

CHAPITRE 1. Revue de littérature

1.1 Généralités sur le matériau bois

La connaissance des propriétés anatomiques, physiques et mécaniques d'un matériau végétal est très importante pour une utilisation rationnelle de ce dernier. Étant donné son origine biologique, le bois est un matériau très variable, c'est-à-dire que ses caractéristiques varient entre les espèces, dans une même espèce et à l'intérieur d'un même arbre. Cette variabilité rend l'utilisation du bois plus complexe.

Les principales caractéristiques du matériau bois sont:

- Matériau hygroscopique:

Le bois est un matériau qui adsorbe et désorbe de l'eau en fonction de l'humidité relative et de la température de l'air qui l'entoure. Ce facteur influence ses dimensions et ses propriétés mécaniques. Le bois tend à arriver à une teneur en humidité d'équilibre (H_{eq}) avec le milieu qui l'entoure, cette teneur en humidité d'équilibre varie suivant les espèces. La teneur en eau ou teneur en humidité du bois (H) est souvent exprimée comme étant la masse de l'eau qu'il contient ramenée à la masse anhydre. H est une grandeur sans dimension souvent exprimée en pourcentage et pouvant facilement avoir des valeurs supérieures à 100%.

- Matériau orthotrope:

Les propriétés du bois varient selon la direction considérée, ce qui fait du bois un matériau anisotrope. À l'échelle macroscopique de quelques centimètres, le bois est considéré comme un matériau homogène et orthotrope. Il présente alors trois directions principales (longitudinale, radiale et tangentielle) et trois plans ligneux bien définis : le plan transversal (radial-tangentiel) qui est perpendiculaire à l'axe de la tige ; le plan radial (radial-longitudinal) qui est tangent aux cernes de croissance et le plan tangentiel (tangentiel-longitudinal) qui est parallèle aux cernes de croissance de la tige.

- Structure cellulaire:

La figure 1.1 montre les directions principales du bois et la structure tridimensionnelle générale des feuillus. La connaissance de ces caractéristiques est importante pour mieux comprendre les propriétés de ce matériau.

Une brève description des caractéristiques des éléments montrés à la figure 1.1 suit ci-dessous (Cloutier 2002):

- les éléments de vaisseaux sont des cellules spécialisées dans la conduction de la sève brute et sont présents seulement chez les feuillus. Les vaisseaux sont disposés les uns sur les autres et sont interconnectés par des ponctuations et cloisons perforées. La longueur et le diamètre des vaisseaux varient selon l'espèce, ce dernier est mesuré selon la direction tangentielle et varie de 20 μm jusqu'à 300 μm en fonction des espèces. Les parois latérales des vaisseaux sont abondamment ponctuées, la dimension et la disposition des ponctuations sont importantes lors du séchage et de la pénétration des substances dans le bois. Des thylls peuvent se développer normalement dans les vaisseaux de certaines espèces. Les vaisseaux contiennent parfois des dépôts de tannins, gommés, cristaux, etc. ;
- les ponctuations peuvent être définies comme une discontinuité dans la paroi cellulaire donnant naissance à une ouverture ;
- les fibres servent à la conduction de la sève brute et au support mécanique de la tige. Ce sont de longues cellules de faible diamètre, possédant des parois cellulaires épaisses mais ne possédant pas de cloison perforée dans les bouts. La proportion des fibres varie beaucoup entre les espèces et influence la résistance mécanique du bois ;
- le parenchyme axial (longitudinal) sert à l'entreposage et à la distribution de substances nutritives, pour cela, leur paroi est peu lignifiée et abondamment ponctuée. Les cellules de parenchyme sont connectées entre elles par des ponctuations simples ;
- Les rayons ont un rôle de conduction radiale et d'accumulation de substances de réserve. Chez les feuillus, la hauteur des rayons varie d'environ 20 μm (une cellule) jusqu'à 50 mm. La proportion en volume des rayons a un effet important sur la stabilité dimensionnelle, la formation de gerces et de fentes internes lors du séchage, la perméabilité et la résistance mécanique. Des contenus cellulaires (cristaux, silice, amidon, gommés, résines, tannins, huiles, latex, etc.) sont souvent présents dans les cellules des rayons.

- Matériau poreux:

Le « réseau cellulaire » qui est formé par les parois, les lumens et les ponctuations des différents éléments cellulaires fait du bois un matériau poreux. Quelques aspects

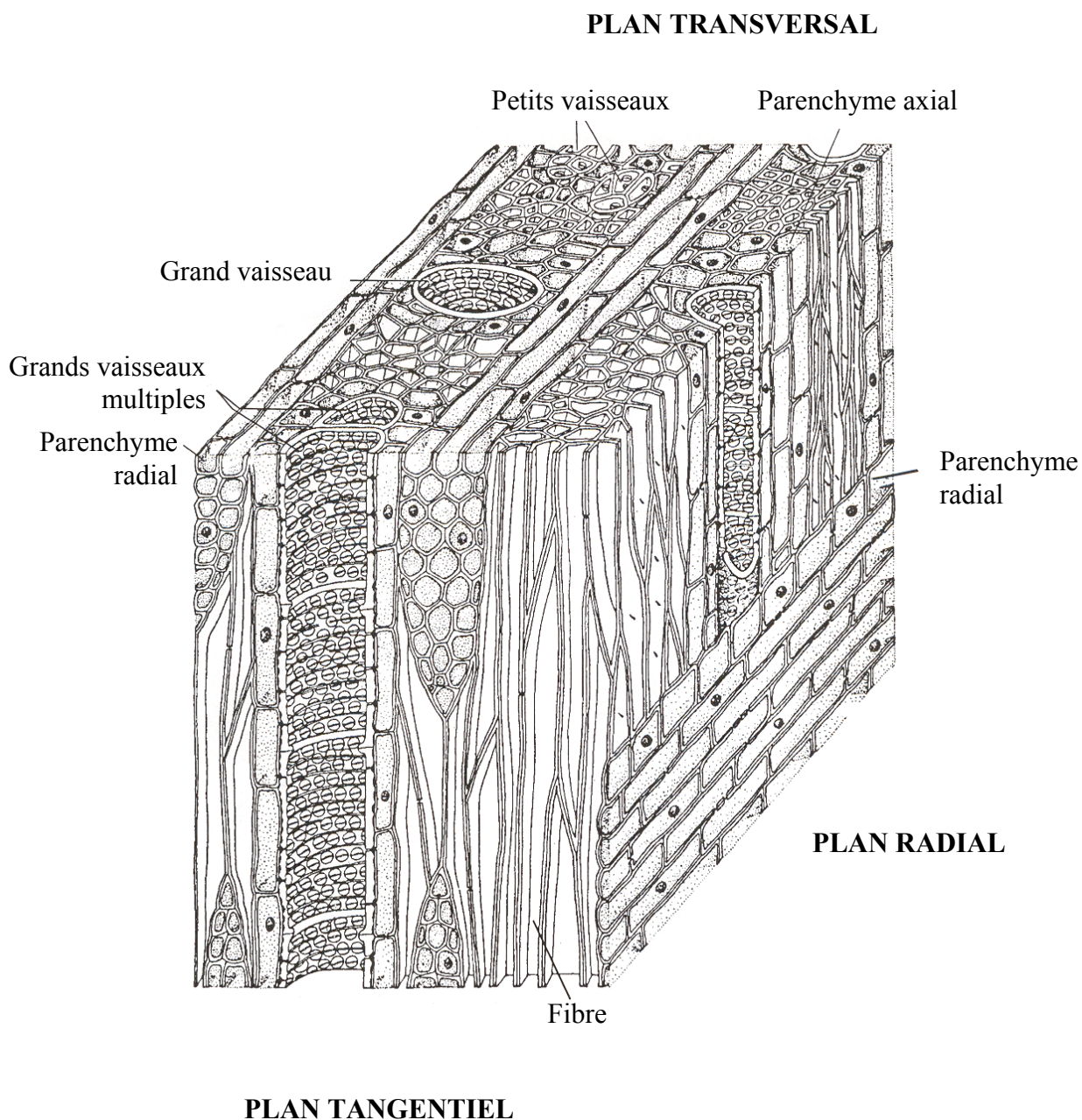


Figure 1.1. Structure tridimensionnelle générale des feuillus (d'après Fahn 1990).

quantitatifs qui caractérisent les matériaux poreux sont : la surface spécifique de la matrice solide, l'espace poreux effectif et la distribution des tailles des pores.

1.2 Relations bois – eau

1.2.1 Domaine hygroscopique

De par sa nature hygroscopique, le bois tend constamment vers un équilibre hygrothermique avec l'air qui l'entoure: à cet équilibre correspondent une teneur en humidité ainsi que des propriétés définies du bois (Djolani 1970).

Plusieurs grandeurs physiques, dépendantes les unes des autres, peuvent servir à caractériser l'air humide. Toutefois, la température et l'humidité relative de l'air (HR) sont les plus utilisées (Goulet et Djolani 1968).

L'humidité d'équilibre du bois augmente avec l'humidité relative de l'air et diminue avec l'élévation de la température. Ces mêmes variables affectent considérablement les principales caractéristiques physiques du bois. Les changements des propriétés du bois avec sa teneur en humidité sont qualifiés "d'effets de premier ordre de la sorption d'humidité" dans le bois (Djolani 1970).

Le bois vert contient généralement l'eau sous trois formes : l'eau liquide qui remplit partiellement ou totalement les cavités cellulaires; la vapeur d'eau dans les cavités cellulaires et l'eau dans les parois cellulaires, laquelle est intimement associée et combinée avec la structure de ces parois surtout à des faibles degrés d'humidité du bois. L'eau liquide est également appelée de l'eau libre et celle dans les parois cellulaires est appelée de l'eau liée. L'eau liquide est la première à sortir du bois vert durant le séchage car cette eau est retenue plus faiblement que l'eau liée. On suppose depuis longtemps que ce n'est qu'après la perte de l'eau liquide que l'eau liée commence, à son tour, à quitter les parois des cellules. Le point où seulement la vapeur d'eau est présente dans les cavités cellulaires et que les parois cellulaires sont remplies d'eau est appelé le « point de saturation de fibres (PSF)» ou « saturation des membranes (H_{sm}) ». Une discussion plus détaillée du PSF sera donnée à la section 1.2.5.

Le domaine hygroscopique du bois s'étend de l'état anhydre ($H=0\%$), qui constitue la teneur en humidité du bois à une humidité relative de l'air très faible ($HR \approx 0\%$), jusqu'au PSF

(aux environs de 30% $H_{\text{éq}}$ à 20°C), qui correspond à un équilibre en adsorption dans la vapeur d'eau saturée ($HR \approx 100\%$) (Hernández 1989).

1.2.2 Application des concepts thermodynamiques

Buckingham (1907) a été le premier chercheur à proposer l'idée que le mouvement d'eau dans les sols résulte de la différence de potentiel capillaire entre deux points du sol. Ce chercheur a considéré que le sol exerce une attraction suffisante pour maintenir l'eau malgré l'action de la gravité, et que cette attraction diminue à mesure que la quantité d'eau contenue dans le sol augmente. Il a proposé le terme 'potentiel capillaire' (ψ_{cap}) pour décrire cette attraction. Néanmoins, si la quantité d'eau contenue dans deux types de sol est la même, cela ne veut pas dire que l'état de l'eau soit nécessairement le même. Cela veut dire que le concept de potentiel capillaire ne nous permet pas de comparer, sur une même échelle, l'état de l'eau. Gardner et al. (1922) ont alors proposé de montrer la relation entre la pression de l'eau dans le sol et son potentiel capillaire. À partir de 1935, il y a eu plusieurs études sur le potentiel chimique (potentiel total) de l'eau dans le sol, par rapport à l'eau libre à une même température. Même si ces concepts expriment la même théorie, ils ont été appelés de façons différentes. Par exemple, Veihmeyer et Edlefsen (1937) ont utilisé le terme potentiel hydrique. Conséquemment, avec l'introduction du concept de potentiel hydrique et en utilisant les concepts thermodynamiques, l'eau dans un milieu peut être caractérisée en terme d'état d'énergie (Iwata et al. 1994).

