



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>

Thèse

Présentée pour l'obtention du titre de

Docteur de L'Université Henri Poincaré, Nancy-1

En Sciences du Bois et des Fibres

par

Saloua GHAZIL

ETUDE DE LA MIGRATION DES FLUIDES DANS LE BOIS.

Soutenue publiquement le 15 avril 2010

Membres du Jury

Rapporteurs :

M^{me}. Laurence PODGORSKI

M. David CHASSAGNE

Coordinateur adjoint, FCBA, Pôle Industries Bois
Construction,

Enseignant-chercheur, Université de Bourgogne

Examineurs :

M. Philippe GERARDIN

M. Yann ROGAUME

M^{me}. Marie-Christine TRIBOULOT

M. Patrick PERRE

Professeur, U.H.P. Nancy I (Président du jury)

Professeur, U.H.P. ENSTIB Epinal

Maitre de Conférences, ENSTIB, (Co-directeur de
thèse)

Professeur, ENGREF, Nancy (Directeur de thèse)

Invité :

M. Emmanuel MAURIN

Responsable pôle Bois, Laboratoire de Recherche des
Monuments Historiques

| | |
|---|-----------|
| INTRODUCTION | 4 |
| ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE | 10 |
| I- ANATOMIE ET PERMEABILITE DU BOIS | 10 |
| I-1- L'anatomie du bois | 10 |
| I-1-1- Macrostructure | 11 |
| I-1-2- Microstructure | 13 |
| I-1-3- Ultrastructure | 14 |
| I-1-4- Anatomie des essences de bois étudiées | 18 |
| I-1-4-1- Anatomie du chêne blanc français | 18 |
| I-1-4-2- Anatomie du chêne rouge américain | 20 |
| I-1-4-3- Anatomie du robinier faux acacia | 21 |
| I-1-4-4- Anatomie du hêtre | 23 |
| I-1-4-5- Anatomie du sapin | 25 |
| I-2- Perméabilité | 26 |
| I-2-1- Définition | 26 |
| I-2-2- Imprégnabilité et préservation du bois | 27 |
| I-3- Facteurs influençant la perméabilité du bois | 28 |
| I-3-1- Direction du flux | 28 |
| I-3-1-1- Écoulement axial | 28 |
| I-3-1-2- Écoulement latéral | 31 |
| I-3-2- Nature du bois dans l'arbre | 31 |
| I-3-2-1- Aubier et duramen | 31 |
| I-3-2-2- Bois initial et bois final | 33 |
| I-3-3- Ultrastructure du bois | 33 |
| I-3-4- Nature du fluide | 36 |
| I-3-5- Humidité du bois | 36 |
| I-4- Relation entre anatomie et perméabilité chez les chênes et autres feuillus à zone initiale poreuse | 37 |
| I-4-1- Perméabilité des chênes | 37 |
| I-4-2- Les thyllés | 37 |
| I-5- Relation entre anatomie et perméabilité chez le hêtre | 43 |
| I-6- Relation entre anatomie et perméabilité chez le sapin et autres résineux | 43 |
| I-7- Effet de la biodégradation du bois sur l'anatomie et la perméabilité | 45 |
| I-7-1- Généralités | 45 |
| I-7-2- Augmentation de la perméabilité du bois suite à sa biodégradation | 46 |

| | |
|---|------------|
| I-7-3- Colonisation du bois par les mycètes | 47 |
| II- MIGRATION DES LIQUIDES DANS LE BOIS | 51 |
| II-1- Introduction | 51 |
| II-2- Matériels et méthodes | 52 |
| II-2-1- Sélection des essences | 52 |
| II-2-1-1- Le chêne sessile (<i>Quercus petraea</i> Liebl) | 52 |
| II-2-1-2- Le hêtre (<i>Fagus silvatica</i> L.) | 54 |
| II-2-1-3- Le sapin (<i>Abies pectinata</i> D.C.) | 54 |
| II-2-2- Plan de débit et conditionnement des échantillons | 55 |
| II-2-3- Montage expérimental pour l'étude de la cinétique de migration | 58 |
| II-2-4- Mesure de l'infra- densité | 61 |
| II-2-5- Préparation de la surface d'entrée du liquide | 62 |
| II-2-6- Choix des colorants | 64 |
| II-2-7- Exploration des échantillons imprégnés | 65 |
| II-2-8- Observation par microscopie électronique à balayage | 66 |
| II-3- Résultats et discussions | 67 |
| II-3-1- Le chêne | 68 |
| II-3-1-1- Aubier | 68 |
| II-3-1-1-1-Écoulement longitudinal | 68 |
| II-3-1-1-2-Écoulement radial et tangentiel | 81 |
| II-3-1-2- Duramen | 82 |
| II-3-1-2-1-Écoulement longitudinal | 82 |
| II-3-2- Le bois de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche | 86 |
| II-3-2-1- Aubier | 87 |
| II-3-2-1-1-Écoulement longitudinal | 87 |
| II-3-2-1-2-Écoulement radial | 96 |
| II-3-2-1-3-Écoulement tangentiel | 98 |
| II-3-2-2- Duramen | 98 |
| II-3-2-2-1-Écoulement longitudinal | 98 |
| II-3-3- Le hêtre | 101 |
| II-3-3-1- Aubier | 101 |
| II-3-3-1-1-Écoulement longitudinal | 101 |
| II-3-3-1-2-Écoulement radial | 105 |
| II-3-3-1-3-Écoulement tangentiel | 106 |
| II-3-3-2- Duramen | 107 |
| II-3-3-2-1-Écoulement longitudinal | 107 |
| II-3-3-2-2-Écoulement radial | 110 |
| II-3-3-2-3-Écoulement tangentiel | 111 |
| II-3-4- Le sapin | 112 |
| II-3-4-1- Aubier | 112 |
| II-3-4-1-1-Écoulement longitudinal | 112 |
| II-3-4-1-2-Écoulement radial | 117 |
| II-3-4-1-3-Écoulement tangentiel | 118 |
| II-3-4-2- Duramen | 119 |
| II-3-4-2-1-Écoulement longitudinal | 119 |

SOMMAIRE

| | |
|--|------------|
| II-3-4-2-2-Écoulement radial et tangentiel | 122 |
| II-4- Conclusion | 123 |
| III- PERMEABILITE A L'AIR ET THYLLOSE | 124 |
| III-1- Matériels et méthodes | 125 |
| III-1-1- Préparation des échantillons | 125 |
| III-1-2- Système de mesure de perméabilité à l'air | 129 |
| III-2- Résultats et discussion | 134 |
| III-2-1- Le chêne sessile (<i>Quercus petraea</i> L.) | 134 |
| III-2-2- Le chêne rouge américain (<i>Quercus rubra</i> L.) | 138 |
| III-2-3- Le robinier faux acacia (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.) | 141 |
| III-3- Conclusions | 145 |
| CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES | 146 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 154 |

Introduction

Le travail présenté dans ce mémoire a été financé en partie par le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques de Champs-sur-Marne, du Ministère de la Culture et de la Communication.

Au cours des années 80, la conservation du bois présent dans le patrimoine culturel, en particulier dans les meubles anciens, a vécu une véritable révolution alors que les meubles anciens eux-mêmes changeaient de statut. Une nouvelle génération de restaurateurs « en blouse blanche » s'est référée à la fois aux principes généraux de la protection classique des biens culturels et aux travaux de recherche scientifique, s'opposant ainsi aux restaurateurs issus de la tradition artisanale pure. Le meuble ancien n'est plus seulement un objet utilitaire, qu'il faut réparer ou rénover, mais un « livre », témoin de son époque et de sa propre histoire, dont il ne faut effacer aucune « page ». On assiste alors à la confrontation des « interventionnistes » et des « restaurateurs conservateurs ».

Le changement de statut de l'objet et la redéfinition du métier ont mis en exergue la nécessité d'acquérir toutes les connaissances techniques et scientifiques permettant de respecter l'intégrité de l'œuvre et de garantir la réversibilité des interventions.

C'est dans ce contexte que le laboratoire d'étude et de recherche sur le matériau bois LERMaB a répondu, en 1994, à une demande de collaboration de la part des restaurateurs de mobilier ancien sur différentes thématiques de recherche appliquée :

- caractérisations physique et mécanique des formulations de colles animales ;
- redressement des panneaux-supports par imprégnation superficielle du bois par du polyéthylène glycol ;
- amélioration du collage bois-laiton : influence de la préparation du laiton et de la formulation de colle utilisée ;
- élimination de la colle par hydrolyse enzymatique des colles animales.

L'étude de l'hydrolyse enzymatique des colles animales a fait l'objet en 2002/2003 d'un premier contrat de recherche avec le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques du Ministère de la Culture et de la Communication. Les enzymes présentent l'avantage d'agir à de très faibles concentrations et d'avoir une action ciblée qui garantit la maîtrise de l'intervention de restauration-conservation. De telles pratiques existent déjà dans le domaine du papier, du textile ou des œuvres picturales. Cette dernière étude a montré qu'une étude plus fondamentale sur la migration des liquides dans le bois s'avérait incontournable afin d'appréhender toutes les conséquences d'un dépôt de liquide à la surface d'une pièce de bois, dans le cadre d'opération de restauration de pièces de mobilier ou de panneaux décoratifs.

- ***Le choix des essences***

En concertation avec le Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques de Champs-sur-Marne, nous avons choisi de mener notre étude sur trois essences fréquemment rencontrées dans la restauration-conservation du patrimoine historique et culturel : le chêne, le hêtre et le sapin. L'avantage de ce choix est également de travailler sur des essences représentatives de grands groupes de bois anatomiquement différents.

Chêne blanc français (*Quercus robur* L. ou *Quercus petraea* Liebl.)

Première essence feuillue de France, le chêne a toujours été beaucoup utilisé, que ce soit pour la charpente, l'ébénisterie, la menuiserie ou la tonnellerie. Ce bois de feuillu est à zone initiale poreuse et à aubier différencié.

Hêtre (*Fagus silvatica* L.)

Deuxième essence feuillue des forêts françaises après le chêne, c'est l'essence de bois traditionnellement la plus employée pour les objets du quotidien réservés à un usage à l'abri des intempéries, en particulier les meubles et les sièges. Une connaissance précise de son comportement à l'imprégnation est de première importance pour les restaurateurs et conservateurs du patrimoine. Ce bois de feuillu est à pores diffus et à aubier non différencié.

Sapin pectiné (*Abies pectinata* DC)

Le bois de sapin a été traditionnellement utilisé dans l'ébénisterie et la charpente pendant des siècles, malgré sa faible résistance naturelle aux insectes xylophages. Ce bois de conifère à aubier non différencié a un plan ligneux simple.

Afin d'établir le niveau de relation entre la coloration du bois, indice du taux de duraminisation, et la perméabilité nous avons également mis en relation la perméabilité au gaz du bois et la thyllose pour quatre feuillus à zone initiale poreuse : le chêne rouvre, le robinier et le chêne rouge d'Amérique.

La restauration des bois anciens

Nous n'exposerons pas dans ce travail un panorama complet de la restauration-conservation du bois dans le patrimoine culturel, ni l'ensemble des problèmes rencontrés, mais nous aborderons quelques exemples qui montrent que la compréhension de la migration des liquides dans le bois revêt une importance particulière dans le cadre d'interventions contrôlées.

Lors du nettoyage de surface, il faut éviter une pénétration trop importante du liquide qui pourrait être la cause d'un décollement, de l'altération de matériaux non visés, ou de la déformation du bois. En revanche, lorsqu'on traite le bois avec des produits de préservation curatifs ou des résines consolidantes, on cherche une pénétration plus profonde, qui pourra être obtenue d'une manière très variable selon l'essence et l'état de dégradation biologique et physique du matériau.

Lors de la restauration d'une table marquetée du XVIII^{ème} siècle, on est confronté à des dégradations dues au vieillissement et aux restaurations passées (Philp 1999). La marqueterie a perdu ses couleurs d'origine, en partie à cause de l'application de produits non adaptés, présents non seulement en surface mais aussi en profondeur du placage.

En effet, il était courant de frotter les surfaces avec de la pierre-ponce dans de l'huile de lin. Cette huile insaturée présente l'inconvénient de foncer et de réticuler avec le temps.

La présence de glycérine est également délétère. Selon les critères actuels, dans le cadre d'une restauration, la marqueterie doit être débarrassée impérativement des polluants qui contribuaient à sa détérioration. Plusieurs expériences ont montré l'intérêt d'utiliser des solvants (eau, ethanol, ...) sous forme de gel pour nettoyer une surface tout en limitant le risque d'une pénétration trop importante du liquide dans le bois.

Les comptes-rendus de restauration de retables permettent de comprendre dans quel état de ruine le bois se trouvait avant d'être restauré.

Le retable de Sainte Colombe à Deerlijk, en Belgique, daté du XVI^e siècle, donne un bon exemple des causes de dégradation et des opérations réalisées, hier et aujourd'hui, sur du chêne polychrome (Serck-Dewaide 1990) :

- un premier surpeint a été effectué probablement au XVII^e siècle ;
- un deuxième surpeint localisé est daté de la fin du XVIII^e ou du début du XIX^e siècle ;
- l'ensemble est peint en blanc au cours du XIX^e siècle.

Lors de la première guerre mondiale, le retable est caché, emmuré, mais un obus touche le bâtiment, dans lequel pénètrent alors la boue et l'humidité. Ce n'est qu'en 1930, en préparation d'une exposition, qu'on « lave » et qu'on remonte l'œuvre. Lors de la deuxième guerre mondiale, le retable est mis en sécurité dans les caves du théâtre de Courtrai. Suite aux bombardements, le retable se retrouve une seconde fois dans l'eau.

En 1953, un amateur consolide les statues avec de la paraffine chaude et bouche les manques avec du mastic huileux.

En 1985, l'œuvre est documentée et examinée. La restauration débute en 1986 :

- désinfection par gazage au cyanure ;
- nettoyage consciencieux à sec puis au white spirit pour éliminer taches et spores visibles ;
- élimination des mastics et extraction de la paraffine ;
- injection d'une résine consolidante (Paraloïd B72 dissout dans le toluène)
- fixation des couches picturales soulevées avec différents produits ;

- enlèvement des adjonctions picturales postérieures au XIX^e siècle à l'aide d'un scalpel ;
- modelage des éléments manquants à partir de documents photographiques du début du XX^e siècle. Les éléments sont ensuite moulés en silicone, coulés en résine synthétique et fixés d'une manière réversible ;
- bouchage et consolidation à l'aide d'un mastic réversible constitué de poudre de chêne tamisée liée avec de l'acétate de polyvinyl dilué ;
- retouche de la polychromie ;
- protection à l'aide d'une couche de cire synthétique ;
- fixation des éléments sculptés à l'aide des anciens trous de clous sur des nouveaux blocs de soutènements en chêne, traités préventivement avec des produits fongicide et insecticide.

Les sculptures du retable de Grunewald au Musée Unterlinden de Colmar (Bas-Rhin) n'ont pas subi de dégâts des eaux (Gérard 1990). En revanche, réalisées en tilleul, excellent bois de sculpture mais sensible aux insectes xylophages, elles présentaient une attaque généralisée. L'impossibilité de déplacer l'œuvre a imposé un traitement par voie liquide. Une solution insecticide a été badigeonnée sur toutes les surfaces et injectée dans les trous de sortie des insectes. La désinsectisation des objets en bois par fumigation ou par anoxie peut parfois suffire, mais le recours à un traitement en phase liquide est bien souvent nécessaire.

Face aux problèmes rencontrés dans le respect des principes déontologiques de sa profession, le restaurateur doit pouvoir disposer d'un ensemble de connaissances techniques et scientifiques qu'il applique (Krawczyk 1992).

La migration des liquides dans le bois est un phénomène qui entre en jeu dans les opérations de nettoyage, de traitement de préservation préventif ou curatif, ou encore de consolidation. La recherche de nouvelles techniques de restauration, élaborées dans le souci permanent de la maîtrise et de la réversibilité des opérations, est confrontée à des interrogations concernant la pénétration des liquides dans les différentes essences de bois. Ce fut le cas des études réalisées au LERMaB, en particulier sur le redressement

des panneaux supports par imprégnation locale de polyéthylène glycol (Triboulot 1998) et l'hydrolyse enzymatique des colles animales (Triboulot et al. 2005).

Etude bibliographique

I- Anatomie et perméabilité du bois

I-1- L'anatomie du bois

Le bois est un ensemble de tissus d'origine secondaire, à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale. C'est un matériau poreux hétérogène, perméable mais fortement anisotrope et hygroscopique (Keller 1994). Le bois, ou xylème, et le liber sont générés par le cambium, situé sous l'écorce. Le cambium est un méristème secondaire, cette couche cylindrique de cellules indifférenciées (toujours jeunes) qui se divisent pour former le liber vers l'extérieur et nouvelles cellules de bois vers l'intérieur (Jacquot et al. 1973). Elles assurent ainsi la croissance en diamètre de la plante. Dans les régions tempérées, le cambium ne fonctionne que pendant la saison de végétation, du printemps à la fin de l'été. Il produit chaque année une couche de bois, appelée cerne annuel dans lequel on peut parfois distinguer le bois initial formé au printemps et le bois final formé à la fin de la période de végétation (Zimmermann 1983).

Le bois remplit dans l'arbre des fonctions bien déterminées : conduction de la sève brute, soutien mécanique et stockage de réserve. Les deux rôles fondamentaux du bois (conduction et soutien) sont remplis par des cellules mortes – cellules qui ont perdu leur protoplasme et dont il ne subsiste que la paroi. Les parois des cellules de bois sont caractérisées par la présence de lignine. Grâce à la lignification des parois de ces cellules, le bois est rigide, relativement hydrophobe et résistant à la biodégradation par rapport aux autres tissus végétaux. Ainsi les couches de bois formées au cours de la vie de l'arbre sont conservées et forment un cylindre sur lequel vient s'appliquer chaque année un nouveau cerne de circonférence supérieure. L'arbre se dote ainsi chaque année d'une quantité d'éléments conducteurs nouveaux qui croît en même temps que ses besoins en sève brute.

Les cellules mortes du bois (cellules conductrices de sève et cellules de soutien) sont associées à des cellules vivantes, les cellules de parenchyme, qui sont capables de stocker, et de mobiliser des réserves ou d'élaborer des substances. Dans les couches de bois les plus anciennes, c'est à dire les plus profondes, les cellules de parenchyme finissent par mourir (Jacquiot et al. 1973).

I-1-1- Macrostructure

L'œil permet une appréciation globale de l'aspect général du bois et de la disposition de ses tissus les plus apparents. Nous pouvons distinguer sur la figure I-1 les parties suivantes (Jacquiot et al. 1973) :

- ***L'écorce interne (liber)***

Couche située entre l'écorce et l'aubier qui, par des tubes criblés, assure le transport de la sève élaborée.

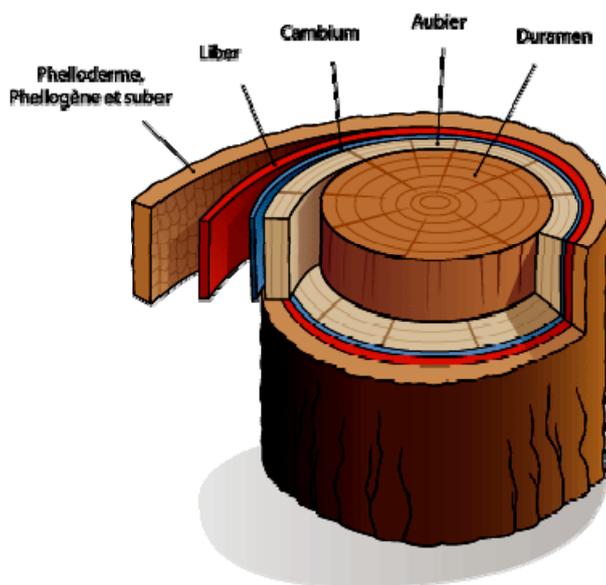
- ***L'aubier***

L'aubier est défini comme la zone périphérique du tronc dans laquelle les cellules de parenchyme sont vivantes. Il est de couleur claire généralement. La conduction de la sève brute n'a souvent lieu que dans les couches les plus externes de l'aubier.

- ***Le duramen***

La partie centrale du tronc qui ne contient plus que des cellules mortes, est appelée « duramen ». Chez certaines essences, dites essences à aubier différencié, le bois du duramen est coloré, il est alors nettement distinct de la couronne d'aubier de couleur plus claire. Cette partie centrale a subi une transformation d'ordre chimique, parfois anatomique, ce sont ces transformations qui constituent la duraminisation. La duraminisation est provoquée et contrôlée par les cellules vivantes de l'aubier ; les cellules de parenchyme. On note par exemple, l'élaboration de substances qui vont imprégner le bois, lui conférer sa couleur et une certaine résistance naturelle vis à vis des champignons ou des insectes ravageurs.

Les voies de circulation de la sève peuvent se fermer (fermeture des ponctuations aréolées des trachéides de résineux) ou se boucher (bouchage des vaisseaux de feuillus par des expansions membranaires appelées thylles ou par des substances obstruantes), ce qui a pour effet de rendre le bois duraminisé difficilement imprégnable et même étanche. La duraminisation explique en grande partie certaines caractéristiques essentielles des essences, à savoir la durabilité naturelle et l'imprégnabilité. La thyllose (formation des thylles obstruant les vaisseaux) est une qualité essentielle recherchée chez le chêne pour la tonnellerie puisqu'elle conditionne l'imperméabilité des tonneaux. La partie centrale du tronc n'est pas vitale pour l'arbre, elle peut même manquer suite à une dégradation biologique (cas des arbres creux). Il est intéressant de noter que dans l'arbre sur pied, l'aubier, grâce à son parenchyme vivant, est réactif, et moins souvent dégradé que le duramen. Chez l'arbre sur pied le phénomène de compartimentalisation isole la zone blessée et évite qu'une perte d'eau ne se propage dans les tissus sains. En revanche, dans le cas d'un arbre abattu ou du bois mis en œuvre, l'aubier résiste nettement moins bien que le duramen, car ce dernier est imprégné de substances protectrices élaborées au moment de la duraminisation, notamment des tanins.



*Figure I-1 : Représentation schématique d'un tronc d'arbre
(D'après Ponette et al. www.afd-Id.org)*

I-1-2- Microstructure

Du point de vue botanique, on distingue deux catégories de bois :

Les résineux sont des végétaux plutôt primitifs. D'un point de vue botanique, ces végétaux appartiennent à la subdivision des conifères dans le sous-branchement des gymnospermes. Les cellules qui forment leur bois sont peu spécialisées. Plus de 90 % du volume du bois de résineux est constitué de trachéides longitudinales, cellules allongées issues d'initiales fusiformes du cambium. La trachéide remplit à la fois un rôle de conduction de la sève brute et de soutien mécanique. Elle mesure en moyen 3 mm de long et porte à ses extrémités et sur les faces radiales des ponctuations aréolées. Les trachéides se chevauchent au niveau des extrémités. Les ponctuations permettent la communication et donc le passage de la sève brute d'une trachéide à l'autre (Venet 1986) (figure I-2).

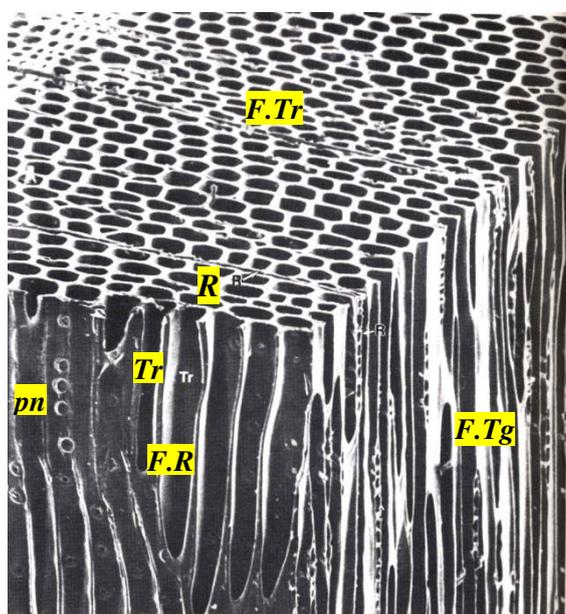


Figure I-2 : Eléments anatomiques des résineux. Cette photographie montre trois plans orthogonaux (F. Tr, face transversale, F.R., face radiale; F.Tg, face tangentielle) pn : ponctuation aréolée; R : rayon (parenchyme horizontal); Tr : trachéide. (D'après Robert & Catesson 1990).

Les feuillus sont des espèces végétales plus évoluées que les résineux. D'un point de vue botanique, ils appartiennent à la classe des dicotylédones dans le sous-branchement des angiospermes. Le bois est plus complexe, les cellules ont un rôle physiologique plus spécifique, leur plan ligneux est plus varié et l'identification des essences généralement plus facile. Les rôles de conduction de la sève et de soutien mécanique sont assurés par des types de cellules différentes (vaisseaux, fibres). Leur structure présente une diversité beaucoup plus grande que celle du bois de résineux. Leur bois est constitué de vaisseaux, de fibres, de fibres-trachéïdes, de rayons ligneux (parenchyme radial) et de parenchyme longitudinal (Jacquot et al 1973) (figure I-3).

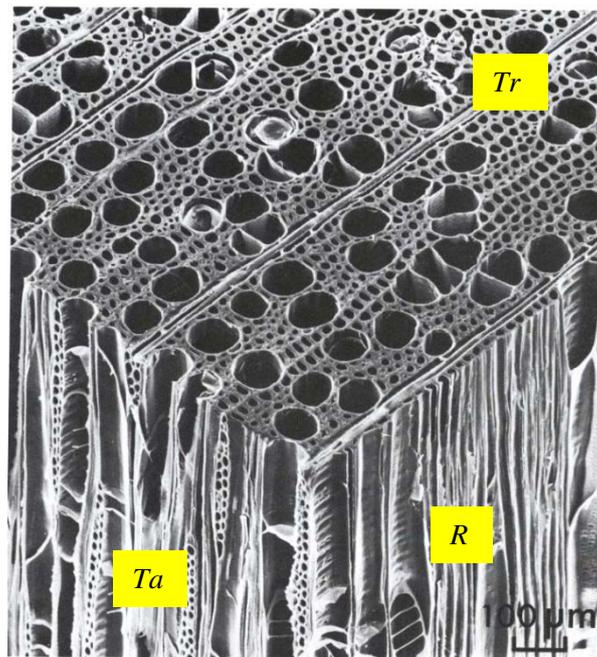


Figure I-3 : Plan ligneux de feuillus. Cette photographie montre trois plans orthogonaux (Tr, face transversale, R, face radiale; Ta, face tangentielle). (D'après Siau 1984)

I-1-3- Ultrastructure

- *Les ponctuations et les perforations des parois cellulaires*

Une paire de ponctuation consiste en deux interruptions des parois secondaires de deux

cellules adjacentes, avec une membrane mitoyenne correspondant à la lamelle moyenne prise en sandwich entre les deux parois primaires. Il existe trois types de paires de ponctuations que l'on trouve dans le bois de résineux et dans le bois de feuillus (figure I-4):

- la ponctuation simple est généralement localisée entre deux cellules de parenchyme ;
- la ponctuation semi-aréolée entre une cellule de parenchyme et une cellule de prosenchyme (cellule morte dont ne subsiste plus que la paroi), la partie aréolée se trouvant côté prosenchyme ;
- une ponctuation aréolée est située entre deux cellules de prosenchyme comme des trachéides longitudinales ou des trachéides radiales (Siau 1984).

Il existe de véritables perforations, ce sont les ouvertures de chaque extrémité des éléments de vaisseaux chez les feuillus. Elles peuvent être totales, de même diamètre que la lumière des vaisseaux ou partielles, laissant subsister dans l'ouverture des éléments de paroi sous forme de barres, elles sont dites alors scalariformes.

- *Chez les résineux*

D'après Siau (1984), des trois types de ponctuations, la paire de ponctuations aréolées à l'influence la plus significative sur les propriétés d'écoulement, car presque tout le bois de résineux est constitué de trachéides. Le diamètre total des chambres des ponctuations aréolées de résineux est de l'ordre de 6 à 30 μm , celles du bois initial étant plus large que celle du bois final. Le torus, lorsqu'il est présent, a un diamètre de 1/3 à 1/2 du diamètre de la chambre. Le torus est la portion centrale épaissie de la membrane de la ponctuation, consistant en matériaux de paroi primaire. Il est typique des espèces de la famille des pinacées. Normalement, il n'y a pas d'ouverture apparente dans le torus, mais occasionnellement, de petits trous sont observés chez certaines espèces.

Généralement, le torus est imperméable aux fluides, comme le montre la corrélation établie entre l'aspiration de la ponctuation et la faible perméabilité. La membrane entourant le torus est appelé marge, et consiste en plage de microfibrilles de cellulose

rayonnant du torus vers la périphérie de la chambre (Siau 1984). Les espaces entre les microfibrilles permettent le passage des fluides et des petites particules à travers la membrane de la ponctuation. Des mesures microscopiques et des méthodes indirectes indiquent que ces espaces ont un diamètre compris entre 0,02 et 4 μm (Siau 1984).

L'épaisseur de la membrane de la ponctuation est une grandeur importante. La marge aurait une épaisseur comprise entre 0,1 et 0,5 μm (Siau 1984). Les membranes des ponctuations simples ou semi-aréolées sont apparemment plus épaisses que celles des ponctuations aréolées. Malgré leur épaisseur relative et l'absence d'espaces de ces membranes, Siau a apporté des preuves de leur efficacité comme voies de passage des flux.

Les ponctuations aréolées du bois initial et du bois final sont comparées : dans le bois final, elles ont un diamètre total plus petit avec une membrane et un torus plus épais, ce qui conduit à une structure plus rigide qui est d'avantage capable de résister aux forces de capillarité qui causent l'aspiration. Les ouvertures dans le bois final ressemblent plus à des capillaires et celles du bois initial à des orifices. Cette variation est susceptible de produire des différences significatives dans les propriétés de flux (Siau 1984).

Lors de la duraminisation, le torus est plaqué contre la paroi secondaire, ce qui bloque l'ouverture et empêche la pénétration des fluides. Le torus est probablement maintenu dans cette position par des liaisons hydrogènes entre les chaînes de cellulose, ainsi que par une incrustation des extractibles (Côte 1963).

- *Chez les feuillus*

Il n'y a généralement pas de torus dans les ponctuations des feuillus et les membranes sont continues à travers toute la chambre de la ponctuation. Ces membranes sont des parois primaires dont les microfibrilles sont orientées au hasard. Les ponctuations des feuillus sont généralement plus petites que celle des résineux. Bien qu'il n'y ait pas d'ouvertures comparables à celle des marges chez les résineux, il existe de nombreuses preuves de l'existence d'ouvertures.

Les divers résultats montrent qu'il y a une grande variabilité dans les tailles des pores des membranes de ponctuations des feuillus et que les valeurs obtenues dépendent de méthode utilisée. On trouve dans la littérature des valeurs comprises entre 5 et 170 nm. (Siau 1984)

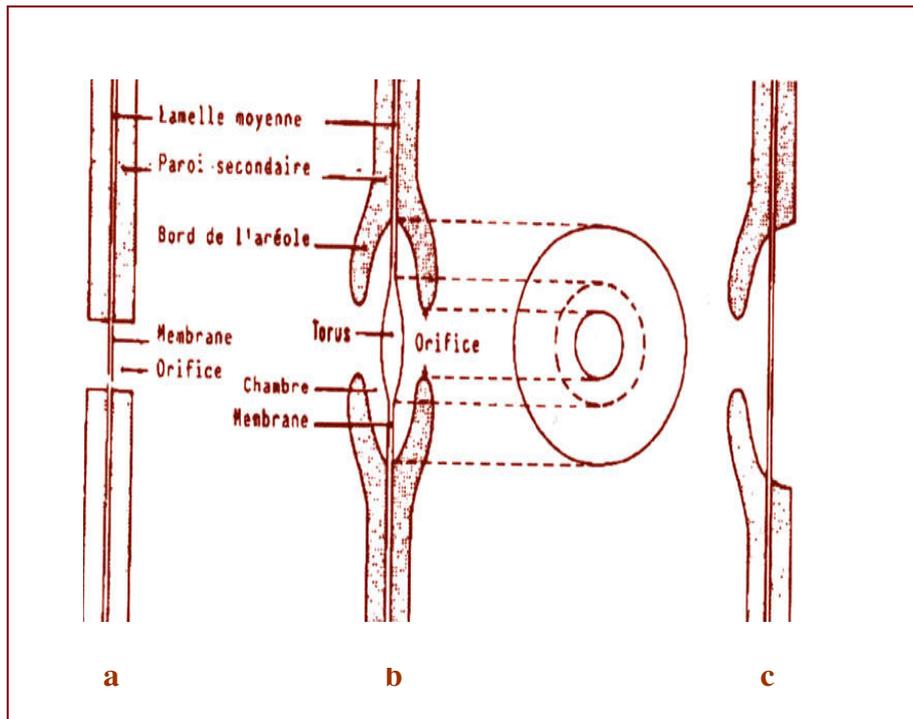


Figure I-4 : Les différents types de ponctuations, (a) ponctuation simple, (b) ponctuation aréolée, (c) ponctuation semi-aréolée. (D'après Grosser 1977 cité par Keller 1994)

I-1-4- Anatomie des essences de bois étudiées

I-1-4-1- Anatomie du chêne blanc français

- *Le chêne sessile (Quercus petraea L.)*

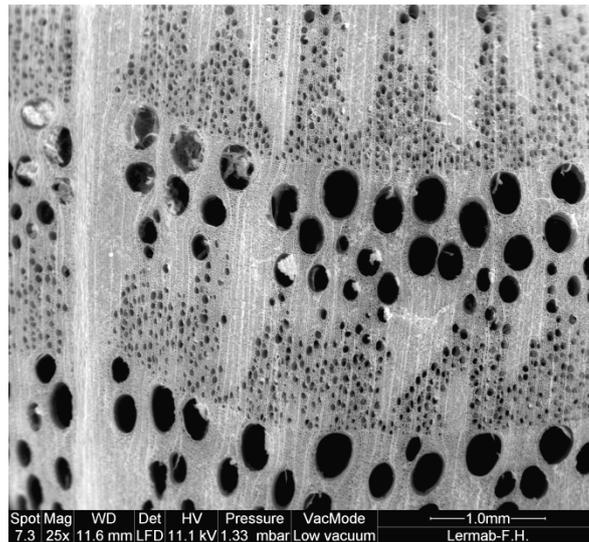


Figure I-5.: Coupe transversale de Quercus petraea. (Photo Huber 2008)

Les caractéristiques anatomiques de l'essence (Jacquot et al. 1973)Plan ligneux

- Bois à zone initiale poreuse
- Vaisseaux du bois initial nombreux, formant 2 à 4 rangs
- Les vaisseaux du bois final tendent vers une disposition en plages radiales, plus ou moins nettement délimitées, plus étroites et plus nettes dans les échantillons possédant des cernes annuels larges et un bois final important, moins distinctes dans les échantillons à cernes étroits, où elles peuvent devenir confluentes à la fin du cerne et même se transformer en une zone presque continue.
- Rayons de types distincts: la plupart unisériés, très fins; les autres larges, souvent fractionnés, homogènes en général.
- Parenchyme paratrachéal et apotrachéal diffus, abondant.

Vaisseaux

- Diamètre de 300 à 500 μm dans le bois initial.
- Dans le bois final, le diamètre diminue jusqu'à 20 μm .
- Perforations uniques
- Ponctuations intervasculaires assez grandes, elliptiques en rangées horizontales, parfois en files obliques
- Ponctuations rayon-vaisseau assez grandes et elliptiques
- Thyllés abondants dans le duramen.

Rayons

- La plupart unisériés. Hauteur : 10 cellules en moyenne.
- Les autres (1 sur 15 à 20 environ) sont plurisériés, atteignent une largeur de 15 cellules. Hauteur de plusieurs centimètres.

Fibres libriformes

- Forment la masse des tissus fibreux dans le bois final, où elles sont groupées en zones radiales, entre les plages de vaisseaux.
- Parois épaisses, à ponctuations fines et nombreuses, à orifice en fente.

Fibres trachéides

- Mélangées aux vaisseaux.
- Ponctuations nombreuses, petites, à orifices en fentes et croisées.

Parenchyme

- Abondant, paratrachéal et apotrachéal en couches, à parois minces.
- Ponctuations nombreuses sur les faces radiales.
- Cellules cristallifères absentes ou occasionnelles.

On peut apporter quelques précisions concernant le parenchyme longitudinal. Le parenchyme paratrachéal enrobe les vaisseaux et le parenchyme apotrachéal forme de très fines lignes tangentielles au sein des plages de tissus fibreux (Venet 1986).

I-1-4-2- Anatomie du chêne rouge américain

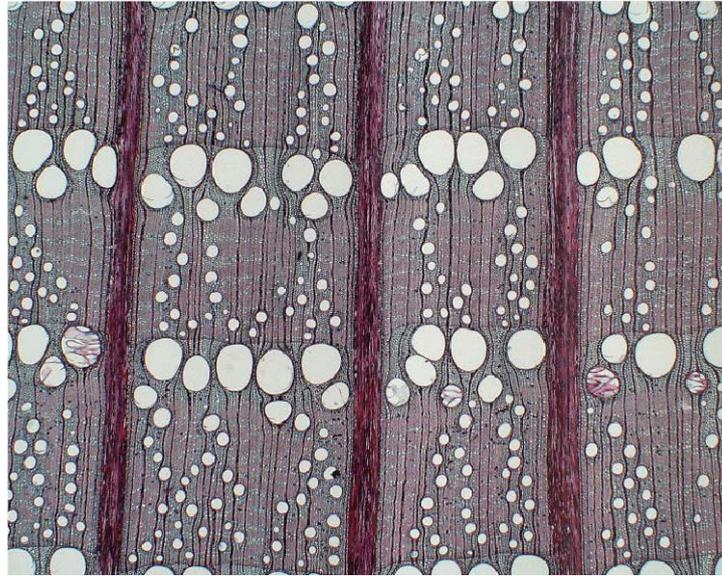
- *Le chêne rouge* (*Quercus rubra* L.)

Figure I-6 : Coupe transversale de Quercus rubra L. (Richter & Dallwitz, 2000)

Les caractéristiques anatomiques de l'essence

Les seules particularités anatomiques notées par Jacquot et al. (1973) pour le chêne rouge par rapport au chêne sessile concerne l'absence de thylles, les ponctuations rayon-vaisseau (petites, de forme variant de la fenêtre à la fente à axe vertical ou oblique) et la hauteur des rayons multisériés (pas plus de 2 cm chez le chêne rouge alors qu'elle dépasse 6 cm chez le chêne sessile).

Venet (1986) note que chez le chêne sessile, les alignements radiaux de petits vaisseaux dans le bois final s'élargissent « en diabolos » vers la fin du cerne alors que chez le chêne rouge, les vaisseaux de bois d'été constituent simplement des alignements rectilignes.

I-1-4-3- Anatomie du robinier faux acacia

- **Le robinier** (*Robinia pseudoacacia* L.)

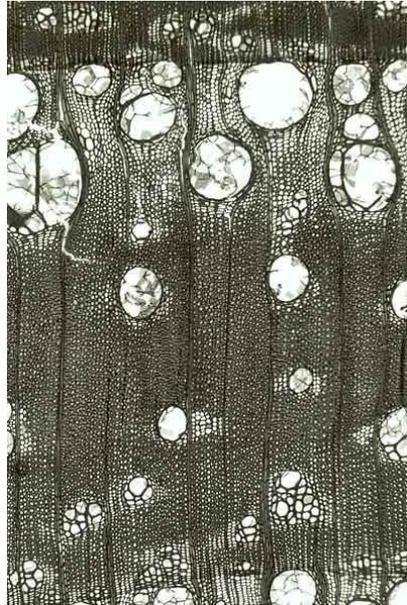


Figure I-7: Coupe transversale Robinia pseudoacacia L. (Schoch et al. 2004)

Les caractéristiques anatomiques de l'essence (Jacquot et al. 1973)Plan ligneux

- Bois à zone initiale poreuse
- Vaisseaux du bois initial nombreux groupés sur 2 à 3 rangs
- Vaisseaux du bois final accolés en groupes assez importants, eux-mêmes isolés ou disposés en bandes tangentielles ou oblique discontinues.
- Rayons de taille moyenne, assez peu nombreux : 5 à 6 par mm tangentiel.
- Parenchyme étagé très abondant, circumvasculaire, parfois à tendance aliforme, et terminal.
- Limite des cernes visible, parfois flexueuse.

Vaisseaux

- Section circulaire à elliptique dans la zone poreuse, polygonale dans le bois final.

- Diamètre atteignant 200 à 300 μm dans la zone poreuse, de 50 à 150 μm dans le bois final.
- Perforations uniques, souvent placées au même niveau, surtout dans le bois final, donnant un aspect étagé.
- Parois assez épaisses, à épaissements spiralés serrés dans le bois final.
- Ponctuations intervasculaires en quinconce, grandes, elliptiques, ornées.
- Ponctuations rayon-vaisseau grandes, elliptiques.
- Thyllés très abondants, parfois absent dans l'extrême bois final.

Rayons

- Largeur : 3 à 5 cellules. Hauteur : 20 à 40 cellules, parfois davantage, parfois fractionnés.
- Homogènes.
- Parois d'épaisseur moyenne à ponctuations assez nombreuses.

Fibres libriformes

- Parois minces à moyennes. Ponctuations fines à orifices en fente et croisées.
- Disposition étagée surtout dans le bois final.

Fibres trachéides

- Absentes

Parenchyme

- Formé surtout de cellules fusiformes étagées, entremêlées de cellules plus courtes provenant de la division d'une initiale fusiforme en 2 ou 4 cellules.
- Parois d'épaisseur moyenne.
- Ponctuations peu nombreuses.

La description de Venet (1986) précise ce plan ligneux. Les vaisseaux du bois final forme des groupements et des alignements très divers et très inégaux : parfois plages circulaires, entre deux rayons ligneux, formées par un groupe de très petits vaisseaux,

parfois alignements obliques de petits groupes de vaisseaux, dessinant comme des dents de scie ou même des alignements tangentiels, mais généralement discontinus, situés en particulier sur le bord externe de la zone finale. Le parenchyme auréolant les groupes de vaisseaux et les alignements est de couleur nettement plus claire que le tissu fibreux.

I-1-4-4- Anatomie du hêtre

- **Le hêtre** (*Fagus silvatica* L.)

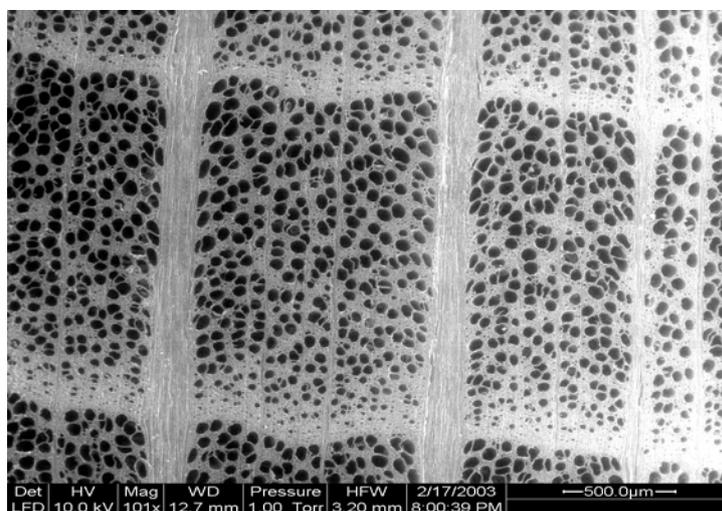


Figure I-8 : Coupe transversale de Fagus silvatica L. (Photo Huber 2008)

Les caractéristiques anatomiques de l'essence (Jacquot et al. 1973)

Plan ligneux

- Bois homogène, à pores diffus, isolés ou accolés par 2 à 6, très nombreux : 50 à 100 par mm², leur nombre décroissant régulièrement du bois initial au bois final.
- Rayons de largeurs différentes, nombreux, les plus épais élargis à la limite des cernes.
- Parenchyme abondant, juxtavasculaire ou apotrachéal dispersé.
- Limite des cernes visibles, relevés au niveau des rayons.

Vaisseaux

- Section elliptique ou ploygonale. Diamètre assez fin : 50 à 75 μm .
- Perforations uniques ou scalariformes pouvant atteindre 20 barreaux.
- Parois minces.
- Ponctuations intervasculaires aréolées en rangées horizontales ou parfois scalariformes.
- Ponctuations rayon-vaisseau grandes, elliptiques, à grand axe horizontal, en rangées parallèles, nombreuses.

Rayons

- Largeur de 1 à 25 cellules. Hauteur pouvant atteindre 4 mm.
- Homogènes.
- Parois très épaisses à ponctuations nombreuses.

Fibres libriformes

- Parois épaisses. Longueur : 1500 μm environ.
- Ponctuations fines.

Fibres trachéides

- Peu nombreuses. Parois épaisses.
- Ponctuations assez nombreuses.
- On rencontre les formes intermédiaires entre fibres libriformes et fibres trachéides.

Parenchyme

- Parois épaisses.
- Ponctuations fines groupées en plages.

La répartition des vaisseaux dans le bois de hêtre est diffuse avec parfois une concentration plus forte dans le bois initial que dans le bois final. Le nombre de vaisseaux au mm^2 est plus important chez les jeunes plantes que chez les adultes, mais

le pourcentage de surface transversale occupée par les vaisseaux est plus élevé chez les adultes car le diamètre des vaisseaux y est plus grand. La surface poreuse due aux vaisseaux (porosité) est maximum au début du bois initial et minimum à la fin du bois final. La proportion de fibres trachéides augmente du bois initial vers bois final, leur diamètre tangentiel semble aussi augmenter régulièrement avec l'âge. Le parenchyme longitudinal est plus abondant chez les jeunes plants que chez les adultes. Il est à parois plutôt épaisses, organisé en files disséminées parmi les fibres et les vaisseaux et constitue la partie vivante du bois fonctionnel. Leur pourcentage moyen chez le hêtre est de 5% (Keller 1994).

