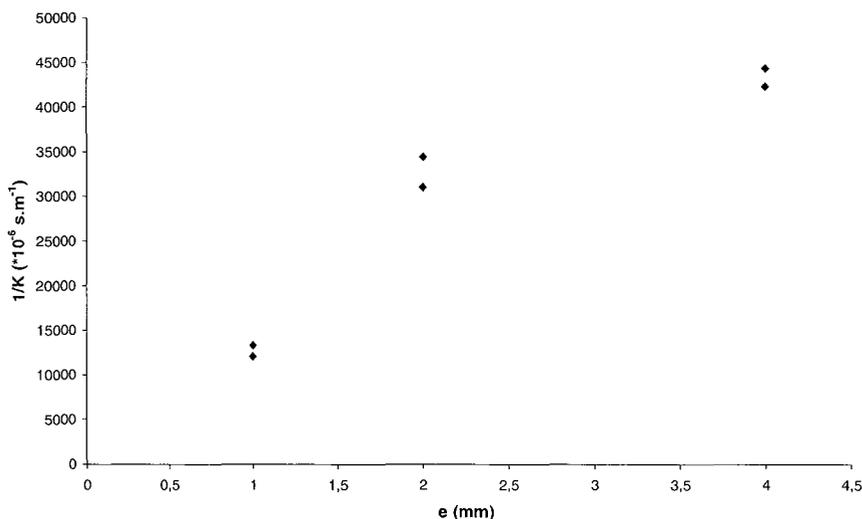


Figure III.4 : Variation de $1/K$ en fonction de e dans le cas des mesures radiales

Les points expérimentaux sont sensiblement alignés. Toutefois, le nombre d'épaisseurs étudiées est trop limité pour atteindre avec une grande précision la valeur du coefficient de diffusion D et du coefficient de transfert externe k (supposé identique pour les deux compartiments). La différence de pression totale devant être nulle, le non-respect de cette condition ayant plus de conséquences sur les mesures effectuées sur les échantillons de 1mm

d'épaisseur, nous avons accordé plus de confiance aux valeurs du coefficient global obtenues pour les échantillons d'épaisseur 2 et 4mm.

En effet, les différentes valeurs de K étant obtenues sur des échantillons indépendants, la valeur moyenne du coefficient de diffusion prend partiellement en compte l'incertitude des mesures expérimentales et la variabilité des échantillons au niveau d'un même avivé. Une estimation plus précise du domaine de variation du coefficient de diffusion lié à la variabilité de l'échantillon nécessiterait, pour chaque épaisseur, des mesures transitoires sur une dizaine d'échantillons. A chaque temps d'opération, la mesure doit être reproduite deux fois, l'analyse de la concentration d'hélium ne pouvant être effectuée que dans un compartiment. En définitive, chaque expérience transitoire se déroulant sur plus de six heures, le nombre d'échantillons est resté limité.

A partir des valeurs moyennes de $1/K$ obtenues pour les épaisseurs de 2 et 4mm, nous pouvons obtenir des valeurs moyennes de D et k pour les échantillons de hêtre dans lesquels le transport diffusionnel se fait dans les directions tangentielles et radiales. Le coefficient de transfert externe devant être identique pour les différents échantillons, les valeurs obtenues sont les suivantes :

$$k = 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$$

$$D_T = (5,2 \pm 1,6).10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

$$D_R = (8,5 \pm 1,3).10^{-8} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

Les incertitudes données sur les coefficients de diffusion sont obtenues en tenant compte des valeurs du coefficient global K obtenues pour les deux épaisseurs de 2 et 4mm. La valeur du coefficient de diffusion dans la direction radiale est supérieure à celle dans la direction tangentielle. Nous pouvons attribuer cet accroissement à la présence des rayons ligneux dans la direction radiale.

Les valeurs de D_T et D_R représentent les coefficients de diffusion de l'hélium en phase gazeuse au sein du bois. Pour estimer les coefficients de diffusion de l'eau vapeur en phase gazeuse, nous utilisons la relation exprimant que la diffusivité apparente est proportionnelle au coefficient de diffusion moléculaire en phase gazeuse. Pour ce dernier, en toute rigueur il faudrait tenir compte de la distribution des diamètres de pores de l'échantillon pour différencier la part du transport diffusionnel du type Fick du transport diffusionnel de type Knudsen. Nous supposons ici que le transport est uniquement de type fickien. A 30°C, l'application de la relation de *Fuller (Perry [1984], Reid [1977])* permet d'évaluer les coefficients de diffusion moléculaires des systèmes binaires azote-hélium et vapeur d'eau-azote, soient :

$$D_{\text{He-N}_2} = 7,32 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$D_{\text{eau-N}_2} = 2,69 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Par suite, les coefficients de diffusion apparents de l'eau vapeur en phase gazeuse au sein du bois de hêtre sont tels que :

$$D_{VT} = D_T \frac{D_{\text{eau-N}_2}}{D_{\text{He-N}_2}} = (1,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

$$D_{VT} = D_R \frac{D_{\text{eau-N}_2}}{D_{\text{He-N}_2}} = (3,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

III.2.2. Mesure des diffusivités apparentes et des perméabilités dans la direction longitudinale des échantillons de la première famille

Ces mesures expérimentales ont également fait l'objet d'une publication (*Mouchot [2002]*).

Les mesures sont réalisées en régime stationnaire en présence d'une différence de pression totale entre les deux compartiments de la cellule. Elles ont été répétées deux fois par échantillon et leur reproductibilité est dans tous les cas très satisfaisante. En revanche, il existe une grande variabilité entre les échantillons bien que ceux-ci aient été prélevés au sein d'un même avivé.

La modélisation de la cellule en régime stationnaire (cf. Chapitre II, § II.2.3) conduit aux relations suivantes :

$$-\text{Ln} \frac{Q_{IS}(C_{2S} - C_{1S}) + Q_{IE}(C_{1E} - C_{2S})}{Q_{IE}(C_{1E} - C_{1S})} = \frac{e}{SD} (Q_{IS} - Q_{IE}) = \text{Ln}[A] \quad (\text{III.4})$$

$$u = \frac{Q_{IS} - Q_{IE}}{S} = \frac{B \Delta P}{\mu e} \quad (\text{III.5})$$

A titre d'exemple, nous portons sur les figures III.5 et III.6 les variations du premier membre de la relation (III.4) en fonction de $Q_{IS} - Q_{IE}$ et de u en fonction de ΔP pour les trois échantillons hL4, hL5 et hL6 d'épaisseur 18mm.

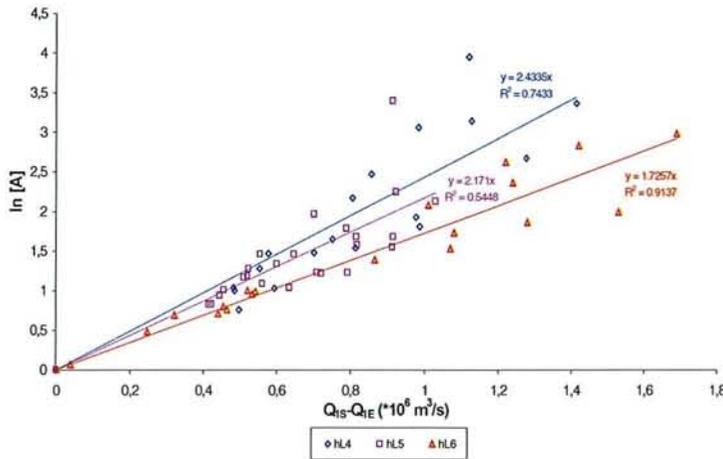


Figure III.5 : Variation de $\ln A$ en fonction de $Q_{IS} - Q_{IE}$ pour les échantillons hL4, hL5 et hL6

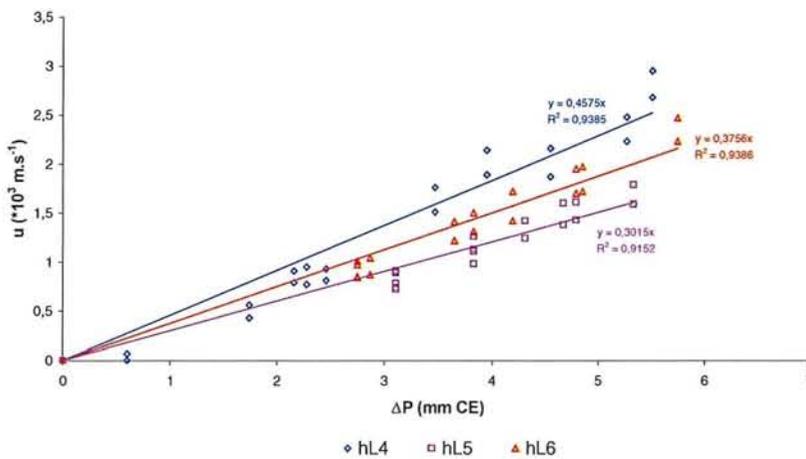


Figure III.6 : Variation de la vitesse d'ensemble u en fonction de ΔP pour les échantillons hL4, hL5 et hL6

Les points expérimentaux pour chacun des échantillons confirment la validité de la modélisation et permettent à partir des pentes des relations linéaires d'obtenir respectivement les coefficients de diffusion de l'hélium au sein du bois et la perméabilité de l'échantillon pour l'écoulement gazeux. Des résultats similaires ont été obtenus pour les autres échantillons de hêtre d'épaisseurs différentes et les courbes correspondantes sont données en **Annexe 4**.

Les mesures ont été réalisées pour des écoulements d'azote et d'hélium secs et saturés, à la température ambiante. Les valeurs moyennes obtenues pour les trois échantillons de même épaisseur et pour des gaz secs et humides sont résumées dans le tableau III.4 pour le coefficient de diffusion et dans le tableau III.5 pour les perméabilités.

Tableau III.4 : Valeurs moyennes des coefficients de diffusion dans la direction longitudinale pour les échantillons de la première famille

Echantillons	Epaisseur (mm)	D (gaz secs) (m ² .s ⁻¹)	D (gaz humides) (m ² .s ⁻¹)
hL1, hL2, hL3	10	(1,36 ± 0,13).10 ⁻⁵	(1,56 ± 0,05).10 ⁻⁵
hL4, hL5, hL6	18	(1,57 ± 0,06).10 ⁻⁵	(1,76 ± 0,09).10 ⁻⁵
hL7, hL8, hL9	25	(1,76 ± 0,10).10 ⁻⁵	(1,84 ± 0,05).10 ⁻⁵

Tableau III.5 : Valeurs moyennes de la perméabilité dans la direction longitudinale pour les échantillons de la première famille

Echantillons	Epaisseur (mm)	B (gaz secs) (m ²)	B (gaz humides) (m ²)
hL1, hL2, hL3	10	(1,46 ± 0,21).10 ⁻¹¹	(1,71 ± 0,26).10 ⁻¹¹
hL4, hL5, hL6	18	(1,39 ± 0,19).10 ⁻¹¹	(1,79 ± 0,26).10 ⁻¹¹
hL7, hL8, hL9	25	(1,07 ± 0,12).10 ⁻¹¹	(1,30 ± 0,12).10 ⁻¹¹

Les coefficients de diffusion obtenus augmentent légèrement avec l'épaisseur des échantillons en présence de gaz secs ou humides. Cet accroissement traduit probablement la présence de résistance de transfert externe à la surface des échantillons en contact avec l'écoulement gazeux. Ainsi, à partir des valeurs estimées des coefficients de diffusion, il est possible de calculer un coefficient de transfert global $K = \frac{D}{e}$ et d'examiner la variation de $\frac{1}{K}$ en fonction de l'épaisseur des échantillons.

Cette représentation effectuée sur la figure III.7 montre que les points expérimentaux sont bien alignés aussi bien pour les mesures effectuées pour les gaz secs que pour celles effectuées avec les gaz humides. Nous pouvons noter que les deux relations linéaires ont la même ordonnée à l'origine, celle-ci correspondant à deux fois la résistance relative au transfert diffusionnel externe. La pente de ces relations linéaires permet d'obtenir une meilleure évaluation du coefficient de diffusion de l'hélium au sein du bois dans la direction longitudinale.

Nous obtenons :

$$D_L = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour le hêtre anhydre}$$

$$D_L = 2,3 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \text{ pour le hêtre humide}$$

Le fait que les deux droites aient la même ordonnée à l'origine est logique dans la mesure où à la température de la cellule, le titre molaire de l'eau dans les deux gaz est de l'ordre de 2,3%. La valeur du coefficient de transfert de matière k est de l'ordre de 10^{-2} m.s^{-1} . Il est plus grand que celui obtenu dans le cas où le transfert dans les deux compartiments est réalisé en système fermé, puisque dans ces mesures, il existe un écoulement permanent des deux phases gazeuses. De plus, sa prise en compte est nécessaire dans la mesure où la résistance externe n'est pas négligeable devant la résistance interne pour les épaisseurs étudiées.

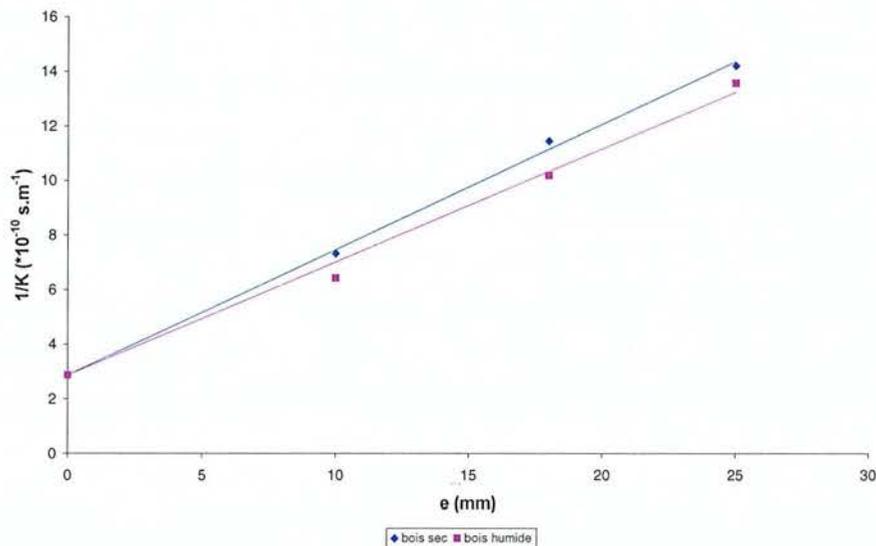


Figure III.7 : Variation de $1/K$ en fonction de l'épaisseur pour les échantillons de hêtre de la première famille pour lesquels le transport se fait dans la direction longitudinale

En ce qui concerne l'influence de l'humidité, l'accroissement du coefficient de diffusion avec l'humidité de l'échantillon est peut-être dû à un accroissement de la porosité. Toutefois, la variation observée est dans le domaine d'incertitude des déterminations expérimentales, aussi nous prendrons comme valeur de la diffusivité de l'hélium dans la direction longitudinale des échantillons de hêtre la valeur :

$$D_L = (2,2 \pm 0,1) \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

En ce qui concerne les valeurs de la perméabilité, la diminution de la perméabilité avec l'épaisseur des échantillons est conforme aux résultats de la littérature. Cette diminution est liée à l'agencement des fibres de bois, les espaces libres au sein des fibres à l'extérieur ne constituant pas des trajets continus entre les extrémités de l'échantillon, le nombre de discontinuités étant proportionnel à l'épaisseur de l'échantillon.

Si nous admettons que la variation de la perméabilité en fonction de l'épaisseur est exponentielle, nous pouvons obtenir une valeur locale de la perméabilité du bois de hêtre. L'accroissement de la perméabilité avec l'humidité du bois est peut-être également due à l'augmentation de la porosité, mais les variations restent du même ordre de grandeur que la variabilité des valeurs de perméabilités observée entre les divers échantillons.

En prenant des valeurs moyennes de perméabilités aux trois épaisseurs, la perméabilité locale du bois de hêtre que nous pouvons obtenir est :

$$B_L = (2,2 \pm 0,2).10^{-11} \text{ m}^2$$

Nous verrons ci-après que cette valeur est tout à fait compatible avec la valeur de perméabilité que nous pouvons obtenir par mesure directe.

Connaissant la valeur du coefficient de diffusion de l'hélium au sein du bois, nous pouvons en déduire celle du coefficient de diffusion de la vapeur d'eau au sein du bois en utilisant la proportionnalité avec le coefficient de diffusion moléculaire. Ainsi, nous obtenons :

$$D_{vL} = (8,1 \pm 0,4).10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

En ce qui concerne la perméabilité, à 20°C la viscosité de l'air humide étant peu différente de celle de l'azote, la valeur de perméabilité dans la direction axiale sera identique à celle mesurée précédemment pour le mélange azote-hélium-vapeur d'eau, soit :

$$B_L = (2,2 \pm 0,2).10^{-11} \text{ m}^2$$

III.2.3. Mesures directes de la perméabilité des échantillons de hêtre

Les mesures directes de perméabilité ont été effectuées dans la cellule de Wicke et Kallenbach, où pour chacun des compartiments, un des orifices de sortie ou d'entrée est fermé. Le gaz traversant l'échantillon est soit de l'azote sec, soit de l'azote humide.

La perméabilité est obtenue à partir des points expérimentaux donnant le débit volumique traversant l'échantillon en fonction de la différence de pression appliquée entre les deux compartiments de la cellule.

Les mesures de perméabilité ont été essentiellement réalisées sur des échantillons de hêtre pour lesquels le transport se fait dans la direction longitudinale, afin de valider les valeurs trouvées lors de la détermination des coefficients de diffusion.

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.8 les points expérimentaux donnant le débit volumique en fonction de la différence de pression dans le cas des échantillons de hêtre de

25mm d'épaisseur (hL7, hL8 et hL9), traversés par un courant d'azote sec. Des résultats similaires sont obtenus pour les échantillons d'épaisseur 10 et 18 mm (cf. **Annexe 3**).

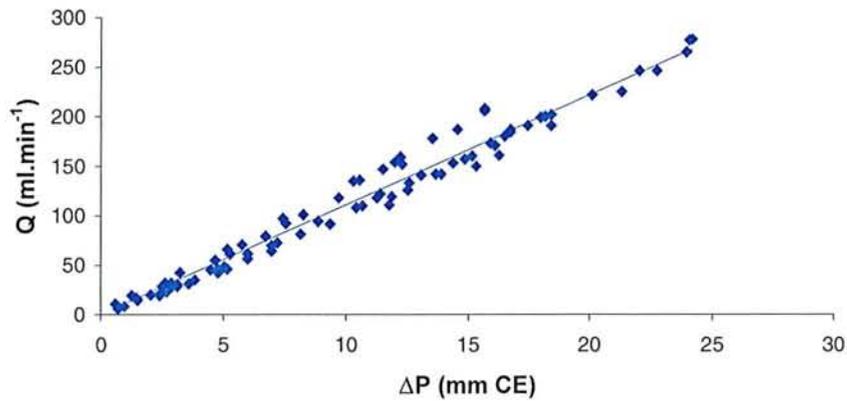


Figure III.8 : Variation du débit d'azote en fonction de la différence de pression pour les échantillons de hêtre hL7, hL8, hL9

Les résultats obtenus montrent que la loi de Darcy est bien vérifiée. A partir de la pente de la relation linéaire, nous pouvons estimer la perméabilité de l'échantillon. Les valeurs obtenues sont résumées dans le tableau III.6.

Tableau III.6 : Perméabilités des échantillons de hêtre pour un écoulement dans la direction longitudinale

Echantillons	Perméabilité avec azote sec (m ²)	Perméabilité avec azote humide (m ²)
hL1	1,79.10 ⁻¹¹	1,39.10 ⁻¹¹
hL2	2,37.10 ⁻¹¹	1,77.10 ⁻¹¹
hL3	1,88.10 ⁻¹¹	1,45.10 ⁻¹¹
hL4	1,81.10 ⁻¹¹	1,43.10 ⁻¹¹
hL5	1,56.10 ⁻¹¹	1,28.10 ⁻¹¹
hL6	2,16.10 ⁻¹¹	1,75.10 ⁻¹¹
hL7	1,44.10 ⁻¹¹	1,11.10 ⁻¹¹
hL8	1,75.10 ⁻¹¹	1,37.10 ⁻¹¹
hL9	1,47.10 ⁻¹¹	1,11.10 ⁻¹¹

Pour chacune des épaisseurs, les valeurs moyennes des perméabilités sont résumées dans le tableau III.7.

Les perméabilités diminuent avec l'épaisseur conformément à ce qui avait déjà été observé lors des mesures simultanées. En revanche, avec l'azote humide, les perméabilités trouvées sont plus faibles que celles trouvées avec l'azote sec. Ce résultat inversé par rapport à celui observé lors des mesures simultanées met en évidence la difficulté de préciser l'influence de l'humidité du bois sur la valeur de la perméabilité.

Tableau III.7 : Valeurs moyennes des perméabilités des échantillons de hêtre pour un écoulement dans la direction longitudinale

Epaisseur des échantillons (mm)	Perméabilité moyenne azote sec (m ²)	Perméabilité moyenne azote humide (m ²)
10	(2,01 ± 0,24).10 ⁻¹¹	(1,54 ± 0,16).10 ⁻¹¹
18	(1,84 ± 0,21).10 ⁻¹¹	(1,49 ± 0,18).10 ⁻¹¹
25	(1,55 ± 0,21).10 ⁻¹¹	(1,20 ± 0,12).10 ⁻¹¹

Toutefois, les différences observées sont du même ordre de grandeur que celles dues à la variabilité des échantillons et nous pouvons donc nous limiter à une valeur moyenne de la perméabilité, indépendante de l'humidité du bois dans le domaine hygroscopique. Si nous comparons ces valeurs à celles obtenues lors des déterminations simultanées (cf. tableau III.5), nous constatons une très bonne concordance. La mesure directe de perméabilité étant plus simple que la mesure simultanée, cet accord nous permet de justifier l'intérêt des mesures simultanées qui conduisent directement aux paramètres de transport convectif et diffusif en phase gazeuse.

Pour les échantillons de hêtre pour lesquels les transports se font dans les directions tangentielles et radiales, les mesures de perméabilités n'ont pas été réalisées de façon aussi complète. Les mesures effectuées sur deux échantillons dans la direction tangentielle (hT2 et hT4) et dans la direction radiale (hR1 et hR2) conduisent aux valeurs suivantes :

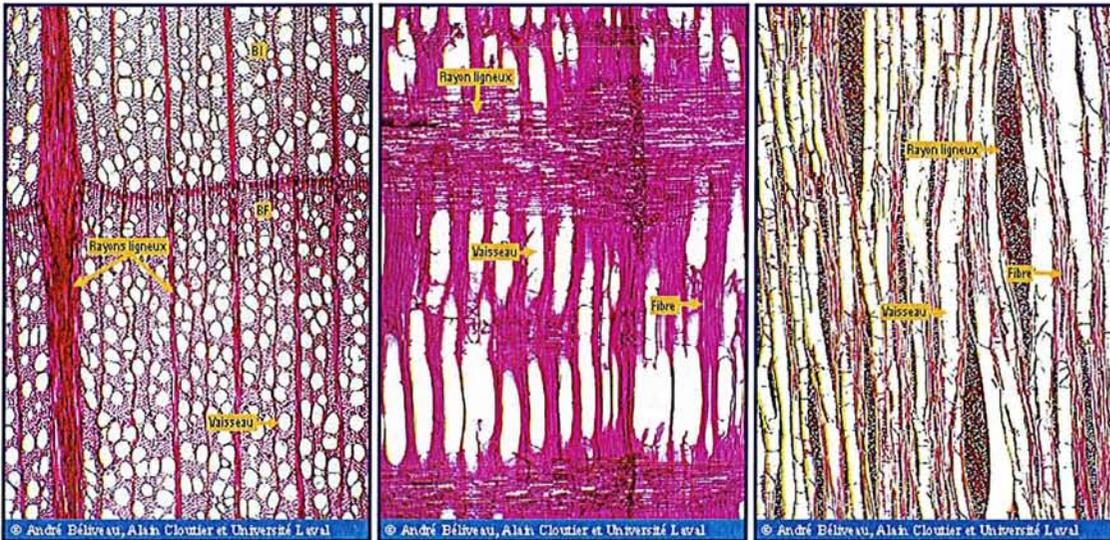
$$B_T = 10^{-16} \text{ m}^2$$

$$B_R = 10^{-17} \text{ m}^2$$

Ces valeurs très inférieures à la perméabilité longitudinale sont conformes à la structure anatomique du hêtre. Les coupes microscopiques reportées sur la figure III.9 mettent en évidence les passages privilégiés du gaz suivant la direction principale d'étude :

- vaisseaux dans la direction longitudinale (coupe RT)
- rayons ligneux dans la direction radiale (coupe LT)

La proportion de vaisseaux dans la coupe LR est supérieure à celle de la coupe LT, ce qui peut expliquer que B_T est supérieur à B_R .



Coupe RT X40

Coupe LR X40

Coupe LT X40

Figure III.9 : Coupes microscopiques du hêtre dans les trois directions orthotropiques du bois (d'après A. Beliveau et A. Cloutier)

III.3. Résultats expérimentaux relatifs aux échantillons de la deuxième famille

III.3.1. Résultats obtenus dans la cellule de Wicke et Kallenbach en aluminium

a) Mesure des diffusivités apparentes dans les directions radiales et tangentielles

Les mesures des diffusivités apparentes dans la cellule de Wicke et Kallenbach en aluminium ont été réalisées sur des échantillons de hêtre (H7T, H8T, H11R, H13R) et sur des échantillons d'épicéa (ET4, ET6, ER4, ER6).

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.10 les premiers membres des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps pour les deux échantillons de hêtre dont le transport se fait dans la direction tangentielle, soient H7T et H8T.

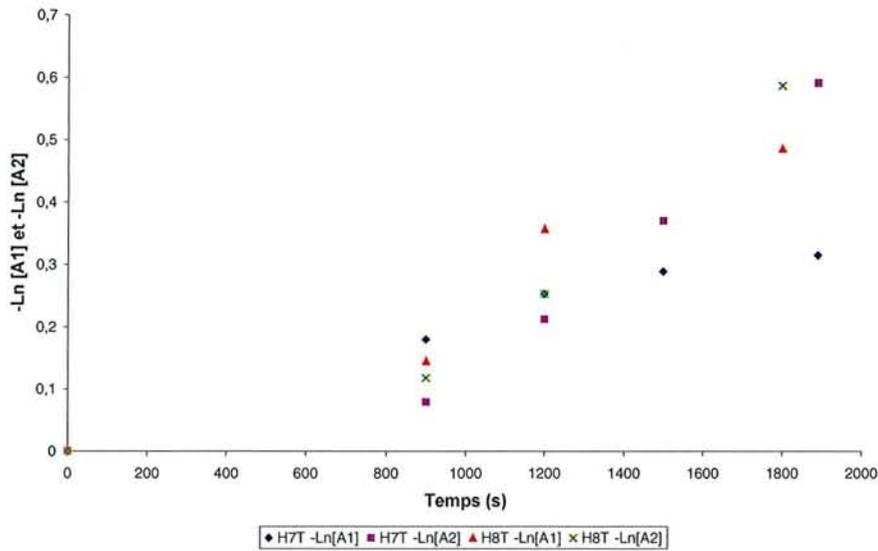


Figure III.10 : Variation de $-\text{Ln}A_1$ et $-\text{Ln}A_2$ en fonction du temps pour les échantillons de hêtre H7T et H8T

La dispersion des points expérimentaux est plus grande que pour les mesures effectuées dans la cellule en laiton. Toutefois, les épaisseurs des échantillons H7T et H8T étant proches (12,6mm pour H7T et 13,9 mm pour H8T), nous avons préféré considérer l'ensemble des points expérimentaux. A partir de la pente de la droite définie sur l'ensemble des points expérimentaux, le coefficient global de transfert de matière K est de 10^{-6} m.s^{-1} .

Les deux compartiments évoluant en système fermé macroscopiquement immobile, nous pouvons admettre que le coefficient de transfert externe k est du même ordre de grandeur que celui de la petite cellule, soit $k = 10^{-4} \text{ m.s}^{-1}$. Dans ces conditions, la résistance due au transfert externe $\frac{2}{k} = 20000 \text{ s.m}^{-1}$ est négligeable devant la résistance globale $\frac{1}{K} = 1000000 \text{ s.m}^{-1}$. Nous pouvons donc assimiler la résistance globale à la résistance interne. Par suite, le coefficient de diffusion de l'hélium au sein de l'échantillon est tel que :

$$D_1 = \frac{K}{e} \quad (\text{III.6})$$

A partir des valeurs de K obtenues sur l'ensemble des échantillons (les figures correspondantes aux points expérimentaux sont données en **Annexe 4**), nous pouvons estimer

des valeurs moyennes des coefficients de diffusion apparents de l'hélium au sein des échantillons. Nous obtenons :

- pour le hêtre dans la direction tangentielle : $D_{TH} = (10,0 \pm 2,4) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour le hêtre dans la direction radiale : $D_{RH} = (10,8 \pm 2,2) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'épicéa dans la direction tangentielle : $D_{TE} = (4,6 \pm 1,6) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'épicéa dans la direction radiale : $D_{RE} = (3,5 \pm 1,4) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

En tenant compte de la proportionnalité entre les coefficients de diffusion apparents et les coefficients de diffusion moléculaires, nous pouvons estimer les coefficients de diffusion apparents de la vapeur d'eau au sein du bois. Nous obtenons :

- pour le hêtre dans la direction tangentielle : $D_{VTH} = (3,5 \pm 0,9) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour le hêtre dans la direction radiale : $D_{VRH} = (4,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'épicéa dans la direction tangentielle : $D_{VTE} = (1,7 \pm 0,6) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'épicéa dans la direction radiale : $D_{VRE} = (1,3 \pm 0,5) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Si nous comparons pour les échantillons de hêtre les valeurs des coefficients de diffusion obtenues avec la cellule en aluminium avec celles obtenues avec la cellule en laiton, nous observons un bon accord dans le cas de la direction radiale. L'écart est un peu plus important pour les valeurs des coefficients de diffusion dans la direction tangentielle, mais ces valeurs restent toutefois inférieures à celles obtenues dans la direction radiale.

b) Mesures des diffusivités apparentes et des perméabilités dans la direction longitudinale

Les mesures effectuées en régime stationnaire dans la cellule de Wicke et Kallenbach en aluminium ont concerné l'échantillon de hêtre HL11 et les trois échantillons d'épicéa 3352B, EL6 et EL39. Les mesures n'ont pu être réalisées que sur un seul échantillon de hêtre, les deux autres ayant subi des dégradations lors des mesures effectuées sur le troisième dispositif. A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.11 la variation du premier membre de la relation (III.4) en fonction de $Q_{IS} - Q_{IE}$ dans le cas de l'échantillon d'épicéa EL39.

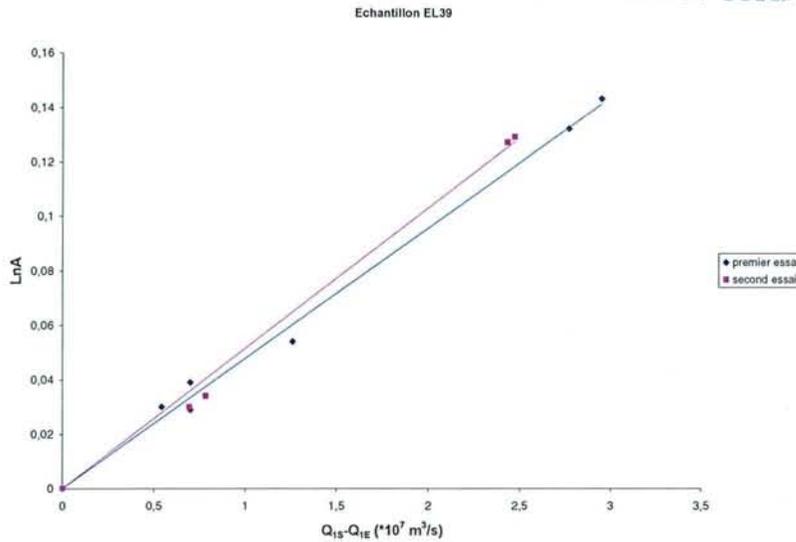


Figure III.11 : Variation de $\text{Ln}A$ en fonction de $Q_{1S} - Q_{1E}$ pour l'échantillon d'épicéa EL39

Des courbes similaires sont obtenues pour les trois autres échantillons (cf. **Annexe 4**).

A partir de ces représentations linéaires, nous pouvons obtenir le coefficient de diffusion de l'hélium au sein de l'échantillon.

Les valeurs obtenues sont données dans le tableau III.8.

Tableau III.8 : Valeurs des coefficients de diffusion de l'hélium dans la direction longitudinale pour les échantillons de hêtre et d'épicéa

Echantillons	Epaisseur (mm)	Coefficient de diffusion dans la direction axiale ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
HL11	19,0	$(9,1 \pm 0,4) \cdot 10^{-6}$
3352B	29,0	$(10,1 \pm 0,8) \cdot 10^{-6}$
EL6	11,5	$10,3 \cdot 10^{-6}$
EL39	11,5	$(6,2 \pm 0,2) \cdot 10^{-6}$

Pour ces quatre échantillons, la résistance globale $\frac{e}{D}$ est de l'ordre de 1000 à 3000 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$. La résistance externe ayant été estimée dans la cellule en laiton à 200 $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$, nous pouvons également admettre pour ces mesures que la résistance globale se réduit à la résistance interne. La valeur trouvée pour l'unique échantillon de hêtre de 19mm d'épaisseur est plus faible que celles obtenues pour les échantillons de hêtre dans la cellule en laiton (différence comprise entre 50 et 100%) mais l'ordre de grandeur reste le même.

En tenant compte de la proportionnalité entre les coefficients de diffusion apparents au sein du bois et les coefficients de diffusion moléculaires, nous pouvons estimer les coefficients de diffusion apparents de l'eau vapeur au sein du bois. Nous obtenons :

- pour l'échantillon de hêtre HL11 : $D_{VLH} = (3,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'échantillon d'épicéa 3352B : $D_{VLE} = (3,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'échantillon d'épicéa EL6 : $D_{VLE} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
- pour l'échantillon d'épicéa EL39 : $D_{VLE} = (2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$

Les valeurs des coefficients de diffusion pour l'épicéa dans la direction longitudinale sont du même ordre de grandeur que celles trouvées pour le seul échantillon de hêtre. Si nous comparons ces valeurs à celles obtenues sur la première cellule, nous trouvons dans le cas du hêtre une valeur sensiblement inférieure à celle obtenue précédemment, comme dans le cas des coefficients de diffusion dans les directions tangentielle et radiales.

Au cours des mesures précédentes, la relation entre le débit d'ensemble traversant l'échantillon et la différence de pression entre les deux compartiments de la cellule permet d'obtenir une valeur de la perméabilité de l'échantillon.

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.12 les points expérimentaux correspondant à l'échantillon d'épicéa EL6. Des courbes similaires sont obtenues pour les trois autres échantillons (cf. **Annexe 4**). Cependant, le nombre de mesures expérimentales est trop limité (3 par échantillon) pour l'obtention d'une valeur précise de la perméabilité.

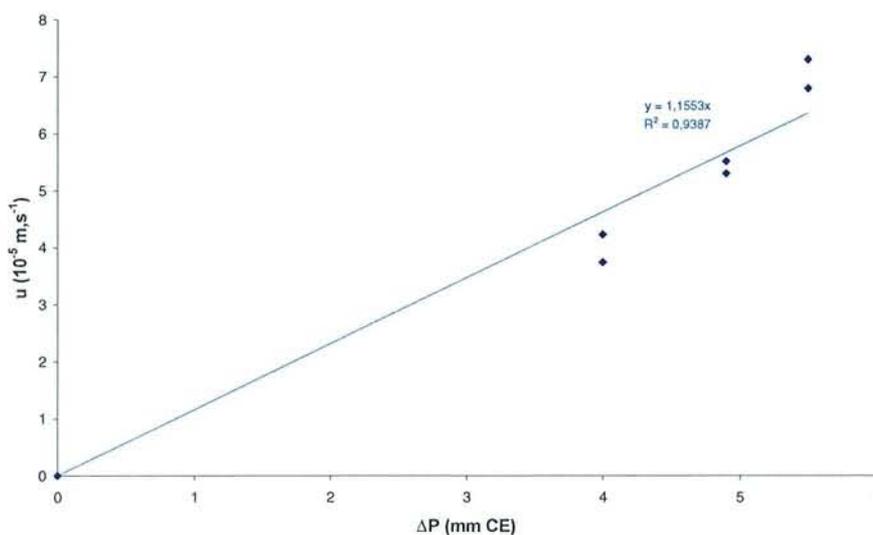


Figure III.12 : Variation de la vitesse u de l'écoulement d'ensemble en fonction de ΔP

A partir des pentes de ces représentations linéaires, nous pouvons obtenir un ordre de grandeur des perméabilités de l'écoulement d'ensemble au sein de l'échantillon. Les valeurs déduites sont données dans le tableau III.9.

Tableau III.9 : Valeurs de la perméabilité dans la direction longitudinale des échantillons de hêtre et d'épicéa

Echantillons	Epaisseur (mm)	Perméabilité (m ²)
HL11	19	$1,1 \cdot 10^{-11}$
3352B	29	$7,6 \cdot 10^{-13}$
EL6	11,5	$8,7 \cdot 10^{-12}$
EL39	11,5	$1,6 \cdot 10^{-13}$

La perméabilité des échantillons d'épicéa dans la direction longitudinale est inférieure à celle du hêtre, ce qui est logique compte-tenu de la présence des vaisseaux dans ce dernier. Toutefois, les valeurs des perméabilités n'étant pas obtenues avec une grande précision, nous avons cherché à les mesurer sur les mêmes échantillons de manière directe.

c) Mesure directe de la perméabilité

Les mesures de perméabilités effectuées dans la cellule de Wicke et Kallenbach ont été réalisées sur les échantillons de hêtre H7T, HT21, H11R, H13R, HR22, HL11 et sur les échantillons d'épicéa ER4, ER6, 3352B, EL6, EL39.

Deux essais ont été réalisés pour chaque échantillon. A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.13 la variation du débit d'azote en fonction de la différence de pression appliquée pour l'échantillon de hêtre HL11. Des courbes similaires sont obtenues pour les autres échantillons et sont données en **Annexe 4**.

A partir de la pente des variations linéaires, il est possible d'évaluer la perméabilité de l'échantillon. Les valeurs obtenues sont données dans la tableau III.10.

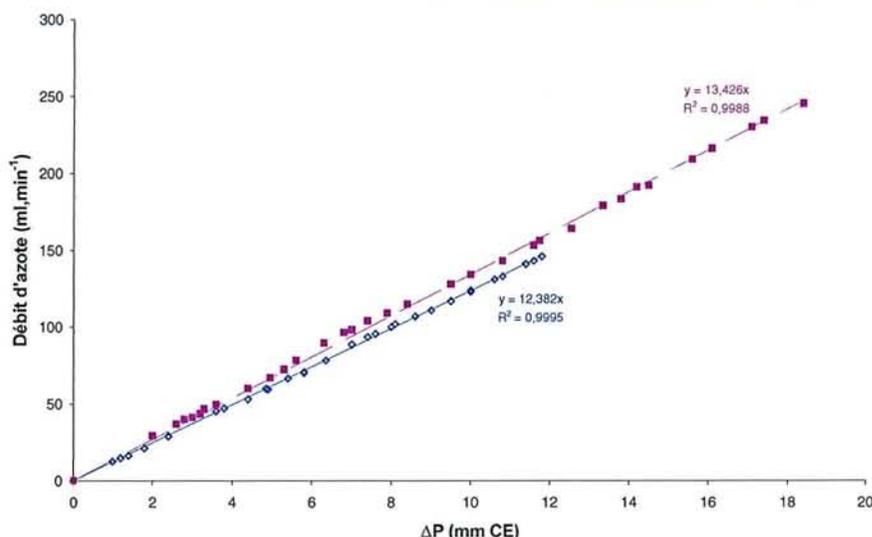


Figure III.13 : Variation du débit volumique d'azote en fonction de la différence de pression ΔP pour l'échantillon de hêtre HL11

Tableau III.10 : Valeurs des perméabilités obtenues par mesure directe

Echantillons	Perméabilité (m ²) Première mesure	Perméabilité (m ²) Seconde mesure	Perméabilité (m ²) Valeur moyenne
H7T	$2,89 \cdot 10^{-16}$	$2,74 \cdot 10^{-16}$	$(2,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-16}$
HT21	$1,36 \cdot 10^{-16}$	$1,65 \cdot 10^{-16}$	$(1,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-16}$
H11R	$4,82 \cdot 10^{-17}$	$4,47 \cdot 10^{-17}$	$(4,6 \pm 0,2) \cdot 10^{-17}$
H13R	$6,18 \cdot 10^{-17}$	$6,61 \cdot 10^{-17}$	$(6,4 \pm 0,2) \cdot 10^{-17}$
HR22	$6,38 \cdot 10^{-17}$	$7,05 \cdot 10^{-17}$	$(6,7 \pm 0,3) \cdot 10^{-17}$
HL11	$1,88 \cdot 10^{-12}$	$2,04 \cdot 10^{-12}$	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$
ER4	$2,77 \cdot 10^{-17}$	$2,93 \cdot 10^{-17}$	$(2,8 \pm 0,1) \cdot 10^{-17}$
ER6	$3,30 \cdot 10^{-17}$	$3,48 \cdot 10^{-17}$	$(3,4 \pm 0,1) \cdot 10^{-17}$
3352B	$3,01 \cdot 10^{-13}$	$2,95 \cdot 10^{-13}$	$(3,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-13}$
EL6	$3,80 \cdot 10^{-17}$	$3,15 \cdot 10^{-13}$	$(3,5 \pm 0,3) \cdot 10^{-13}$
EL39	$4,93 \cdot 10^{-14}$	$4,82 \cdot 10^{-14}$	$(4,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-14}$

Sur l'ensemble des mesures directes de perméabilité, nous pouvons faire les observations suivantes.

Les perméabilités radiales du hêtre sont de l'ordre de 5.10^{-17} m^2 et celles de l'épicéa de l'ordre de 3.10^{-17} m^2 . Ces valeurs sont proches de celles obtenues par *Agoua* [2001] sur les mêmes échantillons mais dans un dispositif différent de la cellule de Wicke et Kallenbach.

La comparaison avec nos valeurs expérimentales est effectuée dans le tableau III.11.

Tableau III.11 : Comparaison entre les mesures de *Agoua* et nos mesures expérimentales pour certains échantillons de hêtre et d'épicéa

Echantillons	Perméabilités obtenues par <i>Agoua</i> (m^2)	Perméabilités moyennes mesurées dans la cellule (m^2)
H11R	$7,53.10^{-17}$	$4,6.10^{-17}$
H13R	$7,34.10^{-17}$	$6,4.10^{-17}$
H7T	$3,04.10^{-16}$	$2,8.10^{-16}$
ER4	$3,86.10^{-17}$	$2,8.10^{-17}$
ER6	$4,66.10^{-17}$	$3,4.10^{-17}$

Les valeurs obtenues par *Agoua* sont légèrement supérieures mais les écarts sont en général inférieurs à 30%.

Pour les échantillons HL11, 3352B, EL6 et EL39, la comparaison entre les perméabilités mesurées directement et celles obtenues simultanément avec les mesures de diffusivités est résumée dans le tableau III.12.

Tableau III.12 : Comparaison des valeurs de perméabilités obtenues par mesure directe avec les mesures simultanées de diffusivité

Echantillons	Perméabilité (m^2) Mesure simultanée	Perméabilité (m^2) Mesure directe
HL11	$1,1.10^{-11}$	$2,0.10^{-12}$
3352B	$7,6.10^{-13}$	$3,0.10^{-13}$
EL6	$2,7.10^{-12}$	$3,5.10^{-13}$
EL39	$1,6.10^{-13}$	$4,9.10^{-14}$

De manière générale, les perméabilités obtenues par mesure directe sont nettement inférieures aux valeurs déduites des mesures simultanées. Ce résultat est différent de celui observé dans le cas des petits échantillons de hêtre mis en œuvre dans la cellule de Wicke et Kallenbach en

laiton. Les points relatifs aux mesures simultanées étant peu nombreux, et pas toujours bien alignés, la détermination de la perméabilité lors des mesures simultanées reste peu précise. Certes, pour l'échantillon de hêtre HL11, la perméabilité mesurée simultanément est tout à fait similaire à celle obtenue avec les petits échantillons de hêtre, mais il ne s'agit que d'un seul échantillon et les valeurs de perméabilité à retenir pour les échantillons précédents devront plutôt être celles obtenues par mesures directes.

Pour les échantillons HL11, 3352B, EL6 et EL39, les mesures directes de perméabilité ont été réalisées avec de l'azote sec et de l'azote humide dans des conditions où l'humidité absolue du bois est voisine de 13%. Les valeurs moyennes de perméabilités obtenues pour les échantillons anhydres et humides sont résumées dans le tableau III.13.