Bien qu'initialement développé pour les sciences du sol, le concept de potentiel hydrique a aussi été utilisé pour les analyses de l'interaction entre l'eau et d'autres matériaux poreux. De fait, ce concept a eu une grande application dans les recherches sur le bois. L'utilisation de ce concept élimine certaines ambiguïtés dues à la détermination du point de saturation des fibres. Il permet de classer ainsi les différentes formes d'humidité du bois (eau libre, eau capillaire et eau hygroscopique) et permet aussi la comparaison quantitative, c'est-à-dire selon une échelle unique, de l'état de l'eau dans plusieurs types de bois (non traité, chimiquement modifié, etc.) (Zhang et Peralta 1999).

Le concept de potentiel hydrique (ψ) est dérivé de la thermodynamique classique. Il est défini comme suit:

$$\psi = \bar{G} - \bar{G}_0 \quad (1.1)$$

où \bar{G} = énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état considéré ($\text{J kg}^{-1}_{\text{eau}}$);
 \bar{G}_0 = énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état de référence ($\text{J kg}^{-1}_{\text{eau}}$).

L'état de référence généralement utilisé est une nappe d'eau libre et pure à la pression atmosphérique, à une hauteur donnée et à la température de l'eau à l'état considéré. À l'état de référence, on assume que ψ est nul (Cloutier 1991).

Le concept de potentiel hydrique est dérivé de la combinaison de la première et de la seconde loi de la thermodynamique classique avec la fonction de l'énergie libre de Gibbs. Le système bois-eau-air est revu comme un système de trois phases dans lequel seulement la phase "eau" est considérée. L'eau dans le bois, incluant les solutés dissous, est donc considérée comme étant un système propre. Étant donné que les mouvements d'eau dans le bois pendant le séchage sont extrêmement lents, ce système peut être considéré comme un système fermé en équilibre thermodynamique avec son milieu ambiant (Cloutier et Fortin 1991).

Le potentiel hydrique exprime fondamentalement la forme de l'énergie par unité de masse, en utilisant comme unité J kg^{-1} . Étant donné que l'eau est considérée incompressible, sauf à l'état quasi anhydre, sa densité est pratiquement indépendante du ψ ou de H . Pour cette raison, ψ peut être exprimé soit par unité de masse, soit par unité de volume. De cette façon, l'unité de ψ lorsque celui-ci est exprimé en énergie par unité de volume sera le Pascal (Cloutier et Fortin 1991).

Le potentiel hydrique ou potentiel total peut être exprimé comme la somme des contributions séparées des différents champs de force agissant sur l'eau dans le bois (Fortin 1979 ; Cloutier 1991 ; Iwata et al. 1994):

$$\psi = \psi_m + \psi_o + \psi_p + \psi_g + \psi_{e.f.} + \dots \quad (1.2)$$

où: ψ_m = potentiel matriciel, dû à l'effet combiné des forces de capillarité et de sorption;
 ψ_o = potentiel osmotique, dû à la présence de solutés dans l'eau du bois;
 ψ_p = potentiel de pression qui peut être relié aux effets de tension superficielles et/ou aux forces de van der Waals;
 ψ_g = potentiel gravitationnel qui tient compte de la gravité;
 $\psi_{e.f.}$ = potentiel dû à l'effet combiné des autres champs de force agissant sur l'eau du bois ;
 Les pointillés indiquent qu'il est théoriquement possible d'ajouter d'autres composantes.

Une description détaillée de chacune des composantes présentées dans l'équation 1.2 est donnée par Fortin (1979).

Comme nous l'avons mentionné, l'énergie libre est un concept important pour comprendre l'état de l'eau dans le bois. D'autres concepts thermodynamiques (l'enthalpie et l'entropie) sont importants pour mieux comprendre comment les molécules d'eau sont sorbées par les parois cellulaires du bois. Le deuxième principe de la thermodynamique définit la notion d'entropie (S^*) comme la mesure du désordre moléculaire d'un système. L'entropie augmente avec la température. En effet, cette dernière génère une agitation moléculaire qui conduit à un accroissement du désordre du système (Pérez et Romulus 1993). L'enthalpie peut être considérée comme l'énergie interne totale d'un système (Siau 1995). La relation entre l'enthalpie, l'entropie et l'énergie libre est exprimée par l'équation suivante :

$$H^* = G + TS^* \quad (1.3)$$

où: H^* = enthalpie;
 G = énergie libre (énergie de Gibbs)
 T = température du système
 S^* = entropie

L'expansion de la vapeur ou d'un gaz correspond à une diminution de l'énergie libre (augmentation du degré de désordre du système ou de l'entropie). Lorsque l'air est saturé, celui-ci est en équilibre hygroscopique avec l'eau à l'état liquide : ils ont la même énergie libre. L'air non saturé a une énergie libre plus faible que l'air saturé, ce qui génère un gradient d'énergie libre entre l'eau liquide et l'air aboutissant à l'évaporation de l'humidité additionnelle. Ce déficit d'énergie libre de la vapeur non saturée ou de l'eau sorbée peut être vu comme la force qui régit la diffusion d'humidité dans le bois (Siau 1995).

Certains travaux ont déterminé l'enthalpie, l'entropie et l'énergie libre de l'eau sorbée dans le bois. Koumoutsakos et Avramidis (1999) ont observé que les changements en enthalpie (ΔH^*) et ceux en entropie (ΔS^*) sont toujours négatifs (en adsorption et en désorption). Cela montre le niveau élevé de la force d'attraction entre les molécules d'eau et les parois cellulaires. Ils ont aussi observé que les valeurs absolues de ΔH^* diminuent avec une augmentation de H_{eq} . Cela montre qu'avec l'augmentation de l'humidité les forces d'attraction des molécules d'eau diminuent. D'autre part, les valeurs absolues de ΔS^* diminuent avec l'adsorption d'humidité, ce qui peut être expliqué par une augmentation de l'ordre des molécules d'eau sorbées par le bois. Les valeurs absolues de ΔH^* et de ΔS^* étaient plus élevées en désorption qu'en adsorption, ce qui montre que les forces d'attraction moléculaires sont plus élevées dans le dernier cas. Avramidis (1992) a observé des résultats semblables pour les valeurs de ΔH^* et de ΔS^* . En ce qui concerne les changements d'énergie libre de Gibbs (ΔG), ces valeurs deviennent moins négatives avec une augmentation de la teneur en humidité et de la température. Cela peut être expliqué par la plus grande facilité à rendre les sites de sorption disponibles lors de l'augmentation de H .

L'enthalpie de chaque composante du système lors du séchage du bois a été déterminée par Tremblay et al. (1999). Ces auteurs ont conclu, qu'au début du processus, l'enthalpie de l'eau capillaire (H_{cap}) compte pour la plus importante proportion de l'enthalpie totale. Avec la diminution de l'humidité du bois, H_{cap} diminue et devient nulle au voisinage du PSF. L'enthalpie de l'eau liée et celle de la paroi cellulaire sont importantes dans tout l'intervalle d'humidité (de l'état vert jusqu'à l'état anhydre), mais la proportion de H^* totale expliquée par ces deux composantes devient plus importante avec la diminution de l'humidité du bois.

1.2.3 Hystérèse de la sorption d'humidité

Plusieurs travaux ont montré qu'à une température fixe et à une humidité relative de l'air donnée les équilibres atteints au terme d'une perte ou d'une prise d'humidité diffèrent sensiblement les uns des autres. Ce phénomène est désigné comme hystérèse de la sorption d'humidité.

L'adsorption désigne la fixation d'eau, soit au niveau moléculaire de la face interne d'un corps soit au niveau des capillaires présents dans les membranes. L'inverse, la perte d'humidité, est appelée la désorption. Le terme sorption s'applique lorsqu'aucune

distinction n'est faite entre ces deux états (Goulet et Fortin 1975). La présence de trois zones distinctes dans la courbe de sorption du bois indique que celle-ci est du type polymoléculaire, ces zones étant décrites comme suit:

- la zone à faibles valeurs de HR correspond à la fixation de la première couche de molécules d'eau sur les sites de sorption des membranes cellulaires, l'énergie de liaison est importante et les molécules d'eau peu mobiles,
- à des HR intermédiaires, les molécules d'eau viennent se fixer sur la première couche déjà absorbée, l'énergie de liaison diminue avec le nombre de couches,
- à des valeurs élevées de HR, voisinant 100%, les molécules adsorbées sur les différents sites vont interagir et former un film liquide continu sur la surface des pores (condensation capillaire). Lorsque le HR atteint 100%, la teneur en eau d'équilibre du bois correspondra à celle de la saturation intégrale.

La "boucle d'hystérèse de sorption d'humidité" du bois à température constante peut être observée aux figures 1.2 à 1.4, où les branches d'adsorption et de désorption ont chacune une forme sigmoïdale. Cette boucle, qui forme une pointe allongée aux basses humidités, voit sa largeur s'accroître progressivement, passer par un maximum à une humidité relative de l'air d'environ 70%, pour se terminer ensuite de nouveau en pointe. Le rapport des teneurs en humidité à l'adsorption (H_a) et à la désorption (H_d) ($v = H_a/H_d$) est appelé "rapport d'hystérèse". Celui-ci se révèle pratiquement constant pour des humidités relatives de l'air situées entre 30% et 80%.

La figure 1.2 montre le travail de Weichert (1963) qui a étudié l'effet de la température sur les isothermes de sorption d'humidité du bois de hêtre. On observe que l'hystérèse est fortement affectée par la température: à 50°C elle est déjà trois ou quatre fois moindre qu'à 25°C et elle disparaît à 75°C pour le cas de hêtre. Une diminution de la boucle d'hystérèse est également observée pour le bois d'érable à sucre lorsque la température passe de 5°C à 50°C (Djolani 1970).

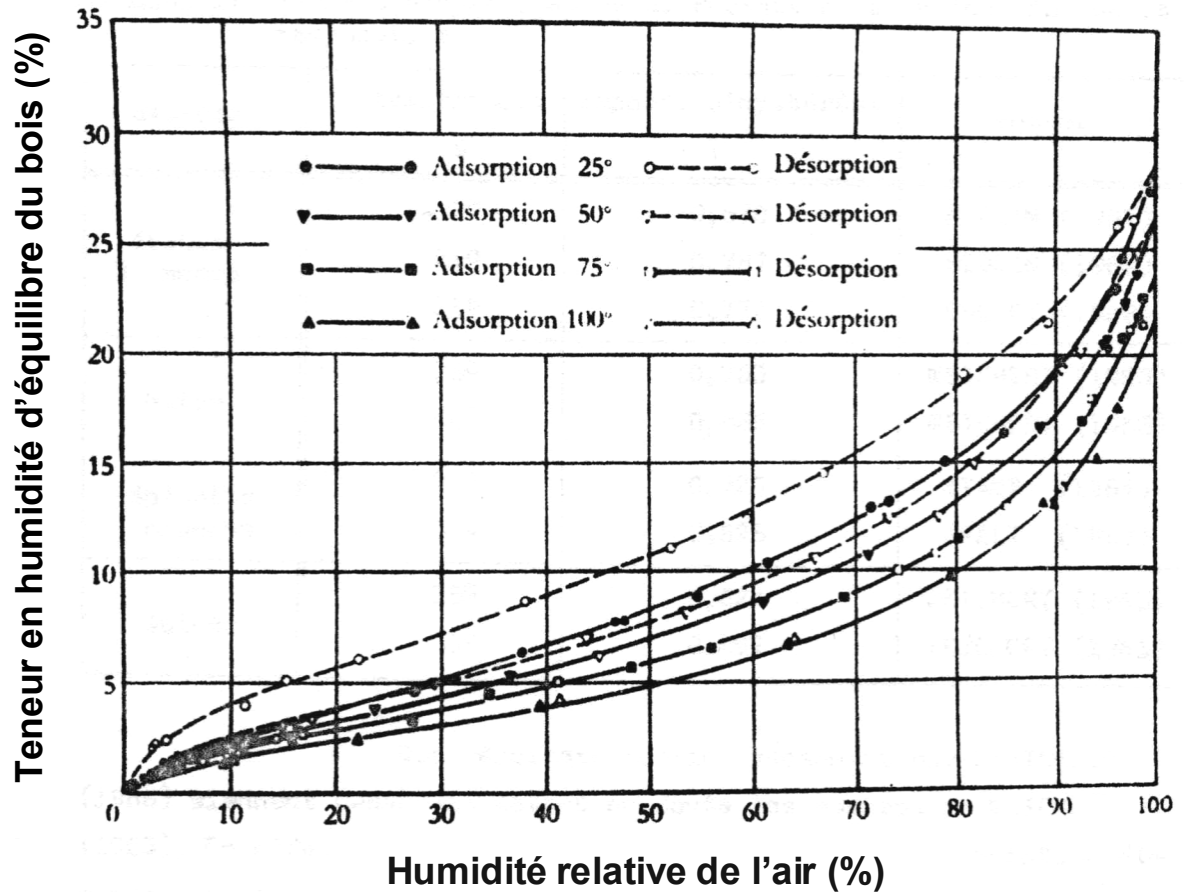


Figure 1.2. Isothermes d'adsorption et de désorption du bois de hêtre à 25°C, 50°C, 75°C et 100°C (d'après Weichert 1963).