I-1-4-5- Anatomie du sapin

- *Le sapin (Abies pectinata D.C.)*

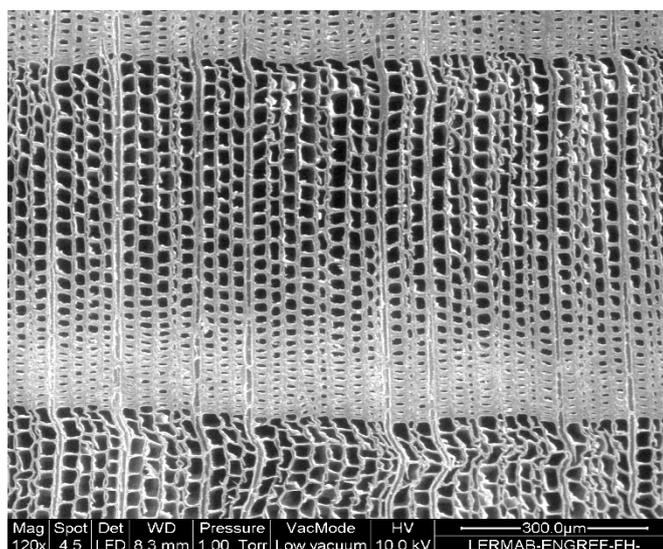


Figure I-9 : Coupe transversale de Abies pectinata D.C. (Photo Huber 2008)

Les caractéristiques anatomiques de l'essence (Venet 1986)

Le sapin est un résineux et son bois est à aubier non différencié. C'est un bois à accroissements très apparents, les trachéides d'été sont à parois nettement plus épaisses, plus denses et plus colorées que celles des trachéides du bois de printemps. Ce sont des

cellules très allongées (1,5 à 4,5 mm), se terminant en pointes effilées, communiquant entre elles et avec les trachéides transversales par des ponctuations aréolées. Il ne présente pas de canaux résinifères, le bois final est assez large et succède au bois initial de manière progressive. Les rayons ligneux du sapin sont homogènes (pas de trachéides radiales) et unisériés, formées de cellules de parenchyme à parois épaisses et très ponctuées communiquant avec les trachéides de printemps par des ponctuations axodioïdes, picéoïdes avec trachéides d'été. C'est un bois qui renferme des cellules de parenchyme longitudinal.

I-2- Perméabilité

I-2-1- Définition

La perméabilité est la propriété d'un corps ou d'un milieu poreux à se laisser pénétrer et traverser par un fluide sous l'effet d'un gradient de pression (Perré 1987).

Pour qu'un solide soit perméable il doit être poreux, mais tous les solides poreux ne sont pas perméables car la perméabilité est possible grâce aux pores interconnectés (Perré 1987).

Les travaux de Darcy sur les fontaines de Dijon ont montré que pour de faibles vitesses d'écoulement de liquide, il y a proportionnalité entre le débit et la différence de pression appliquée de part et d'autre du milieu considéré :

$$\frac{Q.L}{A.\Delta P} = \text{Constant}$$

Avec Q : Flux

L : Longueur dans la direction de l'écoulement

A : Section de passage

ΔP : Différence de pression aux bornes du milieu

La perméabilité spécifique ou intrinsèque est défini par :

$$K = \frac{Q \cdot L_{\mu} \cdot P}{A \cdot \Delta P \cdot \bar{P}}$$

Avec μ : Viscosité dynamique des fluides

K: Perméabilité spécifique ou intrinsèque du milieu poreux considéré

P : Pression à laquelle le flux a été mesuré

\bar{P} : Pression moyenne du gaz

Dans le cas du bois, la perméabilité est possible grâce aux éléments anatomiques interconnectés par les ponctuations et/ou les perforations. De façon empirique, les relations ont été recherchées entre porosité et perméabilité par plusieurs chercheurs (Jacob 1946, Franzini 1951, Hudson & Roberts 1952) cité par Perré 2007, aucune relation simple n'a été trouvée.

I-2-2- Imprégnabilité et préservation du bois

Dans un bois sec (il n'y a plus d'eau dans les lumières des cellules), c'est-à-dire à un taux d'humidité inférieure à 25 %, l'imprégnation fait intervenir les voies structurales du bois et la migration par capillarité (Deglise & Dirol. 2000).

D'un point de vue industriel, la perméabilité du bois est souvent associée voire confondue avec l'imprégnabilité, autrement dit la facilité avec laquelle un bois peut être pénétré par un liquide (comme par exemple un produit de préservation). Dans la norme EN350-2, une classification à 4 niveaux est utilisée :

Niveau 1 : imprégnable

Niveau 2 : moyennement imprégnable

Niveau 3 : Peu imprégnable

Niveau 4 : Non imprégnable

Il n'y a pas d'essais normalisés de l'évaluation de l'imprégnabilité : les informations données découlent de constatations générales rencontrées lors de l'application de traitement vide pression en autoclave. Les données de la norme EN250-2 concernant les essences étudiées au cours de la thèse figurent dans le tableau I-1.

Tableau I-1 : Imprégnabilité des essences de bois étudiées au cours de la thèse (EN250-2)

| | Largeur de l'aubier | Imprégnabilité | |
|----------------------|---------------------|----------------|--------|
| | | Bois parfait | Aubier |
| Sapin | Non différencié | 2-3 | 2v |
| Hêtre | Non différencié | 1 | 1 |
| Chêne sessile | 2 à 5 cm | 4 | 1 |
| Chêne rouge | 2 à 5 cm | 2-3 | 1 |
| Robinier faux acacia | < 2 cm | 4 | 1 |

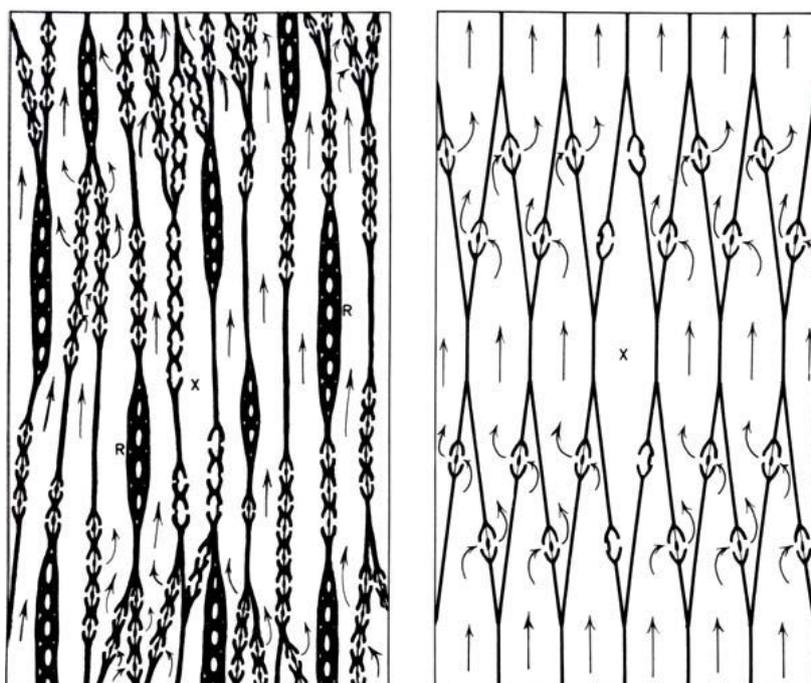
I-3- Facteurs influençant la perméabilité du bois

I-3-1- Direction du flux

I-3-1-1- Écoulement axial

Le flux est plus important dans la direction longitudinale que dans la direction radiale ou tangentielle, ceci chez les résineux comme chez les feuillus. La perméabilité est plus forte radialement que tangentiellement. Sur 22 essences de feuillus étudiées par Choong et al. (1974), la différence entre la perméabilité radiale et la perméabilité tangentielle était significative, le rapport moyen était de l'ordre de 2,3 sur 1. D'après Agoua (2001) la perméabilité longitudinale est très grande par rapport à la perméabilité transversale et le rapport d'anisotropie varie de 100 à 300 000. Une légère différence de perméabilité entre la perméabilité radiale et la perméabilité tangentielle a été remarquée par le même auteur. Le rapport entre la perméabilité transversale (radiale ou tangentielle) et la perméabilité longitudinale pour les résineux est d'environ 1/100 à 1/10 000. Ce rapport est encore plus petit chez les feuillus dû à une très grande conductivité liée à la présence des vaisseaux (Karimi 1995, Perré 2007).

Chez les résineux, l'écoulement axial s'effectue en premier lieu dans les trachéides longitudinales en passant par les ponctuations aréolées (Zimmermann 1983) (figure I-10). Un rôle très secondaire est joué par les canaux résinifères et le parenchyme longitudinal, également orientés dans la direction longitudinale. L'écoulement dans le bois de résineux implique deux facteurs, qui sont le lumen des trachéides et l'ouverture des ponctuations. La résistance au flux ne réside donc pas uniquement dans les membranes des ponctuations. Bolton et Petty (1978) présentent un modèle mathématique basé sur le fait que la résistance totale au flux dépend de plusieurs paramètres : le diamètre ou l'ouverture de la ponctuation, l'anneau bordant le torus (la marge) et la lumière des trachéides.



*Figure I-10 : Modèle d'écoulement de la sève chez les résineux
(D'après Zimmermann 1983)*

Chez les feuillus, l'écoulement des fluides dans la direction longitudinale est largement contrôlé par la taille et le nombre de vaisseaux qui ne sont pas bouchés par les thyllés ou par d'autres obstructions. Les vaisseaux constituent la principale voie de pénétration des liquides. Des liquides polaires et non polaires peuvent passer des vaisseaux au

parenchyme adjacent, aux trachéides vasicentriques ou aux fibres-trachéides via les ponctuations, ce qui montre de nouveau que les ponctuations sont de première importance pour l'écoulement de cellule à cellule. Les fibres libriformes, au lumen étroit et souvent rempli d'air, jouent un rôle mineur dans la conduction des liquides et des gaz (Hansmann et al. 2002). Côté (1963) mentionne que les fibres-trachéides au large lumen et les trachéides vasicentriques sont souvent fortement ponctuées, les cellules de parenchyme longitudinal sont généralement décrites comme plus perméables que les fibres-libriformes. Une étude d'écoulement chez l'eucalyptus, par Wardrop et Davies (1961), a montré que le passage dans l'aubier s'effectue par les vaisseaux, les fibres et les rayons ligneux. Au niveau du duramen, ils ont trouvé que le passage est comparable à celui dans l'aubier en absence des thylles.

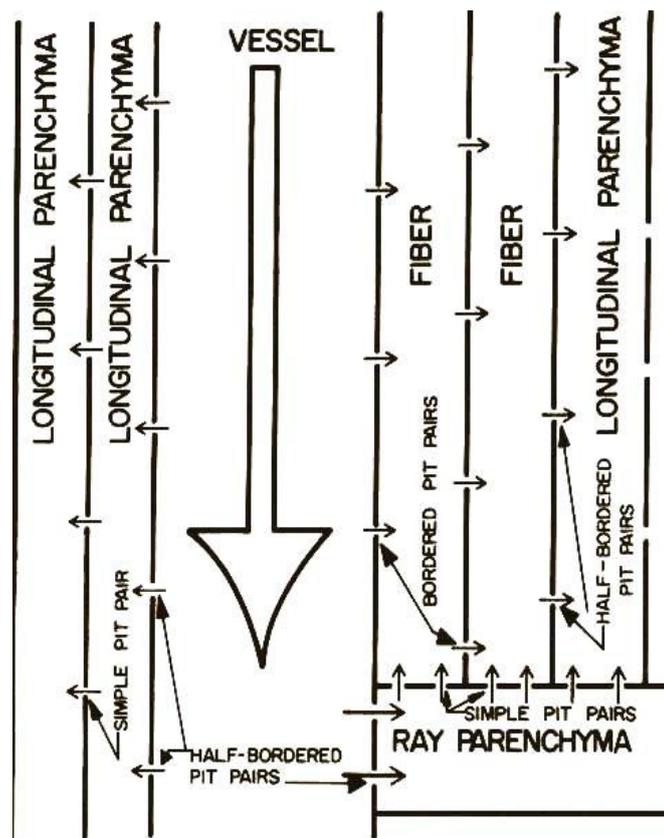


Figure I-11 : Modèle général d'écoulement chez les feuillus (Siau 1984)

I-3-1-2- Écoulement latéral

En général, les rayons ligneux offre un chemin réel pour l'écoulement latéral (Wardrop & Davies 1961, Côté 1963, Murmanis & Chudnoff 1979). Chez les résineux, les rayons ligneux contribuent de manière importante au mouvement dans la direction radiale, particulièrement chez les espèces dont les rayons sont hétérogènes c'est à dire renfermant des trachéides (Côté 1963). Les trachéides des rayons ligneux chez les résineux semblent être radialement plus perméables que le parenchyme radial. D'autre part, Wardrop et Davies (1961) rapportent que la pénétration dans le pin radiata est aisée dans le parenchyme radial. En examinant la pénétration des liquides dans l'aubier d'eucalyptus, Rudman (1965) a mis en évidence un mouvement le long des rayons avec de l'hydroxyde de sodium chaud ou de l'eau chaude.

L'action des rayons sur la perméabilité est plus variable chez les feuillus que chez les résineux (Côté 1963). Il existe une corrélation entre le nombre de rayons ligneux et l'imprégnabilité du bois (Schulze 1960 cité par Efransjah 1988). Les bois très imprégnables présentent un nombre de rayons ligneux plus important que ceux non imprégnables, d'après Linnemann (1953) cité par Keller (1994).

Bien qu'ils n'aient qu'une importance locale, les espaces intercellulaires constituent un autre passage intéressant pour le mouvement radial. Par ailleurs en direction transverse, les liquides polaires peuvent emprunter radialement à la fois le système des ponctuations et le système capillaire des parois cellulaires.

I-3-2- Nature du bois dans l'arbre

I-3-2-1- Aubier et duramen

Le mécanisme de migration de liquide est fortement lié à la structure anatomique du bois. Celle-ci révèle toute la variabilité du matériau selon l'essence, la provenance et la partie de l'arbre (aubier, duramen, bois de réaction, etc...).

Perré et Karimi (2002) ont constaté une différence très marquée de perméabilité entre l'aubier et le duramen de deux espèces de hêtre (*Fagus silvatica*, *Fagus orientalis*) avec deux méthodes (eau, gaz).

Lors de la transformation de l'aubier en duramen, les changements structuraux pour certains conduisent, aussi bien chez les résineux que chez les feuillus, à une diminution de la perméabilité du duramen par rapport à celle de l'aubier (Keller 1994). Les indicateurs de la formation du duramen sont la coloration du bois, en lien avec une imprégnation naturelle par des substances extractibles, un changement de l'humidité, une dégradation de l'amidon, et la mort des cellules de parenchyme. De plus, les principales raisons qui expliquent la diminution de la perméabilité dans le duramen sont la fermeture des ponctuations et la présence de thylls et d'extractibles. Côté (1963) et Comstock (1965) distinguent trois facteurs de fermeture des ponctuations chez les résineux : l'aspiration de la ponctuation, l'occlusion de la ponctuation par des extractibles, et l'incrustation de la ponctuation. Les incrustations de ponctuations sont définies comme des substances lignocomplexes différenciables des extractibles par leur manque de solubilité dans les solvants organiques. Le recouvrement par des substances lignocomplexes des membranes des ponctuations aréolées est un facteur important, responsable de la perméabilité moindre du duramen par rapport à celle de l'aubier. Chez les feuillus, la présence de thylls réduit la perméabilité car ils obstruent la principale voie de passage que sont les vaisseaux. La faible perméabilité ou imprégnabilité du duramen est également due à la présence d'extractibles.

Les extractibles augmentent l'angle de contact entre les liquides aqueux et les parois cellulaires, ils conduisent à diminuer la mouillabilité par rapport à l'aubier où les extractibles sont pratiquement absents.

Quant à la perméabilité à l'air, dans la direction longitudinale, certains auteurs ont trouvé qu'elle était plus élevée dans le duramen que dans l'aubier chez *Populus deltoïdes* (Issac et al. 1971). Ce résultat surprenant peut être expliqué par le phénomène de collapse dans l'aubier lors du séchage du bois ou par une croissance très rapide qui aurait empêché des perforations totales entre éléments de vaisseaux.

I-3-2-2- Bois initial et bois final

A l'état sec, le bois final a une plus grande perméabilité que le bois initial. Le bois final est beaucoup plus résistant à l'aspiration des membranes au niveau de la transition bois initial/bois final chez les résineux. Le fait que le bois final ait des ponctuations plus rares et plus petites que le bois initial ne conduit pas à une diminution de la perméabilité. Ce constat est cependant en opposition avec les moindres valeurs de perméabilité à l'air trouvée chez le bois de compression d'épicéa (Tarmian & Perré 2009).

Liese et Bauch (1967) trouvent que les forces d'adhésion nécessaires à la fermeture de la ponctuation dépendent de la structure de la membrane. Les diamètres plus petits et les membranes plus épaisses des ponctuations du bois final nécessitent des forces d'adhésion plus importantes pour fermer les ponctuations. Bolton et Petty (1978) ont calculé la pression nécessaire pour déplacer la membrane de la ponctuation, ils ont trouvé des valeurs pour les ponctuations du bois final cent fois plus élevées que pour les ponctuations du bois initial. De plus, la texture plus serrée de la marge des ponctuations du bois final et la configuration de la chambre de la ponctuation contribuent à leur rigidité (Alméida et al. 2007).

I-3-3- Ultrastructure du bois

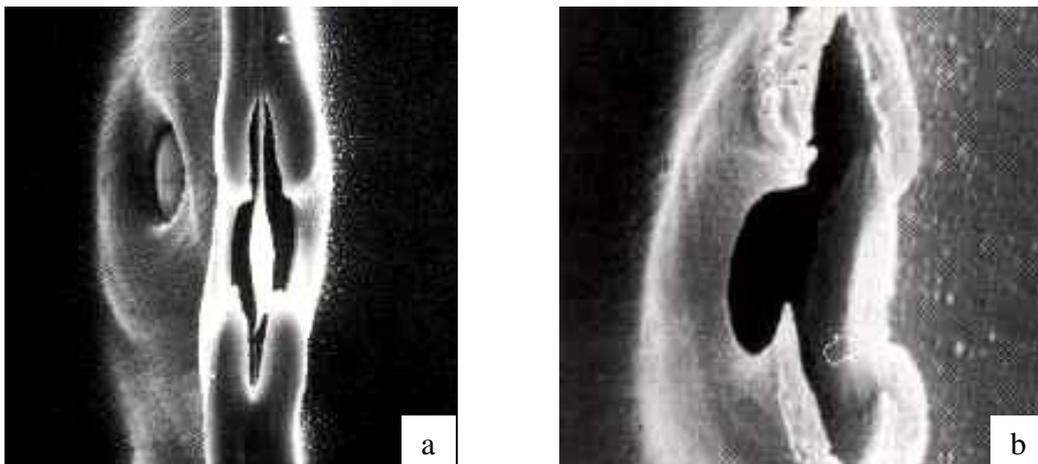
Chez les feuillus comme chez les résineux, l'écoulement des liquides s'effectue par les ponctuations. Chez les résineux, les membranes des ponctuations aréolées sont composées de fibrilles de cellulose qui rayonnent du torus central vers la marge de la chambre de la ponctuation.

D'après Hansmann et al. (2002), les membranes des ponctuations aréolées des résineux sont composées de fibrilles de cellulose, qui rayonnent du torus central vers la marge de la chambre de la ponctuation. Les ouvertures entre les fibrilles ont été étudiées par plusieurs auteurs et ont un diamètre de 0,02 à 4 μm . Les membranes des ponctuations des feuillus n'ont pas de torus et les membranes sont continues dans la chambre des ponctuations.

Des ouvertures dans les membranes des ponctuations d'une taille comprise entre 5 et 170 nm ont été rapportées par les mêmes auteurs pour les feuillus (Hansmann et al. 2002).

Le torus est un disque lignifié, il est construit par les deux cellules contiguës au moment où celles-ci sont encore physiologiquement actives. Ce disque rigide est formé de deux parois primaires qui se sont lignifiées seulement au niveau du renflement de la membrane de la ponctuation.

Lorsque le torus est accolé à la paroi secondaire de droite ou de gauche à l'intérieur de la chambre de la ponctuation, la sève ne peut plus passer car deux éléments se soudent temporairement (figure I-12a, I-12b).



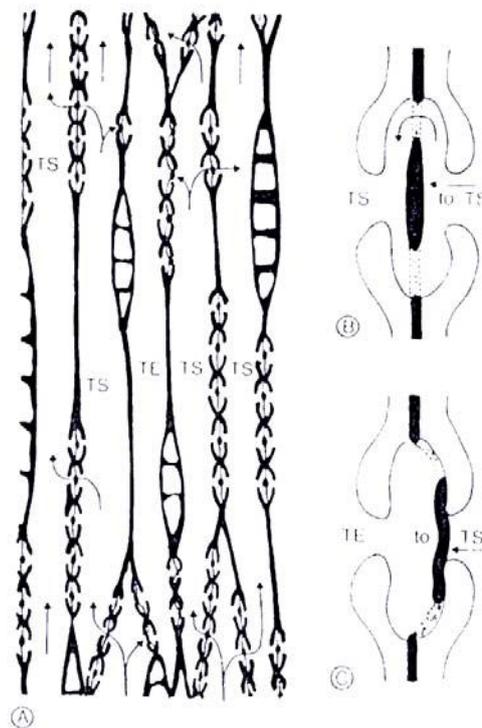
*Figure I-12a et b : Ponctuations aréolées non aspirées (a) et aspirée (b)
(d'après Saiki 1982), The Structure of Domestic and Imported Woods in Japan, An
Atlas of Scanning Electron Micrographs, Japan Forest Technical Association)*

D'après Hansmann et al. (2002) le maintien du torus contre l'auréole de la paroi secondaire est dû aux liaisons hydrogène, et les facteurs contribuant à cette aspiration sont les suivants :

- le liquide qui s'évapore doit être capable de former des liaisons hydrogènes et doit avoir à la fois des propriétés de donneur et d'accepteur d'électrons.
- Le liquide doit gonfler le bois au moins autant que l'eau.

- Les ouvertures de la membrane de la ponctuation doivent être suffisamment petites pour aboutir à la différence de pression nécessaire pour déplacer la membrane.
- La relation entre la tension de surface et l'angle de contact doit être telle que la force capillaire initiale déplacera la membrane.

D'après Zimmermann (1983) la transpiration foliaire étant le moteur principal de la circulation de la sève brute dans l'aubier, les éléments conducteurs se trouvent normalement sous une pression hydrostatique inférieure à la pression atmosphérique. Des raisons diverses (gel, blessure,...) peuvent provoquer une embolie, c'est à dire l'apparition de bulles d'air dans la cellule conductrice. La pression dans une trachéide où se produit une embolie devient égale à la pression atmosphérique.



*Figure I-13 : Conséquences d'une embolie dans une trachéide de Gymnosperme
(D'après Zimmermann 1983)*

- A) Schéma théorique d'une coupe longitudinale tangentielle d'un bois de Gymnosperme. L'embolie de la trachéide TE provoque l'aspiration des parois des ponctuations et l'oblitération de celles-ci par le torus. Le courant de sève (flèches) est donc détourné vers les trachéides saines (TS)
- B) Position normale de la paroi d'une ponctuation. Les flèches indiquent le passage de la sève.
- C) Application du torus (to) contre l'orifice de la ponctuation entre une trachéide embolisée et une trachéide saine.

I-3-4- Nature du fluide

La relation entre la perméabilité au gaz et la perméabilité aux liquides n'est pas établie. D'après Choong et al. (1975), la perméabilité au liquide est légèrement plus élevée que la perméabilité au gaz, lorsqu'elle est supérieure à 1 Darcy ($9,81 \cdot 10^{-13} \text{ m}^2$). Quand elle est inférieure à un Darcy, la perméabilité aux liquides n'est pas significativement différente de la perméabilité au gaz. Ces mêmes auteurs indiquent que la perméabilité à un gaz dans le sens longitudinal, pour les résineux et les feuillus, est significativement plus élevée que la perméabilité à un liquide. Bolton & Petty (1978) cités par Perré (1987) trouvent une perméabilité au liquide toujours inférieure à celle du gaz.

I-3-5- Humidité du bois

Si le bois est en dessous du point de saturation des fibres, la perméabilité des résineux augmente lorsque cette humidité diminue. Il y a probablement un retrait des agrégats de microfibrilles de cellulose dans la marge des ouvertures des ponctuations. Il faut noter cependant, que la perméabilité longitudinale de plusieurs feuillus augmente avec des humidités plus fortes, sans doute par l'importance de la proportion des vaisseaux (Hansmann et al. 2002).

I-4- Relation entre anatomie et perméabilité chez les chênes et autres feuillus à zone initiale poreuse

I-4-1- Perméabilité des chênes

Chez la plupart des espèces de chêne, l'aubier est plus perméable que le duramen. Le chêne rouge qui présente rarement des thylles dans le duramen fait exception à cette règle générale (Choong et al. 1975, Feuillat 1996).

Chez les feuillus, le rapport entre la perméabilité longitudinale et la perméabilité transversale (dans le cas du transfert au travers les tonneaux) est généralement supérieure à 10 000 mais peut excéder 100 000 chez le chêne rouge (Choong et al. 1975). Cela a été expliqué par la forte conductivité des vaisseaux du bois initial lorsqu'ils ne sont pas obstrués par des thylles (Siau 1984, Feuillat 1996, Cochard 1991). Le rapport d'anisotropie entre les perméabilités radiales et tangentielles chez les chênes est en moyenne de 3:1 (Choong et al. 1975). Cela a été expliqué par le rôle joué par les gros rayons ligneux. Cependant, Siau (1984) a trouvé une contribution du même ordre de grandeur entre les deux directions.

I-4-2- Les thylles

Les thylles sont observés pour la première fois en Autriche au XIX^{ème} siècle (Reichenbach 1845, cité par Zimmermann 1979). En 1845, la baronne Hermine von Reichenbach publie anonymement une description d'observations originales de thylles, de façon particulièrement soignée et détaillée. Le plus remarquable est qu'elle affirme dès cette époque que la formation des thylles et la production des gommés sont les résultats (et non les causes) de la cessation de la conduction d'eau ou le résultat d'une blessure, observation qui ne sera confirmée expérimentalement beaucoup plus tard, en 1923 par Klein.

Lorsque les vaisseaux du bois âgé ne fonctionnent plus, ou lorsque leur fonctionnement est entravé par un traumatisme ou une infection parasitaire, ils sont généralement occlus par des protubérances issues des cellules de parenchyme, les thyllles. Selon Buvat (1989) les cellules de parenchyme gainant les vaisseaux et particulièrement les cellules associées aux vaisseaux produisent des excroissances protoplasmiques qui pénètrent à l'intérieur des cavités des vaisseaux à travers les ponctuations. On ne sait pas ce que devient la fine paroi primaire qui subsiste dans les ponctuations ; elle peut soit croître pour envelopper la protubérance cytoplasmique, soit être lysée, et dans ce cas, c'est la cellule invasive qui assure l'expansion de la paroi. Dans tous les cas, une paroi couvre la surface des thyllles ; mince et pectocellulosique dans un premier temps, elle peut devenir épaisse et lignifiée. Dans certains cas, des noyaux pénètrent dans les thyllles qui peuvent alors se diviser. Dans le cas d'une blessure (section d'un organe), les thyllles semblent avoir un rôle protecteur, ils obstruent l'ouverture des vaisseaux, formant ainsi une barrière contre les infections parasitiques ou saprophytiques. A l'échelle des vaisseaux, ils contribuent à la formation de tissus cicatriciels, qui ne peuvent se développer qu'à partir de cellules vivantes (Buvat 1989).

Les thyllles se forment lors de la duraminisation du bois chez certaines essences. Chez les essences à zone initiale poreuse, les thyllles peuvent apparaître dès le deuxième ou le troisième cerne de croissance. La proportion de ces derniers augmente lorsque la duraminisation est plus prononcée. Ils sont toujours présents dans le duramen de chêne sessile et on en trouve même dans l'aubier (Schmitt et al. 1997). Le nombre de gros vaisseaux bouchés par les thyllles augmente de manière progressive en partant de l'aubier le plus externe pour atteindre presque 100 % dans le duramen du chêne sessile (Bakkour 2004).

Selon Schmitt et Liese (1994) la division des thyllles, telle qu'elle est observée dans le tissu blessé de *Robinia pseudoacacia*, est sans doute à l'origine de leur arrangement irrégulier dans la lumière des vaisseaux et peut être interprétée comme un blocage plus efficace des vaisseaux de large diamètre. Apparemment, la division des thyllles ne représente pas un phénomène spécifique aux blessures dans *R. pseudoacacia* car les

vaisseaux du bois initial dans le duramen normal montrent le même arrangement irrégulier des thylles produit de la même façon par divisions. D'autre part, les interfaces entre thylles adjacents sont uniformément horizontales dans les vaisseaux de petit diamètre du bois d'été, ce schéma étant celui produit par des thylles qui ne se divisent pas. De cet arrangement divergeant dans les vaisseaux du bois final et du bois initial, on peut dire que la division des thylles ne s'applique qu'au dernier cas.

En 1949, Chattaway définit d'une façon précise les thylles comme des excroissances des cellules de rayon ligneux, qui traversent les ponctuations des vaisseaux. Elle remarque que les thylles ne sont formés qu'à partir de ponctuations dont les dimensions sont supérieures à 8 voir 10 μm de diamètre. L'activité des cellules de rayon est très importante dans le blocage des vaisseaux lors de la duraminisation et il est suggéré qu'une des clés de la duraminisation pourrait être la durée de vie des cellules des rayons.

Pour Saitoh et al. (1993), les thylles et les gommages proviennent à la fois des rayons et du parenchyme axial dans la plupart des espèces qui ont des ponctuations connectant ces cellules aux vaisseaux. D'après ces auteurs les diamètres minimum et maximum de l'ouverture interne de la ponctuation du vaisseau aux cellules de parenchyme ont une taille comprise entre 2 et 5 μm chez les espèces avec thylles, alors que les diamètres sont inférieurs chez les espèces avec gommages. Les formes des thylles (compacts, compacts par intervalles, unisériés avec parois supérieure et inférieure en contact, unisériés non contigus, collapsés) dans les vaisseaux du duramen sont étroitement liées à la disposition du parenchyme.

D'après Bamber (1976), la nature des changements qui interviennent lors de la transition entre l'aubier et le duramen, suggère que la duraminisation est un processus de régulation permettant de conserver la quantité d'aubier à un niveau optimum. Il est significatif qu'une résorption de certains éléments essentiels s'effectue à grande échelle lors de la duraminisation. Cette résorption évite l'immobilisation de grandes quantités de nutriments minéraux dans l'aubier interne des arbres. Un recyclage interne peut ainsi

réduire la demande des grands arbres vis-à-vis du sol. La disposition des cellules de transition de l'aubier vers le duramen suggère que la duraminisation est contrôlée par une substance HIS (heartwood inducing substance) fonctionnant comme une hormone, dont le déplacement est centripète le long des rayons, à partir du cambium. Elle n'atteindrait le seuil nécessaire à l'initiation de la duraminisation que dans les cellules adjacentes au cœur imperméable (duramen ou moelle) car à ce niveau, tout mouvement centripète serait alors bloqué. La diffusion dans les directions longitudinale et radiale interviendrait comme le résultat d'une augmentation de la concentration en HIS dans les rayons à cet endroit. Le seuil serait atteint simultanément par toutes les cellules de parenchyme adjacentes au cœur imperméable. On observe effectivement que si le développement des thylls est séquencé dans la direction radiale, il est simultanément dans la direction longitudinale.

Ce schéma de duraminisation est général. Certains auteurs (Stewart 1966 cité par Bamber 1976) postulent que les HIS sont des polyphénols toxiques. Cependant, une grande activité biologique est observée dans la zone de transition, qui n'indique pas la détérioration des fonctions cellulaires, à laquelle on pourrait s'attendre si des substances toxiques étaient présentes. La duraminisation serait plutôt une phase de développement, analogue à l'abscission, au mûrissement des fruits ou à la dormance. La mort des cellules de parenchyme serait un résultat et non pas, une cause (Bamber 1976).

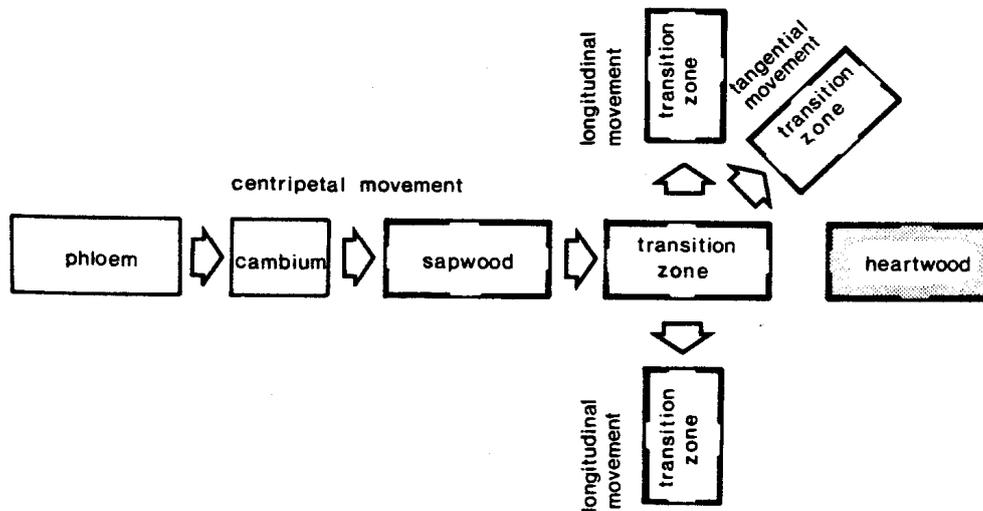


Figure I-14 : Diagramme des voies de passage de la substance HIS (heartwood inducing substance) dans l'aubier (D'après Bamber 1976).

La microstructure et la composition chimique de thylles semblent varier d'une essence à l'autre. La formation et la structure pariétale de thylles naturels, d'incubation et traumatiques sont observées chez *Castanea crenata* (Shibata et al. 1980). La formation de la paroi des thylles naturels paraît traverser les mêmes étapes que celle des thylles traumatiques. La paroi bien lignifiée des thylles naturels a également une épaisseur d'environ 1 μm , et sa structure est similaire à celle des thylles traumatiques. La paroi des cellules de parenchyme qui ont formé les thylles naturels s'épaissit aussi lors de la phase d'épaississement de la paroi du thylle. Cependant, cette paroi n'est pas déposée sur les membranes des paires de ponctuations entre cellules parenchymateuses. Après l'étape de lignification de la thyllose naturelle et de la cellule de parenchyme à partir de laquelle la thyllose s'est formée, il se dépose une couche supplémentaire osmiophile. Cette couche est observée sur toute la surface interne de leurs parois, elle est similaire à la couche protectrice observée dans la cellule de parenchyme. Le complexe thylle/cellule de parenchyme avec la couche osmiophile forme quelquefois de nouveau des thylles et il contient souvent de nombreux grains d'amidon. L'ensemble du complexe semble se comporter comme une simple cellule de parenchyme.

A cause du type de formation et de structure, la paroi des thylles chez le chêne rouge est apparemment une paroi primaire plutôt qu'une paroi secondaire (Murmanis 1975).

D'après Parameswaran et al. (1985), la paroi des thylles consiste en trois couches dans le faux duramen de *Fagus silvatica* L. et de deux couches dans le duramen non traumatique de *Quercus robur* L. La zone centrale de celle en trois couches révèle une lamelle subérifiée. La présence de subérine peut avoir une influence sur la pénétration des gaz ou des liquides.

Des occlusions de vaisseaux dans les branches de *Fraxinus excelsior* L. sont étudiées au moyen de la microscopie électronique à transmission (Schmitt et al. 1997). Les occlusions de vaisseau sont formées par des exsudats provenant des cellules de parenchyme radial et longitudinal. Les stades initiaux se présentent presque toujours sous forme de structures en ballonnets se développant depuis les ouvertures des ponctuations à l'intérieur des vaisseaux. Cependant, les occlusions de vaisseau dans *Fagus excelsior* ne sont pas de véritables thylles. Un phénomène de collapse des thylles trouvé dans le duramen de frêne pourrait être mis en relation avec l'accumulation d'eau dans le duramen (Sano & Fukazawa 1991). Les thylles sont très fragiles à cause de leur faible épaisseur et du manque de couche intercellulaire, Ils peuvent alors facilement être collapsés par des facteurs associés à la duraminisation, comme les forces physiques induites par la formation de gaz à l'intérieur du tronc.

L'observation des thylles connaît actuellement un regain d'intérêt dans le cadre de la tonnellerie. Il est l'élément essentiel dans l'étanchéité de tout récipient en bois. Les chênes rouges d'Amérique ne sont pas employés en tonnellerie en raison de la rareté voire absence des thylles. Quant au chêne blanc américain (*Quercus alba* L.), il peut être entièrement débité par sciage sans entraîner de conséquences dramatiques vis-à-vis de l'étanchéité. Ceci a été attribué par l'auteur à la forte épaisseur et à une grande résistance de la paroi des thylles obstruant les vaisseaux (Chatonnet 1995, cité par Feuillat 1996).

I-5- Relation entre anatomie et perméabilité chez le hêtre

Behr et al (1969) cités par Siau (1984) ont utilisé la créosote et le pentachlorophénol dans le gasoil pour imprégner quatre espèces de feuillus en utilisant le procédé de cellules vides (procédé qui ne vise à imprégner que les parois végétales, en utilisant une surpression d'air à l'intérieur des cellules afin d'appliquer le produit sur leurs parois). Ils ont trouvé que le passage des liquides se fait au niveau des vaisseaux du bois final. Cette capacité de passage dans les petits vaisseaux est probablement due aux forces capillaires plus grandes chez ces derniers.

Les fibres ont été remplies dans la plupart des échantillons, ceci indique que l'écoulement passe des vaisseaux aux fibres par les ponctuations; il n'y a pas de différence entre la pénétration à l'intérieur des fibres du bois final et celles du bois initial. Parham et Baird (1974) ont montré que les vaisseaux du hêtre de plus grand diamètre ont des perforations simples.

Ce sont des éléments essentiels pour la conduction (Carlquist 1988) puisqu'ils offrent moins de frottement. Mais il ne faut pas pour autant considérer que les petits vaisseaux sont des éléments ne participant pas à la conduction parce que leurs perforations sont scalariformes et leurs parois verruqueuses. Il faut remarquer que les vaisseaux de grand diamètre sont plus sujets au phénomène d'embolie que les vaisseaux de petit diamètre (Zimmermann & Tomlinson. 1967).

I-6- Relation entre anatomie et perméabilité chez le sapin et autres résineux

La conduction des sèves chez les résineux concerne les trachéides longitudinales et les rayons ligneux, ces derniers ayant un rôle de conduction radiale. La proportion de ces éléments conducteurs chez le bois de *Pinus strobus* selon Panshin (1980) cité par Siau (1984) est de 93% de trachéides longitudinales, 1% des canaux résinifères longitudinaux et 6% de rayons ligneux. Siau a cité aussi les travaux de Banks (1970) qui

a montré que la perméabilité radiale du pin sylvestre est plus grande que la perméabilité tangentielle ce qui s'explique par l'écoulement du liquide dans les rayons ligneux.

Almeida et al. (2007) ont étudié les caractéristiques du drainage du bois du Douglas. L'analyse d'image obtenue par IRM leur a permis de suivre l'évolution du drainage longitudinal. Celui-ci apparaît en premier lieu dans les zones de bois final sous forme de clusters, puis un faible drainage apparaît au niveau du bois initial. Ce résultat a été expliqué par une grande réaction des ponctuations du bois initial au phénomène d'aspiration.

Les diverses voies par lesquelles les liquides peuvent pénétrer dans l'aubier des espèces de pin ont été passées en revue par un certain nombre d'auteurs (Comstock 1965, Matsumura et al. 1998, Bamber 1972). Les voies qui ont été suggérées sont les trachéides axiales et radiales, les canaux résinifères, le parenchyme radial.

Bamber (1972) a attribué l'amélioration de la perméabilité de l'aubier des espèces de pin, à l'effondrement (collapse) de la paroi mince non lignifiée des cellules de parenchyme de rayon pendant le séchage, créant des espaces interstitiels entre les parenchymes radiaux, axiaux et les trachéides. Ces espaces ont été considérés comme chemin secondaire d'écoulement permettant la libre circulation. Pour le duramen, les changements de la paroi des cellules au cours de la duraminisation semblent réduire la perméabilité des canaux résinifères et des parenchymes des rayons : chez *P. lambertiana*, le tissu parenchymateux des canaux résinifères se lignifie et développe une paroi secondaire. Chez *P. radiata*, il y a lignification sans épaissement secondaire. Toujours d'après Bamber (1972), les essences de pins développent des thylloïdes dans les canaux lors de la formation du duramen.

Matsumura et al. (1998), ont décrit une autre voie d'imprégnation du duramen de *P. radiata*. La pénétration de liquide coloré dans les canaux résinifères du duramen a été améliorée après étuvage à la vapeur. Ceci est vraisemblablement dû au déplacement ou à la redistribution de la résine. Un changement d'état des ponctuations aréolées entre les

trachéides a été aussi observé par microscopie confocale après imprégnation avec de la fluorescéine. La pénétration du liquide dans la direction radiale s'est également révélée plus grande dans le sens écorce-moelle que dans le sens moelle-écorce. Dans cette étude, ils ont aussi confirmé la fonction conductrice des canaux résinifères radiaux des rayons unisériés de l'aubier de *P radiata*. Lors de l'imprégnation la plupart des trachéides conductrices sont mitoyennes aux rayons.

I-7- Effet de la biodégradation du bois sur l'anatomie et la perméabilité

I-7-1- Généralités

Plusieurs types de dégâts peuvent être observés sur le bois suite à l'action des agents de biodégradation. Nous n'évoquerons ici que les dégradations provoquées par les mycètes. Trois principaux types sont communément décrits : la pourriture brune, la pourriture blanche et la pourriture molle.

- *La pourriture brune*

Dans le cas d'une pourriture brune, la cellulose et les hémicelluloses sont dégradées mais la décomposition de la lignine est limitée. La couche S2 riche de ces deux constituants est rapidement dégradée, alors que la couche S3 et la lamelle moyenne, riches en lignine, apparaissent résistantes. De part cette décomposition sélective des carbohydrates, le bois attaqué acquiert une consistance cassante, il se scinde en petits cubes et finit par s'effriter en poussière (Schwarze 2007).

- *La pourriture blanche*

Certains agents de pourriture blanche ont la capacité à extraire de manière sélective d'importantes quantités de lignine tout en ne provoquant que de faibles pertes de cellulose et d'hémicelluloses. La dégradation de la lignine peut être restreinte à des zones isolées du bois, sous forme de poches, ou s'étendre plus largement dans le substrat. D'autres agents de pourriture blanche ne sont pas sélectifs et provoquent d'importantes pertes en carbohydrates.

Coriolus versicolor est un exemple de champignon dit de pourriture blanche qui cause une dégradation simultanée de tous les constituants structuraux de la paroi (Blanchette et al. 1988a).

La pourriture molle

Le terme de « pourriture molle » provient de la texture spongieuse des surfaces de bois attaqué. La pourriture molle se caractérise par l'action des hyphes qui creusent des tunnels à l'intérieur des parois lignifiées.

Elle est chimiquement plus proche de la pourriture brune que de la pourriture blanche car la cellulose et les hémicelluloses sont décomposées alors que la lignine n'est que légèrement modifiée (Schwarze 2007).

I-7-2- Augmentation de la perméabilité du bois suite à sa biodégradation

Des traitements permettant d'augmenter l'imprégnabilité des bois à l'aide d'enzymes commerciales (pectinases, hydrolases avec un large spectre d'activité cellulolytique et hémicellulolytique), de bactéries ou de mycètes, ont été étudiés (Schwarze 2007).

Les hyphes peuvent envahir complètement, par ramification, le bois massif. Il est évident que sous l'action des agents de pourriture, la perméabilité du bois change (Green & Clausen, 1999), ce qui ne peut pas être réalisé par les produits enzymatiques de commerce, ni les bactéries.

Le basidiomycète, *Physisporinus vitreus*, présente une grande capacité à augmenter la perméabilité du bois parfait de *Picea abies* et de *Abies alba* sans induire de pertes de masse importantes. Les hyphes pénètrent dans la chambre de la ponctuation via les ouvertures et les membranes sont dégradées. Cette dégradation commence au niveau du torus, la partie centrale épaissie de la membrane (Schwarze et al. 2006).

I-7-3- Colonisation du bois par les mycètes

L'alignement axial des trachéides, vaisseaux et fibres et l'arrangement radial des rayons ligneux facilitent leur pénétration à l'intérieur du bois et permettent une distribution étendue des hyphes. L'accès aux cellules adjacentes intervient via les ouvertures des ponctuations, ou une pénétration directe peut avoir lieu à travers la paroi cellulaire. Chez l'épicéa, le large lumen des trachéides du bois initial est rapidement envahi par des hyphes de *Stereum sanguinolentum*, comme le sont les cellules de parenchyme radial. Inversement, la croissance des hyphes dans les trachéides du bois final aux parois épaisses est faible car les lumens sont étroits, de plus, les ponctuations aréolées rares et petites, gênent la colonisation (Schwarze 2004). Dans le bois des feuillus, l'agent de pourriture blanche a tendance à coloniser les cellules via les lumens des ponctuations simples ou aréolées qui sont par conséquent élargies et confondues avec des forages.

Fomes fomentarius fore de nombreux tunnels d'un diamètre inférieur à 0,5 μm grâce à des hyphes spécialisés dans la dégradation de la paroi cellulaire. Ces hyphes pénètrent dans la paroi au moyen d'enzymes lignolytiques, ces derniers est alors excrétés à l'extrémité de l'hyphe. Les ouvertures s'élargissent ensuite progressivement suite à la production d'enzymes de toute la surface de l'hyphe. A un stade de dégradation plus avancé, des fissures se développent souvent entre deux ouvertures adjacentes dans les parois radiales des cellules et les ouvertures peuvent alors fusionner (Schwarze et al. 2004).

Tous les agents de pourriture n'ont pas la capacité à forer les parois cellulaires. L'agent de pourriture molle, *Kretzschmaria deusta* par exemple est incapable de forer la lamelle moyenne car cette dernière présente une forte concentration en monomère guaïacyl. Cette couche reste comme un squelette intact même à un stade avancé de dégradation (Schwarze et al. 1995b).

Certains agents de pourriture blanche ont une capacité extraordinaire à hydrolyser la pectine de la lamelle moyenne pendant les stades précoces de la délignification élective.

Meriplius giganteus dégrade préférentiellement les régions de la lamelle moyenne riche en pectine dans les cellules de parenchyme radial du Hêtre. Dans le bois de Tilleul, de telles régions sont uniformément réparties dans la lamelle moyenne du parenchyme axial et radial. Dans le bois de hêtre, la dégradation de la lamelle moyenne riche en pectine commence après la délignification des parois secondaires et aboutit à la formation de cavités dans les rayons ligneux multisériés (Schwarze & Fink 1998).