L'influence de l'humidité de l'échantillon sur la valeur de la perméabilité n'est pas très prononcée et dans le domaine hygroscopique des échantillons, la perméabilité peut être supposée constante.

Tableau III.13 : Influence de l'humidité de l'échantillon sur la valeur de la perméabilité

Echantillons	Perméabilité échantillon anhydre (m ²)	Perméabilité échantillon humide (m ²)
HL11	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$	$(2,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-12}$
3352B	$(3,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-13}$	$(2,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-13}$
EL6	$(3,5 \pm 0,1) \cdot 10^{-13}$	$(2,0 \pm 0,1) \cdot 10^{-13}$
EL39	$(4,9 \pm 0,1) \cdot 10^{-14}$	$(4,7 \pm 0,1) \cdot 10^{-14}$

Enfin, les différences observées entre les échantillons EL6 et EL39 sont dues à des différences de localisation des deux échantillons dans l'arbre. L'échantillon EL6 est prélevé dans l'aubier et EL39 dans le duramen. Conformément aux résultats de la littérature, nous trouvons que l'aubier de l'épicéa est plus perméable que le duramen.

d) Comparaison des diffusivités de l'eau en phase gazeuse déduites des mesures effectuées dans les deux cellules

Bien que les échantillons ne soient pas identiques, cette comparaison a uniquement comme objectif de préciser les ordres de grandeur. Elle est effectuée dans le tableau III.14 pour les mesures effectuées sur les échantillons de hêtre.

Tableau III.14 : Valeurs des diffusivités apparentes moyennes de la vapeur d'eau mesurées sur les différents échantillons de hêtre dans les deux cellules de Wicke et Kallenbach

Direction de transfert	Valeur moyenne de D_V obtenue dans la première cellule ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Valeur moyenne de D_V obtenue dans la seconde cellule ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)
Tangentielle	$(1,9 \pm 0,6) \cdot 10^{-8}$	$(3,7 \pm 0,9) \cdot 10^{-8}$
Radiale	$(3,1 \pm 0,5) \cdot 10^{-8}$	$(4,0 \pm 0,8) \cdot 10^{-8}$
Longitudinale	$(8,1 \pm 0,6) \cdot 10^{-6}$	$(3,3 \pm 0,1) \cdot 10^{-6}$

Le nombre d'échantillons étudiés dans chacune des directions n'est pas suffisamment grand pour donner des valeurs statistiques, mais les valeurs obtenues dans les deux cellules montrent la même tendance.

La diffusivité dans la direction tangentielle est la plus faible et elle est de l'ordre de $(3 \pm 1) \cdot 10^{-8} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. La diffusivité dans la direction radiale est égale à **une fois à une fois et demie** la diffusivité dans la direction tangentielle. Enfin, la diffusivité dans la direction longitudinale est **100 à 200 fois** supérieure à la diffusivité dans la direction radiale.

Nous connaissons à présent de manière indirecte les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans la phase gazeuse des échantillons de la deuxième famille. Nous allons dans ce qui suit utiliser ces valeurs lors de l'interprétation des mesures effectuées au niveau du vaporimètre et de la double enceinte climatique à température et humidité contrôlées.

III.3.2. Résultats obtenus à l'aide du vaporimètre

Dans le dispositif désigné sous le nom de vaporimètre, la variation de la masse du vaporimètre en fonction du temps permet d'évaluer le flux d'eau transféré en régime stationnaire entre les deux zones situées de part et d'autre de l'échantillon de bois.

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.14 la courbe donnant la perte de masse du vaporimètre (égale à celle de l'eau) en fonction du temps pour l'échantillon de hêtre HL11.

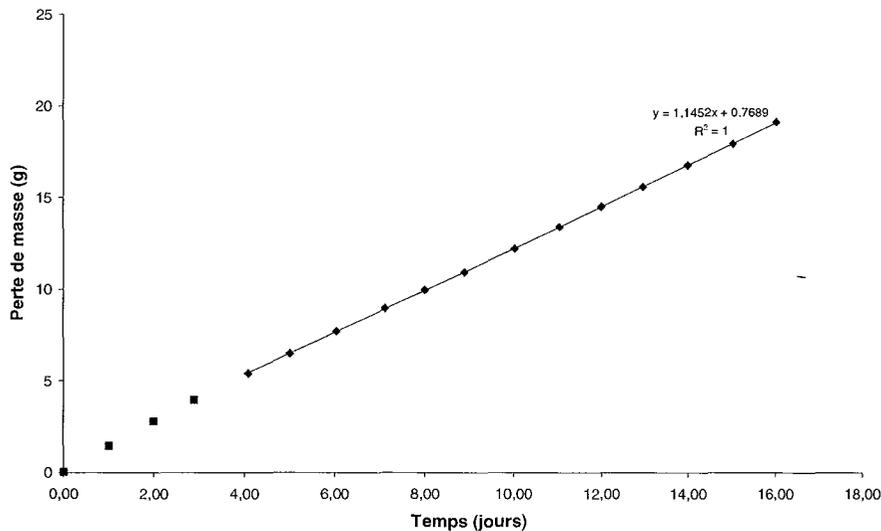


Figure III.14 : Variation de la perte de masse d'eau en fonction du temps pour l'échantillon HL11

La variation observée est bien linéaire ce qui confirme que le flux d'eau transféré au travers de l'échantillon est constant. Des résultats similaires sont obtenus pour les autres échantillons et les courbes correspondantes sont données en **Annexe 5**.

A partir des débits d'eau transférés, il est possible d'évaluer les coefficients de diffusion D^* et D^{**} par l'intermédiaire des relations établies dans le chapitre II, soient :

$$D^* = \frac{\Phi e R T}{S P_s(T) M (H_{R1} - H_{R2})} \quad (\text{III.6})$$

$$D^{**} = \frac{\Phi e}{S \rho_0 (x_1^* - x_2^*)} \quad (\text{III.7})$$

Les expériences réalisées au niveau du vaporimètre sont conduites à une température de 35°C avec des atmosphères d'air humide telles que $H_{R1} = 0,75$ et $H_{R2} = 0,40$. Dans ces conditions, les humidités du bois à l'équilibre x_1^* et x_2^* sont telles que :

$$x_1^* = 0,140 \text{ et } x_2^* = 0,073$$

La pression de vapeur saturante de l'eau à 35°C est estimée à l'aide de la relation de Clausius-Clapeyron :

$$P_s = \exp\left(25,5058 - \frac{5204,9}{T}\right) \quad (\text{III.8})$$

Nous trouvons ainsi une valeur pour P_s de 5514 Pa à $T = 35^\circ\text{C} = 308,15\text{K}$.

Pour chaque échantillon, la masse volumique anhydre ρ_0 est obtenue à partir de la masse anhydre et des dimensions géométriques des échantillons.

Les valeurs des coefficients de diffusion D^* et D^{**} pour les échantillons de hêtre et d'épicéa sont données dans les tableaux III.15 et III.16.

Tableau III.16 : Valeurs des diffusivités D^* et D^{} déduites des mesures effectuées avec le vaporimètre pour les échantillons de hêtre**

Echantillons	e (mm)	S (mm ²)	ρ_0 (kg.m ⁻³)	ϕ (kg.s ⁻¹)	D^* (m ² .s ⁻¹)	D^{**} (m ² .s ⁻¹)
H1L	15,9	4071,3	695,7	$1,54 \cdot 10^{-8}$	$4,47 \cdot 10^{-6}$	$1,30 \cdot 10^{-9}$
HL11	19,0	4043,2	786,1	$1,33 \cdot 10^{-8}$	$4,61 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-9}$
HL21	9,2	3959,2	746,0	$2,40 \cdot 10^{-8}$	$4,10 \cdot 10^{-6}$	$1,12 \cdot 10^{-9}$
H7T	12,6	4128,1	736,0	$4,29 \cdot 10^{-10}$	$9,67 \cdot 10^{-8}$	$2,66 \cdot 10^{-11}$
H8T	13,9	4099,4	763,5	$5,87 \cdot 10^{-10}$	$1,47 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-11}$
HT21	11,5	4099,4	741,5	$6,22 \cdot 10^{-10}$	$1,29 \cdot 10^{-7}$	$3,51 \cdot 10^{-11}$
H11R	14,1	3956,1	743,9	$1,03 \cdot 10^{-9}$	$2,70 \cdot 10^{-7}$	$7,34 \cdot 10^{-11}$
H13R	15,0	4095,9	732,8	$1,26 \cdot 10^{-9}$	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$9,37 \cdot 10^{-11}$
HR22	11,9	3845,3	785,0	$1,74 \cdot 10^{-9}$	$3,99 \cdot 10^{-7}$	$1,03 \cdot 10^{-10}$

Tableau III.17 : Valeurs des diffusivités D^* et D^{} déduites des mesures effectuées avec le vaporimètre pour les échantillons d'épicéa**

Echantillons	e (mm)	S (mm ²)	ρ_0 (kg.m ⁻³)	ϕ (kg.s ⁻¹)	D^* (m ² .s ⁻¹)	D^{**} (m ² .s ⁻¹)
3338B	29,4	3903,4	481,2	$1,54 \cdot 10^{-8}$	$8,54 \cdot 10^{-6}$	$3,60 \cdot 10^{-9}$
3352B	29,0	3820,6	474,1	$1,71 \cdot 10^{-8}$	$9,58 \cdot 10^{-6}$	$4,10 \cdot 10^{-9}$
ET4	9,9	4015,0	540,6	$1,84 \cdot 10^{-9}$	$3,34 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-10}$
ET6	9,85	4015,0	487,8	$1,42 \cdot 10^{-9}$	$2,57 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-10}$
ET8	9,9	4015,0	452,4	$1,51 \cdot 10^{-9}$	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$
ER6	9,85	3958,4	493,0	$2,03 \cdot 10^{-9}$	$3,74 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-10}$
ER7	9,85	3901,9	513,2	$1,74 \cdot 10^{-9}$	$3,23 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-10}$

Si nous comparons les valeurs des coefficients de diffusion D^* mesurées à l'aide du vaporimètre aux valeurs des coefficients de diffusion de l'eau en phase vapeur, nous constatons que les diffusivités dans la direction longitudinale sont du même ordre de grandeur. En revanche, dans les directions radiales et tangentielles, les coefficients de diffusion D^* sont sensiblement supérieurs à ceux obtenus pour la vapeur d'eau en phase gazeuse. Ceci est vrai non seulement pour les échantillons de hêtre mais aussi pour ceux d'épicéa. Il est donc possible en se donnant les valeurs de D_V d'estimer le coefficient de diffusion de l'eau sous forme adsorbée en utilisant la relation :

$$D_A = \frac{\Phi e - D_V S P_s(T) M (H_{R1} - H_{R2}) / RT}{\rho_0 S (x_1^* - x_2^*)} \quad (\text{III.9})$$

En tenant compte des relations (III.6) et (III.7), la relation donnant le coefficient de diffusion de l'eau en phase adsorbée peut être évaluée à partir des coefficients D_V , D^* et D^{**} par la relation suivante :

$$D_A = \left(1 - \frac{D_V}{D^*}\right) D^{**} \quad (\text{III.10})$$

Les valeurs des coefficients de diffusion D_V , D_A , D^* et D^{**} pour les échantillons de hêtre et d'épicéa déduites des mesures effectuées sur la cellule de Wicke et Kallenbach et le vaporimètre sont données dans le tableau III.17.

Tableau III.17 : Valeurs des coefficients de diffusion obtenus pour les échantillons de hêtre et d'épicéa mis en oeuvre dans la cellule de Wicke et Kallenbach et le vaporimètre

Echantillons	D^* ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	D^{**} ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	D_V ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	D_A ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	$\frac{\Phi e - D_V}{\Phi D^*}$
HL11	$4,61 \cdot 10^{-6}$	$1,19 \cdot 10^{-9}$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-10}$	0,716
H7T	$9,67 \cdot 10^{-8}$	$2,66 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$1,64 \cdot 10^{-11}$	0,383
H8T	$1,47 \cdot 10^{-7}$	$3,89 \cdot 10^{-11}$	$3,7 \cdot 10^{-8}$	$2,91 \cdot 10^{-11}$	0,252
H11R	$2,70 \cdot 10^{-7}$	$7,34 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$6,25 \cdot 10^{-11}$	0,148
H13R	$3,40 \cdot 10^{-7}$	$9,37 \cdot 10^{-11}$	$4,0 \cdot 10^{-8}$	$8,27 \cdot 10^{-11}$	0,112
3352B	$9,58 \cdot 10^{-6}$	$4, \cdot 10 \cdot 10^{-9}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-9}$	0,386
ET4	$3,34 \cdot 10^{-7}$	$1,25 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,19 \cdot 10^{-10}$	0,051
ET6	$2,57 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,00 \cdot 10^{-10}$	0,066
ET8	$2,75 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$1,15 \cdot 10^{-10}$	0,062
ER6	$3,74 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,48 \cdot 10^{-10}$	0,035
ER7	$3,23 \cdot 10^{-7}$	$1,28 \cdot 10^{-10}$	$1,3 \cdot 10^{-8}$	$1,23 \cdot 10^{-10}$	0,040

Dans le tableau III.17 est également reportée la fraction du débit massique d'eau transférée par diffusion en phase gazeuse. Cette fraction relativement élevée dans la direction longitudinale du hêtre diminue dans les directions tangentielles et radiales. De plus, les fractions correspondantes pour les échantillons d'épicéa sont sensiblement plus faibles que celles obtenues dans le cas du hêtre. Ainsi, dans les directions tangentielles et radiales des échantillons d'épicéa, l'essentiel du transport de l'eau se fait sous forme d'eau liée.

Nous allons dans ce qui suit voir dans quelle mesure les coefficients de diffusion déduits dans les deux premiers dispositifs permettent d'interpréter les mesures d'absorption et de désorption réalisées dans le troisième dispositif.

III.3.3. Résultats obtenus à l'aide de la double enceinte climatique

Le principe de la mesure est le suivi en fonction du temps de la masse d'un échantillon en équilibre thermique et thermodynamique dans une première enceinte après son transfert dans une deuxième enceinte climatique où la phase gazeuse est à la même température (35°C) mais où l'humidité est supérieure (absorption) ou inférieure (désorption). Les humidités relatives de l'air dans les deux enceintes sont respectivement de 0,40 et de 0,75.

a) Résultats obtenus lors des mesures d'absorption

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.15 la courbe d'absorption relative à l'échantillon H7T en fonction de la racine carrée du temps. Des courbes similaires obtenues pour les autres échantillons sont données dans l'**Annexe 6**.

Toutes les courbes obtenues présentent une singularité après un certain temps d'absorption. Ces variations sont dues à une modification des conditions hygrométriques de l'enceinte. Il faut noter que les expériences d'absorption comme de désorption ont une durée supérieure à 37 jours et que durant toute cette période, il est nécessaire de maintenir constantes les conditions de fonctionnement de l'enceinte dans laquelle est placé l'échantillon après le temps initial.

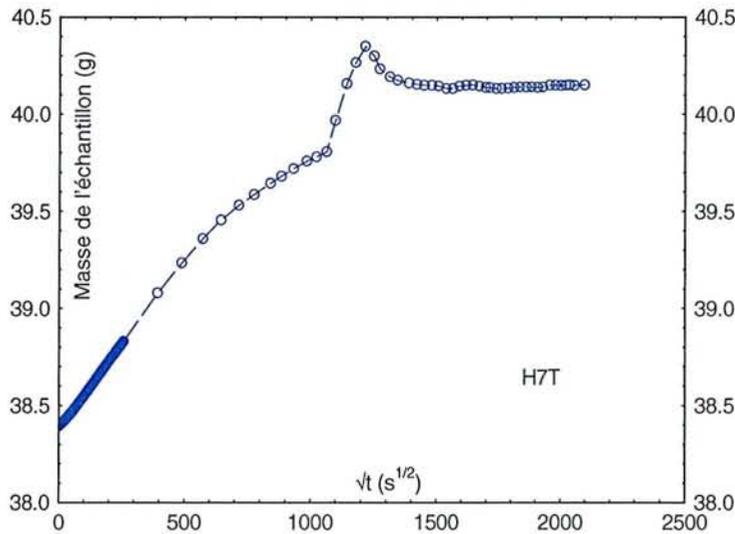


Figure III.15 : Variation de la masse de l'échantillon H7T en fonction de la racine carrée du temps pour une expérience d'absorption

Toutefois, ces courbes d'absorption peuvent être exploitées en ne considérant que la partie de la courbe obtenue avant la perturbation. En effet, si nous considérons la grandeur $E' = \frac{m - m_i}{m_f - m_i}$, la modélisation de l'absorption en négligeant les résistances externes conduit à la relation :

$$E' = 1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D^{**} t}{e^2}\right] \quad (\text{III.11})$$

Pour les petites valeurs du temps, l'expression précédente peut être approximée par la relation:

$$E' = 4 \sqrt{\frac{D^{**}}{\pi e^2}} t^{1/2} \quad (\text{III.12})$$

La relation (III.12) montre que le rapport E' doit varier linéairement en fonction de \sqrt{t} . Ceci est relativement bien observé sur les courbes expérimentales donnant la masse de l'échantillon en fonction de \sqrt{t} .

Toutefois, le calcul de E' dépend de la valeur limite de la masse de l'échantillon. Nous pouvons choisir la valeur finale obtenue à l'issue de l'essai (m_{f1}) ou une valeur extrapolée à partir de la courbe obtenue avant la perturbation (m_{f2}). Pour ces deux valeurs de la masse finale, il est donc possible à partir de la pente de la courbe expérimentale d'évaluer deux coefficients de diffusion, respectivement D_1^{**} et D_2^{**} .

Les valeurs des masses initiales et finales et des coefficients de diffusion pour l'ensemble des échantillons de hêtre et d'épicéa sont données dans le tableau III.18.

Tableau III.18 : Valeurs des coefficients de diffusion D^{} déduites des essais d'absorption**

Echantillons	Pente ($\text{g}\cdot\text{s}^{-1/2}$)	m_i (g)	m_{f1} (g)	m_{f2} (g)	D_1^{**} ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	D_2^{**} ($\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)
H7T	$1,65\cdot 10^{-3}$	38,40	40,14	40,00	$2,8\cdot 10^{-11}$	$3,3\cdot 10^{-11}$
H8T	$2,08\cdot 10^{-3}$	43,44	45,20	45,30	$5,3\cdot 10^{-11}$	$4,7\cdot 10^{-11}$
HT21	$1,88\cdot 10^{-3}$	34,87	36,41	36,53	$3,9\cdot 10^{-11}$	$3,3\cdot 10^{-11}$
H11R	$2,71\cdot 10^{-3}$	41,49	43,20	43,40	$9,8\cdot 10^{-11}$	$7,9\cdot 10^{-11}$
H13R	$3,10\cdot 10^{-3}$	45,02	47,05	47,38	$1,0\cdot 10^{-10}$	$7,6\cdot 10^{-11}$
HR22	$2,57\cdot 10^{-3}$	35,79	37,23	37,50	$8,9\cdot 10^{-11}$	$6,3\cdot 10^{-11}$
H1L	$6,97\cdot 10^{-3}$	43,04	47,60	48,18	$1,2\cdot 10^{-10}$	$9,1\cdot 10^{-11}$
HL11	$7,79\cdot 10^{-3}$	60,03	62,73	63,16	$5,9\cdot 10^{-10}$	$4,4\cdot 10^{-10}$
HL21	$7,03\cdot 10^{-3}$	29,97	31,89	32,07	$2,2\cdot 10^{-10}$	$1,9\cdot 10^{-10}$
ET4	$2,01\cdot 10^{-3}$	21,37	22,33	22,47	$8,4\cdot 10^{-11}$	$6,4\cdot 10^{-11}$
ET6	$2,11\cdot 10^{-3}$	19,16	20,03	20,17	$1,1\cdot 10^{-10}$	$8,3\cdot 10^{-11}$
ET8	$1,97\cdot 10^{-3}$	17,86	18,64	18,76	$1,2\cdot 10^{-10}$	$9,2\cdot 10^{-11}$
ER4	$1,98\cdot 10^{-3}$	19,66	20,50	20,64	$1,1\cdot 10^{-10}$	$8,0\cdot 10^{-11}$
ER6	$2,01\cdot 10^{-3}$	19,07	19,99	20,07	$9,1\cdot 10^{-11}$	$7,7\cdot 10^{-11}$
ER7	$1,86\cdot 10^{-3}$	19,58	20,53	20,61	$7,3\cdot 10^{-11}$	$6,2\cdot 10^{-11}$
3338B	$11,3\cdot 10^{-3}$	55,01	58,00	58,00	$2,4\cdot 10^{-9}$	$2,4\cdot 10^{-9}$
3352B	$10,2\cdot 10^{-3}$	52,17	56,40	57,33	$9,5\cdot 10^{-10}$	$6,4\cdot 10^{-10}$
EL6	$5,12\cdot 10^{-3}$	20,62	21,50	21,64	$8,8\cdot 10^{-10}$	$6,5\cdot 10^{-10}$
EL39	$4,71\cdot 10^{-3}$	18,59	19,43	19,61	$8,1\cdot 10^{-10}$	$5,5\cdot 10^{-10}$

Les valeurs de D^{**} obtenues pour les deux modes d'exploitation des courbes d'absorption restent relativement proches, sauf pour quelques échantillons pour lesquels les masses m_{f1} et m_{f2} sont sensiblement différentes.

b) Résultats obtenus à l'aide des courbes de désorption

A titre d'exemple, nous portons sur la figure III.16 la masse de l'échantillon de hêtre H7T en fonction de la racine carrée du temps. Des courbes similaires obtenues pour les autres échantillons sont données dans l'Annexe 6.

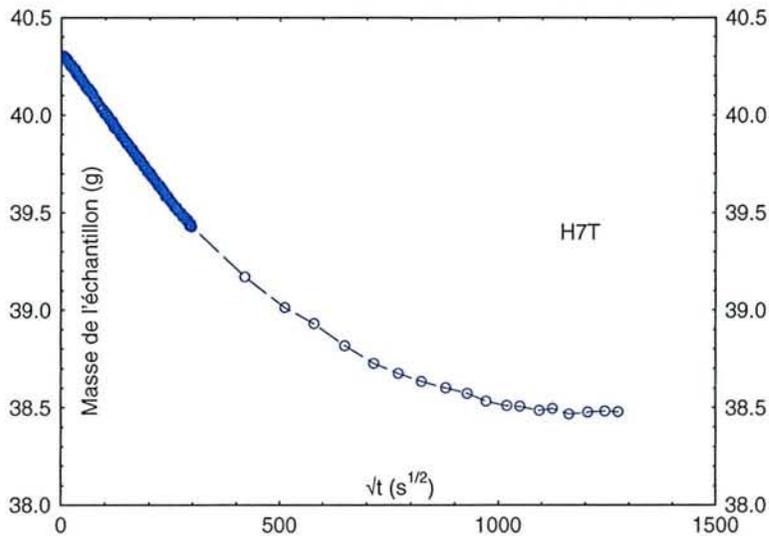


Figure III.16 : Variation de la masse de l'échantillon H7T en fonction de la racine carrée du temps pour une expérience de désorption

Contrairement aux essais d'absorption, il n'y a pas eu en apparence de modification des conditions hygrométriques de l'enceinte lors des essais de désorption.

Pour exploiter ces courbes, nous pouvons tout d'abord utiliser la variation de la grandeur

$E = \frac{m_f - m}{m_f - m_i}$ en fonction du temps. Cette grandeur varie entre 1 et 0. La modélisation de la

désorption en négligeant les résistances externes, conduit à la relation :

$$E = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left[-(2n+1)^2 \frac{\pi^2 D^{**} t}{e^2}\right] \quad (\text{III.13})$$

Pour les petites valeurs du temps, l'expression précédente peut être approximée par la relation:

$$1 - E = 4 \sqrt{\frac{D^{**}}{\pi e^2}} t^{1/2} \quad (\text{III.14})$$

La relation (III.14) montre que $1 - E$ varie linéairement en fonction de \sqrt{t} . Ceci est relativement bien observée sur les courbes expérimentales donnant la masse de l'échantillon.

A partir de la pente de cette variation linéaire et des valeurs des masses initiales et finales des échantillons, il est possible d'évaluer le coefficient de diffusion D_3^{**} de l'eau au sein de l'échantillon.

Les valeurs des masses initiales et finales et des coefficients de diffusion pour l'ensemble des échantillons de hêtre et d'épicéa sont données dans le tableau III.19.

Tableau III.19 : Valeurs des coefficients de diffusion D^{} déduites des essais de désorption**

Echantillons	Pente ($g.s^{-1}$)	m_i (g)	m_f (g)	D_3^{**} ($m^2.s^{-1}$)	$\bar{E}(0)$	D_4^{**} ($m^2.s^{-1}$)
H7T	$2,94.10^{-3}$	40,30	38,48	$8,13.10^{-11}$	216069	$6,12.10^{-11}$
H8T	$3,28.10^{-3}$	45,45	43,50	$1,07.10^{-10}$	202770	$7,94.10^{-11}$
HT21	$2,95.10^{-3}$	36,63	34,78	$6,60.10^{-11}$	202941	$5,43.10^{-11}$
H11R	$3,87.10^{-3}$	43,51	41,46	$1,39.10^{-10}$	143250	$1,16.10^{-10}$
H13R	$5,09.10^{-3}$	47,41	44,88	$1,79.10^{-10}$	135141	$1,39.10^{-10}$
HR22	$4,75.10^{-3}$	37,59	35,66	$1,68.10^{-10}$	94316	$1,25.10^{-10}$
HL11	$13,80.10^{-3}$	63,38	59,80	$1,05.10^{-9}$	42070	$7,15.10^{-10}$
ET4	$3,33.10^{-3}$	22,60	21,34	$1,34.10^{-10}$	93967	$8,69.10^{-11}$
ET6	$3,45.10^{-3}$	20,30	19,12	$1,63.10^{-10}$	86420	$9,36.10^{-11}$
ET8	$2,92.10^{-3}$	18,83	17,85	$1,71.10^{-10}$	73563	$1,11.10^{-10}$
ER4	$2,90.10^{-3}$	20,69	19,67	$1,59.10^{-10}$	71398	$1,17.10^{-10}$
ER6	$3,16.10^{-3}$	20,13	19,08	$1,73.10^{-10}$	77344	$1,05.10^{-10}$
ER7	$3,03.10^{-3}$	20,66	19,57	$1,47.10^{-10}$	79742	$1,01.10^{-10}$
3352B	$16,97.10^{-3}$	57,09	52,11	$1,92.10^{-9}$	60185	$1,16.10^{-9}$
EL6	$7,35.10^{-3}$	21,66	20,57	$1,18.10^{-9}$	41829	$2,63.10^{-10}$
EL39	$7,67.10^{-3}$	19,67	18,57	$1,26.10^{-9}$	45778	$2,41.10^{-10}$

La modélisation de la désorption en résolvant l'équation de bilan dans le domaine transformé de Laplace permet de montrer que le moment d'ordre zéro de la fonction $E(t)$ égal à l'intégrale située sous la courbe donnant $E(t)$ en fonction du temps (voir **Annexe 2**) est tel que :

$$\bar{E}(0) = \frac{e^2}{12D^{**}} \quad (\text{III.15})$$

Par suite, il est possible à partir de l'évaluation de la surface des courbes donnant $E(t)$ en fonction du temps d'obtenir une autre valeur du coefficient de diffusion D^{**} , soit D_4^{**} .

Les valeurs de $\bar{E}(0)$ et de D_4^{**} pour les échantillons de hêtre et d'épicéa sont données dans le tableau III.19.

Les valeurs de D_3^{**} et D_4^{**} sont certes du même ordre de grandeur mais nous pouvons constater une certaine différence. Le calcul de $\bar{E}(0)$ par la méthode des trapèzes est certes moins précis que celle de la détermination de la pente de la partie linéaire de $E(t)$. Toutefois, elle prend en compte l'ensemble de la courbe de désorption et est donc a priori plus représentative de l'ensemble de la désorption. En tout état de cause, la différence entre les

valeurs trouvées nous permet d'affirmer que le modèle postulé n'est peut-être pas représentatif du transport de l'eau dans le bois lors des expériences de désorption et par suite d'absorption, les phénomènes d'absorption -désorption étant en principe réversibles.

c) Comparaison des coefficients de diffusion D^{} obtenus dans le vaporimètre aux coefficients de diffusion D_1^{**} , D_2^{**} , D_3^{**} , D_4^{**} déduits des expériences dans la double enceinte climatique**

Le tableau III.20 rappelle les valeurs des différents coefficients de diffusion D^{**} mesurés sur certains échantillons de hêtre et d'épicéa.

Tableau III.20 : Valeurs des diffusivités D^{} obtenues sur les échantillons de hêtre et d'épicéa mesurées dans les deuxième et troisième dispositifs**

Echantillons	e (mm)	D^{**} (vaporimètre)	D_1^{**} ($m^2.s^{-1}$)	D_2^{**} ($m^2.s^{-1}$)	D_3^{**} ($m^2.s^{-1}$)	D_4^{**} ($m^2.s^{-1}$)
H7T	12,6	$2,7.10^{-11}$	$2,8.10^{-11}$	$3,3.10^{-11}$	$8,1.10^{-11}$	$6,1.10^{-11}$
H8T	13,9	$3,9.10^{-11}$	$5,3.10^{-11}$	$4,7.10^{-11}$	$1,1.10^{-10}$	$7,9.10^{-11}$
HT21	11,5	$3,5.10^{-11}$	$3,9.10^{-11}$	$3,3.10^{-11}$	$6,6.10^{-11}$	$5,4.10^{-11}$
H11R	14,1	$7,3.10^{-11}$	$9,8.10^{-11}$	$7,9.10^{-11}$	$1,4.10^{-10}$	$11,6.10^{-11}$
H13R	15,0	$9,4.10^{-11}$	$1,0.10^{-10}$	$7,6.10^{-11}$	$1,8.10^{-10}$	$13,9.10^{-11}$
HR22	11,9	$10,3.10^{-11}$	$8,9.10^{-11}$	$6,3.10^{-11}$	$1,7.10^{-10}$	$12,5.10^{-11}$
HL11	19,0	$1,30.10^{-9}$	$5,9.10^{-10}$	$4,4.10^{-10}$	$1,1.10^{-9}$	$7,2.10^{-10}$
ET4	9,9	$1,3.10^{-10}$	$8,4.10^{-11}$	$6,4.10^{-11}$	$1,3.10^{-10}$	$8,7.10^{-11}$
ET6	9,85	$1,1.10^{-10}$	$1,1.10^{-10}$	$8,3.10^{-11}$	$1,6.10^{-10}$	$9,4.10^{-11}$
ET8	9,9	$1,2.10^{-10}$	$1,2.10^{-10}$	$9,2.10^{-11}$	$1,7.10^{-10}$	$11,1.10^{-11}$
ER4	10,0	X	$1,1.10^{-10}$	$8,0.10^{-11}$	$1,6.10^{-10}$	$11,7.10^{-11}$
ER6	9,85	$1,5.10^{-10}$	$9,1.10^{-11}$	$7,7.10^{-11}$	$1,7.10^{-10}$	$10,5.10^{-11}$
ER7	9,85	$1,3.10^{-10}$	$7,3.10^{-11}$	$6,2.10^{-11}$	$1,5.10^{-10}$	$10,1.10^{-11}$
3352B	29,0	$4,1.10^{-9}$	$9,5.10^{-10}$	$6,4.10^{-10}$	$1,9.10^{-9}$	$1,2.10^{-9}$
EL6	11,5	X	$8,8.10^{-10}$	$6,5.10^{-10}$	$1,2.10^{-9}$	$2,6.10^{-10}$
EL39	11,5	X	$8,1.10^{-10}$	$5,5.10^{-10}$	$1,3.10^{-9}$	$2,4.10^{-10}$

L'analyse du tableau III.20 montre clairement que les coefficients de diffusion obtenus à l'aide des courbes d'absorption sont sensiblement inférieurs à ceux obtenus à l'aide des courbes de désorption. Rappelons que D_1^{**} , D_2^{**} et D_3^{**} sont obtenus avec le même type de détermination (relation linéaire entre E ou $(1 - E)$ en fonction de \sqrt{t}). On aurait du en principe trouver des valeurs de coefficients de diffusion identiques aux erreurs expérimentales près.

De plus, dans la mesure où l'écart entre D_3^{**} et D_4^{**} est significatif, nous avons cherché à comparer les courbes expérimentales de désorption aux courbes calculées par la relation (III.13) où la valeur du coefficient de diffusion est prise égale à la valeur D_3^{**} de l'échantillon considéré. Les figures III.17 et III.18 résument cette comparaison pour les échantillons HR22 et ET6.

Dans la première partie des courbes de désorption (E compris entre 1 et 0,5), l'accord entre les courbes expérimentales et calculées est parfait, ce qui est logique puisqu'il s'agit de la méthode choisie pour atteindre le coefficient de diffusion D_3^{**} .

En revanche, pour les valeurs de E inférieures à 0,5, la courbe expérimentale est située au-dessus de la courbe calculée. La surface expérimentale est donc supérieure à la surface théorique calculée avec D_3^{**} . En d'autres termes, le coefficient de diffusion D^{**} en désorption et également en absorption ne peut être supposé constant. En absorption, la méthode choisie pour estimer D_1^{**} (ou D_2^{**}) correspond à un domaine d'humidité du bois qui est inférieur à celui relatif pour la détermination de D_3^{**} .

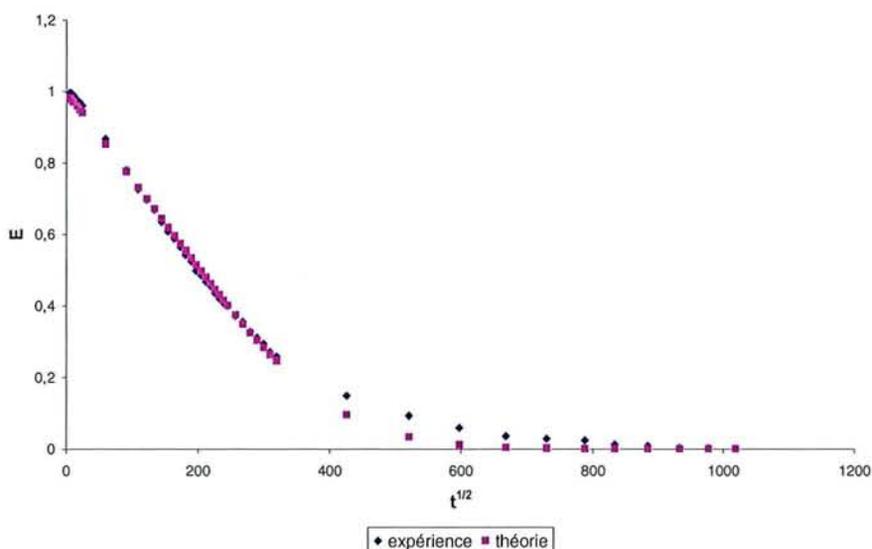


Figure III.17 : Comparaison des courbes de désorption calculées et expérimentales de l'échantillon HR22

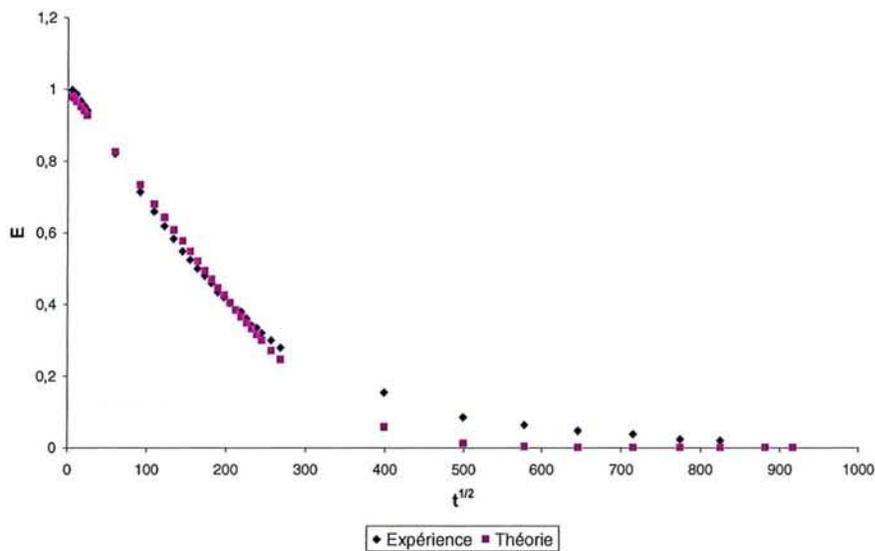


Figure III.18 : Comparaison des courbes de désorption calculées et expérimentales pour l'échantillon ET6

Les valeurs de D_1^{**} et D_2^{**} inférieures à D_3^{**} confirment que le coefficient de diffusion D^{**} ne peut pas être supposé constant et qu'il croît avec l'humidité absolue du bois. Cette variation peut permettre également d'expliquer pourquoi D_4^{**} est plus petit que D_3^{**} .

La variation des coefficients de diffusion D^{**} avec l'humidité du bois peut donc expliquer qualitativement (voire quantitativement) les différences observées entre les courbes d'absorption et de désorption.

Toutefois, si nous comparons les valeurs des coefficients de diffusion D^{**} déduits du troisième dispositif à celles obtenues à l'aide du vaporimètre, nous n'aboutissons pas à des valeurs intermédiaires aux valeurs précédentes. Les valeurs peuvent être inférieures mais aussi supérieures, ce qui peut surprendre étant donnée que l'humidité du bois varie au sein de l'échantillon entre les mêmes valeurs extrêmes que dans le cas des mesures d'absorption et de désorption. En revanche, si nous considérons les valeurs du coefficient de diffusion en phase adsorbée (soit D_A), elles sont toujours inférieures aux différentes valeurs de D^{**} . Ceci est bien vérifié dans le cas des échantillons de hêtre. Pour les échantillons d'épicéa, à l'exception de la direction longitudinale, les valeurs de D_A sont comprises dans l'intervalle des valeurs obtenues par les essais d'absorption et de désorption et donc voisines de celles obtenues à l'aide du vaporimètre.

Les différences observées entre les échantillons de hêtre et d'épicéa sont dues à l'influence du transport diffusionnel en phase gazeuse qui intervient dans toutes les directions dans le cas du

hêtre alors que son influence est limitée à la direction longitudinale dans le cas des échantillons d'épicéa.

Ainsi, dans le cas des échantillons de hêtre, l'équation de bilan de matière qui devrait être résolue est telle que :

$$D_V \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial y^2} + D_A \rho_0 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + \rho_0 \frac{\partial x}{\partial t} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Dans le cas où l'eau en phase gazeuse et en phase adsorbée sont en équilibre, l'équation à associer à l'équation (III.16) est :

$$x = f(\rho_e, T) \quad (\text{III.17})$$

Dans le cas où l'eau en phase gazeuse n'est pas en équilibre avec l'eau en phase adsorbée, l'équation à associer à l'équation (III.16) est par exemple :

$$D_A \rho_0 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \rho_0 \frac{\partial x}{\partial t} + ka (f(\rho_e, T) - x) = 0 \quad (\text{III.18})$$

La résolution mathématique des équations (III.16) et (III.17) et (III.16) et (III.18) ne peut être que numérique et ne disposant pas actuellement des outils informatiques appropriés, nous avons laissé à plus tard cette approche.

A ce stade, dans le cas particulier de l'échantillon de hêtre HL11 pour lequel D_V est 10000 fois supérieur à D_A , nous pouvons considérer lors des essais d'absorption et de désorption que la diffusion en phase gazeuse est très rapide et que la valeur de ρ_e est constante et égale à ρ_{ef} . La résolution numérique est celle effectuée en **Annexe 2**.

La surface située sous la courbe donnant $E(t)$ en fonction du temps est telle que :

$$\bar{E}(0) = \frac{\rho_0}{ka} \left[1 - \frac{\text{th} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2\sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}}}} \right] \quad (\text{III.19})$$

Pour l'échantillon de hêtre HL11, nous avons :

$$\bar{E}(0) = 42070 \text{ s}$$

$$\rho_0 = 786,1 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$e = 19.10^{-3} \text{ m}$$

$$D_A = 3,38.10^{-10} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$$

La résolution de l'équation (III.19) par itération conduit à :

$$\frac{ka}{\rho_0} = 1,057.10^{-5} \text{ s}^{-1}$$

L'inverse de $\frac{ka}{\rho_0}$ représente un temps caractéristique de l'échange entre l'eau en phase vapeur et l'eau adsorbée, soit :

$$\tau_E = \frac{\rho_0}{ka} = 94607 \text{ s}$$

Ce temps caractéristique peut être comparé aux temps caractéristiques des transports diffusionnels en phase gazeuse et adsorbée, soient respectivement :

$$\tau_V = \frac{e^2}{D_V} = 109 \text{ s}$$

$$\tau_A = \frac{e^2}{D_A} = 1068047 \text{ s}$$

Le temps caractéristique de l'échange est nettement supérieur au temps diffusionnel en phase gazeuse mais son influence sur le transport diffusionnel en phase adsorbée ne peut être négligée.

En définitive, l'ensemble de nos mesures expérimentales nous permettent de proposer la méthodologie suivante pour la caractérisation du transport diffusionnel de l'eau dans une des directions orthotropiques du bois.

Pour un échantillon donné (épaisseur, direction) et une température fixée, nous déterminons :

- à l'aide du premier dispositif un coefficient de diffusion pour un soluté inerte
- en modifiant l'épaisseur de l'échantillon, nous pouvons prendre en compte les résistances externes et donc accéder à la valeur réelle du coefficient de diffusion de l'inerte en phase gazeuse
- en admettant que le coefficient de diffusion en phase gazeuse au sein de l'échantillon est proportionnel au coefficient de diffusion moléculaire, nous obtenons le coefficient de diffusion de l'eau en phase gazeuse, soit D_V
- à l'aide du deuxième dispositif, en tenant compte des transports de l'eau en phase gazeuse et en phase adsorbée, nous déduisons une valeur du coefficient de diffusion en phase adsorbée, soit D_A . Nous pouvons à ce stade comparer les flux en phase vapeur et en phase adsorbée. De plus, les expériences au vaporimètre doivent être réalisées avec des intervalles d'humidités d'air humide variables, permettant de couvrir, à une température fixée, les humidités relatives comprises entre 10 et 90% par exemple. L'objectif de ces mesures est d'examiner l'influence de l'humidité de l'échantillon sur la valeur du coefficient de diffusion D_A . L'influence de l'humidité sur la valeur de D_V peut être supposée négligeable.

- Connaissant D_V et D_A , la modélisation des expériences d'absorption (ou de désorption) est envisagée en admettant que l'équilibre thermodynamique est réalisé entre l'eau en phase gazeuse et l'eau adsorbée. La confrontation avec les courbes expérimentales permet de voir si cette hypothèse est réalisée ou non. Dans le cas contraire, l'introduction d'une cinétique de l'atteinte de l'équilibre doit être envisagée.

Cet ensemble méthodologique devra être pris en considération pour tout transport diffusionnel de soluté gazeux adsorbable dans un support microporeux où les flux diffusionnels en phase gazeuse et en phase adsorbée sont du même ordre de grandeur. Il est certain que le rapport des flux dépend fortement de la température, d'où la nécessité de conduire l'ensemble des expériences à une même température et d'examiner l'influence de la température sur les deux flux diffusionnels et la cinétique d'atteinte de l'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase vapeur et l'eau adsorbée.

Conclusions

Conclusions

L'objectif de la recherche était de préciser les transferts diffusionnels de l'eau dans le domaine hygroscopique du bois. Les mesures ont été réalisées sur des échantillons de hêtre et d'épicéa pour lesquels le transfert se fait uniquement dans une des trois directions orthotropiques du bois.

Dans le domaine hygroscopique, l'eau dans le bois se trouve à la fois sous forme gazeuse et sous forme liée (ou adsorbée).

Pour atteindre les propriétés diffusionnelles de transport de l'eau vapeur, les mesures ont été réalisées avec des solutés inertes au sein de l'échantillon dans une cellule de Wicke et Kallenbach évoluant en système fermé (pour les directions tangentielles et radiales) et en système ouvert en régime stationnaire (pour la direction longitudinale). A partir des valeurs du coefficient de diffusion apparent obtenu pour l'hélium, nous avons déduit celui de la vapeur d'eau en écrivant que le coefficient de diffusion apparent est proportionnel au coefficient de diffusion moléculaire du soluté dans le mélange binaire soluté + azote, le coefficient de proportionnalité ne dépendant que de la géométrie et de la morphologie de l'échantillon. Les coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans la direction longitudinale sont nettement supérieurs aux coefficients de diffusion dans les directions tangentielles et radiales. Les ordres de grandeur des coefficients de diffusion pour les échantillons de hêtre et d'épicéa sont similaires et les coefficients de diffusion dans la direction tangentielle sont pratiquement identiques.