Par contre, selon Engelhardt (1979), la boucle d'hystérèse du bois de hêtre devrait disparaître autour de 100°C, car les traitements thermiques diminuent sa capacité de sorption de façon irréversible, déjà à partir de 80°C. L'ampleur de ces effets dépend de l'intensité du traitement en termes de température, de l'humidité relative de l'air et de la durée, mais ils sont aussi liés à l'espèce ligneuse et aux dimensions de l'échantillon. L'hystérèse de la sorption apparaît comme un phénomène stable. Selon Djolani (1970), les oscillations de la température et de l'humidité relative de l'air affectent la largeur apparente de l'hystérèse, mais les effets réels sont faibles.

Djolani (1970) a constaté que les causes exactes de l'hystérèse de sorption ne sont pas encore bien connues. Selon cet auteur, une première théorie simple et encore acceptée pour expliquer la sorption d'humidité et l'hystérèse est celle d'Urquhart et Williams (1924). Elle fait appel essentiellement aux radicaux hydroxyles (OH^-) des matières ligno-cellulosiques: ces derniers sont les principaux responsables de la sorption des molécules d'eau qu'ils attirent mais ils tendent aussi, quoique à un degré moindre, à s'attirer les uns les autres c'est-à-dire à se saturer mutuellement. Ces dernières liaisons seraient plus nombreuses à l'état anhydre qu'à l'état saturé, ce qui explique en partie les effets de premier ordre de la sorption d'humidité dans le bois, entre autres sa plus grande résistance mécanique à l'état sec qu'à l'état humide. Toutefois, dans ces conditions, elles seraient aussi plus nombreuses à l'adsorption qu'à la désorption, rendant ainsi l'accès aux radicaux OH^- plus difficile dans le premier cas que dans le second, ce qui expliquerait également l'hystérèse de la sorption d'humidité. La boucle d'hystérèse pourrait également avoir comme origine les différents taux de cristallinité de la matière ligno-cellulosique, étant donné que ce taux diminue avec une augmentation de l'humidité relative de l'air (Ant-Wuorinen et Visapää 1960). Une autre théorie est celle de Malmquist (1958, 1959), qui suggère une structure qui serait différente à l'adsorption et à la désorption; plus exactement la matière ligneuse présenterait une plus grande cohésion dans le premier cas que dans le second. La plupart des hypothèses susmentionnées se rapportent à l'hystérèse obtenue à des faibles teneurs en $H_{\text{éq}}$. À des teneurs élevées de $H_{\text{éq}}$ (eau capillaire) le bois est un matériel inerte et stable, dans ce cas l'irrégularité des formes des espaces poreux et l'effet de la bouteille d'encre doivent être les principaux responsables de la forte hystérèse observée à des H élevées (comme montré à la figure 1.13, section 1.4.2.2).

La figure 1.3 présente les résultats de cinq essais de désorption du bois d'érable à sucre réalisés par Goulet (1968). Les essais 1, 2, 3 et 4 ont été faits sur des échantillons à l'état vert tandis que pour l'essai 5 les échantillons ont été préalablement conditionnés à une teneur en humidité au voisinage du PSF. On remarque qu'au-dessus de 60% (HR), les équilibres en désorption divergent en fonction de la saturation d'eau initiale. Quelques chercheurs ont considéré cette particularité comme étant propre à la première désorption (Higgins 1957; Spalt 1957; Stamm 1964). Skaar (1988) a attribué ce phénomène à une perte initiale irréversible de l'hygroscopicité du bois vert ou saturé d'eau. Toutefois, son

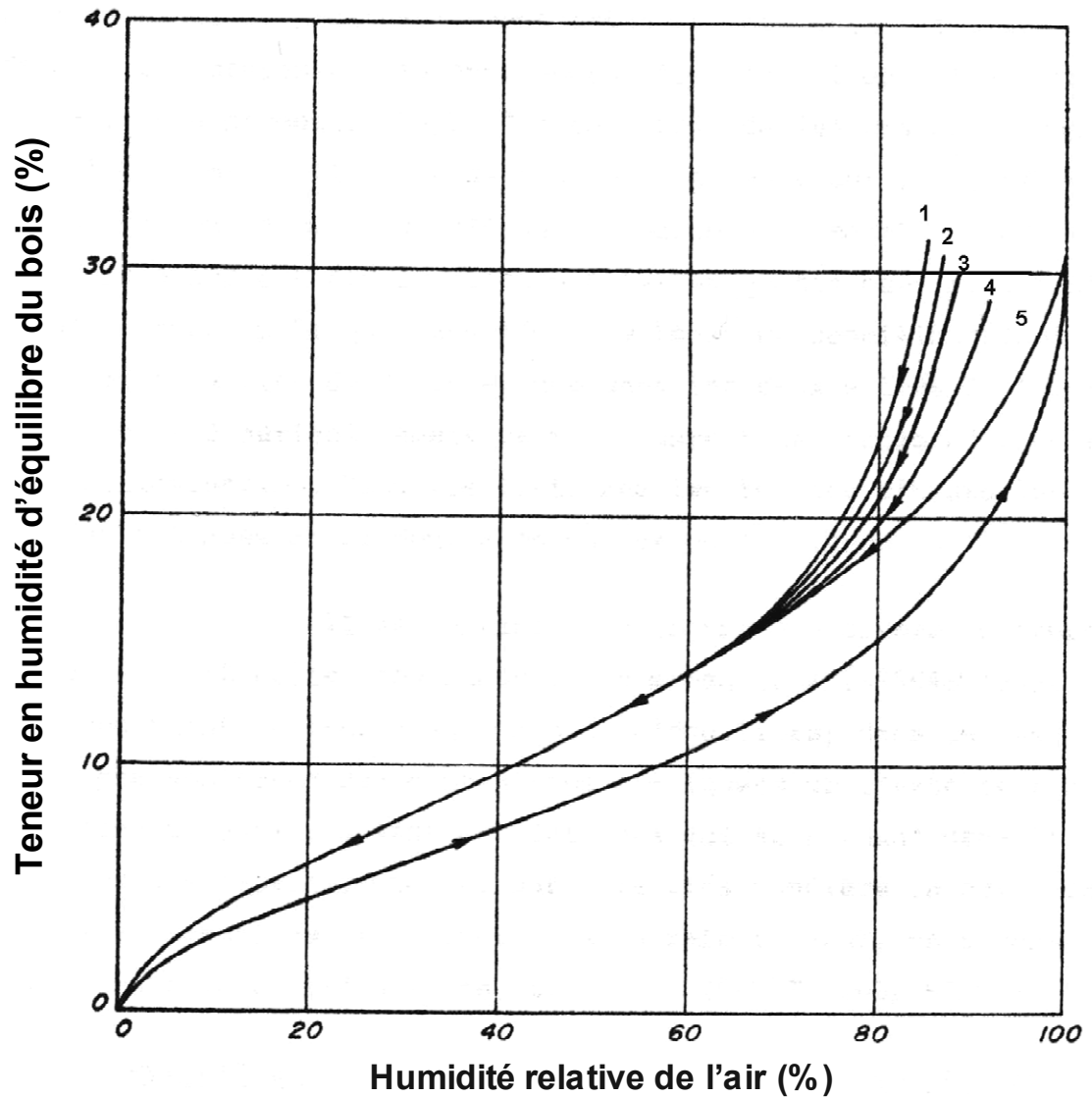


Figure 1.3. Teneur en humidité d'équilibre du bois d'érable à sucre en fonction de l'humidité relative de l'air à 21°C (d'après Goulet 1968).

caractère reproductible a été confirmé par plusieurs chercheurs (Goulet 1967; Fortin 1979; Hart 1984; Cloutier et Fortin 1991 ; Goulet et Hernández 1991, Hernández et Bizoñ 1994). Goulet (1967) a nommé ce phénomène "hystérèse à la saturation d'humidité". D'autre part, les essais 3 et 4 de la figure 1.3 ont été réalisés en utilisant des échantillons d'orientation longitudinale, tandis que l'essai 2 a été réalisé sur des échantillons d'orientation tangentielle. L'orientation et les dimensions des échantillons ne semblent pas affecter l'hystérèse de la sorption.

Peralta (1995) a étudié la sorption d'humidité du bois de tulipier (*Liriodendron tulipifera* L.) autant en adsorption qu'en désorption. Les diverses conditions à l'adsorption ont toujours été faites à partir de l'état anhydre. Par contre, la désorption a été réalisée suite à une adsorption ou saturation totale ou suite à des adsorptions intermédiaires (32%, 53%, 75% et 92% HR) (Figure 1.4). Le travail montre que les isothermes d'adsorption depuis l'état anhydre et de désorption depuis l'état saturé délimitent la boucle d'hystérèse et que les courbes de désorption intermédiaires peuvent atteindre n'importe quel point à l'intérieur de cette boucle. Il est aussi montré qu'il faut au moins 40% de changement d'humidité relative pour que les isothermes de désorption intermédiaires rejoignent la courbe de désorption limite et que seulement la courbe obtenue pour la désorption de 92 à 0% HR a présenté une forme sigmoïdale. Comme cela a déjà été observé par d'autres chercheurs, toutes les courbes de sorption ont présenté de l'hystérèse, même celle entre les teneurs les plus faibles d'humidité relative (32 à 0% HR). Une remarque doit être faite sur le travail de Peralta (1995) puisque la désorption dite totale n'a pas débuté à partir de la saturation intégrale du bois mais plutôt à environ 50% H. Ce facteur affecte nécessairement la forme initiale de la courbe de désorption.

1.2.4 Hygroscopicité du bois à des humidités relatives de l'air élevées

Les isothermes de sorption des figures 1.2 à 1.4 ont été extrapolées pour des humidités relatives au-dessus de 98%. Les méthodes de sorption utilisées dans ces travaux ne permettent pas d'obtenir un contrôle assez précis à ces niveaux de HR. Cependant, les données d'humidité d'équilibre du bois à des HR si élevées sont très importantes puisque c'est dans cette région que les forces capillaires et de l'eau liquide interagissent dans le bois.