Les pourritures molles forment des cavités au sein de la couche S2 initiées par la pénétration d'un hyphe fin formé à partir d'un hyphe situé dans le lumen de la cellule. L'hyphe fin traverse la couche S3 jusqu'à S2 où il croît parallèlement aux fibrilles de cellulose. Le tunnel ainsi creusé longitudinalement s'élargit ensuite en diamètre (Schwarze 2007). Les figures I-15 montrent schématiquement les caractères micro-morphologique des différents types de pourriture observé sur le bois (Schwarze 2007).

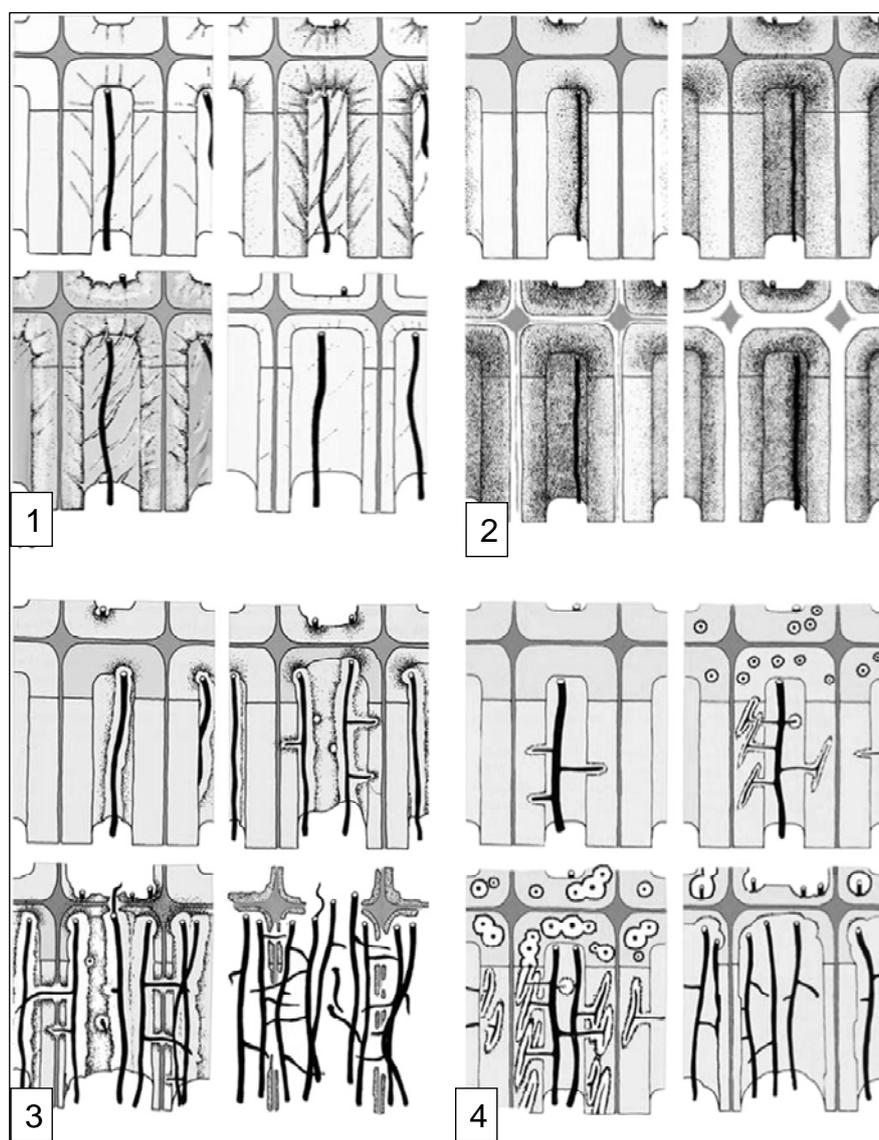
Sur la figure I-15(1), sont représentés les dégâts d'une pourriture brune *Fomitopsis pinicola*. Aux premiers stades de l'attaque, des substances de bas poids moléculaire sont sécrétées par l'hyphe qui croît sur la couche S3, et elles diffusent radialement à travers la paroi cellulaire. A un stade plus avancé, des enzymes ont pénétré dans toute la paroi secondaire, provoquant la décomposition de la cellulose et des hémicelluloses. Le retrait du bois provoque l'apparition de nombreuses fissures. Même à des stades avancés, la couche S3 reste intacte et une matrice de lignine modifiée persiste.

Sur la figure I-15(2), sont représentés les effets d'une délignification sélective par *Heterobasidion annosum* (pourriture blanche). A un stade précoce de l'attaque, des substances de faible poids moléculaire (représentées sous forme de points) diffusent dans la paroi secondaire à partir des hyphes qui croissent dans le lumen. La dégradation des hémicelluloses et de la lignine est initiée à l'intérieur de la paroi secondaire, et s'étend à la lamelle moyenne. A des stades avancés de l'attaque, la dégradation préférentielle de la pectine et de la lignine aboutit à la désolidarisation des cellules entre elles. La cellulose reste intacte.

Sur la figure I-15(3), sont représentées les attaques simultanées provoquées par *Fomes fomentarius* (pourriture blanche). A un stade précoce, la dégradation a lieu à proximité immédiate des abondants hyphes se développant dans le lumen. La paroi cellulaire est progressivement dégradée à partir du lumen vers l'extérieur. Des hyphes individuels pénètrent à l'intérieur de la paroi cellulaire à angle droit par rapport à l'axe de la cellule. La paroi cellulaire devient de plus en plus fine, et de nombreux tunnels apparaissent entre cellules adjacentes. A un stade plus avancé, la dégradation est entravée par la lamelle moyenne fortement lignifiée.

Sur la figure I-15(4), sont représentés les dégâts de la pourriture molle *Kretzschmaria deusta*. A un stade précoce, les hyphes pénètrent dans la paroi secondaire. La ramification et la croissance des hyphes s'effectuent parallèlement aux fibrilles de cellulose dans la couche S2. La dégradation de la paroi cellulaire autour des hyphes conduit à la formation de cavités aux extrémités coniques.

A un stade avancé, la paroi secondaire est presque complètement détruite, alors que la lamelle moyenne riche en guaiacyl persiste.



Figures I-15 : Représentations schématiques des caractères micro-morphologiques des différents types de pourriture observé sur le bois.

- 1- *Fomitopsis pinicola* (pourriture brune)
- 2- *Heterobasidion annosum* (pourriture blanche à délignification sélective)
- 3- *Fomes fomentarius* (pourriture blanche à attaques simultanées)
- 4- *Kretzschmaria deusta* (pourriture molle)

II- Migration des liquides dans le bois

II-1- Introduction

Le mécanisme de migration des liquides est fortement lié à la structure anatomique du bois. Comme exposé au chapitre 1, cette dernière révèle une grande hétérogénéité du matériau selon l'essence, la station ou le traitement des arbres.

En tenant compte des études réalisées sur la migration, perméabilité et simulation du passage des fluides dans le bois, et en essayant de répondre à la problématique de la restauration conservation des bois anciens par application de liquide à la surface de ceux-ci, il était nécessaire d'étudier le passage des liquides au sein du matériau.

Ce que l'on attend de cette étude expérimentale est d'améliorer les connaissances sur l'imprégnabilité du bois et sur les voies de pénétration d'un liquide dans le bois, de connaître les éléments anatomiques participant au passage du liquide, leur taux de participation en fonction de leur dispersion au sein du plan ligneux. Dans ce but, deux phénomènes ont été étudiés. Le premier était de suivre l'écoulement dans une éprouvette orientée, selon l'orthotropie du matériau, par réalisation, à l'échelle macroscopique, des cinétiques d'écoulement capillaire de liquides colorés, dans le bois de trois essences représentatives anatomiquement de trois plans ligneux de bois. Le deuxième était d'étudier les voies de passage, après imprégnation pendant un temps fixe, des liquides au sein des éprouvettes par exploration à différentes distances d'imprégnation des éprouvettes.

Pour cette étude, nous avons obtenu des résultats très variables pour chacune des trois essences sélectionnées : chêne, hêtre et sapin. Les résultats sont présentés, dans un premier temps, par des images montrant l'écoulement longitudinal, radial et tangentiel de la solution colorée, sur la face de sortie de l'éprouvette et, dans un second temps, des images montrant les éléments anatomiques actifs au sein des éprouvettes étudiées.

II-2- Matériels et méthodes

II-2-1- Sélection des essences

Notre étude porte sur des essences fréquemment rencontrés par les restaurateurs. Les mesures ont été réalisées sur deux feuillus, le chêne et le hêtre et un résineux, le sapin

II-2-1-1- Le chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl)

L'échantillonnage a été effectué dans la forêt de Brin-sur-Seille (Meurthe et Moselle). Il s'agit de la forêt expérimentale de l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et Forêts (ENGREF), cette forêt est située à une altitude comprise entre 220 et 280 mètres et soumise au climat lorrain (climat semi-continental). Cette station produit des chênes dits de qualité. On y rencontre également du hêtre et des feuillus précieux (frêne, merisier...).

Deux chênes, aux troncs sains et rectilignes, ont été sélectionnés et abattus en février 2005. Des billons de 130 cm de long ont été débités dans la partie de la grume située à plus de 150 cm du sol. A cette période de l'année la distinction entre les deux espèces sessile et pédonculé n'a pu être faite. La présence des feuilles au sol laissait penser que nous avons abattu des chênes sessiles, cependant la période d'abattage et l'absence de gland demandait une vérification.

Pour distinguer ces deux essences, des bourgeons terminaux des arbres abattus ont été mis en incubation afin de permettre l'observation des feuilles et d'identifier l'espèce, dans notre cas, ces arbres se sont révélés être des chênes sessiles (*Quercus petraea* Liebl.).

Les quatre points cardinaux ont été repérés sur chaque billon avant abattage, ces billons ont été ensuite découpés en disques de 10 cm d'épaisseur. Après une semaine, afin de permettre les mesures dendrométriques, les sections des billes ont été rabotées et polies.

Les directions Nord et Sud ont été indiquées. Le diamètre des billes, l'âge du bois ainsi qu'une estimation du pourcentage d'aubier et de duramen par rapport au bois total formé sont reportées dans le tableau II-1.

Tableau II-1 : Caractéristiques physiques des rondelles des chênes à 130 cm.

| Numéro de l'arbre | Nombre de cernes à 130 cm | Circonférence à 130 cm | Aubier (%) à 130 cm | Duramen (%) à 130 cm |
|-------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| Chêne 1 | 113 | 108 cm | 17 | 83 |
| Chêne 2 | 112 | 111 cm | 20 | 80 |

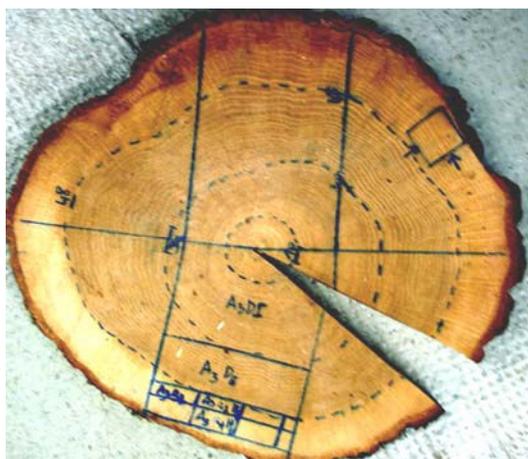


Photo de la rondelle 4 (à 130 cm) de l'arbre 1

Pour éviter l'apparition de fentes et de déformations, nous avons procédé rapidement au débit d'ébauches des éprouvettes. Ceci a permis également un séchage, à l'air, plus rapide, d'une durée de 8 mois.

Plusieurs rondelles de l'arbre 2 ont été stockées à l'extérieur et ont subi une attaque fongique de type pourriture blanche. Afin d'enrichir notre étude, nous avons décidé d'étudier le bois de ces rondelles.

II-2-1-2-Le hêtre (*Fagus silvatica* L.)

Nous avons prélevé le bois de hêtre dans la même forêt sur des arbres sains et sans défaut, Un seul billon a été prélevé. Les caractéristiques physiques de cet arbre sont présentées dans le tableau II-2. Le hêtre ne présente pas d'aubier différencié. Pour fixer une limite entre la partie fonctionnelle du bois (aubier) et la partie interne (bois parfait), nous avons considéré que les 40 derniers cernes formés, sous écorce, appartenait à l'aubier.

Tableau II-2 : Caractéristiques physiques de la rondelle de Hêtre à 130 cm.

| Arbre | Nombre de cernes à 130 cm | Circonférence à 130 cm | Aubier (%) à 130 cm | Duramen (%) à 130 cm |
|-------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| Hêtre | 110 | 88 cm | 40 | 60 |

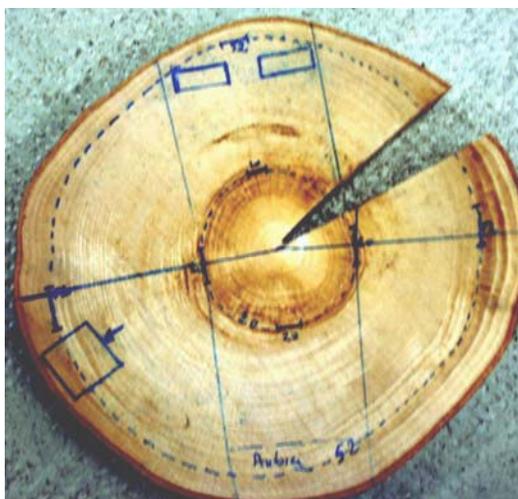


Photo de la rondelle 4 (à 130 cm)

II-2-1-3-Le sapin (*Abies pectinata* D.C.)

L'échantillonnage a été effectué dans la forêt de Haye, forêt domaniale, (Meurthe et Moselle). Cette forêt est située à l'Ouest de Nancy, elle couvre une superficie de 6500

ha. Le choix de l'arbre a été réalisé sur les mêmes critères que pour les deux essences précédentes. De même, une détermination des limites de cerne entre le duramen et l'aubier sur les autres rondelles a été réalisée selon leur âge sur chaque rondelle. Le tableau II-3 montre la caractérisation des billes de sapin. De la même façon, arbitrairement, nous avons considéré que les 12 derniers cernes formés, sous écorce, appartenait à l'aubier, le reste au duramen.

Tableau II-3 : Caractéristiques physiques de la rondelle du sapin à 130 cm.

| Arbre | Nombre de cernes à 130 cm | Circonférence à 130 cm | Aubier (%) à 130 cm | Duramen (%) à 130 cm |
|-------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| Sapin | 38 | 66 cm | 12 | 88 |

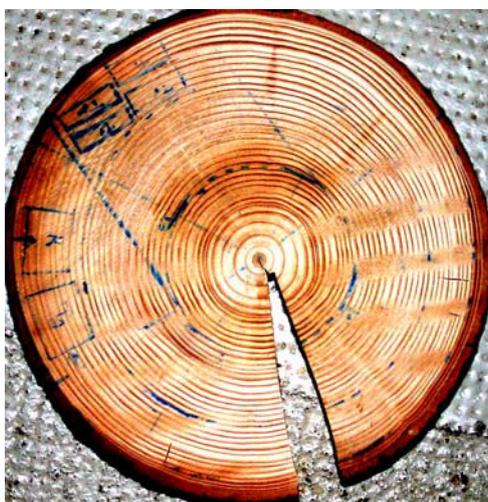


Photo de la rondelle 4 (à 130 cm)

II-2-2- Plan de débit et conditionnement des échantillons

Pour les essais nous avons voulu nous mettre dans les conditions du travail des ébénistes. Les expériences ont été réalisées sur du bois sec à l'air (12 % d'humidité environ) Tout d'abord, les rondelles obtenues pour chaque essence, ont été sciées avec

une scie à ruban en plusieurs barreaux de 8 cm de largeur selon le rayon, certains renfermaient ainsi la moelle et correspondaient au plus grand diamètre des rondelles. Les barreaux ont ensuite été coupés en plusieurs barreaux jumeaux de dimensions suivantes: largeur 4 cm, longueur 10 cm et épaisseur environ 4 cm (Figure 1). Pour arriver à l'équilibre hygroscopique, les barreaux ont été entreposés à l'extérieur, protégé du soleil et de la pluie. Afin d'améliorer le séchage à l'air libre, les barreaux ont été empilés sur des baguettes de séchage assurant la ventilation d'air.

L'échantillonnage en vue des essais d'imprégnation et d'exploration après injection a été fait selon le protocole suivant. Les barreaux ont d'abord été raccourcis en plusieurs petites éprouvettes jumelles de dimensions 1 x 4 cm pour une longueur de 5 cm. La première éprouvette, prélevée dans l'aubier le plus externe de l'arbre 1, est affectée du code :

A1a1h1

Le chiffre qui suit le A majuscule correspond au numéro de l'arbre et le chiffre qui suit le a minuscule correspond à la position radiale de l'échantillon, la dernière lettre (h) et son numéro indiquent la hauteur (direction longitudinale) de prélèvement de l'éprouvette.

De cette façon, plusieurs éprouvettes de 4 x 1 x 5 cm d'aubier et d'autres identiques du duramen ont été préparées à partir de chaque bille. Les éprouvettes étaient stockées sous hangar et se trouvaient dès lors à l'état sec à l'air.

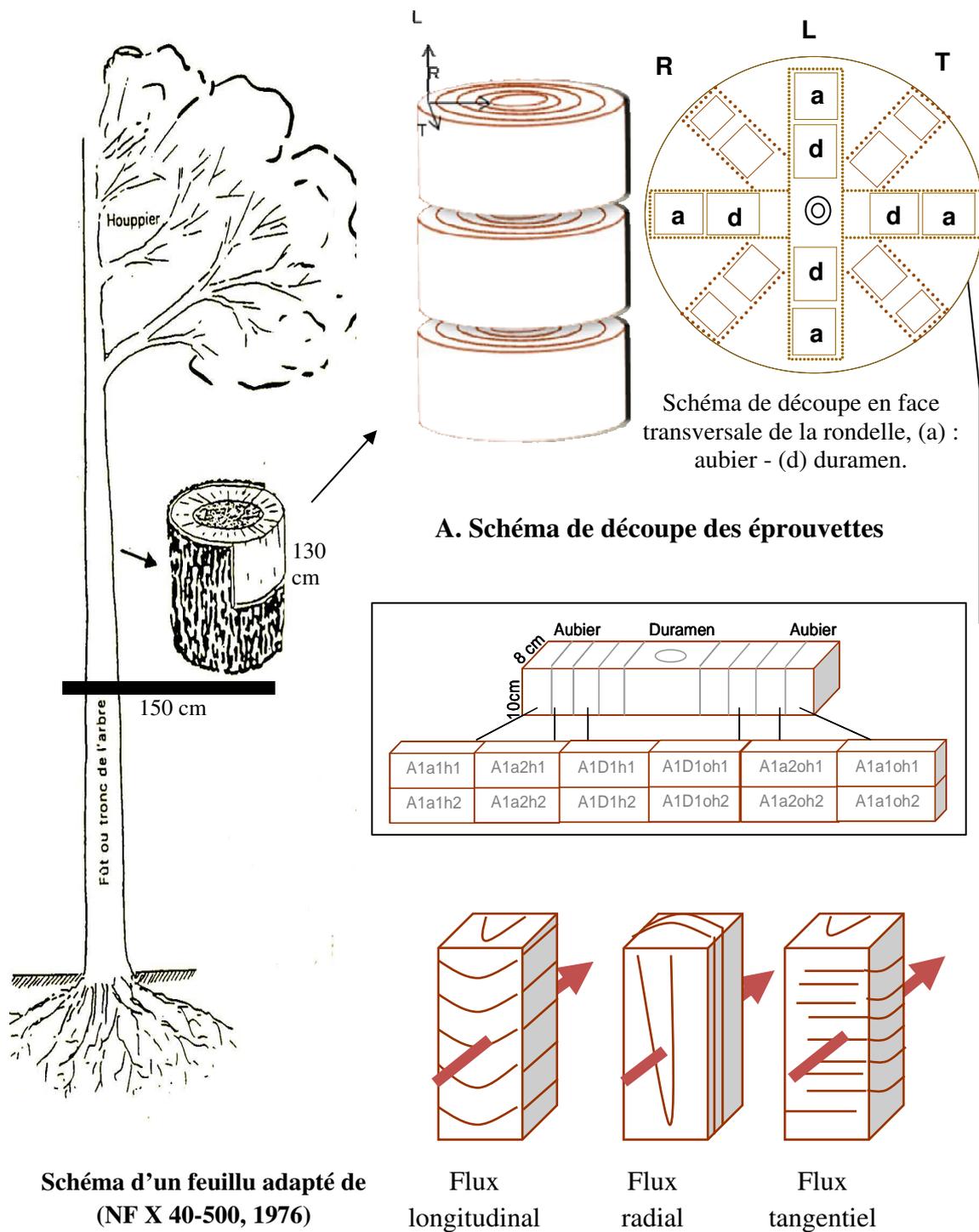


Schéma d'un feuillu adapté de (NF X 40-500, 1976)

C. Éprouvettes et imprégnation orientées selon les trois plans de référence du bois

Figure II -1 : Schéma descriptif de l'échantillonnage et l'usage des éprouvettes.

II-2-3- Montage expérimental pour l'étude de la cinétique de migration

Nous avons mis au point un montage original permettant d'étudier l'écoulement d'un liquide à pression atmosphérique à travers un échantillon de bois orienté, de faible taille. Ce dispositif a été réalisé au LERFoB, site de l'ENGREF à Nancy. L'objectif était de caractériser l'imprégnabilité, dans le temps, selon les trois directions dans le bois chez les trois essences sélectionnées : le chêne, le hêtre et le sapin.

Le dispositif d'observation est composé de trois éléments solidaires d'un rail rectiligne horizontal sur lequel il est possible de déplacer chaque élément suivant un axe horizontal (figure II-2).

Le premier élément est composé d'un réservoir transparent. Il repose sur un chariot élévateur afin de maintenir la surface libre de cette réserve d'eau à la même hauteur que l'échantillon. L'eau est acheminée vers l'échantillon par l'intermédiaire d'un tuyau souple transparent. La jonction entre l'échantillon de bois et le tuyau est réalisée à l'aide d'un élément en silicone moulé à des dimensions légèrement inférieures à celles des éprouvettes.

Le second élément est un support composé de trois micro-platines qui permettent le déplacement de l'échantillon en x, y, z, afin de positionner avec précision la surface observée de l'échantillon face au dispositif d'acquisition d'images.

Le troisième élément est une loupe reliée à un appareil photographique numérique contrôlé par un logiciel spécifique. L'ensemble permet de prendre automatiquement des photographies à intervalles de temps réguliers.

En raison de la différence d'anatomie au sein de l'espèce, l'anisotropie et la variabilité du bois, il nous a été difficile de fixer un temps d'imprégnation propre à chaque essence et chaque direction. L'intervalle d'acquisition d'images varie d'une éprouvette

à l'autre, selon la zone et la direction du bois au sein d'une même essence ainsi que d'une essence à l'autre.

Trois logiciels d'analyse d'images ont été utilisés pour exploiter les images enregistrées et quantifier les éléments anatomiques conducteurs à l'intérieur du bois.

Le premier programme, créé par Perré et Rémond, permet l'acquisition d'images de la surface de sortie du liquide éclairée par des fibres optiques.

Après élimination des images superflues, les images sont ensuite traitées par un deuxième programme (Adobe Photoshop) pour des opérations simples :

- redimensionnement de la taille des images ;
- correction avec accentuation par des filtres.

Un troisième programme (Analysis) nous a permis la création d'une base de données constituée des fichiers traités, avec création des feuilles de mesures. Chez le chêne, le nombre des éléments conducteurs est clairement visible et les éléments imprégnés sont donc comptés par cerne. Dans le cas du hêtre et du sapin c'est le nombre de pixels colorés par unité de surface qui est pris en compte, étant donné l'impossibilité de compter les éléments anatomiques, trop petits et trop nombreux. Avec le même logiciel, nous avons réalisé des animations « film » présentant la cinétique d'écoulement.



Figure II-2 : Montage expérimental conçu pour l'étude de la cinétique d'écoulement capillaire de l'eau colorée à travers le bois au cours du temps

II-2-4- Mesure de l'infra- densité

A l'extrémité de chaque éprouvette d'essai, nous avons prélevé à l'aide d'une microtrouçonneuse, un échantillon de 5 mm de longueur (direction d'imprégnation), 1cm d'épaisseur et 4 cm de largeur. Ces échantillons ont servi à la mesure de l'infra-densité.

L'infra-densité ou densité théorique minimale (masse volumique basale) est définie comme étant le rapport entre la masse anhydre (M_0) de l'échantillon et son volume maximal (V_s) :

$$\rho_i \left(\text{kg} / \text{m}^3 \right) = \frac{M_0}{V_s};$$

Avec M_0 : Masse du bois anhydre par Kg,

V_s : Volume maximal en m^3 du bois saturé, donc mesuré à une humidité supérieure à celle correspondant au Point de Saturation des Fibres, dit PSF.

Après saturation sous vide des échantillons, leur volume est mesuré selon le principe d'Archimède. Ces mêmes échantillons sont amenés à l'état anhydre (24 heures à 103°C). Afin d'éviter toute reprise d'humidité lors de la mesure de masse anhydre, les échantillons sont retirés de l'étuve et pesés un par un très rapidement. Les mesures ont été faites à l'aide d'un système développé au laboratoire par Perré, Bakour et Agoua, qui se compose des éléments suivants:

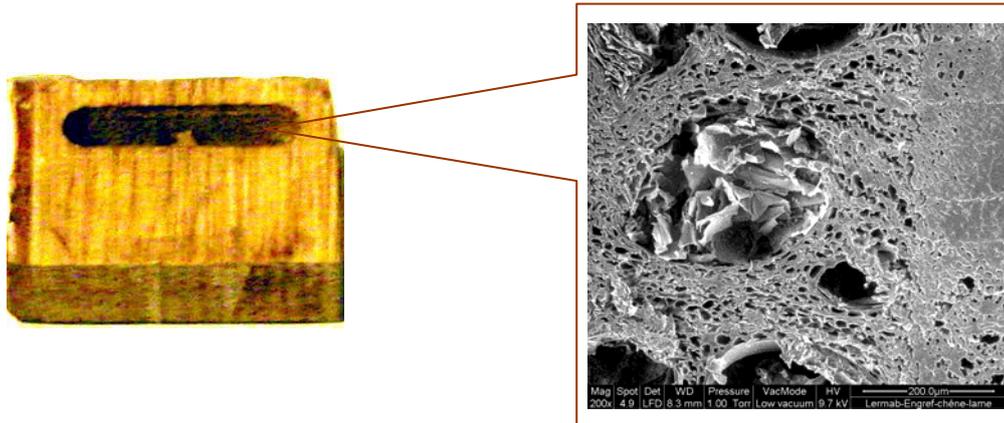
- une pompe à vide liée à une cloche dans laquelle les échantillons sont saturés ;
- une balance électronique avec une précision de 0,1 mg sur laquelle est posé un récipient contenant de l'eau pour mesurer le volume saturé ; sur cette même balance, sera mesuré la masse anhydre ;
- une étuve qui permet le séchage du bois pour l'amener à l'état anhydre.

II-2-5- Préparation de la surface d'entrée du liquide

Des essais préliminaires d'imprégnation ont été réalisés sur des parallélépipèdes de petite taille, obtenus par sciage. Les éprouvettes d'environ 35 mm dans la direction d'imprégnation, 10 mm et 30 mm dans les deux autres directions, comporte une rainure oblongue, obtenue par perçage, remplie de coton. La surface d'entrée de liquide à l'intérieur de la rainure doit permettre l'accessibilité à toutes les voies possibles de pénétration de liquides (cellules non obstruées par des fragments de parois). A cette fin plusieurs méthodes ont été testées dans le but d'obtenir la meilleure qualité pour la surface d'entrée des liquides. Nous avons comparé la qualité des surfaces obtenues avec la mèche à bois, le ciseau à bois, la lame de rasoir, la lame de microtome, la découpe laser, et ceci sur les trois essences.

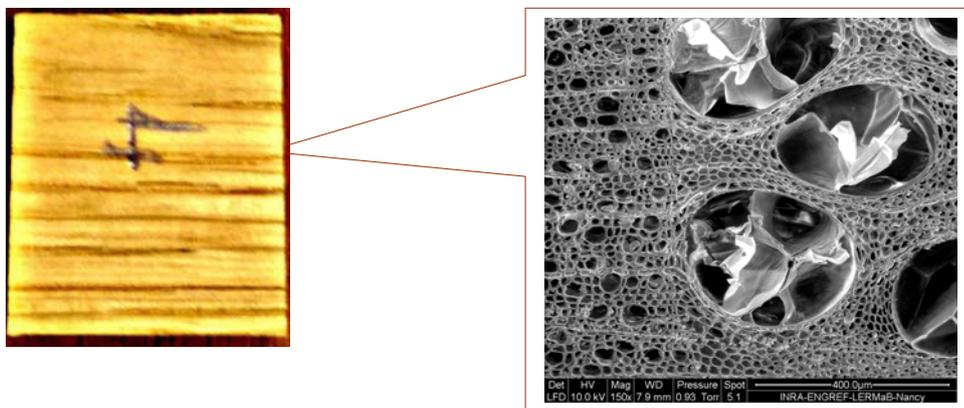
Les difficultés à obtenir une surface de qualité à l'intérieur de la rainure nous ont conduits à renoncer à évider les éprouvettes. La surface d'entrée du liquide est peu facilement obtenue à une extrémité de l'éprouvette, la surface d'observation se trouvant à l'autre extrémité (figure II-3).

Un "réservoir" est alors créé entre l'extrémité préparée au microtome de l'échantillon et un embout en silicone moulé souple, capable de s'adapter au gonflement du bois tout en assurant l'étanchéité



A) Eprouvette avec rainure

a) Etat de surface dans la rainure, obtenu par lame jetable du microtome.



B) Eprouvette sans rainure

b) Etat de surface de l'éprouvette (contact entre liquide et bois, obtenu par la lame au microtome)

*Figure II-3 : Eprouvette avec rainure (A) et sans rainure (B),
(a, b) images des états de surface au niveau des points d'injections (cas du chêne)*

Les surfaces d'entrée et de sortie du liquide ont été préparées soigneusement au microtome. De plus les dimensions finales de l'éprouvette, citée précédemment (35 mm dans la direction d'imprégnation, 10 mm et 30 mm dans les deux autres directions), nous ont été imposées par la géométrie du microtome à glissière.

II-2-6- Choix des colorants

Les phénomènes de coloration des cellules résultent d'un ensemble de phénomènes physico-chimiques. Pour suivre le passage des liquides dans le bois, il est nécessaire de colorer de façon non perturbatrice les voies d'écoulement dans le tissu conducteur. Il convient alors de trouver un colorant, miscible à l'eau, qui répond aux critères suivants :

- taille des particules inférieure à la taille des ponctuations et des perforations permettant la communication entre éléments conducteurs du bois;
- absence de polymérisation avec les composants du bois.
- Marquage satisfaisant du passage du liquide.

Pour obtenir le meilleur résultat, plusieurs colorants ont été testés (tableau II-4). Ils se présentaient sous forme de poudre et étaient solubles dans l'eau à 20°C.

Tableau II-4 : Colorants testés au moment de l'étude

| Nom du colorant | définition | couleur | maximum d'absorption (nm) |
|----------------------------|---|---------|---------------------------|
| Bleu W 6002 | sel disodique d'un colorant du triarylméthane | bleu | 630 |
| Rouge solide W 3000 | colorant diazoïque | rouge | 510 |
| Bleu W 684 | sel disodique d'un colorant indigoïde | bleu | 610 |
| Rouge cerise W 3007 | sel trisodique d'un colorant monoazoïque | rouge | 520 |

Le colorant répondant le mieux aux critères précités est le colorant Bleu W 6002. L'étude de la migration des liquides dans le bois a donc été réalisée à l'aide d'une solution aqueuse de ce colorant à une concentration de 1 g/l.

II-2-7- Exploration des échantillons imprégnés

Afin d'étudier les voies de passages du colorant à travers les éléments anatomiques conducteurs du bois au sein de l'échantillon orienté, nous avons réalisé des coupes perpendiculaires à la direction d'imprégnation des échantillons tous les 5 mm.

Il a été décidé d'explorer des éprouvettes imprégnées après un séchage de 12 heures à l'air libre. Cette durée de séchage fixée après plusieurs essais évite un possible déplacement des colorants lors du passage de la lame du microtome à partir d'un échantillon humide. Mais il faut noter que le séchage du bois ne facilite pas la coupe.

Après plusieurs essais préliminaires d'imprégnation des trois essences choisies, un effet essence s'est clairement manifesté. Une imprégnation de trois éprouvettes d'essences différentes ayant les mêmes dimensions et la même direction d'écoulement, ne donne pas le même résultat en profondeur d'imprégnabilité. Par exemple, au bout de 30 minutes d'injection dans la direction longitudinale, la profondeur d'imprégnation correspond à la longueur totale de l'éprouvette pour le hêtre et le sapin alors qu'elle n'est que de quelques millimètres pour le chêne. C'est pour cette raison que les temps d'imprégnation, pour l'exploration, diffèrent d'une essence à l'autre.

- Montage expérimental

Après découpe des éprouvettes par la microtronçonneuse, les surfaces d'entrée et de sortie de liquide seront préparées par un microtome manuel Léitz, et les images sont ensuite prises sur ces surfaces avec une loupe Olympus de l'ENSTIB (figures II-4).

Parfois il était nécessaire de mener une observation complémentaire à plus petite échelle par microscopie électronique, sur ces dites surfaces, pour compléter la compréhension de la pénétration du liquide au sein des cellules du bois.

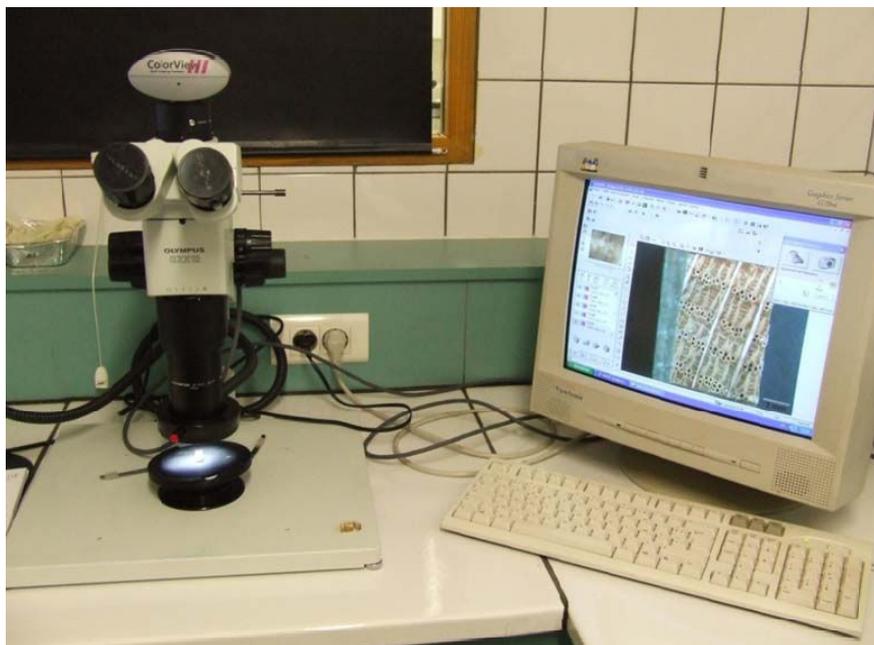


Figure II-4 : loupe binoculaire Olympus (ENSTIB)

II-2-8- Observation par microscopie électronique à balayage

L'ESEM (Environmental Scanning Electron Microscope) (Figure II-5), constitue pour les matériaux biologiques, une avancée importante résolvant les problèmes de préparation des échantillons. L'avantage principal d'un ESEM par rapport aux CSEM, microscope électronique à balayage conventionnel, réside dans le fait qu'il peut fonctionner à des pressions allant jusqu'à 20 Torr (10^{-5} Torr pour un CSEM) et à des températures contrôlées par une platine à effet Peletier, ce qui permet de contrôler l'équilibre hygroscopique de l'échantillon par le jeu des pressions et des températures dans la chambre d'observation. Cet équipement est particulièrement bien adapté au bois car c'est un matériau hygroscopique. Ce dispositif permet d'observer et de faire des images d'échantillons non-conducteurs sans métallisation préalable de leur surface.



Figure II-5 : Microscope électronique à balayage environnemental (ENGREF).

L'ESEM nous a permis de caractériser la thyllose au sein des vaisseaux de plusieurs essences selon la zone du bois, et de vérifier son influence sur la perméabilité (voir chapitre 3).

II-3- Résultats et discussions

Pour chacune des essences étudiées (chêne, chêne dégradé par un agent de pourriture blanche, hêtre, sapin), nous présentons la cinétique et/ou l'exploration réalisées sur des échantillons prélevés dans différentes zones de l'arbre, et imprégnés selon différentes directions d'écoulement du liquide.

II-3-1- Le chêne

II-3-1-1- Aubier

II-3-1-1-1-Écoulement longitudinal

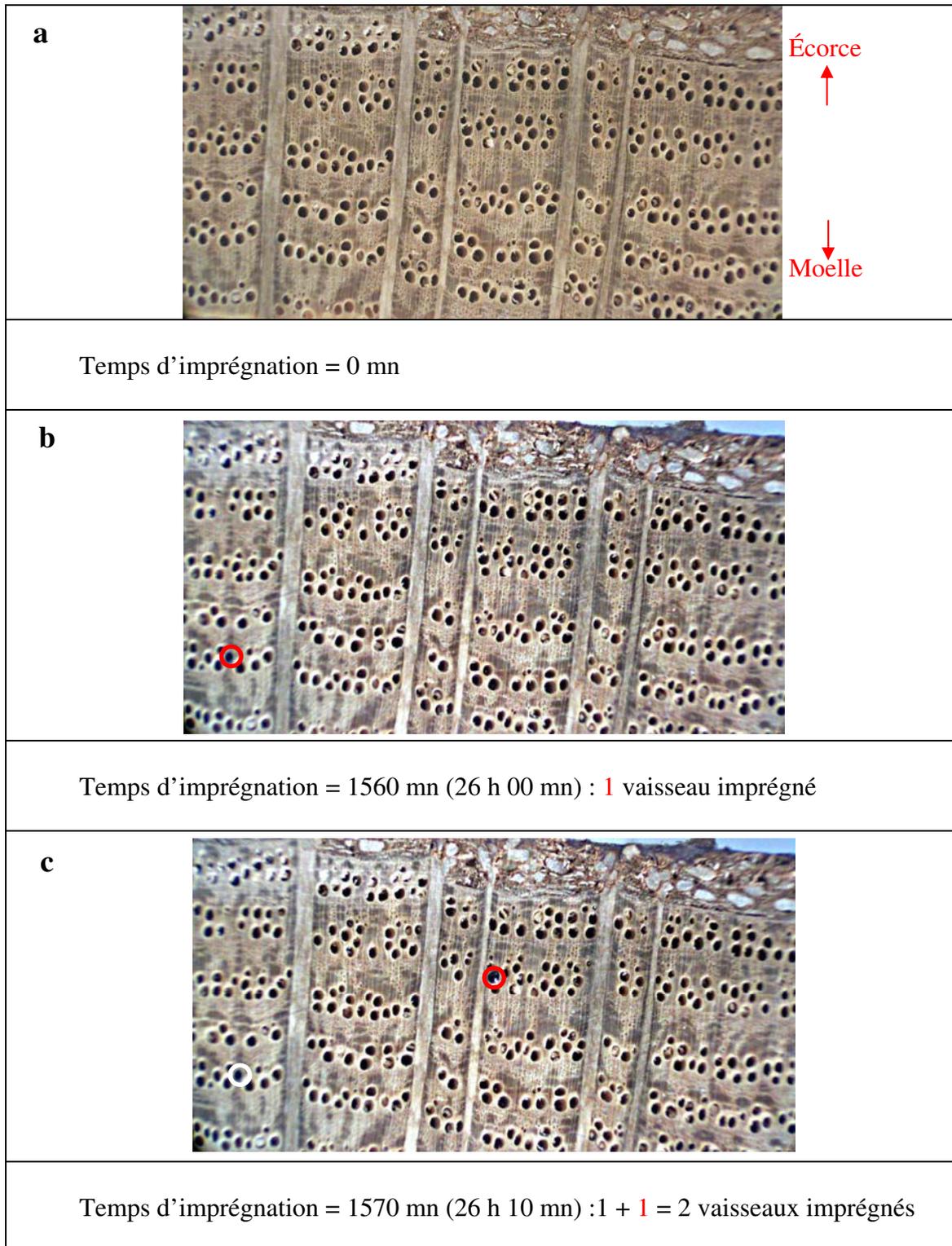
a) Cinétique

Des éprouvettes d'aubier ont été prélevées dans l'arbre 1. Dans le tableau II-5 figure la codification de trois éprouvettes, pour lesquelles les résultats sont présentés. Ces éprouvettes mesurent 35 mm dans la direction d'écoulement.

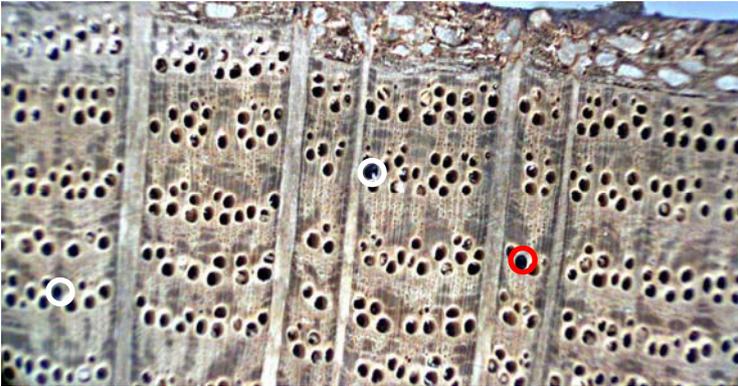
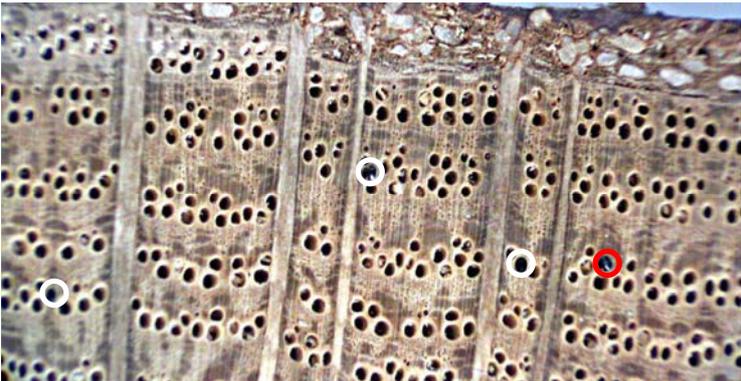
Tableau II-5 : Codification des éprouvettes d'aubier de chêne en fonction de leur position dans l'arbre 1

| Code éprouvette | Position radiale (du cambium vers la moelle) | | | Nombre de cernes | Position verticale | |
|-----------------|--|----------|----------|------------------|--------------------|-----------|
| | Aubier 1 | Aubier 2 | Aubier 3 | Nombre de cernes | Hauteur 1 | Hauteur 2 |
| A1a1h1 | x | | | 5 | x | |
| A1a2h2 | | x | | 7 | | x |
| A1a3h2 | | | x | 8 | | x |

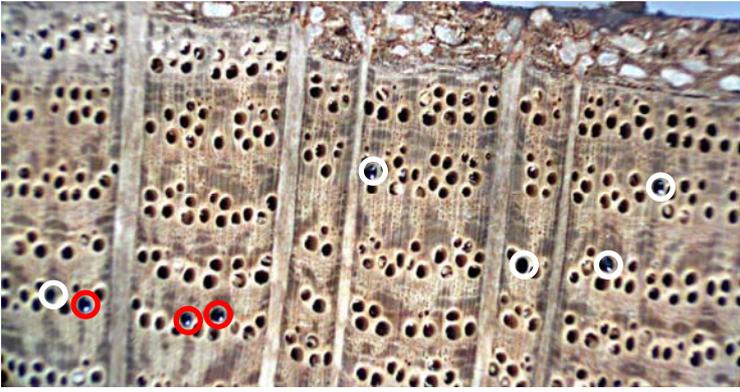
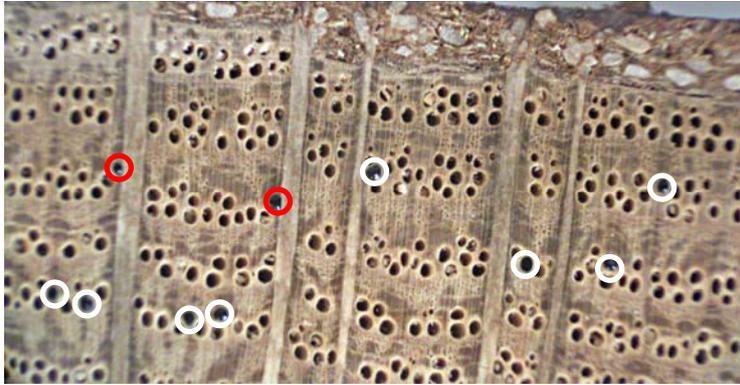
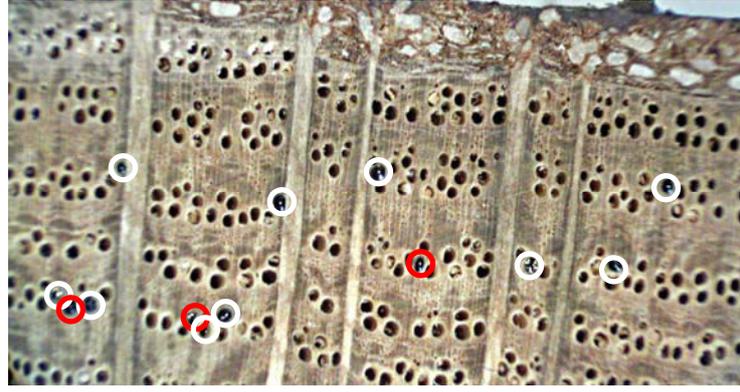
Le tableau II-5 représente la codification des éprouvettes d'aubier de chêne en fonction de leur position dans l'arbre, les échantillons A1a1h1, A1a2h2 et A1a3h2 sont positionnés respectivement du cambium vers la moelle, A1a1h1 étant le plus proche du cambium et A1a3h2 le plus proche de la moelle.