Les mesures réalisées dans le vaporimètre permettent d'accéder aux coefficients de diffusion globaux D^* et D^{**} selon la force motrice considérée. Elles permettent également, connaissant le coefficient de diffusion de l'eau en phase gazeuse, d'obtenir une valeur du coefficient de diffusion de l'eau adsorbée, ainsi que la fraction du flux transféré en phase vapeur par rapport au flux global. Dans la direction longitudinale, pour les deux essences étudiées, le transport de l'eau en phase vapeur est loin d'être négligeable et il est plus important pour le hêtre que pour l'épicéa.

Dans les directions radiales et tangentielles, la fraction du flux en phase gazeuse est plus faible et elle devient négligeable dans le cas des échantillons d'épicéa. Pour le hêtre, elle peut encore

représenter 10 à 40% du flux global et elle est plus importante dans la direction tangentielle que dans la direction radiale.

Les mesures transitoires réalisées dans la double enceinte climatique montrent que la modélisation de l'absorption ou de la désorption avec un coefficient de diffusion global constant n'est pas satisfaisante. Il est nécessaire de prendre en compte une variation du coefficient de diffusion avec l'humidité du bois. Ainsi, le coefficient de diffusion D^{**} augmente avec l'humidité du bois. Pour valider cette influence, il nous apparaît désormais nécessaire de réaliser au niveau du vaporimètre des mesures pour différents intervalles d'humidités relatives de l'air comprises entre 10 et 90%. Le but de ces mesures est de valider ou non l'influence de l'humidité du bois sur la valeur du coefficient de diffusion de l'eau adsorbée D_A . En tenant compte de la loi ainsi obtenue, la modélisation des expériences d'absorption ou de désorption peut alors être effectuée en supposant que l'équilibre thermodynamique entre l'eau vapeur et l'eau adsorbée est réalisé. La confrontation des courbes calculées aux courbes expérimentales permettra de dire si l'hypothèse d'équilibre thermodynamique est justifiée ou non. Dans le cas contraire, il faudra introduire une cinétique d'atteinte de l'équilibre thermodynamique, la modélisation des courbes d'absorption ou de désorption permettant alors de préciser le paramètre cinétique caractéristique du non-équilibre thermodynamique.

L'ensemble de la méthodologie ainsi décrite est d'autant plus nécessaire que les flux diffusionnels en phase gazeuse et en phase adsorbée sont du même ordre de grandeur. Ces flux dépendent de la température et il serait donc nécessaire de valider la méthodologie à des températures plus élevées que celles étudiées et pour d'autres essences et composites à base de bois.

Enfin, la méthodologie pourrait également s'appliquer à d'autres supports microporeux utilisés classiquement comme les adsorbants et les catalyseurs qui sont mis en oeuvre pour des solutés gazeux adsorbables.

Telles sont les orientations que nous suggérons pour une poursuite des recherches dans le domaine de la caractérisation des transferts diffusionnels de matière dans les milieux poreux.

Nomenclature
Références bibliographiques
Liste des figures et tableaux

Nomenclature

- a** : surface d'échange par unité de volume entre la phase gazeuse et la phase solide (m^{-1})
- a_S** : surface spécifique du milieu (m^2)
- A** : constante d'Adzumi (-)
- B** : perméabilité du milieu poreux (m^2)
- B'** : perméabilité d'un matériau en tenant compte de la tortuosité (m^2)
- C** : concentration totale de la phase gazeuse (mol.m^{-3})
- C_e** : concentration de la vapeur d'eau (mol.m^{-3})
- C₁** : concentration d'hélium dans le compartiment 1 alimenté par de l'hélium (mol.m^{-3})
- C₂** : concentration d'hélium dans le compartiment 2 alimenté par de l'azote (mol.m^{-3})
- D*** : coefficient de diffusion eau vapeur-eau liée dont la force motrice est le gradient de concentration massique d'eau vapeur ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- D**** : coefficient de diffusion eau vapeur-eau liée dont la force motrice est le gradient de concentration massique d'eau liée ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- D_I** : coefficient de diffusion apparent du couple azote-hélium ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- D_V** : coefficient de diffusion apparent du couple azote-vapeur d'eau ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- \mathcal{D}_I** : coefficient de diffusion moléculaire hélium-azote ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- \mathcal{D}_V** : coefficient de diffusion moléculaire azote-vapeur d'eau ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- D_{kA}^e** : coefficient de diffusion apparent de Knudsen de la phase gazeuse ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- D_{V eff}** : coefficient de diffusion apparent en phase vapeur ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)
- e** : épaisseur du matériau (m)
- E_a** : énergie d'activation (J.mol^{-1})
- $\bar{E}(s)$** : transformée de Laplace de E(s)
- $\bar{E}(0)$** : moment d'ordre zéro de la fonction E
- f** : diffusivité réduite (-)

- $f(r)dr$** : fraction de volume occupée par les capillaires de rayon compris entre r et $r + dr$ (-)
- $f(x)$** : relation d'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase gazeuse et l'eau en phase adsorbée (-)
- F_V** : flux de la vapeur d'eau (mol.s^{-1})
- F_m** : flux de l'eau liée (mol.s^{-1})
- g** : conductance globale à l'écoulement ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
- g_e** : conductance d'un segment représentatif d'un pore ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
- g_P** : conductance caractéristique des ponctuations ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
- g_t** : conductance caractéristique des trachéides ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)
- H_R** : humidité relative de la phase gazeuse (-)
- k** : coefficient de transfert (m.s^{-1})
- K** : coefficient de transfert global (m.s^{-1})
- K_0, K_1** : coefficients dépendant de la structure poreuse (-)
- K'** : coefficient de proportionnalité (mol.s.m^{-3})
- K_n** : nombre de Knudsen (-)
- K_c** : facteur de Clausing (-)
- L** : longueur d'un capillaire (m)
- L'** : distance droite entre les extrémités d'un capillaire (m)
- L_t** : longueur des trachéides (m)
- L_P** : longueur des ponctuations (m)
- M** : masse molaire du fluide (g.m^{-3})
- m** : masse de l'échantillon à l'équilibre (kg)
- m_0** : masse sèche du bois (kg)
- N_A, N_B** : flux molaires des constituants A et B ($\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
- P** : pression totale (Pa)
- P_A** : pression partielle de la phase gazeuse (Pa)
- \bar{P}** : moyenne arithmétique de la pression P sur la distance Δy (Pa)
- ΔP** : différence de pression totale (Pa)
- ΔP_L** : différence de pression associée à un écoulement laminaire (Pa)

Nomenclature

ΔP_s : pertes de charges singulières (Pa)

P_e : pression partielle de l'eau vapeur (Pa)

$P_s(T)$: pression de vapeur saturante de l'eau liquide à la température T (Pa)

Q : débit volumique de fluide ($m^3 \cdot s^{-1}$)

Q^* : énergie thermique échangée ($J \cdot mol^{-1}$)

r : rayon d'un capillaire (m)

r_t : rayon des trachéïdes (m)

R' : rayon minimal des capillaires cylindriques (m)

R : constante universelle des gaz parfaits ($8,314 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$)

Re : nombre de Reynolds (-)

S : surface droite de l'échantillon (m^2)

t : temps (s)

T : température absolue (K)

T_e : température de l'eau (K)

u : vitesse moyenne du fluide ($m \cdot s^{-1}$)

V_1, V_2 : volumes des compartiments 1 et 2 (m^3)

X : paramètre de Comstock (-)

x : humidité absolue du bois (-)

x_{PSF} : humidité absolue du bois au point de saturation des fibres (-)

x_1^* : humidité du bois en équilibre hygroscopique avec la phase gazeuse dont l'humidité relative est H_{R1} (-)

y : coordonnée d'espace (m)

Lettres grecques

α : angle que fait le ménisque de liquide avec la surface latérale du capillaire (-)

β : coefficient de pertes d'énergie cinétique (-)

ϵ : porosité du bois (-)

Φ : débit massique d'eau vapeur transféré ($kg \cdot s^{-1}$)

Nomenclature

φ_A : flux diffusionnel en phase adsorbée (mol.s^{-1})

φ_E : flux d'échange entre la phase gazeuse et la phase adsorbée (mol.s^{-1})

φ_V : flux diffusionnel en phase gazeuse (mol.s^{-1})

λ : libre parcours moyen des molécules (m)

μ : viscosité du fluide (Pa.s)

μ' : potentiel chimique de l'eau liée (J.mol^{-1})

ρ_0 : masse volumique du bois anhydre (kg.m^{-3})

ρ_e : masse volumique de l'eau vapeur (kg.m^{-3})

σ : tension superficielle de l'eau vis-à-vis du gaz (N.m^{-1})

σ' : surface par unité de volume de fluide au contact du fluide (m^2)

$2\sigma^3$: constante de Kozeny (-)

Ω : section droite du milieu (m^2)

Indices

0 : instant initial

1 : dans le compartiment 1 (hélium)

2 : dans le compartiment 2 (azote)

E : à l'entrée du compartiment

S : à la sortie du compartiment

Références bibliographiques

A .

Abbasi M.H., Evans J.W., 1983, Diffusion of gases in porous solids : Monte Carlo simulations in the Knudsen and ordinary diffusion regimes, *AICHE Journal*, 29(4), 617-624.

Adler E., 1977, Lignin chemistry. Past, present and future, *Wood science and technology*, 11, 169-218.

Adzumi H., 1937, On the flow of gases through a porous wall, *Bull. Chem. Soc. Jpn*, 12, 304-312.

Agoua E., 2001, Mesure et prédiction des propriétés de transfert de masse dans le bois et les matériaux à base de bois, Thèse E.N.G.R.E.F..

Ahmet K., Dai G., Jazayeri S. et al, 1999, Experimental procedures for determining the equilibrium moisture content of twenty timber species, *Forest Product Journal*, 49(1), 88-93.

Anderson N.T., Mc Carthy J.L., 1963, Two parameters isotherm equation for fiber-water systems, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop* , 2, 103-105.

Avramidis S., Siau J.F., 1987, An investigation of the external and internal resistance to moisture diffusion in wood, *Wood Science and Technology*, 21, 249-256.

B .

Bramhall G., Wilson J.W., 1971a, Axial gas permeability of douglas-fir microsections dried by various techniques, *Wood Science*, 3 (4), 223-230.

Bramhall G., 1971b, The validity of Darcy's law in the axial penetration of wood, *Wood Science and Technology*, 5, 121-134.

Bramhall G., 1979a, Sorption diffusion in wood, *Wood Science*, 12, 3-13.

Bramhall G., 1979b, Mathematical model for lumber drying. I. Principles involved, *Wood Science*, 12(1), 14-21.

Brunauer S., Emmett P.H., Teller E.J., 1938, *J. Am. Chem. Soc.*, 60, 309-318.

Bramhall G., 1995, Diffusion and the drying of wood, *Wood Science and Technology*, 29(3), 209-215.

Burganos V.N., Sothirchos, 1987, Diffusion in pore networks : effective medium theory and smooth field approximation, *AICHE Journal*, 33, 1678-1689.

C.

Carman P.C., 1956, Flow of gases through porous media, Academic press, New-York, 182 pp.

Charlier K., 1997, Mesure des diffusivités de solutés inertes et organiques dans une mousse polyuréthane, D.E.A. Sciences du Bois.

Chen P.Y.S., Tang Y., 1991, Variation in longitudinal permeability of three U.S. hardwoods, *Forest Product Journal*, 41(11-12), 79-83.

Chen P.Y.S., Zhang G., Van Sambeek J.W., 1998, Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species, *Forest Product Journal*, 48(3), 87-90.

Choong E.T., 1963, Movement of moisture through a softwood in the hygroscopic range, *Forest Product Journal*, 13(11), 489-498.

Choong E.T., 1965, Diffusion coefficients of softwoods by steady-state and theoretical methods, *Forest Product Journal*, 15(1), 21-27.

Choong E.T., Skaar C., 1972, Diffusivity and surface emissivity in wood drying, *Wood Fiber*, 4(2), 80-86.

Choong E.T., Achmadi S., Tesoro F.O., 1988, Variables affecting the longitudinal flow of gas in hardwoods, in : Cellulose and wood - Chemistry and technology proceedings of the tenth cellulose conference, Ed. C. Schwerch, Syracuse, New-York, 1175-1196.

Comstock G.L., 1967, Longitudinal permeability of wood to gases and non-swelling liquids, *Forest Product Journal*, 17(10), 41-46.

Comstock G.L., Cote W.A. Jr., 1968, Factors affecting permeability and pit aspiration in coniferous sapwood, *Wood science and technology*, 2(4), 279-291.

Crank J., 1975, The mathematics of diffusion, 2nd edition, Clarendon press, Oxford, England, 414 pp.

D.

Dent R.W., 1977, A multilayer theory for gas sorption, I. Sorption of a single gas., *Textile research*, 47(2), 145-152.

E.

Erickson H.D., Schmidt R.N., 1969, Rupture of pit membranes during embedding procedure, *Wood Science and Technology*, 3, 194-202.

F.

Feng C., Stewart W.E., 1973, Practical models for isothermal diffusion and flow of gases in porous solids, *Ind. Eng. Chem.*, 12(2), 143-147.

Fujii T., Suzuki Y., Kuroda N., 1997, Borderd pit aspiration in the wood of *Cryptomeria japonica* in relation to air permeability, *IAWA Journal*, 18(1), 69-76.

Forest Products Laboratory, Forest service, U.S. Department of Agriculture, 1974, *Wood Handbook : wood as an engineering material*, Handbook n°72, Washington DC-USA.

H.

Hailwood A.J., Horrobin S., 1946, Absorption of water by polymers : analysis in terms of a simple model, *Trans. Faraday Society*, 42B, 84-92.

Haluk J.-P., 1994, Composition chimique du bois, dans « le Bois, matériau d'ingénierie », Ed. Ph. Jodin, ARBOLOR, 53-89.

Hartley I.D., Avramidis S., 1993, Analysis of the wood sorption isotherm using clustering theory, *Holzforschung*, 47, 163-167.

Hartley I.D., Kamke F.A., Peemoeller H., 1994, Absolute moisture content determination of aspen wood below the fiber saturation point using pulsed NMR, *Holzforschung*, 48, 474-479.

Hartley I.D., Avramidis S., Mackay A.L., 1996, H-NMR studies of water interactions in Sitka spruce and western hemlock : moisture content determination and second moments, *Wood science and technology*, 30, 141-148.

Haugaard J., Livbjerg H., 1998, Models of pore diffusion in porous catalysts, *Chemical Engineering Science*, 53(16), 2941-2948.

Hunter A.J., 1993, On movement of water through wood – The diffusion coefficient, *Wood Science and Technology*, 27, 401-408.

Hunter A.J., 1996, A complete theoretical isotherm for wood, based on capillary condensation, *Wood Science and Technology*, 30, 127-131.

I.

Isaacs C.P., Choong E.T., Fogg P.J., 1971, Permeability variation within a cottonwood tree, *Wood Science*, 3(4), 231-237.

J.

Jensen K.F., Reyes S., 1985, Estimation of effective transport coefficients in porous solids based on percolation concepts, *Chemical Engineering Science*, 40, 1723-1734.

Jones T.G., Walker J.C.F., Langrish T.A.G., 1995, Dissolved carbon dioxide gas diffusion in green *Nothofagus fusca* heartwood, *Wood Science and Technology*, 29, 171-176.

K.

Kang H.Y., Hart C.A., 1997, Temperature effect on diffusion coefficient in drying wood, *Wood and Fiber Science*, 29(4), 325-332.

Keller R., 1994, La constitution du bois, dans « le Bois, matériau d'ingénierie », Ed. Ph. Jodin, ARBOLOR, 13-52.

Kolin B., Stevanovic Janezic T., 1996, The effect of temperature, density and chemical composition upon the limit of hygroscopicity of wood, *Holzforschung*, 50, 263-268.

Koponen H., 1986, Transport processes in finnish birch, pine and spruce, Part I. Sorption isotherms and moisture diffusion coefficients, *Paperi ja puu, Papper och trä* 6-7.

Kumar S., 1979, Validity of Darcy flow equation for gas flow through wood in axial penetration, *Journal of timber development association of India*, 23(3), 17-41.

Kuroda N., Siau J.F., 1988, Evidence of nonlinear flow in softwoods from wood permeability measurements, *Wood and Fiber Science*, 20(1), 162-169.

L.

Lartigue C., Puiggali J.R., 1987, Caractéristiques des pins des Landes à la compréhension des phénomènes de séchage, Actes du 2^{ème} colloque Sciences et Industries du Bois, ARBOLOR, Nancy, 57-64.

Lignum, 1960, Union suisse en faveur du bois, Service de consultations, Zurich.

Liu J.Y., 1989, A new method for separating diffusion coefficient and surface emission coefficient, *Wood and Fiber Science*, 21(2), 133-141.

Liu J.Y., Simpson W.T., Inverse determination of diffusion coefficient for moisture diffusion in wood, Proceedings of 33RD ASME National heat transfer conference, Heat and Mass transfer in porous media, August 15-17, 1999, Albuquerque, New Mexico.

Lu J., Avramidis S., 1997, Non-darcian air flow in wood, Part 1. Specimen length effect, *Holzforschung*, 51(6), 577-583.

Lu J., Avramidis S., 1999a, Non-darcian air flow in wood, Part 2. Nonlinear flow, *Holzforschung*, 53(1), 77-84.

Lu J., Avramidis S., 1999b, Non-darcian air flow in wood, Part 3. Molecular slip flow, *Holzforschung*, 53(1), 85-92.

M.

Malmquist L., 1995, Sorption equilibrium in relation to the spatial distribution of molecules, *Holzforschung*, 49(6), 555-564.

Malmquist L., Söderström O., 1996, Sorption equilibrium in relation to the spatial distribution of molecules – Application to sorption of water by wood, *Holzforschung*, 50(5), 437-448.

Mason E.A., Malinauskas A.P., Evans III R.B., 1967, Flow and diffusion of gases in porous media, *The Journal of Chemical Physics*, 46(8), 3199-3216.

Matsumura J., Tsutsumi J., Oda K., 1995, Relationships of bordered pit aspiration occurring during to longitudinal gas permeability in Karamatsu (*Larix leptolepis*) woods natural- and freeze-dried, , 41(4), 433-439.

Milota M.R. et al., 1995, Gas permeability of plantation loblolly pine, 27, 34-40.

Mouchot N., 1998, Détermination des diffusivités d'un soluté inerte dans les trois directions orthotropiques du bois de hêtre-Influence de l'humidité du bois, D.E.A. Sciences du Bois, Université Henri Poincaré-Nancy I.

Mouchot N., Wehrer A., Bucur V., Zoulalian A., 2000, Détermination indirecte des coefficients de diffusion de la vapeur d'eau dans les directions tangentielle et radiale du bois de Hêtre, *Annals of Forest Science*, 57, 793-801.

Mouchot N., Zoulalian A., 2002, Longitudinal permeability and diffusivity of steam in beech determined with a Wicke et Kallenbach cell, *Holzforschung*, 56(3), 318-326.

N.

Na J.-S., 1994, Etude de la dégradation hydrolytique des joints bois-urée-formol : mise en évidence et caractérisations physico-chimiques, Thèse de l'I.N.P.L..

Nadler K.C., Choong E.T., Wetzel D.M., 1985, Mathematical modeling of the diffusion of water in wood during drying, *Wood and Fiber Science*, 17, 404-423.

Nakao T., 1998, Description of moisture dependence of diffusion coefficient by moisture diffusion equation considering Coulomb friction, *Holz als Roh- und Werkstoff*, 56, 266.

Nelson R.M. Jr., 1983, A model for sorption of water vapor by cellulosic materials, *Wood and Fiber Science*, 15(1), 8-22.

Nelson R.M. Jr., 1991, Heats of transfer and activation energy for bound water diffusion in wood, *Wood Science and Technology*, 25, 193-202.

P.

Panshin A.J., de Zeeuw C., 1980, Textbook of wood technology, fourth edition, MC Graw-Hill Book Co., New-York, NY, 722p.

Peralta P.N., Lea A.W.C., 1995, Unsteady-state diffusion of moisture in giant timber bamboo (*Phyllostachys bambusoides* Sieb & Zuch), *Wood and Fiber Science*, 27(4), 421-427.

Peralta P.N., 1995, Modeling wood moisture sorption hysteresis using the independent-domain theory, *Wood and Fiber Science*, 27(3), 250-257.

Perng W.R., 1980a, Studies on flow in wood. III. Comparison of theoretical flow rate and experimental flow rate in various sample lengths, *Mokuzai Gakkaishi*, 26(6), 388-393.

Perng W.R., 1980b, Studies on flow in wood. I. Permeability and axial structural variation, *Mokuzai Gakkaishi*, 26(3), 132-138.

Perré P., 1987, Measurements of softwoods' permeability to air : importance upon the drying model, *International communication heat mass transfer*, 14, 519-529.

Perré P., 1994, Le séchage du bois, dans « le Bois, matériau d'ingénierie », Ed. Ph. Jodin, ARBOLOR, 201-286.

Perré P., Zohoun S., Brandão A., 1996a, Détermination de la diffusivité massique en régime permanent : résultats d'une campagne de mesures sur différentes essences tempérées et tropicales, *Sciences et Industries du Bois – 4^{ème} colloque*, 11-12-13 Sept. 1996, Nancy, ARBOLOR.

Perré P., 1996b, Mesure en régime permanent de la diffusivité massique dans le domaine hygroscopique : présentation du système PVC – CHA, *Cahiers d'ARBOLOR*.

Perry R.H., 1984, Perry's chemical engineers' handbook-Sixth edition, International student edition.

Petty J.A., 1970, Permeability and structure of the wood of Sitka spruce, *Proc. Roy. Soc. London B*, 175, 149-166.

R.

Reid R.C., Prausnitz J.M., Sherwood T.K., 1977, "Chapter 11 : diffusion coefficients" in The properties of gases and liquids-Third edition, The edition McGraw-Hill, 544-601.

Resch H., Ecklund B.A., 1964, Permeability of wood exemplified by studies on redwood, Forest Product Journal, 14(5), 199-206.

Rosen H.N., 1976, Exponential dependency of the moisture diffusion coefficient on moisture content, Wood Science, 8(3), 174-179.

S.

Scheidegger A.E., 1974, The physics of flow through porous media, Univ. Toronto Press.

Schuffenecker L., Scacchi G., Proust B., Thermodynamique et cinétique chimiques, Collection Infochimie, Paris, 1991.

Siau J.F., Flow in wood, Syracuse University Press, Syracuse, 131 pp., 1971.

Siau J.F., Petty J.A., 1979, Corrections for capillaries used in permeability measurements in wood, Wood Science and Technology, 13, 179-185.

Siau J.F., Jin Z., 1980, Nonisothermal moisture movement in wood, Wood Science, 13(1), 11-13.

Siau J.F., Babiak M., 1983, Experiments on nonisothermal moisture movement in wood, Wood and Fiber Science, 15(1), 40-46.

Siau J.F., 1987, Nonisothermal moisture diffusion experiments analysed by four alternative equations, Wood Science and Technology, 19, 151-157.

Simpson W.T., Liu J.Y., 1991, Dependence of the water vapor diffusion coefficient of aspen (*Populus spec.*) on moisture content, Wood Science and Technology, 26, 9-21.

Simpson W.T., 1993, Determination and use of moisture diffusion coefficient to characterize drying of northern red oak (*Quercus rubra*), Wood Science and Technology, 27, 409-420.

Skaar C., 1958, Moisture movement in beech below the fiber saturation point, Forest Product Journal, 8, 352-357.

Skaar C., Siau J.F., 1981, Thermal diffusion bound water in wood, Wood Science and Technology, 15, 105-112.

Smith D.N., Lee L., 1958, The longitudinal permeability of some hardwoods and softwoods, Dep. Sci. Ind. Res. For. Prod. Res. Special Rep. 13, London, 13pp.

Soderström O., Salin J.G., 1993, On determination of surface emission factors in wood drying, *Holzforschung*, 47(5), 391-397.

Spalt A., 1957, The sorption of water vapour by domestic and tropical woods, *Forest Product Journal*, 7, 331-335.

Spalt A., 1958, The fundamentals of water vapour sorption by wood, *Forest Product Journal*, 8, 288-295.

Stamm A.J., 1959, Bound water diffusion into wood in the fiber direction, *Forest Product Journal*, 9(1), 27-32.

Stamm A.J., 1960a, Bound water diffusion into wood in across the fiber directions, *Forest Product Journal*, 524-528.

Stamm A.J., 1960b, Combined bound-water and water-vapor diffusion into Sitka spruce, *Forest Product Journal*, 644-648.

Stamm A.J., Nelson R.M.Jr., 1961, Comparison between measured and theoretical drying diffusion coefficients for southern pine, *Forest Product Journal*, 11, 536-543.

Stamm A.J., 1964, *Wood and cellulose science*, Ronald Press, New-York.

Stamm A.J., 1971, Review of nine methods for determining the fiber saturation point of wood and wood products, *Wood Science*, 2, 114-128.

Stamm A.J., 1980, Combined bound water and water vapor diffusion into sitka spruce veneer, *Forest Product Journal*, 10, 644-648.

Stanish, 1986, The roles of bound water chemical potential and gas phase diffusion in moisture transport through wood, *Wood Science and Technology*, 19, 53-70.

Suocoff E.I., Chen P.Y.S., Hossfeld R.L., 1965, Permeability of unseasoned xylem of northern white cedar, *Forest Product Journal*, 15(8), 321-324.

Suh S.-H., Heo N.-H., Nicholson D., 1998, Knudsen diffusion in the sequentially linked spherical pore, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, 31(4), 644-648.

T.

Tompkins E.E., 1974, Flow measurement utilizing multiple parallel capillaries, In R.B. Dowdell ed, *Flow: its measurement and control in Science and Industry*, Pittsburgh, Instrument society of America, 465-475.

V.

Vásquez G. et al., 1997, Longitudinal permeability of sapele (*Entandrophragma cylindricum*) to air, *Holzforschung*, 51, 173-176.

W.

Wädso L., 1993a, Measurements of water vapour sorption in wood, Part 1. Instrumentation, *Wood Science and Technology*, 27, 396-400.

Wädso L., 1993b, Measurements of water vapour sorption in wood, Part 2. Results, *Wood Science and Technology*, 28, 59-65.

Wicke E., Kallenbach R., 1941, *Kolloid Z.*, 97, 131.

Wiedenbeck J.K. et al, 1990, Air permeability, shrinkage, and moisture sorption of lodgepole pine stemwood, *Wood and Fiber Science*, 22(3), 229-245.

Y.

Youngquist G.R., 1970, Diffusion and flow of gases in porous solids, Flow through porous media symposium, *Industrial and Engineering Chemistry*, 62(8), 52-63.

Z.

Zhdanov V.M., 1996, Flow and diffusion of gases in capillaries and porous media, *Advances in Colloid and Interface Science*, 66, 1-21.

Liste des figures et tableaux

*** CHAPITRE I : Généralités sur le bois et l'eau dans le bois**

- **Figure I.1** : Les différentes parties d'une cellule ligneuse
 - **Figure I.2** : Plan ligneux des résineux
 - **Figure I.3** : Coupes transversales de ponctuations
 - **Figure I.4** : Plan ligneux des feuillus
 - **Figure I.5** : Les trois axes principaux du bois en accord avec la direction des fibres
 - **Figure I.6** : Représentation schématique de l'hypothèse de Langmuir
 - **Figure I.7** : Types fondamentaux d'isothermes de physisorption gaz-solide
 - **Figure I.8** : Schéma de principe d'un vaporimètre
 - **Figures I.9** : a) variation de la masse de l'échantillon au cours d'une absorption
 b) variation de la masse de l'échantillon au cours d'une désorption
 - **Figure I.10** : Représentation de l'échantillon
 - **Figure I.11** : Représentation schématique des différents chemins possibles pour le transport de l'eau au sein de la structure
 - **Figure I.12** : Modèle du faisceau de capillaires parallèles et indépendants
 - **Figure I.13** : Modèle du faisceau de capillaires rectilignes indépendants
 - **Figure I.14** : Modèle de Comstock pour les conifères
- **Tableau I.1** : Mécanismes de transport de l'eau au sein du bois
- **Tableau I.2** : Humidités relatives en équilibre avec des solutions salines

*** CHAPITRE II : Dispositifs et protocoles expérimentaux** **Grandeurs mesurées et déduites**

- **Figure II.1** : Différentes configurations d'utilisation de la cellule de diffusion
- **Figure II.2** : Schéma simplifié de la cellule de diffusion en laiton
- **Figure II.3** : Photographie de la cellule en laiton
- **Figure II.4** : Schéma de la cellule en aluminium
- **Figure II.5** : Photographie de la cellule en aluminium
- **Figure II.6** : Photographie de l'ensemble du dispositif expérimental
- **Figure II.7** : Caractéristiques de la cellule lors d'une mesure en régime stationnaire
- **Figure II.8** : Caractéristiques de la cellule lors d'une mesure en régime transitoire
- **Figure II.9** : Schéma du vaporimètre
- **Figure II.10** : Photographie du vaporimètre
- **Figure II.11** : Schéma de l'enceinte climatique
- **Figure II.12** : Schéma de fonctionnement de l'enceinte climatique
- **Figure II.13** : Schéma simplifié des deux enceintes climatiques
- **Figure II.14** : Photographie des deux enceintes climatiques

✱ CHAPITRE III : Résultats expérimentaux et discussion

- **Figure III.1** : Variation des premiers membres des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps pour l'échantillon hT5
 - **Figure III.2** : Variation des premiers membres des relations (III.1) et (III.2) en fonction du temps pour l'échantillon hR3
 - **Figure III.3** : Variation de $1/K$ en fonction de e dans le cas des mesures tangentielles
 - **Figure III.4** : Variation de $1/k$ en fonction de e dans le cas des mesures radiales
 - **Figure III.5** : Variation de $\text{Ln}A$ en fonction de $Q_{1S} - Q_{1E}$ pour les échantillons hL4, hL5 et hL6
 - **Figure III.6** : Variation de la vitesse d'écoulement u en fonction de ΔP pour les échantillons hL4, hL(et hL6
 - **Figure III.7** : Variation de $1/K$ en fonction de l'épaisseur pour les échantillons de hêtre de la première famille pour lesquels le transport se fait dans la direction longitudinale
 - **Figure III.8** : Variation du débit d'azote sec en fonction de la différence de pression pour les échantillons de hêtre hL7, hL8, hL9
 - **Figure III.9** : Coupes microscopiques du hêtre dans les trois directions orthotropiques du bois
 - **Figure III.10** : Variation de $\text{Ln}A_1$ et $\text{Ln}A_2$ en fonction du temps pour les échantillons de hêtre H7T et H8T
 - **Figure III.11** : Variation de $\text{Ln}A$ en fonction de $Q_{1S} - Q_{1E}$ pour l'échantillon d'épicéa EL39
 - **Figure III.12** : Variation de la vitesse u de l'écoulement d'ensemble en fonction de ΔP
 - **Figure III.13** : Variation du débit volumique d'azote sec en fonction de la différence de pression ΔP pour l'échantillon de hêtre HL11
 - **Figure III.14** : Variation de la perte de masse d'eau en fonction du temps pour l'échantillon de hêtre HL11
 - **Figure III.15** : Variation de la masse de l'échantillon H7T en fonction de la racine carrée du temps pour une expérience d'absorption
 - **Figure III.16** : Variation de la masse de l'échantillon H7T en fonction de la racine carrée du temps pour une expérience de désorption
 - **Figure III.17** : Comparaison des courbes de désorption calculées et expérimentales de l'échantillon HR22
 - **Figure III.18** : Comparaison des courbes de désorption calculées et expérimentales pour l'échantillon ET6
-
- **Tableau III.1** : Identification et caractéristiques des échantillons de la première famille
 - **Tableau III.2** : Identification et caractéristiques des échantillons de la deuxième famille
 - **Tableau III.3** : Valeurs du coefficient global obtenues pour les échantillons de hêtre dans les cas des transferts tangentiels et radiaux
 - **Tableau III.4** : Valeurs moyennes des coefficients de diffusion dans la direction longitudinale pour les échantillons de la première famille
 - **Tableau III.5** : Valeurs moyennes de la perméabilité dans la direction longitudinale pour les échantillons de la première famille
 - **Tableau III.6** : Perméabilités des échantillons de hêtre pour un écoulement dans la direction longitudinale

- **Tableau III.7** : Valeurs moyennes des perméabilités des échantillons de hêtre pour un écoulement dans la direction longitudinale
- **Tableau III.8** : Valeurs des coefficients de diffusion de l'hélium dans la direction longitudinale pour les échantillons de hêtre et d'épicéa
- **Tableau III.9** : Valeurs de la perméabilité dans la direction longitudinale des échantillons de hêtre et d'épicéa
- **Tableau III.10** : Valeurs des perméabilités obtenues par mesure directe
- **Tableau III.11** : Comparaison entre les mesures de Agoua et nos mesures expérimentales pour certains échantillons de hêtre et d'épicéa
- **Tableau III.12** : Comparaison des valeurs de perméabilités obtenues par mesure directe avec les mesures simultanées de diffusivité
- **Tableau III.13** : Influence de l'humidité de l'échantillon sur la valeur de la perméabilité
- **Tableau III.14** : Valeurs des diffusivités apparentes moyennes de la vapeur d'eau mesurées sur les différents échantillons de hêtre dans les deux cellules de Wicke et Kallenbach
- **Tableau III.15** : Valeurs des diffusivités D^* et D^{**} déduites des mesures effectuées avec le vaporimètre pour les échantillons de hêtre
- **Tableau III.16** : Valeurs des diffusivités D^* et D^{**} déduites des mesures effectuées avec le vaporimètre pour les échantillons d'épicéa
- **Tableau III.17** : Valeurs des coefficients de diffusion obtenus pour les échantillons de hêtre et d'épicéa mis en oeuvre dans la cellule de Wicke et Kallenbach et le vaporimètre
- **Tableau III.18** : Valeurs des coefficients de diffusion D^{**} déduites des essais d'absorption
- **Tableau III.19** : Valeurs des coefficients de diffusion D^{**} déduites des essais de désorption
- **Tableau III.20** : Valeurs des diffusivités D^{**} obtenues sur les échantillons de hêtre et d'épicéa mesurées dans les deuxième et troisième dispositifs

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

Annexes

Liste des annexes

ANNEXE 1 : MODE OPERATOIRE DES ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES EN REGIME STATIONNAIRE ET TRANSITOIRE

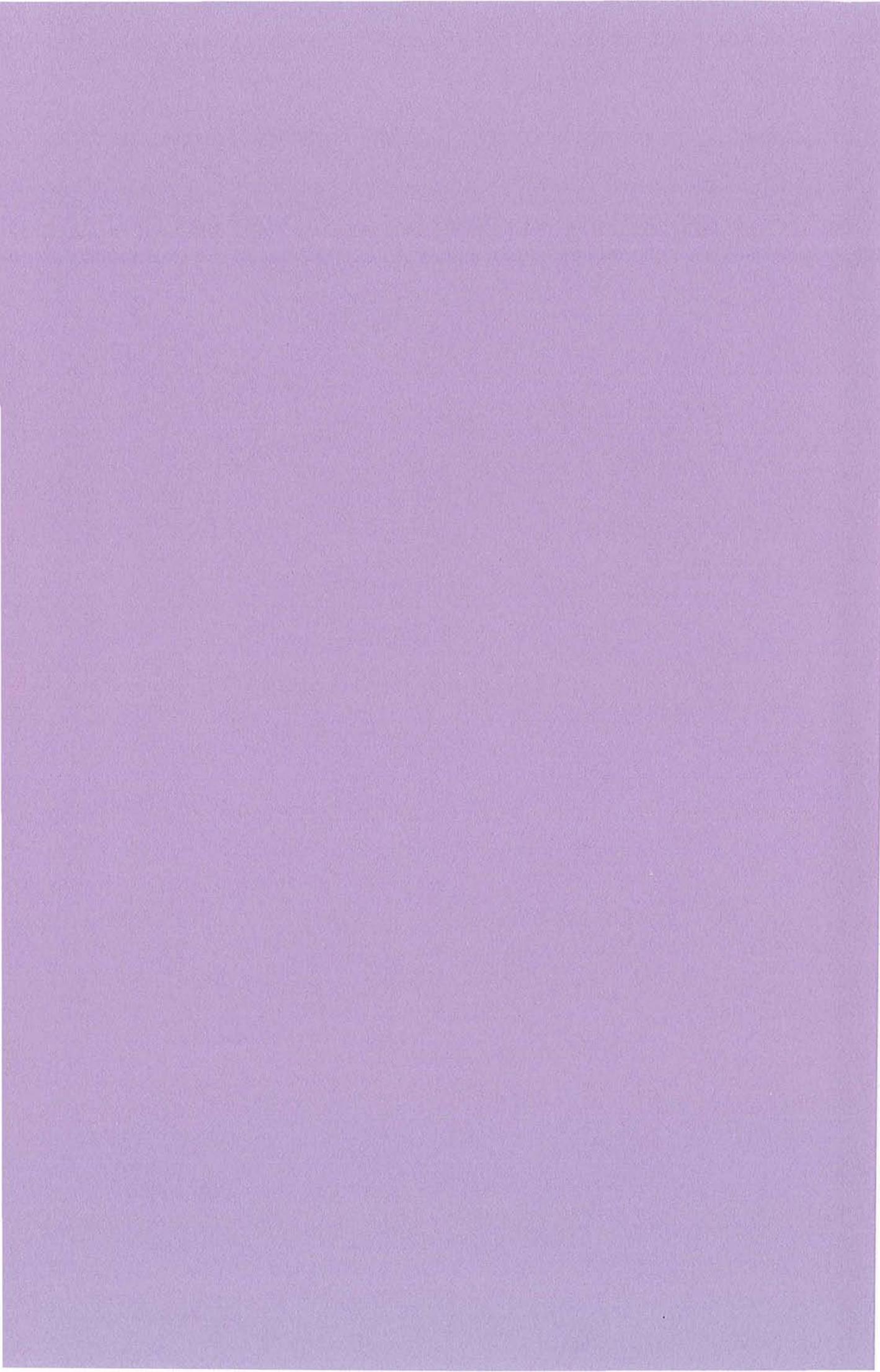
ANNEXE 2 : MODELISATION DES ESSAIS D'ABSORPTION OU DE DESORPTION DES ECHANTILLONS DE BOIS

ANNEXE 3 : RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LA CELLULE DE DIFFUSION EN LAITON

ANNEXE 4 : RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LA CELLULE DE DIFFUSION EN ALUMINIUM

ANNEXE 5 : RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LE VAPORIMETRE

ANNEXE 6 : RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS EN ABSORPTION ET EN DESORPTION



ANNEXE 1

MODE OPERATOIRE DES ANALYSES

CHROMATOGRAPHIQUES EN REGIME STATIONNAIRE

ET TRANSITOIRE

I. Présentation de la chromatographie en phase gazeuse

I.1. Le processus chromatographique

La chromatographie en phase gazeuse est une technique d'analyse par séparation qui s'applique aux composés gazeux ou susceptibles d'être vaporisés par chauffage sans décomposition. Elle permet ainsi l'analyse de mélanges éventuellement très complexes de natures et de volatilités très diverses. L'instrument utilisé est un chromatographe, réalisant à la fois la séparation des constituants de l'échantillon et la mesure des quantités de produits séparés. Le cœur du chromatographe est la colonne. Celle-ci est un tube plus ou moins perméable aux gaz, renfermant une substance active (solide ou liquide) appelée phase stationnaire. La colonne est balayée en permanence par un gaz appelé gaz porteur (ou gaz vecteur).

Le processus chromatographique est discontinu. A l'instant initial, l'échantillon est introduit en tête de colonne. Les constituants vont se séparer les uns des autres dans la course à travers la colonne, selon leur affinité pour la phase stationnaire. Le détecteur va évaluer en continu la quantité de chacun des constituants séparés au sein du gaz porteur, grâce à la mesure d'une certaine propriété physique du mélange gazeux qui dépend de cette quantité. Ainsi, le détecteur que nous utiliserons est un catharomètre et celui-ci mesure en continu la conductivité thermique du gaz à la sortie de la colonne. A la sortie, nous avons recours à un intégrateur qui nous donne directement la surface des pics en unités d'aires.

I.2. Le système d'injection

Plusieurs systèmes d'injection existent mais dans le cadre de nos recherches, nous utiliserons une vanne d'injection pour les gaz. Celle-ci est une vanne spéciale à six voies représentée par les figures ci-dessous :

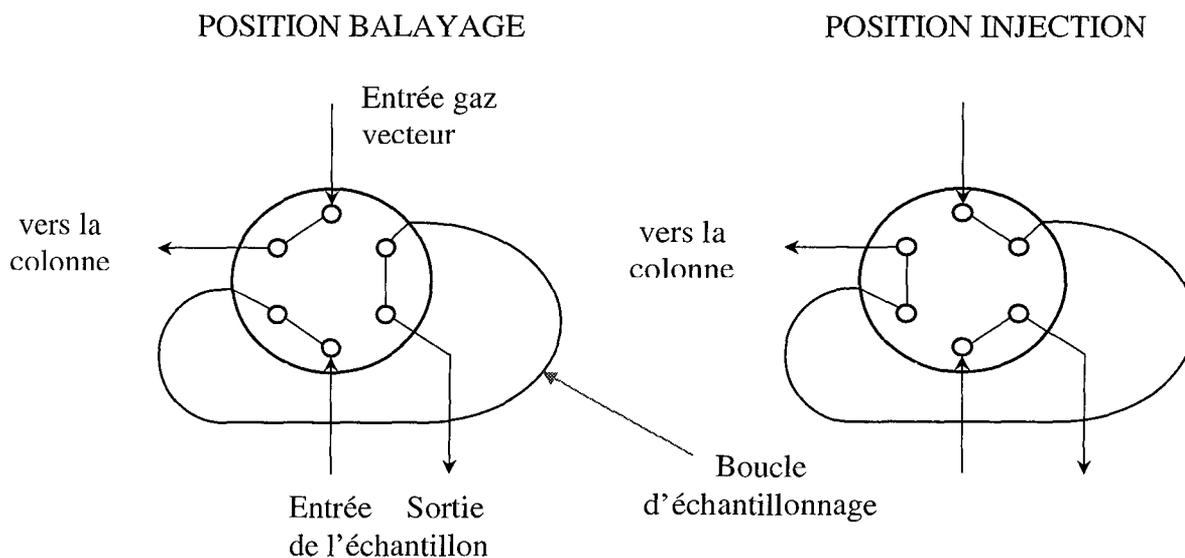


Figure A1.1 : Schéma représentatif d'une vanne six voies

La reproductibilité de la quantité injectée est meilleure que 1 %, à condition que la température et la pression demeurent constantes dans la boucle d'échantillonnage avant l'injection. De même, si le balayage est effectué en permanence, une modification du débit entraînera une variation de pression dans la boucle car les pertes de charge de la vanne et de la boucle ne sont pas nulles.

Pour que l'injection soit représentative, il est nécessaire que les caractéristiques (P, V, T) du mélange soient telles que tous les composés se trouvent à l'état de vapeur sèche au moment de l'échantillonnage car des condensations induisent des changements de composition.

Les constituants des produits à analyser sont véhiculés sous forme gazeuse dans la colonne par l'intermédiaire du gaz vecteur, dans lequel ils ont été injectés. Quand ils atteignent, plus ou moins bien séparés, la sortie de la colonne, ils sont donc mélangés à une quantité relativement importante de ce gaz vecteur. Repérer leur passage est alors l'affaire du détecteur. Le signal que délivre le détecteur est reçu, le plus souvent après amplification, par un enregistreur, qui trace le chromatogramme. Généralement un intégrateur associé donne les valeurs de rétention et de mesure des aires des pics.

Il existe plusieurs catégories de détecteurs que nous pouvons classer de deux manières différentes : soit nous distinguons des détecteurs universels ou semi-universels, donc donnant une réponse pour chacun des solutés qui les traversent, et des détecteurs spécifiques, qui ne répondent qu'à certaines familles de solutés. Soit nous distinguons des détecteurs dont la réponse est proportionnelle à la concentration du soluté dans le gaz vecteur, et des détecteurs dont la réponse est proportionnelle au débit massique du soluté dans l'appareil. Nos travaux de recherches nous ont conduits à utiliser un détecteur catharométrique qui comme nous

allons le montrer ci-après est un détecteur universel et dont la réponse est proportionnelle à la concentration du soluté dans le gaz vecteur.

En l'absence de toute injection dans la colonne, le tracé fourni par le détecteur sur l'enregistreur constitue la ligne de base, que nous ajustons sur le zéro de l'appareil. Ceci ne signifie pas que le signal correspond à zéro mA ou à zéro mV, mais que nous sommes à un état d'équilibre de fonctionnement de l'ensemble. Ceci constitue le bruit de fond de l'appareillage.

Le niveau limite (ou seuil) de détection est, par convention, égal à deux fois la valeur du bruit de fond. Nous ne considérons pas comme étant un pic un signal dont la hauteur est inférieure à cette valeur. La quantité minimale détectable y est alors associée.