La figure 1.5 montre deux isothermes de désorption du bois de chêne rouge, où l'axe de l'humidité relative de l'air est présenté en échelle logarithmique pour mieux étaler les valeurs à proximité du PSF. La comparaison entre les courbes de sorption de la figure 1.5 et celles de la figure 1.3 (obtenues par la méthode traditionnelle de solutions salines saturées) nous permet de signaler un important désavantage de la méthode traditionnelle : la partie de la courbe entre 98% et 100% HR est généralement extrapolée. Le résultat de cette

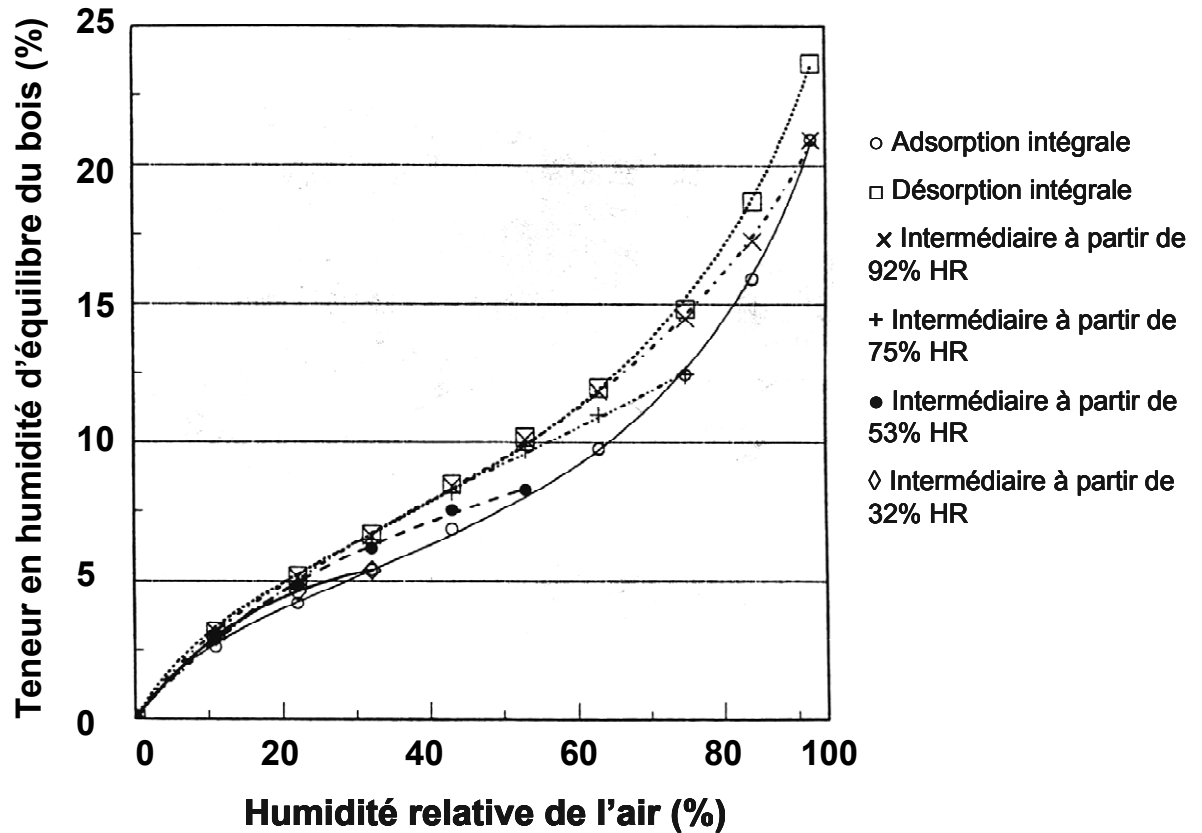


Figure 1.4. Courbes de sorption obtenues pour l'adsorption et la désorption intégrale et pour les désorptions intermédiaires à 30°C (d'après Peralta 1995).

extrapolation est une teneur en humidité d'environ 30% à 100% HR. Selon l'équation de Kelvin (équation 1.4, section 1.4.2.1) tous les pores doivent être remplis d'eau lorsque HR est égale à 100%, ce qui, en toute rigueur, implique une saturation intégrale du bois.

L'utilisation des méthodes qui assurent un contrôle adéquat de HR et qui rendent possible la détermination de la relation entre le potentiel hydrique (ψ), le potentiel chimique (μ), la pression capillaire (P_c) et la teneur en humidité dans le bois solide (H) au-dessus du PSF a fait l'objet de plusieurs études (Perem 1954; Stone et Scallan 1967; Griffin 1977; Fortin 1979; Spolek et Plumb 1981; Choong et Tesoro 1989; Cloutier et Fortin 1991). Les techniques généralement utilisées sont celles de la plaque sous tension, la plaque sous pression, la membrane poreuse et celle par centrifugation.

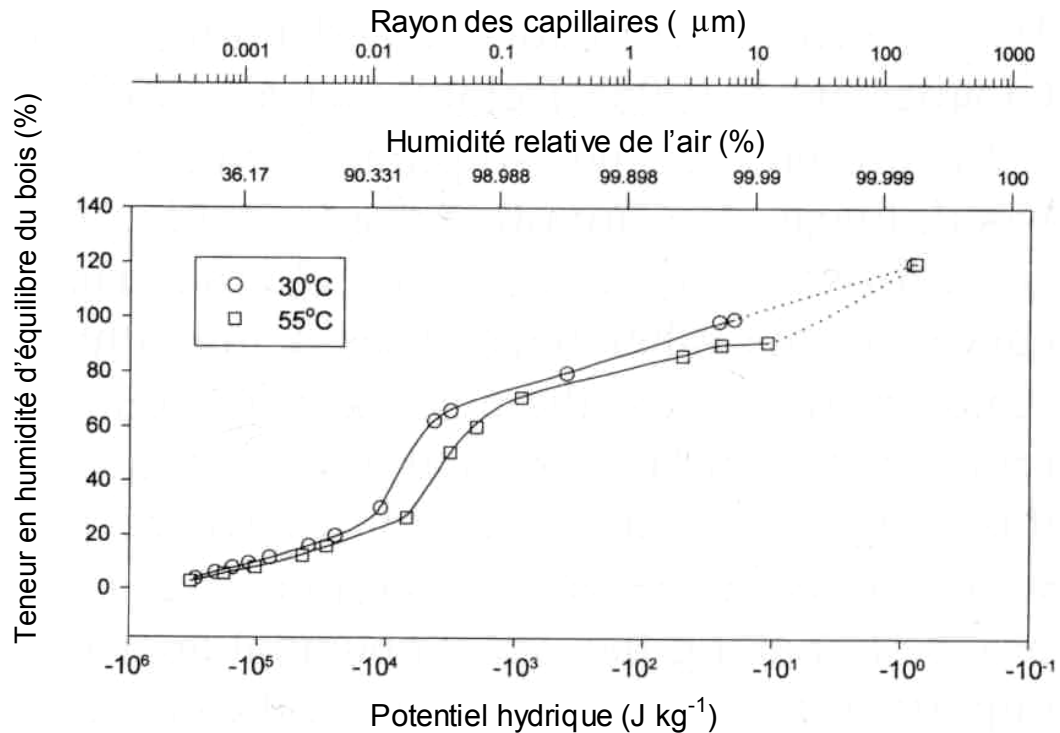


Figure 1.5. Isothermes de désorption en fonction du potentiel hydrique du bois de chêne rouge à 30°C et 55°C (d'après Zhang et Peralta 1999).

La technique de la plaque sous tension consiste à connecter la phase liquide de l'eau présente dans le bois avec l'eau liquide dans la plaque poreuse à une faible pression obtenue par une colonne d'eau. Les tensions qui peuvent être atteintes ou obtenues sont limitées par la taille et la largeur des pores dans la plaque poreuse et par des problèmes de formation de bulles d'air dans la colonne d'eau. La tension enlève l'eau du bois au travers de la plaque et est contraire aux forces de tension superficielle du bois. Différentes tensions appliquées au système produiront des teneurs en humidité d'équilibre différentes, dépendant de la grandeur et de la disposition des pores dans le bois (Fortin 1979). Généralement cette méthode est utilisée pour des pressions de 0 à 0,05 bar.

La technique de la plaque sous pression est similaire à celle de la plaque sous tension, mais le bois et la plaque sont placés ensemble dans un récipient et soumis à une pression positive du gaz pendant l'alimentation en eau sous pression atmosphérique au-dessous de la plaque poreuse (Cloutier et al. 1995). Une technique similaire appelée membrane poreuse est basée sur les mêmes principes que la technique de la plaque sous pression, mais une membrane

poreuse usuellement faite d'acétate de cellulose est utilisée au lieu de la plaque de céramique. La plus faible capillarité de la membrane permet d'appliquer des pressions allant jusqu'à environ 10000 kPa.

L'eau présente dans le bois peut être soumise à des forces de masse causées par l'action gravitationnelle développée par centrifugation. L'eau liquide coule du bois jusqu'à ce que les forces capillaires soient égales à la force de masse du bois. Puisque la force de masse est proportionnelle au carré de la vitesse angulaire de la centrifugation, la relation entre les forces capillaires et la teneur en humidité peut être établie en mesurant l'humidité d'équilibre atteinte à différentes vitesses angulaires. Toutefois, la force de masse est proportionnelle à la distance du centre de rotation de la centrifugeuse jusqu'au point considéré dans le bois. Ainsi, la force de masse appliquée à l'eau contenue dans le bois n'est pas uniforme. Cette technique a été utilisée par Perem (1954) pour déterminer le point de saturation des fibres et par Spolek et Plumb (1981) et Choong et Tesoro (1989) pour déterminer la relation entre la pression capillaire et la saturation dans le bois de 0 à 50 kPa et de 60 à 2110 kPa, respectivement.

Dans le présent travail la technique de la membrane poreuse sous pression est utilisée, laquelle permet de mieux contrôler la quantité de vapeur d'eau à des humidités relatives de l'air élevées, soit au-dessus de 96% HR. Cloutier et Fortin (1991), Hernández et Bizoñ (1994) et Zhang et Peralta (1999) ont montré une bonne correspondance entre les courbes de désorption obtenues à l'aide de la technique des solutions salines saturées et celle de la membrane poreuse sous pression. Il est alors possible d'obtenir des valeurs précises d'humidité d'équilibre à des valeurs élevées de HR. Ces méthodes donnent ainsi une boucle d'hystérèse qui s'élargit grandement à des humidités relatives de l'air élevées. La technique de la membrane poreuse sous pression (ou de plaque de pression) a aussi été employée avec succès par Robertson (1965), Stone et Scallan (1967), Griffin (1977), entre autres.

1.2.5 Point de saturation des fibres (PSF)

Le point de saturation des fibres (PSF) est une caractéristique importante du bois qui régit les changements de ses propriétés (Siau 1995; Skaar 1988). Cette caractéristique fut définie au début du siècle par Tiemann (1906) comme la teneur en humidité à laquelle les parois

des cellules sont complètement saturées tandis qu'il n'y a pas d'eau libre (ou liquide) dans les cavités cellulaires.

Il existe plusieurs méthodes pour déterminer le PSF, chacune ayant un niveau de précision propre. Nous pouvons citer ainsi les suivantes:

- Courbes de sorption : extrapolation des isothermes de sorption en adsorption ($H_{\text{eq}} \times \text{HR}$) jusqu'à 100% HR. La difficulté de cette méthode est de contrôler l'humidité relative de l'air au-dessus de 98% HR, puisque des changements de température de l'ordre de 0,1°C peuvent avoir un effet significatif sur l'HR. Un autre facteur qui peut influencer la valeur du PSF est la condensation d'eau dans les cavités cellulaires: le bois présente des capillaires si petits qu'ils provoqueront la condensation à des valeurs d'humidité relative de l'air proches de 99% (Stamm 1971; Siau 1995).
- Plaque de tension (en adsorption): la différence entre cette méthode et d'autres méthodes de sorption est que les teneurs élevées de HR sont contrôlées avec une grande précision (Stamm 1971; Siau 1995).
- La teneur en humidité du bois influence de façon importante plusieurs de ses propriétés. L'hypothèse de que le PSF délimite le changement de plusieurs propriétés du bois est utilisée pour déterminer ce point. Quelques propriétés du bois utilisées pour déterminer le PSF sont le retrait et le gonflement volumique, la résistance mécanique, la résistance électrique, la transmission des rayons bêta, etc. Kelsey (1956) a mesuré les points d'intersection du retrait radial et tangentiel et a noté que dû à la non linéarité du retrait aux valeurs faibles et élevées d'humidité relative, seulement les mesures faites entre 35% et 65% HR doivent être utilisées pour déterminer ces points d'intersection.
- Technique de centrifugation pour forcer l'eau liquide à sortir du bois. L'utilisation de cette méthode sur des espèces imperméables peut générer des valeurs erronées (Perem 1954). Chong et Tesoro (1989) en utilisant la technique de centrifugation ont observé des valeurs de PSF plus élevées que 30%. Ils ont conclu que de l'eau liquide serait restée dans la structure du bois même avec des temps prolongés de centrifugation à une vitesse très élevée.
- Des techniques de résonance magnétique nucléaire (RMN) (Araujo et al. 1994) et de calorimétrie différentielle à balayage (DSC) (Simpson et Barton 1991; Repellin et Guyonnet 2005) peuvent aussi être utilisées pour déterminer le PSF. Ces deux méthodologies se révèlent très intéressantes puisqu'elles mesurent directement la quantité d'eau liée aux parois cellulaires. Araujo et al. (1994) ont observé que le PSF déterminé par RMN est similaire à celui calculé à partir du modèle de sorption Hailwood-Horrobin. D'autre part, la technique de DSC donne des résultats semblables

à ceux obtenus par l'intersection du retrait volumique (Repellin et Guyonnet 2005).