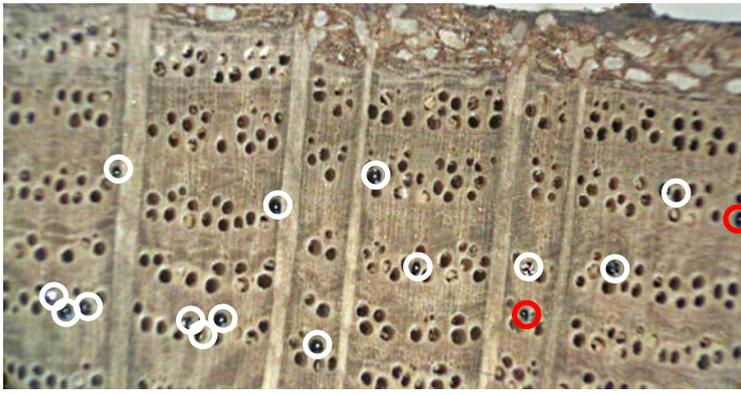
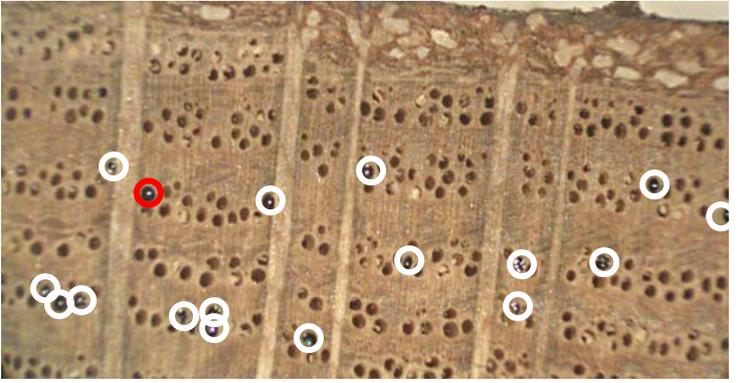
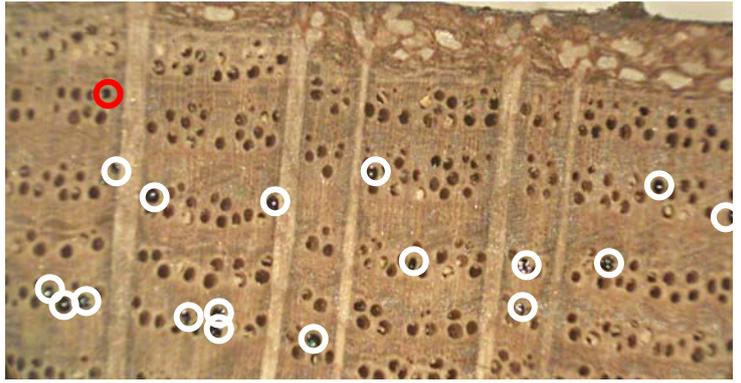
Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (A1a1h1)

| | |
|---|--|
| d |  |
| Temps d'imprégnation = 1580 mn (26 h 20 mn) : 2 + 1 = 3 vaisseaux imprégnés | |
| | |
| Temps d'imprégnation = 1601 mn (26 h 41 mn) : 3 + 1 = 4 vaisseaux imprégnés | |
| e |  |
| Temps d'imprégnation = 1664 mn (27 h 44 mn) : 4 + 1 = 5 vaisseaux imprégnés | |

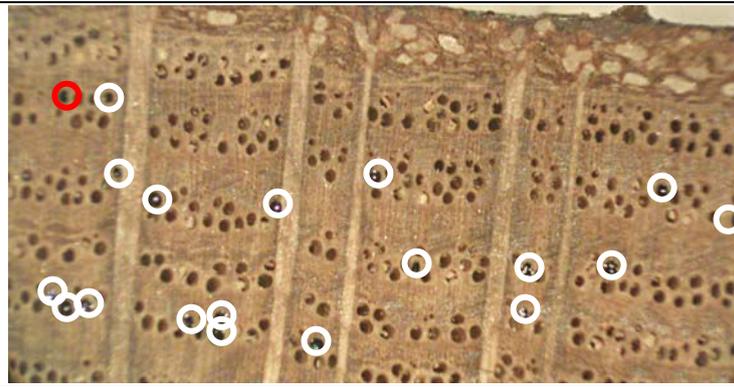
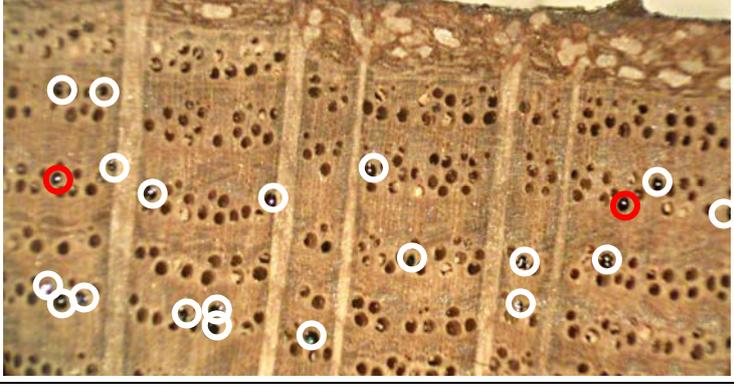
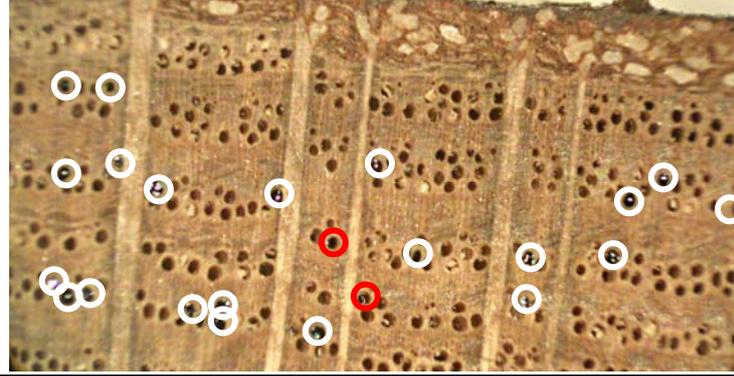
Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (A1a1h1)

| | |
|--|--|
| g |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1674 mn (27 h 54 mn) : 5 + 3 = 8 vaisseaux imprégnés</p> | |
| h |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1695 mn (28 h 15 mn) : 8 + 2 = 10 vaisseaux imprégnés</p> | |
| i |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1737 mn (28 h 57 mn) : 10 + 3 = 13 vaisseaux imprégnés</p> | |

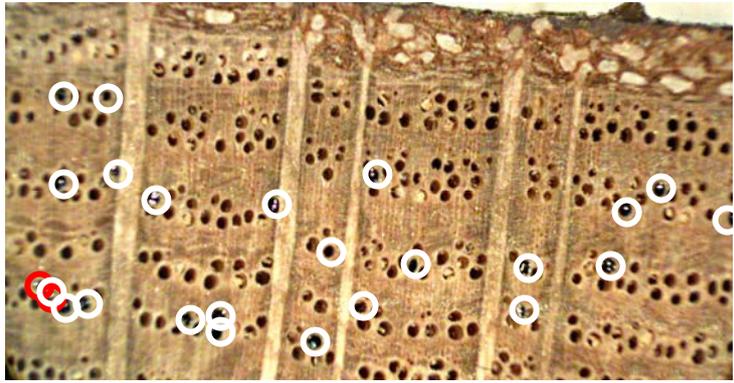
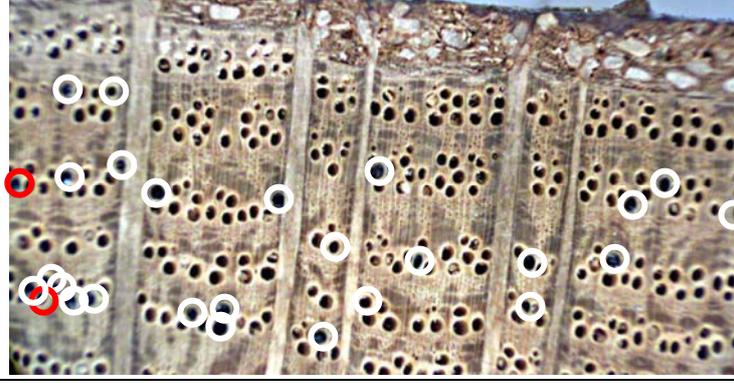
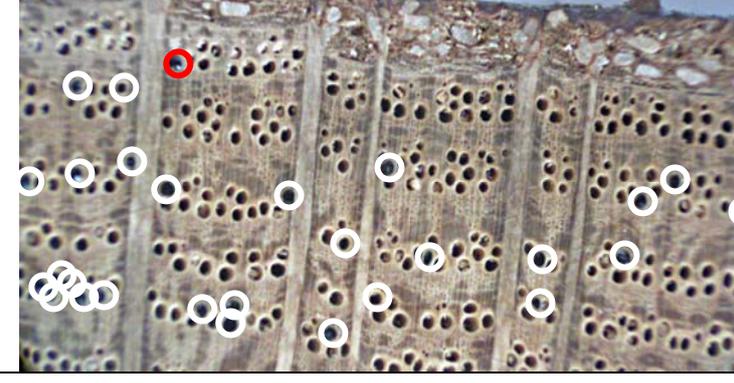
Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'ubier de chêne sain (A1a1h1)

| | |
|--|--|
| j |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1763 mn (29 h 23 mn) : 13 + 3 = 16 vaisseaux imprégnés</p> | |
| k |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1874 mn (31 h 14 mn) : 16 + 1 = 17 vaisseaux imprégnés</p> | |
| l |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 1946 mn (32 h 26 mn) : 17 + 1 = 18 vaisseaux imprégnés</p> | |

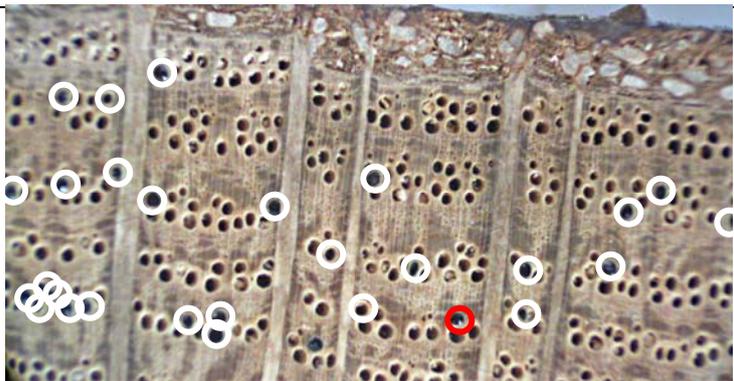
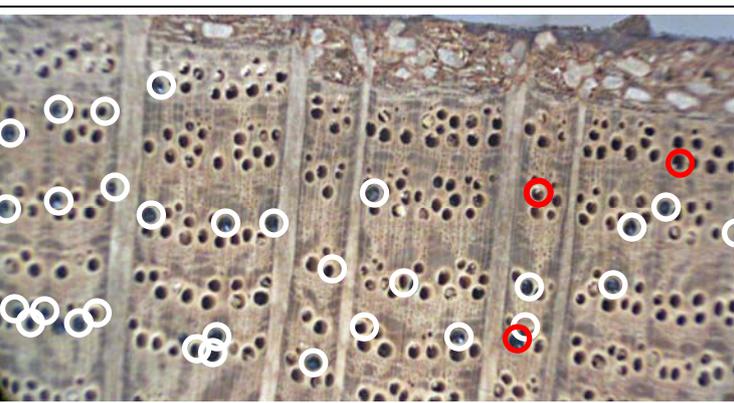
Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'ubier de chêne sain (A1a1h1)

| | |
|--|--|
| <p>m</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2066 mn (34 h 26 mn) : 18 + 1 = 19 vaisseaux imprégnés</p> | |
| <p>n</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2166 mn (36 h 6 mn) : 19 + 2 = 21 vaisseaux imprégnés</p> | |
| <p>o</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2636 mn (43 h 56 mn) : 21 + 2 = 23 vaisseaux imprégnés</p> | |

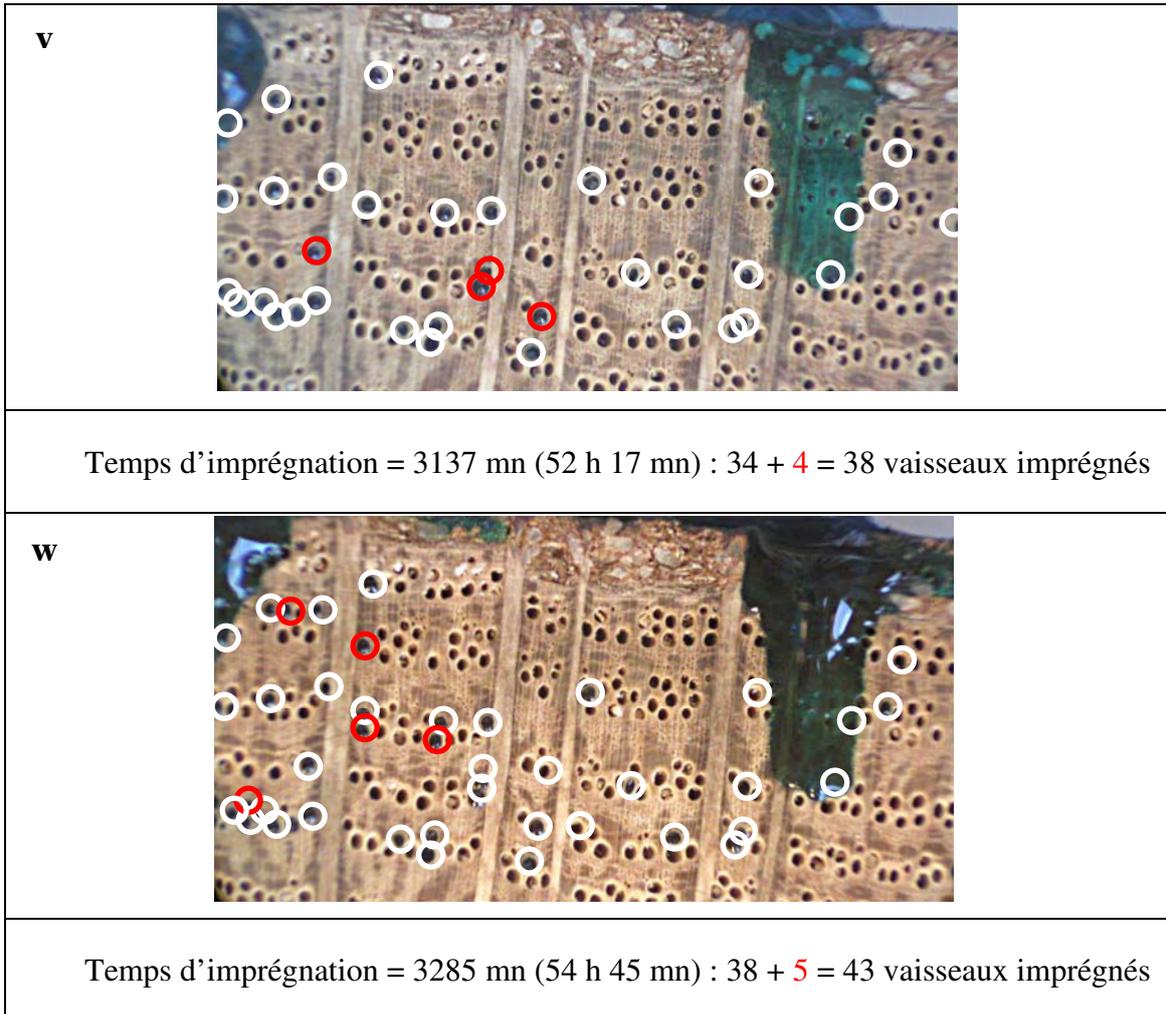
Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (Ala1h1)

| | |
|--|--|
| <p>p</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2767 mn (46 h 7 mn) : 23 + 2 = 25 vaisseaux imprégnés</p> | |
| <p>q</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2923 mn (48 h 43 mn) : 25 + 2 = 27 vaisseaux imprégnés</p> | |
| <p>r</p> |  |
| <p>Temps d'imprégnation = 2985 mn (49 h 15 mn) : 27 + 1 = 28 vaisseaux imprégnés</p> | |

Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (Ala1h1)

| | | |
|--|--|--|
| <p>s</p> |  | |
| <p>Temps d'imprégnation = 3053 mn (50 h 53 mn) : 28 + 1 = 29 vaisseaux imprégnés</p> | | |
| <p>t</p> |  | |
| <p>Temps d'imprégnation = 3105 mn (51 h 05 mn) : 29 + 2 = 31 vaisseaux imprégnés</p> | | |
| <p>u</p> |  | |
| <p>Temps d'imprégnation = 3132 mn (52 h 12 mn) : 31 + 3 = 34 vaisseaux imprégnés</p> | | |

Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (A1a1h1)



Figures II-6a à II-6w : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne sain (A1a1h1)

Cinétique de l'éprouvette A1a1h1

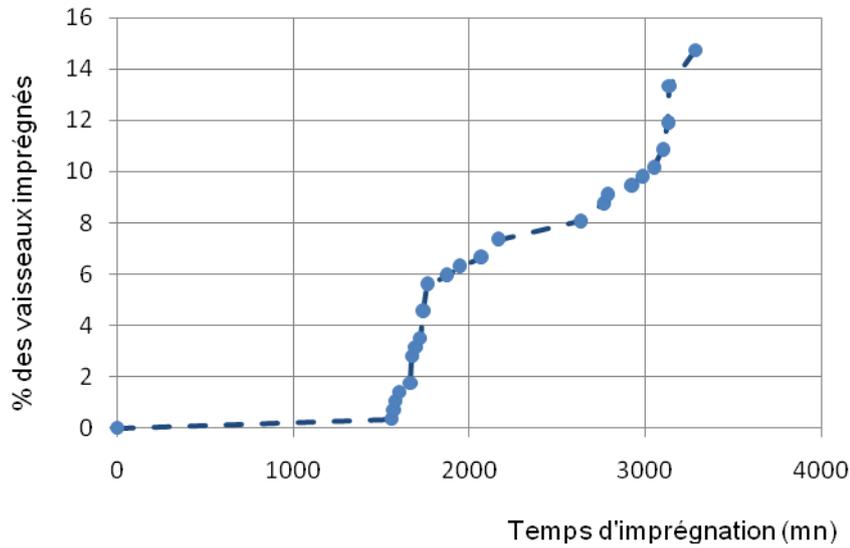


Figure II-7 : Pourcentage de vaisseaux imprégnés en fonction du temps dans l'aubier de chêne sessile 1 (A1a1h1)

Cinétique de l'éprouvette A1a2h2

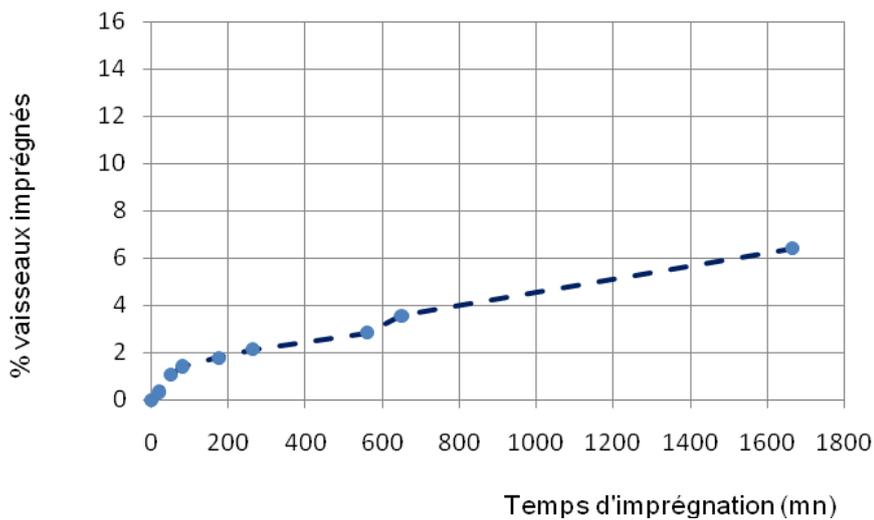


Figure II-8 : Pourcentage de vaisseaux imprégnés en fonction du temps dans l'aubier de chêne sessile 1 (A1a2h2)

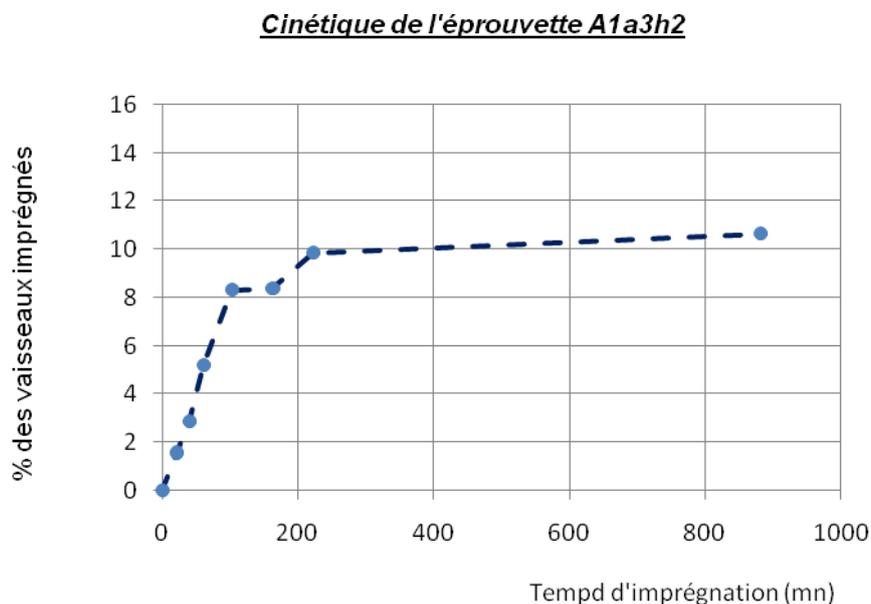


Figure II-9 : Pourcentage de vaisseaux imprégnés en fonction du temps dans l'aubier de chêne sessile 1(A1a3h2)

Les figures II-6a à II-6w représente l'évolution temporelle de l'écoulement d'une solution aqueuse colorée par le Bleu W 6002 dans la direction longitudinale pour un échantillon de chêne prélevé dans l'aubier sous écorce, renfermant les cinq derniers cernes formés par le cambium (éprouvette A1a1h1). Les temps relevés correspondent à l'apparition d'un (ou plusieurs) nouveau(x) vaisseau(x) conducteur(s) sur la face de sortie. Les nouveaux vaisseaux conducteurs sont entourés d'un cercle rouge alors que ceux qui étaient préalablement conducteurs sont entourés d'un cercle blanc.

Ces relevés ont permis de tracer des cinétiques d'écoulement pour l'éprouvette A1a1h1, qui représentent l'aubier de chêne 1 (figures II-7).

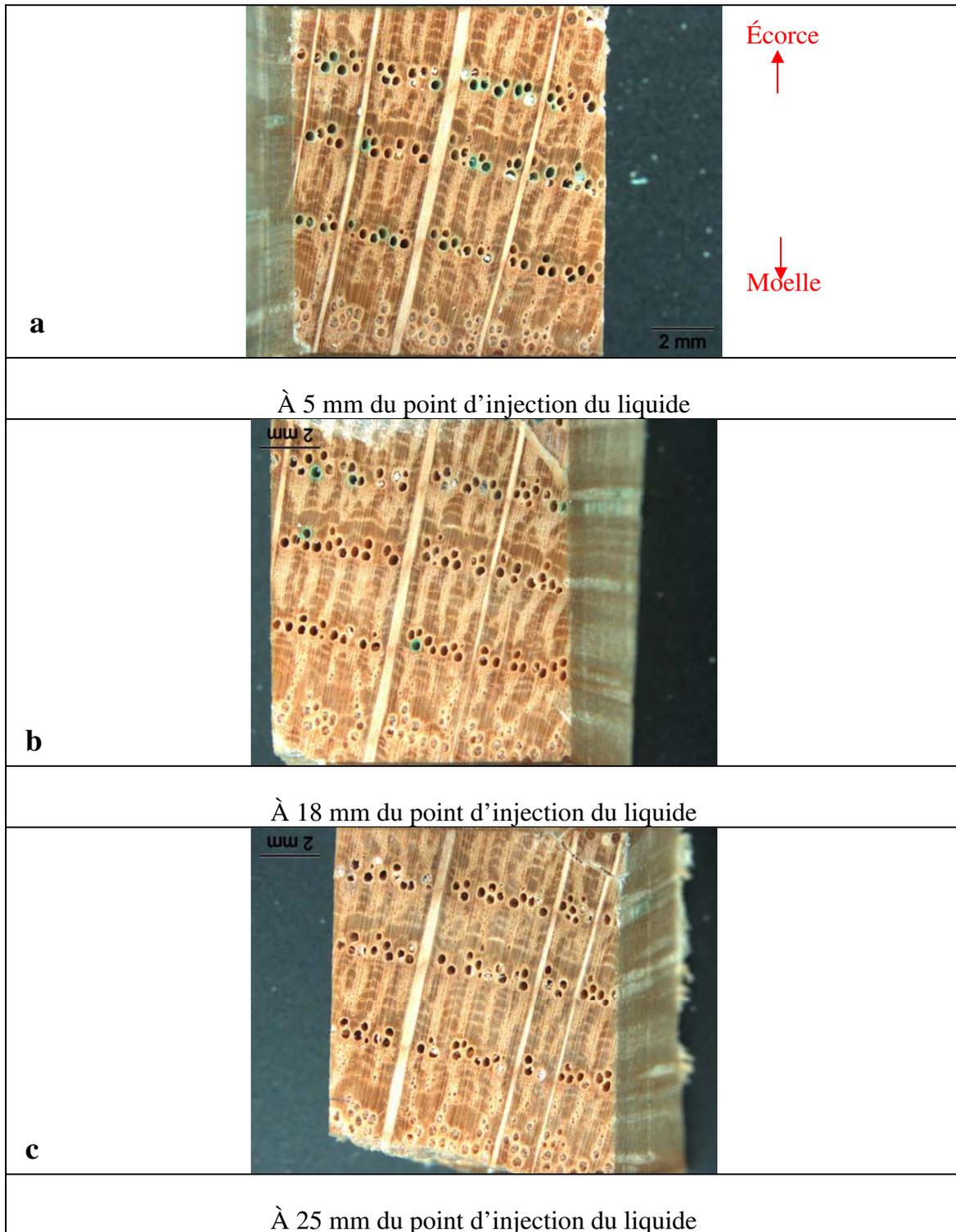
Le même relevés ont été effectués sur les éprouvettes A1a2h2 et A1a3h2, qui ont été prises sur un même rayon (de l'écorce vers la moelle) que A1a1h1, les résultats sont représentés dans les figures II-8 et II-9.

L'écoulement, au sein des trois éprouvettes, montre que le pourcentage des vaisseaux imprégnés augmente en fonction du temps avec des vitesses différentes (figures II-7, II-8 et II-9). Pour les éprouvettes A1a2h2 et A1a3h2 (figure II-8 et figure II-9), certains vaisseaux se révèlent conducteurs dès le début de l'essai alors que pour l'éprouvette A1a1h1, le premier vaisseau laissant sortir du liquide coloré n'est observé qu'au bout de 26 heures (figure II-7). Les courbes de cinétique montrent cependant une allure similaire, quoique plus ou moins marquée. Dès que le liquide commence à s'écouler au niveau de la face de sortie, le nombre de vaisseaux conducteurs augmente rapidement, puis semble se stabiliser pour augmenter de nouveau. Cette observation est particulièrement nette pour l'éprouvette A1a1h1 (figure II-7). On pourrait penser que l'écoulement s'effectue grâce à deux phénomènes décalés dans le temps.

b) Exploration

Les éprouvettes utilisées lors de l'étude de la cinétique d'imprégnation sont "explorées", c'est à dire coupées en tranches afin d'étudier les voies de passage du liquide coloré. Cependant, les expériences précédentes ont été poursuivies jusqu'à l'observation d'un écoulement de liquide sur la face de sortie. Cet écoulement s'est produit au bout d'un temps très variable et les éprouvettes n'ont pas subi le même temps d'imprégnation.

Les premiers résultats ne peuvent donc pas être comparés entre eux. Une nouvelle série d'expériences était réalisée avec des temps d'imprégnation fixes, indépendants du temps nécessaire pour obtenir l'écoulement au niveau de la face de sortie. Les figures II-10a à II-10c présentent le passage de la solution colorée dans l'aubier du chêne sessile imprégné durant 5 minutes, puis coupé à différents niveaux, de plus en plus éloignés du point d'injection.



Figures II-10a à II-10c: Exploration d'une éprouvette d'aubier de chêne après 5 mn d'imprégnation dans la direction longitudinale, à différentes distances du point d'injection.

Ces images montrent que la migration du liquide se fait dans les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse et que le nombre de vaisseaux actifs diminue lorsque la distance de la surface d'entrée du liquide augmente. Le même résultat est obtenu à partir d'une analyse cerne par cerne (tableau II-6)

Tableau II-6: Nombre de vaisseaux actifs en fonction de la distance au point d'injection.

| Distance au point d'injection | Nombre de vaisseaux imprégnés par cerne | | |
|-------------------------------|---|--------|--------|
| | cerne1 | cerne2 | cerne3 |
| 5mm | 8 | 7 | 8 |
| 18mm | 3 | 1 | 1 |
| 25 mm | 0 | 0 | 0 |

II-3-1-1-2-Écoulement radial et tangentiel

a) Cinétique

Après un mois d'imprégnation, aucun écoulement au niveau de la face de sortie n'a été observé que ce soit dans la direction radiale ou tangentielle.

b) Exploration

L'exploration d'un échantillon imprégné durant 30 minutes¹ dans la direction radiale n'a montré aucune pénétration de liquide coloré.

Lorsqu'un échantillon est imprégné durant 30 minutes dans la direction tangentielle, toute trace de liquide coloré disparaît à partir de 400 µm de profondeur (figure II-11).

¹ Série d'expérience réalisée avec des temps d'imprégnation fixe, indépendants du temps nécessaire pour obtenir l'écoulement au niveau de la face de sortie.

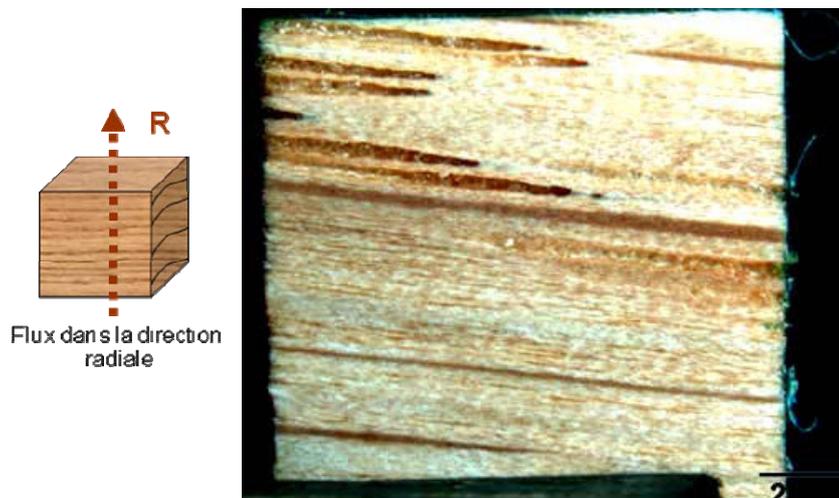


Figure II-11 : Exploration d'une éprouvette d'aubier de chêne après 30 mn d'imprégnation dans la direction radiale, à 400 μm du point d'injection

II-3-1-2- Duramen

II-3-1-2-1-Écoulement longitudinal

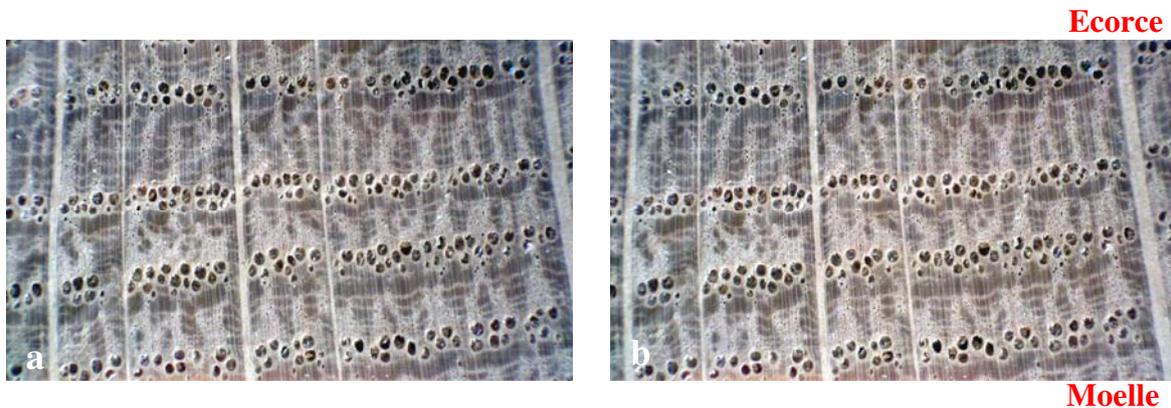
a) Cinétique

Les figures II-12 et II-13 représentent les résultats d'imprégnation de deux éprouvettes de chênes, prélevées dans le duramen interne et externe de l'arbre 1 (tableau II-7).

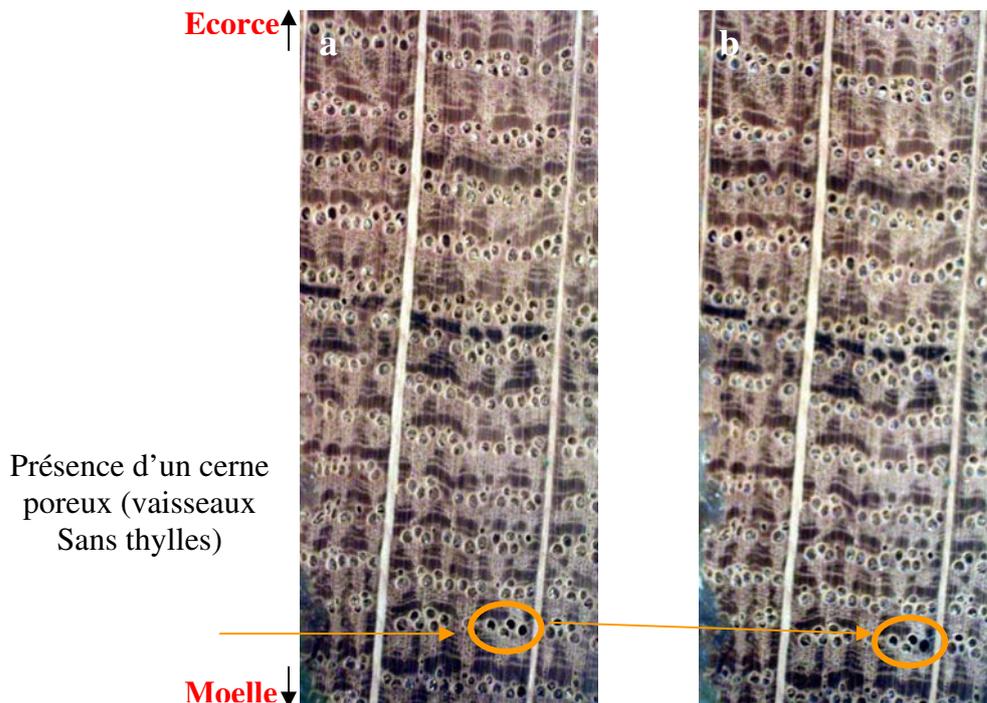
Tableau II-7 : Codification des éprouvettes de duramen de chêne en fonction de leur position dans l'arbre 1

| Code éprouvette | Infradensité (Kg/m^3) | Position radiale (du cambium vers la moelle) | | Position verticale | |
|-----------------|-------------------------------------|---|----------------------------|--------------------|--------------|
| | | Duramen externe (de) | Duramen interne (di) | Hauteur 1 | Hauteur 2 |
| A1deh1 | 556 | x | | x | |
| A1dih1 | 569 | | x | x | |

Les éprouvettes A1deh1, A1dih1 sont positionnées respectivement de l'aubier vers la moelle, A1deh1 étant le plus proche de l'aubier (zone de transition) et A1dih1 le plus proche de la moelle (bois juvénile).



Figures II-12a et b : Images de la surface de sortie lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette de duramen externe de chêne sain (A1deh1) (a : temps = 0 minutes ; b : temps = 4320 minutes = 72 heures)

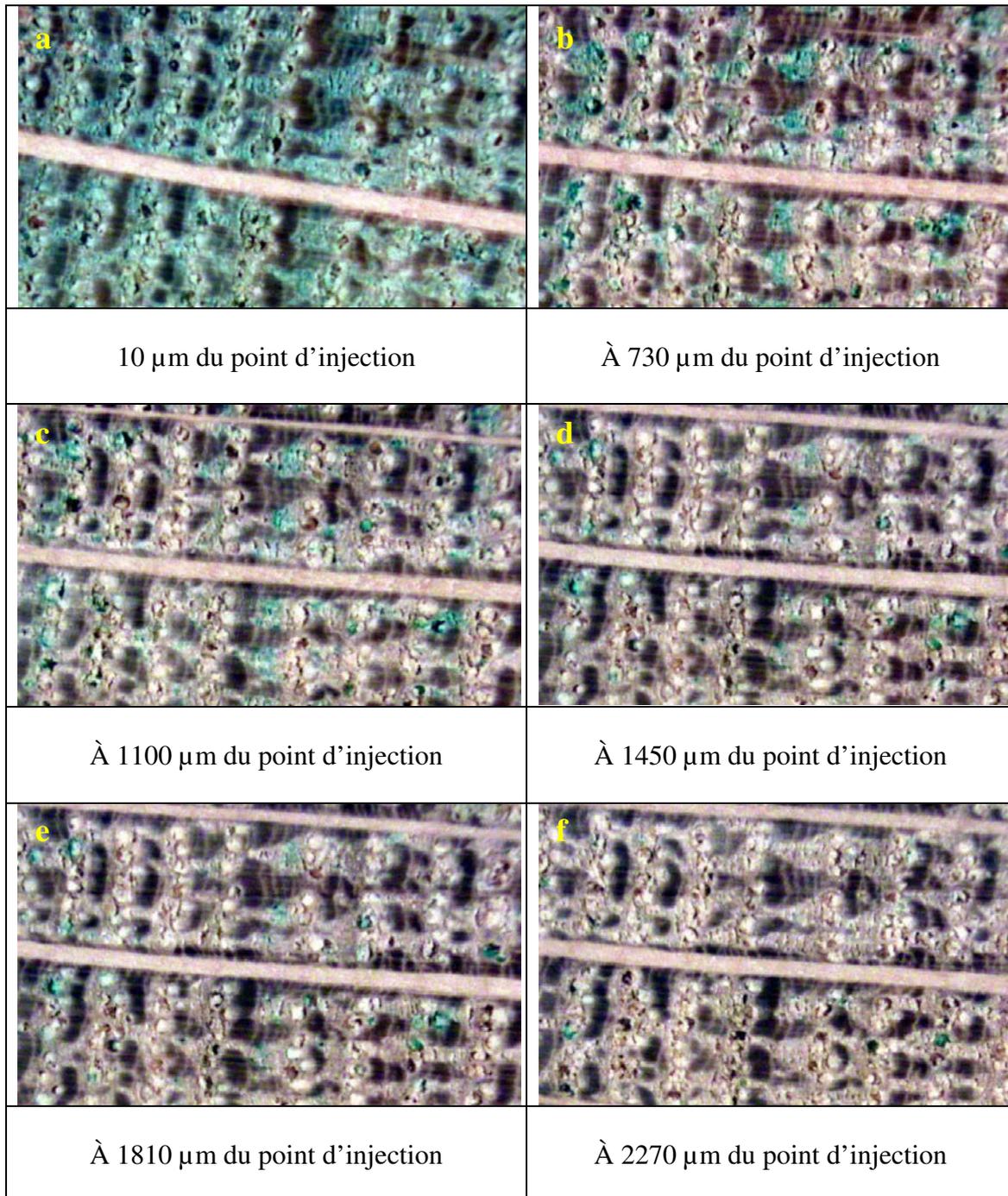


Figures II-13a et b : Images de la surface de sortie lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette de duramen interne de chêne sain (A1dih1) (a : temps = 0 minutes ; b : temps = 1440 minutes = 24 heures)

Dans la quasi-totalité des éprouvettes de duramen, nous n'avons observé aucune imprégnation au niveau de la face de sortie. Le temps maximum d'essai d'imprégnation du duramen de chêne correspond à deux mois. Cependant sur une éprouvette (A1dloh1), nous avons noté la présence de ce que les merrandiers appellent un « cerne poreux », c'est à dire, un cerne présentant un défaut de thyllose chez certains vaisseaux. Dans ce cerne dit « poreux », un vaisseau unique s'est montré conducteur au bout de 24 heures d'imprégnation (figure II-13b)

b) Exploration

Etant donnée la faible imprégnabilité du duramen de chêne, nous n'avons exploré que l'éprouvette prélevée dans le duramen interne et imprégnée pendant deux mois. La figure II-14a à II-14f représente les résultats de cette exploration à différentes distance d'injection.



Figures II-14a à II-14f: Exploration d'une éprouvette de duramen de chêne après deux mois d'imprégnation dans la direction longitudinale.

L'exploration du duramen de chêne sain, imprégné durant 2 mois, montre que la profondeur de pénétration du liquide est très faible. Au-delà de 2300 μm de profondeur, la couleur du colorant n'est plus détectée. Les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse sont bouchés par des thyllés, qui font barrière au liquide. On remarque par contre que les petits vaisseaux du bois final conduisent le liquide coloré plus profondément que les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse.

II-3-2- Le bois de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche

Le bois du chêne 2 est resté six mois à l'extérieur et a subi une attaque par un agent de pourriture blanche, ce qui nous a permis d'étudier le comportement d'éprouvettes présentant cette altération. Cette altération se manifeste par des différences de coloration entre le bois encore sain et le bois attaqué. Ces zones de bois dégradées sont soulignées d'un liseré brun foncé bien défini (figure II-15).

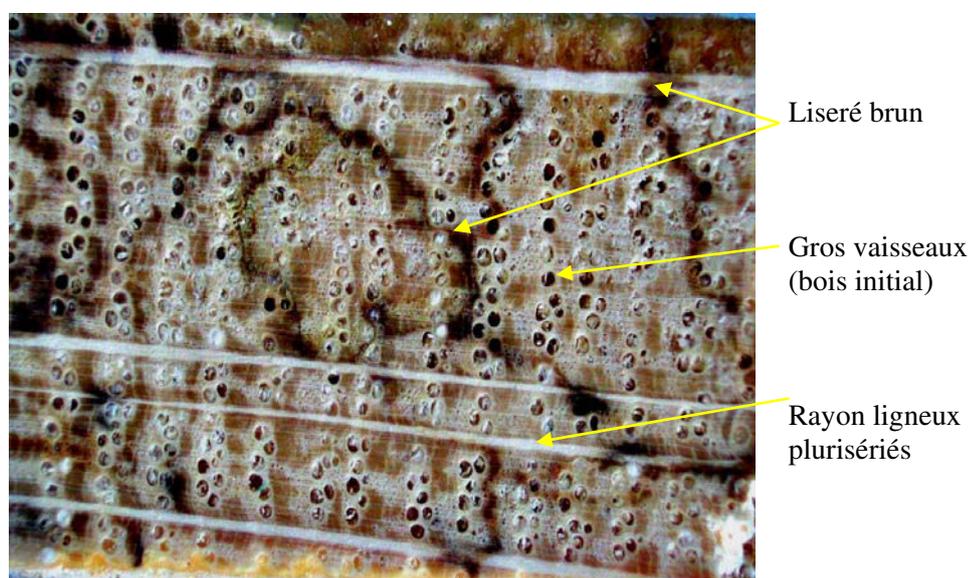


Figure II-15 : Plan transversal d'aubier de chêne sessile dégradé par un agent de pourriture blanche

II-3-2-1-Aubier

II-3-2-1-1-Écoulement longitudinal

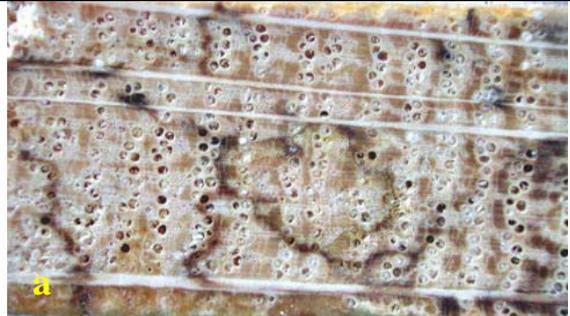
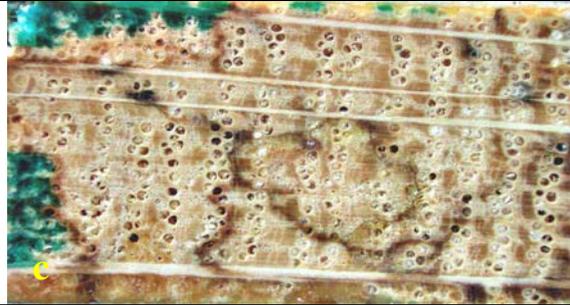
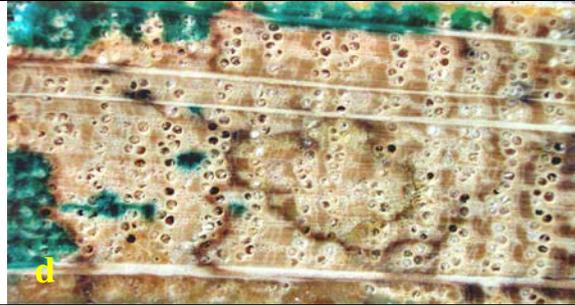
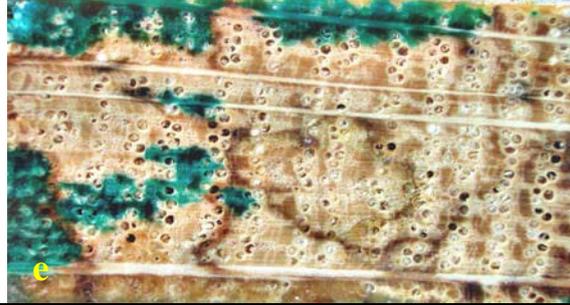
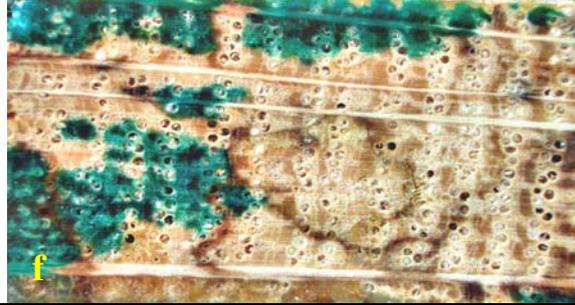
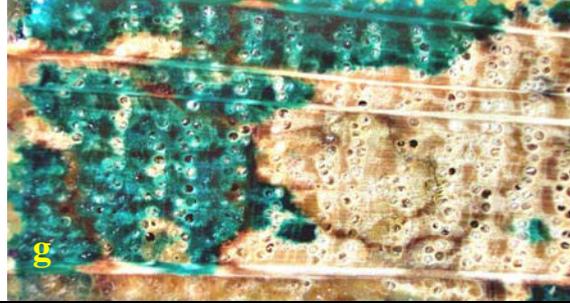
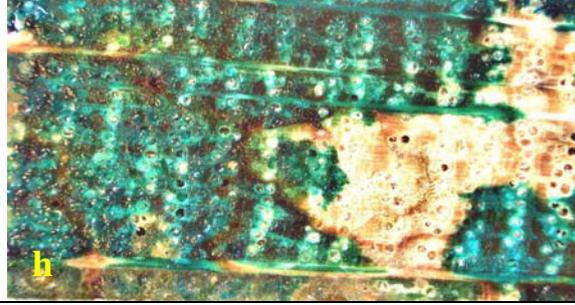
a) Cinétique

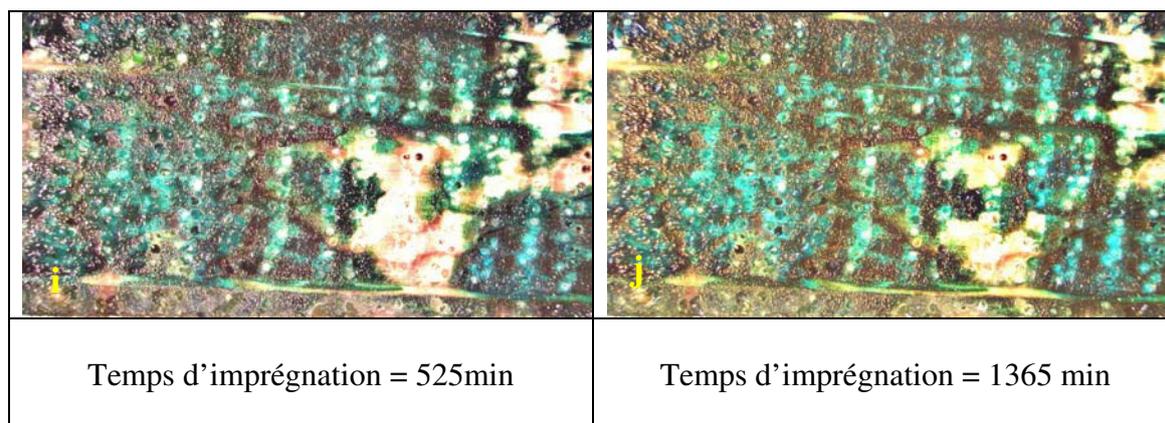
Des éprouvettes d'aubier ont été prélevées dans l'arbre 2. Dans le tableau II-8 figure la codification de quatre éprouvettes, pour lesquelles les résultats seront présentés.