I.3. Le catharomètre

Historiquement, le catharomètre (ou T.C.D. : Thermal Conductivity Detector) est le premier détecteur différentiel monté sur les chromatographes commerciaux. Avec la balance de densité des gaz, proposée sous une première forme par A.J.P. Martin en 1944, c'est le plus universel de tous les détecteurs et probablement le plus simple.

Le principe de base du catharomètre consiste à comparer la conductibilité thermique du gaz vecteur pur à celle des mélanges solutés-gaz vecteur qui sortent de la colonne à un instant donné.

Le montage de base consiste à placer dans une cavité d'un bloc métallique maintenu à température constante un filament (ou thermistance) parcouru par un courant électrique. Cette cavité est reliée à l'alimentation en gaz vecteur sous un débit constant de ce dernier. La chaleur dégagée par effet Joule est en partie rayonnée dans le bloc métallique, en partie emportée par le gaz vecteur. Si le système est stable, il s'établit un équilibre entre les deux parties, et la cellule est portée à une température constante, ce qui donne une valeur constante R_1 à la résistance du filament (filament de référence).

Dans une autre cavité du bloc, un deuxième filament est parcouru par un courant électrique de même valeur que le premier.

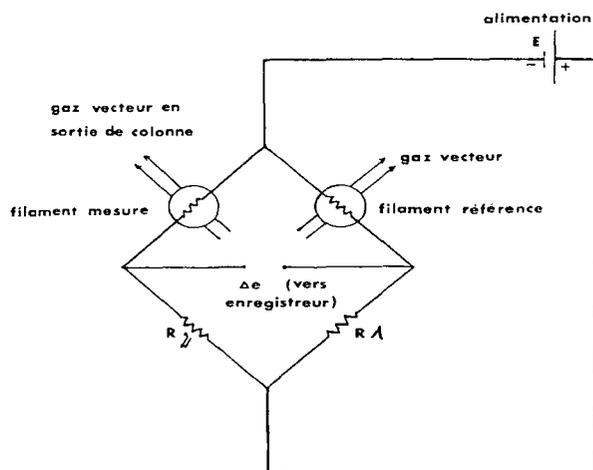


Figure A1.2 : Pont de Wheatstone

Tant que le gaz vecteur est pur, l'équilibre qui s'établit dans la cellule conduit à une valeur constante R_2 de la résistance du filament. Les deux filaments sont montés dans un pont de Wheatstone, suivant le schéma ci-dessous, en face de résistances fixes R , et nous pouvons alors sur un enregistreur ajuster au zéro de l'appareil le courant dans le pont, permettant ainsi le tracé de la ligne de base.

Quand la composition du gaz qui passe sur le filament R_2 (filament de mesure) change, sa conductivité thermique, généralement différente de celle du gaz pur, modifie l'équilibre entre chaleur rayonnée et chaleur emportée, ce qui fait varier la température de la cellule, donc fait varier aussi la valeur de R_2 . Le pont est déséquilibré et un signal apparaît sur l'enregistreur.

Ce signal est proportionnel à la concentration de soluté dans le gaz vecteur. Comme celle-ci obéit à une loi pratiquement gaussienne, à la sortie de la colonne le signal est un pic gaussien si toutes les conditions chromatographiques sont bonnes.

Par le principe même qui vient d'être énoncé, nous n'obtenons de réponse que s'il y a une différence de conductivité thermique entre le gaz vecteur et le soluté, la réponse sera d'autant plus importante que cette différence est plus grande.

Dans le tableau A1.1 sont résumées les conductivités thermiques des gaz vecteurs les plus utilisés.

Dans le cadre de nos expériences, le gaz vecteur sera de l'azote N_2 et le soluté à analyser l'hélium He , les deux gaz montrant une différence de conductivités thermiques conséquente.

Tableau A1.1 : Conductibilités thermiques de différents gaz vecteurs

Gaz vecteur	Conductibilité thermique à 100°C (cal/cm s °C x10 ⁵)
Hydrogène	54,3
Hélium	41,6
Azote	7,5
Argon	5,2

La figure montre trois possibilités de passage du gaz sur les filaments.

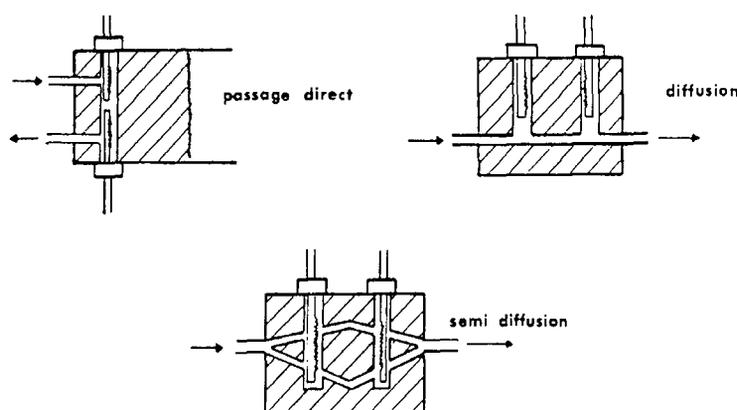


Figure A1.3 : Géométrie de cellules

Le montage en passage direct donne la plus grande sensibilité et la réponse la plus rapide.

Les filaments sont souvent en tungstène-rhénium, mais on peut utiliser du nickel ou du platine s'il y a des risques de corrosion.

Conclusion : le catharomètre est donc un détecteur universel, simple et robuste, dont l'influence du débit de gaz vecteur sur la réponse est nulle, mais qui reste cependant moyennement sensible.

Précautions à prendre :

- ✿ ne pas couper le débit de gaz vecteur sans couper le courant de pont
- ✿ s'assurer de l'absence de fuites aux raccords pour éviter l'entrée d'oxygène dans le circuit gazeux. Utiliser une sortie capillaire assez longue pour éviter une rétrodiffusion de l'oxygène
- ✿ maintenir le détecteur à une température constante au moins égale à celle de la colonne, afin d'éviter la condensation de produits lourds
- ✿ maintenir le chauffage du détecteur même quand on n'utilise pas le chromatographe, car l'équilibre thermique souhaitable est long à obtenir

Annexe 1 : Mode opératoire des analyses chromatographiques en régime stationnaire et transitoire

- ⊗ utiliser une très bonne régulation de débit sur le circuit de gaz vecteur, car le catharomètre est sensible aux variations de cette donnée
- ⊗ en programmation de température, utiliser un régulateur de débit massique. Une colonne identique en parallèle peut être souhaitable.

Nous allons à présent détailler ci-dessous les différents montages expérimentaux permettant d'accéder aux diffusivités de l'inerte, à la fois en régime transitoire et en régime permanent. L'élément central des montages est la cellule de diffusion (en bronze ou en aluminium) et nous utiliserons un chromatographe phase gazeuse ainsi qu'un intégrateur pour accéder aux différentes surfaces de pics d'hélium dans chacun des compartiments.

II. Montages en régime transitoire

Nous rappelons ici que ces montages expérimentaux sont utilisés pour les mesures des diffusivités dans les directions radiale et tangentielle.

Ces montages ont déjà été utilisés pendant les travaux de recherches du D.E.A. Sciences du Bois (*Mouchot [1998]*).

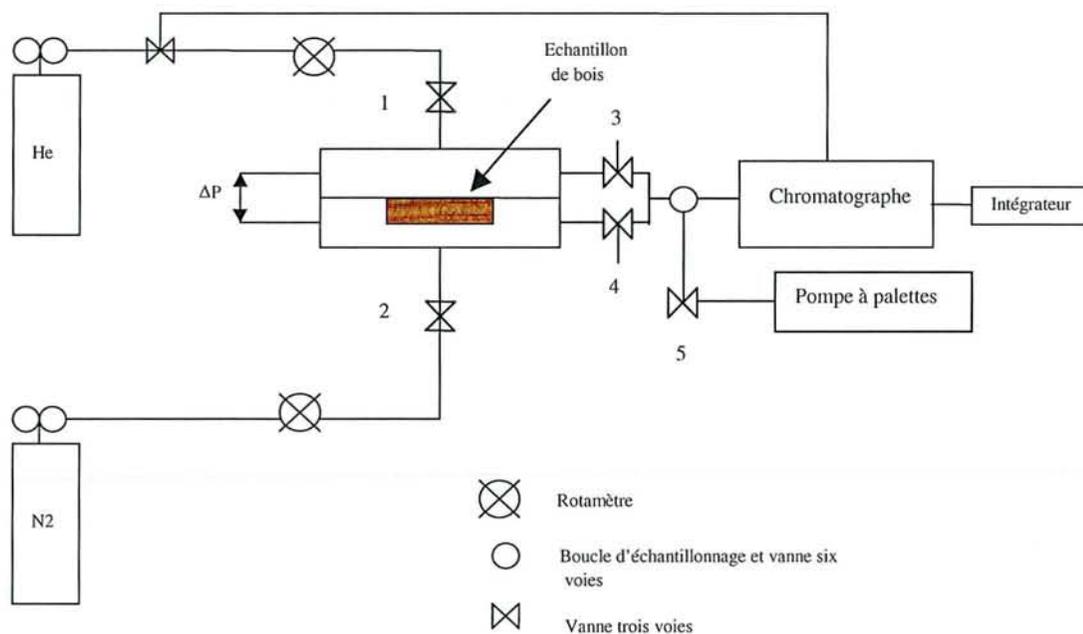


Figure A1.4 : Montage expérimental en régime transitoire (cas du bois sec)

III. Montages en régime permanent

Ces montages expérimentaux sont utilisés dans le cadre des mesures dans la direction longitudinale.

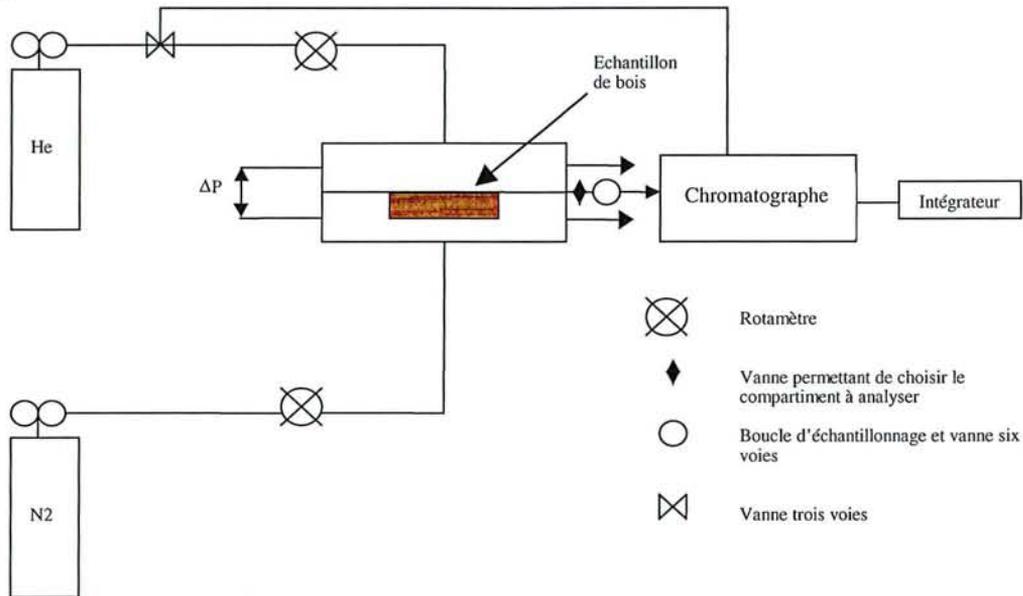


Figure A1.5 : Montage expérimental en régime permanent (cas du bois sec)

Dans le cas de l'étude du bois humide, un barboteur et un flacon de garde sont placés entre le rotamètre et l'entrée de la cellule et ceci pour chacun des courants gazeux.

IV. Protocole expérimental

IV.1. Cas des mesures en régime transitoire

Le protocole expérimental, à répéter pour toutes les manipulations est le suivant :

- faire balayer les gaz à travers les deux compartiments pendant quelques minutes
- à l'instant $t = 0$, fermer les vannes 1 et 2 puis 3 et 4
- faire le vide à l'aide de la vanne 5 par l'intermédiaire de la pompe à palettes jusqu'aux vannes 3 et 4, la vanne six voies en position charge et refermer la vanne 5
- à un temps t donné, tourner la vanne 3 ou 4, suivant le compartiment dont nous voulons analyser le contenu : ceci a pour but de contrôler la pression
- basculer la vanne six voies en position injection et lancer l'analyse

Ce protocole est à répéter pour chaque temps t et pour chacun des deux compartiments.

IV.2. Cas des mesures en régime permanent

Les deux compartiments sont balayés en continu par les deux courants gazeux (azote et hélium). La vanne en sortie de compartiments permet de choisir le compartiment dont nous souhaitons analyser le contenu. Il faut prendre garde de mesurer les différents débits volumiques en entrées et sorties de compartiments avant et après chaque expérience, ceci afin de vérifier la stabilité de ceux-ci et de vérifier les bilans de matière. A un temps t (environ 15 minutes), la vanne six voies est basculée en position injection et l'analyse est effectuée. Pour chaque compartiment, nous effectuons deux analyses afin de moyennner les surfaces de pics.

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

ANNEXE 2

MODELISATION DES ESSAIS D'ADSORPTION OU DE DESORPTION DES ECHANTILLONS DE BOIS

D'une manière générale, les bilans de matière de l'eau en phase gazeuse et adsorbée s'écrivent respectivement :

$$-D_V \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial y^2} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + ka[f(\rho_e, T) - x] = 0 \quad (1)$$

$$-D_A \rho_0 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \rho_0 \frac{\partial x}{\partial t} - ka[f(\rho_e, T) - x] = 0 \quad (2)$$

où ρ_e désigne la concentration massique d'eau en phase gazeuse

x est l'humidité absolue du bois

ρ_0 est la masse volumique du bois anhydre

D_V et D_A représentent le coefficient de diffusion apparent de l'eau en phase gazeuse et en phase adsorbée

ka est une conductance de transfert caractéristique de la cinétique d'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase gazeuse et l'eau adsorbée

$x^* = f(\rho_e, T)$ représente la relation d'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase gazeuse et l'eau en phase adsorbée.

Nous allons nous placer dans le cas où la relation d'équilibre $x^* = f(\rho_e, T)$ est linéaire, soit :

$$x^* = K\rho_e.$$

Dans ces conditions, les équations de bilan s'écrivent :

$$-D_V \frac{\partial^2 \rho_e}{\partial y^2} + \frac{\partial \rho_e}{\partial t} + ka[K\rho_e - x] = 0 \quad (3)$$

$$-D_A \rho_0 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \rho_0 \frac{\partial x}{\partial t} - ka[K\rho_e - x] = 0 \quad (4)$$

Lors des essais d'absorption ou de désorption, les variations de masse de l'échantillon correspondent essentiellement à celles de l'eau adsorbée. De plus, le coefficient de diffusion en phase vapeur est en général supérieur à celui de l'eau en phase adsorbée. Par suite, pour la variation de masse de l'échantillon, nous pourrions nous limiter à l'équation de bilan (4), en

admettant que la masse volumique de l'eau vapeur est constante au sein de l'échantillon et égale à la valeur qui correspond à la deuxième enceinte, soit ρ_{ef} .

Ainsi, avec ces différentes simplifications, l'analyse des courbes d'absorption ou de désorption peut se limiter à la résolution de l'équation de bilan suivante :

$$-D_A \rho_0 \frac{\partial^2 x}{\partial y^2} + \rho_0 \frac{\partial x}{\partial t} + k a x = k a K \rho_{ef} = k a x_f \quad (5)$$

x_f est l'humidité du bois atteinte à l'équilibre dans la deuxième enceinte.

L'équation peut être résolue dans le domaine transformé de Laplace.

En posant :

$$\bar{x} = \int_0^{\infty} x(t) \exp(-st) dt \quad (6)$$

L'équation transformée s'écrit :

$$-D_A \rho_0 \frac{d^2 \bar{x}}{dy^2} + (\rho_0 s + k a) \bar{x} = \frac{k a x_f}{s} - \rho_0 x_i \quad (7)$$

x_i est l'humidité du bois en équilibre dans la première enceinte.

L'équation (7) est une équation différentielle du deuxième ordre avec un deuxième membre dont la solution est :

$$\bar{x} = \frac{\rho_0 x_i s + k a x_f}{s [k a + \rho_0 s]} + \alpha \exp\left(\sqrt{\frac{\rho_0 s + k a}{\rho D_A}} y\right) + \beta \exp\left(-\sqrt{\frac{\rho_0 s + k a}{\rho D_A}} y\right) \quad (8)$$

Les deux constantes α et β doivent être estimées en tenant compte des conditions aux limites de l'équation de bilan (5).

Une des conditions aux limites est :

$$\text{à } y = 0 \quad \frac{\partial x}{\partial y} = 0 \quad (9)$$

qui s'écrit dans le domaine transformé :

$$\text{à } y = 0 \quad \frac{\partial \bar{x}}{\partial y} = 0 \quad (10)$$

En tenant compte de cette condition, la solution de l'équation devient :

$$\bar{x} = \frac{\rho_0 x_i s + k a x_f}{s [k a + \rho_0 s]} + 2 \alpha \alpha c \sqrt{\frac{\rho_0 s + k a}{D_A \rho_0}} y \quad (11)$$

La deuxième condition aux limites est différente selon que l'on tient compte ou que l'on néglige la résistance de transfert externe à la surface externe de l'échantillon.

a) Cas où la résistance de transfert est négligeable

La condition aux limites s'écrit :

$$\text{à } y = e/2 \quad x = x_f \quad (12)$$

soit dans le domaine transformé :

$$\text{à } y = e/2 \quad x = \frac{x_f}{s} \quad (13)$$

En tenant compte de la condition aux limites (13), on détermine α et la solution de l'équation de bilan vérifiant les conditions aux limites (10) et (13) est :

$$\bar{x} = \frac{\rho_0 s x_i + k a x_f}{s[k a + \rho_0 s]} + \frac{\rho_0 (x_f - x_i)}{k a + \rho_0 s} \frac{\text{ch} \sqrt{\frac{\rho_0 s + k a}{D_A \rho_0}} y}{\text{ch} \sqrt{\frac{\rho_0 s + k a}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}} \quad (14)$$

b) Cas où la résistance de transfert externe n'est pas négligeable

La condition aux limites s'écrit :

$$\text{à } y = e/2 \quad D_A \rho_0 \left(\frac{dx}{dy} \right) = k_g (\rho_{ef} - \frac{x}{K})$$

que nous pouvons écrire :

$$\frac{dx}{dy} = \gamma (x_f - x) \quad (15)$$

avec
$$\gamma = \frac{k_g}{K \rho_0 D_A} \quad (16)$$

k_g est le coefficient de transfert caractéristique de l'échange entre la phase gazeuse de l'enceinte et la surface de l'échantillon.

Dans le domaine transformé, la condition s'écrit :

$$\text{à } y = e/2 \quad \frac{d\bar{x}}{dy} = \gamma \left(\frac{x_f}{s} - \bar{x} \right) \quad (17)$$

En tenant compte de la condition aux limites (17), on détermine α et la solution de l'équation de bilan vérifiant les conditions aux limites (10) et (17) est :

$$\bar{x} = \frac{\rho_0 x_i s + k a x_f}{s[ka + \rho_0 s]} + \frac{\gamma \frac{\rho_0 (x_f - x_i)}{ka + \rho_0 s} \operatorname{ch} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} y}{\gamma \operatorname{ch} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2} + \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \operatorname{sh} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}} \quad (18)$$

Lorsque $\gamma \rightarrow \infty$, la relation (18) se réduit à la relation (14).

A partir des relations (14) et (18), il est possible d'évaluer la transformée de Laplace de la masse d'eau contenue dans l'échantillon à l'instant t , soit \bar{m} et par la suite, la transformée de Laplace de la grandeur $E = \frac{m_f - m}{m_f - m_i}$.

Aussi bien en absorption qu'en désorption, la grandeur E varie entre 1 (valeur initiale) et 0 (valeur finale). Evaluons \bar{m} et E .

La masse m est telle que :

$$m = 2S\rho_0 \int_0^{e/2} x dy \quad (19)$$

Nous avons de plus :

$$\begin{cases} m_i = 2S\rho_0 x_i \frac{e}{2} \\ m_f = S\rho_0 x_f e \end{cases} \quad (20)$$

et

d'où :

$$E = \frac{m_f - m}{m_f - m_i} = \frac{x_f - \frac{2}{e} \int_0^{e/2} x dy}{x_f - x_i} \quad (21)$$

Par suite, la transformée de Laplace est :

$$\bar{E} = \frac{\frac{x_f}{s} - \frac{2}{e} \int_0^{e/2} x dy}{x_f - x_i} \quad (22)$$

Les expressions de \bar{E} sont telles que :

* en l'absence de résistance diffusionnelle externe :

$$\bar{E} = \frac{\rho_0}{ka + \rho_0 s} \left[1 - \frac{\operatorname{th} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}}} \right] \quad (23)$$

* en présence de résistance diffusionnelle externe :

$$\bar{E} = \frac{\rho_0}{ka + \rho_0 s} \left[1 - \frac{\gamma \operatorname{th} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \left[\gamma + \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{\rho_0 s + ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2} \right]} \right] \quad (24)$$

A partir de $\bar{E}(s)$, il est possible d'évaluer tous les moments de la grandeur $E(t)$. En particulier, le moment d'ordre zéro est tel que :

$$\mu_0 = \int_0^{\infty} E(t) dt = \bar{E}(0) \quad (25)$$

Nous obtenons alors pour $\bar{E}(0)$ les relations suivantes en l'absence et en présence d'une résistance diffusionnelle externe respectivement :

$$\bar{E}(0) = \frac{\rho_0}{ka} \left[1 - \frac{\operatorname{th} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}}} \right] \quad (26)$$

$$\bar{E}(0) = \frac{\rho}{ka} \left[1 - \frac{\gamma \operatorname{th} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2}}{\frac{e}{2} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \left(\gamma + \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \operatorname{th} \sqrt{\frac{ka}{D_A \rho_0}} \frac{e}{2} \right)} \right] \quad (27)$$

A partir de la valeur expérimentale de μ_0 , l'utilisation des relations (26) ou (27) permet d'évaluer la conductance ka si on connaît par ailleurs le coefficient de diffusion D_A ou D_A et γ .

Bien entendu pour déterminer les grandeurs, il est possible d'utiliser les expressions des autres moments sachant que leurs estimations expérimentales deviennent de moins en moins précises en fonction de l'ordre du moment. C'est pourquoi nous nous limiterons à l'utilisation du moment d'ordre zéro.

Remarque : Dans le cas particulier où le transport de l'eau se fait uniquement en phase adsorbée, l'équation de bilan à résoudre correspond à l'équation (4) avec $ka = 0$. A partir des courbes d'adsorption ou de désorption, il est possible d'évaluer le coefficient de diffusion en phase adsorbée à partir du moment expérimental d'ordre zéro. En effet, en l'absence de résistance diffusionnelle externe à la surface des échantillons de bois, nous pouvons chercher la limite de $\bar{E}(0)$ donnée par la relation (26) lorsque $ka \rightarrow 0$. Nous trouvons :

$$\bar{E}(0) = \mu_0 = \int_0^{+\infty} E(t) dt = \frac{e^2}{12D_A} \quad (28)$$

Le coefficient de diffusion ainsi déterminé n'est rien d'autre que le coefficient de diffusion D^{**} introduit au niveau du deuxième dispositif expérimental. Ainsi, les courbes d'absorption et de désorption de l'eau permettent, en admettant que le transport diffusionnel se fait uniquement en phase adsorbée, de déterminer le coefficient de diffusion D^{**} donné en l'absence de résistance diffusionnelle externe par la relation :

$$D^{**} = \frac{e^2}{12\mu_0} = \frac{e^2}{12 \int_0^{+\infty} E(t) dt} \quad (29)$$

S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY Cédex

ANNEXE 3

RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LA CELLULE DE DIFFUSION EN LAITON

Dans cette annexe sont regroupés toutes les données expérimentales relatives aux échantillons étudiés, ainsi que les graphiques qui y sont issus. Dans les tableaux, les concentrations C_1 et C_2 sont exprimées en mol/m^3 et $C_1V_1 + C_2V_2$ est multiplié par 10^3 mol.

- Cas des directions radiales et tangentielles

MESURE TANGENTIELLE DE LA DIFFUSION :

Echantillon de 1 mm :

✿ Bois sec :

Echantillon hT1 :

Temps (s)	C1	C2	A1	A2	$-\ln(A1)$	$-\ln(A2)$	$C_1V_1+C_2V_2$
0	1,17	28,51	1,052	0,943	-0,051	0,059	1,86
10	2,30	28,21	0,973	0,92	0,027	0,083	1,91
20	3,11	27,95	0,916	0,90	0,088	0,105	1,94
120	5,38	26,34	0,758	0,776	0,277	0,254	1,97
300	8,30	23,40	0,554	0,551	0,591	0,598	1,95
480	10,28	22,28	0,415	0,465	0,879	0,766	1,99
600	11,65	21,07	0,319	0,322	1,143	0,989	2,00
900	13,59	19,44	0,184	0,247	1,693	1,398	2,01

✿ Bois humide, Hr=40% :

Echantillon hT1 :

Temps (s)	C1	C2	A1	A2	$-\ln(A1)$	$-\ln(A2)$	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,9	26,84	0,980	1,021	0,020	-0,021	1,74
10	1,17	26,59	0,961	1,001	0,040	-0,001	1,74
20	1,39	26,00	0,944	0,954	0,058	0,047	1,72
120	3,57	23,33	0,784	0,738	0,243	0,340	1,68
300	6,73	20,58	0,551	0,515	0,596	0,664	1,68
480	8,89	18,86	0,392	0,376	0,936	0,978	1,70
600	9,97	18,03	0,312	0,309	1,165	1,174	1,71
900	11,87	16,43	0,172	0,180	1,700	1,715	1,72

☼ Bois humide, Hr=80% :

Echantillon hT1 :

	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,86	25,97	0,968	1,035	0,033	-0,034	1,69
10	1,13	25,50	0,948	0,995	0,053	0,005	1,67
20	1,39	25,03	0,928	0,956	0,075	0,045	1,66
120	3,48	22,37	0,769	0,734	0,263	0,309	1,61
300	6,21	19,78	0,561	0,518	0,578	0,658	1,60
480	8,29	18,14	0,403	0,381	0,909	0,965	1,62
600	9,30	17,29	0,326	0,310	1,121	1,171	1,62
900	10,97	15,77	0,199	0,183	1,614	1,698	1,62

Echantillon hT2 :

Temps (s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	1,02	26,07	1,003	0,997	-0,003	0,003	1,70
10	1,32	25,80	0,980	0,974	0,020	0,026	1,70
20	1,62	25,57	0,957	0,955	0,044	0,046	1,70
120	4,23	22,99	0,758	0,739	0,277	0,302	1,69
300	7,64	20,11	0,498	0,498	0,697	0,697	1,71
480	9,76	18,22	0,336	0,340	1,091	1,079	1,71
600	10,84	17,39	0,254	0,270	1,370	1,309	1,72
900	12,44	15,96	0,132	0,150	2,025	1,897	1,72

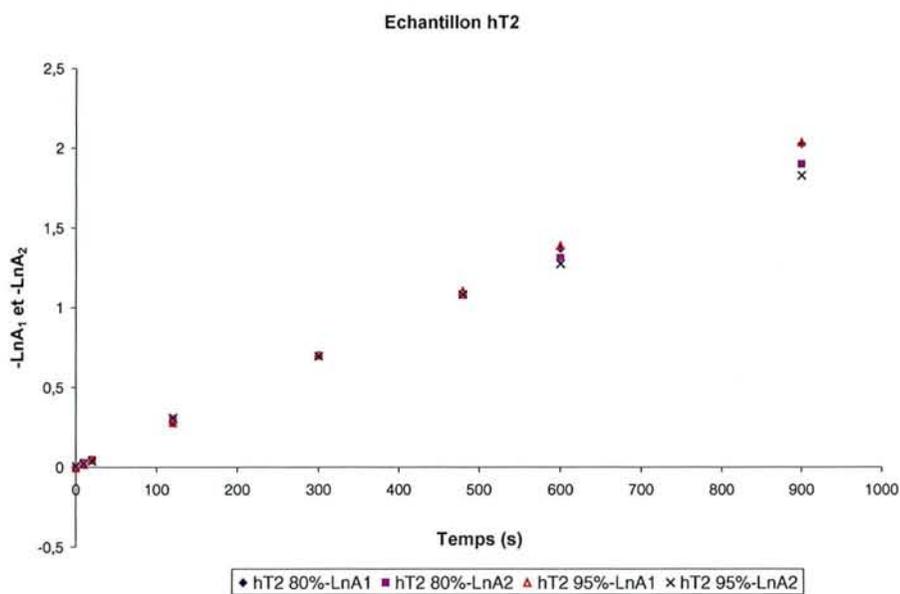
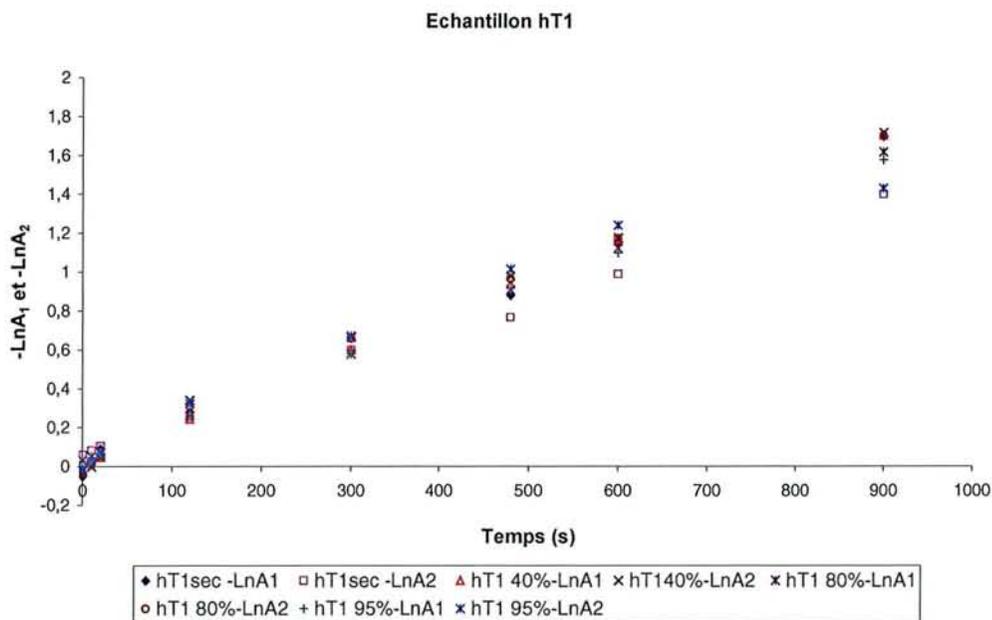
☼ Bois humide, Hr=95% :

Echantillon hT1 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2^*$
0	0,83	24,98	0,973	1,010	0,027	-0,010	1,62
10	1,08	24,59	0,953	0,977	0,048	0,023	1,61
20	1,33	24,09	0,934	0,934	0,068	0,068	1,59
120	3,37	21,62	0,772	0,724	0,259	0,323	1,56
300	6,07	19,12	0,559	0,511	0,582	0,671	1,55
480	8,08	17,39	0,399	0,363	0,919	1,013	1,56
600	8,91	16,53	0,334	0,290	1,097	1,238	1,55
900	10,51	15,95	0,207	0,240	1,575	1,427	1,61

Echantillon hT2 :

Temps (s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,99	25,75	1,007	0,993	-0,007	0,007	1,68
10	1,25	25,59	0,986	0,979	0,014	0,021	1,68
20	1,61	25,41	0,959	0,964	0,042	0,037	1,69
120	4,21	22,70	0,758	0,734	0,277	0,309	1,67
300	7,58	19,92	0,498	0,499	0,697	0,695	1,69
480	9,71	18,03	0,333	0,339	1,100	1,082	1,69
600	10,79	17,34	0,250	0,280	1,386	1,273	1,71
900	12,33	15,93	0,131	0,161	2,033	1,826	1,71



Echantillon de 2 mm :

☼ Bois sec :

Echantillon hT3 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,22	24,71	0,968	1,036	0,033	-0,035	1,57
50	0,63	23,54	0,936	0,935	0,066	0,067	1,52
150	1,25	22,56	0,887	0,851	0,120	0,161	1,49
300	2,06	21,84	0,824	0,790	0,194	0,236	1,49
600	3,43	20,75	0,717	0,696	0,333	0,362	1,50
900	4,56	20,05	0,629	0,636	0,464	0,453	1,53
1500	6,46	18,48	0,481	0,502	0,732	0,689	1,54

Echantillon hT4 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,19	26,48	0,982	1,020	0,018	-0,020	1,68
50	0,47	25,92	0,962	0,975	0,039	0,025	1,66
150	0,80	25,38	0,938	0,932	0,064	0,070	1,65
300	1,19	24,82	0,909	0,887	0,095	0,120	1,63
600	2,01	24,13	0,850	0,832	0,163	0,184	1,64
900	2,80	23,49	0,792	0,781	0,233	0,247	1,64
1500	4,19	22,37	0,691	0,692	0,370	0,368	1,65

* Bois humide, Hr=40% :

Echantillon hT3 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,21	26,74	0,957	1,047	0,044	-0,046	1,70
50	0,58	25,83	0,931	0,975	0,071	0,025	1,66
150	1,20	24,50	0,886	0,870	0,121	0,139	1,61
300	2,01	23,46	0,827	0,788	0,190	0,238	1,59
600	3,28	22,33	0,736	0,698	0,307	0,360	1,60
900	4,39	21,40	0,656	0,625	0,422	0,470	1,60
1500	6,32	19,90	0,517	0,506	0,660	0,681	1,62

* Bois humide, Hr=80% :

Echantillon hT3 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,15	26,93	0,969	1,034	0,031	-0,033	1,71
50	0,46	26,22	0,947	0,978	0,054	0,022	1,68
150	1,01	24,92	0,908	0,876	0,097	0,132	1,63
300	1,71	23,79	0,858	0,788	0,153	0,238	1,60
600	2,97	23,37	0,768	0,755	0,264	0,281	1,64
900	4,04	22,00	0,692	0,647	0,368	0,435	1,62
1500	5,86	21,57	0,562	0,614	0,576	0,488	1,70

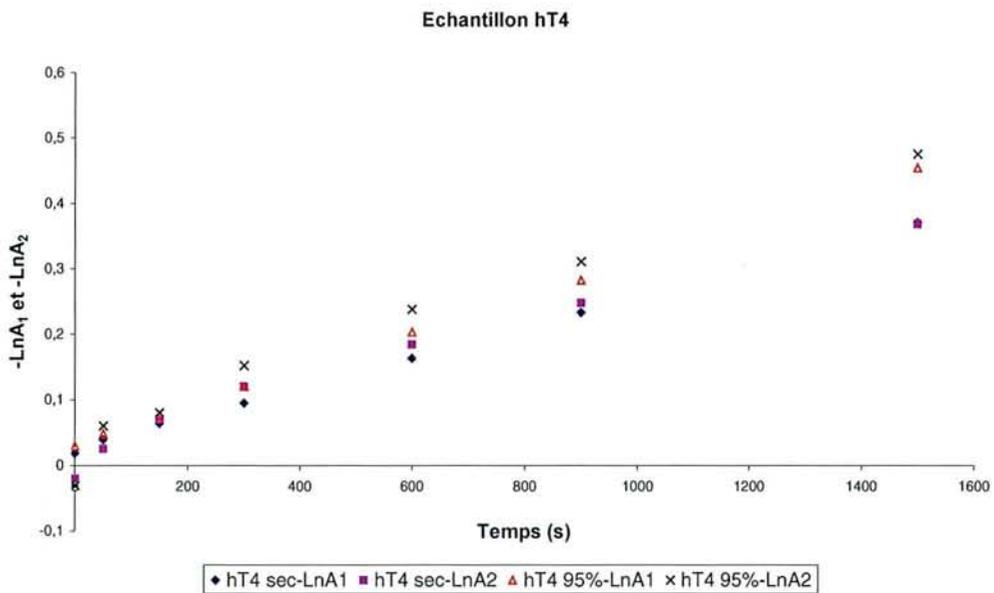
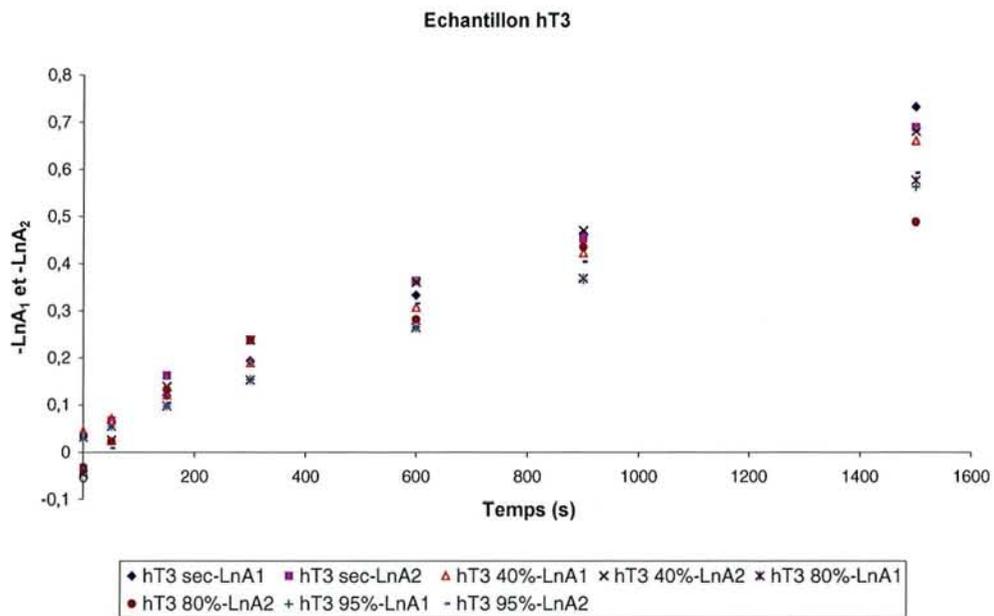
* Bois humide, Hr=95% :

Echantillon hT3 :

Temps (s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,16	26,24	0,969	1,034	0,031	-0,0333	1,66
50	0,46	25,71	0,947	0,992	0,054	0,008	1,65
150	0,99	24,58	0,908	0,901	0,097	0,104	1,61
300	1,69	23,66	0,857	0,827	0,154	0,190	1,59
600	2,90	22,46	0,768	0,730	0,264	0,315	1,58
900	3,91	21,68	0,694	0,668	0,365	0,403	1,59
1500	5,60	20,26	0,570	0,553	0,562	0,592	1,60

Echantillon hT4 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,13	25,90	0,971	1,032	0,029	-0,031	1,64
50	0,37	25,44	0,953	0,994	0,048	0,060	1,62
150	0,73	24,57	0,927	0,923	0,076	0,080	1,59
300	1,27	23,78	0,887	0,859	0,120	0,152	1,57
600	2,22	22,90	0,816	0,788	0,203	0,238	1,57
900	3,06	22,23	0,754	0,733	0,282	0,311	1,58
1500	4,66	20,87	0,635	0,622	0,454	0,475	1,58



Echantillon de 4 mm :* Bois sec :

Echantillon hT5 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,09	25,93	0,984	1,018	0,016	-0,018	1,64
50	0,28	25,23	0,970	0,961	0,030	0,040	1,61
150	0,62	24,71	0,944	0,919	0,058	0,084	1,59
300	1,05	24,39	0,913	0,893	0,091	0,113	1,60
600	1,86	23,80	0,853	0,845	0,159	0,168	1,61
900	2,53	23,18	0,803	0,795	0,219	0,229	1,61
1500	3,95	22,26	0,698	0,714	0,360	0,337	1,63

Echantillon hT6 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,09	28,81	0,999	1,001	0,001	-0,001	1,82
50	0,29	28,51	0,985	0,980	0,015	0,020	1,81
150	0,68	28,13	0,959	0,952	0,042	0,049	1,81
300	1,12	27,64	0,930	0,916	0,073	0,088	1,81
600	1,98	27,02	0,873	0,871	0,136	0,138	1,82
900	2,86	26,19	0,814	0,810	0,206	0,211	1,81
1500	4,26	25,40	0,721	0,752	0,327	0,285	1,85

* Bois humide, Hr=50% :

Echantillon hT5 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,10	26,20	0,974	1,028	0,026	-0,028	1,66
50	0,29	25,71	0,960	0,989	0,041	0,011	1,64
150	0,62	24,80	0,936	0,916	0,066	0,088	1,60
300	1,03	24,11	0,906	0,861	0,099	0,150	1,58
600	1,83	23,46	0,847	0,808	0,166	0,213	1,58
900	2,54	23,41	0,795	0,804	0,229	0,218	1,62
1500	3,88	22,14	0,697	0,702	0,361	0,354	1,62

* Bois humide, Hr=95% :

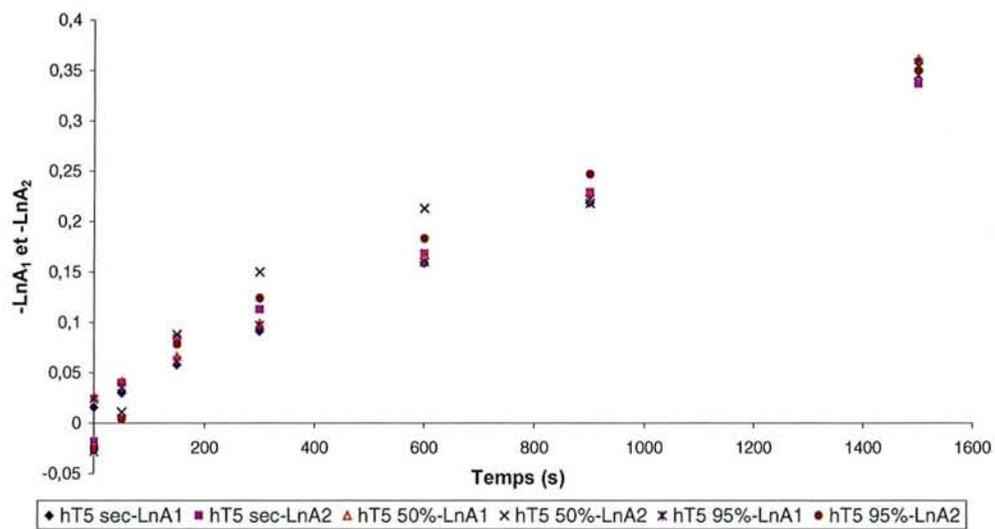
Echantillon hT5 :

	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,09	27,70	0,976	1,026	0,024	-0,026	1,75
50	0,25	27,31	0,965	0,996	0,036	0,004	1,74
150	0,62	26,37	0,940	0,925	0,062	0,078	1,70
300	1,08	25,82	0,908	0,883	0,097	0,124	1,69
600	1,89	25,16	0,852	0,833	0,160	0,183	1,69
900	2,62	24,48	0,801	0,781	0,222	0,247	1,69
1500	3,97	23,48	0,708	0,705	0,345	0,350	1,71

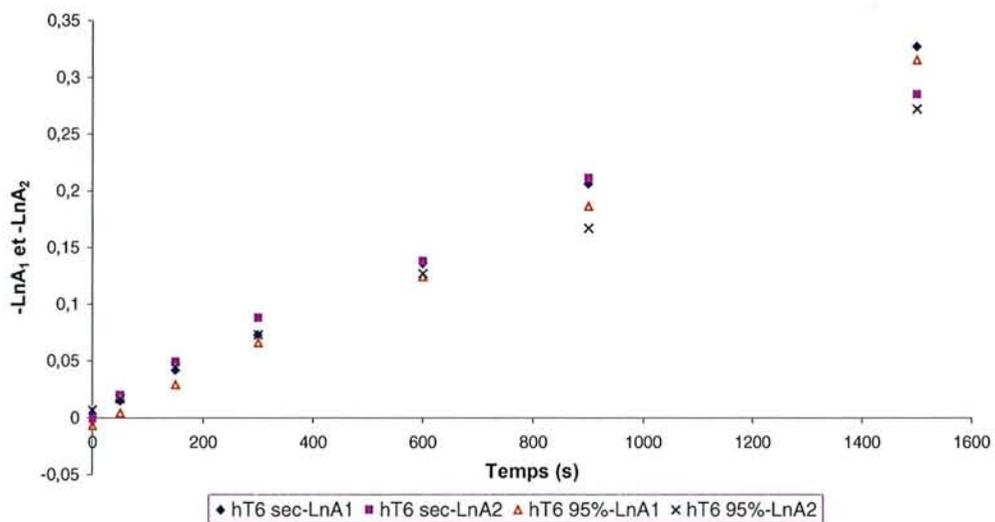
Echantillon hT6 :