Parmi les facteurs qui affectent le PSF, nous pouvons citer les suivants (Skaar 1988):

- La quantité d'extractibles exerce un effet inversement proportionnel sur le PSF, les extractibles agissent comme charge ou comme agents de remplissage des pores et même de blocage des voies d'accès à l'intérieur des membranes.
- Le PSF augmente avec la température jusqu'à 0°C, pour les températures entre 0°C et 140°C le PSF diminue à un taux moyen de 0,93% H par élévation de 10°C (Siau 1995).
- Le PSF augmente avec la diminution de la masse volumique du bois, particulièrement au-dessous de 400 kg m⁻³ (Feist et Tarkow 1967). Pour expliquer cela, Čudinov (1981) a partagé l'eau des membranes en humidité liée par attraction moléculaire (fonction des constituants du bois) et humidité liée par capillarité (fonction de l'espace disponible principalement à la surface interne des cellules et dans S2). L'humidité liée par capillarité serait intimement liée à la masse volumique du bois et conséquemment, un bois moins dense présenterait une plus grande quantité d'espaces disponibles et aurait un PSF plus élevé.
- Le fait que le PSF soit déterminé en adsorption ou en désorption a un effet marqué sur l'estimation de ce dernier, cet écart est de 8% à 10% H. Stone et Scallan (1967) ont déterminé que le PSF de l'épinette noire est de 40% H_{éq} par la méthode de plaque poreuse en désorption, valeur nettement supérieure à la valeur traditionnelle de 30% H_{éq}. Toutefois, plusieurs facteurs peuvent influencer et conséquemment causer des erreurs lors de la détermination du PSF en désorption, comme par exemple l'eau liquide qui peut rester « piégée » dans le lumen des éléments ligneux les moins perméables (rayons cellulaires) (Menon et al. 1987; Hernández et Bizoñ 1994).

On suppose normalement que le PSF est l'humidité en-dessous de laquelle les propriétés physiques et mécaniques du bois commencent à s'altérer en fonction de la teneur en humidité (USDA 1974; Siau 1995). Le PSF est l'humidité en-dessous de laquelle débutent les changements dimensionnels du bois et où les propriétés de résistance commencent à augmenter. Tel que mentionné ci-haut, des efforts ont été faits pour estimer sa valeur à partir de graphiques qui rapportent le retrait en fonction de la teneur en humidité (Kelsey 1956; Choong et Achmadi 1991; Chong et al. 1998; Repellin et Guyonnet 2005).

Bien que le PSF ait été étudié et défini depuis le début du siècle dernier, cette propriété demeure encore assez mal connue. Ainsi, il est généralement reconnu que l'humidité d'équilibre affecte plusieurs propriétés du bois en-dessous du PSF, tandis qu'au-dessus de celui-ci ces propriétés demeurent inchangées (USDA 1974; Skaar 1988). Ce paramètre est donc utilisé pour ajuster les cotes mécaniques du bois en fonction de H (USDA 1974), de même que pour les modèles d'ajustement de la masse volumique et du retrait du bois (Siau 1995; Skaar 1988).

Cependant, certains travaux laissent entendre que cette présomption ne se serait pas toujours réaliste. Stevens (1963) a montré que le retrait du bois de hêtre se présente même au-dessus de la saturation des membranes (Figure 1.6). Ses valeurs de retrait ont été obtenues à l'équilibre d'humidité de telle manière que la présence d'un gradient d'humidité comme étant la cause possible du début du retrait semble peu probable.

En étudiant la compression radiale du bois d'érable à sucre, Goulet (1968) a constaté que cette propriété est affectée à 37% $H_{\text{éq}}$, alors que la saturation des membranes de ce bois est d'environ 30% $H_{\text{éq}}$. Goulet et Hernández (1991) ont mesuré l'influence de la teneur en humidité sur la traction tangentielle du bois d'érable à sucre. L'allure des courbes obtenues par ces auteurs leur a permis de supposer que l'effet de l'humidité du bois pourrait se prolonger même au-dessus de la saturation des membranes. Hernández (1983) a indiqué que l'eau liquide pourrait être présent dans le bois même en-dessous de la saturation des membranes mais sans pouvoir apporter d'autres précisions.

Les figures 1.7 et 1.8, tirées du travail de Hernández et Bizoñ (1994), montrent clairement que le retrait et la résistance en direction tangentielle sont affectés même au-dessus du PSF. En désorption, la perte d'eau hygroscopique du bois d'érable à sucre a débuté à environ 42,5% $H_{\text{éq}}$. Cette dernière humidité devrait être fonction de l'espèce, notamment de la dimension et distribution des micro-pores dans le bois. Ce travail avait été fait avec l'érable à sucre seulement.

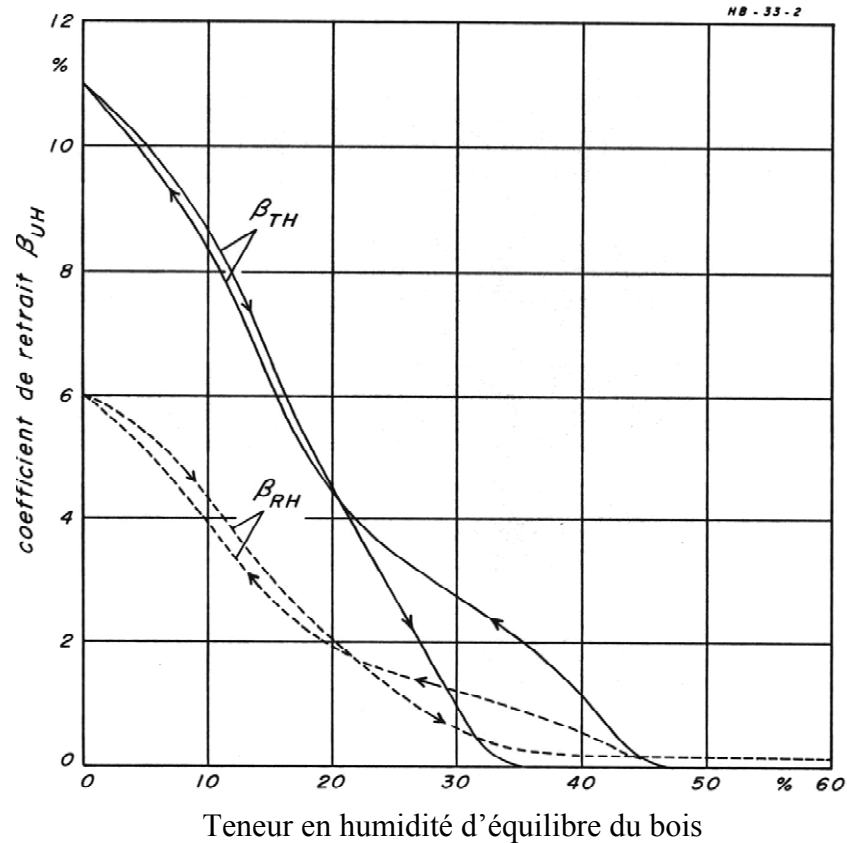


Figure 1.6. Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de son humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à environ 25°C (d'après Stevens 1963).

Menon et al. (1987) ont utilisé la résonance magnétique nucléaire et des analyses anatomiques pour déterminer la localisation de l'eau dans le bois de sapin douglas et de cèdre de l'ouest à différentes teneurs en humidité. Les auteurs ont observé que même si l'eau liée commence à sortir des membranes cellulaires à environ à 31% H, il reste encore de l'eau liquide dans les rayons et les trachéides. L'eau liquide sortirait complètement des vides du bois seulement à 9% H (Figure 1.9). Les auteurs suggèrent alors que le concept de PSF soit réévalué.

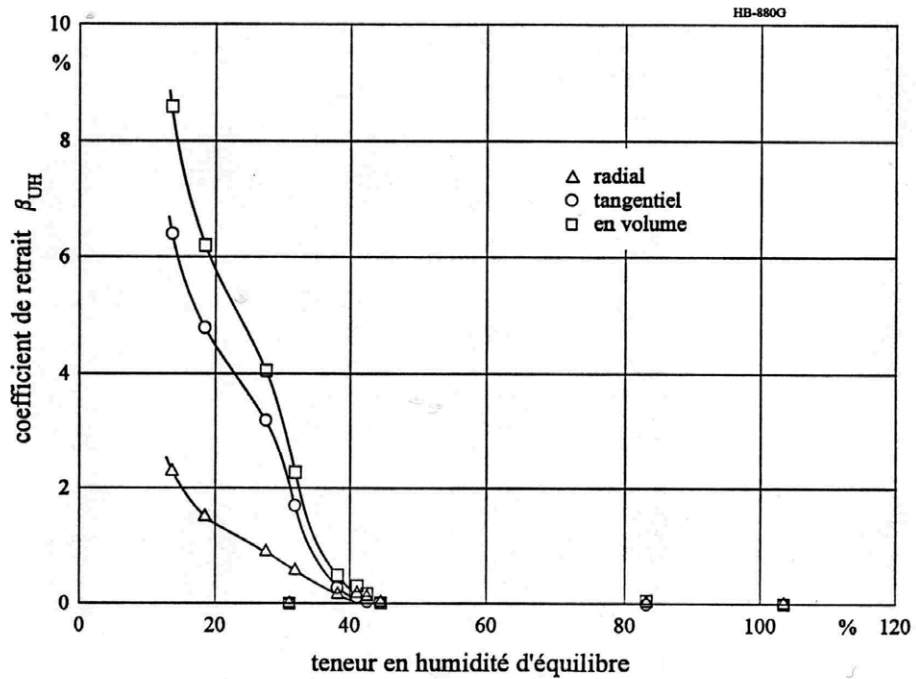


Figure 1.7. Coefficient de retrait du bois d'érable à sucre en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre obtenue à 21°C (d'après Hernández et Bizoñ 1994).