Tableau II-8 : Codification des éprouvettes d'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche en fonction de leur position dans l'arbre 2.

| Code éprouvette | Infradensité Kg/m ³ | Position radiale (du cambium vers la moelle) | | Position verticale | |
|-----------------|-----------------------------------|---|----------|--------------------|--------------|
| | | Aubier 1 | Aubier 2 | Hauteur 1 | Hauteur 2 |
| A2a1h2 | 367 | x | | | x |
| A2a1h1 | 341 | x | | x | |
| A2a1oh1 | 323 | x | x | x | |
| A2a1oh2 | 313 | x | x | | x |

Les figures II-16a à II-16j représente l'évolution temporelle de l'écoulement d'une solution aqueuse colorée par le Bleu W 6002 dans la direction longitudinale pour un échantillon d'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche. L'infradensité de cet échantillon est de 320 Kg/m³, alors que l'infradensité moyenne des échantillons d'aubier sain testés est de 500 Kg/m³.

| Moelle | Écorce |
|---|--|
|  |  |
| Temps d'imprégnation = 0 min | Temps d'imprégnation = 5 min |
|  |  |
| Temps d'imprégnation = 10 min | Temps d'imprégnation = 15 min |
|  |  |
| Temps d'imprégnation = 20 min | Temps d'imprégnation = 25 min |
|  |  |
| Temps d'imprégnation = 45 min | Temps d'imprégnation = 165 min |



Figures II-16a à II-16j: Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche

La migration de l'eau dans le bois de chêne dégradé, à pression atmosphérique, semble s'effectuer avant tout au niveau du bois final, dans les plages de fibres ou de petits vaisseaux associés au parenchyme. Elle est beaucoup plus rapide et plus étendue que dans l'aubier de chêne sain car l'hydrolyse enzymatique des constituants du bois par le mycélium augmente la microporosité du bois (Schwarze 2007).

Pour tracer les cinétiques d'écoulement, il n'est plus question ici de compter les vaisseaux conducteurs. Nous avons donc exprimé quantitativement l'imprégnation en comptabilisant le nombre de pixels colorés par le colorant sur les images. Les cinétiques d'imprégnation sont données pour quatre éprouvettes jumelles sur les figures II-17, II-18, II-19 et II-20, correspondant respectivement aux éprouvettes A2a1h2, A2a1h1, A2a1oh1 et A2a1oh2.

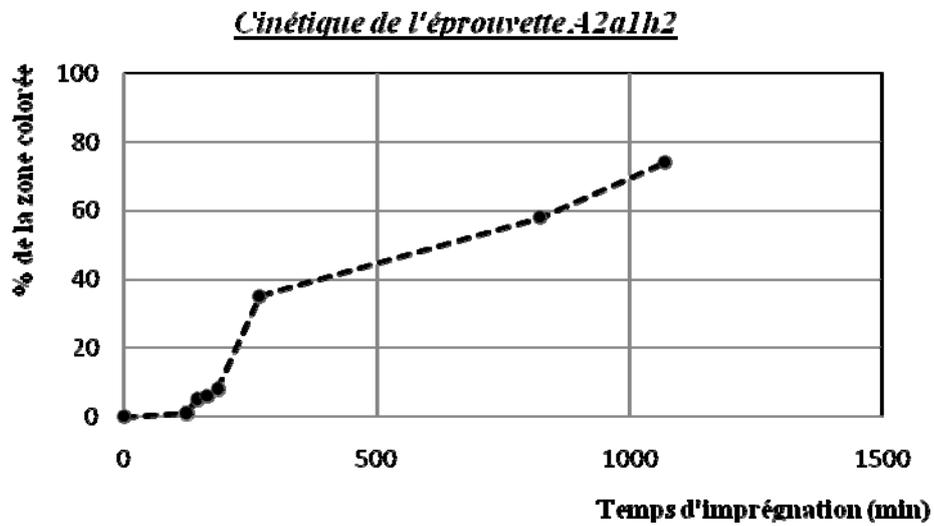


Figure II-17 : % de la zone du bois imprégné en fonction du temps dans l'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche (A2a1h2)

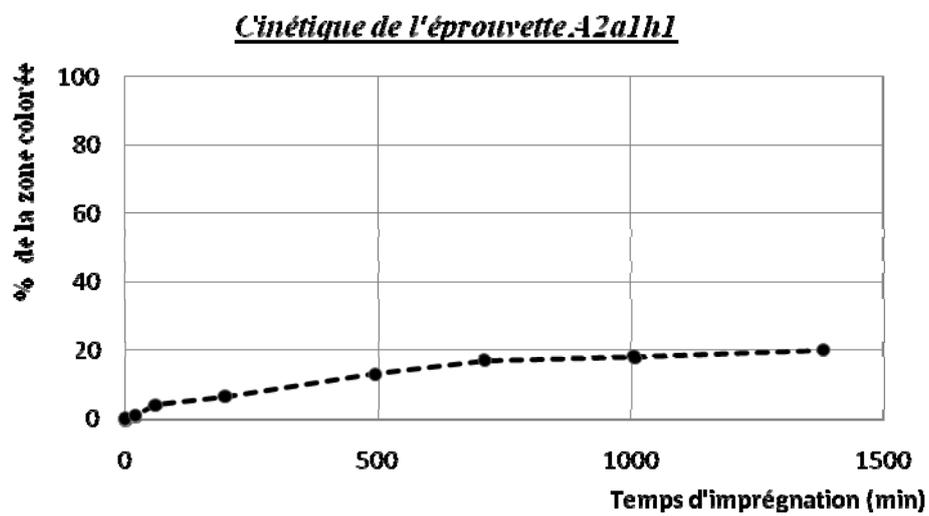


Figure II-18 : % de la zone du bois imprégné en fonction du temps dans l'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche (A2a1h1)

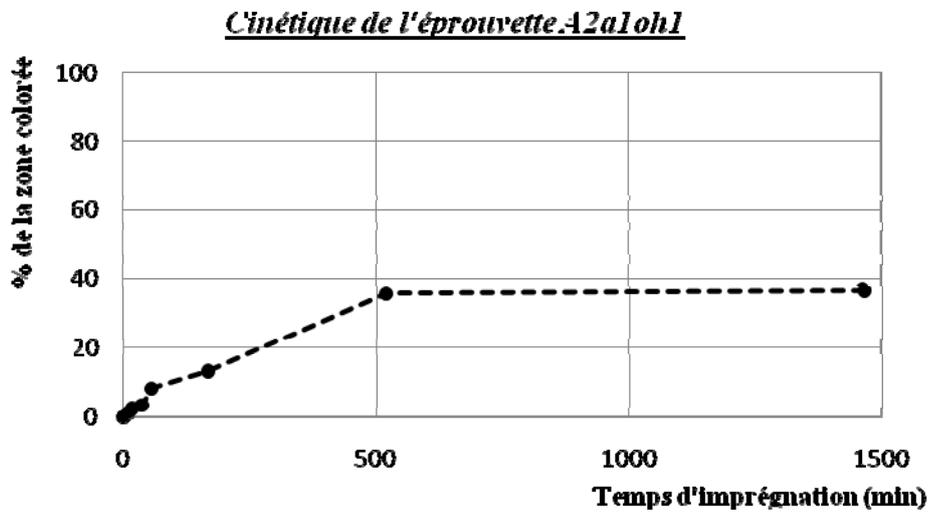


Figure II-19 : % de la zone du bois imprégné en fonction du temps dans l'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche (A2a1oh1)

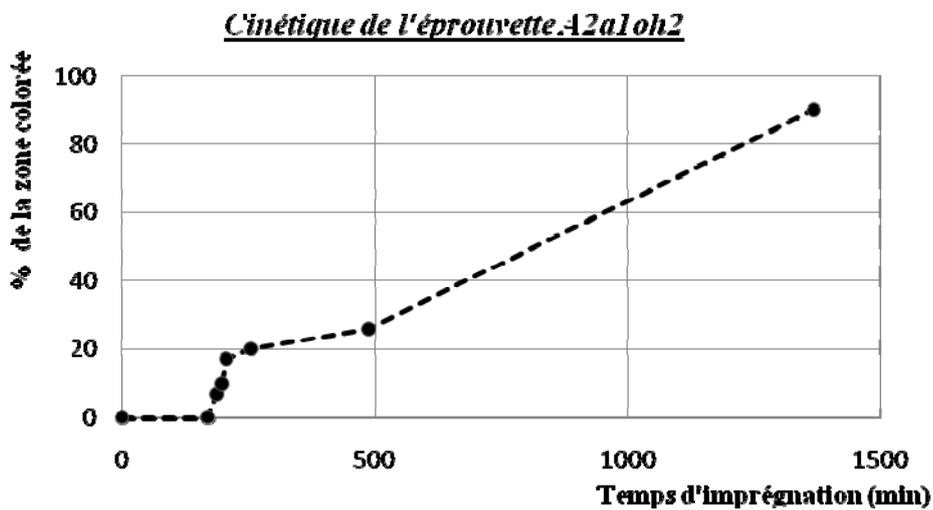


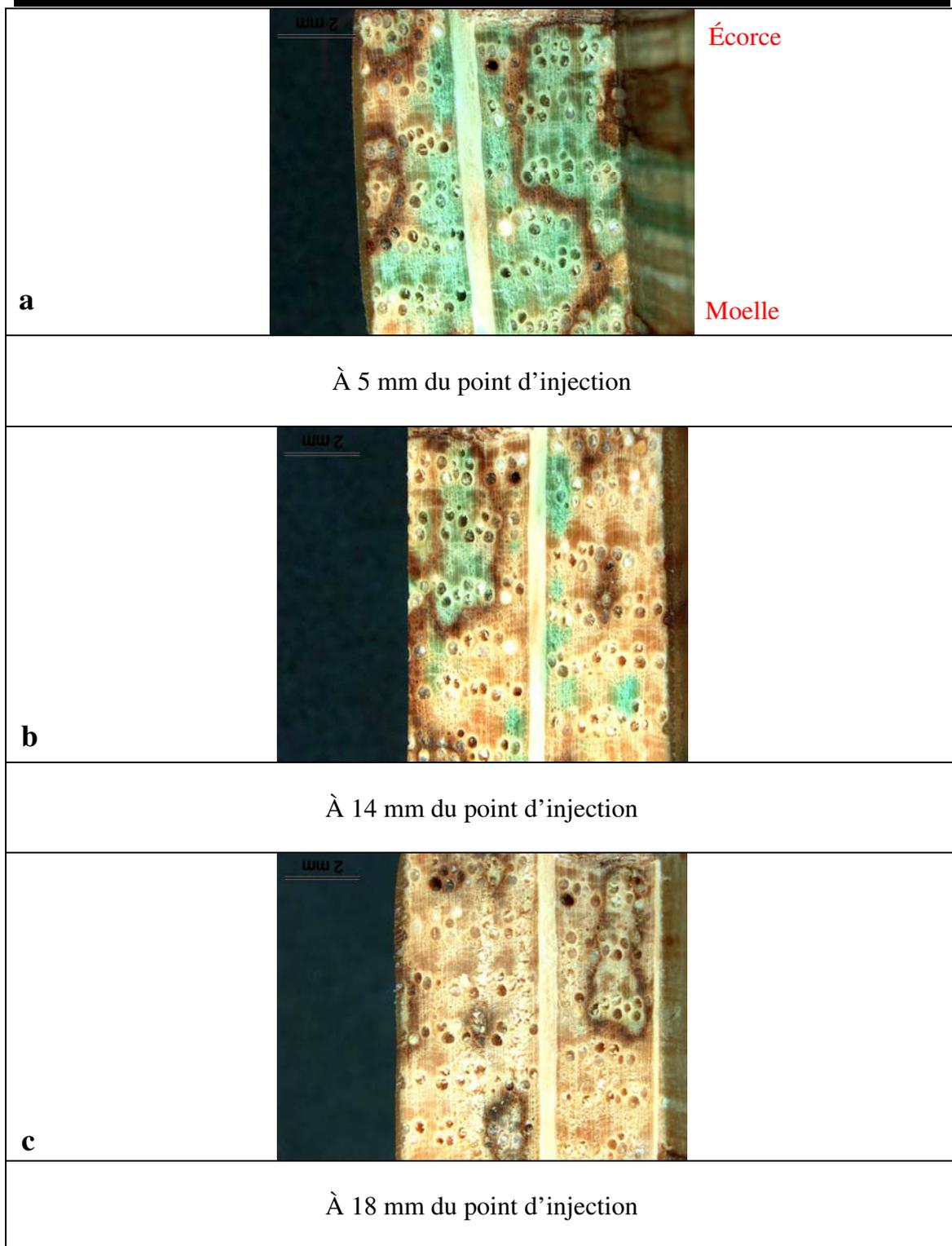
Figure II-20 : % de la zone du bois imprégné en fonction du temps dans l'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche (A2a1oh2)

L'allure des courbes est bien différente de celles obtenues avec l'aubier de chêne sain. L'apparition de liquide à la surface de sortie est immédiate (figure II-18 et figure II-19), pour les deux autres éprouvettes il a fallu deux à trois heures pour voir le liquide apparaître sur la face de sortie (figure II-17 et figure II-20).

La différence d'imprégnabilité des éprouvettes échauffées peut être expliquée par la différence du degré de dégradation de ces mêmes éprouvettes par le champignon (Green & Clausen, 1999).

b) Exploration

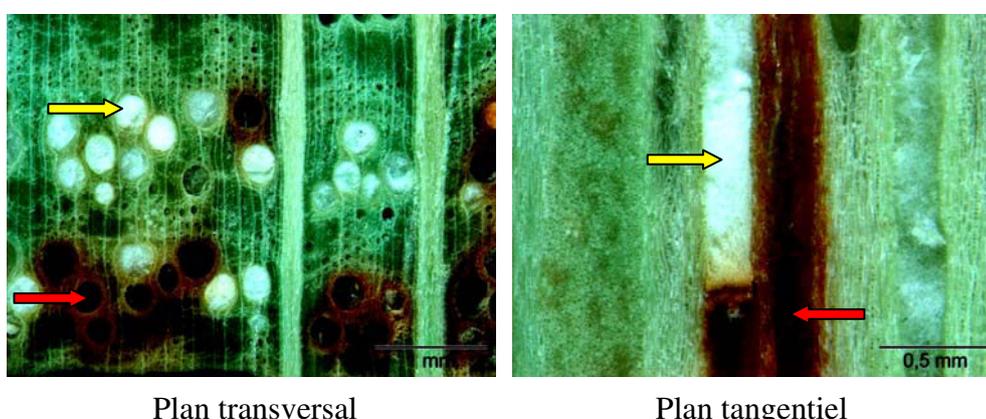
Afin de faciliter la comparaison nous présenterons, comme pour l'aubier du chêne sain, une exploration après imprégnation de 5 minutes (figure II-21).



Figures II-21a à II-21c : Exploration d'une éprouvette d'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche, après 5 min d'imprégnation dans la direction longitudinale, à différentes distances du point d'injection

L'exploration des éprouvettes de l'aubier de chêne échauffé montre que la migration du liquide se fait par zones formant des taches, principalement dans le bois final, et semble être influencée par la présence des liserés bruns foncés produits suite au développement du mycélium de l'agent de pourriture blanche dans le bois.

Dans l'aubier échauffé du chêne, l'écoulement axial des liquides est favorisé au niveau des tissus fibreux et parenchymateux dans lesquels l'hydrolyse enzymatique a augmenté la microporosité. On remarque que les gros vaisseaux encombrés par les filaments mycéliens ne sont plus conducteurs. Les liserés bruns foncés délimitent des zones imprégnées et des zones non imprégnées.



Figures II-22a et b : Aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche (a : plan transversal ; b : plan tangentiel) vue avec loupe binoculaire

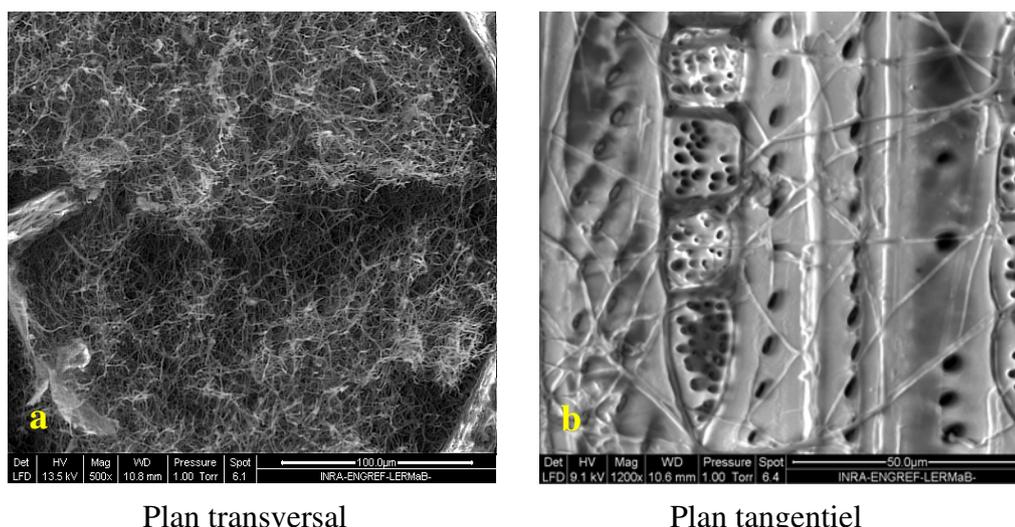
Les images du bois dégradé par un agent de pourriture blanche puis imprégné (figure II-22a et II-22b) montrent une structure, ou organisation cellulaire, du bois de chêne relativement intacte.

Nos résultats confirment les données bibliographiques, selon lesquelles, les agents de pourriture blanche ont une action plus importante sur le parenchyme et les fibres-trachéides associées aux vaisseaux que sur les parois des vaisseaux ou des fibres libriformes. Plusieurs études insistent sur la résistance des parois de vaisseaux à la décomposition par les agents de pourriture blanche, Blanchette et al. (1988a), Levin & Castro (1998) et Schwarze et al (2004) ont observé que les fibres-trachéides associées aux vaisseaux sont préférentiellement dégradées par *Fomes fomentarius*, agent de pourriture blanche. Le parenchyme semble résister à l'action des pourritures brunes

alors qu'il est prioritairement attaqué par les agents de pourriture blanche, en particulier ceux qui procèdent par lignification sélective. La résistance du parenchyme à la pourriture brune serait davantage liée à la morphologie de la paroi cellulaire, qu'à la composition de la lignine. Au contraire, les fibres libriformes qui sont rapidement dégradées par les agents de pourriture brune résistent à la lignification sélective des pourritures blanches, au moins lors des premiers stades de l'attaque (Schwarze 2007).

Les vaisseaux se trouvant dans les zones délimitées par les liserés bruns foncés sont souvent ouverts (flèche rouge sur les figure II-22a et b) alors que d'autres, à proximité de ces liserés, sont remplis d'un feutrage mycélien extrêmement dense (flèche jaune sur les figures II-22a et II-22b). D'après la littérature, ces liserés bruns foncés sont caractéristiques d'une attaque du bois par un agent de pourriture blanche comme *Coriolus versicolor*.

Une étude en microscopie électronique menée sur des éprouvettes d'aubier de chêne dégradé, a confirmé l'abondance des filaments mycéliens dans les vaisseaux ainsi que le passage de ces filaments à travers les ponctuations, grâce auxquelles le mycète colonise le bois (figures II-23a et II-23b)



Figures II-23a et b : Aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche observé en ESEM.

Wilcox (1970) a montré que les changements observés dans le bois attaqué par un agent de pourriture blanche sont dans un premier temps la séparation des cellules, puis l'apparition de fissures et enfin l'élargissement des cavités des ponctuations. On comprend aisément que ces changements de la microstructure et de la macrostructure augmentent l'imprégnabilité du bois.

Liese et Schmid (1966) ont montré que des cavités sont produites dans la couche S2 de la paroi secondaire, souvent lorsqu'aucun mycélium n'est apparent, on peut supposer que des cellulases fongiques ont diffusé à travers la couche S3 pour produire cet effet. L'aptitude des enzymes d'un agent de pourriture blanche à diffuser sur une certaine distance à partir d'un hyphes producteur a également été mentionnée par Cowling (1961), à partir de l'observation d'un amincissement des parois cellulaires qui atteint dans des cellules sans mycélium le même degré que dans les cellules avec mycélium. On peut supposer que l'abondant mycélium présent dans les vaisseaux, s'il entrave l'imprégnation des vaisseaux ainsi bouchés, va produire des enzymes qui vont diffuser dans les tissus voisins (tissus fibreux et parenchymateux), les dégrader et augmenter leur capacité à se laisser pénétrer par le liquide coloré.

II-3-2-1-2-Écoulement radial

a) Cinétique

L'imprégnation, pendant deux jours, dans la direction radiale à pression atmosphérique d'échantillons d'aubier de chêne dégradé n'a pas permis d'observer l'apparition de liquide sur la surface de sortie.

b) Exploration

L'exploration d'une éprouvette d'aubier de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche imprégnée durant 30 minutes² a cependant permis d'observer la coloration du bois au sein de l'éprouvette (figure II-24).

² Temps d'imprégnation fixe, indépendants du temps nécessaire pour obtenir l'écoulement au niveau de la face de sortie.

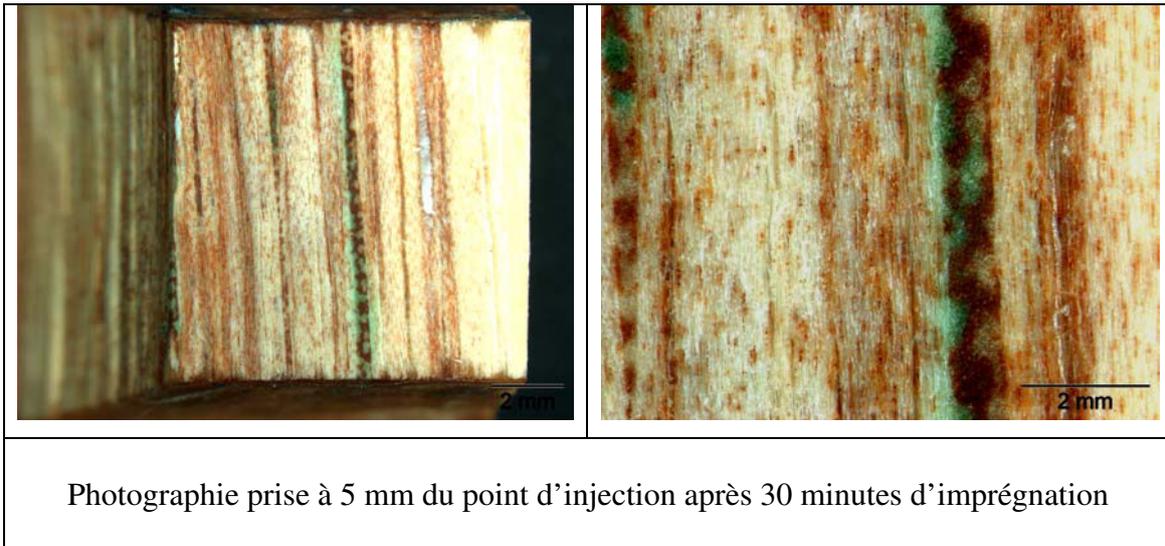
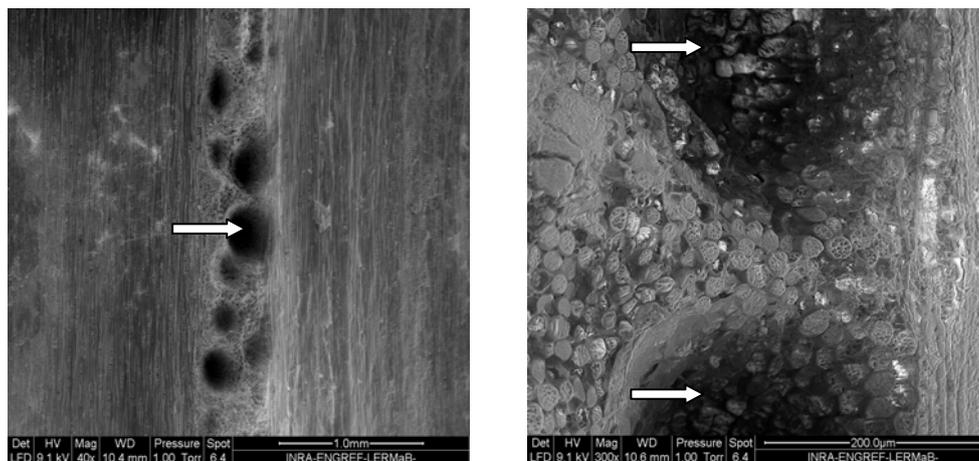


Figure II-24: Éprouvette d'aulé de chêne dégradé après 30 minutes d'imprégnation dans la direction radiale.

Contrairement à l'aulé du chêne sessile sain, nous observons donc un flux dans la direction radiale pour le chêne dégradé. Le liquide a pénétré de manière assez hétérogène sous forme de taches au niveau des rayons ligneux multisériés. L'observation en microscopie électronique montre que les rayons ligneux larges du chêne attaqué par un agent de pourriture blanche sont criblés de cavités (flèches blanches sur la figure II-25a). Une photographie prise à un plus fort grossissement montre la désolidarisation des cellules de parenchyme radial (figure 25b).



Figures II-25a et b : Aulé dégradé de chêne par un agent de pourriture blanche observé sur un plan longitudinal tangentiel (ESEM)

Schwarze et Fink (1998) ont observé que dans le bois de hêtre, la dégradation de la lamelle moyenne riche en pectine par un agent de pourriture blanche commence après la délignification des parois secondaires et aboutit à la formation de cavités dans les rayons ligneux multisériés. C'est bien ce que nous observons ici dans le cas du chêne.

II-3-2-1-3-Écoulement tangentiel

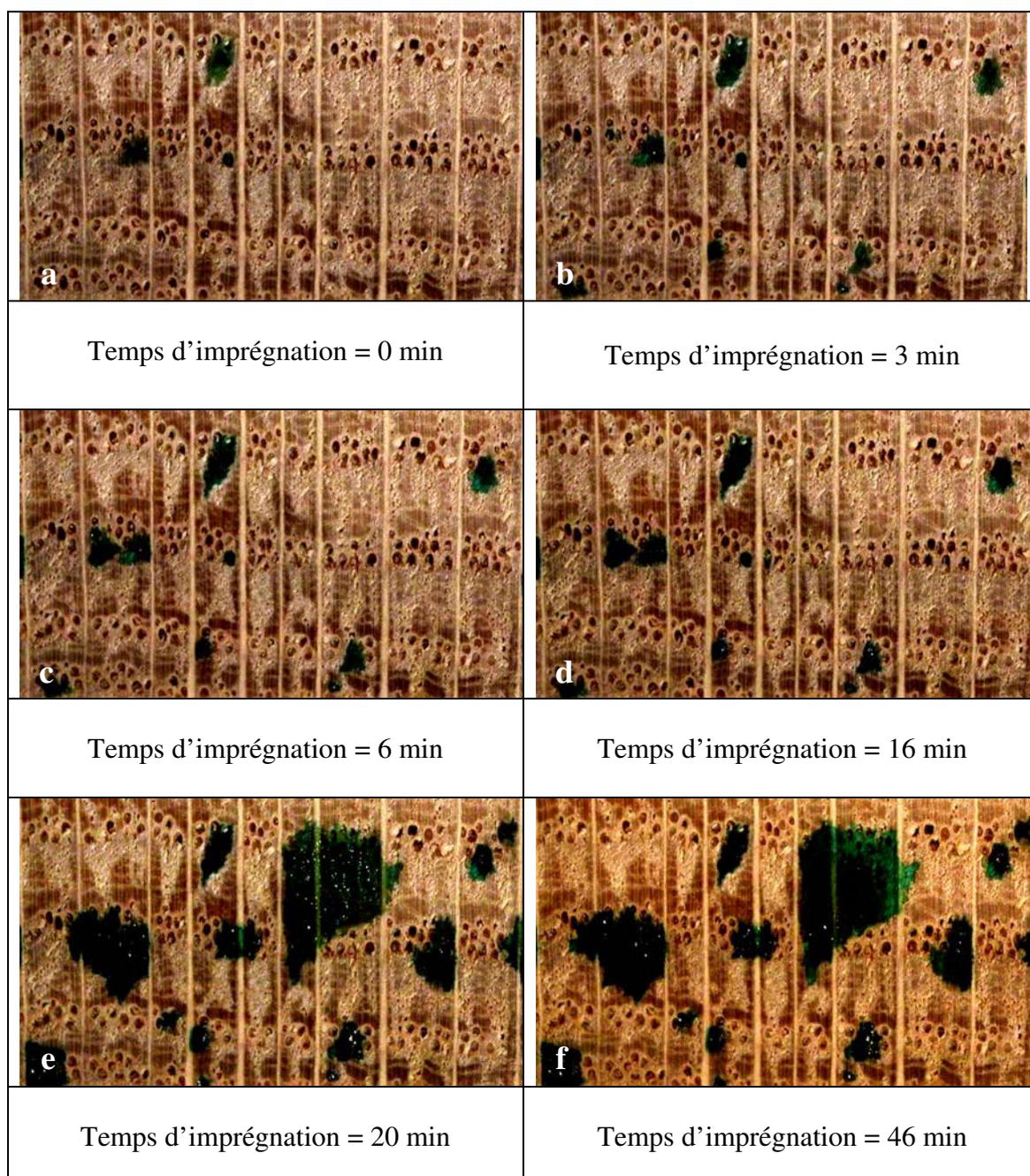
Dans le cas d'un flux dans la direction tangentielle, imprégnation pendant 30 minutes, nous n'avons observé aucune pénétration du liquide dans le bois prélevé dans l'aubier du chêne dégradé par un agent de pourriture blanche.

II-3-2-2-Duramen

II-3-2-2-1-Écoulement longitudinal

a) Cinétique

Alors qu'aucun écoulement n'a été observé dans le duramen du chêne sain après deux mois d'imprégnation, les cinétiques d'écoulement longitudinal réalisées dans le duramen du chêne dégradé, montrent aux premières minutes d'imprégnation un passage qui ne semble pas cantonné aux vaisseaux de la zone initiale poreuse (figure II-26). L'infradensité de cet échantillon est de 425 Kg/m^3 , alors que l'infradensité moyenne des échantillons de duramen sain testés est de 570 Kg/m^3 .

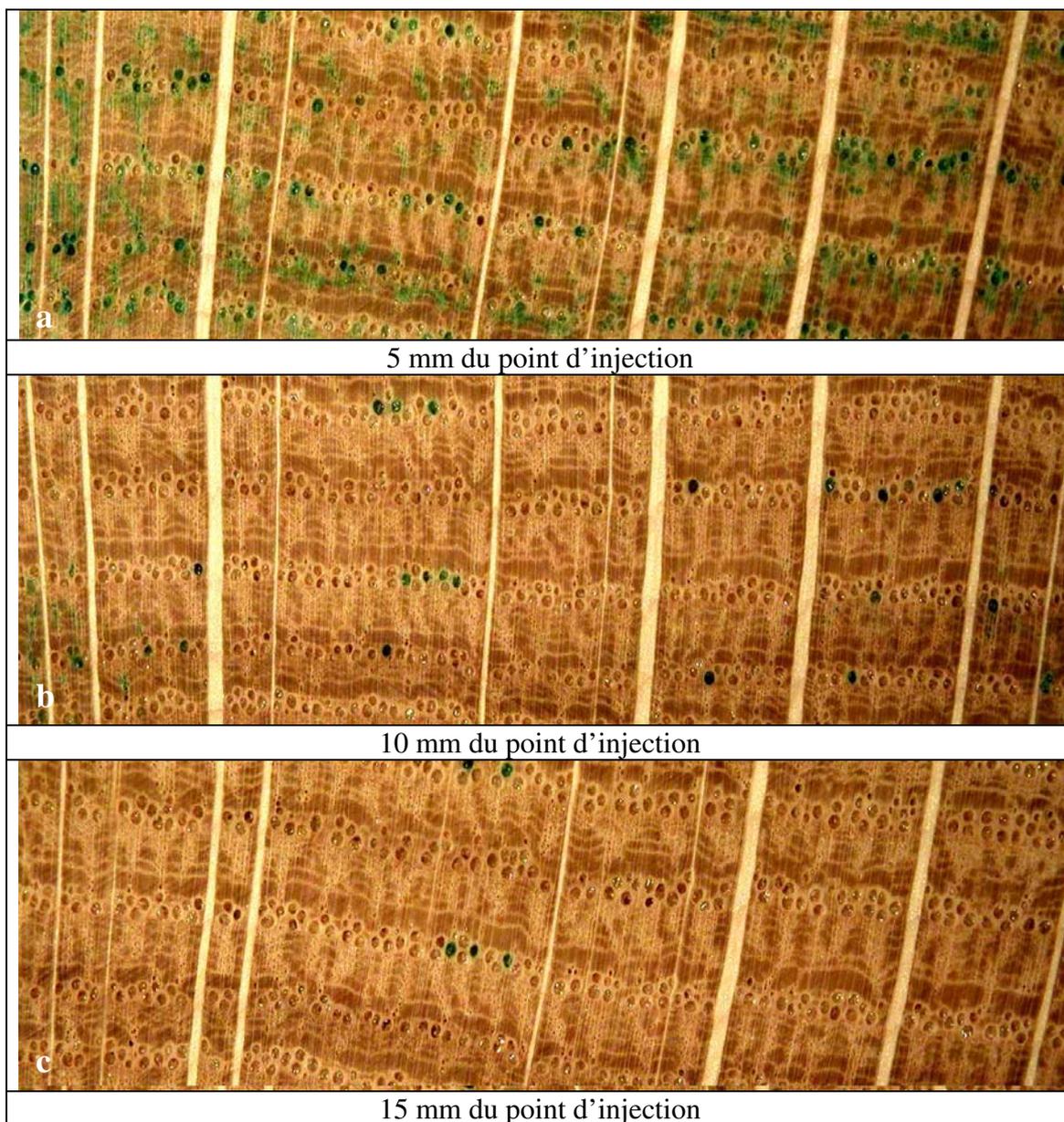


Figures II-26a à II-26f : Images de la surface de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette de duramen de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche

Alors que nous n'observons aucune pénétration dans le cas du duramen sain, le bois de duramen dégradé montre une imprégnation par les gros vaisseaux du bois initial et les plages de petits vaisseaux du bois final.

b) Exploration

Les figures II-27a à II-27c montrent les surfaces d'exploration d'une éprouvette de duramen de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche, après une imprégnation d'une heure.



Figures II-27a à II-27c : Exploration d'une éprouvette de duramen de chêne dégradé par un agent de pourriture blanche, après 30 min d'imprégnation dans la direction longitudinale, à différentes distances du point d'injection

A proximité du point d'injection, on observe à la fois une imprégnation de certains gros vaisseaux et de plages de petits vaisseaux qui ne sont d'ailleurs pas toujours en contact avec les gros vaisseaux imprégnés (figure II-27a). Plus en profondeur, seuls certains gros vaisseaux sont imprégnés (figure II-27c).

On peut en conclure que l'imprégnation des gros vaisseaux et celle des petits vaisseaux semblent indépendantes et que la première est plus rapide que la seconde.

Il est possible que le mycète agisse sur les thylles. En effet, les thylles sont des proliférations, à l'intérieur des vaisseaux, des cellules de parenchyme radial ou longitudinal. Nous avons vu précédemment que le tissu parenchymateux était particulièrement sensible à l'action hydrolytique des enzymes digestives d'un agent de pourriture blanche. Alors que dans le duramen de chêne sain, les gros vaisseaux, obstrués par des thylles, conduisaient le liquide moins loin que les petits vaisseaux, dans le duramen de chêne dégradé, les gros vaisseaux, contenant des thylles sans doute partiellement hydrolysés, conduisent le liquide plus loin que les petits vaisseaux.

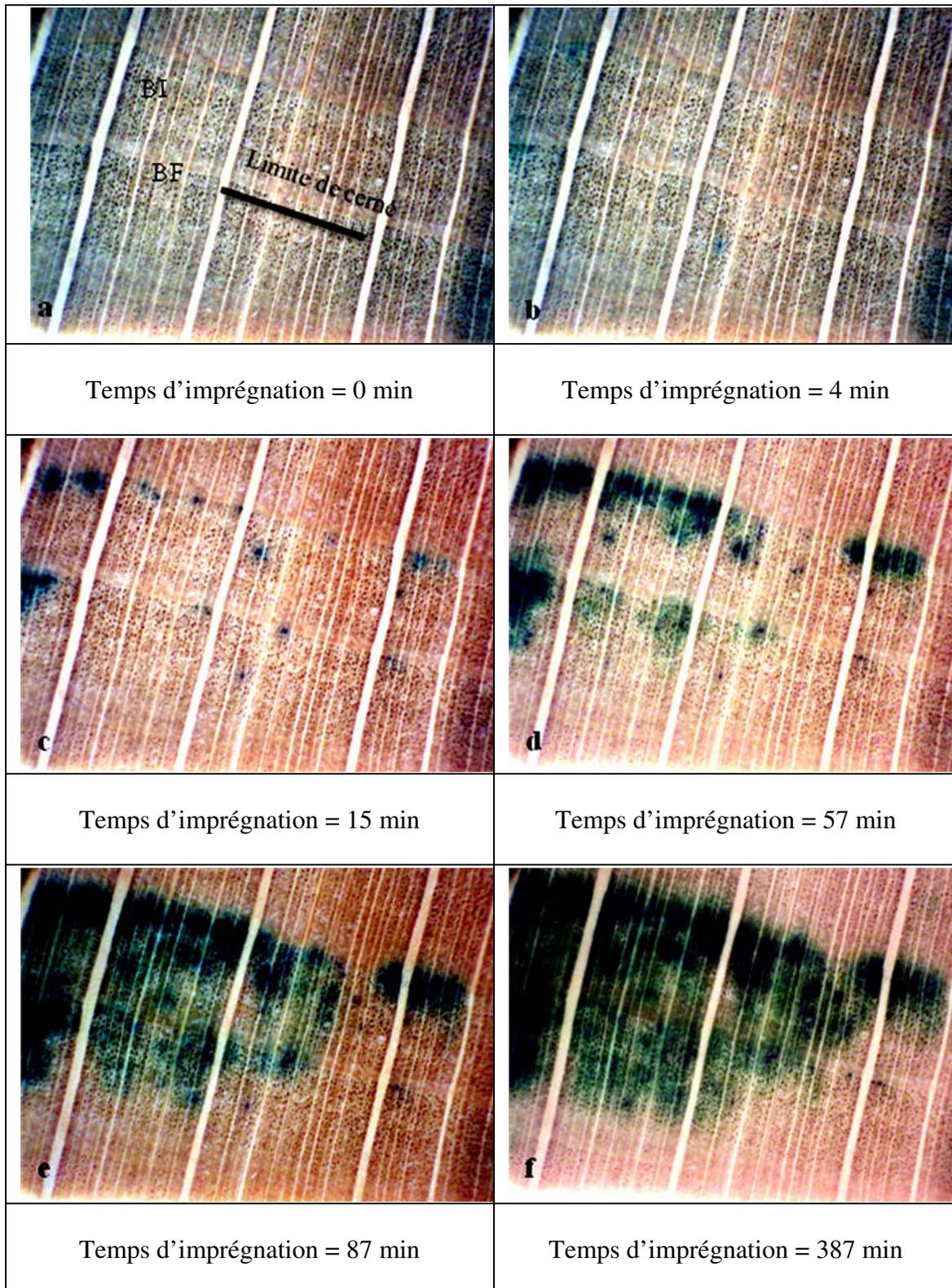
II-3-3- Le hêtre

II-3-3-1- Aubier

II-3-3-1-1-Écoulement longitudinal

a) Cinétique

Les figures II-28a à II-28f montrent l'évolution au cours du temps de la migration de la solution colorée dans l'aubier (sous écorce) du hêtre. L'infradensité moyenne des échantillons d'aubier du hêtre testés est de 560 Kg/m³.



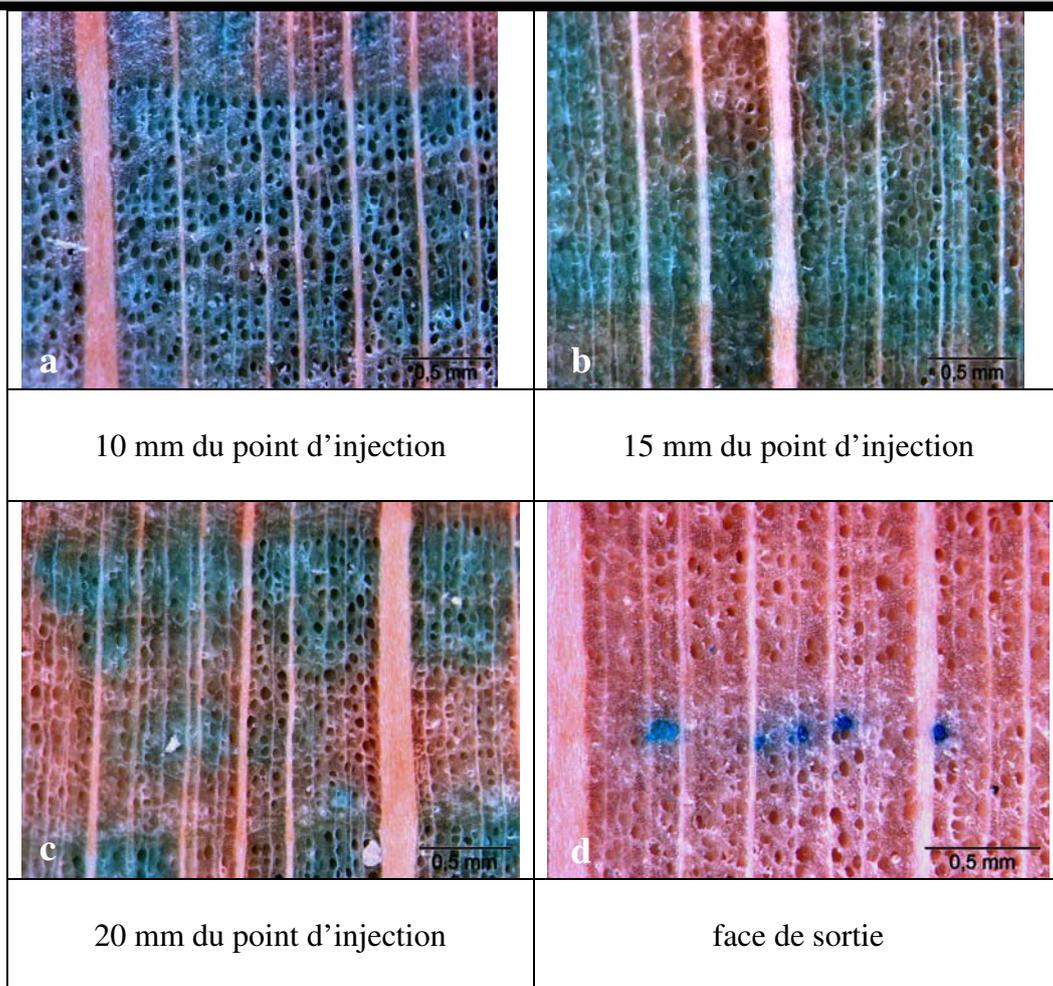
Figures II-28a à II-28f : Images de la face de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de hêtre. (BI : bois initial ; BF : bois final)

L'écoulement, tel qu'il est observé dans la plupart des éprouvettes testées, montre un passage préférentiel par zones dans les vaisseaux du bois initial. Ce résultat a été montré à l'échelle microscopique par Parham et Baird (1974), ces auteurs ont montré que les vaisseaux du hêtre de plus grand diamètre sont plus conducteurs grâce à leurs perforations simples, sans pour autant considérer que les petits vaisseaux par leurs perforations scalariformes sont des éléments qui ne participaient pas à la conduction.