Temps(s)	C1	C2	A1	A2	$-\ln(A1)$	$-\ln(A2)$	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,09	26,74	1,007	0,993	-0,007	0,007	1,69
50	0,24	26,62	0,996	0,983	0,004	0,017	1,69
150	0,58	26,27	0,971	0,956	0,029	0,045	1,69
300	1,08	25,94	0,936	0,930	0,066	0,073	1,70
600	1,81	25,32	0,883	0,881	0,124	0,127	1,70
900	2,55	24,88	0,830	0,846	0,186	0,167	1,71
1500	3,95	23,81	0,730	0,762	0,315	0,272	1,73

Echantillon hT5



Echantillon hT6



MESURE RADIALE DE LA DIFFUSION :

Echantillon de 1 mm :

☉ Bois sec :

Echantillon hR1 :

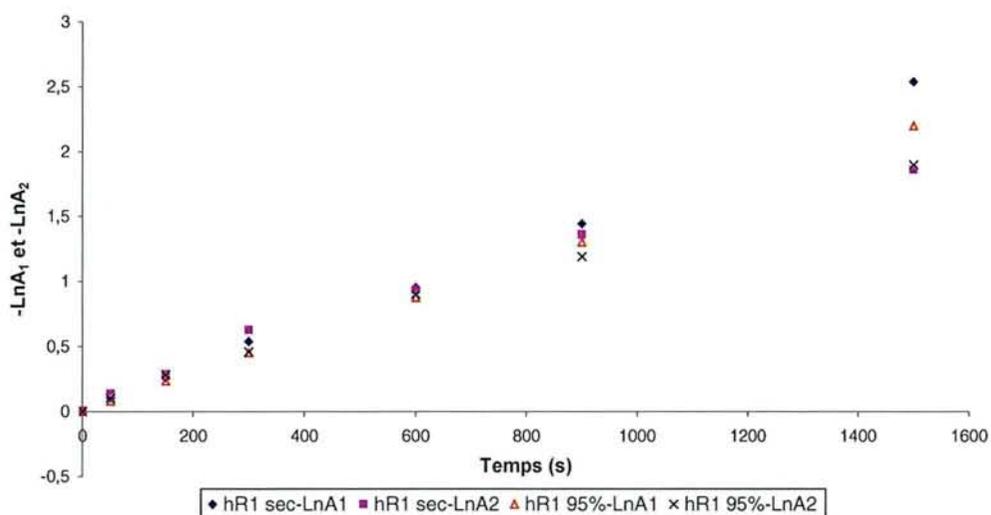
Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,68	25,20	1,004	0,995	-0,004	0,005	1,63
50	2,02	23,76	0,900	0,872	0,105	0,137	1,61
150	3,69	22,37	0,770	0,753	0,261	0,284	1,62
300	6,07	19,81	0,584	0,534	0,538	0,627	1,60
600	8,62	18,15	0,386	0,392	0,952	0,936	1,64
900	10,54	16,57	0,236	0,257	1,444	1,359	1,65
1500	12,56	15,39	0,079	0,156	2,538	1,858	1,69

☉ Bois humide, Hr=95% :

Echantillon hR1 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,62	27,59	0,998	1,002	0,002	-0,001	1,77
50	1,67	26,31	0,924	0,902	0,079	0,103	1,75
150	3,55	24,40	0,791	0,754	0,234	0,282	1,74
300	5,72	22,83	0,637	0,632	0,451	0,459	1,78
600	8,84	19,93	0,416	0,406	0,877	0,901	1,76
900	10,87	18,62	0,272	0,304	1,302	1,191	1,80
1500	13,14	16,63	0,111	0,150	2,198	1,897	1,80

Echantillon hR1



Echantillon de 2 mm :

* Bois sec :

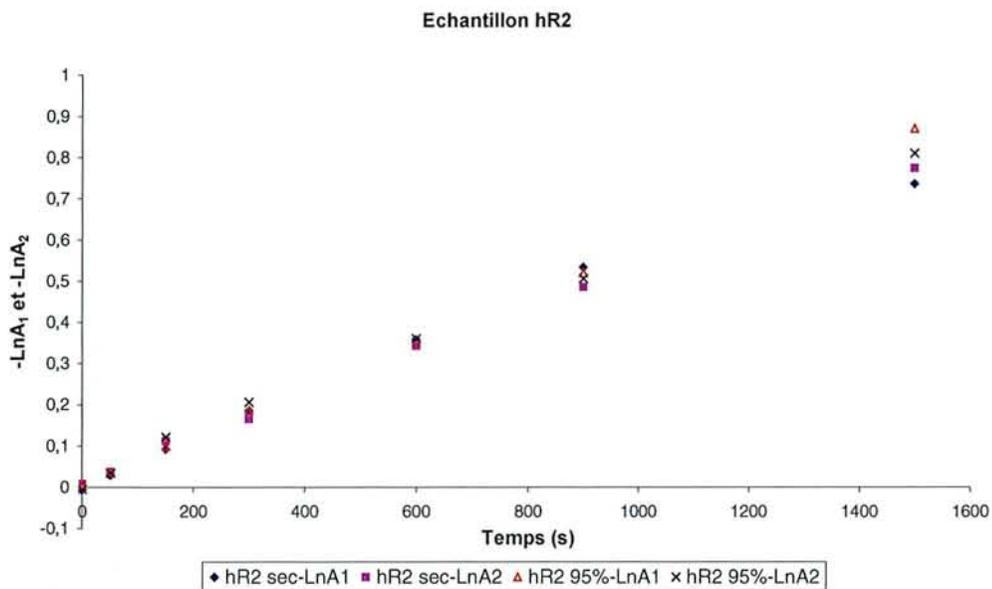
Echantillon hR2 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,27	26,12	1,006	0,993	-0,006	0,007	1,66
50	0,74	25,77	0,971	0,965	0,029	0,036	1,67
150	1,56	24,90	0,911	0,894	0,093	0,112	1,66
300	2,63	24,33	0,831	0,848	0,185	0,165	1,68
600	4,41	22,63	0,700	0,710	0,357	0,342	1,68
900	5,93	21,47	0,587	0,616	0,533	0,485	1,69
1500	7,40	19,56	0,479	0,461	0,736	0,774	1,66

* Bois humide, Hr=95 % :

Echantillon hR2 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,24	25,33	0,995	1,005	0,005	-0,005	1,61
50	0,64	24,87	0,965	0,967	0,036	0,034	1,60
150	1,41	23,90	0,906	0,886	0,099	0,121	1,59
300	2,41	23,05	0,830	0,814	0,186	0,206	1,59
600	4,08	21,66	0,703	0,698	0,352	0,360	1,60
900	5,50	20,52	0,595	0,603	0,519	0,506	1,61
1500	7,81	18,63	0,419	0,445	0,870	0,810	1,62



Echantillon de 4 mm :

* Bois sec :

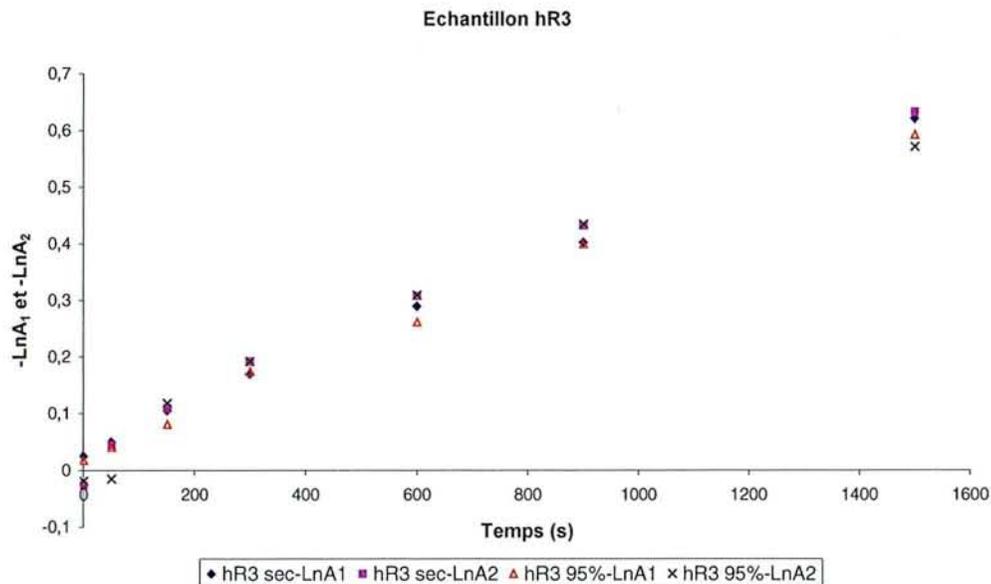
Echantillon hR3 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,22	33,14	0,975	1,027	0,025	-0,027	2,10
50	0,64	32,04	0,951	0,957	0,050	0,044	2,06
150	1,52	31,09	0,900	0,897	0,105	0,109	2,05
300	2,48	29,96	0,844	0,825	0,170	0,192	2,03
600	4,12	28,56	0,749	0,735	0,289	0,308	2,04
900	5,49	27,21	0,669	0,649	0,402	0,432	2,03
1500	7,76	25,37	0,538	0,532	0,620	0,631	2,04

* Bois humide, Hr=95% :

Echantillon hR3 :

Temps	C1	C2	A1	A2	-ln(A1)	-ln(A2)	$C_1V_1+C_2V_2$
0	0,17	25,78	0,983	1,019	0,017	-0,019	1,63
50	0,48	25,73	0,960	1,015	0,041	-0,015	1,65
150	0,99	24,20	0,922	0,889	0,081	0,118	1,58
300	2,09	23,42	0,840	0,825	0,174	0,192	1,60
600	3,02	2,230	0,770	0,734	0,261	0,309	1,58
900	4,35	21,25	0,671	0,648	0,399	0,434	1,59
1500	5,93	20,24	0,553	0,565	0,592	0,571	1,62



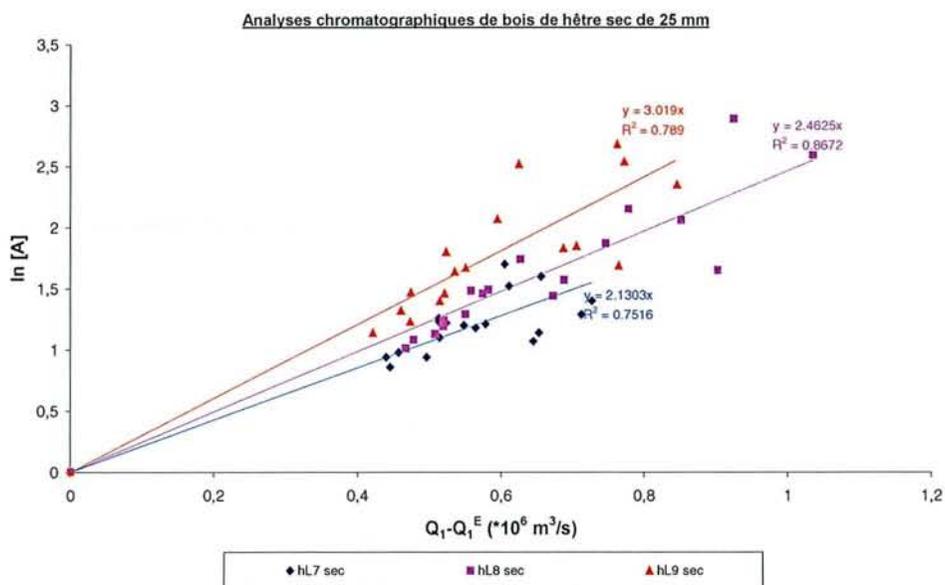
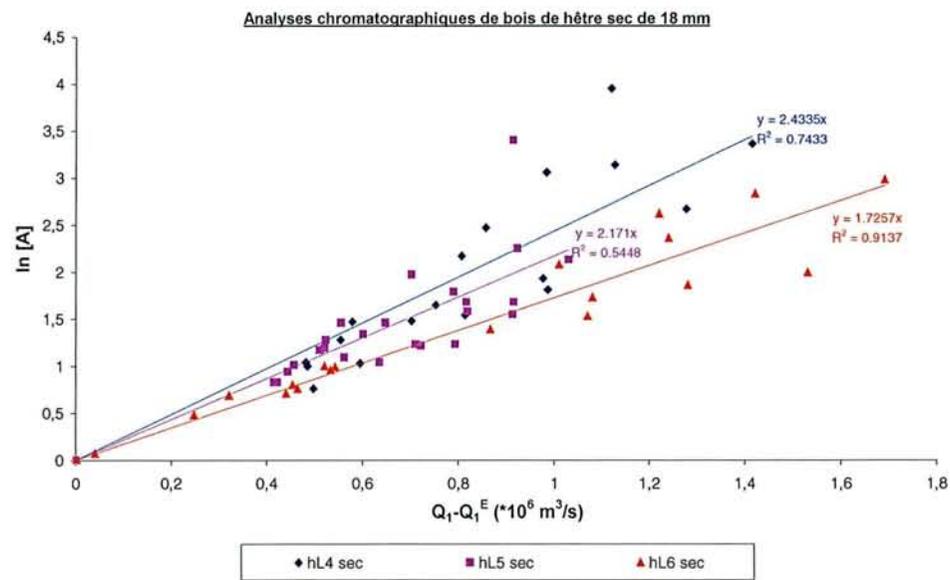
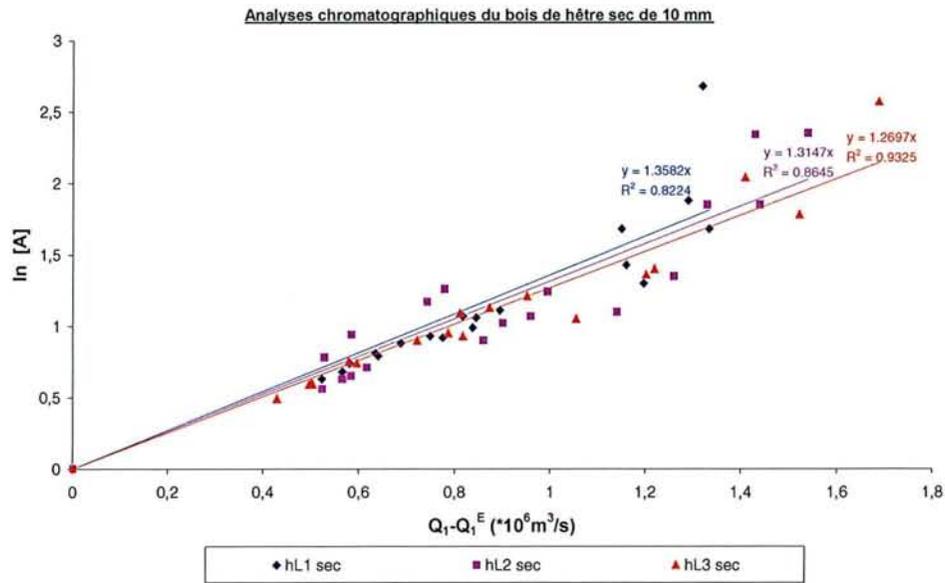
- Cas de la direction longitudinale

ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES

☼ Bois sec :

Echantillon	Pente (*10 ⁶ m ⁻³ .s)	D _I (*10 ⁵ m ² .s ⁻¹)
h1L	1,3073	1,34
	1,5414	1,13
	1,2135	1,44
h2L	1,0511	1,66
	1,4610	1,20
	1,3850	1,26
h3L	1,2916	1,35
	1,1475	1,52
	1,3231	1,32
h4L	2,5529	1,23
	2,3640	1,33
	2,4170	1,30
h5L	1,9421	1,62
	1,7699	1,78
	2,2062	1,42
h6L	1,7165	1,83
	1,7622	1,78
	1,7059	1,84
h7L	2,3110	1,89
	2,1883	2,00
	1,8922	2,31
h8L	2,2835	1,91
	2,6876	1,62
	2,4585	1,78
h9L	2,9023	1,50
	3,0801	1,42
	3,0854	1,42

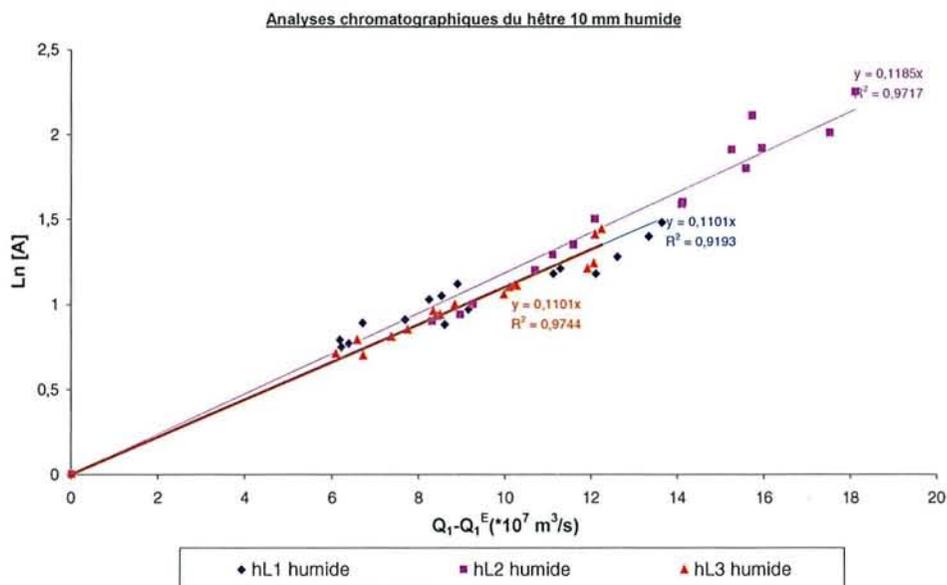
Tableau récapitulatif des pentes et des coefficients de diffusion apparents associés dans des échantillons de bois de hêtre secs

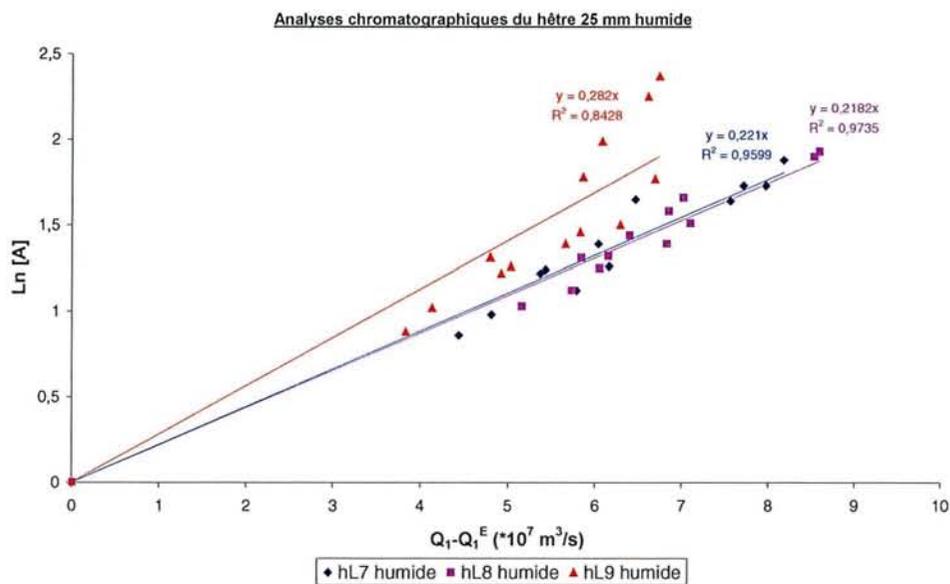
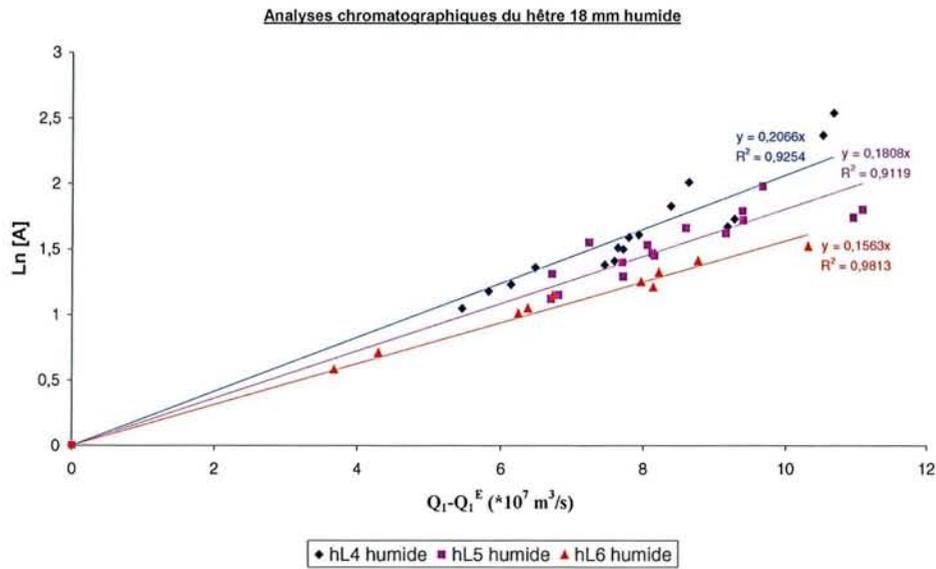


⊗ Bois humide (x = 13%) :

Echantillon	Pente (*10 ⁶ m ⁻³ .s)	D ₁ (*10 ⁵ m ² .s ⁻¹)
h1L	1,074	1,63
	1,122	1,56
h2L	1,144	1,53
	1,220	1,43
h3L	1,075	1,62
	1,125	1,55
h4L	2,183	1,44
	1,933	1,63
h5L	1,695	1,85
	1,939	1,62
h6L	1,542	2,04
	1,626	1,93
h7L	2,171	2,01
	2,278	1,92
h8L	2,152	2,03
	2,258	1,93
h9L	2,486	1,76
	3,195	1,37

Tableau récapitulatif des pentes et des coefficients de diffusion apparents associés dans des échantillons de bois de hêtre humides



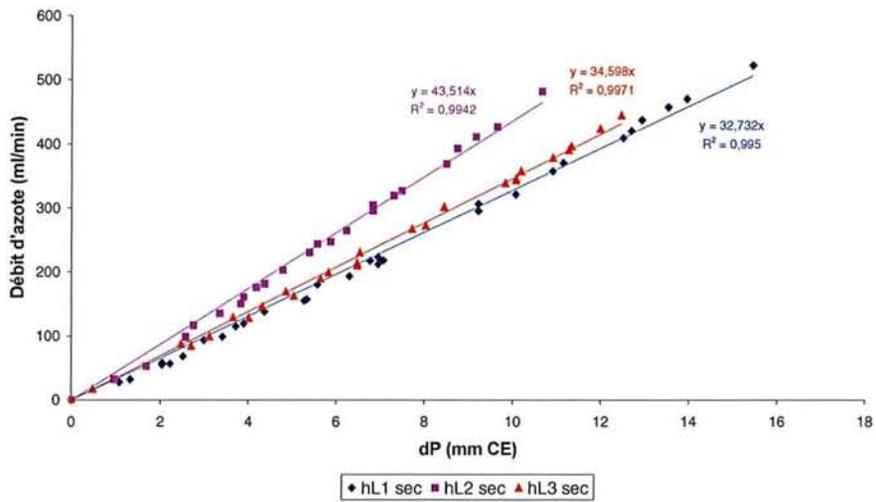


PERMEAMETRIE A L'AZOTE :

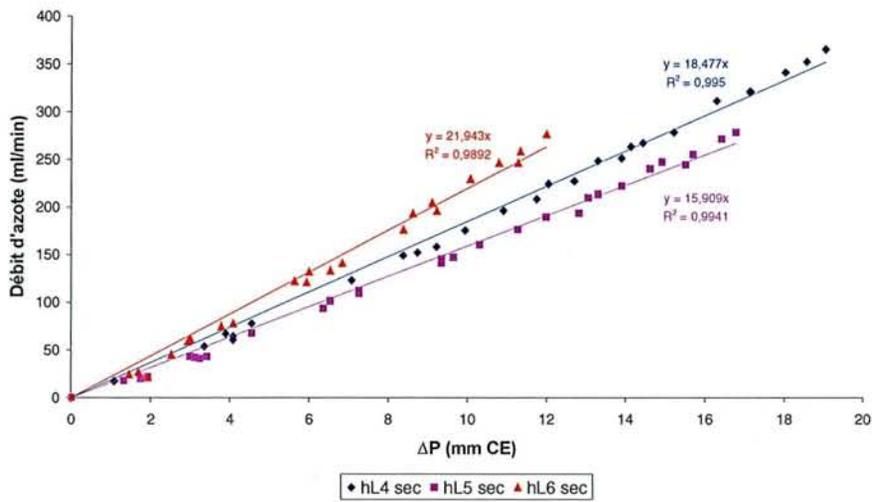
Ci-dessous sont données les représentations graphiques du débit d'azote en fonction de la différence de pression appliquée, les données expérimentales étant mentionnées dans le chapitre III.

Bois sec :

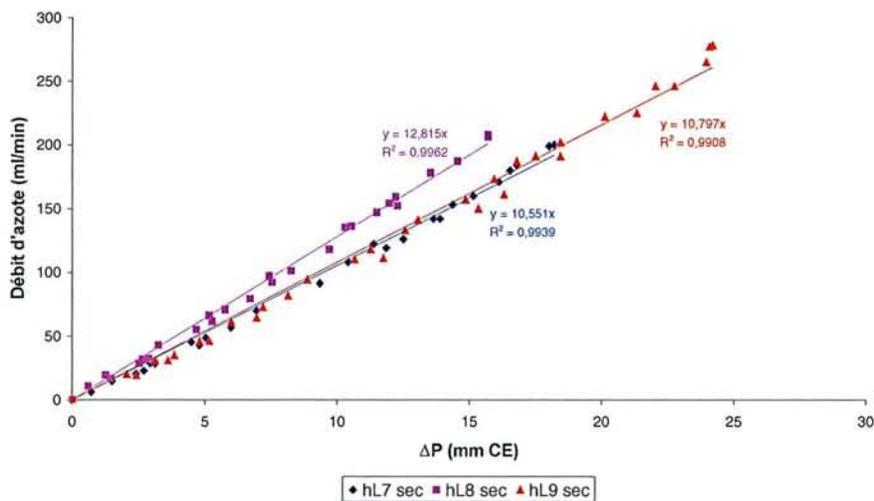
Perméabilité à l'azote du hêtre 10 mm sec



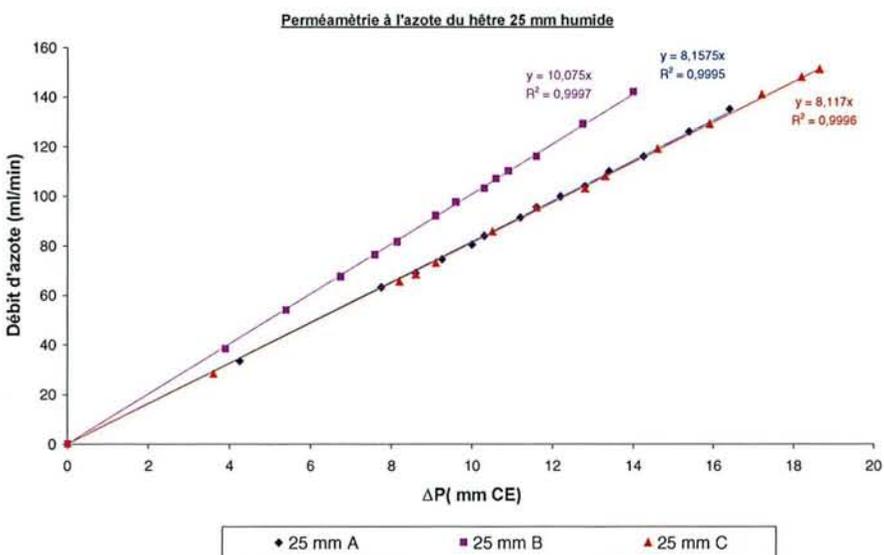
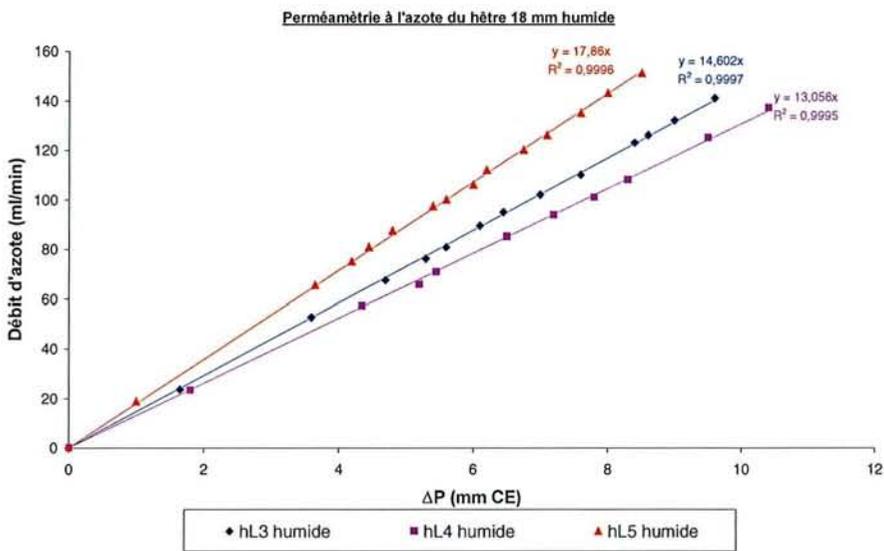
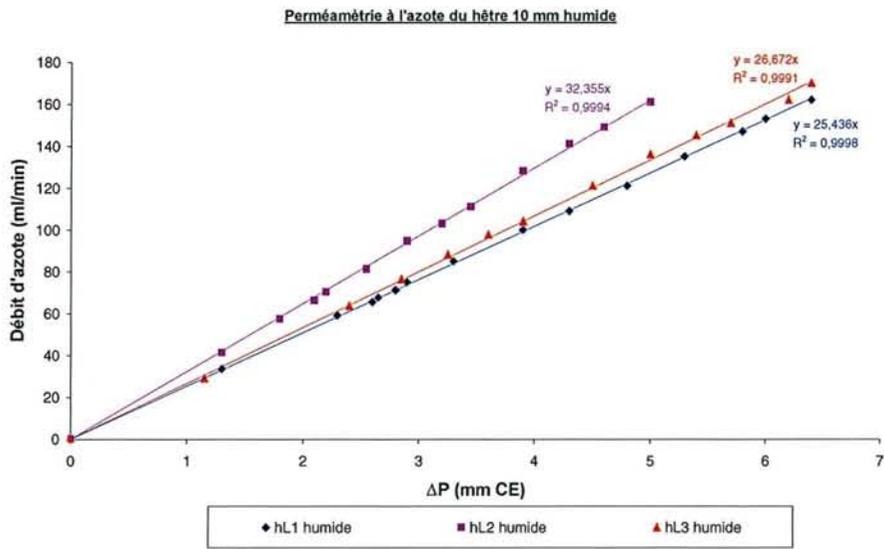
Perméabilité à l'azote du hêtre 18 mm sec



Perméabilité à l'azote du hêtre 25 mm sec



☼ Bois humide (x = 13%) :



ANNEXE 4

RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LA CELLULE DE DIFFUSION EN ALUMINIUM

Ci-dessous sont reportées les différentes grandeurs mesurées pour les échantillons de hêtre et d'épicéa dans les trois directions orthotropiques, ainsi que les mesures de perméamétrie à l'azote d'autre part.

ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES (directions tangentielle et radiales)

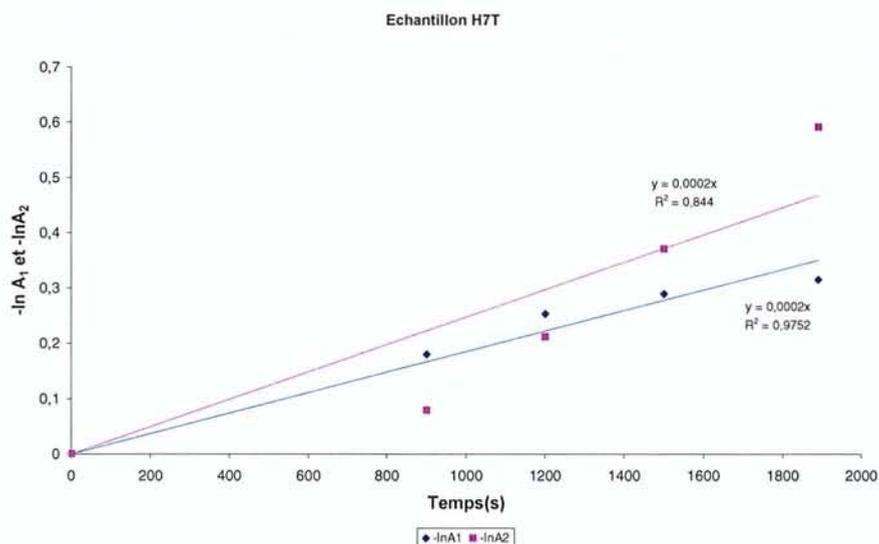
* Hêtre tangentiel

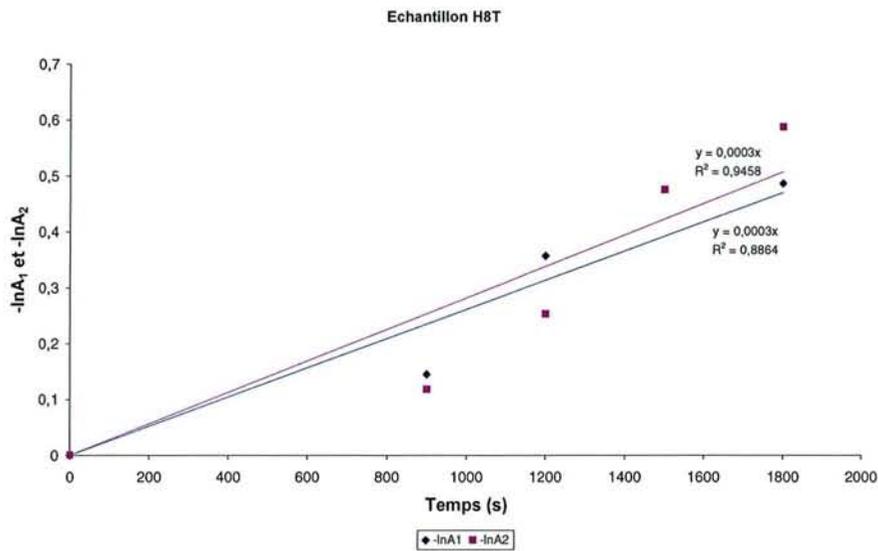
H7T

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	37373	0	36,00	0	42,56	0	0	0
1200	33808	4182	32,56	4,03	38,50	4,76	0,253	0,212
1890	29036	5048	27,97	4,86	33,07	5,75	0,315	0,591
0	34902	0	33,62	0	39,75	0	0	0
900	33574	2878	32,34	2,77	38,24	3,28	0,180	0,079
1500	29507	4383	28,42	4,22	33,60	4,99	0,289	0,370

H8T

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	35552	0	34,24	0	40,56	0	0	0
1200	31575	5332	30,41	5,14	36,03	6,09	0,357	0,253
1800	27654	6846	26,63	6,59	31,55	7,81	0,486	0,587
0	34480	0	33,21	0	39,34	0	0	0
900	32565	2327	31,36	2,24	37,15	2,65	0,145	0,118
1500	27961	2621 ?	26,93	2,52 ?	31,90	2,99 ?	0,165 ?	0,475





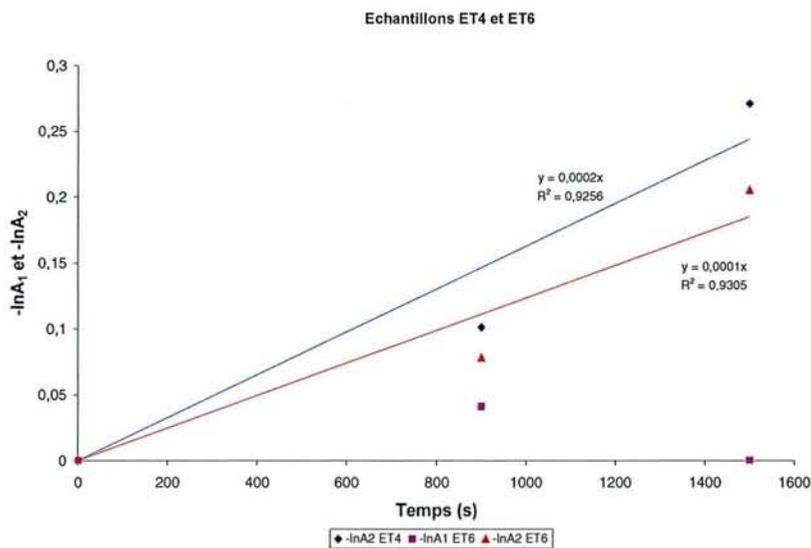
✳ Epicéa tangentiel

ET4

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	35523	0	34,21	0	40,32	0	0	0
900	33820	0	32,57	0	38,38	0	0	0,101
1500	31316	0	30,16	0	35,54	0	0	0,271

ET6

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	37669	0	36,28	0	42,76	0	0	0
900	36269	756	34,93	0,73	41,16	0	0,041	0,078
1500	34181	0	32,92	0	38,80	0	0	0,205



* Hêtre radial

H11R

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	34776	0	33,49	0	39,68	0	0	0
1200	30114	3149	29,00	3,03	34,36	3,59	0,200	0,312
1800	27205	5540	26,20	5,34	31,04	6,33	0,384	0,572
0	36712	0	35,36	0	41,89	0	0	0
900	34630	3933	33,35	3,79	39,51	4,49	0,241	0,121
1500	31139	5223	29,99	5,03	35,53	5,96	0,335	0,362

H13R

Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	35966	0	34,64	0	41,09	0	0	0
1200	31554	4492	30,39	4,33	36,05	5,14	0,288	0,281
1800	27652	5920	26,63	5,70	31,59	6,76	0,399	0,621
0	37257	0	35,88	0	42,57	0	0	0
900	33551	3823	32,31	3,68	38,33	4,37	0,230	0,222
1500	31510	5419	30,35	5,22	36,01	6,19	0,344	0,368

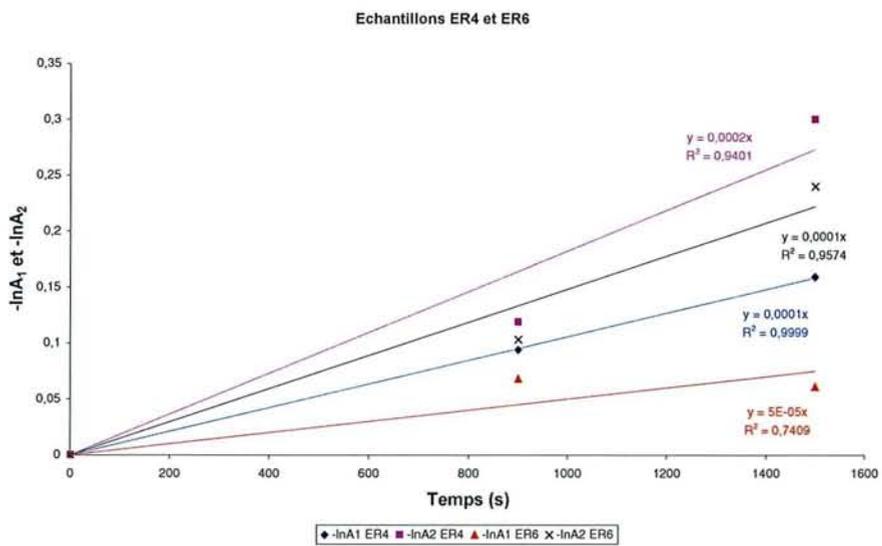
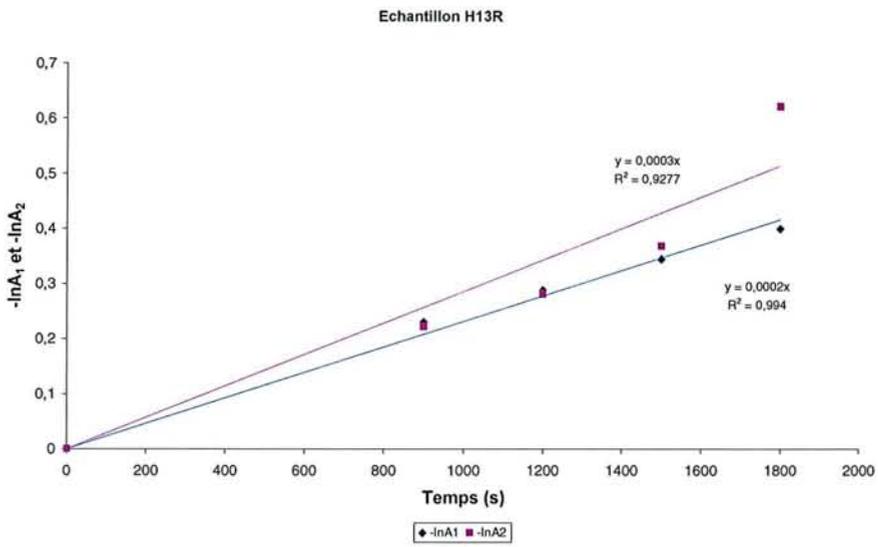
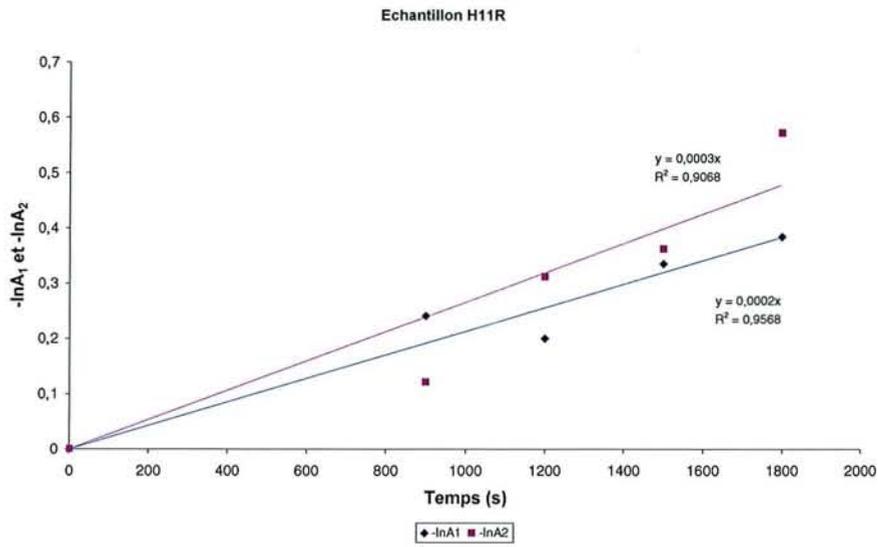
* Epicéa radial