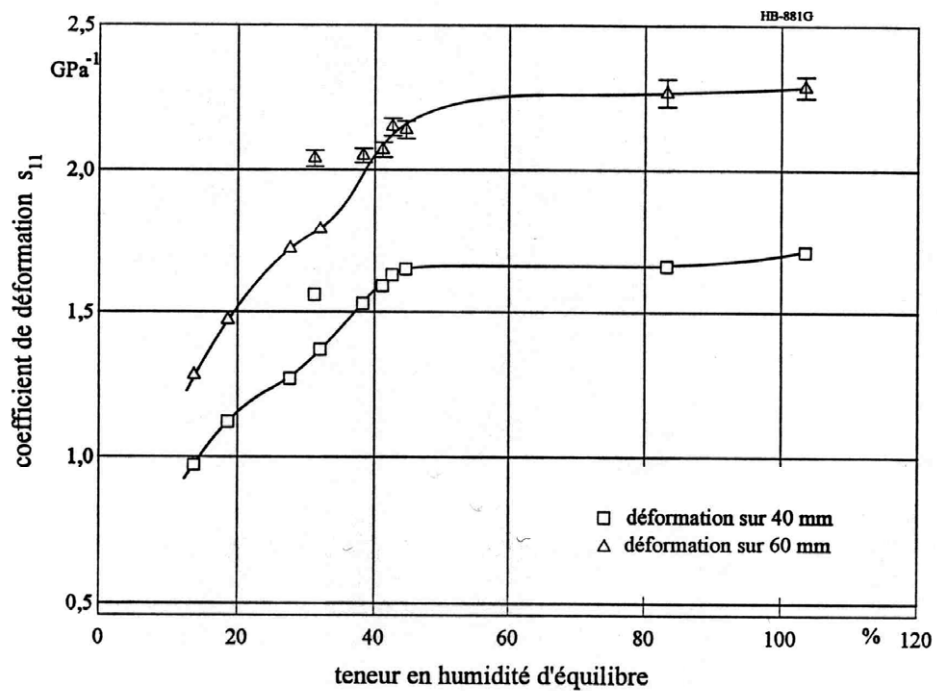


Figure 1.8. Déformabilité du bois d'érable à sucre en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Hernández et Bizoñ 1994).

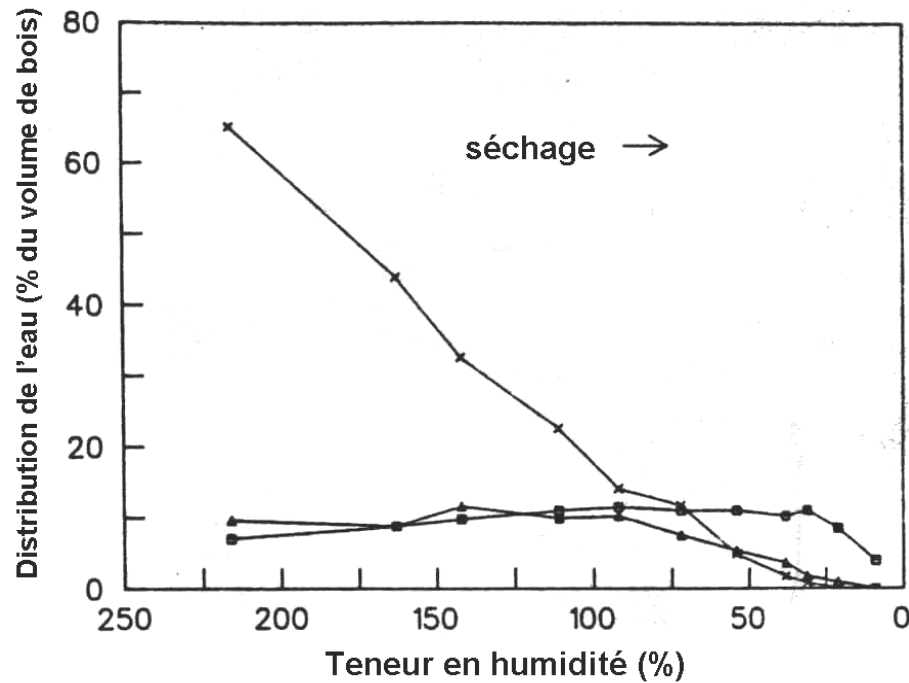


Figure 1.9. Distribution de l'eau à des différentes teneurs en humidité du bois de cèdre de l'ouest: (x) lumen des trachéides du bois initial, (▲) lumen des rayons et des trachéides du bois final et (■) membrane cellulaire des fibres (d'après Menon et al. 1987).

L'analyse des travaux susmentionnés semble indiquer que de l'eau liquide et l'eau liée co-existent encore dans un certain domaine d'humidité du bois en dessous du PSF. À cause de ce comportement, Siau (1995) et d'autres chercheurs (Menon et al. 1987; Hernández et Bizoñ 1994) ont reconnu que l'utilisation du terme PSF est erronée, car il ne s'agit pas d'un « point » spécifique.

Comme nous l'avons montré, un siècle après la définition du terme PSF, plusieurs incertitudes se posent sur ce concept. Pour cette raison, les teneurs en humidité concernées par le présent travail seront proches du PSF. Ce travail vise aussi étudier des espèces ayant différents plans ligneux dans le but de déterminer l'effet de la structure du bois sur les relations eau-bois au voisinage du PSF. Grâce aux résultats prometteurs obtenus par des techniques d'analyse non-destructives, l'un des objectifs de ce travail est d'utiliser la

technique de RMN pour déterminer les quantités des différents types d'eau dans le bois pour différentes teneurs d'humidité d'équilibre proches du PSF.

1.3 Propriétés dimensionnelles du bois

Dans l'utilisation du matériau "bois", hygroscopique et anisotrope, la connaissance des propriétés dimensionnelles se révèle très importante. Le gonflement et le retrait du bois sont le résultat de l'interaction entre l'humidité (gain ou perte, respectivement) et la matière ligneuse. Des changements dimensionnels ont lieu suite à une déformation interne du tissu ligneux. L'ampleur de ces déformations est influencée par le taux de séchage (retrait) et par le taux d'adsorption (gonflement).

La stabilité dimensionnelle du bois est un facteur important lors de son utilisation. Un bois stable présente de faibles changements dimensionnels dans des conditions d'oscillations d'HR et une faible tendance à se déformer (Torelli and Gorišek 1995; Choong et al. 1998). Noack et al. (1973) ont proposé le gonflement différentiel (g) dans le but de quantifier la stabilité dimensionnelle du bois. Ce paramètre indique le pourcentage de changement dimensionnel (tangential et radial) lors d'un changement d'humidité d'équilibre de 1%. Selon ce chercheur, g peut être considéré comme constant pour des teneurs en humidité du bois entre 7% et 20%, un intervalle important pour l'application pratique du bois. Un autre paramètre utile pour déterminer la stabilité dimensionnelle du bois est le facteur de gonflement (m). Selon Chafe (1987), ce facteur représente le changement de volume externe du bois dû au retrait ou au gonflement relatif au volume de l'eau correspondant au changement de teneur en eau (il est supposé que la masse volumique de l'eau liée est égale à celle de l'eau pure). Lorsque les dimensions des cavités cellulaires se maintiennent constantes pendant le retrait ou le gonflement, la magnitude du facteur m est égale à 1 (Stamm 1964; Skaar 1988). Une représentation graphique des changements de la valeur de m avec les changements de dimensions du lumen cellulaire est donnée à la figure 1.10.

Le phénomène de gonflement peut produire des microfissures ou la séparation permanente des tissus induits par une distribution hétérogène des forces de l'eau, conduisant à une déformation externe importante. Hernández et Bizoň (1994) ont suggéré que des échantillons ayant une teneur en humidité initiale de 14% et re-humidifiés rapidement par immersion dans l'eau distillée, pourraient avoir subi un effet négatif permanent des parois

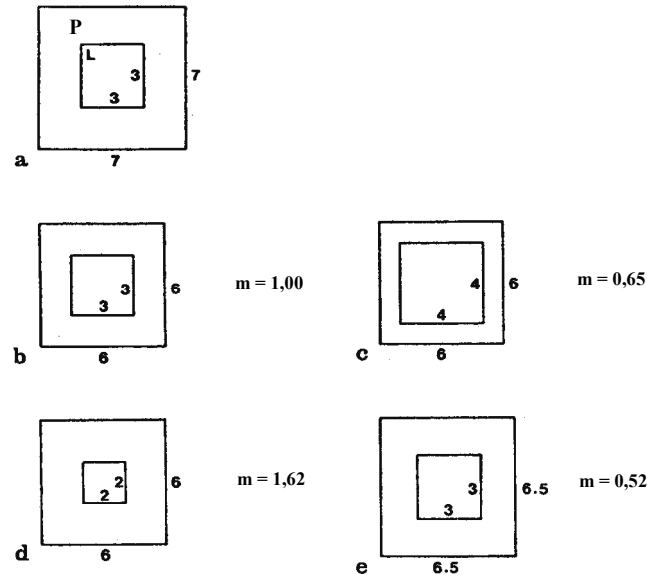


Figure 1.10. Représentation des changements des valeurs de m avec les changements des dimensions du lumen cellulaire. Le changement du volume d'eau est représenté par celui du volume de la paroi cellulaire. a) Fibre de bois gonflée par l'eau. P = paroi cellulaire ; L = lumen cellulaire. b) Fibre séchée où il n'y a pas eu de changement de volume du lumen pendant le retrait. c) Fibre séchée où il y a eu une augmentation du volume du lumen pendant le retrait. d) Fibre séchée où il y a eu une diminution du volume du lumen pendant le retrait. e) Hypothèse d'une fibre séchée au four (grande quantité de substances extractibles dans la paroi cellulaire), où le lumen n'a pas changé mais le retrait externe est inférieur à b, c ou d (d'après Chafe 1987).

cellulaires et causé un retrait tangentiel plus élevé du bois d'érable à sucre. Suite à cela, Naderi et Hernández (1997), ont comparé trois méthodes de saturation du bois d'érable à sucre ayant une teneur en humidité initiale de 14% H. Le gonflement et le retrait furent plus élevés lorsque les échantillons furent plongés directement dans l'eau. Le niveau de tensions internes fut plus fort que celui produit pendant un traitement de saturation plus doux. La direction radiale fut plus affectée que la direction tangentielle. Une méthode de saturation intermédiaire a produit des résultats similaires à ceux obtenus par le traitement de saturation plus doux. Ces résultats ont été pris en compte lors de la saturation préalable de nos éprouvettes.

D'importants aspects reliés aux propriétés dimensionnelles du bois, tels que l'anisotropie des variations dimensionnelles et l'influence des caractéristiques anatomiques sur ces propriétés, seront analysés en détail dans la section 1.4.1.

1.4 Relations entre les caractéristiques anatomiques et physiques du bois

1.4.1 Effet de la structure anatomique du bois sur ses propriétés physiques

Les caractéristiques anatomiques du bois exercent une grande influence sur ses propriétés physiques, comme par exemple le retrait et le gonflement du bois, la perméabilité du bois, la résistance mécanique, etc. Les effets de la structure anatomique du bois sur ses propriétés physiques (comme le comportement hystérétique en courbes de sorption au-dessus du PSF) sont étroitement liés à la porosité du bois.

Plusieurs travaux ont étudié la relation entre les espèces et les variations dimensionnelles. Par exemple, Mantanis et al. (1994) ont montré que le gonflement tangentiel des espèces résineuses (épinette 6,5%-7,3% ; sapin douglas 7,3%) est plus faible que celui des espèces feuillues (érable à sucre 10-12% ; tremble 9,1-10%), ce facteur est surtout dû à la masse volumique plus élevée de ces dernières. La relation entre la structure anatomique et la magnitude du retrait du bois a été étudiée par Trenard et Guéneau (1977). Ces auteurs ont conclu que la morphologie cellulaire à l'échelle microscopique (comme exemple les dimensions des lumens et l'épaisseur des parois) expliquent mieux le retrait que les grandeurs macroscopiques telles que la largeur des cernes. Leclercq (1981) en étudiant le bois de hêtre a constaté que le retrait volumique total s'accroît avec la proportion des fibres à faible lumen (rayon entre 2,5 et 3,7 μm), avec la longueur et le diamètre des fibres les plus étroits. Ce même retrait diminue avec l'accroissement du diamètre des fibres à lumen plus large (rayon entre 3,7 et 7,5 μm). Selon ce même auteur, la liaison retrait-épaisseur des parois explique aussi la liaison observée entre la masse volumique et le retrait. Keller et Thiercelin (1975) ont constaté que les gros rayons du bois de hêtre ont une action défavorable sur les retraits radial et tangentiel.

L'effet de la structure du bois et des substances extractibles sur le gonflement du bois d'acajou a été étudié par Arévalo (2002). Les paramètres anatomiques qui ont le plus affecté le gonflement radial et tangentiel du bois de cette espèce ont été la forme des rayons et des vaisseaux. Néanmoins, leur effet sur le gonflement du bois est moindre que celui des substances extractibles.