Nous avons remarqué aussi lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale, que le passage par le bois initial se fait sur une bande de vaisseaux le long du rayon, sur presque tout le cerne, y compris tout près de sa limite, ce qui laisse supposer l'existence d'un échange entre les vaisseaux et les rayons ligneux via les ponctuations de champs de croisement. D'après Schulze cité par Efransjah (1988), il existe une corrélation entre le nombre de rayons ligneux et l'imprégnabilité du bois.

b) Exploration

Les figures II-29a à II-29d présentent le passage de la solution colorée dans l'aubier de hêtre imprégné durant 2 minutes. Ce temps a été choisi en raison de la rapidité à laquelle se produit l'écoulement du liquide dans l'aubier de hêtre.



Figures II-29a à II-29d : Exploration d'une éprouvette d'aubier de hêtre, après 2 mn d'imprégnation dans la direction longitudinale, à différentes distances du point d'injection

Les résultats d'exploration en profondeur des éprouvettes d'aubier après une courte durée d'imprégnation confirment ceux obtenus pendant les cinétiques : les premiers éléments conducteurs sont les vaisseaux formés au début de la mise en place du bois initial.

L'observation à l'échelle microscopique nous permet de supposer une participation des fibres au voisinage des vaisseaux conducteurs ainsi qu'une diffusion du colorant dans la zone du bois final. Ces résultats sont conformes aux travaux de Behr et al (1969) cités par Siau (1984). Ces observations indiquent que les vaisseaux ne sont pas les seuls éléments conducteurs, que les fibres participent à l'écoulement du liquide et qu'il y a

vraisemblablement communication entre fibres et vaisseaux au niveau des ponctuations que ce soit dans le bois initial ou le bois final.

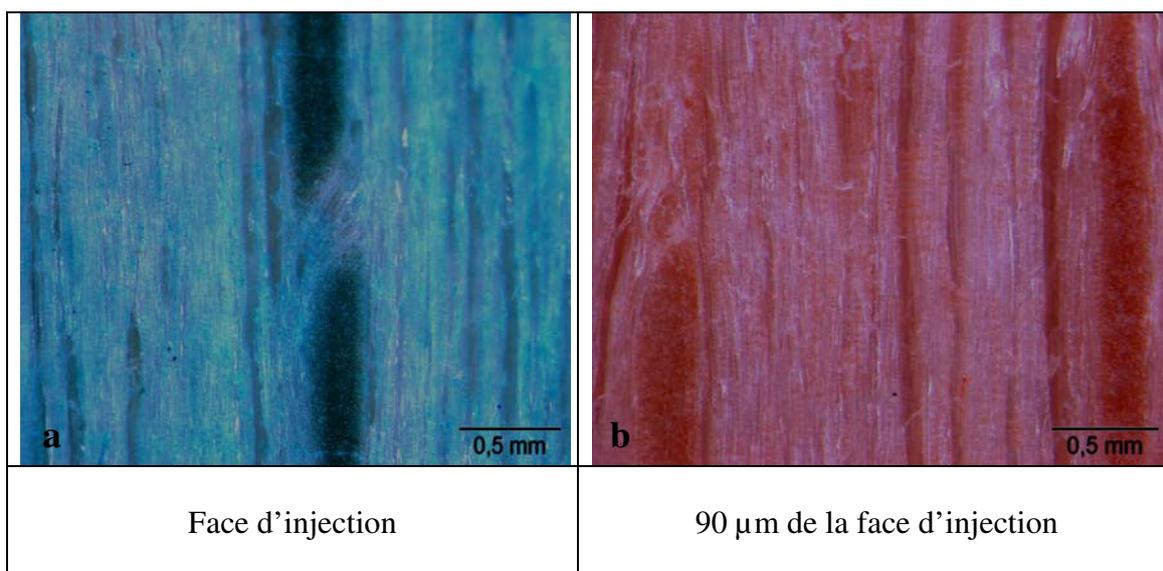
II-3-3-1-2-Écoulement radial

a) Cinétique

Aucune imprégnation au niveau de la face de sortie n'a été observée sur les éprouvettes le long des rayons ligneux après un mois d'imprégnation.

b) Exploration

Les figures suivantes nous montrent que la pénétration du liquide coloré s'arrête à 90 μm .



Figures II-30a et b : Exploration d'une éprouvette d'aulx de hêtre, après 30 mn d'imprégnation dans la direction radiale

Après 30 minutes d'imprégnation, nous n'avons observé aucun passage du colorant ni à la face de sortie de l'éprouvette ni aux quatre points d'explorations (25, 20, 15 et 5 mm), c'est pour cette raison que nous avons exploré à l'échelle micrométrique notre éprouvette en partant de la face d'injection.

Les résultats obtenus indiquent que les rayons ligneux ne contribuent pas à l'imprégnation du hêtre dans la direction radiale.

II-3-3-1-3-Écoulement tangentiel

a) Cinétique

Comme pour l'imprégnation radiale, aucun passage n'a été observé sur la surface de sortie des éprouvettes d'aubier de hêtre imprégnées pendant un mois dans la direction tangentielle.

b) Exploration

Comme pour l'étude d'exploration des éprouvettes dans la direction radiale, nous avons dû approfondir notre exploration dans la direction tangentielle, à l'échelle micrométrique.

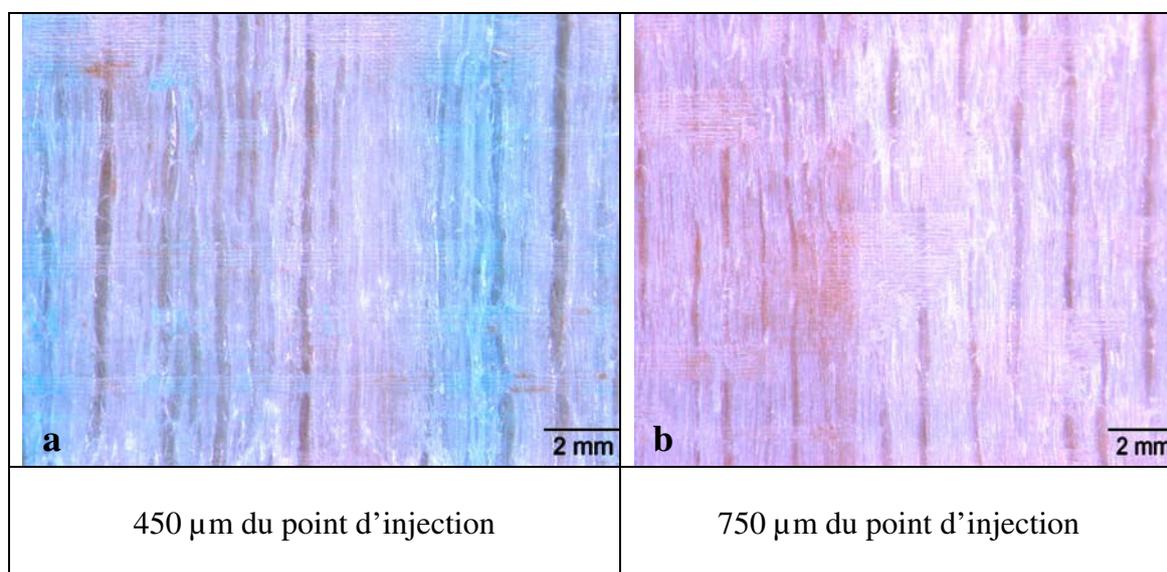


Figure II-31a et b : Exploration d'une éprouvette d'aubier de hêtre, après 30 mn d'imprégnation dans la direction tangentielle

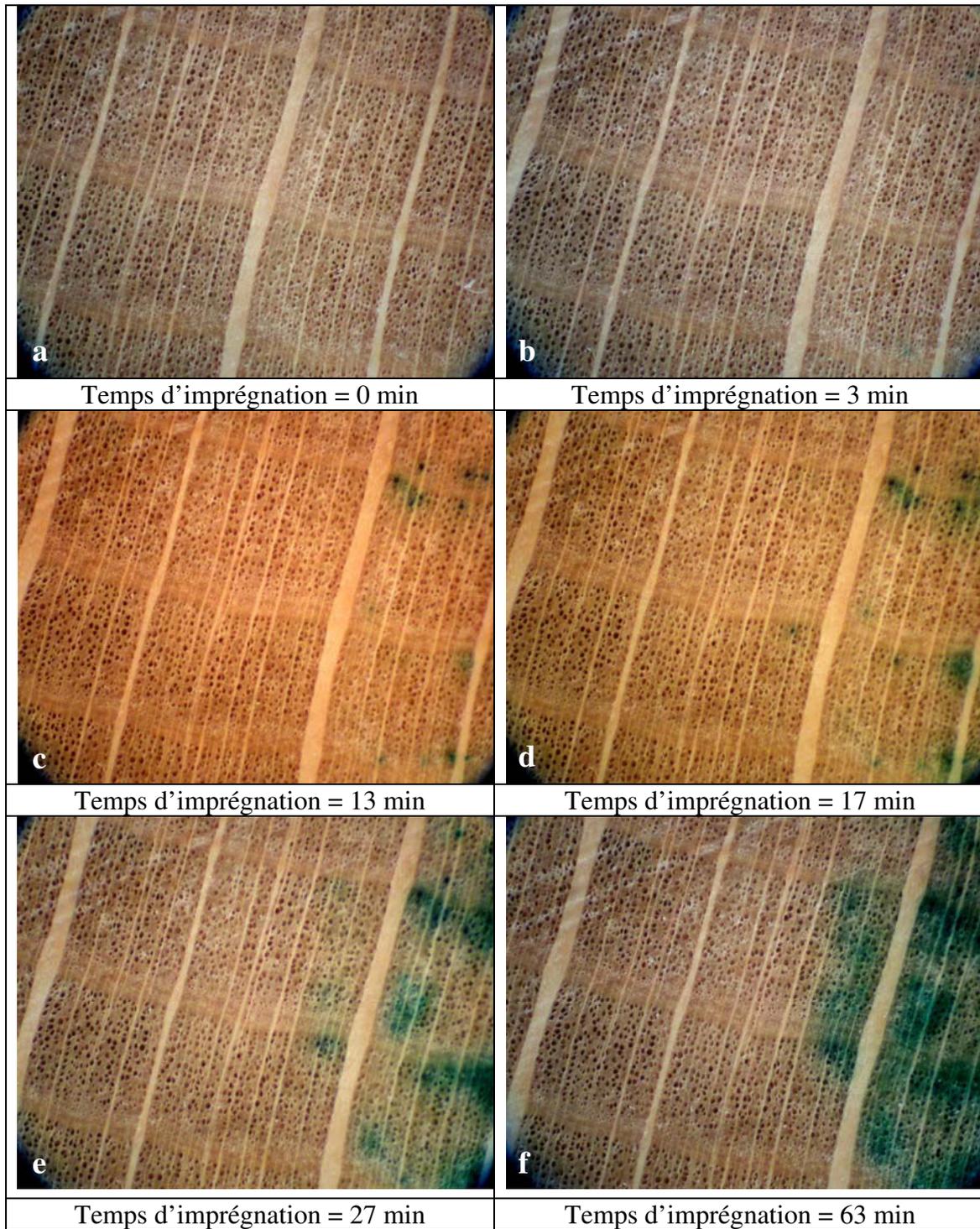
Les figures II-31a et II-31b montrent qu'à 450 μm le produit coloré pénètre dans la direction tangentielle, cette pénétration faiblit nettement à 750 μm . Les résultats obtenus nous permettent de dire que le bois de hêtre est plus imprégnable dans la direction tangentielle que dans la direction radiale (90 μm). Le liquide a, vraisemblablement, emprunté à la fois le système de ponctuations et le système capillaire des parois cellulaires dans la direction tangentielle.

II-3-3-2-Duramen

II-3-3-2-1-Écoulement longitudinal

a) Cinétique

Sur les figures II-32a à II-32f, nous observons l'évolution du passage de la solution colorée, en fonction du temps, au sein d'une éprouvette de duramen de hêtre.

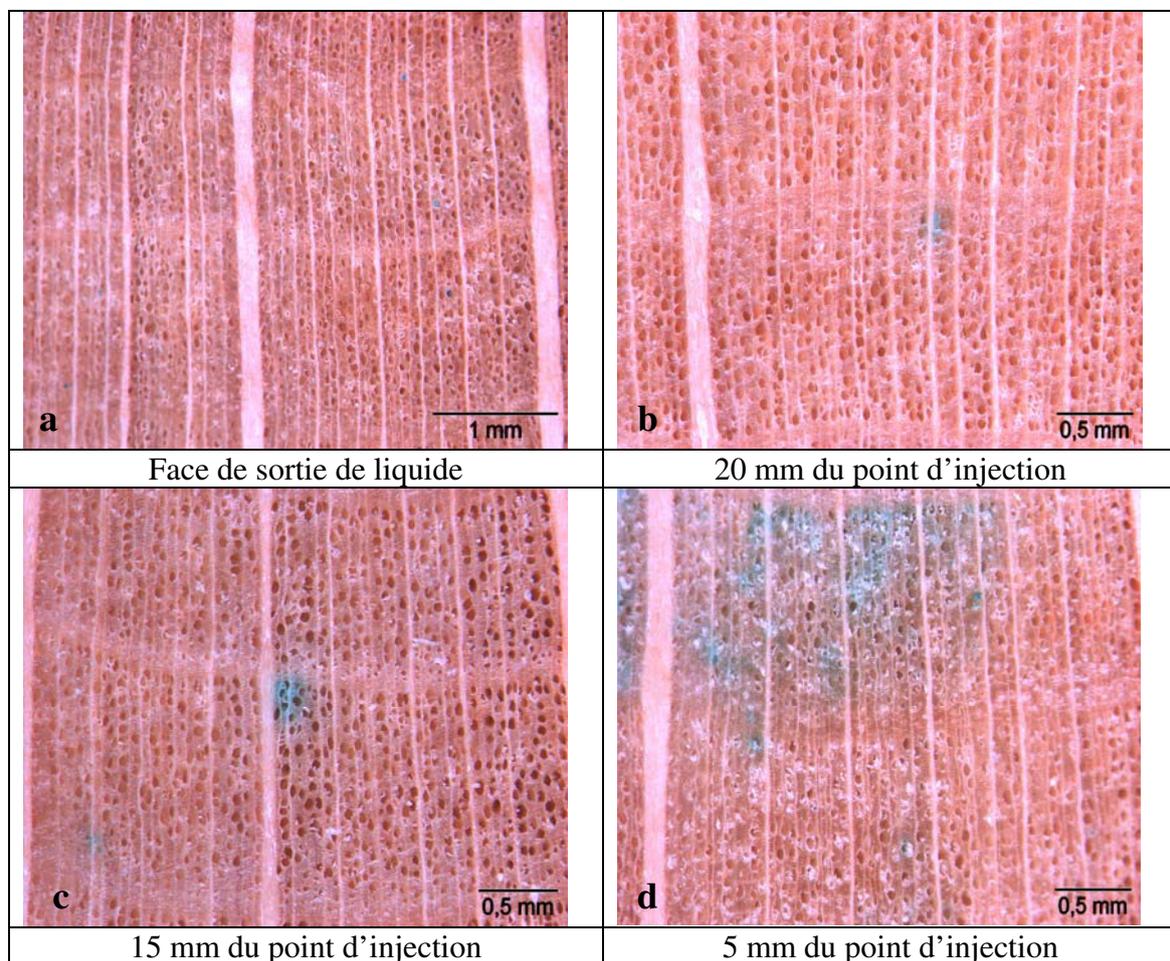


Figures II-32a à II-32f : Images de la face de sortie à différents temps lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette de duramen de hêtre

Au niveau des éléments conducteurs dans la direction longitudinale, le duramen du hêtre semble s'imprégner en utilisant les mêmes voies anatomiques que celles de l'aubier. Toutefois la vitesse d'imprégnation est moins rapide que dans l'aubier, bien que le hêtre soit un bois à aubier non différencié et que le duramen ne subisse pas de duraminisation marquée.

b) Exploration

Les figures II-33a à II-33d présentent le passage de la solution colorée dans le duramen de hêtre imprégné durant 5 minutes.



Figures II-33a à II-33d : Exploration d'une éprouvette de duramen de hêtre, après 5 mn d'imprégnation dans la direction longitudinale, à différentes distances du point d'injection

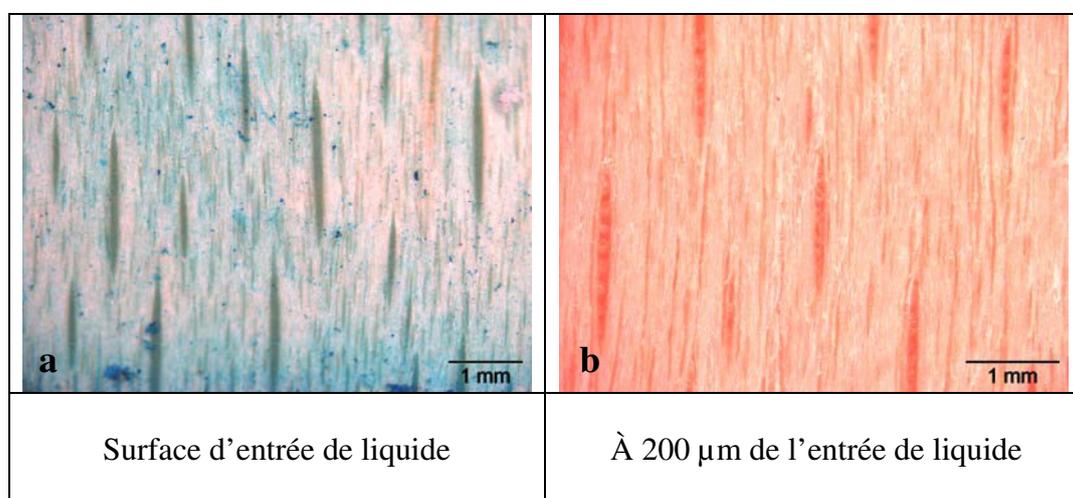
Après exploration de l'éprouvette, le résultat montre que le liquide emprunte en profondeur un chemin similaire à celui observé sur la face de sortie pendant la cinétique.

En effet l'écoulement commence dans la zone initiale, pour se propager ensuite radialement vers le bois final. Les premiers vaisseaux imprégnés sont à proximité des rayons ligneux. On note également une diminution de la surface de la zone colorée, en fonction de la distance au point d'injection de l'échantillon, ainsi que la contribution des fibres et parenchymes du hêtre à l'imprégnation sur les 15 premiers millimètres à partir du point d'injection.

II-3-3-2-2-Écoulement radial

- *Exploration*

Les figures II-34a et II-34b montrent l'exploration d'une éprouvette du duramen de hêtre après une imprégnation de 30 minutes.



Figures II-34a et b : Exploration d'une éprouvette de duramen de hêtre, après 30 mn d'imprégnation dans la direction radiale

Les deux images ci-dessus montrent qu'aucune imprégnation radiale du duramen du hêtre n'a été observée au delà de 180 µm, ceci est probablement due à une contribution plus au moins faible des rayons ligneux.

Une comparaison de l'imprégnabilité radiale entre les deux zones du bois, aubier et duramen du hêtre, montre que ce dernier s'imprègne deux fois plus que l'aubier. Ce résultat inattendu peut être expliqué par une disparition du contenu cellulaire des cellules de rayons ligneux dans le duramen.

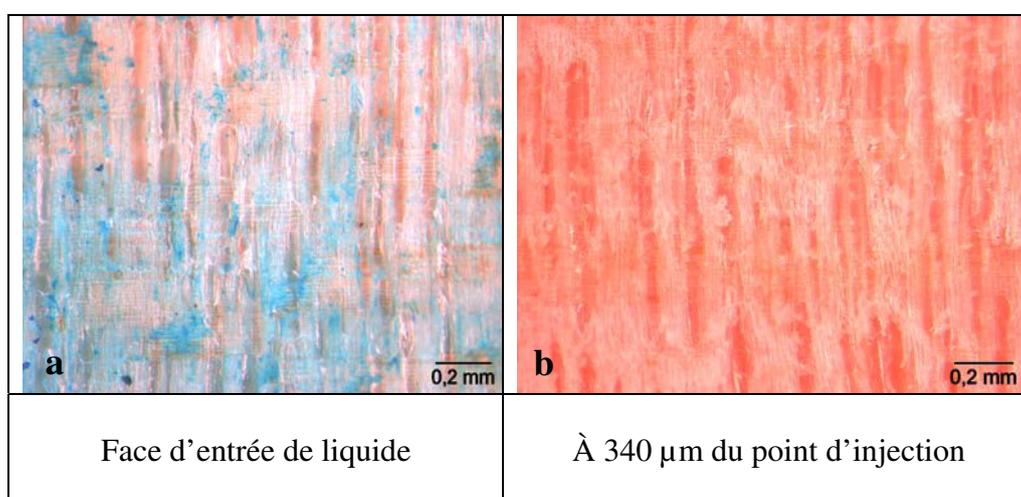
II-3-3-2-3-Écoulement tangentiel

a) Cinétique

Après un mois d'imprégnation du duramen de hêtre dans la direction tangentielle, aucun écoulement n'a été observé.

b) Exploration

Les figures II-35a et II-35b montrent l'exploration d'une éprouvette de duramen de hêtre, après une imprégnation de 30 minutes dans la direction tangentielle.



Figures II-35a et b : Exploration d'une éprouvette de duramen de hêtre, après 30 minutes d'imprégnation dans la direction tangentielle

Les images ci-dessus présentent la profondeur de l'écoulement tangentiel dans le duramen de hêtre après 30 minutes d'imprégnation. Aucune imprégnation n'a été observée au delà de la surface d'injection. Sur la figure II-35a, on observe une simple diffusion par zone, et non pas une imprégnation.

Ceci a été vérifié par une série de découpes de 20 μm (jusqu'à 340 μm de profondeur, figure II-35b), afin de mettre en évidence une éventuelle migration du liquide coloré, entre les rayons ligneux et les éléments longitudinaux, via les punctuations de champs de croisement.

L'exploration indique que l'écoulement s'effectue plus dans la direction radiale que dans la direction tangentielle, ceci est en accord avec la littérature. En effet sur 22 essences de feuillus étudiées par Choong et al. (1974), la différence entre la perméabilité radiale et la perméabilité tangentielle était significative, le rapport moyen était de l'ordre de 2,3 sur 1.

II-3-4- Le sapin

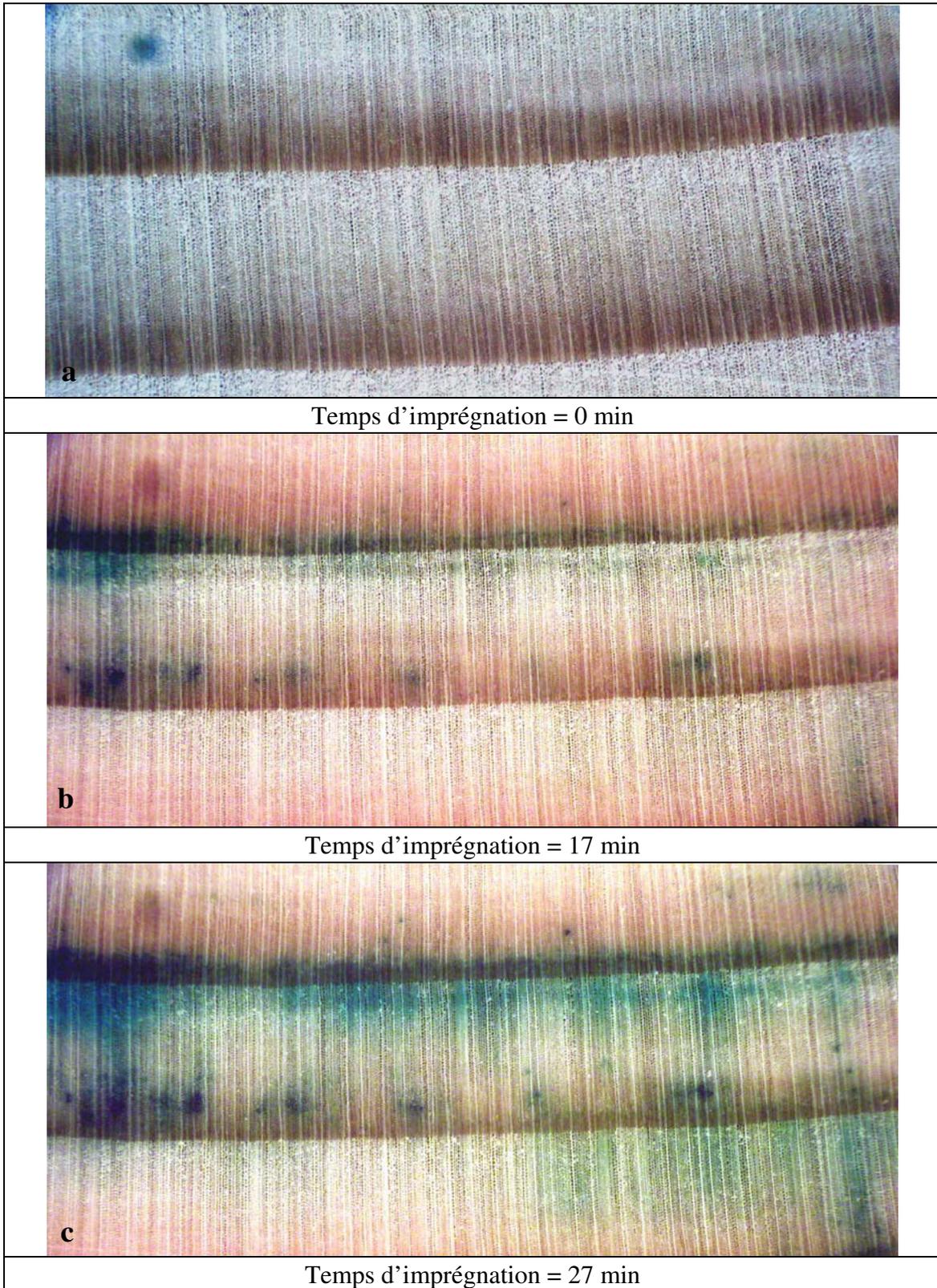
II-3-4-1- Aubier

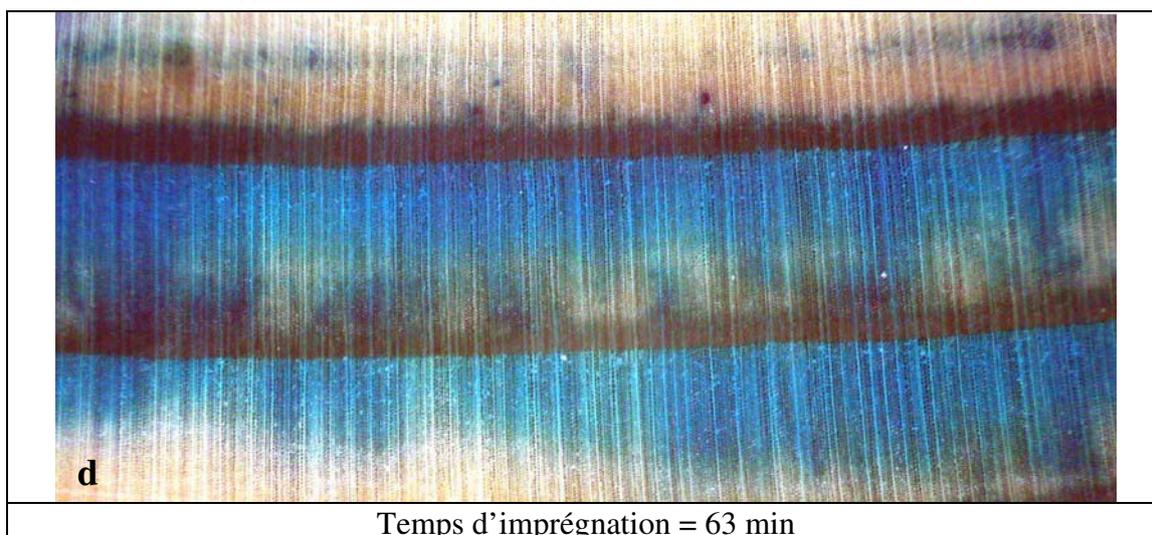
II-3-4-1-1-Écoulement longitudinal

a) Cinétique

Des éprouvettes d'aubier ont été prélevées selon le protocole d'échantillonnage précédemment décrit. Ces éprouvettes mesurent 25 mm dans la direction d'écoulement. L'infradensité moyenne des échantillons d'aubier de sapin testés est de 236 Kg/m^3 .

Les figures II-36a à II-36d, représentent l'évolution de passage de la solution colorée, dans la direction longitudinale en fonction du temps, au sein d'un échantillon d'aubier de sapin.





Figures II-36a à II-36d : Images de la surface de sortie lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette d'aubier de sapin

Nos résultats d'imprégnation longitudinale de l'aubier du sapin montrent un passage préférentiel par le bois final (les premiers clusters apparaissent dans la limite du cerne), puis une migration dans la direction radiale. Cette migration continue lentement vers le bois initial. Contrairement au passage longitudinal du liquide chez les deux feuillus précédemment étudiés, via les vaisseaux du bois initial, les trachéides du bois initial chez le sapin sont moins actives que celles du bois final. Ceci s'explique par leur grande susceptibilité au phénomène d'aspiration des ponctuations aréolées (Siau 1984, Perré 1987, Almeida et al. 2007).

b) Exploration

Les figures II-37a à II-37d correspondent à l'exploration des éprouvettes d'aubier de sapin après une imprégnation longitudinale de 5 minutes.

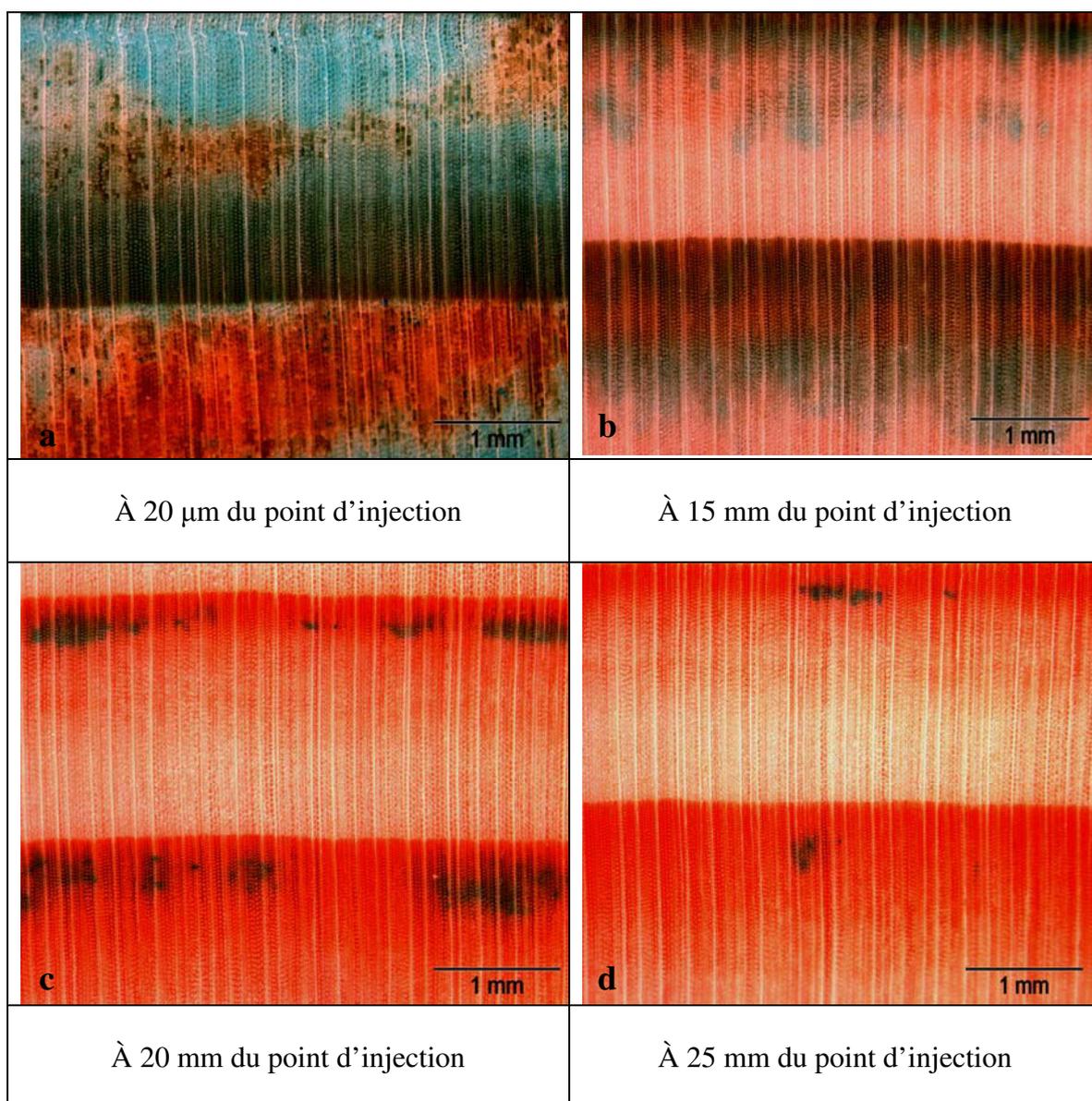


Figure II-37a à II-37d : Exploration d'une éprouvette d'ubier de sapin, après 5 minutes d'imprégnation dans la direction longitudinale

L'exploration après imprégnation pendant 5 minutes confirme les observations obtenues lors de la cinétique : le liquide coloré apparaît au niveau des trachéides du bois final.

Les figures II-38a à II-38d correspondent à l'exploration des éprouvettes d'ubier de sapin, après une imprégnation longitudinale de 15 minutes.

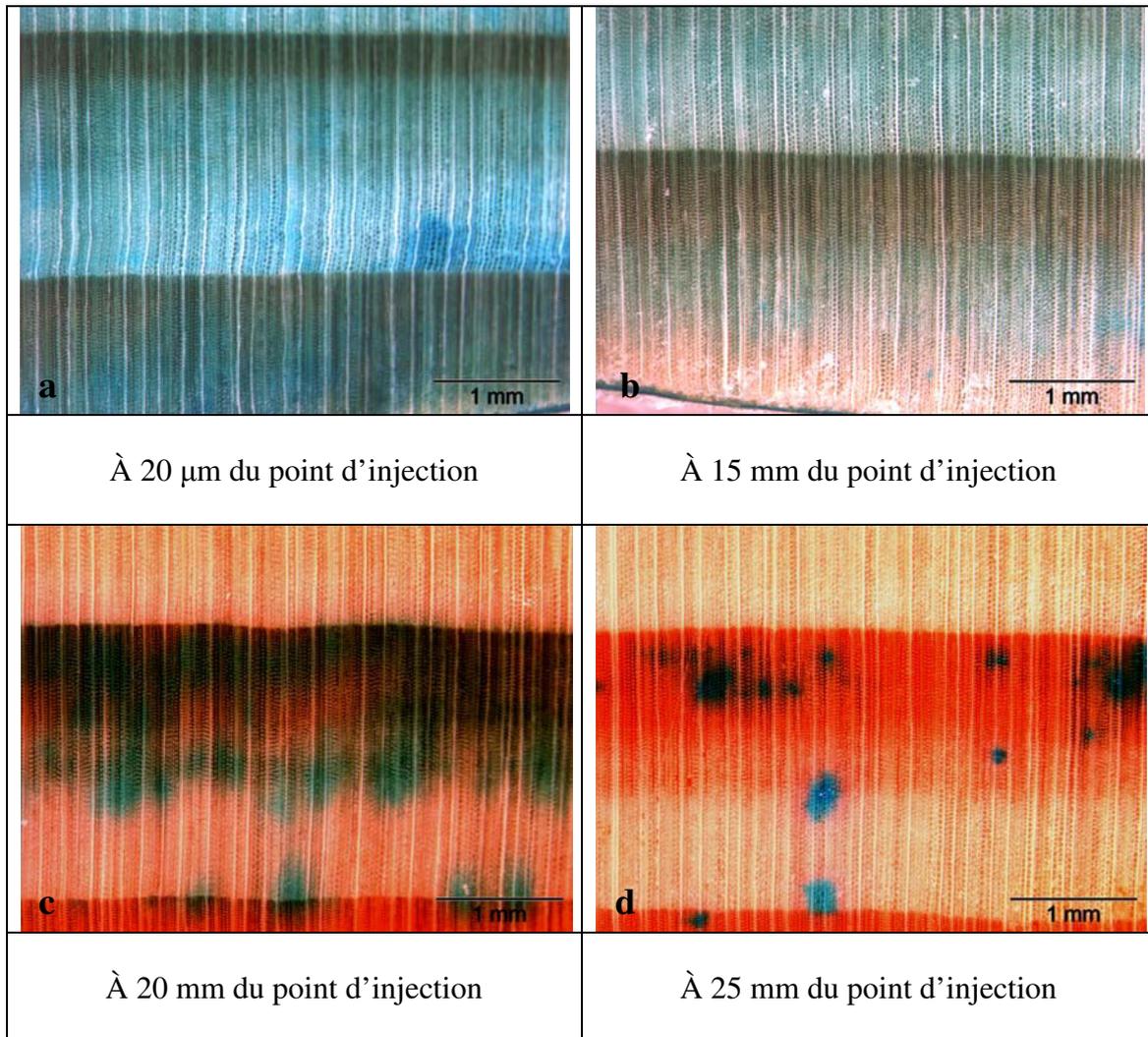


Figure II-38a à II-38d : Exploration d'une éprouvette d'aubier de sapin, après 15 minutes d'imprégnation dans la direction longitudinale

La figure II-38 montre une imprégnation plus importante. Le facteur temps d'imprégnation est déterminant. Le liquide emprunte dans un premier temps les trachéides du bois final, ensuite un passage apparaît dans les trachéides de la zone intermédiaire bois initial-bois final.

II-3-4-1-2-Écoulement radial

a) Exploration

Les figures II-39a à II-39c montrent l'exploration d'une éprouvette d'aubier de sapin après une imprégnation pendant 30 minutes dans la direction radiale.

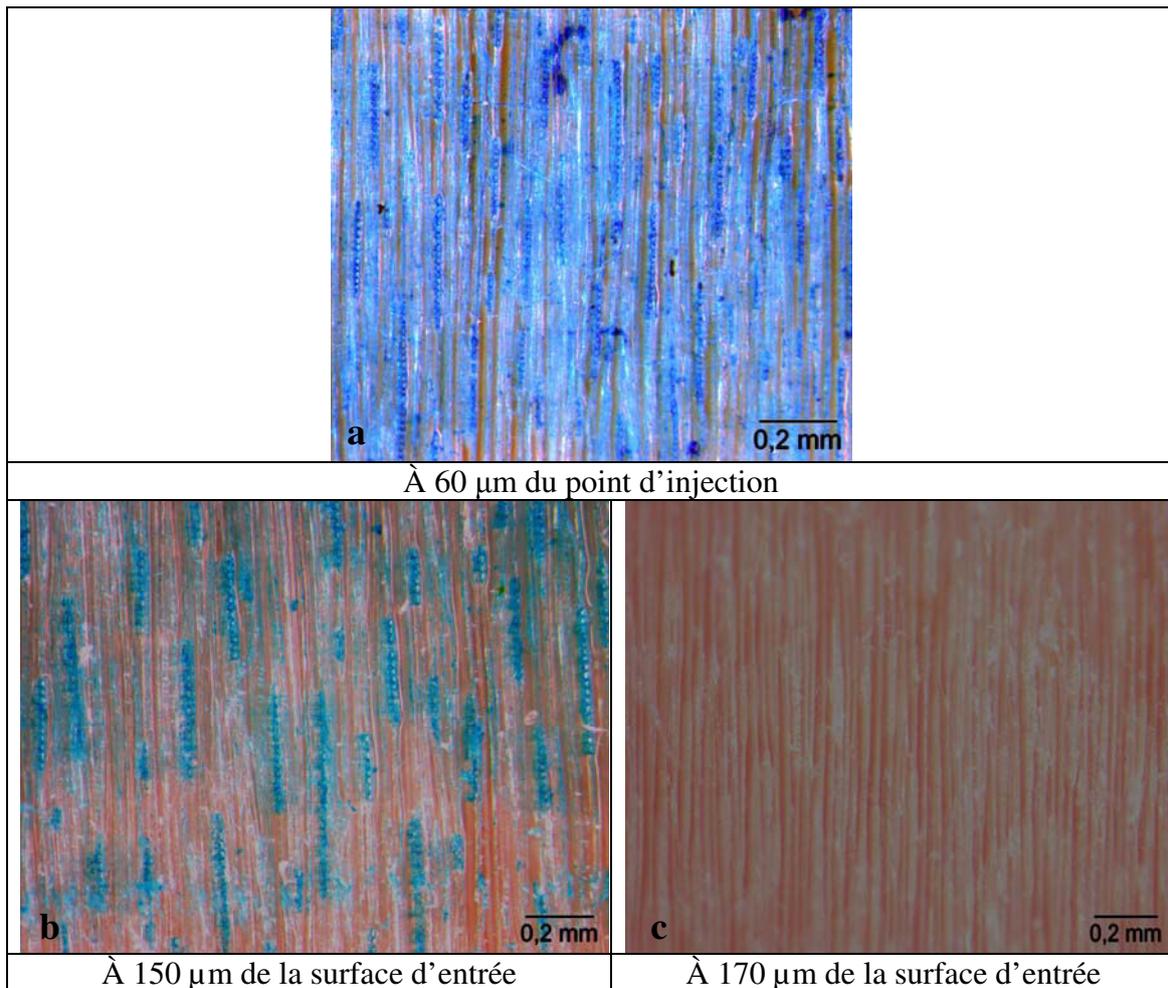


Figure II-39a à II-39c : Exploration d'une éprouvette d'aubier de sapin, après 30 mn d'imprégnation dans la direction radiale

Après 30 minutes d'imprégnation dans la direction radiale de l'aubier du sapin, on observe qu'à 60 μm du point d'injection tous les éléments du plan ligneux sont conducteurs, alors qu'à partir de 150 μm il n'y a que les rayons ligneux qui le sont et à 170 μm aucun élément n'est plus conducteur.

II-3-4-1-3-Écoulement tangentiel

a) Cinétique

Comme pour les autres essences, aucun écoulement n'a été observé dans la direction tangentielle après un temps d'imprégnation égal à un mois.

b) Exploration

Les figures II-40a à II-40c montrent l'exploration d'une éprouvette d'aubier de sapin après imprégnation pendant 30 minutes dans la direction tangentielle.