ER4

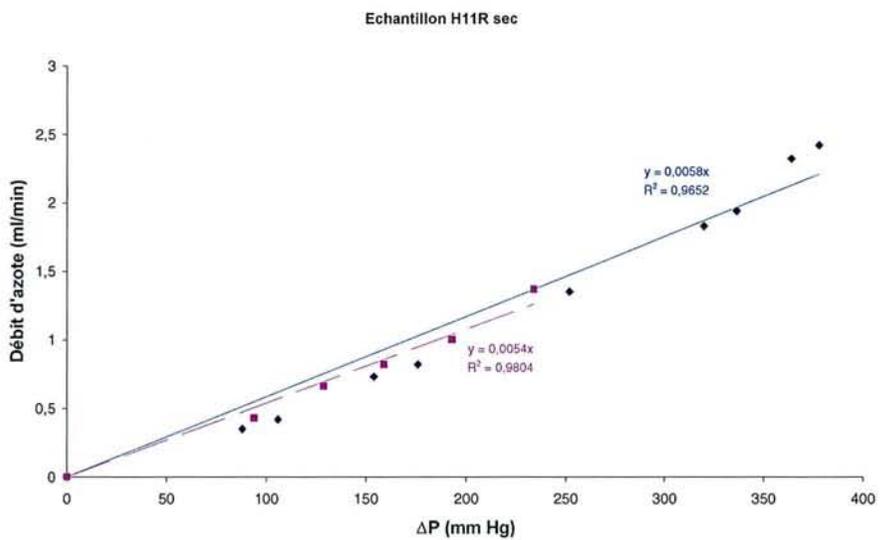
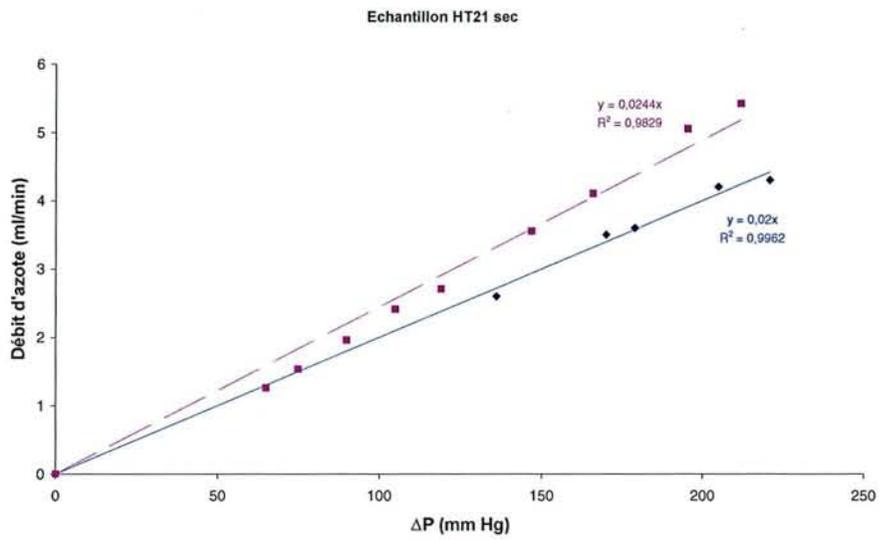
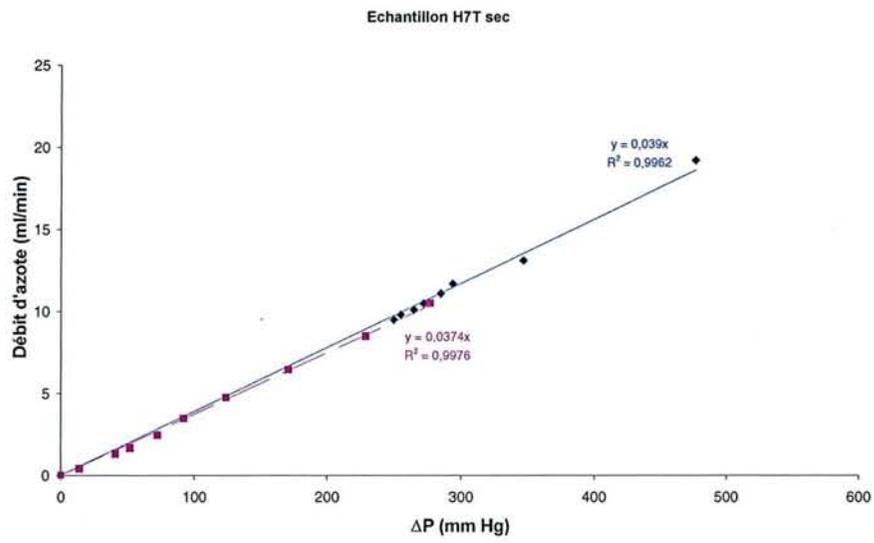
Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	38232	0	36,82	0	43,39	0	0	0
900	36077	1716	34,75	1,65	40,95	1,94	0,094	0,119
1500	33271	2807	32,04	2,70	37,76	3,18	0,159	0,300

ER6

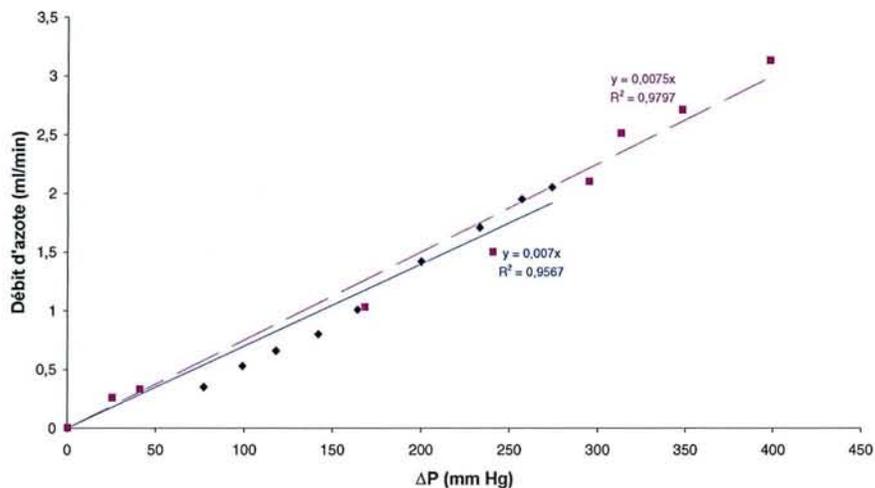
Temps (s)	Surface cell He	Surface cell N ₂	C _{b2}	C _{b1}	C ₂	C ₁	-ln A ₁	-ln A ₂
0	35187	0	33,89	0	39,94	0	0	0
900	33461	1152	32,23	1,11	37,98	1,31	0,068	0,103
1500	31443	1047	30,28	1,01	35,68	1,19	0,061	0,240



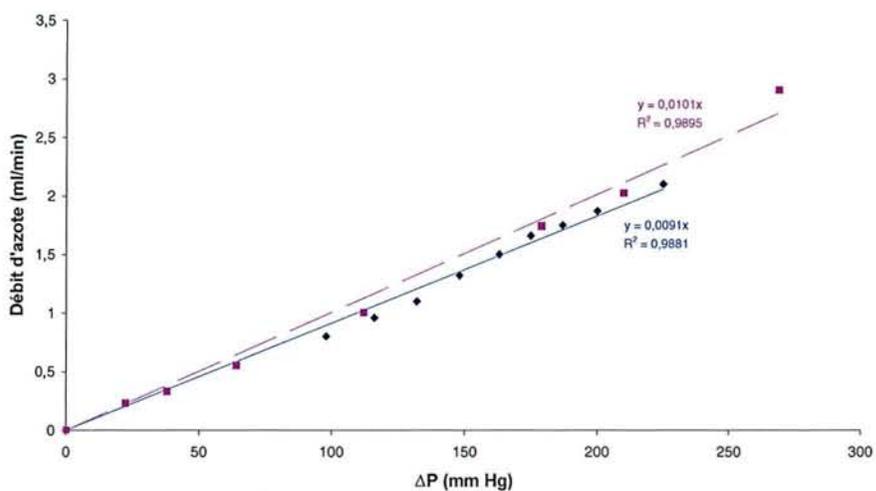
PERMEAMETRIE A L'AZOTE (directions tangentielle et radiales)



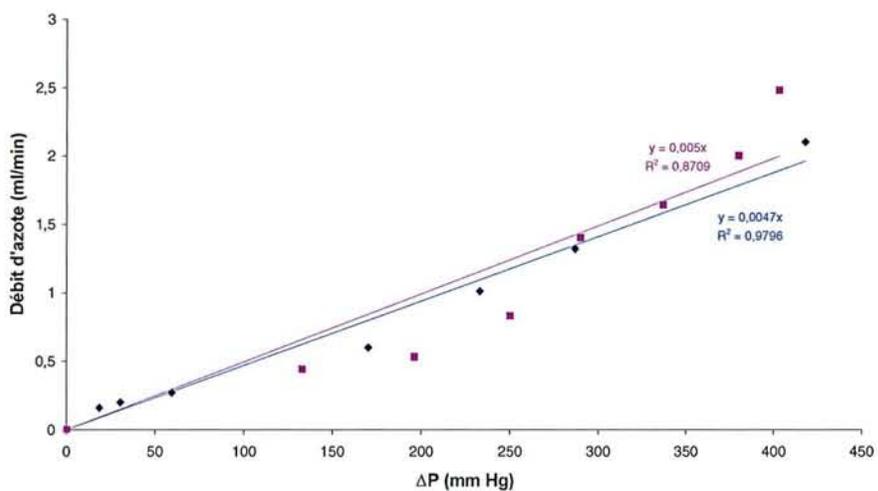
Echantillon H13R sec

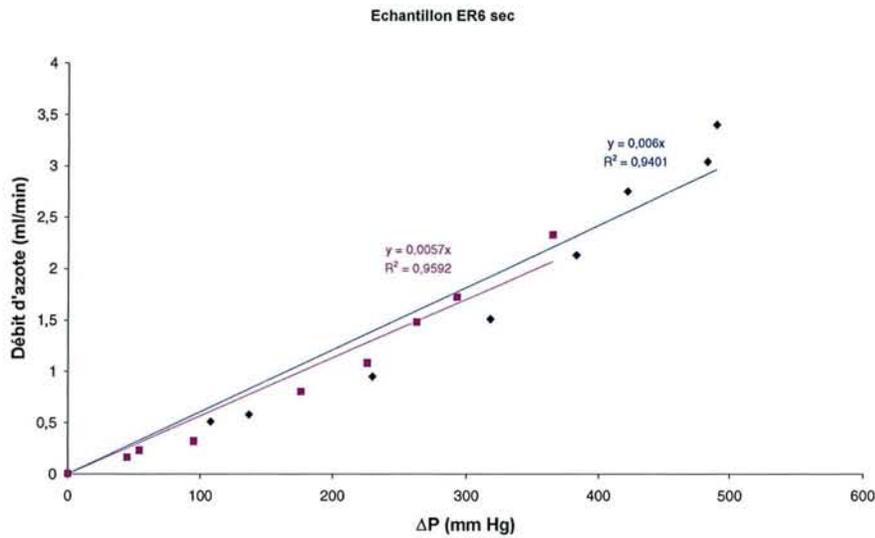


Echantillon HR21 sec



Echantillon ER4 sec





ANALYSES CHROMATOGRAPHIQUES (direction longitudinale)

Q_{IE} , Q_{IS} , q_1^S et q_1^E sont exprimés en ml/min et C_1^E , C_1 et C_2 en mol/m³.
 $Q_{IS}-Q_{IE}$ est exprimé en 10⁻⁷ m³/s.

* Etude de HL11

Premier essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
3,9	4,22	0,231	4,14	0,226
2,9	2,41	0,120	2,07	0,100

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
53,6	68,08 et 66,00	39,44	26,27	21,07	2,9
53,18	78,50 et 78,0	39,44	23,23	16,22	3,9

Pente de $0,0534 \cdot 10^7$ s/m³ soit $D_{He}(HL11) = 0,95 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

Second essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
2,2	2,75	0,113	2,62	0,107
3,2	3,99	0,260	4,27	0,282

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
54,21	70,70 et 69,90	40,27	25,08	19,68	2,2
54,87	78,80 et 80,5	40,27	24,38	15,99	3,2

Pente de $0,0583 \cdot 10^7$ s/m³ soit $D_{He}(HL11) = 0,85 \cdot 10^{-5}$ m²/s.

* Etude de 3352BPremier essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
11,6	0,253	0,022	0,478	0,036
14,2	0,560	0,047	0,745	0,064

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
56,13	57,65 et 59,00	39,73	27,47	20,24	11,6
55,93	59,29 et 60,40	39,73	28,15	19,24	14,2

Pente de $0,0833 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(3352B) = 0,90 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Second essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
12,3	0,557	0,029	0,435	0,023
16,3	1,120	0,084	1,010	0,076

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
55,89	59,23 et 58,50	40,08	26,06	19,09	12,3
55,74	62,45 et 61,80	40,08	25,40	15,52	16,3

Pente de $0,0710 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(3352B) = 1,06 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

* Etude de EL6Premier essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
4,0	1,58	0,05	1,40	0,04
4,9	1,98	0,06	2,06	0,07
5,5	2,73	0,08	2,54	0,07

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
52,22	61,71 et 60,60	40,07	27,20	23,84	4,0
52,43	64,31 et 64,80	40,07	25,75	21,67	4,9
52,68	39,04 et 67,90	40,07	24,54	20,51	5,5

Pente de $0,0280 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(EL6) = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

Second essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
5,8	1,88	0,080	2,06	0,088
7,4	3,24	0,072	3,07	0,069

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
54,67	65,92 et 67,00	39,70	24,75	19,25	5,8
54,39	73,82 et 72,80	39,70	21,76	18,40	7,4

Pente de $0,0280 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(EL6) = 1,07 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

※ Etude de EL39

Pour cet échantillon, il fut très difficile d'obtenir $Q_2 > Q_1$. D'où la nécessité d'utiliser un autre manomètre à eau de plage plus grande et de commencer par une différence de pression de 49 mm CE.

Premier essai :

ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
49	0,543	0,030	0,700	0,039
60	1,260	0,054	0,700	0,029
73	2,770	0,132	2,950	0,143

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
57,60	60,86 et 61,80	39,64	21,15	11,95	49
60,19	67,73 et 64,40	39,64	18,89	9,92	60
57,53	74,13 et 75,20	39,64	17,73	8,18	73

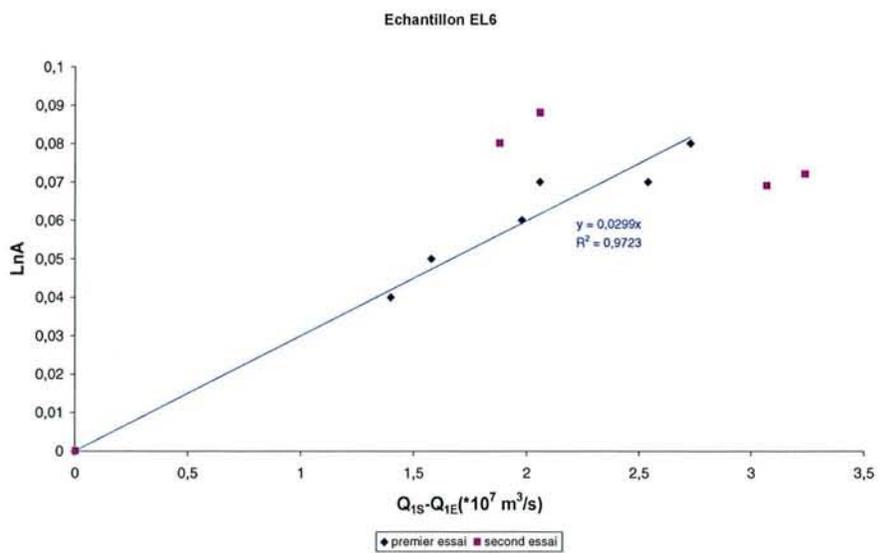
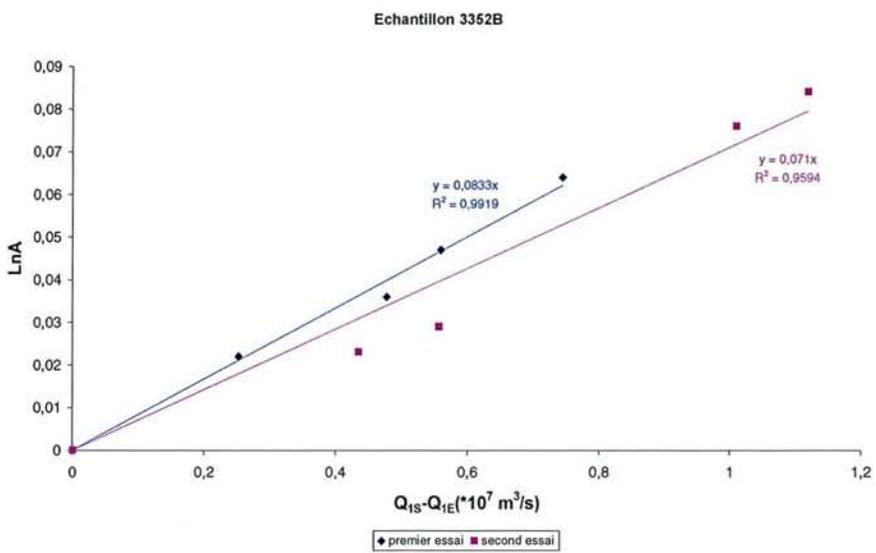
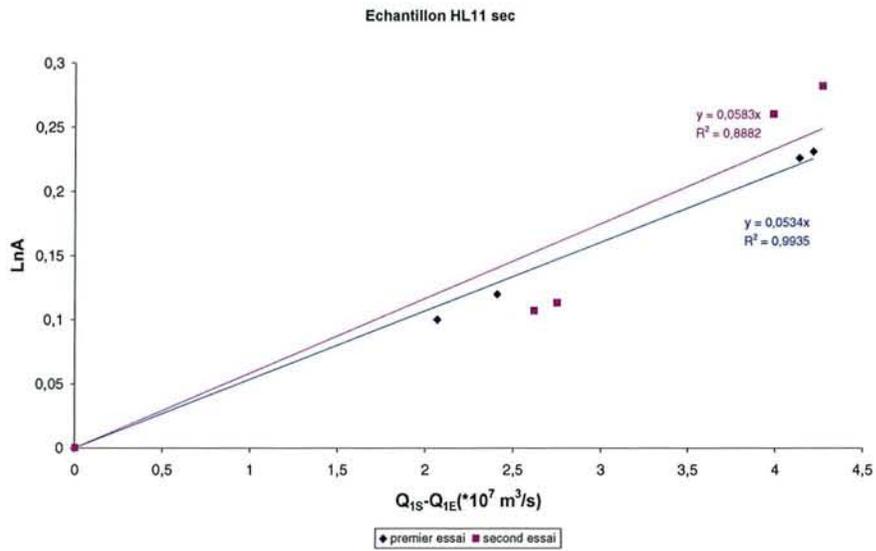
Pente de $0,0478 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(EL39) = 0,62 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

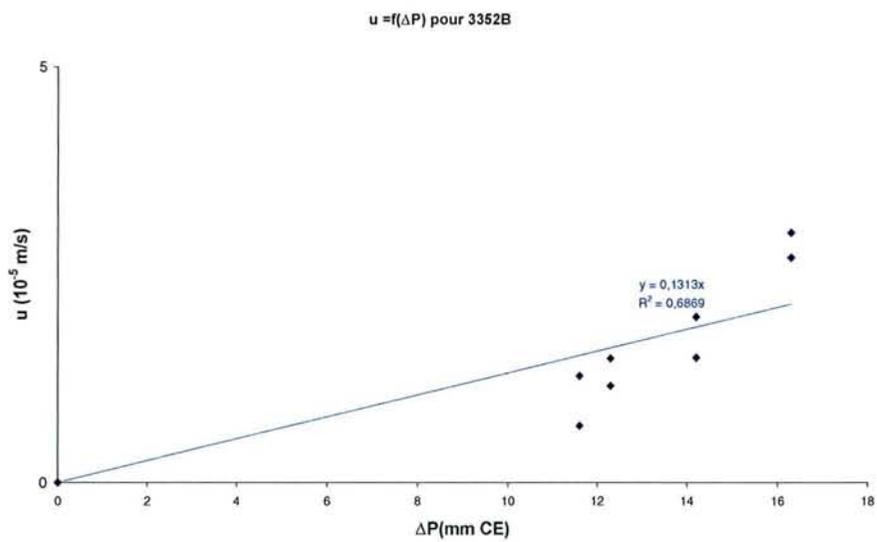
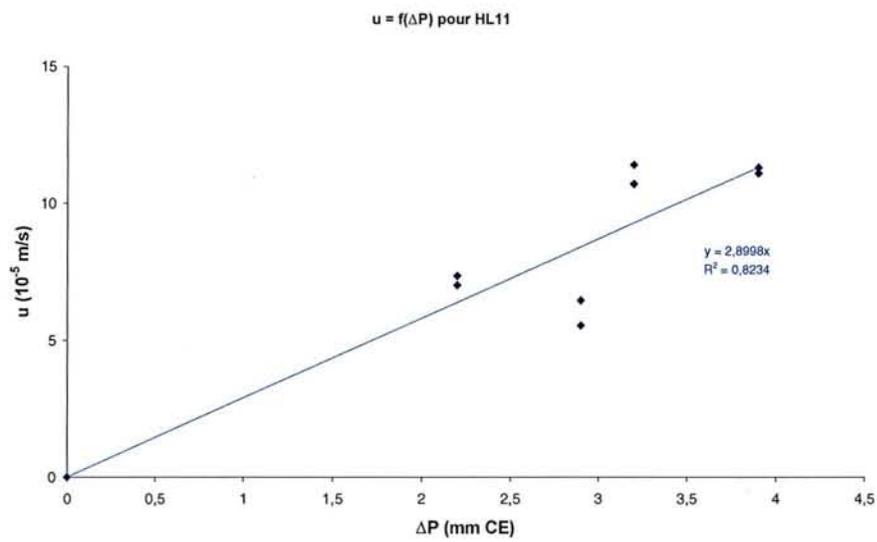
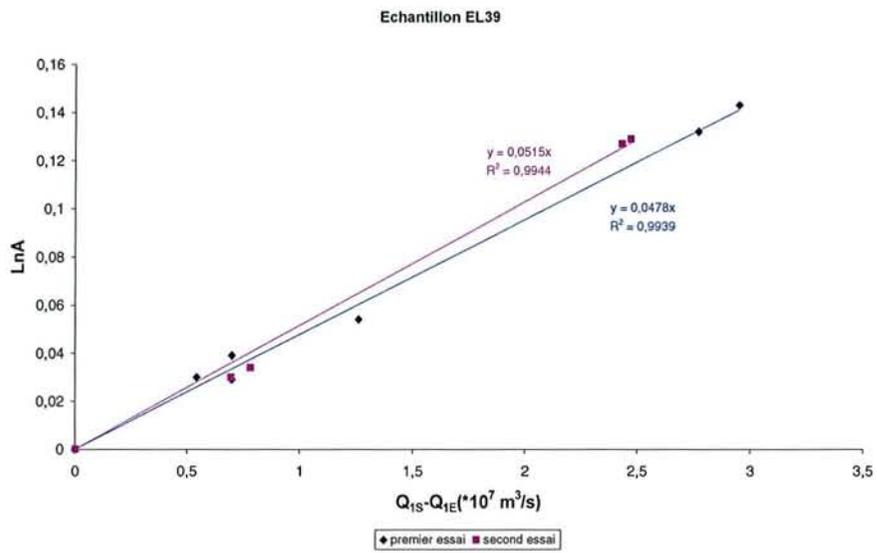
Second essai :

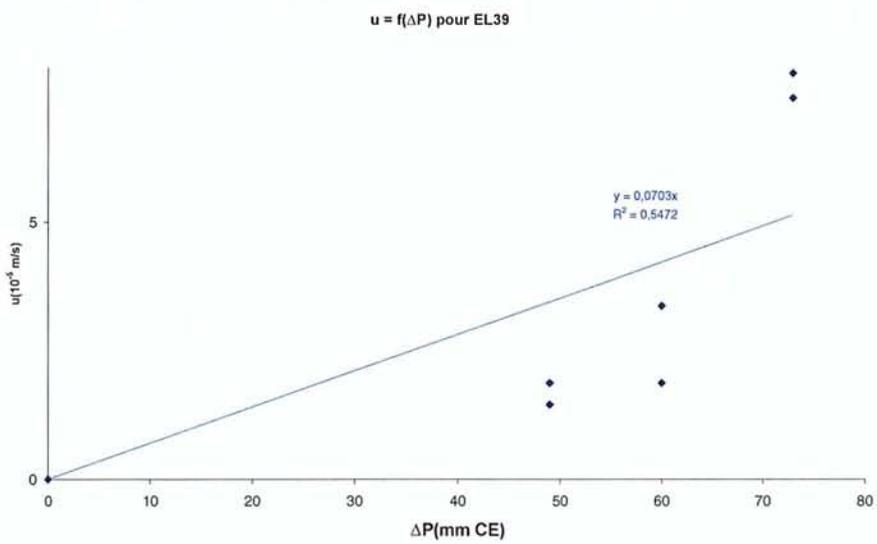
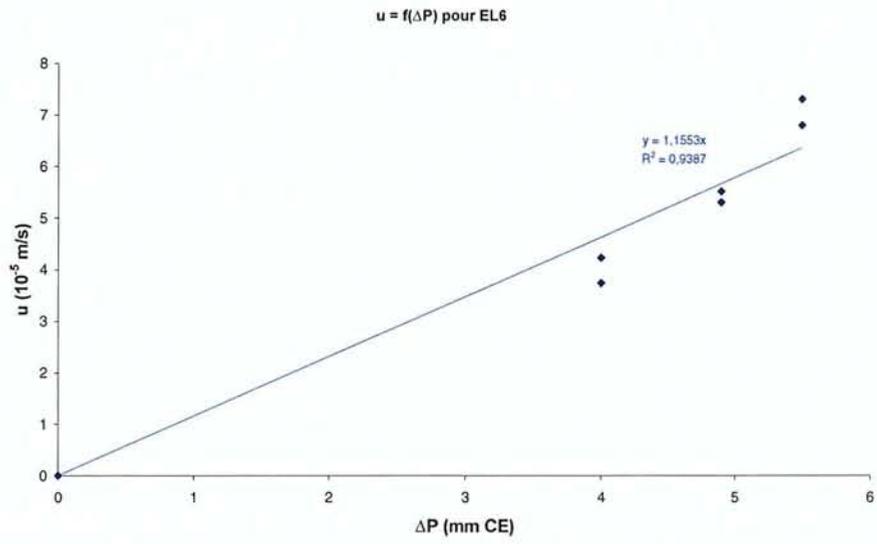
ΔP (mm CE)	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$	$Q_{IS}-Q_{IE}$	$\ln[A]$
51	0,695	0,030	0,783	0,034
69	2,430	0,127	2,470	0,129

Q_{IE}	Q_{IS}	C_1^E	C_1	C_2	ΔP
60,1	64,27 et 64,80	39,93	19,73	10,77	51
57,8	72,37 et 72,60	39,93	19,08	9,13	69

Pente de $0,0515 \cdot 10^7 \text{ s/m}^3$ soit $D_{He}(EL39) = 0,58 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$.

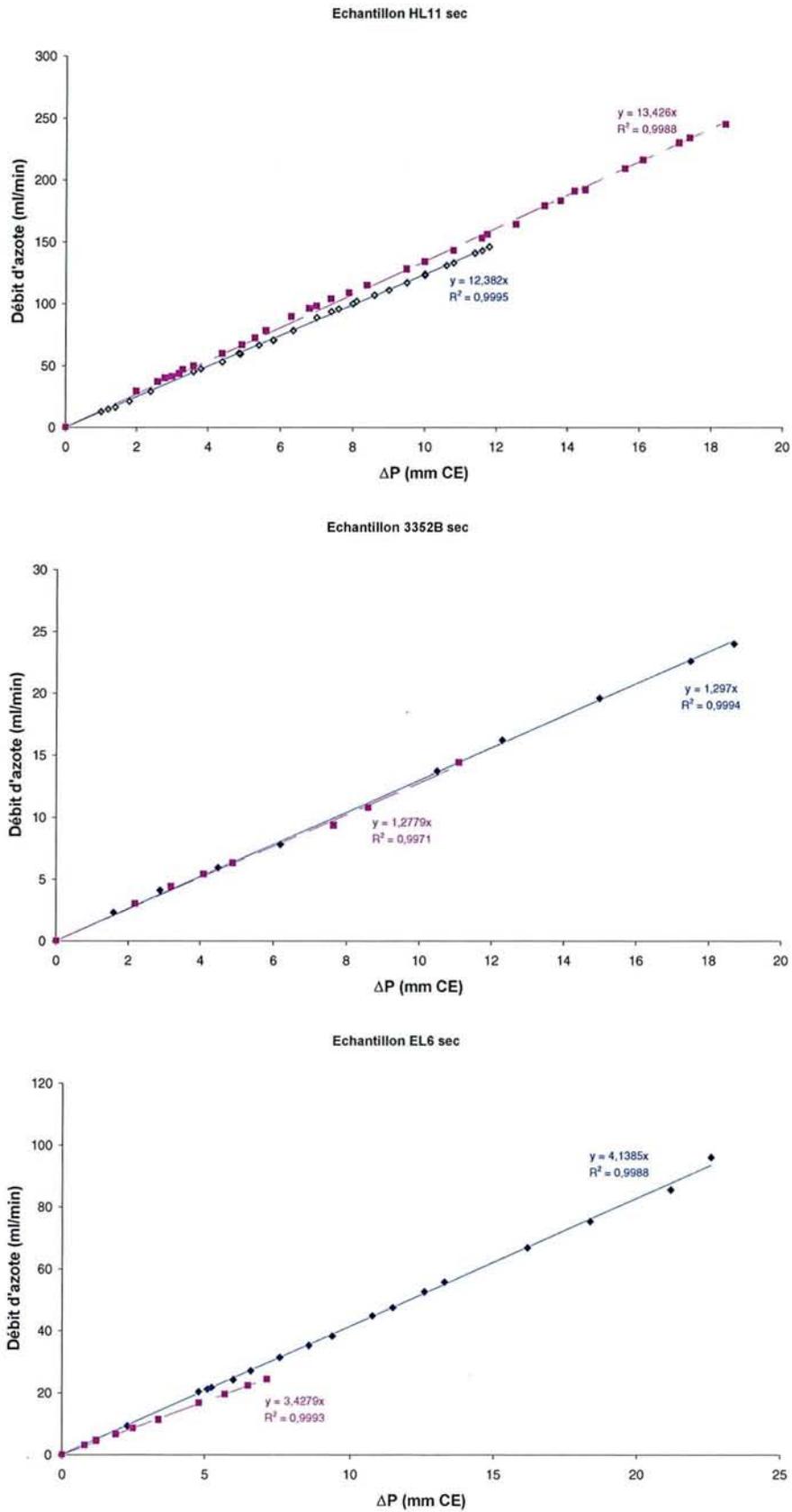


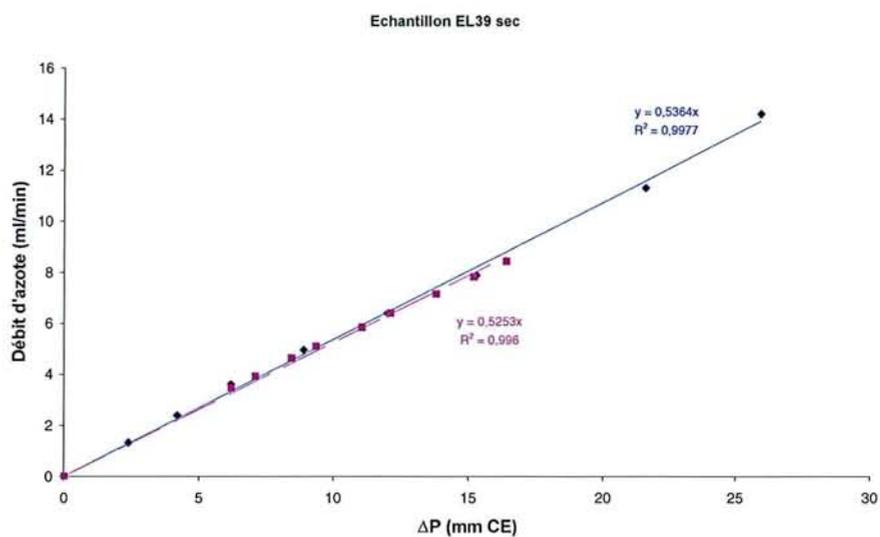




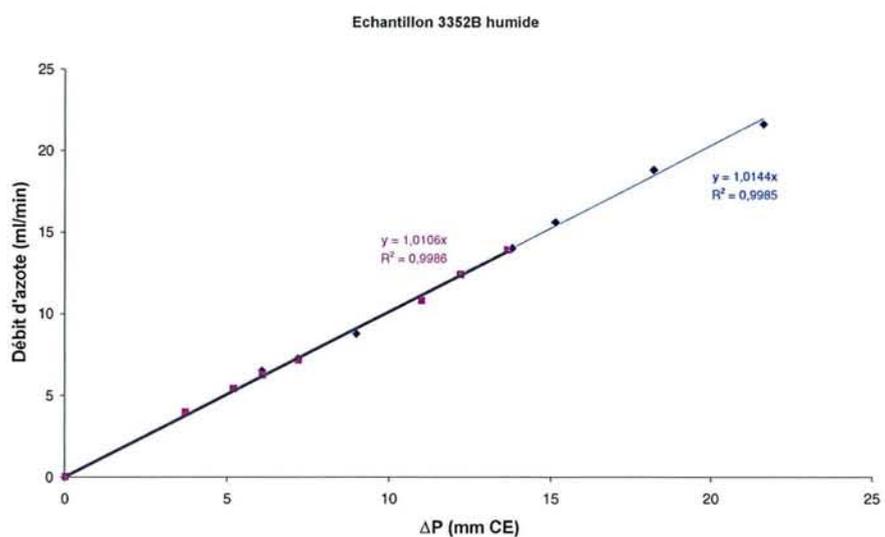
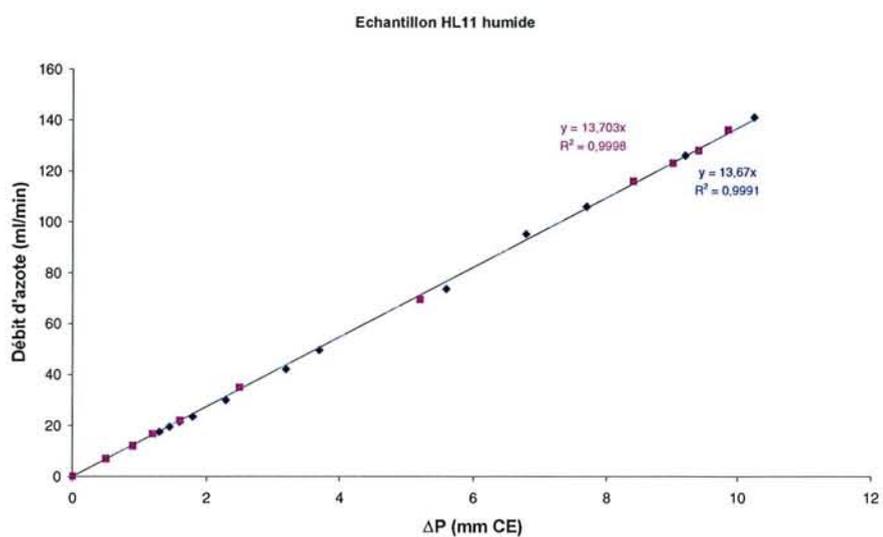
PERMEAMETRIE A L'AZOTE (direction longitudinale)

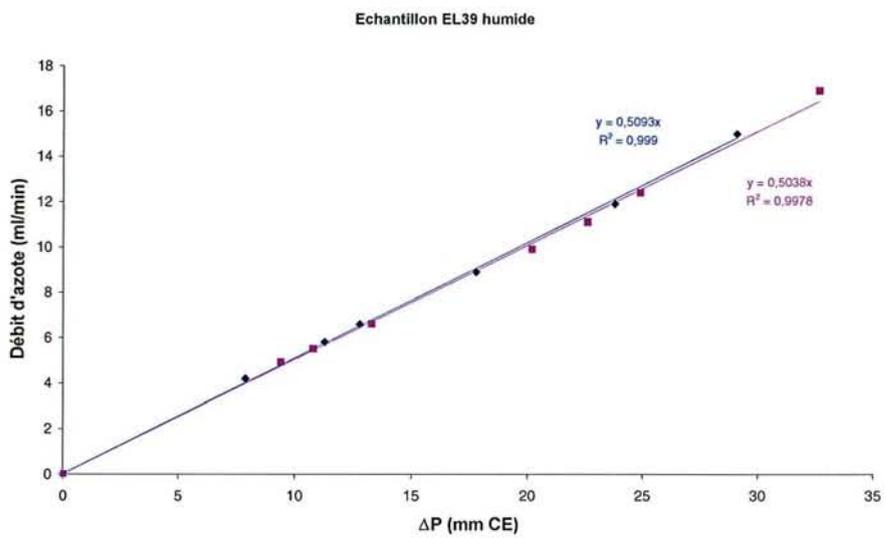
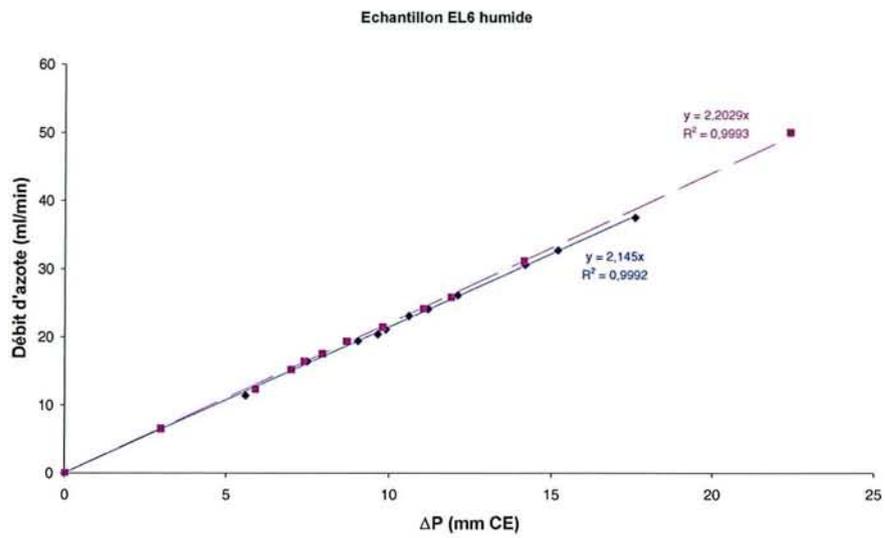
* Cas du bois sec :





* Cas du bois humide :





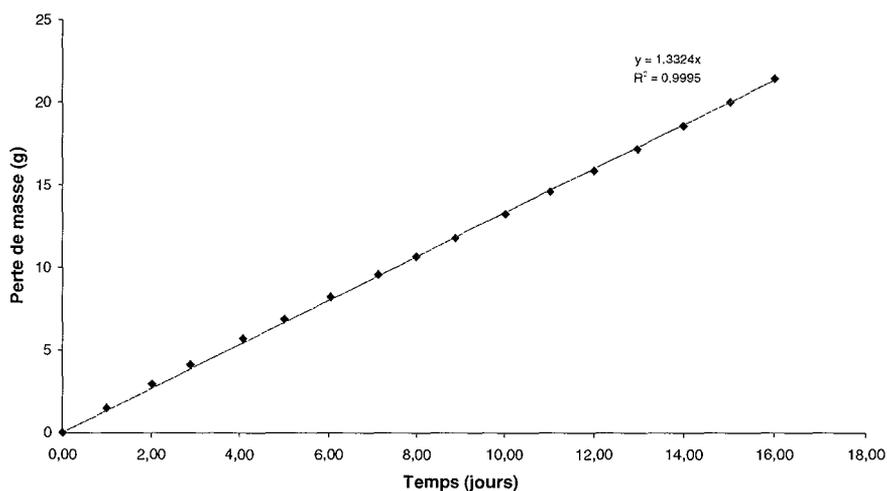
S.C.D. - U.H.P. NANCY 1
BIBLIOTHÈQUE DES SCIENCES
Rue du Jardin Botanique - BP 11
54601 VILLERS-LES-NANCY *Cédex*

ANNEXE 5

RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS AVEC LE
VAPORIMETRE

* **Echantillons de hêtre :**

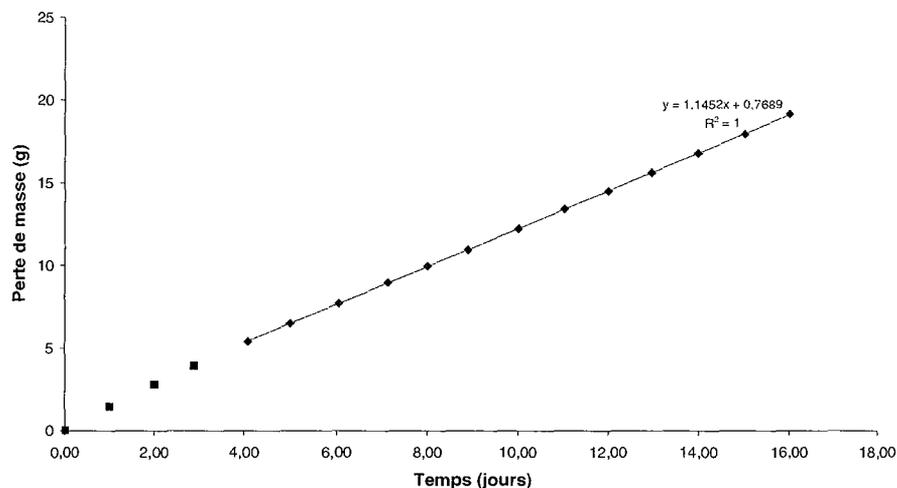
Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon H1L



Echantillon H1L

Jour	Date	Heure	Masses	Temps écoulé	Perte de masse(g)
Mercredi	12/07/2000	15:46:52	557,00	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:43:52	555,52	1,00	1,48
Vendredi	14/07/2000	16:06:31	554,08	2,01	2,92
Samedi	15/07/2000	13:07:14	552,88	2,89	4,12
Dimanche	16/07/2000	17:48:40	551,31	4,08	5,69
Lundi	17/07/2000	15:49:59	550,14	5,00	6,86
Mardi	18/07/2000	16:56:10	548,80	6,05	8,20
Mercredi	19/07/2000	18:54:37	547,44	7,13	9,56
Jeudi	20/07/2000	15:51:51	546,33	8,00	10,67
Vendredi	21/07/2000	13:03:48	545,21	8,89	11,79
Samedi	22/07/2000	16:03:52	543,75	10,01	13,25
Dimanche	23/07/2000	16:35:25	542,41	11,03	14,59
Lundi	24/07/2000	15:53:03	541,12	12,00	15,88
Mardi	25/07/2000	15:01:00	539,83	12,97	17,17
Mercredi	26/07/2000	15:34:04	538,42	13,99	18,58
Jeudi	27/07/2000	16:10:06	536,99	15,02	20,01
Vendredi	28/07/2000	16:18:48	535,56	16,02	21,44

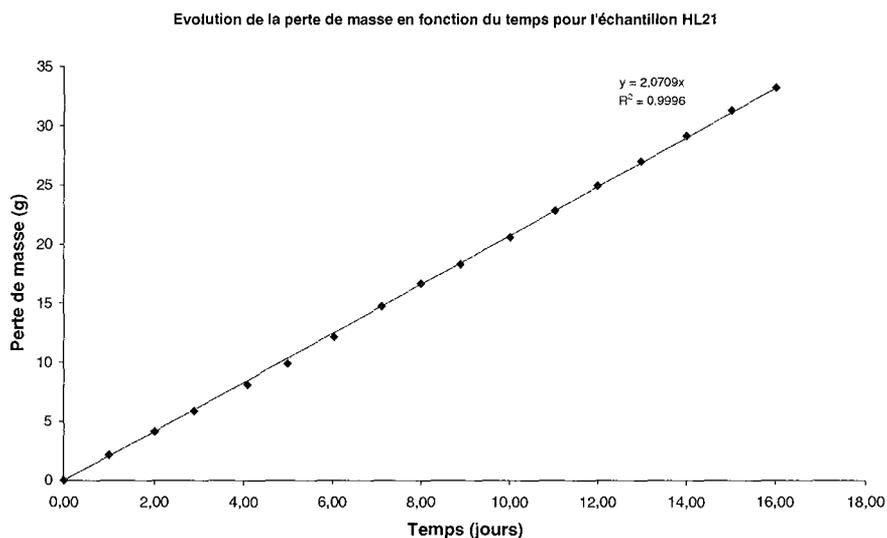
Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon HL11