Plusieurs travaux ont aussi mis en exergue la proportionnalité existante entre le retrait et la masse volumique des bois présentant une faible quantité d'extractibles (Stamm 1964; Skaar 1988; Noack et al. 1973). Toutefois, la présence de substances extractibles dans les parois cellulaires augmente la stabilité dimensionnelle du bois, ce qui limite le retrait (Hernández 1989; Choong et Achmadi 1991; Mantanis et al. 1995; Arévalo 2002). Concernant l'effet de ces substances extractibles, Hernández (1989) a étudié ces effets sur les principales propriétés physico-mécaniques des bois tropicaux. Ce chercheur a observé que les substances solubilisées dans l'acétone seraient localisées principalement dans les membranes cellulaires, compte tenu du pouvoir gonflant de ce solvant. Ces composés apparaissent comme directement responsables des variations de l'humidité d'équilibre de même que du gonflement radial. Ainsi, des bois montrant des teneurs élevées en extractibles à l'acétone, sont moins hygroscopiques et moins gonflants que les espèces neutres.

Concernant l'étude du gonflement différentiel (g) et du facteur de gonflement (m), Arévalo (2002) a observé que, pour le bois d'acajou, la variation du facteur m peut être attribuée à la variation de la masse volumique, aux extractibles polaires et non-polaires et à la proportion des rayons et des vaisseaux dans le bois. Hernández (1989) a montré également que les extraits à l'acétone sont responsables de la stabilité hygroscopique de certains bois tropicaux, définie à l'aide du rapport de sorption (s). Par ailleurs, l'étude du gonflement différentiel (g) et du facteur de gonflement (m) a démontré que ces mêmes substances et celles solubles dans le méthanol ont un effet bénéfique propre sur la stabilité dimensionnelle de ces espèces.

En relation au caractère anisotrope du bois, le rapport moyen du changement dimensionnel pour toutes les espèces est d'environ 1/20/40 (L/R/T). Selon Skaar (1988), il y a quatre théories pour expliquer l'anisotropie transversale:

- la théorie des restrictions radiales, où les tissus radiaux limitent le mouvement radial d'autres cellules. Cette théorie est la plus ancienne et la plus populaire;
- la théorie de l'interaction bois initial/bois final, où le bois final a un retrait tangentiel plus élevé que le bois initial et il est également plus fort. Le bois initial serait alors forcé à avoir un retrait tangentiel plus élevé et par l'effet de Poisson, un retrait radial plus faible;
- les différences en retrait et en gonflement des directions tangentielles et radiales sont causées pour les différentes propriétés dimensionnelles des couches qui forment la paroi cellulaire, surtout les différences d'arrangement et de composition de la lamelle moyenne;
- les différents angles d'orientation des micro-fibrilles de la couche S2: cet angle serait plus élevé dans les parois radiales que tangentielles, ce qui génère une plus grande expansion des parois radiales suivant la direction tangentielle.

Selon Skaar (1988), plusieurs mécanismes peuvent causer l'anisotropie transversale du retrait/gonflement du bois et qu'ils ne sont pas les mêmes pour toutes les espèces. Par exemple, Gu et al. (2001) supportent que la théorie de l'angle d'orientation des micro-fibrilles de la couche S2 exerce un rôle important dans l'anisotropie transversale du bois de *Pinus sylvestris*. Yamamoto et al. (2001) ont déterminé la relation entre l'angle de micro-fibrilles de la couche S2 et le retrait du bois de *Pinus jeffreyi*. Ces auteurs ont constaté qu'avec un angle plus faible que 30% les retraits transversal et longitudinal sont de 7-8% et < 1%, respectivement. Avec un angle supérieur à 30% le retrait longitudinal augmente avec une augmentation de l'angle et le contraire se passe avec le retrait transversal, jusqu'à la situation extrême où le retrait longitudinal devient supérieur à celui transversal.

En ce qui concerne l'anisotropie du bois en relation à sa perméabilité, la structure anatomique du bois des feuillues en direction longitudinale fait que le mouvement de liquides suivant cette direction peut être, en ordre de grandeur, de 10 000 à 100 000 fois supérieur à celui dans les directions radiale et tangentielle (Siau 1995). Ce rapport est moins élevé pour les résineux et peut être expliqué un cheminement de proche en proche via les ponctuations de trachéides chez ces espèces, ce qui permet aussi une migration dans le plan transverse.

L'influence de la structure du bois sur les relations eau-bois a été le sujet de plusieurs travaux. Avec comme objectif principal l'amélioration de l'utilisation du bois, la plupart de ces études a porté sur la perméabilité du bois et sur les mouvements de l'eau à travers ce matériau (Stamm 1967; Behr et al. 1969; Tesoro et al. 1974; Thomas 1976; Gonzalez and Siau 1978; Murmanis and Chudnoff 1979; Choong and Tesoro 1989; Choong et al. 2001). Ces travaux ont montré l'important rôle des vaisseaux dans la perméabilité longitudinale et l'effet négatif des thylles et des dépôts de gommés. Tesoro et al. (1974) ont comparé la perméabilité de plusieurs espèces résineuses et feuillues et ont constaté que la plus faible perméabilité des résineux est probablement reliée au plus faible rayon effectif des pores, à la disposition différenciée des capillaires des résineux et à la présence de torus. Dans le cas des feuillus, les auteurs ont constaté que dans les espèces à zone poreuse et semi-poreuse environ 20% des espaces effectifs des pores du bois d'aulx ont été responsables pour environ 80% du mouvement de gaz; pour les espèces à pores diffus environ 30% des espaces effectifs des pores du bois d'aulx ont été responsables pour le même pourcentage de perméabilité au gaz. Les espèces à pores diffus ont présenté une proportion plus élevée de saturation. Cela serait dû au fait que les espèces à zone poreuse et semi-poreuse ont eu une proportion plus élevée d'espaces poreux occupés par de l'air emprisonné.

La présence de trois zones de perméabilité agissant en parallèle a été mise en évidence par Gonzalez et Siau (1978) pour du bois de hêtre et d'eucalyptus. Ces zones sont formées par différents types de cellules, où les plus perméables sont les vaisseaux, suivis par le parenchyme axial et les fibres et finalement une troisième zone imperméable qui correspondrait aux rayons. Ces résultats sont corroborés par ceux de Behr et al. (1969).

La structure anatomique du bois influence la façon dont l'eau est retenue dans ce matériau. Choong et Tesoro (1989) ont déterminé la pression capillaire des différentes espèces en utilisant la méthode de centrifugation à partir de la saturation intégrale des échantillons. Lors de la centrifugation des feuillus, la plupart de l'eau retirée vient des gros capillaires et la réduction de l'humidité du bois a été plus graduelle dans le bois à zone poreuse qu'à pores diffus en raison de la sortie graduelle de l'eau des pores de tailles différentes. Les espaces poreux des feuillus sont composés de fibres de faibles diamètres, avec ponctuations simples et non perforées, ce qui rend difficile la sortie de l'eau. Un autre facteur qui affecte

la sortie de l'eau des espèces feuillues est la présence de cellules de parenchyme qui peuvent retenir l'eau liquide.

1.4.2 Effet de la distribution des dimensions des pores sur l'hygroscopicité du bois

La connaissance de la structure poreuse d'un matériau est d'extrême importance pour son étude hygroscopique, principalement parce que l'adsorption et la désorption capillaire sont étroitement liées à la structure poreuse. Il faut donc tenir compte de la distribution de la taille des pores et également de leur configuration. Nous pouvons citer comme exemple les pores en forme de bouteille d'encre qui sont étroitement liés au phénomène d'hystérèse de la sorption à des valeurs de H élevées (Figure 1.11, section 1.4.2.1). À cause de ces facteurs, nous apportons un intérêt spécial dans le cadre de ce travail à la distribution des tailles des pores dans le bois et à la classification des pores selon la structure anatomique du bois.

1.4.2.1 Porosité et condensation capillaire

Les systèmes poreux des solides peuvent avoir des types très distincts. Les pores individuels peuvent varier grandement en taille et en forme dans un solide donné, et entre deux solides. Une caractéristique de grand intérêt est la largeur des pores, e.g. le diamètre des pores cylindriques. Une classification des pores selon leur largeur moyenne est donnée au tableau 1.1. La base de la classification du tableau 1.1 est que chacune des classes de largeur des pores correspond à des effets d'adsorption caractéristiques qui se manifestent dans les isothermes. Dans le cas des *micro-pores*, l'interaction potentielle est significativement supérieure à celle des pores plus larges à cause de la proximité des parois, et la quantité adsorbée (à une pression relative donnée) est augmentée. Dans le cas des *méso-pores*, il y a la condensation capillaire, qui est caractéristique de la boucle d'hystérèse. Dans le cas des *macro-pores*, ces derniers sont si larges qu'il est virtuellement impossible de tracer l'isotherme en détail parce que l'humidité relative est tout près de 100% (Gregg et Sing 1982).

Tableau 1.1. Classification des pores selon leur diamètre (d'après l'Union International de Chimie Pure et Appliquée, IUPAC 1972).

| Largeur | |
|-------------|--|
| Micro-pores | Inférieure à $\sim 20 \text{ \AA}$ ($0,002 \text{ }\mu\text{m}$) |
| Méso-pores | Entre $\sim 20 \text{ \AA}$ et $\sim 500 \text{ \AA}$ ($0,002$ et $0,050 \text{ }\mu\text{m}$) |
| Macro-pores | Supérieure à $\sim 500 \text{ \AA}$ ($0,050 \text{ }\mu\text{m}$) |

L'étude de la structure de méso-pores et de macro-pores est particulièrement importante pour les sciences du bois car la boucle d'hystérèse à des valeurs élevées de HR est reliée à la taille et à la distribution de ces derniers. L'étude des méso-pores est étroitement reliée au concept de la condensation capillaire dont son expression quantitative est donnée par l'équation de Kelvin. Cette équation est d'ailleurs à la base de tous les calculs de distribution des tailles des pores, soit:

$$\ln \frac{p}{p^0} = -\frac{2\mathcal{W}_L}{RT} \frac{1}{r_m} \quad (1.4)$$

où : p/p^0 est la pression relative de la vapeur à l'équilibre;
 r_m est le rayon du capillaire;
 R est la constante des gaz parfaits;
 T est la température;
 γ est la tension superficielle et
 V_L est le volume molaire du liquide sorbé.

Si $K = \frac{\mathcal{W}_L}{RT}$ et en utilisant la forme exponentielle, l'équation 1.4 devient :

$$\frac{p}{p^0} = \exp\left(\frac{-2K}{r_m}\right) \quad (1.5)$$

Un facteur important à considérer lors de l'étude de la porosité du bois est l'effet de la bouteille d'encre, composé de pores interconnectés de taille variable. Dans ce cas, la répartition de l'eau dans les pores pour une valeur donnée d'humidité relative, donc de pression capillaire, sera différente en adsorption et en désorption (Figure 1.11). En effet, la variation de dimension entre les différents types de cavités connectées en série suggère que la désorption est contrôlée par les plus petits pores, et l'adsorption par les plus gros pores. Donc, la courbe de désorption est fortement influencée par le diamètre des canaux qui relient les cavités cellulaires, tandis que la courbe d'adsorption est surtout régie par le diamètre de ces cavités.