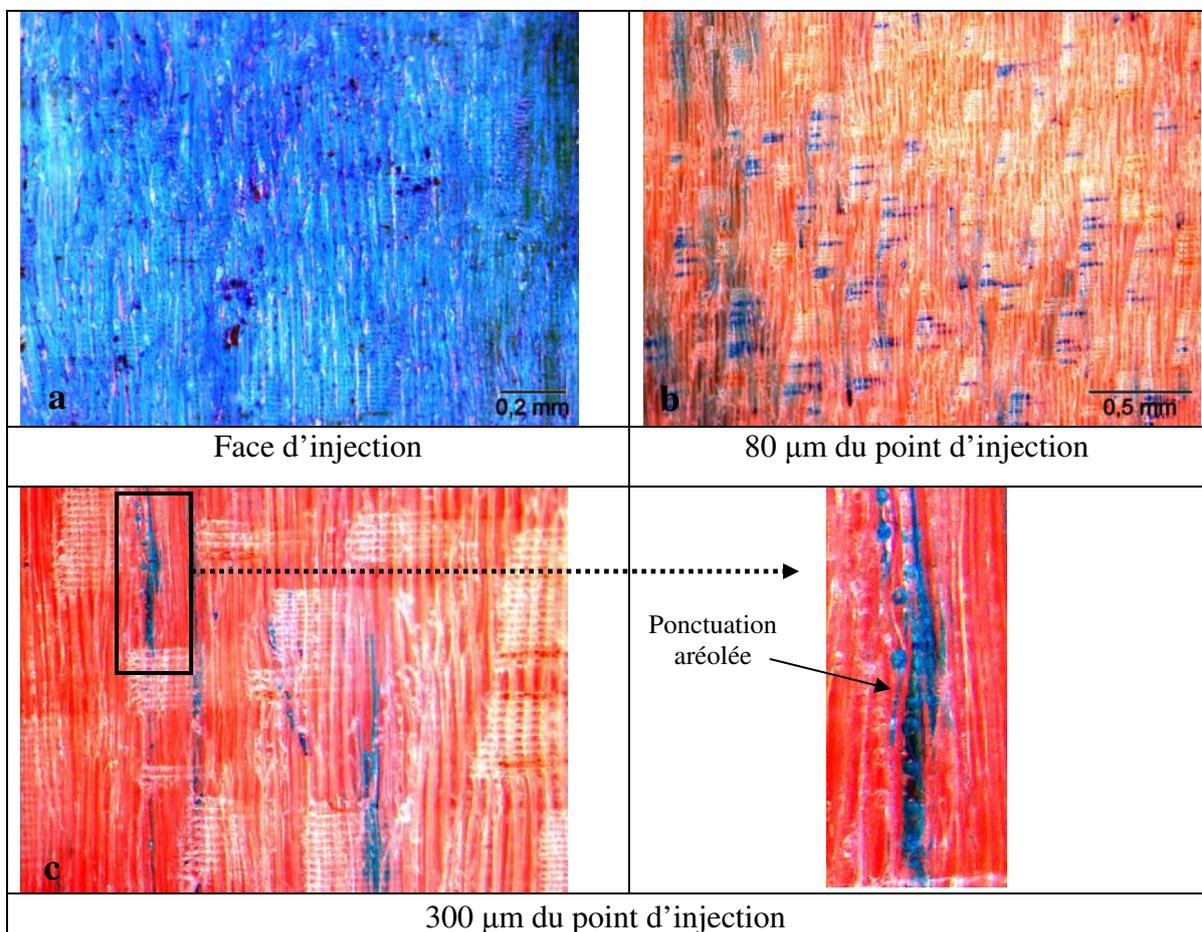


Figure II-40a à II-40c : Résultats d'exploration d'une éprouvette d'aubier de sapin après 30 mn d'imprégnation dans la direction tangentielle

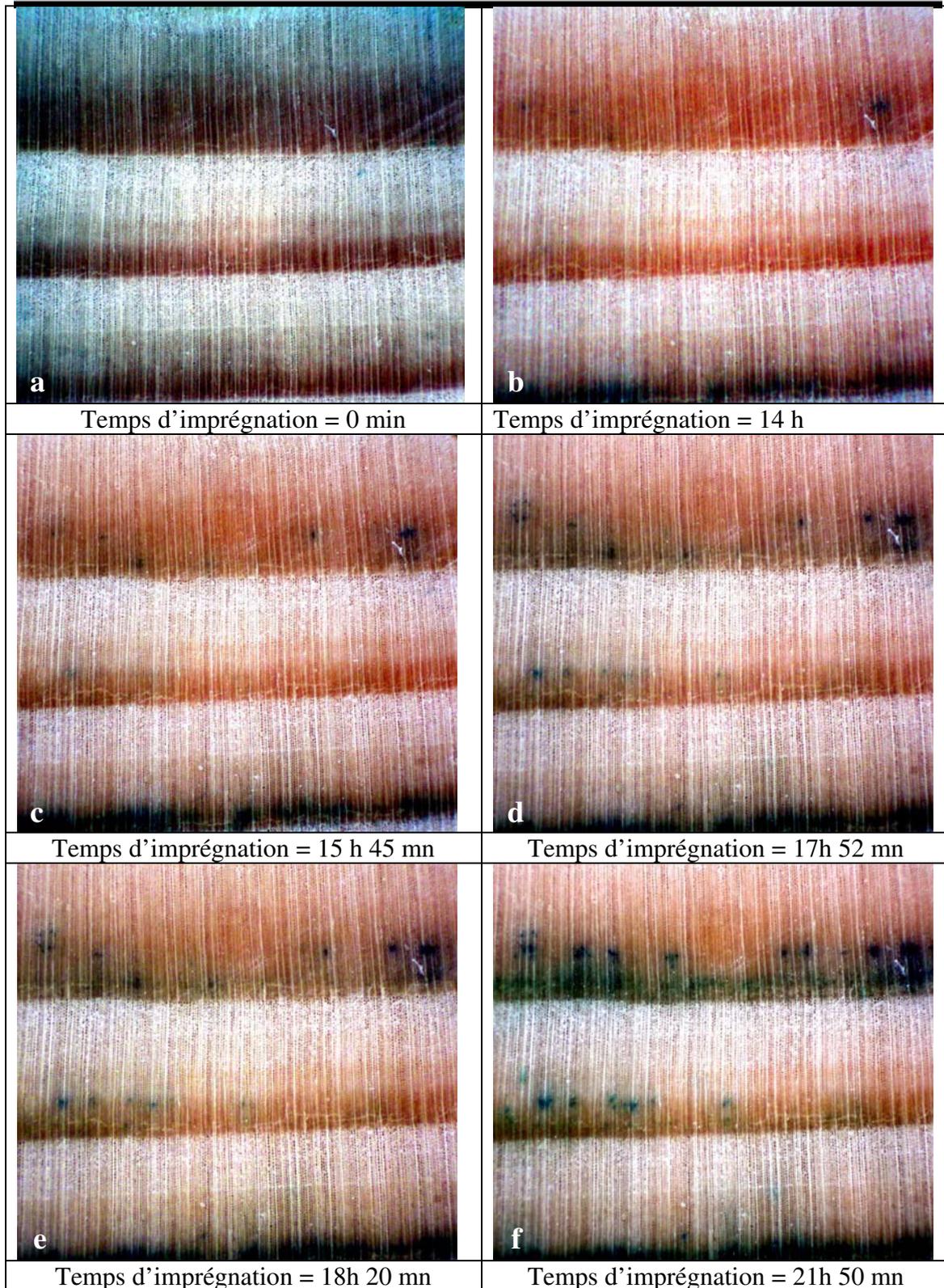
Après 30 minutes d'imprégnation dans la direction tangentielle de l'aubier du sapin, on observe à 80 μm du point d'injection, que les rayons ligneux et les trachéides sont toujours conducteurs, alors qu'à 300 μm seules les trachéides le sont encore. Ceci indique que l'imprégnation tangentielle du sapin est difficile, et que la pénétration du produit n'excède pas 300 μm . Au-delà de cette profondeur (320 μm) nous n'avons observé aucune migration. Banks (1970) cité par Siau (1984) qui a étudié le pin sylvestre, a trouvé que la perméabilité radiale de cette essence est plus grande que la perméabilité tangentielle grâce aux rayons ligneux.

II-3-4-2-Duramen

II-3-4-2-1-Écoulement longitudinal

a) Cinétique

Les figures II-41a à II-41f représentent l'évolution de passage de la solution colorée, dans la direction longitudinale en fonction du temps, au sein d'une éprouvette de duramen du sapin.



Figures II-41a à II-41f : Images de la surface de sortie lors de l'imprégnation dans la direction longitudinale d'une éprouvette de duramen de sapin

Les études cinétiques réalisées au sein du duramen de sapin montrent que les voies principales de passage du liquide coloré restent les trachéides du bois final. À la différence de l'aubier, la migration est très concentrée sur le bois final (limite du cerne). Ce résultat a toujours été expliqué par le phénomène d'aspiration des ponctuations aréolées dans les trachéides du bois initial (Siau 1984, Perré 1987, Almeida et al. 2007).

La faible vitesse d'imprégnation du duramen révèle le contraste des deux zones du bois (aubier – duramen). Un facteur 20 (63 mn d'imprégnation pour l'aubier et 21h50mn pour le duramen) a été trouvé entre ces zones. Cette différence est vraisemblablement liée à la fermeture des ponctuations aréolées.

b) Exploration

Les figures II-42a et II-42b du duramen du sapin après imprégnation longitudinale pendant 5 minutes.

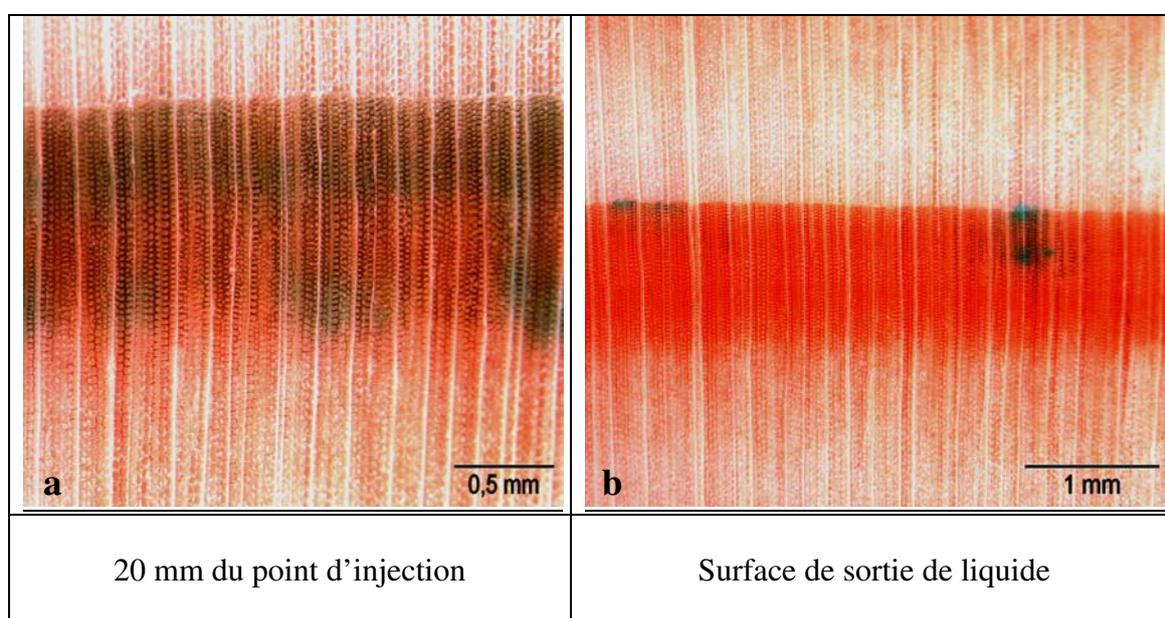


Figure II-42a et b : Exploration d'une éprouvette de duramen de sapin, après 5 minutes d'imprégnation dans la direction longitudinale

L'exploration de l'échantillon montre que le passage du liquide ne se limite pas au niveau du bois final (limite du cerne), comme le montre la face de sortie, après 5 minutes d'imprégnation. Après exploration à 5, 10 et 20 mm, du point d'injection, le liquide apparaît dans tout le bois final, et se propage même vers le bois initial.

L'image de la face sortie n'est pas le reflet exact des voies de passage du liquide dans la masse du bois de sapin.

L'ensemble des résultats d'imprégnation et d'exploration du sapin, montre qu'il n'y aurait pas de réelle participation des rayons ligneux dans l'imprégnation de celui-ci.

II-3-4-2-2-Ecoulement radial et tangentiel

Lors de l'étude de la migration du liquide coloré et de l'exploration des échantillons imprégnés dans les directions radiale et tangentielle du duramen de sapin, nous avons obtenu les mêmes résultats et les mêmes constatations que pour l'aubier.

II-4- Conclusion

Les résultats obtenus montrent que l'imprégnabilité dépend fortement de la structure anatomique (plan ligneux) de l'essence, de la zone du bois (aubier/duramen) à l'intérieur de l'essence et du type de bois (bois initial/bois final) au sein du cerne. Pour l'ensemble des essences étudiées un effet temps d'imprégnation a été mis en évidence.

Pour le chêne, les résultats observés sur des éprouvettes jumelles ont mis en évidence la variabilité de la migration d'un fluide dans le bois. La longueur des éprouvettes (35 mm) explique qu'une variabilité des caractères des gros vaisseaux de la zone initiale poreuse, peut s'exprimer fortement par la présence plus ou moins importante de thylles qui peuvent être présents sporadiquement, même dans l'aubier, et par la présence plus ou moins importante d'extrémités de vaisseaux (éléments terminaux).

Pour le chêne attaqué, l'altération plus ou moins avancée des éléments anatomiques, change le schéma d'imprégnation par rapport au chêne sain. En effet la zone initiale poreuse est moins conductrice par le fait de la présence de mycélium dans les gros vaisseaux, qui les bouche.

Les études que nous avons menées sur l'imprégnabilité du bois de hêtre et de sapin, ont fait ressortir une variabilité dans la zone du bois aubier/duramen, ainsi qu'au sein du même cerne.

III-Perméabilité à l'air et thyllose

Dans le bois des feuillus, la migration des fluides est surtout entravée dans les vaisseaux par la présence de thylls ou de matières obstruantes, dont la formation est liée au mécanisme normal de duraminisation ou la compartimentalisation subséquente liée à des blessures ou à des pathologies de la partie vivante de l'arbre.

Nous nous intéressons ici à la thyllose normale du chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.) et à son influence sur la perméabilité du bois. Nous étudions aussi deux autres essences feuillues à zone initiale poreuse :

- le robinier (*Robinia pseudoacacia* L.), qui est un bois à duraminisation précoce et dont la thyllose, particulièrement abondante ;
- le chêne rouge américain (*Quercus rubra* L.), chez lequel une duraminisation peu marquée, ne se traduit généralement pas par une production de thylls.

Sachant qu'il existe une relation entre la perméabilité au liquide et la perméabilité au gaz (Comstock 1967), nous avons choisi d'étudier la perméabilité à l'air dans la direction longitudinale d'échantillons cylindriques prélevés à différentes distances de l'écorce. Avec du gaz, il est en effet plus facile de garantir un écoulement monophasique, donc de mesurer la perméabilité intrinsèque d'un échantillon.

Par ailleurs, nous avons observé en Microscopie Electronique à Balayage environnemental (ESEM) la structure fine des thylls des trois essences afin de comprendre si, au delà de l'abondance de la thyllose, des différences d'ordre qualitatif permettaient d'interpréter les résultats obtenus en perméabilité à l'air.

III-1- Matériels et méthodes

III-1-1- Préparation des échantillons

Pour l'étude de la perméabilité à l'air de toutes les essences, chêne sessile, chêne rouge d'Amérique et robinier, les échantillons ont été préparés de la même façon. Les billes de chaque arbre ont été tronçonnées en disques de 10 cm d'épaisseur. Des cylindres d'une hauteur de 35 mm et de 18 mm de diamètre sont extraits à l'aide d'une scie cloche dans l'aubier, la zone de transition et le duramen (figure III-1). Trois éprouvettes jumelles sont prélevées sur une même verticale et présentent donc les mêmes cernes. De plus nous avons évité les zones présentant du bois de tension, des fentes ou une autre singularité.

Les surfaces des extrémités des cylindres sont préparées par une coupe nette à la scie à dents carbure. Les pourtours sont isolés avec une couche de résine époxy assurant ainsi la direction de flux choisi et annulant toute fuite d'air latérale.

Pour des raisons de simplicité, le gaz utilisé est l'air ambiant. En contrepartie, afin d'éviter les transferts de masse parasites, les échantillons doivent être à l'équilibre hygroscopique. La teneur en eau à laquelle se font les mesures ne peut donc être choisie (elle est d'environ 12 %). En raison du gonflement, la perméabilité diminue lorsque la teneur en eau augmente (Perré 1987).

Un soin particulier a été apporté au séchage du bois afin d'éviter tout risque d'apparition de microfissures, de collapse ou de dégradation biologique.

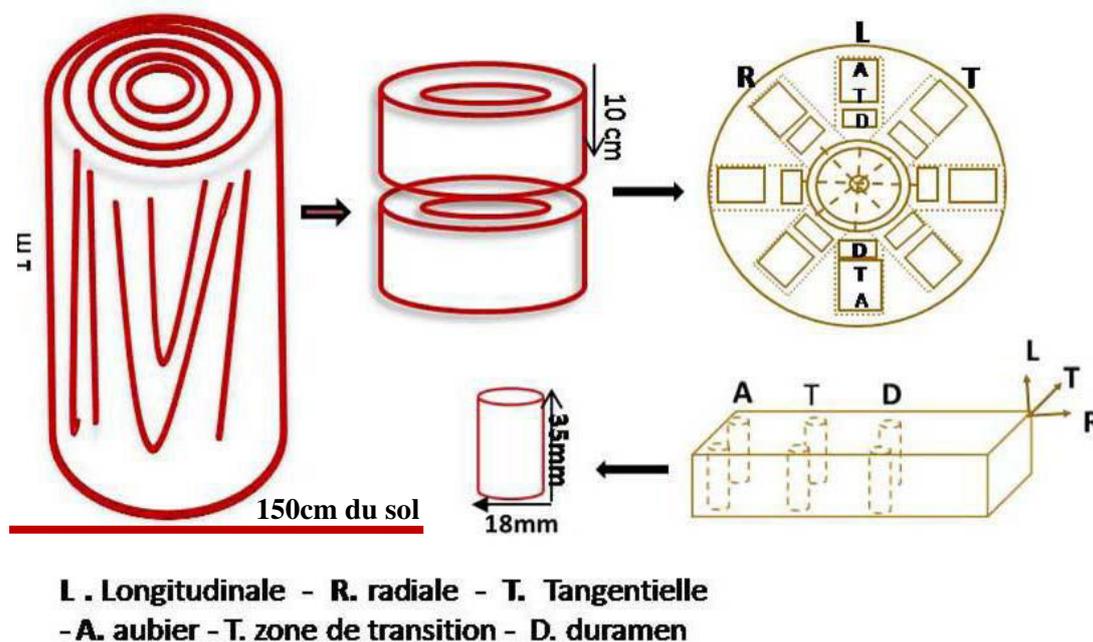


Figure III-1: Echantillonnage

- *Le chêne sessile (Quercus petraea L.)*

Nous avons travaillé sur les mêmes chênes abattus en fin d'hiver 2005 dans la forêt de brin. Les caractéristiques physiques de ces arbres figurent dans le tableau III-1.

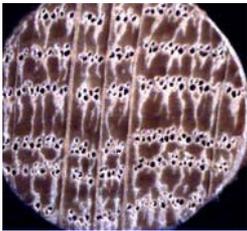
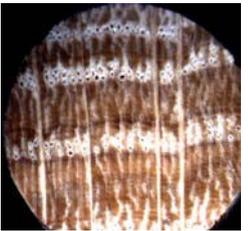
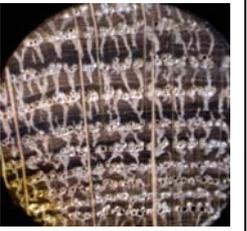
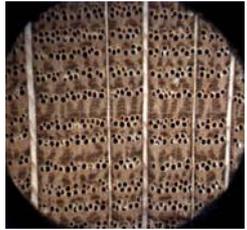
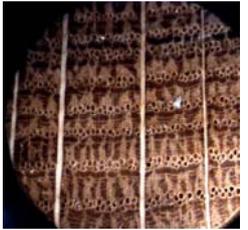
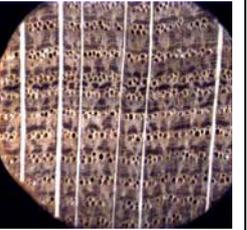
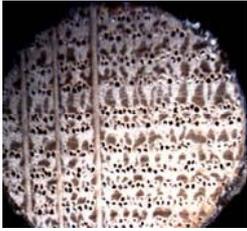
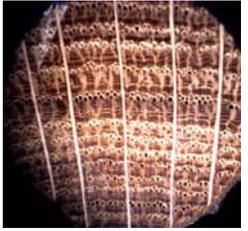
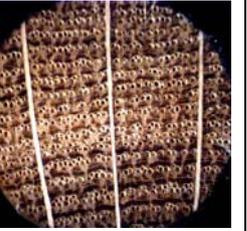
Tableau III-1: Caractéristiques physiques de deux des arbres étudiés

| Numéro de l'arbre | Nombre de cernes à 130 cm | Circonférence à 130 cm | Aubier (%) à 130 cm | Duramen (%) à 130 cm |
|-------------------|---------------------------|------------------------|---------------------|----------------------|
| Arbre 1 (chêne 1) | 113 | 108 | 23 | 77 |
| Arbre 2 (chêne 2) | 112 | 111 | 21 | 79 |

Nous avons complété nos essais avec un troisième arbre (arbre 3) que nous savions, issu de la même forêt mais dont nous n'avons pas pu connaître la date d'abattage, ni déterminer les caractéristiques physiques.

Les photographies des sections transversales (tableau III-2) montrent la variabilité du bois utilisé au niveau de la largeur de cernes, de la coloration et de l'aspect obstrué ou non des vaisseaux.

Tableau III-2 : Photographies des sections transversales des éprouvettes des chênes sessiles testées

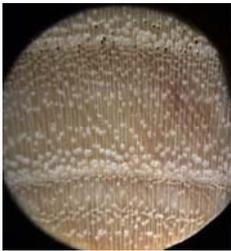
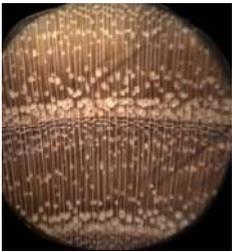
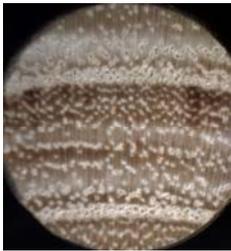
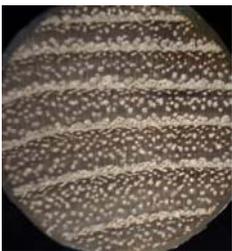
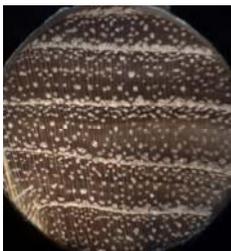
| | Aubier | Zone de transition | Duramen |
|---------|--|--|--|
| Arbre 1 |  a |  b |  c |
| Arbre 2 |  d |  e |  f |
| Arbre 3 |  g |  h |  i |

- *Le robinier (Robinia pseudocacia L.)*

Deux arbres sont étudiés. Ils ont été prélevés dans la même forêt que le chêne sessile précédemment cité. Nous ne possédons pas d'information concernant la date d'abattage de ces arbres.

Les photographies des sections transversales des éprouvettes (tableau III-3) montrent la variabilité du bois utilisé au niveau de la largeur de cernes, de la coloration et de l'obstruction des vaisseaux.

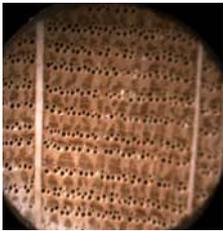
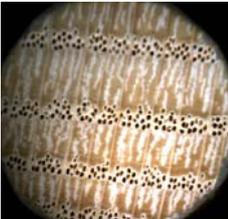
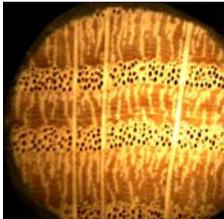
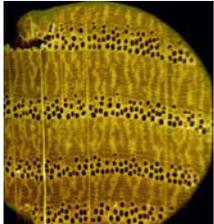
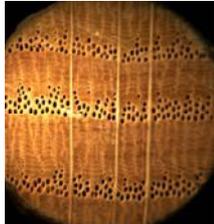
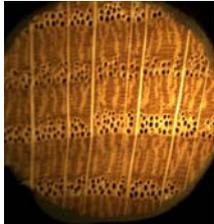
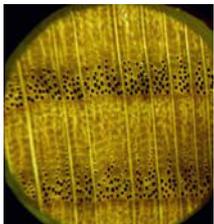
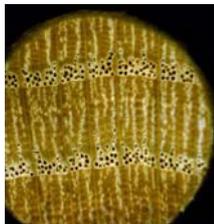
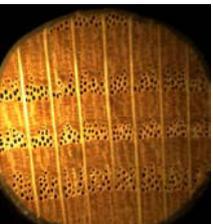
Tableau III-3 : photographies des sections transversales des éprouvettes des robiniers testées

| | Aubier | Duramen externe | Duramen interne |
|---------|--|--|--|
| Arbre 1 |  a |  b |  c |
| Arbre 2 |  d |  e |  f |

- *Le chêne rouge (Quercus rubra L.)*

Nous avons travaillé sur trois arbres de chêne rouge provenant de la forêt du Montech située dans Tarn et Garonne. Ces arbres, dont on ignore la date d'abattage, étaient stockés dans la réserve de L'ENGREF. Des cylindres sont extraits comme pour les essences précédentes dans la partie la plus externe de l'arbre (contenant l'aubier) le duramen externe et le duramen interne. Les photographies des sections transversales des éprouvettes (tableau III-4) montrent la variabilité du bois utilisé au niveau de la largeur de cernes et de la coloration.

Tableau III-4 : Photographies des sections transversales des éprouvettes de chêne rouge testées

| | Aubier | Duramen externe | Duramen interne |
|---------|--|--|---|
| Arbre 1 |  a |  b |  c |
| Arbre 2 |  d |  e |  f |
| Arbre 3 |  g |  h |  i |

III-1-2- Système de mesure de perméabilité à l'air

La nécessité d'effectuer des mesures de perméabilité à l'air de diverses espèces à différents niveaux de pression exige un dispositif précis et fiable. A cette fin, Agoua (2001) a développé un système appelé ALU-CHA à l'ENGREF. Il permet de mesurer la perméabilité sur une très large gamme de valeurs de pression. Beaucoup de soin a été apporté à l'étanchéité latérale. Ce dispositif permet d'appliquer une différence précise et constante de pression entre les deux faces de l'échantillon (figure III-2). Le flux correspondant de gaz est déterminé grâce à un débitmètre massique. Une membrane en caoutchouc est employée pour assurer l'étanchéité latérale. Celle-ci est plaquée sur

l'échantillon à l'aide d'une surpression. Le diamètre de la membrane est légèrement inférieure à celle de l'échantillon afin d'éviter les plis. La mise en place de l'échantillon est facilitée en créant un vide partiel entre le tube extérieur et la membrane (figure III-3).

Le principe du dispositif est visible sur la figure III-3 et sur les photographies 4a et 4b. La différence de pression ΔP existant entre deux cuves crée un débit d'air Q dans l'échantillon. La perméabilité est alors déduite des mesures grâce à la loi de Darcy :

$$K_g = \frac{Q.L.P}{A.\Delta P.\bar{P}}$$

K : Perméabilité intrinsèque [m^2]

A : Section de l'éprouvette [m^2]

Q : Débit du gaz [m^3/s]

L : Epaisseur de l'éprouvette dans la direction de l'écoulement(m)

P : Pression à l'entrée absolue [Pa]

ΔP : Différence de pression (Pa)

\bar{P} : Pression moyenne $(P_1+P_2)/2$

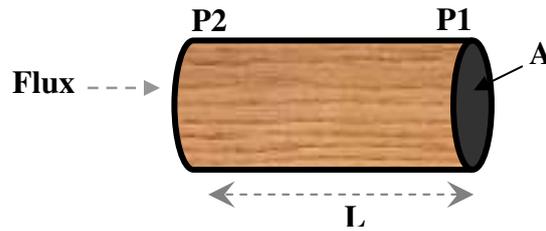


Figure III-2 : Schéma de l'échantillon de bois, pour la mesure de perméabilité à l'air

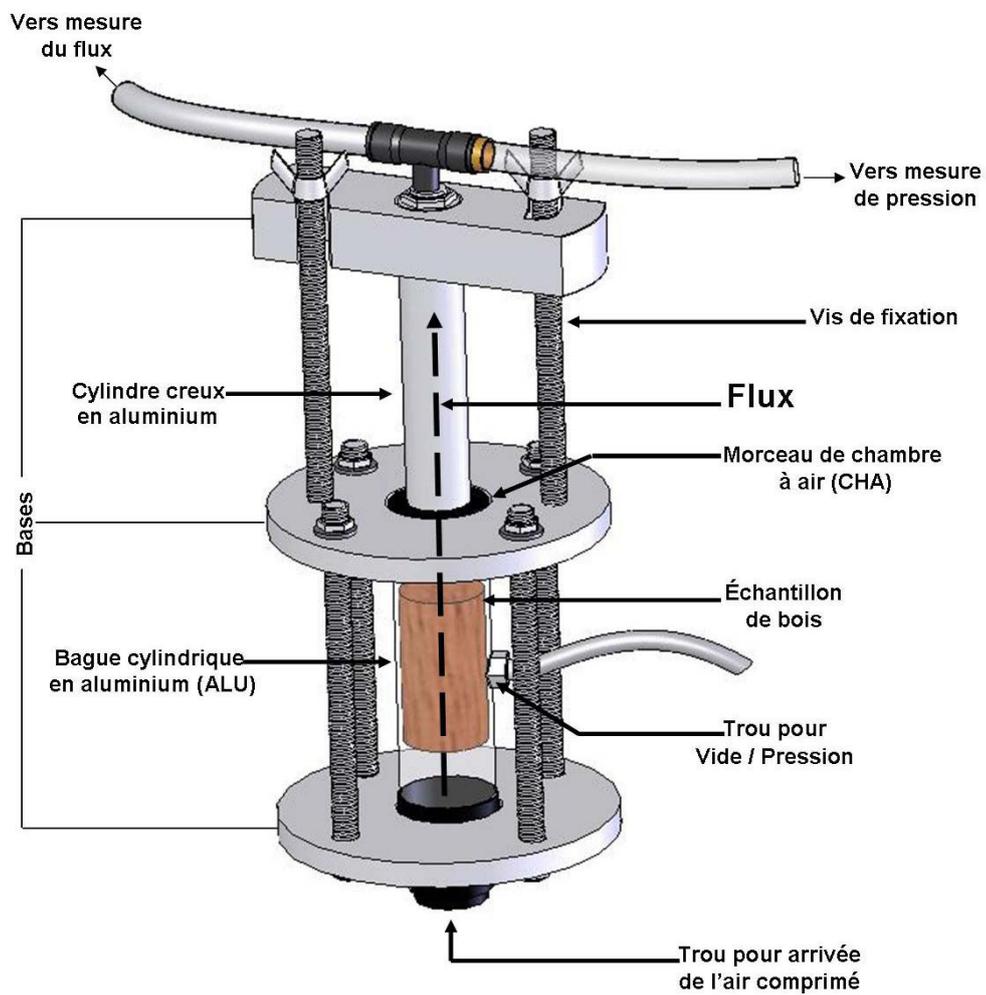


Figure III-3 : Représentation schématique du système ALU-CHA

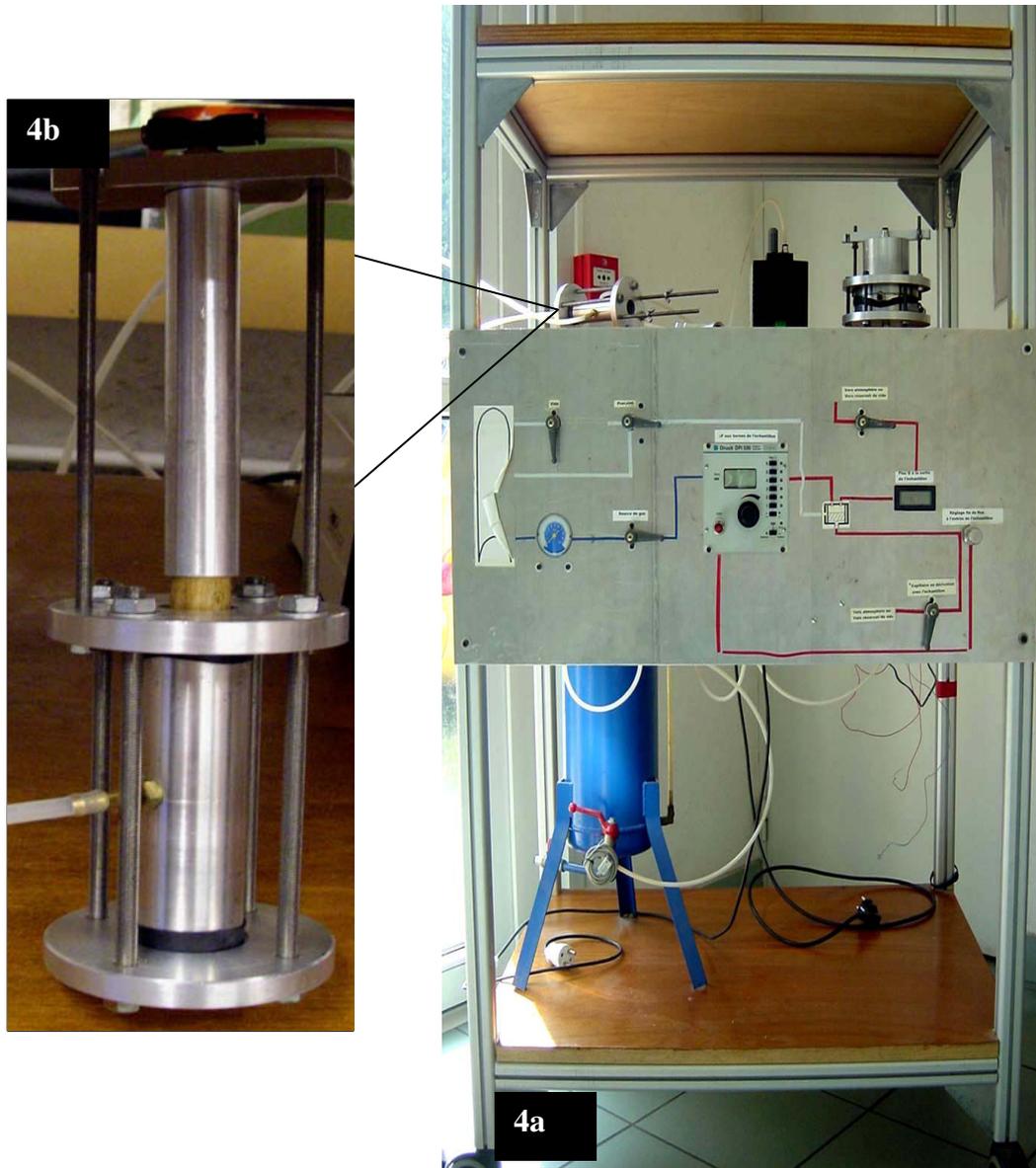


Figure III-4 : Dispositif de mesure de la perméabilité à l'air (4a : vue d'ensemble, 4b : détail du système ALU-CHA)

Le système est constitué d'un panneau général depuis lequel on commande le circuit de mise en pression de la chambre à air et le circuit d'évacuation de l'air de la chambre à air, le réglage du passage de l'air à travers l'échantillon. La mesure et le contrôle de pression aux bornes de l'échantillon sont assurés à l'aide d'un régulateur. Le débitmètre permet de mesurer le flux d'air qui passe à travers l'échantillon. Le porte-échantillon est fabriqué à partir d'un petit cylindre en aluminium et d'un morceau de chambre à air d'où le nom ALU-CHA. Le morceau de chambre à air est placé à l'intérieur du cylindre d'aluminium ; ses parties débordantes sont repliées vers l'extérieur sur la surface latérale de la bague et sont solidement tendues et attachées par des colliers.

- *Etalonnage des appareils de mesure de flux*

Le débitmètre et l'afficheur qui lui est adapté ont été préalablement étalonnés. L'air qui traverse le débitmètre est recueilli par déplacement d'eau dans la partie supérieure d'une éprouvette graduée renversée préalablement remplie d'eau. Le temps mis par le passage de l'air et le volume qui lui correspond, sont enregistrés.

La figure III-5 montre une bonne linéarité entre le flux d'air (en ml/min) qui passe dans le débitmètre et l'afficheur qui permet de connaître ce débit grâce à une relation affine. Il faut noter que la tension lue correspond à une conversion, grâce à une résistance de la sortie 4-20 mA du débitmètre. Ceci explique pourquoi un débit nul correspond à un volt (0,9881).

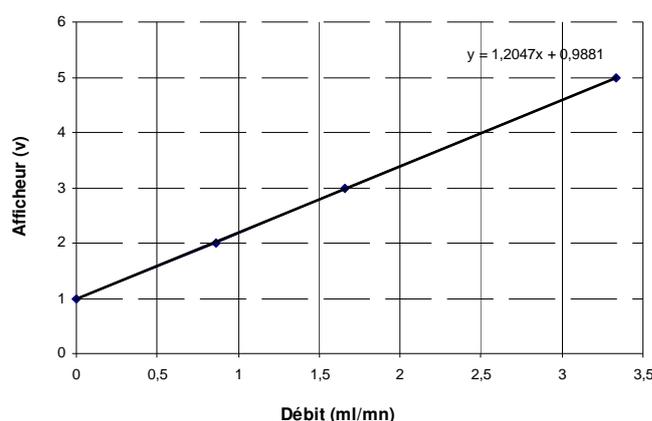
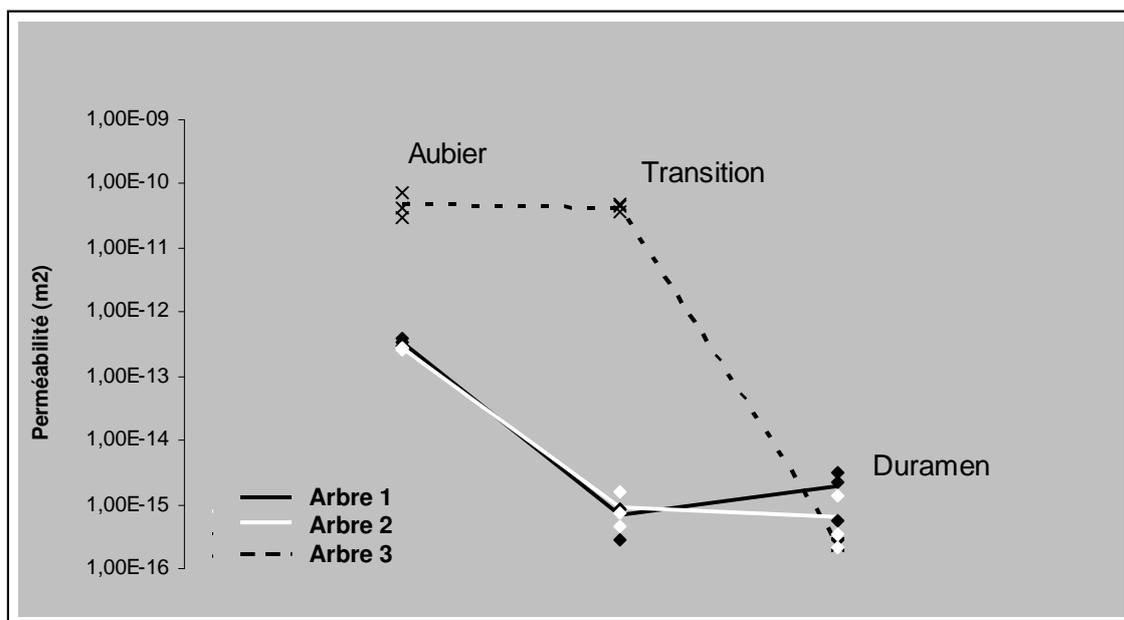


Figure III-5 : Graphique d'étalonnage des appareils de mesure de flux.

III-2- Résultats et discussion

III-2-1- Le chêne sessile (*Quercus petraea* L.)

- Les résultats obtenus sont représentés sur la figure III-6.



*Figure III-6: Perméabilité dans la direction longitudinale d'échantillons cylindriques prélevés dans les différentes zones de 3 arbres (*Quercus petraea* Liebl.)*

Les éprouvettes dites « jumelles », prélevées sur une même verticale, ont des perméabilités proches, à l'intérieur d'un même arbre pour une même zone de prélèvement. Cela confirme les résultats de Bamber qui évoque une simultanée de la formation des thylles dans la direction longitudinale en accord avec l'hypothèse d'un transport radial d'une substance HIS (Heartwood Inducing Substance) qui s'accumulerait simultanément dans toutes les cellules de parenchyme adjacentes au cœur imperméable, autrement dit là où le mouvement centripète est bloqué (Bamber 1976).

Les éprouvettes de duramen des trois arbres présentent des perméabilités proches et très faibles alors que les éprouvettes d'aubier et de zone de transition se distinguent d'un

arbre à l'autre. Les chênes 1 et 2 proviennent de la même parcelle (même sylviculture et même environnement) et ont été abattus en même temps, à la fin de l'hiver, et stockés dans des conditions similaires. Nous pouvons proposer l'hypothèse d'une formation de thylles traumatiques dans l'aubier de ces deux arbres suite à l'abattage. La perméabilité comparable de leur aubier s'explique sans doute par l'apparition d'une thyllose traumatique de même intensité chez ces deux arbres.

Les éprouvettes prélevées dans la zone de transition ont des perméabilités voisines pour l'arbre 1 et 2 et comparable à celles du duramen, alors que la zone de transition de l'arbre 3 a une perméabilité voisine de celle de l'aubier. Il faut souligner que la zone de transition est repérée grâce au changement de couleur et que la production de thylles n'est pas synchrone à l'imprégnation du bois par des substances phénoliques, responsable du changement de couleur. Le plus souvent, elle la précède (Bamber 1976).

Le chêne 1 présente une largeur de cerne plus importante que le chêne 2, pourtant, les bois de ces deux arbres montrent des perméabilités voisines pour toutes les zones de prélèvement. Chen et al. (1998) avancent que la réduction de la perméabilité longitudinale suite à la duraminisation n'est pas liée de manière significative à la vitesse de croissance en diamètre. D'après lui, des facteurs comme la génétique ou les blessures ont probablement une plus grande influence sur la fermeture des voies de passage des liquides lors de la duraminisation que la vitesse de croissance en diamètre.

Les photographies prises en ESEM du bois de duramen montrent des vaisseaux de la zone initiale obstrués par une thyllose compacte (figure III-7a et III-7b).

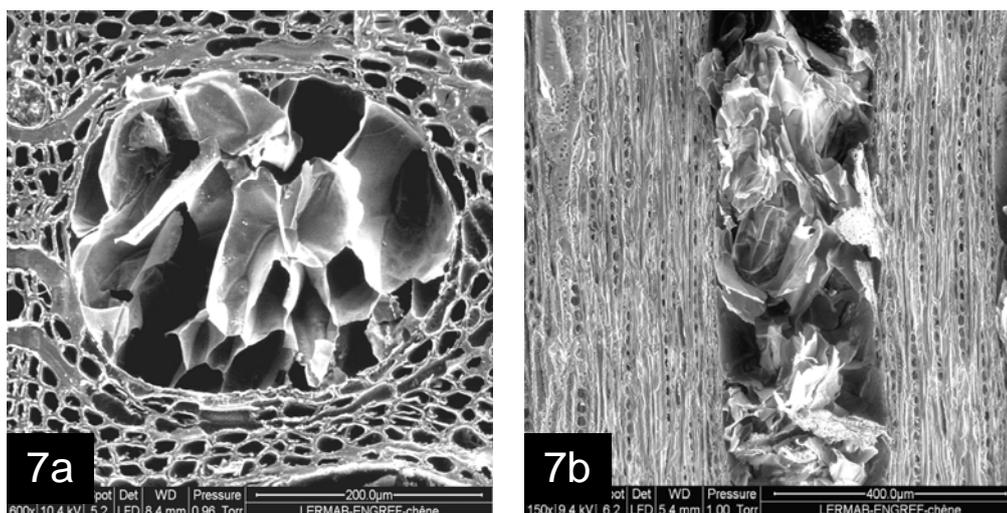
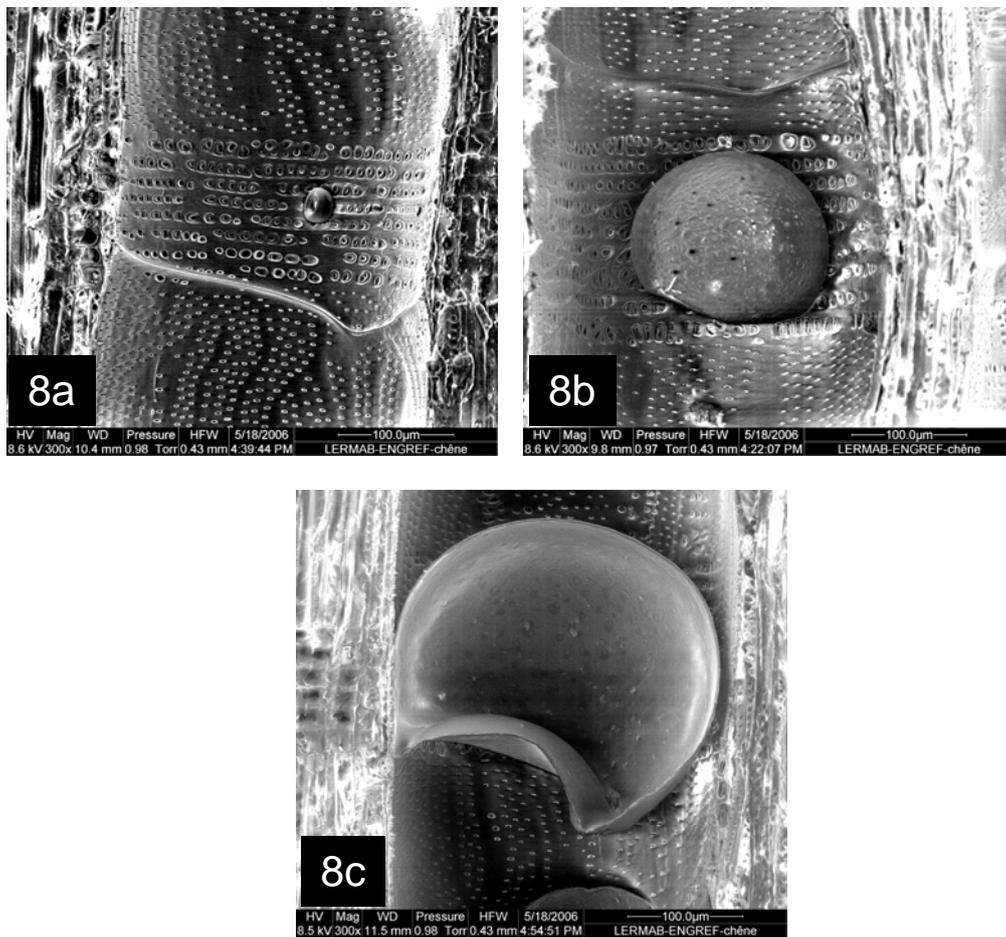


Figure III-7 : Coupe transversale (a) et coupe tangentielle longitudinale (b) du bois de duramen de chêne 1 (Quercus petraea Liebl.)

La thyllose compacte observée dans le duramen est vraisemblablement la thyllose formée au moment de la duraminisation au début de l'automne lors de la perte d'eau des vaisseaux concernés. Les travaux de Reichenbach (1845) redécouverts par Zimmermann (1979) montrent que, dans *Robinia pseudoacacia* L., la formation des thylles dans les vaisseaux de l'année en cours commence en octobre (en Autriche) et est plus ou moins achevée en décembre. Ces résultats ont été confirmés sur la même essence au Japon (Fujita et al. 1978). Reichenbach conclut que les thylles se forment lorsque les vaisseaux sont remplis de gaz, car ils apparaissent à l'automne après arrêt de la conduction de l'eau. Dans le bois des chênes 1 et 2 abattus en février, la production de la thyllose lors de duraminisation de l'année précédente était donc achevée et celle de l'année suivante n'était pas encore amorcée.