Echantillon HL11

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:47:05	573,94	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:44:05	572,50	1,00	1,44
Vendredi	14/07/2000	15:52:56	571,15	2,00	2,79
Samedi	15/07/2000	13:07:28	570,01	2,89	3,93
Dimanche	16/07/2000	17:48:55	568,53	4,08	5,41
Lundi	17/07/2000	15:50:11	567,44	5,00	6,50
Mardi	18/07/2000	16:56:22	566,23	6,05	7,71
Mercredi	19/07/2000	18:55:07	564,98	7,13	8,96
Jeudi	20/07/2000	15:52:09	563,99	8,00	9,95
Vendredi	21/07/2000	13:04:01	562,99	8,89	10,95
Samedi	22/07/2000	16:04:03	561,71	10,01	12,23
Dimanche	23/07/2000	16:35:35	560,53	11,03	13,41
Lundi	24/07/2000	15:53:13	559,43	12,00	14,51
Mardi	25/07/2000	15:01:10	558,34	12,97	15,60
Mercredi	26/07/2000	15:34:14	557,16	13,99	16,78
Jeudi	27/07/2000	16:10:18	556,00	15,02	17,94
Vendredi	28/07/2000	16:18:58	554,79	16,02	19,15

| 1,32546E-08 : pente |



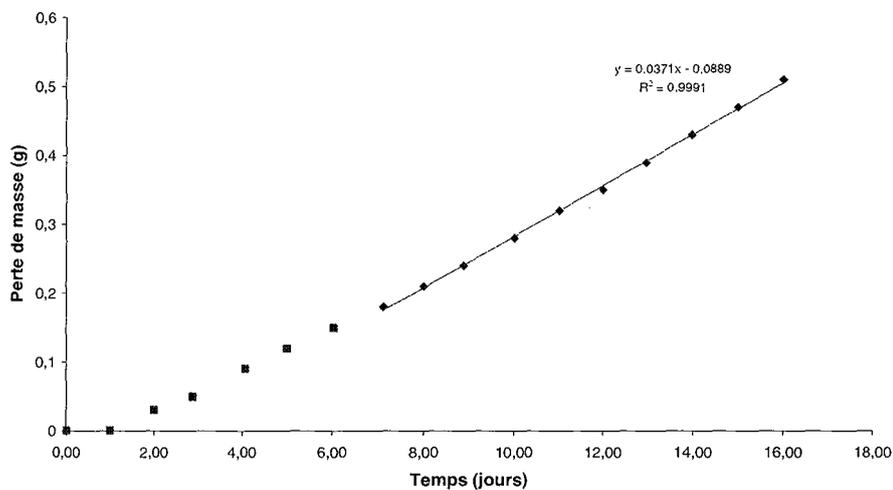
Echantillon HL21

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:47:17	531,08	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:44:18	528,93	1,00	2,15
Vendredi	14/07/2000	15:53:10	526,91	2,00	4,17
Samedi	15/07/2000	13:07:39	525,21	2,89	5,87
Dimanche	16/07/2000	17:49:07	522,98	4,08	8,10
Lundi	17/07/2000	15:50:22	521,18	5,00	9,90
Mardi	18/07/2000	16:56:31	518,92	6,05	12,16
Mercredi	19/07/2000	18:55:22	516,35	7,13	14,73
Jeudi	20/07/2000	15:52:22	514,46	8,00	16,62
Vendredi	21/07/2000	13:04:18	512,80	8,89	18,28
Samedi	22/07/2000	16:04:13	510,49	10,01	20,59
Dimanche	23/07/2000	16:35:46	508,26	11,03	22,82
Lundi	24/07/2000	15:53:23	506,15	12,00	24,93
Mardi	25/07/2000	15:01:20	504,08	12,97	27,00
Mercredi	26/07/2000	15:34:24	501,91	13,99	29,17
Jeudi	27/07/2000	16:10:32	499,79	15,02	31,29
Vendredi	28/07/2000	16:19:11	497,86	16,02	33,22

2,39688E-08

: pente|

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour l'échantillon H7T

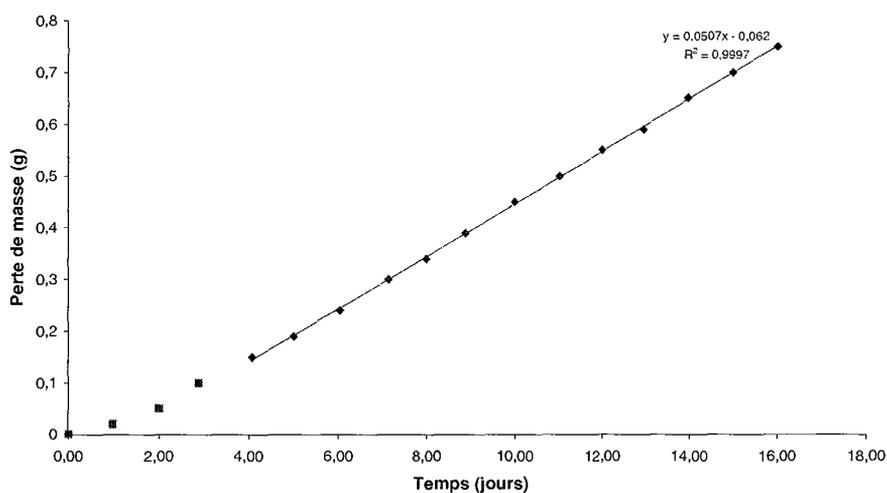


Echantillon H7T

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:47:27	538,49	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:44:30	538,49	1,00	0
Vendredi	14/07/2000	15:53:21	538,46	2,00	0,03
Samedi	15/07/2000	13:07:52	538,44	2,89	0,05
Dimanche	16/07/2000	17:49:17	538,40	4,08	0,09
Lundi	17/07/2000	15:50:32	538,37	5,00	0,12
Mardi	18/07/2000	16:56:41	538,34	6,05	0,15
Mercredi	19/07/2000	18:55:38	538,31	7,13	0,18
Jeudi	20/07/2000	15:52:37	538,28	8,00	0,21
Vendredi	21/07/2000	13:04:41	538,25	8,89	0,24
Samedi	22/07/2000	16:04:22	538,21	10,01	0,28
Dimanche	23/07/2000	16:35:56	538,17	11,03	0,32
Lundi	24/07/2000	15:53:32	538,14	12,00	0,35
Mardi	25/07/2000	15:01:31	538,10	12,97	0,39
Mercredi	26/07/2000	15:34:37	538,06	13,99	0,43
Jeudi	27/07/2000	16:10:47	538,02	15,02	0,47
Vendredi	28/07/2000	16:19:23	537,98	16,02	0,51

| 4,29398E-10 : pente |

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour H8T



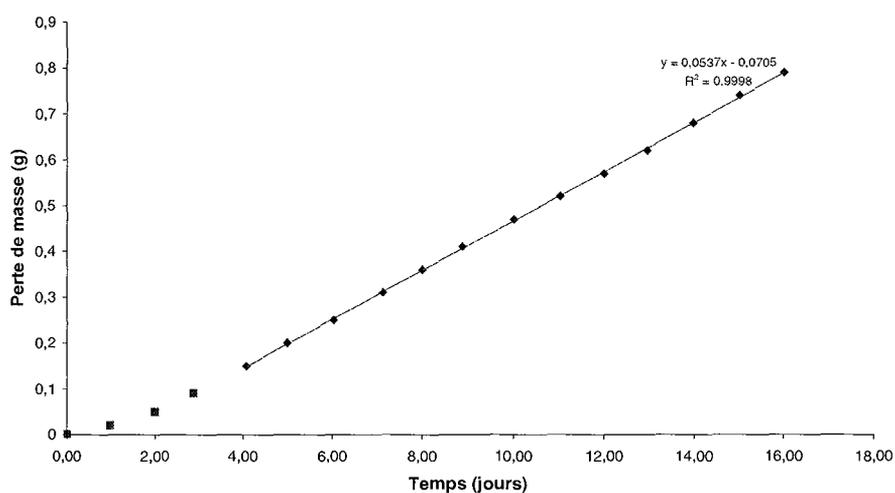
Echantillon H8T

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:47:54	548,99	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:44:43	548,97	1,00	0,02
Vendredi	14/07/2000	15:53:34	548,94	2,00	0,05
Samedi	15/07/2000	13:08:04	548,89	2,89	0,10
Dimanche	16/07/2000	17:49:29	548,84	4,08	0,15
Lundi	17/07/2000	15:50:43	548,80	5,00	0,19
Mardi	18/07/2000	16:56:52	548,75	6,05	0,24
Mercredi	19/07/2000	18:55:51	548,69	7,13	0,30
Jeudi	20/07/2000	15:52:51	548,65	8,00	0,34
Vendredi	21/07/2000	13:04:59	548,60	8,89	0,39
Samedi	22/07/2000	16:04:33	548,54	10,01	0,45
Dimanche	23/07/2000	16:36:08	548,49	11,03	0,50
Lundi	24/07/2000	15:53:44	548,44	12,00	0,55
Mardi	25/07/2000	15:01:43	548,40	12,97	0,59
Mercredi	26/07/2000	15:34:47	548,34	13,99	0,65
Jeudi	27/07/2000	16:11:00	548,29	15,02	0,70
Vendredi	28/07/2000	16:19:36	548,24	16,02	0,75

5,8681E-10

: pente

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour HT21

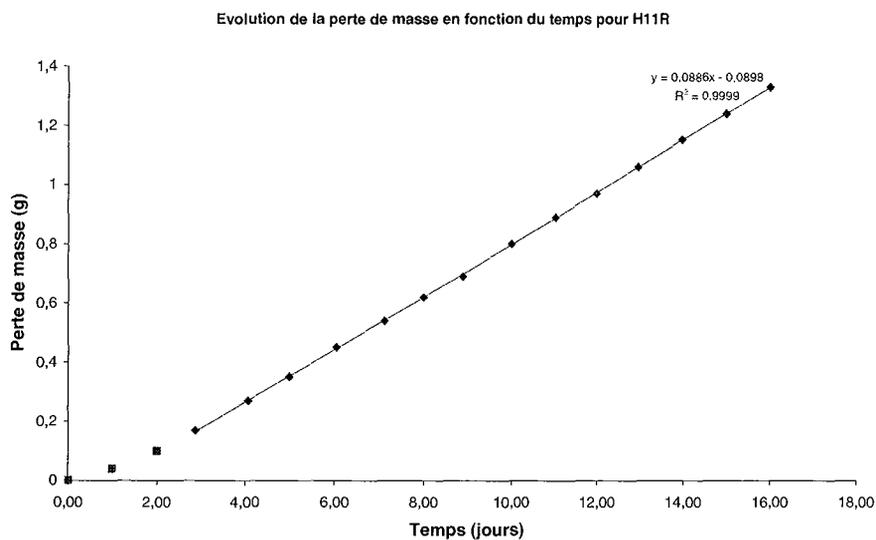


Echantillon HT21

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:48:11	554,60	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:44:57	554,58	1,00	0,02
Vendredi	14/07/2000	15:53:48	554,55	2,00	0,05
Samedi	15/07/2000	13:08:17	554,51	2,89	0,09
Dimanche	16/07/2000	17:49:41	554,45	4,08	0,15
Lundi	17/07/2000	15:50:54	554,40	5,00	0,20
Mardi	18/07/2000	16:57:06	554,35	6,05	0,25
Mercredi	19/07/2000	18:56:12	554,29	7,13	0,31
Jeudi	20/07/2000	15:53:06	554,24	8,00	0,36
Vendredi	21/07/2000	13:05:17	554,19	8,89	0,41
Samedi	22/07/2000	16:04:45	554,13	10,01	0,47
Dimanche	23/07/2000	16:36:19	554,08	11,03	0,52
Lundi	24/07/2000	15:53:54	554,03	12,00	0,57
Mardi	25/07/2000	15:01:55	553,98	12,97	0,62
Mercredi	26/07/2000	15:34:57	553,92	13,99	0,68
Jeudi	27/07/2000	16:11:12	553,86	15,02	0,74
Vendredi	28/07/2000	16:19:50	553,81	16,02	0,79

6,21528E-10

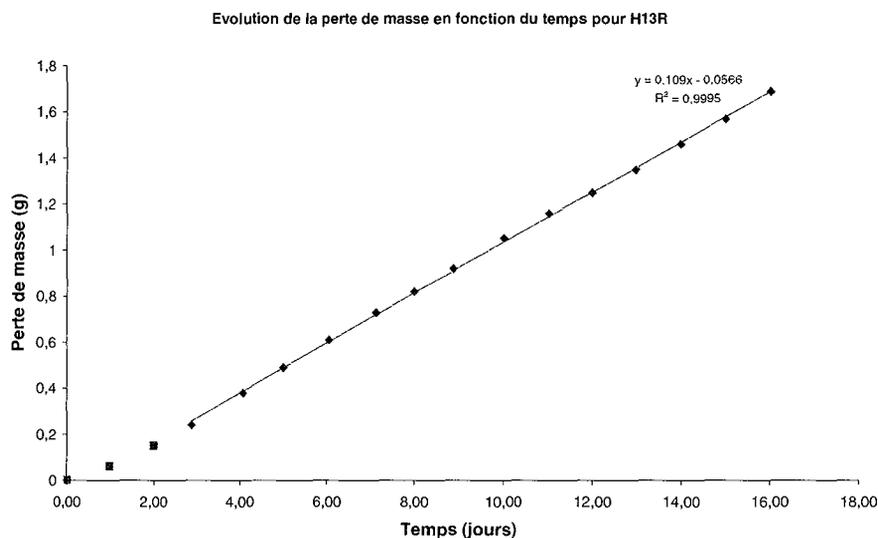
: pente|



Echantillon H11R

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:48:21	556,64	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:45:07	556,60	1,00	0,04
Vendredi	14/07/2000	15:53:59	556,54	2,00	0,10
Samedi	15/07/2000	13:08:29	556,47	2,89	0,17
Dimanche	16/07/2000	17:49:51	556,37	4,08	0,27
Lundi	17/07/2000	15:51:02	556,29	5,00	0,35
Mardi	18/07/2000	16:57:15	556,19	6,05	0,45
Mercredi	19/07/2000	18:56:25	556,10	7,13	0,54
Jeudi	20/07/2000	15:53:17	556,02	8,00	0,62
Vendredi	21/07/2000	13:05:30	555,95	8,89	0,69
Samedi	22/07/2000	16:04:55	555,84	10,01	0,80
Dimanche	23/07/2000	16:36:30	555,75	11,03	0,89
Lundi	24/07/2000	15:54:03	555,67	12,00	0,97
Mardi	25/07/2000	15:02:06	555,58	12,97	1,06
Mercredi	26/07/2000	15:35:08	555,49	13,99	1,15
Jeudi	27/07/2000	16:11:23	555,40	15,02	1,24
Vendredi	28/07/2000	16:20:02	555,31	16,02	1,33

| 1,0255E-09 : pente |



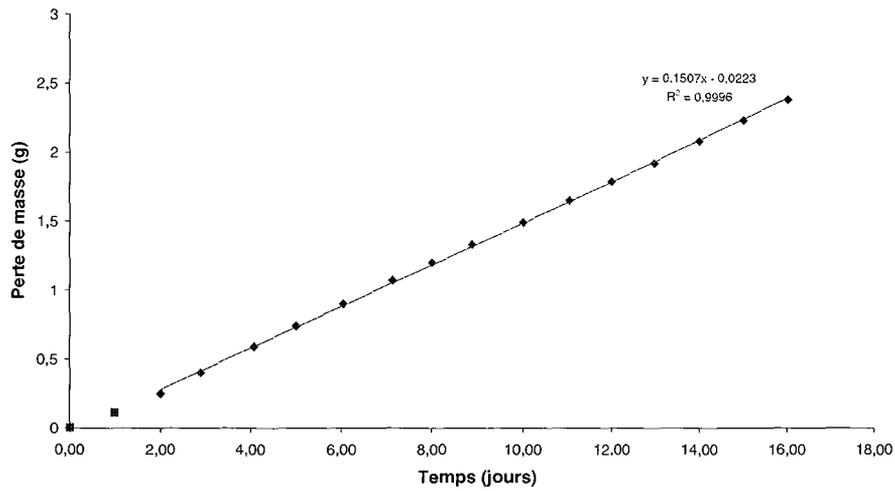
Echantillon H13R

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:48:30	540,63	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:45:17	540,57	1,00	0,06
Vendredi	14/07/2000	15:54:12	540,48	2,00	0,15
Samedi	15/07/2000	13:08:41	540,39	2,89	0,24
Dimanche	16/07/2000	17:50:03	540,25	4,08	0,38
Lundi	17/07/2000	15:51:12	540,14	5,00	0,49
Mardi	18/07/2000	16:57:27	540,02	6,05	0,61
Mercredi	19/07/2000	18:56:36	539,90	7,13	0,73
Jeudi	20/07/2000	15:53:30	539,81	8,00	0,82
Vendredi	21/07/2000	13:05:43	539,71	8,89	0,92
Samedi	22/07/2000	16:05:05	539,58	10,01	1,05
Dimanche	23/07/2000	16:36:40	539,47	11,03	1,16
Lundi	24/07/2000	15:54:13	539,38	12,00	1,25
Mardi	25/07/2000	15:02:15	539,28	12,97	1,35
Mercredi	26/07/2000	15:35:19	539,17	13,99	1,46
Jeudi	27/07/2000	16:11:34	539,06	15,02	1,57
Vendredi	28/07/2000	16:20:15	538,94	16,02	1,69

1,26157E-09

: pente

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour HR22



Echantillon HR22

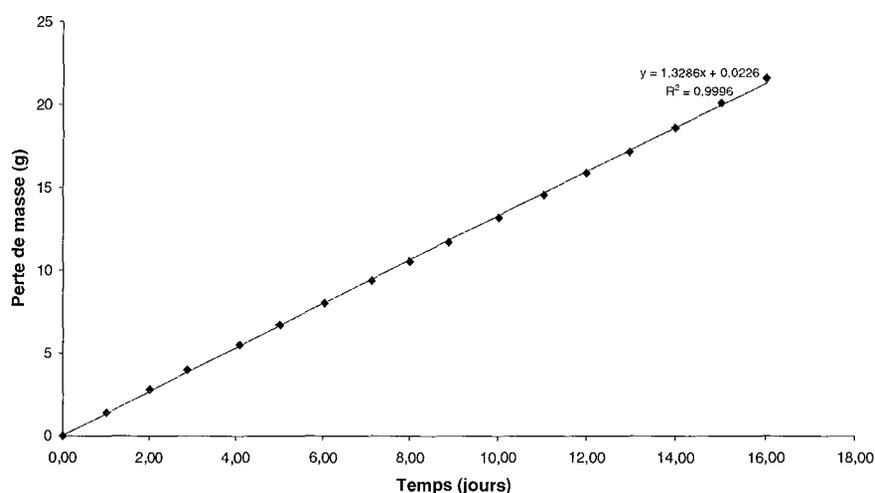
Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:48:41	548,74	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:45:27	548,63	1,00	0,11
Vendredi	14/07/2000	15:54:27	548,49	2,00	0,25
Samedi	15/07/2000	13:08:54	548,34	2,89	0,40
Dimanche	16/07/2000	17:50:12	548,15	4,08	0,59
Lundi	17/07/2000	15:51:21	548,00	5,00	0,74
Mardi	18/07/2000	16:57:37	547,84	6,05	0,90
Mercredi	19/07/2000	18:56:49	547,67	7,13	1,07
Jeudi	20/07/2000	15:54:42	547,54	8,00	1,20
Vendredi	21/07/2000	13:06:02	547,41	8,89	1,33
Samedi	22/07/2000	16:05:14	547,25	10,01	1,49
Dimanche	23/07/2000	16:36:50	547,09	11,03	1,65
Lundi	24/07/2000	15:54:22	546,95	12,00	1,79
Mardi	25/07/2000	15:02:25	546,82	12,97	1,92
Mercredi	26/07/2000	15:35:31	546,66	13,99	2,08
Jeudi	27/07/2000	16:11:46	546,51	15,02	2,23
Vendredi	28/07/2000	16:20:25	546,36	16,02	2,38

1,74421E-09

: pente|

* Echantillons d'épice :

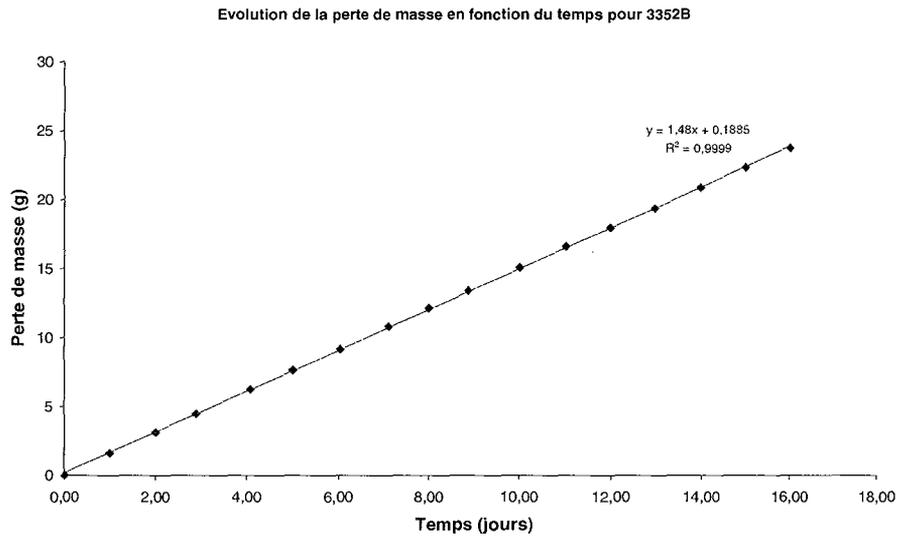
Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour 3338B

**Echantillon 3338B**

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:48:52	550,58	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:45:37	549,16	1,00	1,42
Vendredi	14/07/2000	15:54:41	547,78	2,00	2,80
Samedi	15/07/2000	13:09:05	546,60	2,89	3,98
Dimanche	16/07/2000	17:50:23	545,05	4,08	5,53
Lundi	17/07/2000	15:51:32	543,88	5,00	6,70
Mardi	18/07/2000	16:57:56	542,56	6,05	8,02
Mercredi	19/07/2000	18:57:03	541,18	7,13	9,40
Jeudi	20/07/2000	15:53:56	540,04	8,00	10,54
Vendredi	21/07/2000	13:06:21	538,89	8,89	11,69
Samedi	22/07/2000	16:05:25	537,39	10,01	13,19
Dimanche	23/07/2000	16:37:01	536,02	11,03	14,56
Lundi	24/07/2000	15:54:32	534,72	12,00	15,86
Mardi	25/07/2000	15:02:35	533,42	12,97	17,16
Mercredi	26/07/2000	15:35:43	531,98	13,99	18,60
Jeudi	27/07/2000	16:11:55	530,47	15,02	20,11
Vendredi	28/07/2000	16:20:35	528,94	16,02	21,64

| 1,53773E-08

: pente|

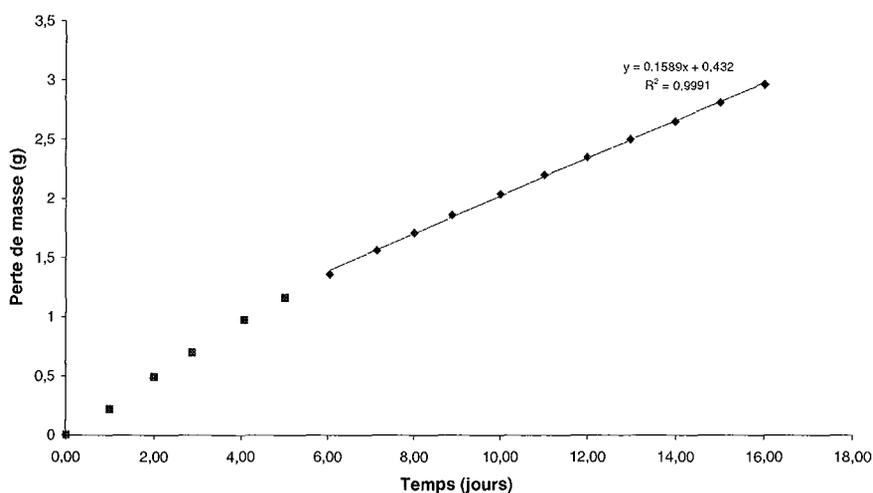


Echantillon 3352B

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:49:26	567,21	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:46:39	565,58	1,00	1,63
Vendredi	14/07/2000	15:55:23	564,08	2,00	3,13
Samedi	15/07/2000	13:10:46	562,74	2,89	4,47
Dimanche	16/07/2000	17:51:29	560,97	4,08	6,24
Lundi	17/07/2000	15:52:28	559,58	5,00	7,63
Mardi	18/07/2000	16:58:50	558,02	6,05	9,19
Mercredi	19/07/2000	18:57:24	556,39	7,13	10,82
Jeudi	20/07/2000	15:54:47	555,08	8,00	12,13
Vendredi	21/07/2000	13:06:40	553,80	8,89	13,41
Samedi	22/07/2000	16:06:25	552,11	10,01	15,10
Dimanche	23/07/2000	16:38:30	550,60	11,03	16,61
Lundi	24/07/2000	15:56:18	549,23	12,00	17,98
Mardi	25/07/2000	15:03:06	547,85	12,97	19,36
Mercredi	26/07/2000	15:36:04	546,34	13,99	20,87
Jeudi	27/07/2000	16:12:21	544,89	15,02	22,32
Vendredi	28/07/2000	16:20:57	543,47	16,02	23,74

| 1,71296E-08 : pente|

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour ET4



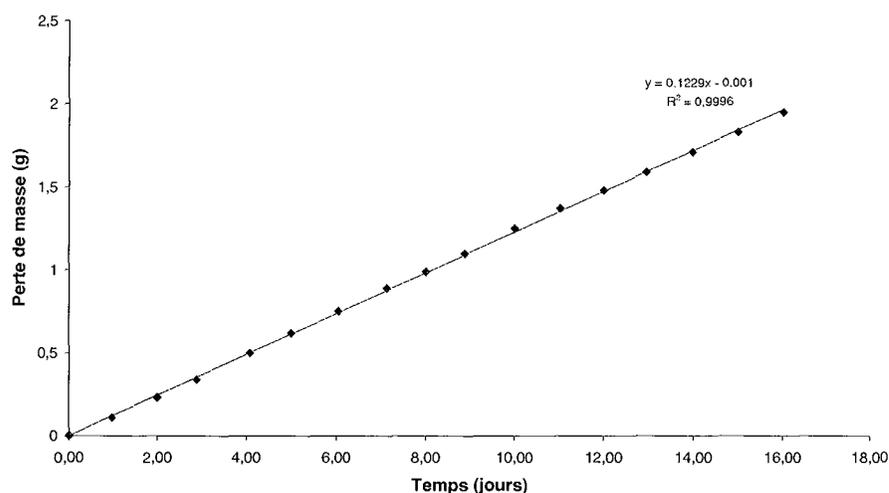
Echantillon ET4

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:49:34	531,51	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:46:50	531,29	1,00	0,22
Vendredi	14/07/2000	15:52:30	531,02	2,00	0,49
Samedi	15/07/2000	13:10:59	530,81	2,89	0,70
Dimanche	16/07/2000	17:51:39	530,54	4,08	0,97
Lundi	17/07/2000	15:52:36	530,35	5,00	1,16
Mardi	18/07/2000	16:58:58	530,15	6,05	1,36
Mercredi	19/07/2000	18:57:37	529,95	7,13	1,56
Jeudi	20/07/2000	15:55:10	529,80	8,00	1,71
Vendredi	21/07/2000	13:07:00	529,65	8,89	1,86
Samedi	22/07/2000	16:06:36	529,47	10,01	2,04
Dimanche	23/07/2000	16:38:39	529,31	11,03	2,20
Lundi	24/07/2000	15:56:27	529,16	12,00	2,35
Mardi	25/07/2000	15:03:17	529,01	12,97	2,50
Mercredi	26/07/2000	15:36:17	528,86	13,99	2,65
Jeudi	27/07/2000	16:12:32	528,70	15,02	2,81
Vendredi	28/07/2000	16:21:07	528,55	16,02	2,96

1,83912E-09

: pente|

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour ET6



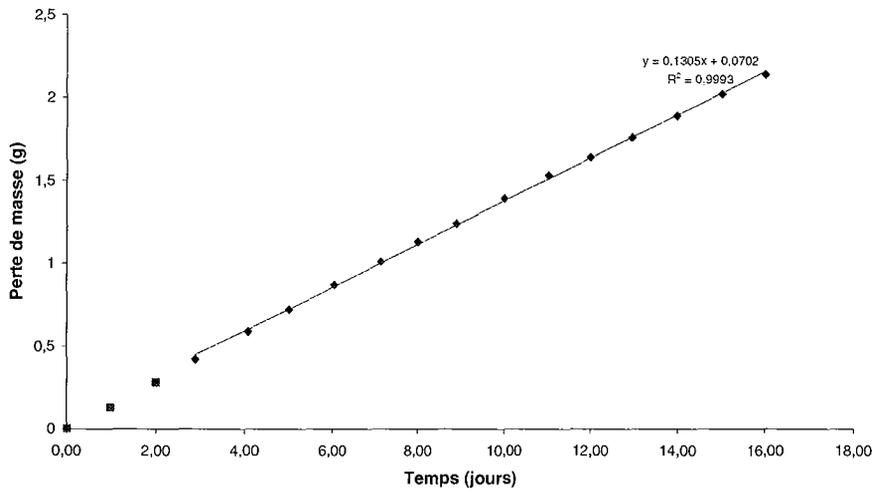
Echantillon ET6

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:49:42	517,18	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:47:00	517,07	1,00	0,11
Vendredi	14/07/2000	15:55:42	516,95	2,00	0,23
Samedi	15/07/2000	13:11:10	516,84	2,89	0,34
Dimanche	16/07/2000	17:51:49	516,68	4,08	0,50
Lundi	17/07/2000	15:52:44	516,56	5,00	0,62
Mardi	18/07/2000	16:59:08	516,43	6,05	0,75
Mercredi	19/07/2000	18:57:49	516,29	7,13	0,89
Jeudi	20/07/2000	15:55:25	516,19	8,00	0,99
Vendredi	21/07/2000	13:07:21	516,08	8,89	1,10
Samedi	22/07/2000	16:06:45	515,93	10,01	1,25
Dimanche	23/07/2000	16:38:49	515,81	11,03	1,37
Lundi	24/07/2000	15:56:36	515,70	12,00	1,48
Mardi	25/07/2000	15:03:28	515,59	12,97	1,59
Mercredi	26/07/2000	15:36:27	515,47	13,99	1,71
Jeudi	27/07/2000	16:12:43	515,35	15,02	1,83
Vendredi	28/07/2000	16:21:17	515,23	16,02	1,95

1,4225E-09

: pente

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour ET8

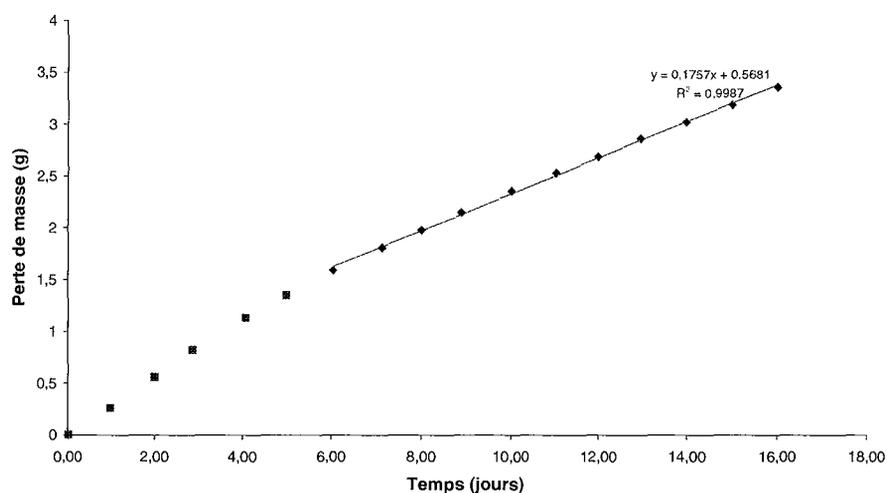


Echantillon ET8

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:49:52	519,44	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:47:10	519,31	1,00	0,13
Vendredi	14/07/2000	15:55:56	519,16	2,00	0,28
Samedi	15/07/2000	13:11:23	519,02	2,89	0,42
Dimanche	16/07/2000	17:52:01	518,85	4,08	0,59
Lundi	17/07/2000	15:52:54	518,72	5,00	0,72
Mardi	18/07/2000	16:59:18	518,57	6,05	0,87
Mercredi	19/07/2000	18:58:05	518,43	7,13	1,01
Jeudi	20/07/2000	15:55:36	518,31	8,00	1,13
Vendredi	21/07/2000	13:07:40	518,20	8,89	1,24
Samedi	22/07/2000	16:06:55	518,05	10,01	1,39
Dimanche	23/07/2000	16:38:59	517,91	11,03	1,53
Lundi	24/07/2000	15:56:44	517,80	12,00	1,64
Mardi	25/07/2000	15:03:38	517,68	12,97	1,76
Mercredi	26/07/2000	15:36:38	517,55	13,99	1,89
Jeudi	27/07/2000	16:12:53	517,42	15,02	2,02
Vendredi	28/07/2000	16:21:28	517,30	16,02	2,14

| 1,51042E-09 : pente|

Evolution de la perte de masse en fonction du temps pour ER6

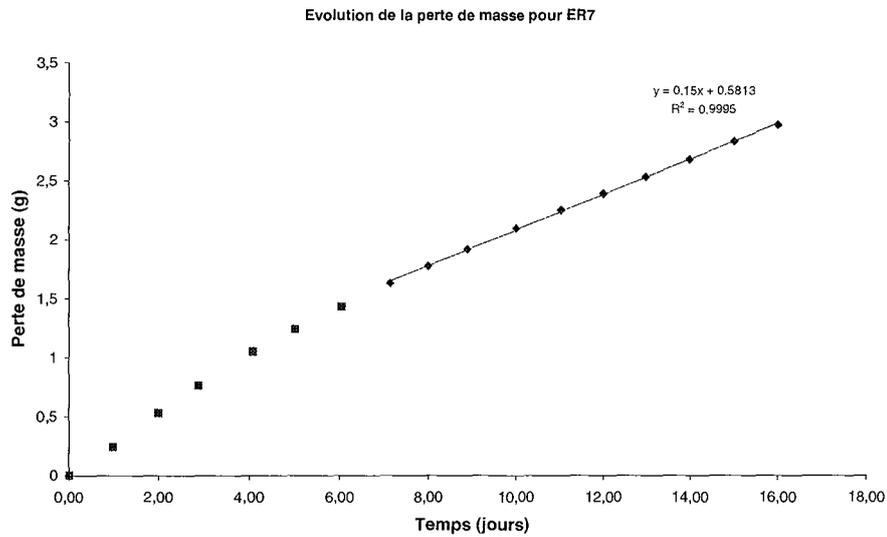


Echantillon ER6

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:50:33	522,99	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:47:31	522,73	1,00	0,26
Vendredi	14/07/2000	15:56:39	522,43	2,00	0,56
Samedi	15/07/2000	13:11:48	522,17	2,89	0,82
Dimanche	16/07/2000	17:52:24	521,86	4,08	1,13
Lundi	17/07/2000	15:53:13	521,64	5,00	1,35
Mardi	18/07/2000	16:59:39	521,40	6,05	1,59
Mercredi	19/07/2000	18:58:40	521,18	7,13	1,81
Jeudi	20/07/2000	15:56:00	521,01	8,00	1,98
Vendredi	21/07/2000	13:08:37	520,84	8,89	2,15
Samedi	22/07/2000	16:07:17	520,64	10,01	2,35
Dimanche	23/07/2000	16:39:22	520,46	11,03	2,53
Lundi	24/07/2000	15:57:03	520,30	12,00	2,69
Mardi	25/07/2000	15:04:06	520,13	12,97	2,86
Mercredi	26/07/2000	15:37:04	519,97	13,99	3,02
Jeudi	27/07/2000	16:13:15	519,80	15,02	3,19
Vendredi	28/07/2000	16:21:47	519,63	16,02	3,36

2,0336E-09

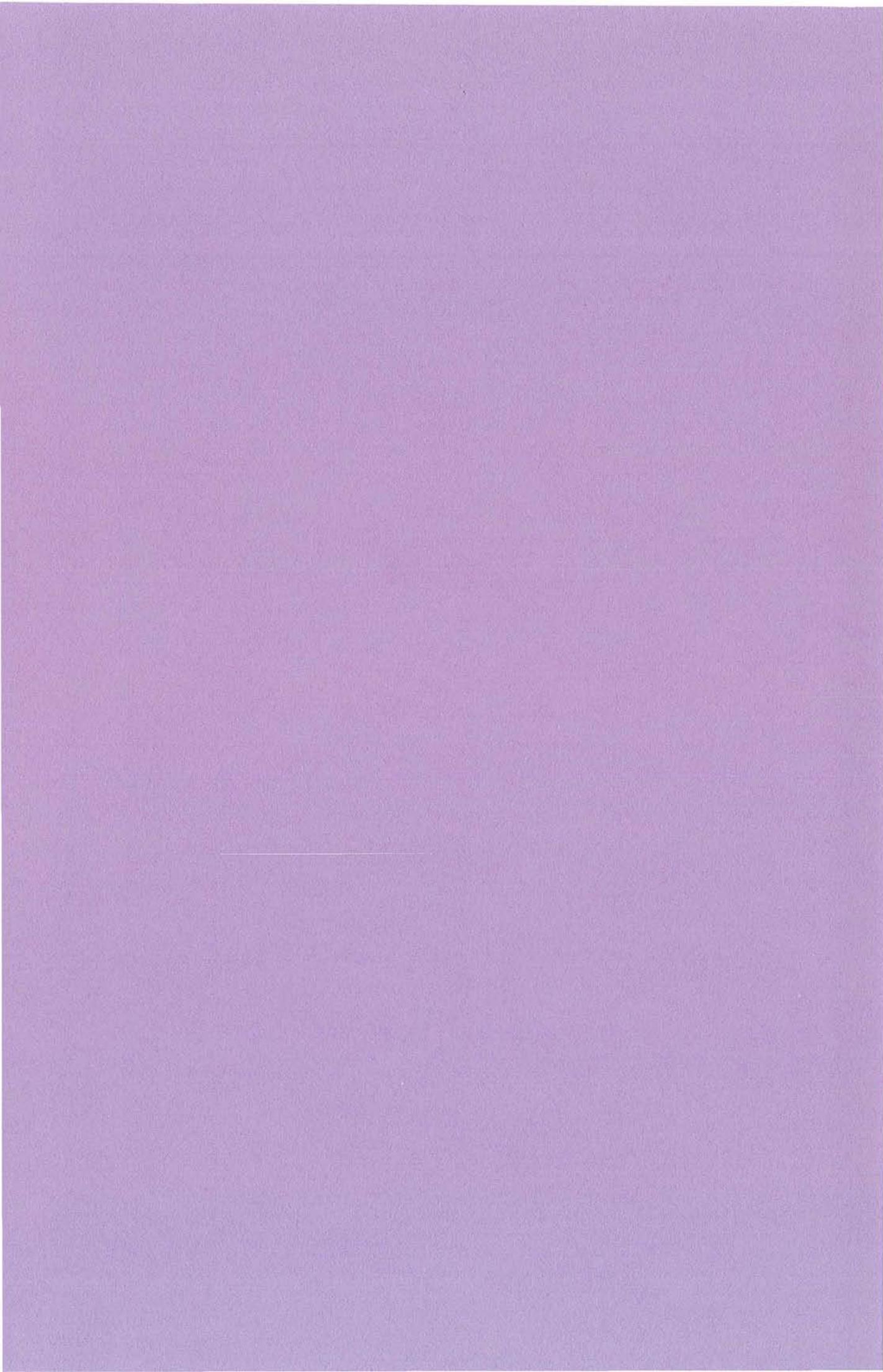
: pente



Echantillon ER7

Jour	Date	Heure	Masse	Temps écoulé	Perte de masse (g)
Mercredi	12/07/2000	15:50:22	537,90	0,00	0
Jeudi	13/07/2000	15:47:42	537,66	1,00	0,24
Vendredi	14/07/2000	15:56:25	537,37	2,00	0,53
Samedi	15/07/2000	13:12:00	537,14	2,89	0,76
Dimanche	16/07/2000	17:52:37	536,85	4,08	1,05
Lundi	17/07/2000	15:53:22	536,66	5,00	1,24
Mardi	18/07/2000	16:59:50	536,47	6,05	1,43
Mercredi	19/07/2000	18:58:51	536,27	7,13	1,63
Jeudi	20/07/2000	15:56:14	536,12	8,00	1,78
Vendredi	21/07/2000	13:08:59	535,98	8,89	1,92
Samedi	22/07/2000	16:07:26	535,81	10,01	2,09
Dimanche	23/07/2000	16:39:31	535,65	11,03	2,25
Lundi	24/07/2000	15:57:13	535,51	12,00	2,39
Mardi	25/07/2000	15:04:17	535,37	12,97	2,53
Mercredi	26/07/2000	15:37:16	535,22	13,99	2,68
Jeudi	27/07/2000	16:13:26	535,07	15,02	2,83
Vendredi	28/07/2000	16:21:56	534,93	16,02	2,97

| 1,73611E-09 : pente|

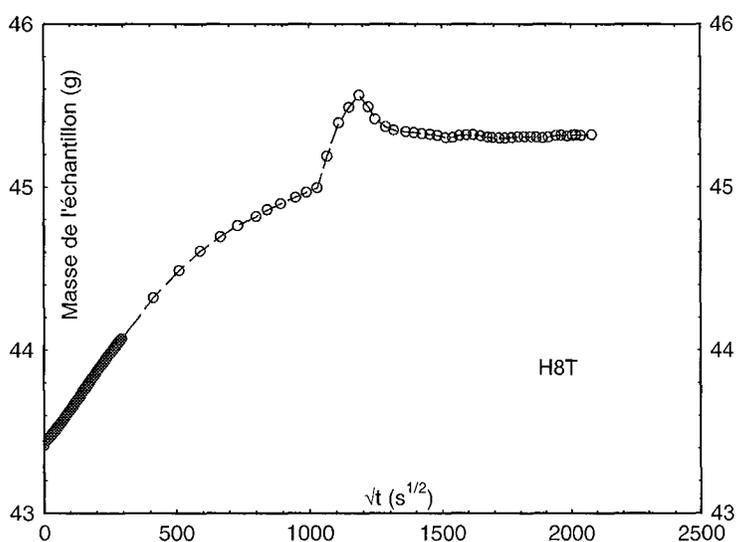
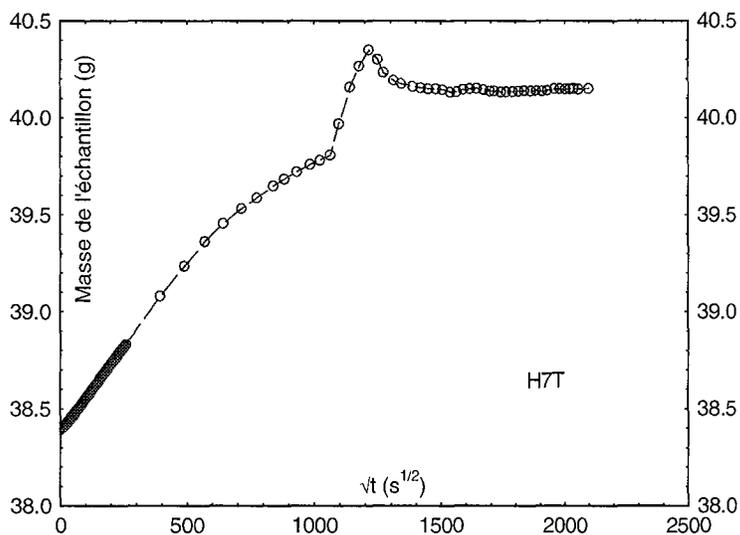


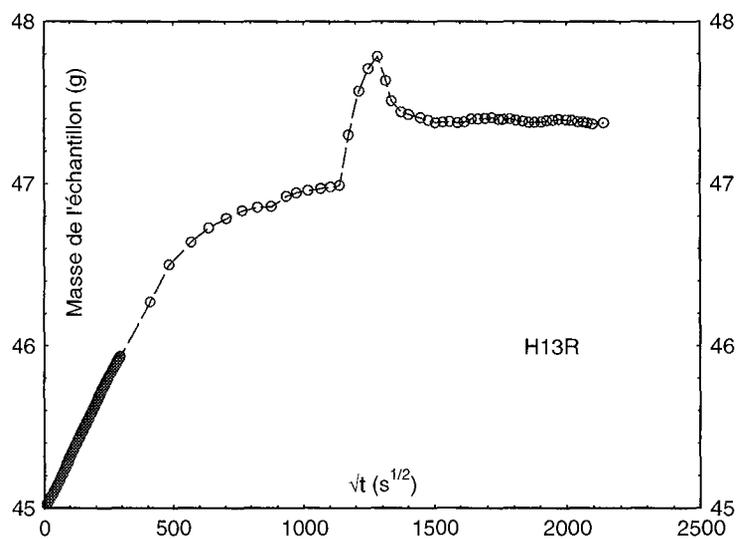
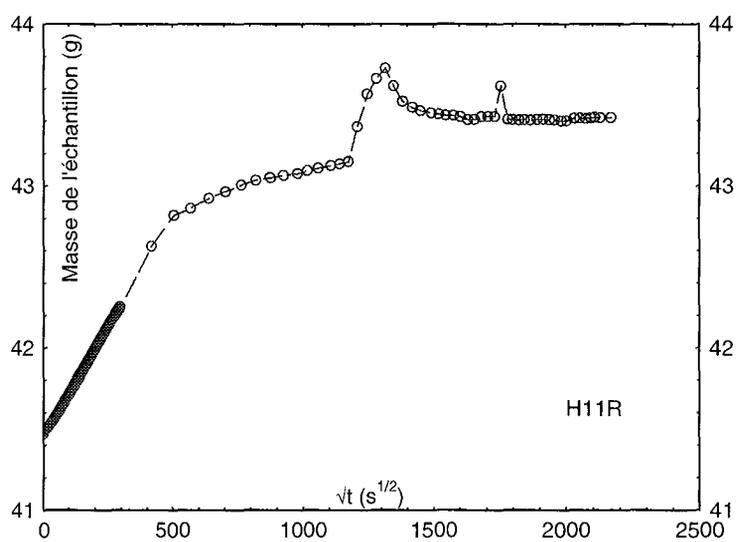
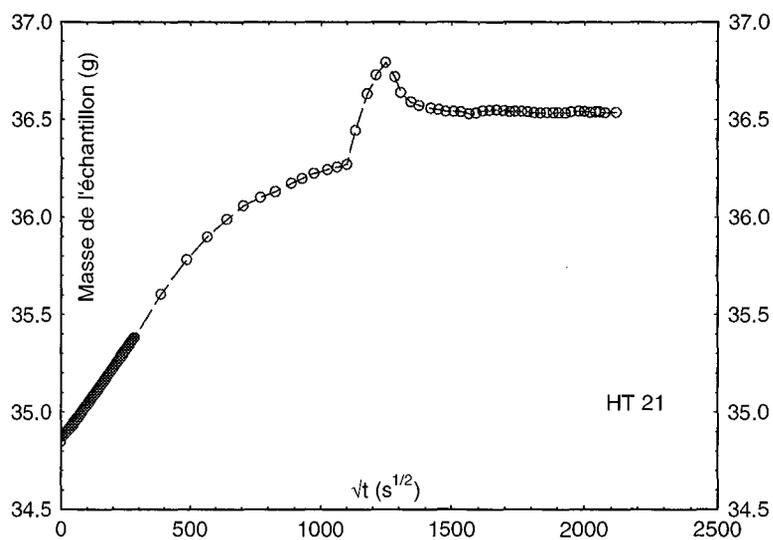
ANNEXE 6

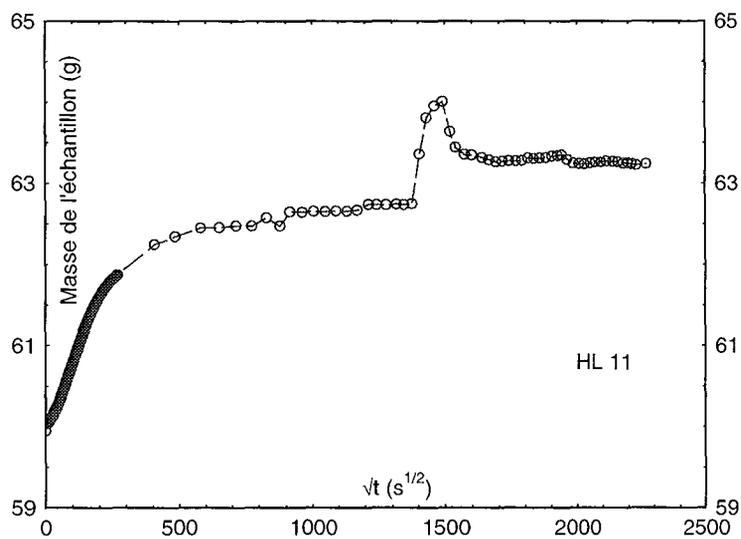
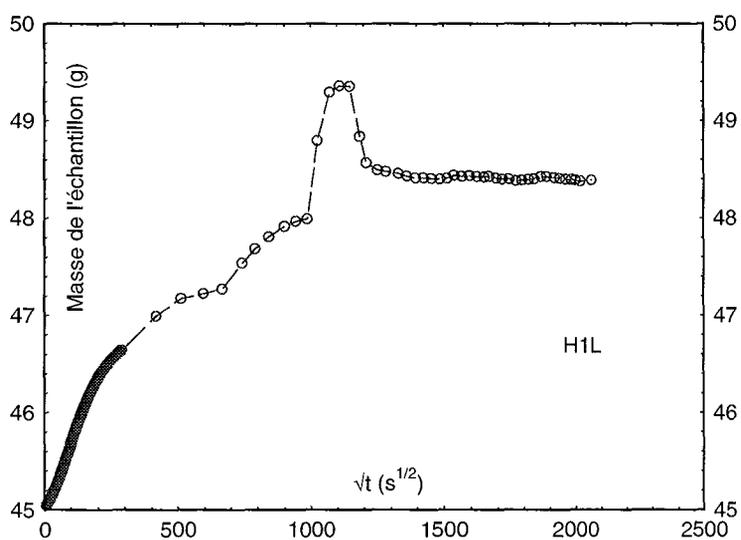
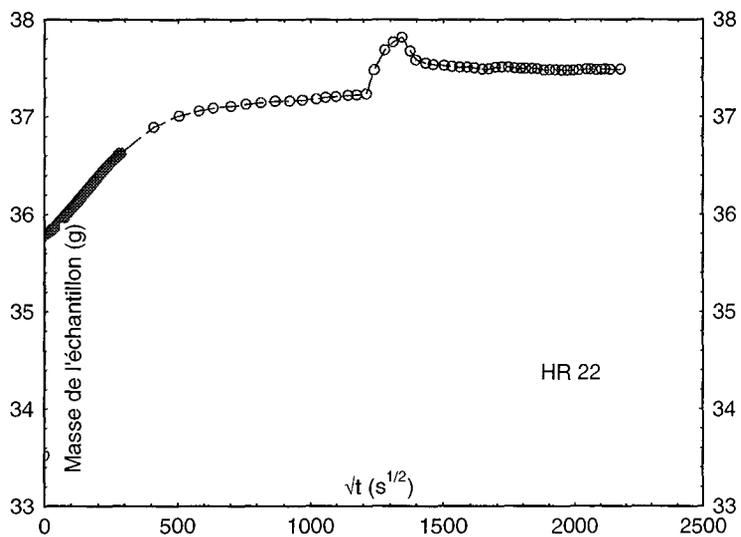
RESULTATS EXPERIMENTAUX OBTENUS EN ABSORPTION ET EN DESORPTION

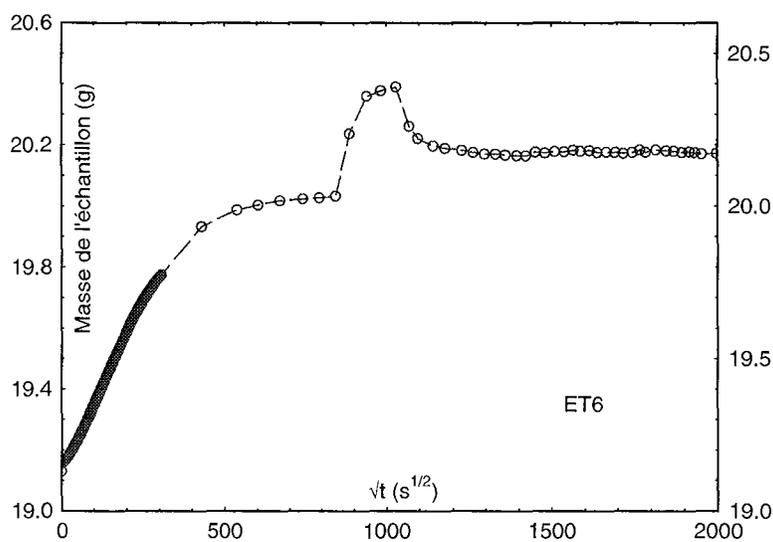
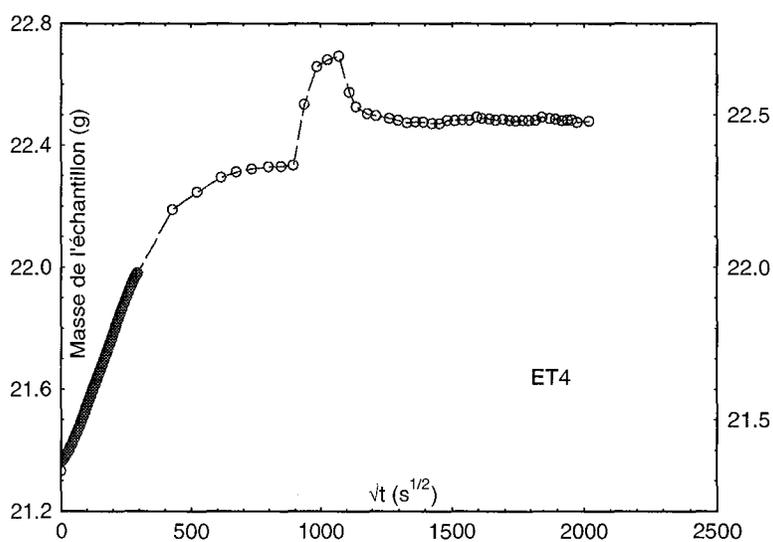
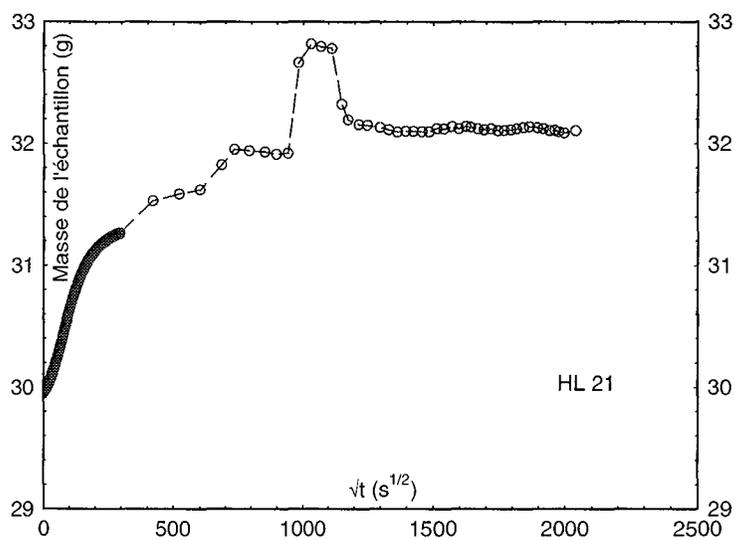
* Courbes d'absorption

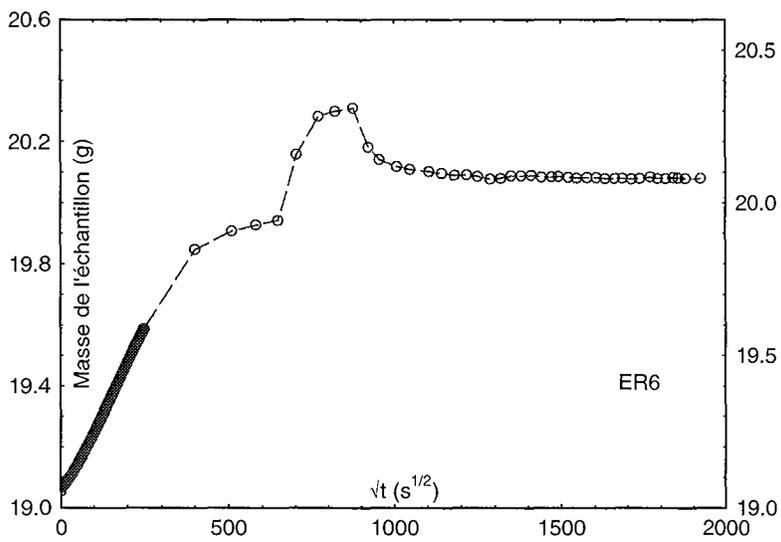
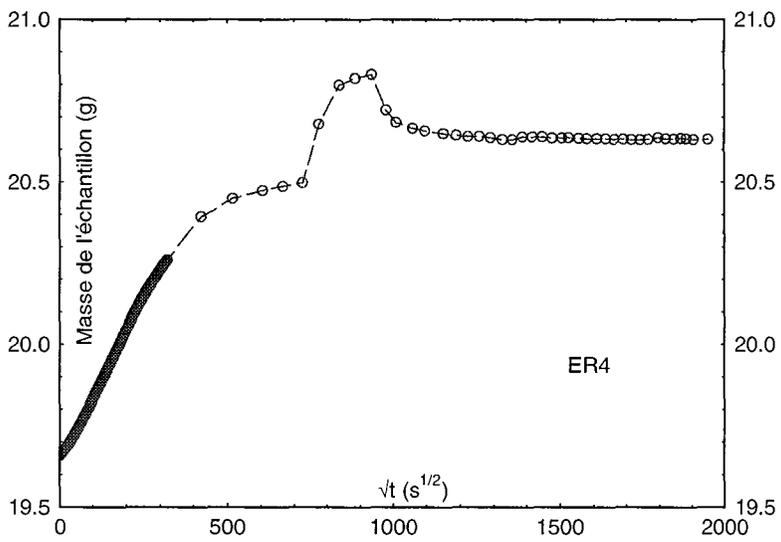
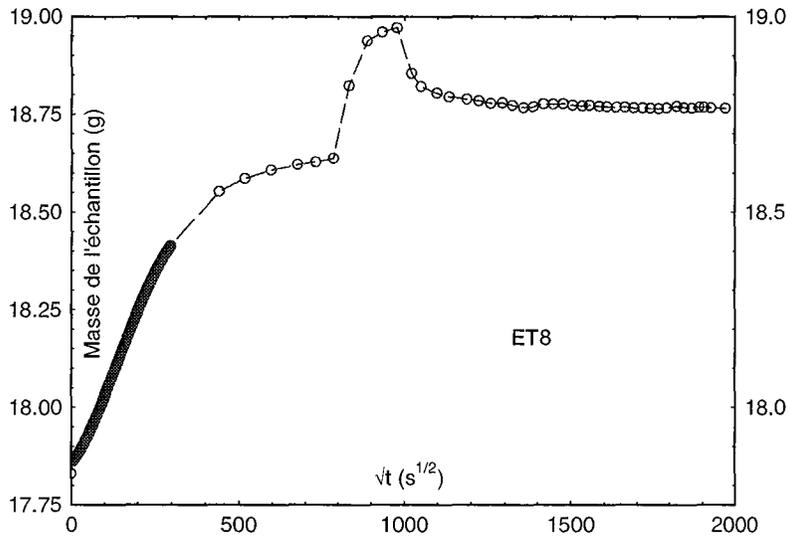
Ci-dessous sont représentées les courbes donnant la masse de l'échantillon en fonction de \sqrt{t} pour tous les échantillons testés.

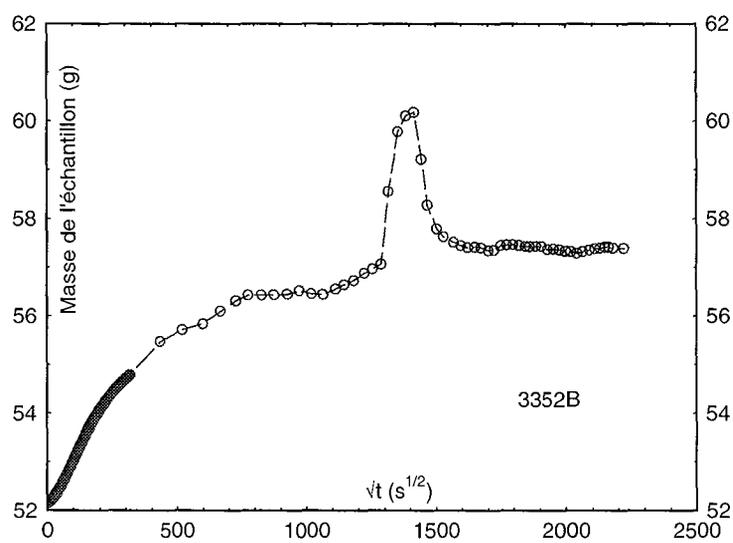
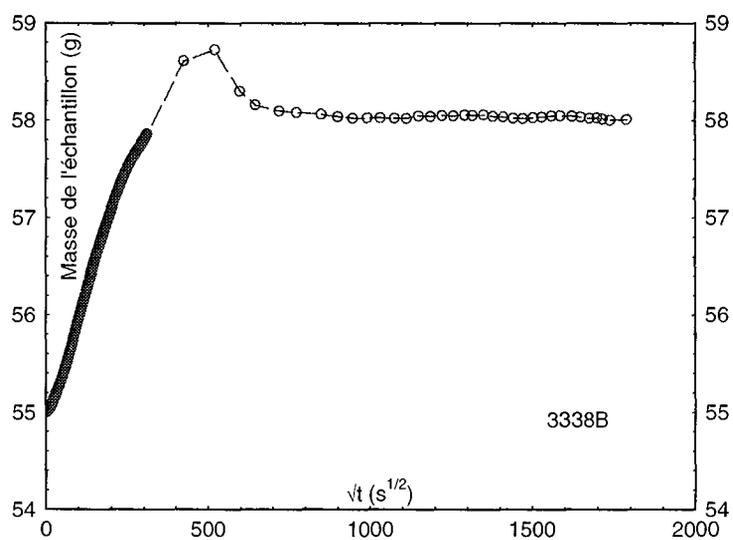
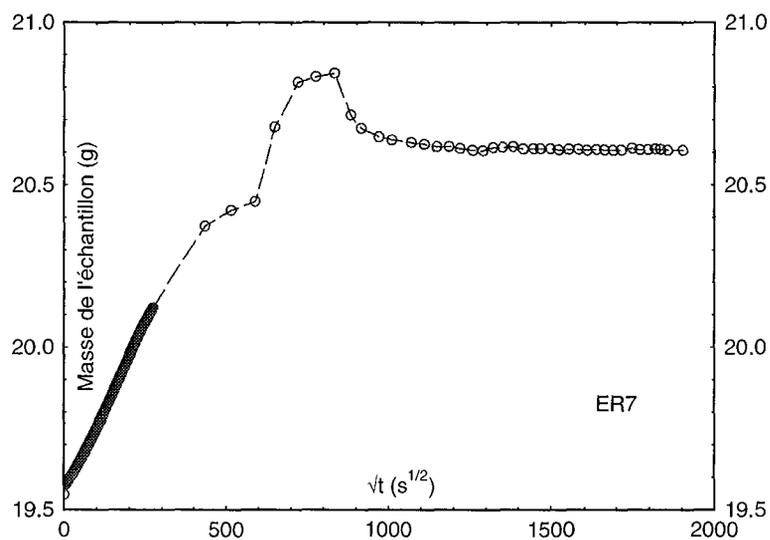


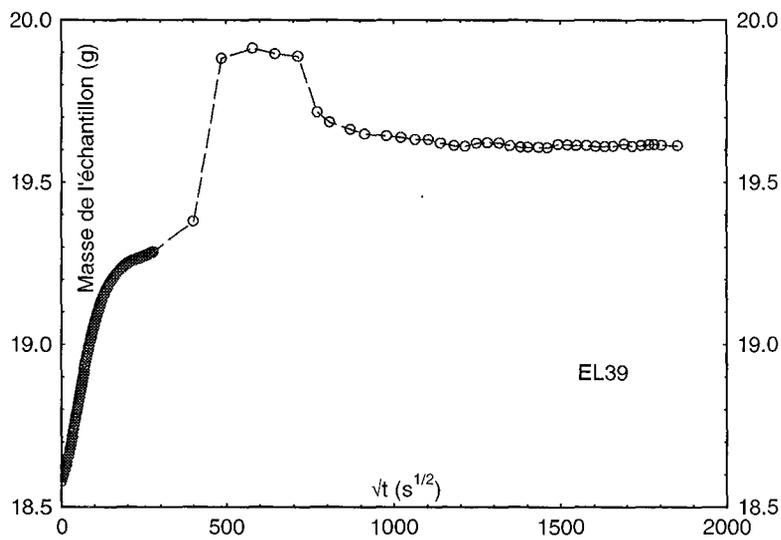
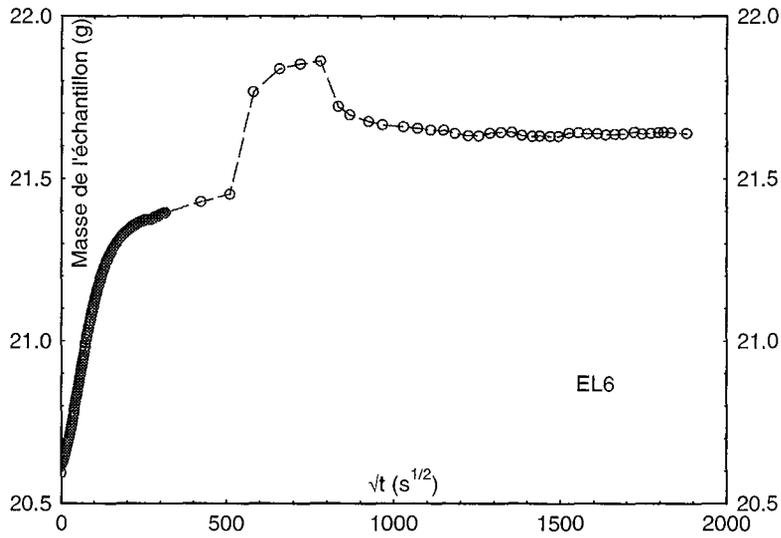






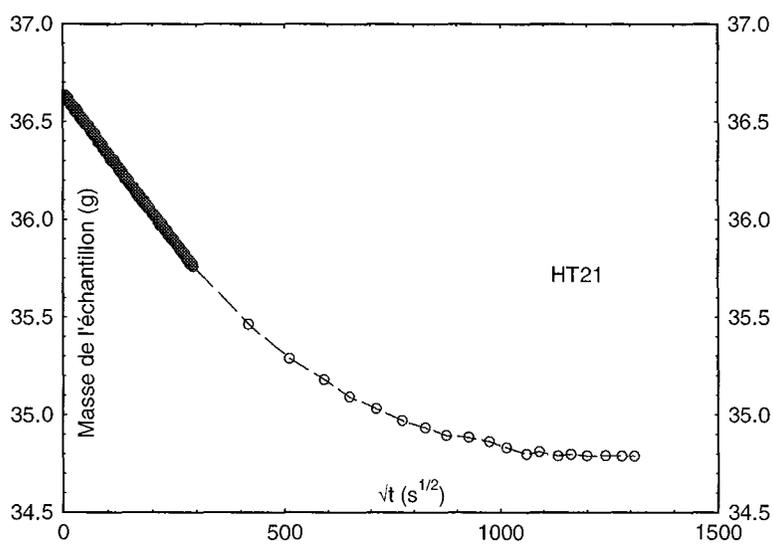
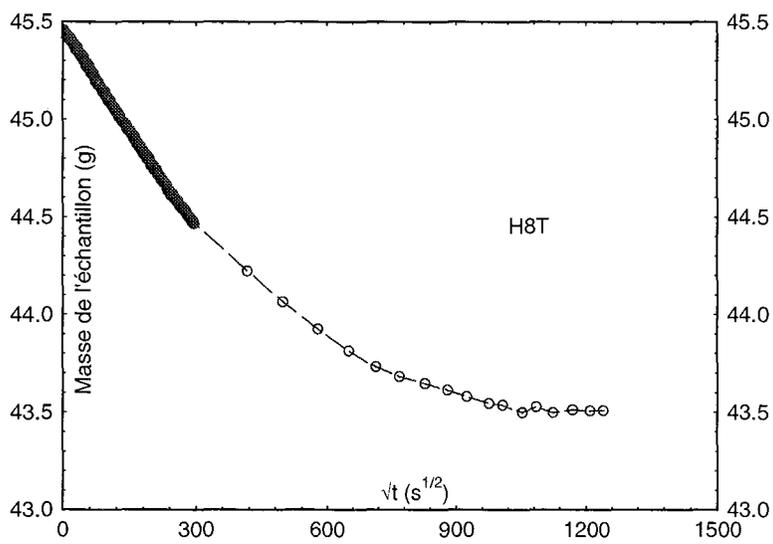
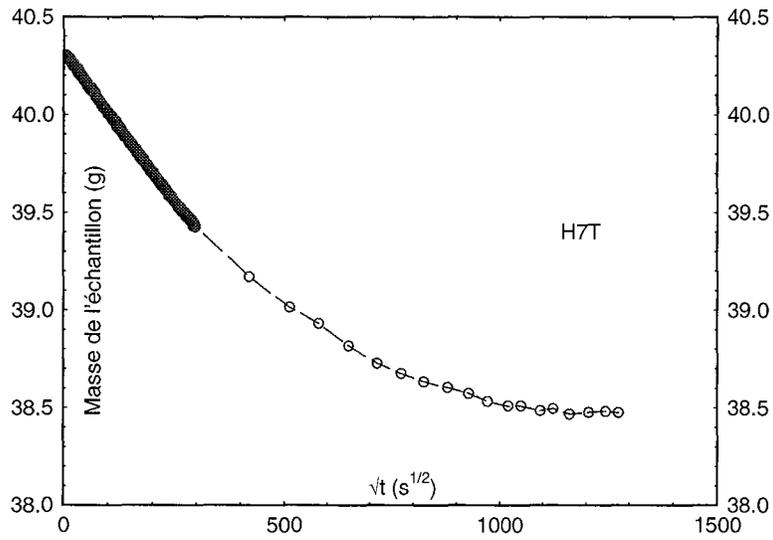


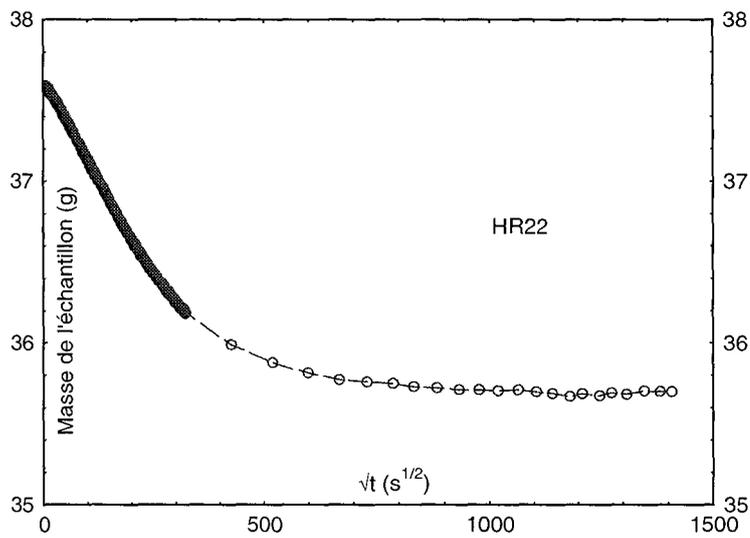
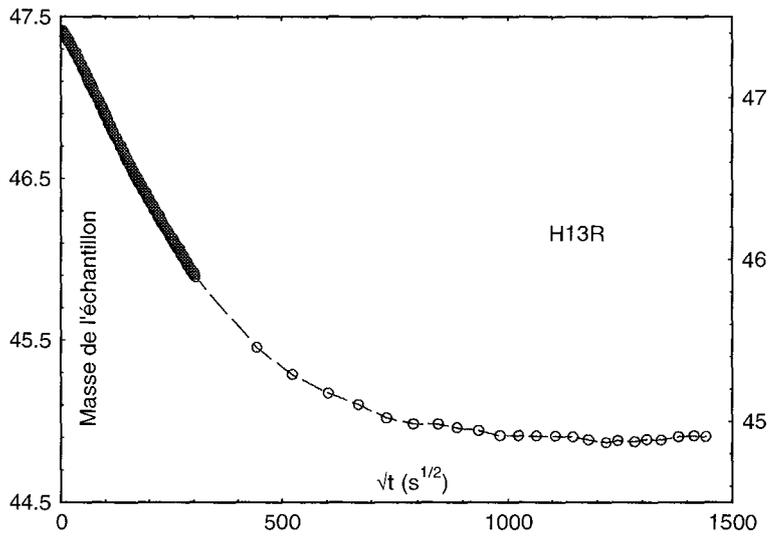
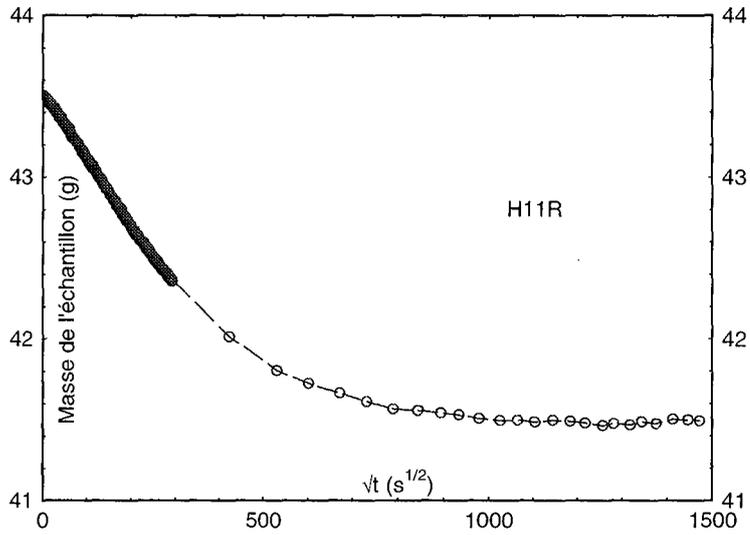


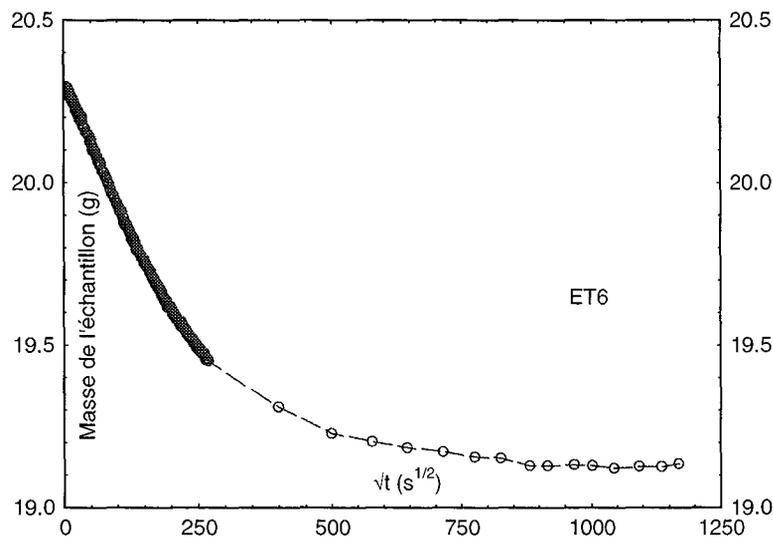
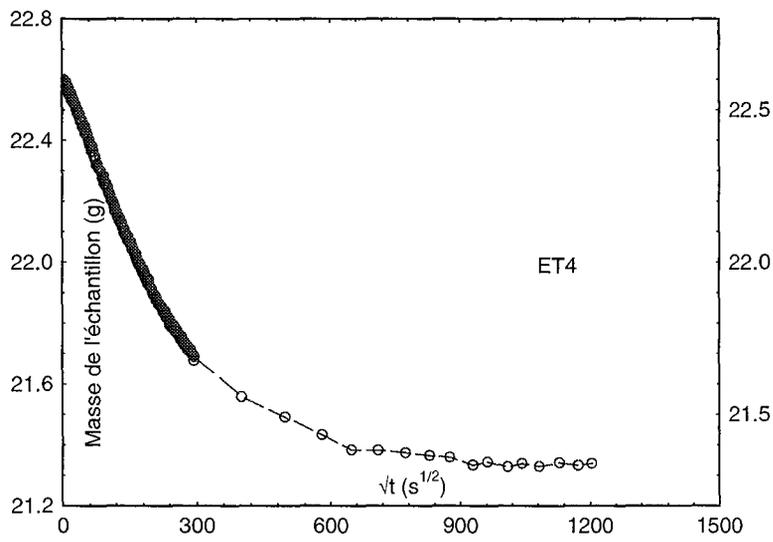
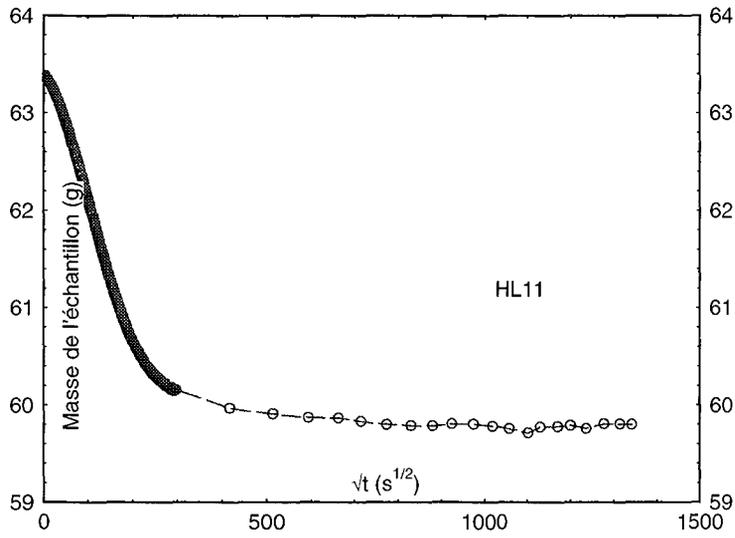


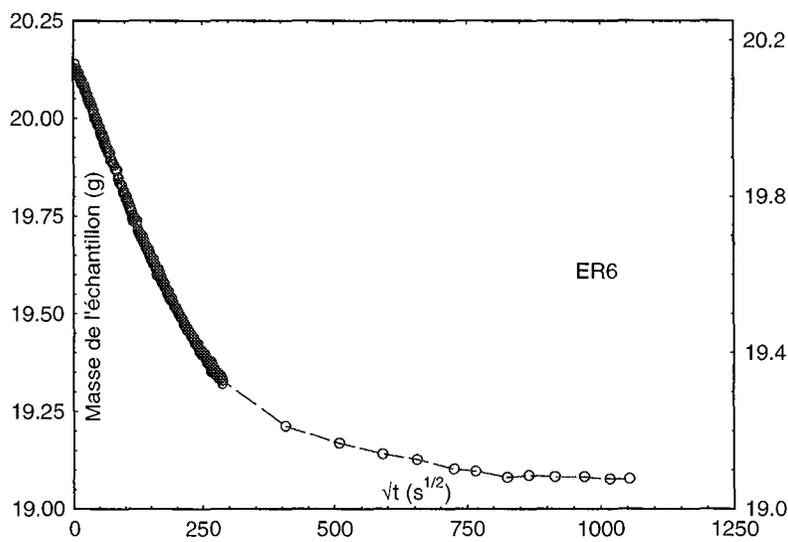
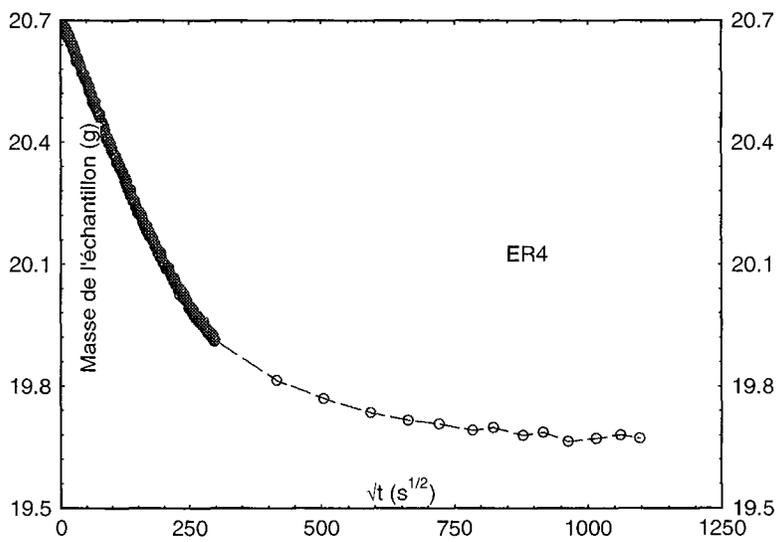
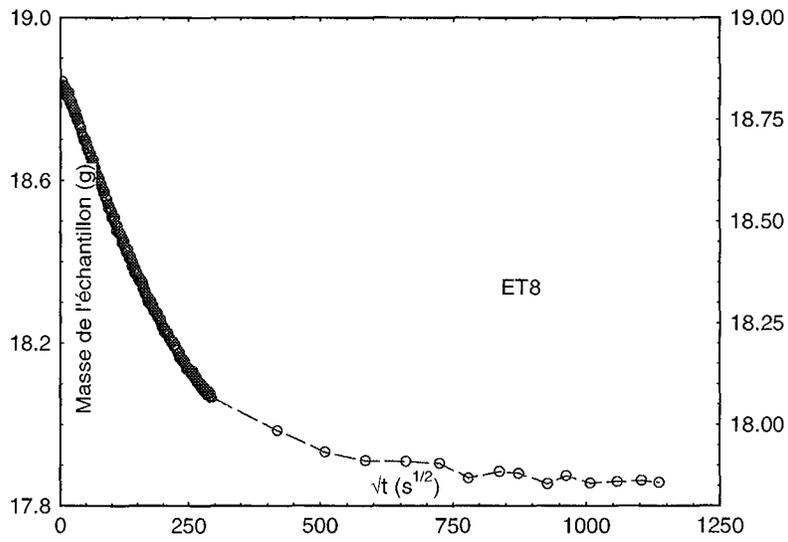
* Courbes de désorption

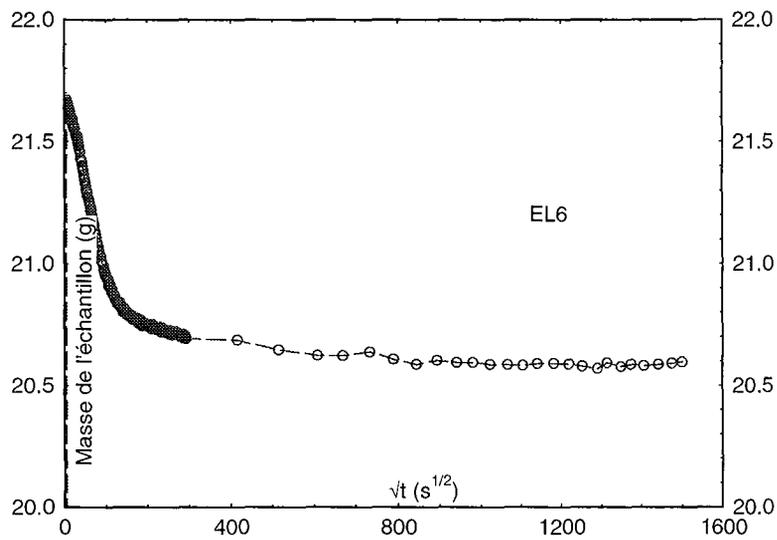
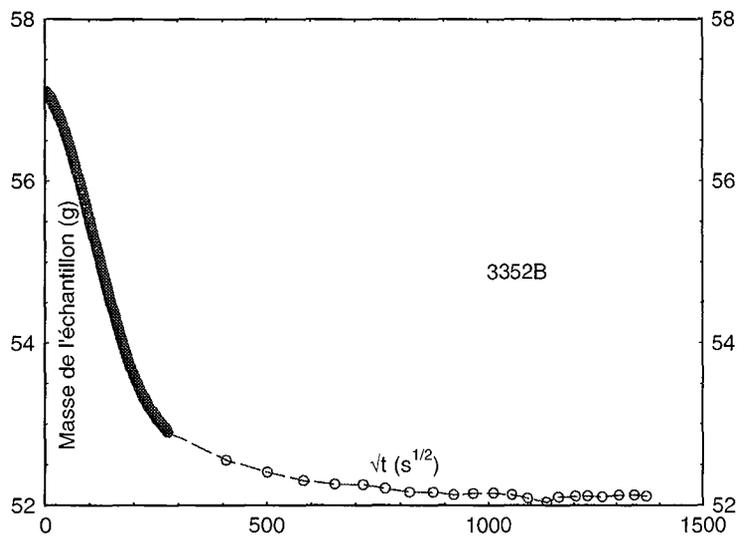
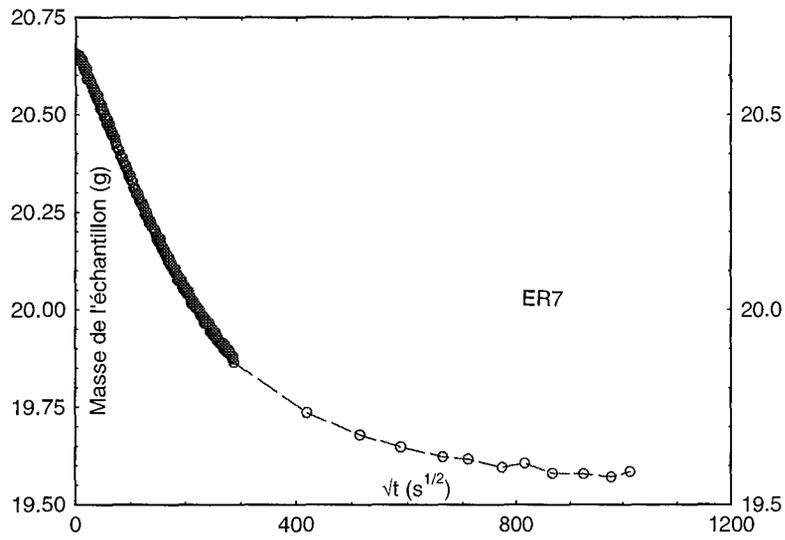
Ci-dessous sont représentées les courbes donnant la masse de l'échantillon en fonction de \sqrt{t} pour tous les échantillons testés.

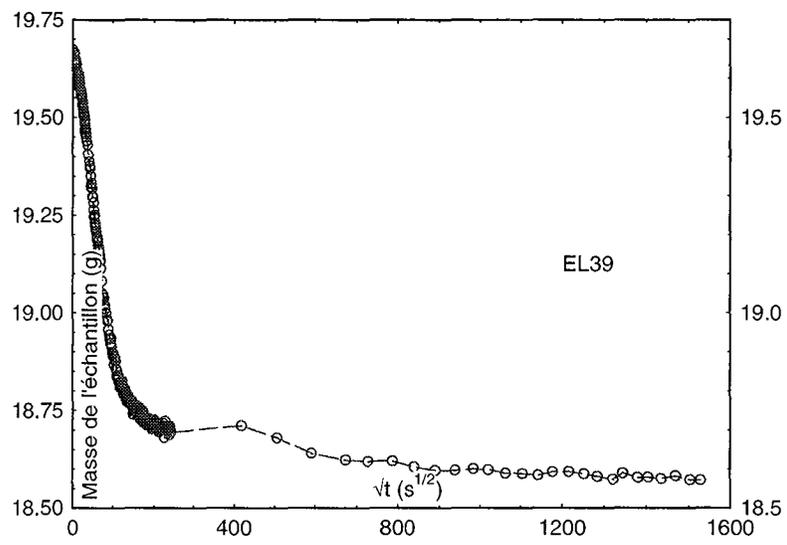












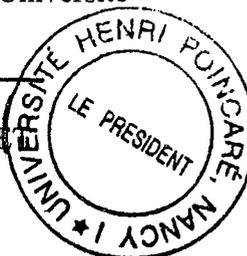
Mademoiselle MOUCHOT Nadia

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARÉ, NANCY-1
en SCIENCES et TECHNOLOGIES INDUSTRIELLES

VU, APPROUVE ET PERMIS D'IMPRIMER *n°717*

Nancy, le *13 novembre 2002*

Le Président de l'Université

Cl. BURLI


Résumé

Dans le domaine hygroscopique du bois et à basse température, les transferts internes de l'eau en phase gazeuse et adsorbée se font par diffusion. L'objectif de cette recherche est de préciser une méthodologie permettant d'accéder aux coefficients de diffusion caractéristiques de ces deux transferts. Cette méthodologie a été développée sur deux essences (hêtre et épicéa) et dans les trois directions orthotropiques du bois.

Trois dispositifs expérimentaux ont été mis en œuvre : une cellule de Wicke et Kallenbach, un vaporimètre et une double enceinte climatique.

Les expériences réalisées sur la cellule permettent d'obtenir indirectement les coefficients de diffusion de l'eau en phase gazeuse au sein du bois.

Celles conduites en régime stationnaire dans les vaporimètres permettent de préciser les coefficients de diffusion de l'eau adsorbée et les fractions d'eau transférée en phase gazeuse et en phase adsorbée.

Les mesures transitoires réalisées dans la double enceinte climatique en absorption et en désorption mettent en évidence des aspects qui méritent d'être confirmés, à savoir :

- Les coefficients de diffusion de l'eau adsorbée dépendent de l'humidité du bois et augmentent avec l'humidité
- Lors des étapes transitoires d'absorption ou de désorption, l'équilibre thermodynamique entre l'eau en phase gazeuse, et l'eau adsorbée n'est peut-être pas réalisé.

L'étude des mêmes échantillons dans les trois dispositifs constitue un travail original dans le domaine du transfert diffusionnel d'un soluté adsorbable dans un milieu solide poreux.

Les résultats acquis sont non seulement intéressants pour la modélisation des transferts diffusionnels de l'eau au sein du bois et des matériaux à base de bois, mais la méthodologie proposée doit pouvoir s'appliquer à tout soluté gazeux adsorbable sur un support solide microporeux, que ce soit un adsorbant ou un catalyseur.

Mots clés : coefficients de diffusion, hêtre, épicéa, cellule de Wicke et Kallenbach, vaporimètre, double enceinte climatique