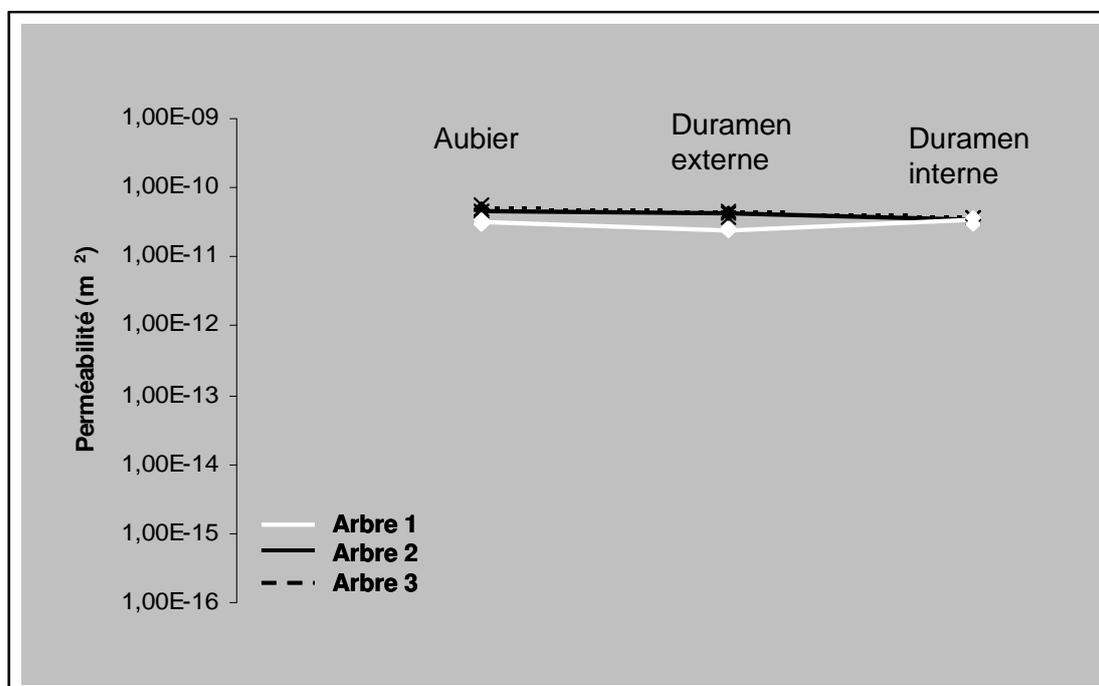
En revanche, les photographies du bois d'aubier de ces arbres (figure III-8) montrent des thylles plus ou moins avortés, certainement formés suite au traumatisme de l'abattage. D'après nos observations, les thylles du chêne sessile sont toujours issus des cellules du parenchyme radial ; cela confirme les observations de plusieurs auteurs (Chattaway 1949, Murmanis 1975, Zürcher et al. 1985).



Figures III-8 : Coupes radiales longitudinales du bois d'aubier de chêne 1 (Quercus petraea Liebl.)

III-2-2- Le chêne rouge américain (*Quercus rubra* L.)

- Les résultats obtenus sur le chêne rouge sont représentés sur la figure III-9.

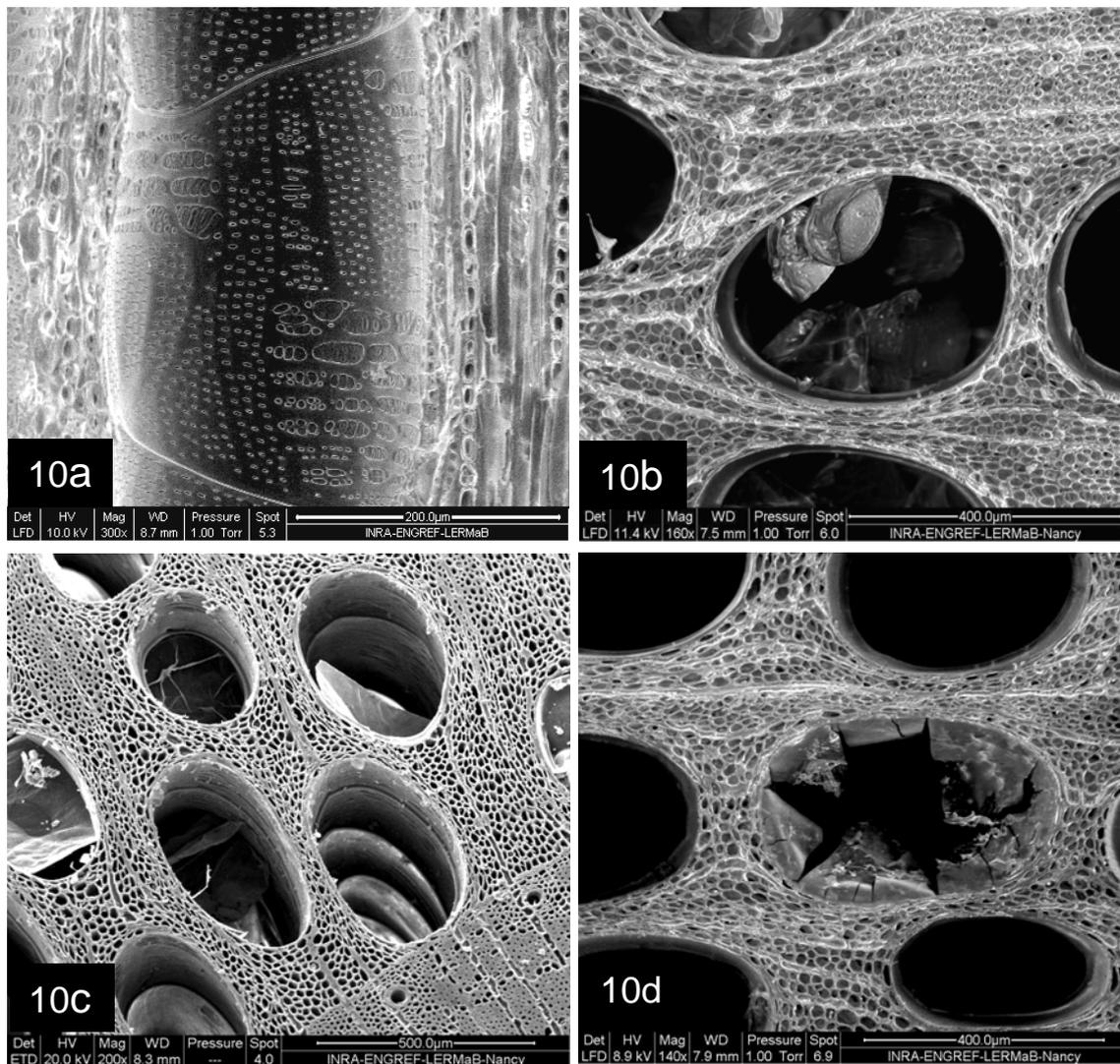


*Figure III-9: Perméabilité dans la direction longitudinale d'échantillons cylindriques prélevés dans les différentes zones de 3 chênes rouges (*Quercus rubra* L.)*

Le bois de toutes les éprouvettes testées, qu'elles proviennent de l'aubier, du duramen interne ou du duramen externe, présente une forte perméabilité dans la direction longitudinale comprise entre 10^{-11} et 10^{-10} m², autrement dit une perméabilité voisine de celle de l'aubier des chênes sessiles.

Chen et al. (1998) ont montré que, en moyenne, le chêne rouge qui ne forme pas de thylls dans le duramen, perd seulement 26% de sa perméabilité lors de la duraminisation.

Les observations en Microscopie Electronique à Balayage environnemental confirment une absence de thylls dans la plupart des vaisseaux (figure III-10a). Pourtant certains vaisseaux montrent des thylls avortés, qui n'obstruent jamais complètement le lumen du vaisseau (figure III-10b). Ils pourraient s'agir de thylls traumatiques.



Figures III-10 : Coupes tangentielle longitudinale (a) et transversales (b, c, d) du bois de duramen du chêne rouge 1 (Quercus rubra L.)

D'après Murmanis (1975), les thylles se forment dans l'aubier de chêne rouge en l'espace de quelques heures si le bois est coupé durant la saison de végétation et conservé sans séchage artificiel en laboratoire. Si le bois est coupé pendant la période de dormance et stocké à l'état vert, les thylles se forment après plus d'un mois. Cette formation dépend de la température. La paroi des thylles chez le chêne rouge serait une paroi primaire plutôt qu'une paroi secondaire.

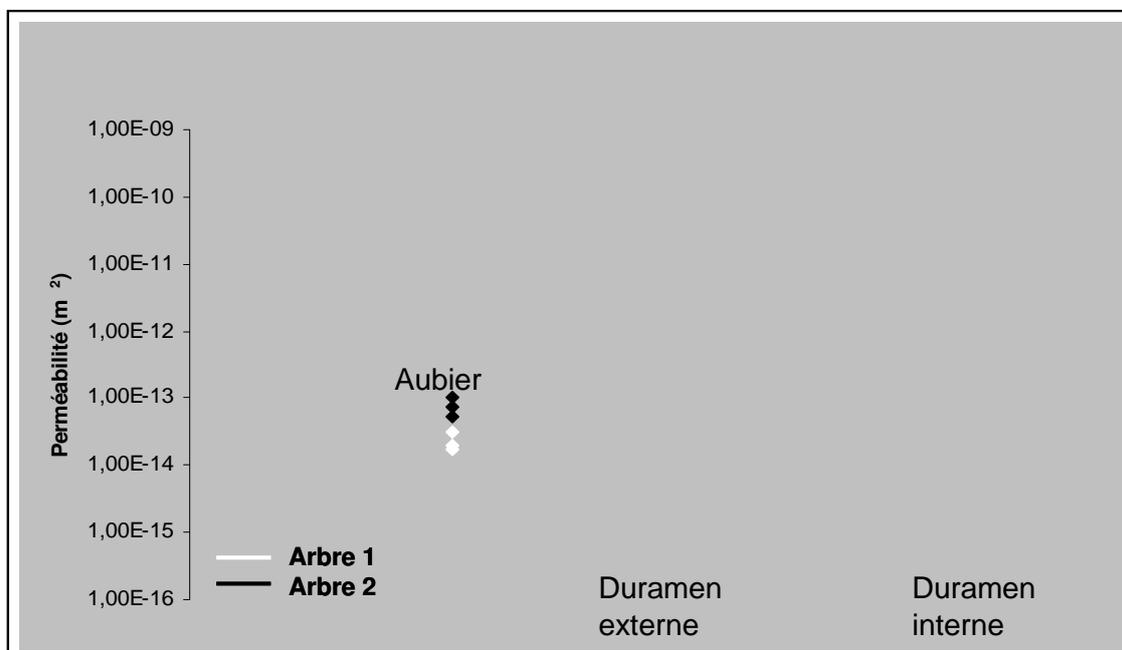
Les parois des thylles ont des ponctuations simples et les ponctuations peuvent se former même si la paroi n'est pas en contact avec celle d'une cellule adjacente.

Nos observations montrent que d'autres vaisseaux contiennent une substance obstruante, formant comme une membrane au niveau des marges des perforations uniques, entre deux éléments de vaisseaux superposés (flèches sur la photographie III-10c). La photographie III-10d montre une de ces membranes craquelée : la présence des craquelures montre la fragilité de cette membrane, qui semble correspondre à des dépôts amorphes, non fibrillaires. La disposition de ces dépôts n'est pas sans rappeler le type 1 correspondant aux thylles étroitement compactée décrit par Saitoh et al. (1993) à propos des gommés. Même si le dépôt observé dans le chêne rouge ne correspond peut-être pas à des gommés, on comprend qu'une substance excrétée dans le vaisseau puisse acquérir cette forme.

Des études sur la structure fine des occlusions de vaisseaux dans les espèces sans thylles révèlent le dépôt de substances phénoliques à l'intérieur des vaisseaux depuis les cellules de parenchyme radial et axial à travers les membranes des ponctuations. Un tel dépôt a pu être décrit comme une caractéristique pour plusieurs genres, *Betula*, *Tilia*, *Acacia*, mais accompagnant aussi la formation des thylles pour les espèces à zone initiale poreuse *Robinia* et *Quercus* (Schmitt et al. 1997). On peut supposer que les occlusions observées correspondent à un dépôt de substances phénoliques, qui ne serait d'ailleurs guère susceptible de diminuer la perméabilité du duramen de chêne rouge, compte tenu de leur fragilité.

III-2-3- Le robinier faux acacia (*Robinia pseudoacacia* L.)

- Les résultats obtenus sur le robinier sont représentés sur la figure III-11.



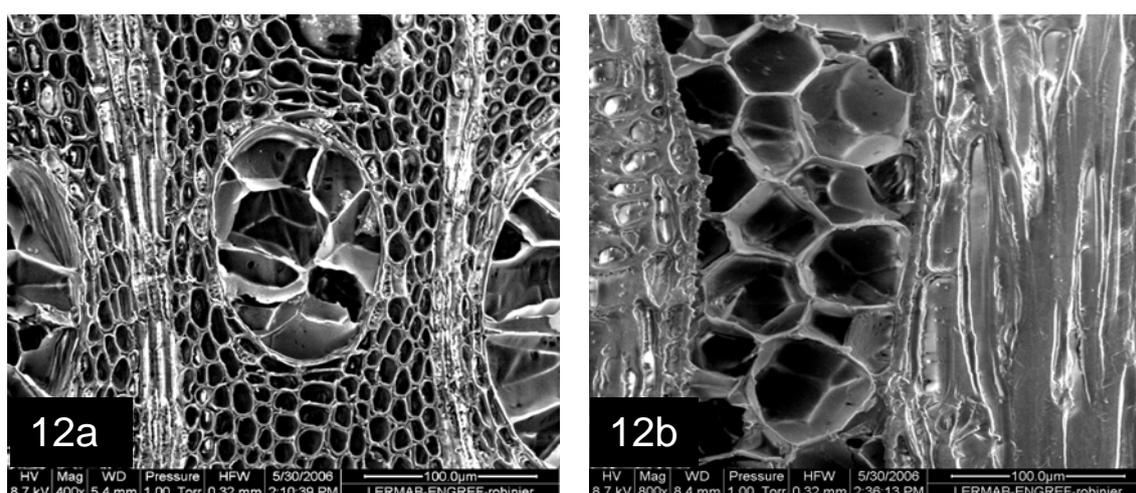
*Figure III-11: Perméabilité dans la direction longitudinale d'échantillons cylindriques prélevés dans les différentes zones de 2 robiniers (*Robinia pseudoacacia* L.)*

La perméabilité au gaz dans la direction longitudinale du duramen de robinier n'a pas pu être mesurée car les valeurs étaient si faibles, qu'elles se situaient en dehors des limites de mesures du dispositif. On peut seulement affirmer qu'elles sont inférieures à 10^{-17} m². La perméabilité des éprouvettes de robinier issues des deux arbres et contenant de l'aubier est comprise entre 10^{-14} m² et 10^{-13} m². Sur le chêne sessile, l'aubier présentait une perméabilité qui était de l'ordre de 10^{-12} m² pour un arbre et de 10^{-10} m² pour les deux autres.

Cette différence entre le robinier et le chêne sessile proviendrait d'une duraminisation précoce et d'une thyllose particulièrement développée chez le robinier. Il semblerait que, dans l'aubier de cette espèce, seul le dernier cerne formé soit exempt de thylles. En effet, Reichenbach (1845) cité par Zimmermann (1979) observe que tous les vaisseaux

de l'année en cours ne contiennent pas de thylles alors que tous les précédents en sont remplis. La formation des thylles dans les vaisseaux de l'année en cours commence en octobre (en Autriche) et est plus ou moins achevée en décembre. Klein (1923) trouve chez le robinier quelques vaisseaux larges du bois initial non obstrués par des thylles lors du deuxième été, alors que les vaisseaux de faible diamètre du bois final restent ouverts pendant plusieurs étés. D'après Saitoh et al. (1993) les thylles apparaissent dans le bois initial du cerne âgé de deux ans et dans le bois final du cerne âgé de trois ans.

Les figures III-12a et III-12b montrent la densité de la thyllose à l'intérieur des vaisseaux de la zone initiale poreuse dans le duramen du robinier 2. Cette thyllose est abondante et anguleuse. Elle résulte visiblement de divisions ultérieures des thylles. Les ponctuations entre thylles sont bien visibles même à faible grossissement.



Figures III-12 : Coupe transversale (a) et coupe longitudinale radiale (b) du bois de duramen de l'arbre 2 (Robinia pseudoacacia L.)

Pour Schmitt et Liese (1994), la division des thylles, telle qu'elle est observée dans le tissu blessé de *R. pseudoacacia* L., est sans doute à l'origine de leur arrangement irrégulier dans le lumen des vaisseaux et peut être interprété comme un blocage plus efficace des vaisseaux de gros diamètre.

Cependant, la division des thylls ne représente pas un phénomène spécifique aux blessures dans *R. pseudoacacia* L, en effet les vaisseaux du bois initial dans le duramen normal montrent le même arrangement irrégulier des thylls que lorsqu'ils sont produit par divisions. D'autre part, les interfaces entre thylls adjacents sont uniformément horizontales dans les vaisseaux de petit diamètre du bois d'été, schéma de thylls qui ne se divisent pas.

La même observation a été faite par Saitoh et al. (1993) qui ont défini plusieurs types de thylls. Dans le bois initial, la thyllose est de type 1, alors que dans le bois final, elle est de type 3, c'est-à-dire unisériée avec des parois supérieures et inférieures, le contact est alors horizontal. Ces deux types se rencontrent souvent dans les bois à zone initiale poreuse, et le type 1 dans les vaisseaux les plus larges.

D'après nos observations (figures III-12a et 12b), les rayons ligneux sont rarement en contact avec les vaisseaux, et nous pensons que la thyllose du robinier est surtout formée à partir du parenchyme longitudinal, ou plus précisément des cellules associées aux vaisseaux. La figure III-13 montre la formation d'un thyll à partir d'une cellule de parenchyme longitudinal. L'importante croissance en diamètre des éléments de vaisseaux de la zone initiale poreuse au moment de la différenciation a tendance à comprimer et à déformer les cellules adjacentes, qui apparaissent très aplaties sur la figure III-13 (voir flèche).

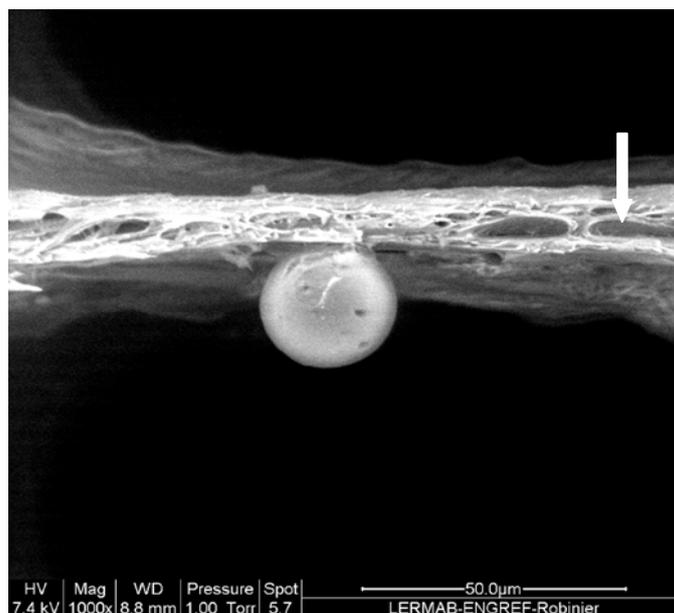


Figure III-13 : Coupe transversale du bois d'aubier du robinier 2 (Robinia pseudoacacia L.), formation d'un thylosse à partir d'une cellule de parenchyme longitudinal

D'après Saitoh et al. (1993), la thylosse du robinier se formait aussi bien à partir des cellules de parenchyme longitudinal que des cellules des rayons ligneux. Cependant, le type 1 de thylosse est plus fréquemment rencontré chez les essences présentant un parenchyme longitudinal paratrachéal plutôt que apotrachéal, ce qui montre le rôle important des cellules de parenchyme longitudinal dans la formation de la thylosse du robinier. Chattaway (1949) trouve que dans la plupart des espèces australiennes qu'elle étudie (1100 genres) les thylls et les gommes se forment presque exclusivement à partir des cellules de rayon. Mais, le robinier ne fait pas partie de ses espèces étudiées.

Les travaux de Zhang et al. (2003) concernent la proportion d'éléments radiaux n'étant pas en contact avec les éléments axiaux. Chez le robinier, cette proportion est particulièrement élevée : dans le cambium de cette espèce, 63 % des cellules initiales des rayons ne sont pas en contact avec les cellules fusiformes.

III-3- Conclusions

Quatre types de thylls (thylle absent, thylle naissant, thylle avorté et thylle compact) ont été distingués dans ce travail. Le deuxième type, appelé « développé » est l'intensité de seuil, qui est assez haut pour que les cellules des thylls desserrent leur forme de ballon. Ceci représente donc l'intensité géométrique pour laquelle le flux de fluide entre les cellules des thylls commence à être difficile, par conséquent la valeur de la perméabilité est basse

En outre, nos observations tendent à prouver que, contrairement à la plupart des espèces, les thylls du *R pseudoacacia* se forment particulièrement des cellules de parenchyme axiales.

Conclusions et perspectives

Migration des liquides

L'objectif de cette étude est d'améliorer les connaissances sur les aspects quantitatifs et qualitatifs de la migration des liquides dans le bois afin de permettre aux restaurateurs-conservateurs qui interviennent sur des objets de grande valeur historique de prévoir les effets d'une opération pour ne pas nuire à l'intégrité de la pièce.

Nous avons étudié la migration des liquides dans trois bois, parmi les essences forestières les plus abondantes sur le sol français et les plus fréquemment rencontrées dans le patrimoine historique et culturel de la France : le chêne sessile, le hêtre et le sapin. Nous avons étudié l'influence de la direction du flux et de la position du bois dans l'arbre sur la cinétique d'imprégnation, la profondeur de pénétration et la nature des tissus intervenant dans la conduction.

Un dispositif d'expérimentation a été spécialement conçu et réalisé pour mener à bien ce travail. L'écoulement est observé en continu sur la surface de sortie d'une éprouvette reliée à son autre extrémité à un réservoir d'eau colorée. Sur d'autres éprouvettes imprégnées pendant des durées fixes, nous avons procédé à une « exploration » du bois de manière à préciser les voies anatomiques de pénétration du liquide et la profondeur de celle-ci.

L'imprégnabilité du chêne dégradé par un agent de pourriture, tel qu'il peut se rencontrer dans les ouvrages anciens, n'avait, à notre connaissance, jamais été étudiée.

- Aubier de chêne sessile sain

Dans l'aubier de chêne sain, l'écoulement des liquides dans la direction longitudinale se cantonne aux gros vaisseaux de la zone initiale poreuse.

Si on compte le nombre de gros vaisseaux conducteurs au cours du temps, les courbes de cinétique obtenues montrent une allure similaire, quoique plus ou moins marquée.

Dès que le liquide commence à s'écouler au niveau de la face de sortie, le nombre de vaisseaux conducteurs augmente rapidement, puis semble se stabiliser pour augmenter de nouveau. Cette observation est particulièrement nette pour l'éprouvette prélevée juste sous l'écorce où l'écoulement, ralenti par rapport à celui des éprouvettes d'aubier prélevées plus en profondeur, a pu être observé sur une durée longue, de presque 55 heures. On pourrait penser que l'écoulement s'effectue grâce à deux phénomènes décalés dans le temps. Le ralentissement de l'écoulement pour cette éprouvette, contenant les tout derniers cernes de bois formés par le cambium, est peut-être dû à la présence de thylles traumatiques, formés suite à l'abattage. Dans l'aubier plus interne, l'écoulement peut être observé dès la mise en place du dispositif. Nous pouvons rappeler ici que les éprouvettes testées ont une longueur de 35 mm dans la direction du flux.

L'exploration d'une éprouvette d'aubier de chêne imprégnée confirme que les gros vaisseaux se révèlent conducteurs de manière indépendante, certains plus tôt que d'autres. En réalité c'est la distance sur laquelle le vaisseau conduit le liquide qui varie d'un vaisseau à l'autre. Même dans l'aubier, des obstacles ou des freins semblent exister à l'intérieur des vaisseaux et ralentissent la progression du liquide lorsqu'il est introduit à une pression proche de la pression atmosphérique. Notre dispositif expérimental contient un réservoir légèrement surélevé par rapport à l'éprouvette. Il simule un traitement par voie liquide appliqué au bois à pression atmosphérique.

Dans les directions radiale et tangentielle, aucun écoulement n'a été observé au niveau de la surface de sortie d'une éprouvette d'aubier de chêne de 35 mm de longueur, après 1 mois d'expérimentation. L'exploration a confirmé la non imprégnabilité de l'aubier de chêne dans ces directions.

L'aubier de chêne blanc est considéré comme imprégnable selon la norme EN350-2. Nous pouvons rappeler cependant qu'il n'y a pas d'essais normalisés de l'évaluation de

l'imprégnabilité : les informations données découlent de constatations générales rencontrées lors de l'application de traitement industriel vide pression en autoclave. Le travail de recherche présenté ici ne concerne pas le cas d'un traitement de préservation des bois en profondeur, tel qu'il se pratique pour des classes d'emploi 3 ou 4. Notre intérêt porte sur les traitements réalisés par voie liquide, à pression atmosphérique, sur des bois mis en œuvre ou sur des objets dans le cadre d'opérations de restauration-conservation, pour lesquels la profondeur de pénétration des liquides doit être évaluée de manière à éviter tout effet indésirable.

- Duramen de chêne sessile sain

Dans la plupart des éprouvettes de duramen de chêne sessile, nous n'avons observé aucune imprégnation au niveau de la face de sortie, même après 2 mois d'expérimentation. Cependant sur une éprouvette de duramen interne, nous avons noté la présence de ce que les mérandiers appellent un « cerne poreux », c'est à dire, un cerne présentant un défaut de thyllose chez certains vaisseaux. Dans ce cerne dit « poreux », un vaisseau unique s'est montré conducteur au bout de 24 heures d'imprégnation. Ce défaut peut-être une cause de fuite dans les tonneaux.

L'exploration du duramen de chêne sain, imprégné durant 2 mois, montre que la profondeur de pénétration du liquide est très faible. Au-delà de 2300 μm de profondeur, la couleur du colorant n'est plus détectée. Les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse sont bouchés par des thylls, qui font barrière au liquide. On remarque par contre que les petits vaisseaux du bois final conduisent le liquide coloré plus profondément que les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse.

- Aubier de chêne sessile dégradé par un agent de pourriture blanche

Une rondelle provenant de l'arbre 2 a été stocké à l'extérieur et a subi une attaque, identifiée visuellement comme étant le fait d'un agent de pourriture blanche ou fibreuse (éclaircissement du bois par taches, soulignées de liserés foncés). L'aubier attaqué présentait une infradensité moyenne de 320 kg/m^3 contre 500 kg/m^3 pour l'aubier sain.

La migration de l'eau dans le bois de chêne dégradé, à pression atmosphérique, semble s'effectuer avant tout au niveau du bois final, dans les plages de fibres ou de petits vaisseaux associés aux parenchymes. Elle est beaucoup plus rapide et plus étendue que dans l'aubier de chêne sain car l'hydrolyse enzymatique des constituants du bois par le mycélium augmente la microporosité du bois.

Pour certaines éprouvettes, l'apparition de liquide à surface de sortie est immédiate. Elle concerne des plages et non plus uniquement les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse. Pour tracer les cinétiques d'écoulement, nous avons donc exprimé quantitativement l'imprégnation en comptabilisant le nombre de pixels colorés par le colorant vert sur les images. Les courbes de cinétiques montrent un changement de pente : l'imprégnation semble faire appel à deux voies, dont l'une se révèle après un temps plus long que l'autre.

L'exploration confirme que le bois final est plus impliqué dans l'imprégnation que dans le cas de l'aubier sain. Certains vaisseaux de la zone initiale poreuse, bouchés par un mycélium dense, ne sont plus conducteurs. Les liserés foncés, qui pourraient délimiter des zones attaqués par des mycéliums différents (germination de spores différentes) interviennent également dans le profil d'imprégnation en délimitant des zones imprégnées et des zones non imprégnées.

Nous n'avons pas observé de pénétration de liquide dans la direction tangentielle. Par contre, nous observons une pénétration non négligeable dans la direction radiale pour l'aubier de chêne dégradé. Le liquide a pénétré de manière assez hétérogène sous forme de taches au niveau des rayons ligneux multisériés. L'observation en microscopie électronique montre que les rayons ligneux larges sont criblés de cavités. Une photographie prise à un plus fort grossissement montre la désolidarisation des cellules de parenchyme radial.

Nos résultats confirment les données bibliographiques, selon lesquelles, les agents de pourriture blanche ont une action plus importante sur le parenchyme et les fibres-

trachéides associées aux vaisseaux que sur les parois des vaisseaux ou des fibres libriformes.

La présence d'un abondant feutrage mycélium dans les gros vaisseaux de la zone initiale poreuse peut être le point de départ d'une importante diffusion d'enzymes digestives vers les tissus voisins, plus sensibles à action cellulolytique et lignolytique du mycète lignivore.

- Duramen de chêne sessile dégradé par un agent de pourriture blanche

L'infradensité du duramen dégradé est de 425 kg/m^3 , alors que l'infradensité moyenne des échantillons de duramen sain testés est de 570 kg/m^3 . L'écoulement est observé dès les premières minutes de l'expérience dans le cas d'une imprégnation dans la direction longitudinale du duramen dégradé.

L'exploration d'une éprouvette imprégnée 30 minutes montre à la fois une imprégnation de certains gros vaisseaux et de plages de petits vaisseaux, qui ne sont d'ailleurs pas toujours en contact avec les gros vaisseaux imprégnés. Plus en profondeur, seuls certains gros vaisseaux sont imprégnés. On peut en conclure que l'imprégnation des gros vaisseaux et celle des petits vaisseaux semblent indépendantes et que la première est plus rapide que la seconde. Il est possible que le mycète agisse sur les thylles. En effet, les thylles sont proliférations à l'intérieur des vaisseaux, des cellules de parenchyme radial ou longitudinal. Nous avons vu précédemment que le tissu parenchymateux était particulièrement sensible à l'action hydrolytique des enzymes digestives d'un agent de pourriture blanche.

- Hêtre et sapin

Les résultats obtenus sur le hêtre et le sapin confirment les données bibliographiques existantes. Chez le hêtre, l'aubier est plus imprégnable que le bois parfait ; le bois initial plus perméable que le bois final ; l'imprégnation tangentielle plus importante que l'imprégnation radiale.

Chez le sapin, l'aubier est plus imprégnable que le bois parfait ; le bois final, moins sensible à l'aspiration des ponctuations aréolées, plus perméable que le bois initial ; l'imprégnation tangentielle plus importante que l'imprégnation radiale.

Notre travail a mis également en évidence la variabilité inter-espèce et individuelle, qui se manifeste sur l'imprégnabilité du bois.

Migration des gaz

Afin d'améliorer notre compréhension de l'influence de la thyllose sur la perméabilité des bois, notamment du chêne, nous avons complété notre étude en mettant en relation le type de thyllose de plusieurs feuillus à zone initiale poreuse et la perméabilité. Sachant qu'il existe une relation entre la perméabilité au liquide et la perméabilité au gaz, nous avons choisi d'étudier la perméabilité à l'air dans la direction longitudinale d'échantillons cylindriques prélevés à différentes distances de l'écorce. Avec du gaz, il est en effet plus facile de garantir un écoulement monophasique, donc de mesurer la perméabilité intrinsèque d'un échantillon.

Par ailleurs, nous avons observé en Microscopie Electronique à Balayage environnemental (ESEM) la structure fine des thylles des trois essences afin de comprendre si, au delà de l'abondance de la thyllose, des différences d'ordre qualitatif permettraient d'interpréter les résultats obtenus en perméabilité à l'air.

Pour l'ensemble des échantillons testés, la valeur de perméabilité a pu être mise en relation avec le type de thyllose (absente, avortée, naissante, compacte, très compacte). Nos observations tendent à montrer que contrairement à ce qui est généralement admis pour la grande majorité des bois présentant des thylles, chez *Robinia pseudoacacia*, ils se formeraient plus souvent à partir des cellules de parenchyme longitudinal qu'à partir des cellules de parenchyme radial.

Perspectives

Les résultats obtenus au cours de ce travail nous ont conduits à étudier plus précisément l'imprégnation du bois de chêne sessile, non seulement en fonction de la direction du flux et de la position du bois dans l'arbre, mais également en étudiant l'influence de la biodégradation du bois par un mycète lignivore, plus précisément un agent de pourriture blanche.

Les résultats montrent que la présence du mycète influence fortement la vitesse et la profondeur d'imprégnation du bois. L'action préférentielle des enzymes hydrolytiques sur certains tissus modifie le profil de pénétration du liquide dans le plan ligneux. Par exemple, les cellules de parenchyme sont davantage atteintes que les autres cellules.

Les thylls constituent le principal obstacle aux fluides dans les feuillus, notamment les feuillus à zone initiale poreuse. Comme nous avons pu le montrer grâce aux mesures de perméabilité à l'air, la densité de thyllose à l'intérieur des vaisseaux est corrélée à la perméabilité. Or, les thylls sont des expansions des cellules de parenchyme jouxtant les vaisseaux. La cellule parenchymateuse pénètre à l'intérieur d'un vaisseau à la faveur d'une ponctuation, croît à l'intérieur de celui-ci et peut même s'y diviser par mitose. Les thylls ont donc une composition chimique proche de celle du parenchyme, on peut donc s'attendre à ce qu'ils soient sensibles à l'action du mycète. Cette sensibilité a pu être démontrée.

Nos résultats ouvrent des perspectives d'études axées sur l'imprégnation de bois dégradé, qui représente un cas fréquent dans le cadre de bois anciens d'intérêt historique et culturel. Il pourrait être intéressant d'étudier l'effet de la biodégradation sur plusieurs essences, de mettre en relation l'infra-densité du bois attaqué, traduisant l'intensité de l'attaque lignivore, avec l'imprégnation. L'imprégnation par des résines ou d'autres substances consolidantes pourraient permettre de préciser le gain obtenu en termes de résistance

Conclusions et perspectives

Un résultat important de cette étude est la confirmation de la faible pénétration des liquides dans les directions tangentielle et radiale, à pression atmosphérique, dans le bois sain des trois essences testées, représentatives des principaux groupes de bois.

Références bibliographiques

- Agoua E., 2001, “Diffusivité et perméabilité du bois : validation de méthodologies expérimentales et prise en compte de paramètres morphologiques simples pour la modélisation physique”, thèse en sciences forestières et du bois, ENGREF-Nancy.
- Almeida G., Leclerc S., Perré P., 2007, “NMR imaging of fluid pathways during drainage of softwood in a pressure membrane chamber”, *International Journal of multiphase flow*, 34 : 312-321.
- Bakkour R., 2004, “Influence de l’espèce et de la provenance des chênes français sur la structure anatomique et les propriétés physiques des merrains”, Thèse ENGREF-Nancy.
- Bamber R.K., 1972, “The Formation and Permeability of Interstitial Spaces In The Sapwood of Some Pinus Species”, *Wood Technology, Forest Commission of N.S.W.*
- Bamber R.K., 1976, “Heartwood, its function and formation”, *Wood Science and Technology*, 10 (1) : 1-8.
- Bao F., Lu J., Avramidis S., 1999, “On the permeability of main species wood species in China”, *Holzforschung*, 5 (4) : 350-354.
- Blanchette R.A., Burnes T.A., Leatham G.F., Effland M.J., 1988a, “Selection of white-rot fungi for Biopulping”, *Biomass*, 15 : 93-101.
- Boeglin N., Kuzara S., Duchanois G., Masson D., 1993, “Etude du chêne de tonnellerie : perméabilité et cintrage”, *Revue Française d’Œnologie*, n° 144- nov. /déc.
- Bolton A.J., Petty J.A., 1978, “A model describing axial flow of liquids through conifer wood”, *Wood Science and Technology*, 12 (1) : 37-48.
- Buvat R., 1989, “Ontogeny Cell Differentiation and Structure of Vascular Plants”, Springer, 588.
- Carlquist S., 1988, “Comparative Wood Anatomy”, Springer-Verlag, 436.
- Chattaway M.M., 1949, “The development of tyloses and secretion of gum in heartwood formation”, *Aust. J. Sci. Res. B. Biol. Sci.* 2 : 227-240.
- Chen P.Y.S., Zhang G., Sambeek J.W., 1998, “Relationships among growth rate, vessel lumen area, and wood permeability for three central hardwood species”, *Forest Products Journal*, 48 (3) : 87-90.
- Choong E.T., McMillin C.W., Tesoro F.O., 1975, “Effect of surface preparation on gas permeability of wood”, *Wood Science and Technology*, 7 (4) : 319-322.

Choong E.T., Tesoro F.O., Manwiller F.G., 1974, "Permeability of twenty-two small diameter hardwoods growing on southern pine sites", *Wood and Fiber*, 6 : 91-101.

Cochard H., 1991, "L'eau dans l'arbre et le bois, Importance des phénomènes de cavitation et d'embolie", rapport INRA, Ecophysiologie, Nancy.

Comstock G.L., 1965, "Longitudinal permeability of green Eastern hemlock", *Forest Products Journal*, 15 (10) : 441-449.

Comstock G. L., 1967, "Longitudinal permeability of wood to gase and nonswelling liquids", *Forest Products Journal*, 17 (10) : 41-46.

Côté W.A., 1963, "Structural factors affecting the permeability of wood", *Journal of Polymer Science*, 2 : 231-242.

Cowling, 1961, "Comparative biochemistry of the decay of sweetgum sapwood by white rot and brown rot fungi", *Tech. Bull. n° 1258. USDA*.

Deglise X., Dirol D., 2000, "Durabilité du bois et problèmes associés", *Hermes science publications*, 415.

Dullien F.A.L., 1992, "Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure", 2nd Edition, *Academic Press Inc., Toronto*.

Efransjah M., 1988, "contribution à l'étude de la préservation du bois : amélioration de l'imprégnabilité de l'épicéa par un pré-traitement bactérien", Thèse, Université de Nancy I.

Feuillat F., 1996, "Contribution à l'étude des phénomènes d'échanges bois/vin/ atmosphère à l'aide d'un « fut » modèle", Thèse, ENGREF, Nancy.

Fujita M., Nakagawa K., Mori N., Harada H., 1978, "The season of tylosis development and changes in parenchyma cell structure in *Robinia pseudoacacia* L", *Bull. Kyoto Univ. For.*, 50 : 183-190.

Gérard A., 1990, "sculptures du retable de Grunewald au Musée Unterlinden de Colmar : traitement de désinsectisation", "La conservation du bois dans le patrimoine culturel", *Journées d'études de la S.F.I.C.C., Besançon – Vesoul, 8-9-10 novembre 1990* : 139-145.

Green F., Clausen C.A., 1999, "Production of polygalacturonase and increase of longitudinal gas permeability in Southern Pine by brown-rot and white-rot fungi", *Holzforshung*, 53 : 563-568

Hansmann C., Gindl W., Wimmer R., Teischinger A., 2002, "Permeability of wood - A Review", *Wood Research-Drevarsky Vyskum*, 47 (4) : 1-16.

Isaac C.P., Choong E.T., Fogg P.J., 1971, "Permeability variation within a cottonwood tree", *Wood Science*, 3 (4) : 231-237.

Jacquot C., Trénard Y., Dirol D., 1973, "Atlas d'anatomie des bois des angiospermes (essences feuillues)", Tome1, CTB, Paris.

Karimi M.A., 1995, "Caractérisation microscopique et macroscopique de l'écoulement dans le hêtre, interprétation à l'aide d'un modèle de percolation", Thèse, ENGREF-Nancy.

Keller R., 1994, "Le Bois Matériau d'ingénierie, Chapitre 1 : La Constitution du bois", A.R.B.O.L.O.R.

Klein G., 1923, "Zur Aetologie der Thyllen", *Z Bot*, 15 : 418-439.

Krawczyk J., 1992, "La tradition artisanale et la conservation des meubles anciens, Conservation-restauration des biens culturels", 4 : 6-11.

Levin L., Castro M.A., 1998. "Anatomical study of the decay caused by the white-rot fungus *Trametes trogii* (Aphyllophorales)", *Wood of Salix and Populus*.

Liese W., Bauch J., 1967, "On the closure of bordered pits in conifers", *Wood Science and Technology*, 1 (1) : 1-13.

Liese W., Schmid R., 1966, "Untersuchungen über den Zellwandabbau von Nadelholz durch *Trametes pini*", *Holz als Roh- und Werkstoff* 24 : 454-460.

Matsumura J., Booker R.E., Donaldson L.A., Ridoutt B.G., 1998, "Impregnation of Radiata Pine wood by vacuum treatment : Identification of flow paths using fluorescent dye and confocal microscopy", *IWA Journal*, 19 (1) : 25-33.

Murmanis L., 1975, "Formation of Tyloses in Felled *Quercus rubra* L.", *Wood Science and Technology*, 9 : 3-14.

Murmanis L., Chudnoff M., 1979, "Lateral flow in beech and birch as revealed by the electron microscope", *Wood Science and Technology*, 13 : 79-87.

Parameswaran N., Knigge H., Liese W., 1985, "Electron microscopic demonstration of a suberised layer in the tylosis wall of Beech and Oak", *IWA Bulletin*, 6 (3) : 269-271.

Parham R.A., Baird W.M., 1974, "Warts in the evolution of angiosperm wood", *Wood Sciences and Technology*, 8 : 1-10.

Perré P., 1987, "Le séchage Convectif de Bois Résineux Choix, Validation et Utilisation d'un Modèle", Thèse, Université Paris VII.

Perré P., 2007, “Fundamentals of Wood Drying”, A.R.BO.LOR et COST, 366.

Perré P., Karimi A., 2002, “Fluid migration in two species of beech (*Fagus silvatica* and *Fagus orientalis*) : a percolation model able to account for macroscopic measurements and anatomical observations”, *Maderas, Cienc.tecnol.*, 4 (1) : 50--68.

Philp F., 1999, “An alternative solution to an old problem : the conservation of an 18th century marquetry table”, Fourth Symposium on Wood and Furniture Conservation, Amsterdam, 10 décembre 1998 : 41-45

Von Reichenbach H., (Anonymous), 1845, “Untersuchungen über die zellernartigen Ausfüllungen der Gefässe”, *Bot. Z.*, 3 : 225-231, 241-253.

Richter H.G., Dallwitz M.J., 2000, “Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval”, in English, French, German, and Spanish.
Online version (4th May 2000) : www.biologie.uni-hamburg.de/b-online/wood/french

Robert, Catesson, 1990, “Biologie végétale, Tome 2, Organisation végétative” Doin.

Rudman P., 1965, “Studies in wood preservation. Part I. The penetration of liquids into eucalypt sapwoods”, *Holzforschung* 19 (1) : 5-13.

Saiki, 1982, “The Structure of Domestic and Imported Woods in Japan, An Atlas of Scanning Electron Micrographs”, Japan Forest Technical Association.

Saitoh T., Ohtani J., Fukazawa K., 1993, “The occurrence and morphology of tyloses and gums in the vessels of Japanese Hardwoods”, *IAWA Journal*, 14 (4) : 359-371.

Sano Y., Fukazawa K., 1991, “Structural Differences of Tyloses in *Fraxinus Mandshurica* var. *Japonica* and *Kalopanax Pictus*”, *IAWA Bulletin*, 12 (3) : 241-249.

Schmitt U., Liese W., 1994, “Wound tyloses in *Robinia pseudoacacia* L.”, *IAWA Journal*, 15 (2) : 157-160.

Schmitt U., Richter H.G., Muche C., 1997, “TEM study of wound-induced vessel occlusions in European ash (*Fraxinus excelsior* L.)”, *IAWA Journal*, 18 (4) : 401-404.

Schoch W., Heller I., Schweingruber F.H., Kienast F., 2004, “Wood anatomy of central European Species”. Online version : www.woodanatomy.ch

Schwarze F.W.M.R., Lonsdale D., Mattheck C., 1995b, “Detectability of wood decay caused by *Ustulina deusta* in comparison with other tree-decay fungi”, *European Journal of Forest Pathology*, 25 : 327-341.

Schwarze F.W.M.R., Fink S., 1998, "Host and cell type affect the mode of degradation by *Meripilus giganteus*", *New Phytologist*, 139 : 721–731.

Schwarze F.W.M.R., 2004, "Forest Pathology: Heart Rot and Wood Decay", In : Burley J, Evans J, Youngquist J (eds), *Encyclopedia of Forest Sciences*, Elsevier Science 4 : 808–816.

Schwarze F.W.M.R., Mattheck C., Engels J., 2004, "Fungal strategies of wood decay in trees", Springer, Heidelberg.

Schwarze F.W.M.R., Landmesser H., Zraggen B., Heeb M., 2006, "Permeability changes in heartwood of *Abies alba* and *Picea abies* induced by incubation with *Physisporinus vitreus*", *Holzforschung*, 60 : 450-454.

Schwarze F.W.M.R., 2007, "Wood decay under the microscope", *Fungal Biology Reviews*, 21 : 133-170.

Serck-Dewaide M., 1990, "Le retable de Sainte Colombe à Deerlijk XVIIe siècle – Etude et restauration", "La conservation du bois dans le patrimoine culturel", Journées d'études de la S.F.I.C.C., Besançon – Vesoul, 8-9-10 novembre 1990 : 113-124.

Shibata N., Harada H., Saiki H., 1980, "Formation and Wall Structure of Tyloses in *Castanea crenata* Sieb. et Zucc.", *Bulletin of the Kyoto University Forests*, 52 : 206-215.

Siau J.F., 1984, "Transport processs in wood", Spring-Verlag New York, 245.

Tarmian A., Perré P., 2009, "Air permeability in longitudinal and radial directions of compression wood of *Picea abies* L. and tension wood of *Fagus sylvatica* L.", *Holzforschung*, 63 (3) : 352-356

Triboulot M-C., 1998, "Studies into the properties of polyethylene glycol (PEG) in furniture conservation », Fourth Symposium on Wood and Furniture Conservation", Amsterdam, 10 décembre 1998 : 23-29.

Triboulot M-C., Bocquet J-F., Lyon F., Maurin E., 2005, "Hydrolyse enzymatique des colles de protéines animales : application à la restauration de panneaux plaqués anciens", *Les cahiers scientifiques du bois*, 3 : 177-190

Venet J., 1986, "Identification et classement des bois français", 2^e édition revue par R. Keller, ENGREF, Nancy.

Wardrop A.B., Davies G.W., 1961, "Morphological factors relating to the penetration of liquids into wood", *Holzforschung*, 15 (5) : 129-137.

Wilcox, 1970, "Anatomical changes in wood cell walls attacked by fungi and bacteria", *The botanical review*, 36 (1) : 1-28.

Références bibliographiques

Zhang C., Fujita M., Takabe K., 2003, "Contact and non contact proportions between axial elements and rays", IAWA Journal, 24 (3) : 247-255.

Zimmermann M.H., Tomlinson P.B., 1967, "A method for analysis of the course of vessels" IAWA, n° 852.

Zimmermann M.H., 1979, "The discovery of tylose formation by a viennese lady in 1845", IAWA Bulletin, 2-3 : 51-56

Zimmermann M.H., 1983, "Xylem structure and the ascent of sap", Springer series in wood science.

Zürcher E., Kucera L., Bosshard H.H., 1985, "Bildung und Morphologie der Thyllen : eine Literaturübersicht", Viertel-jahrsschr Natforsch Ges Zürich, 130 : 311-333.