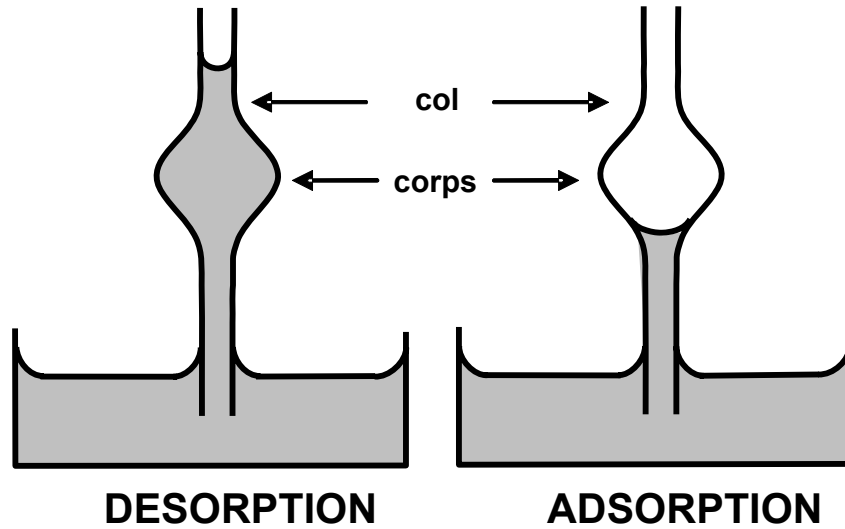


Figure 1.11. Pores du type de la bouteille d'encre.

1.4.2.2 Détermination de la distribution des dimensions des pores

Plusieurs méthodes peuvent être utilisées pour déterminer la distribution de dimensions des pores, telles que la porosimétrie au mercure, la méthode d'adsorption de gaz, la thermoporosimétrie, la résonance magnétique nucléaire, l'analyse des courbes de sorption, etc. (Hill et Papadopoulos 2001).

La porosimétrie au mercure est une des méthodes les plus courantes. Selon Washburn (1921), la pression nécessaire pour forcer l'entrée d'un liquide non mouillant (mercure) par un capillaire de section circulaire est inversement proportionnelle au diamètre du capillaire et directement proportionnelle à la tension superficielle du liquide et à l'angle de contact avec la surface solide. Si l'on suppose alors que le pore ou capillaire est cylindrique et l'ouverture de la section transversale est circulaire, la relation entre la pression appliquée (P) et la taille minimale du pore dans lequel le mercure pourra entrer est la suivante:

$$P = \frac{-2\gamma \cos \theta}{r} \quad (1.6)$$

où : γ est la tension superficielle;
 r est le rayon du capillaire et

θ est l'angle de contact avec le substrat, dans le cas d'un liquide non mouillant la valeur de cet angle est entre 90° et 180° .

Lors de l'utilisation de l'équation 1.6, il est généralement supposé que $\theta = 130^\circ$ et $\gamma = 0,485 \text{ N m}^{-1}$ (interface mercure/air à 20°C). Les résultats obtenus dans le cas du bois sont une estimation des dimensions des différents éléments car l'équation 1.6 fait l'hypothèse que ces derniers sont tous circulaires.

La dimension de l'échantillon dans le sens longitudinal est très importante dans l'analyse de la porosimétrie au mercure, puisque dans le cas des dimensions qui sont plusieurs fois plus grandes que la longueur moyenne des fibres, la plus grande partie des éléments du bois n'est pas sectionnée et le mercure doit, pour les atteindre, emprunter les voies habituelles de communication, c'est-à-dire les ponctuations de toutes les tailles. Trenard (1980) a étudié l'effet de la dimension de l'échantillon sur les résultats obtenus lors de la porosimétrie au mercure sur quatre espèces ligneuses, avec un spectre de pores analysé dans le bois qui s'étend d'environ $0,0014 \mu\text{m}$ à $170 \mu\text{m}$. Les mesures furent réalisées d'une part sur des coupes minces ($240 \mu\text{m}$ pour le hêtre, épaisseur nettement inférieure à la longueur minimale des fibres, ce qui assure la pénétration du mercure), d'autre part sur des échantillons de 10 mm dans le sens longitudinal. La pénétration du mercure dans des coupes minces a été totale, tandis qu'elle fut estimée à 46% pour des échantillons de 10 mm . Il a été constaté également que la pénétration de mercure n'était plus complète déjà pour des échantillons de 1 mm de longueur. La figure 1.12 montre les courbes porosimétriques du hêtre sur coupes de $240 \mu\text{m}$ d'épaisseur et la répartition par classes des tailles de cavité obtenues par analyse de texture.

Stayton et Hart (1965) ont utilisé la porosimétrie au mercure pour déterminer la distribution des tailles des pores de trois espèces de conifères. Des pores de $0,06 \mu\text{m}$ ont été pénétrés par le mercure en utilisant une pression de $20,7 \text{ MPa}$ (3000 psi). Stone et al. (1966) ont analysé plusieurs espèces de bois et de la pâte de cellulose à l'aide de la porosimétrie au mercure. Ces auteurs ont constaté qu'une pression maximale de $0,7 \text{ MPa}$ (100 psi) a permis de remplir de pores de jusqu'à $2 \mu\text{m}$ de diamètre. Cependant, aucun de ces travaux n'a étudié la pénétration des micro-pores présents dans les parois cellulaires. Bariska (1975), en analysant des éprouvettes de hêtre de $320 \mu\text{m}$ dans le sens longitudinal, a constaté que des micro-pores avec un diamètre d'environ $0,08 \mu\text{m}$ ont été présents dans la membrane cellulaire. Les appareils plus modernes permettent maintenant d'atteindre des niveaux de

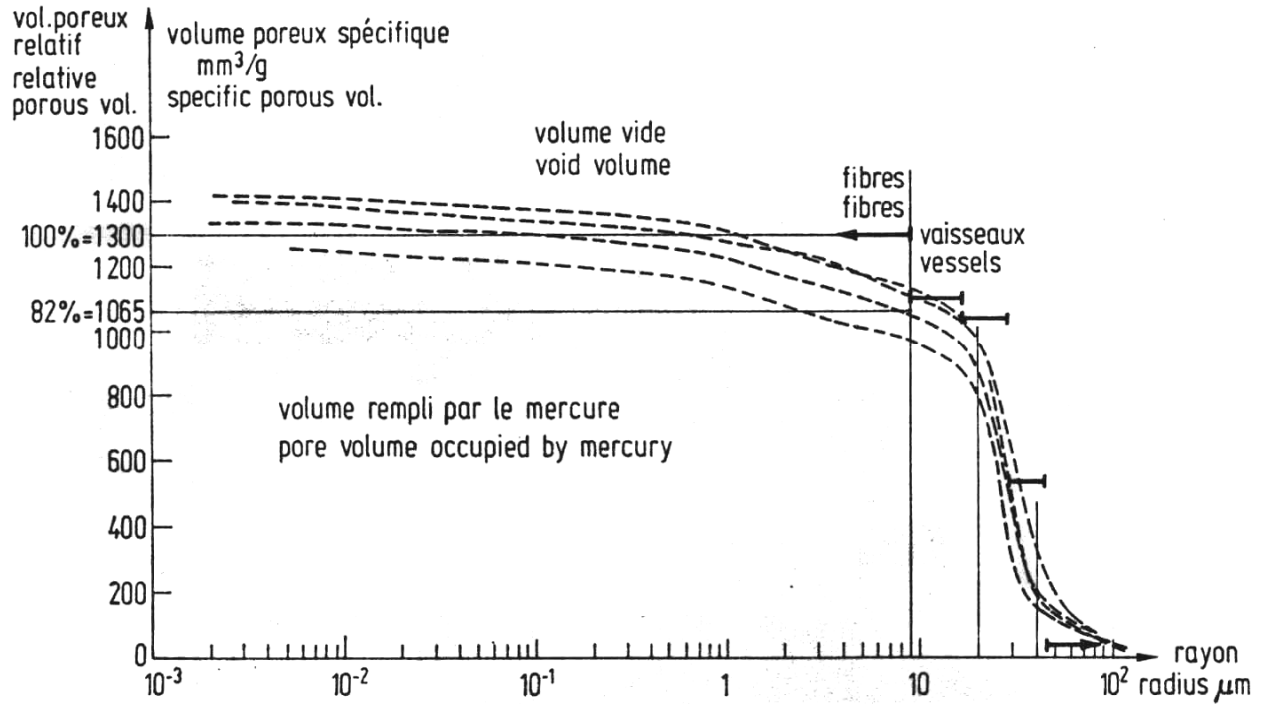


Figure 1.12. Courbes porosimétriques du hêtre sur coupes de 240 μm d'épaisseur et la répartition par classes des tailles des cavités obtenue par analyse de texture (d'après Trenard 1980).

pression ayant jusqu'à 414 MPa (60000 psi), où des pores avec un rayon de 0,0015 μm peuvent être théoriquement remplis (Hill et Papadopoulos 2001).

Tel que discuté dans la section 1.4.2.1, il est possible de déterminer la distribution des dimensions des pores en utilisant la relation existante entre la pression appliquée (P_m) et la structure capillaire du bois. Le potentiel hydrique (ψ) est directement relié à la pression hydrique équivalente (P_m) appliquée sur le côté de l'échantillon qui est en contact avec la plaque ou la membrane poreuse.

$$\psi = -\bar{V}_w P_m \quad (1.7)$$

où : ψ est le potentiel hydrique (J kg^{-1});

\bar{V}_w est le volume spécifique de l'eau ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$) et

P_m est la pression hydrique équivalente (Pa).

L'équation 1.6 peut être utilisée pour décrire la relation existante entre la pression appliquée (P_m) et la structure capillaire du bois. En utilisant les équations 1.6 et 1.7, on obtient:

$$\psi = -\frac{2\gamma\bar{V}_w}{r} \cos \theta \quad (1.8)$$

Le tableau 1.2 montre la relation entre le potentiel hydrique, l'humidité relative de l'air et le rayon capillaire. Les rayons capillaires ont été obtenus à partir de la formule 1.8, en considérant $\theta = 0^\circ$ et $\gamma = 0,072 \text{ N m}^{-1}$ (interface eau/air à 25°C).

La relation 1.8 a été appliquée pour déterminer la taille des pores sur le bois (Cloutier et Fortin 1991; Tremblay et al. 1996; Defo et al. 1999) et sur d'autres matériaux comme par exemple le sol (Homshaw et Cambier 1980; Prost et al. 1998; Yeates et al. 2002). Néanmoins, l'utilisation de cette équation peut se révéler inefficace pour des faibles teneurs en humidité. En effet, dans ces cas le potentiel hydrique est davantage affecté par les forces de sorption que par les forces capillaires. De plus, à des faibles teneurs en humidité, les rayons calculés ont des dimensions proches de celles de la molécule de l'eau, et dans ce cas le concept de tension superficielle ne peut plus s'appliquer (Barkas 1949; Cloutier et Fortin 1991).

La figure 1.13 montre la courbe de sorption obtenue par Fortin (1979), où la partie de la boucle d'hystérèse qui s'élargie grandement à des humidités relatives de l'air élevées est causée par la présence du phénomène de la bouteille d'encre (section 1.4.2.1) qui est provoqué par la variation de la dimension des capillaires du bois.

Les figures 1.14 à 1.16 montrent les résultats des travaux de Cloutier et Fortin (1991), Tremblay et al. (1996) et de Defo et al. (1999). Ces travaux ont utilisé la relation existante entre le ψ et la taille des pores afin de déterminer la proportion du volume des pores (λ) et la distribution différentielle de la taille des pores ($\delta\lambda/\delta r$) dans le bois.

Tableau 1.2. Relation entre le potentiel hydrique et le rayon capillaire à 25°C.

| Potentiel hydrique | | Humidité relative | Rayon (μm) |
|--------------------|--------|-------------------|-------------------------|
| Bar | kPa | (%)* | |
| - 0,1 | - 10 | 99,993 | 14,44 |
| - 0,15 | - 15 | 99,989 | 9,60 |
| - 0,17 | - 17 | 99,988 | 8,47 |
| - 0,2 | - 20 | 99,985 | 7,20 |
| - 0,3 | - 30 | 99,978 | 4,80 |
| - 1 | - 100 | 99,927 | 1,44 |
| - 3 | - 300 | 99,782 | 0,48 |
| - 5 | - 500 | 99,637 | 0,29 |
| - 7 | - 700 | 99,492 | 0,21 |
| - 20 | - 2000 | 98,557 | 0,072 |
| - 40 | - 4000 | 97,134 | 0,036 |
| - 45 | - 4500 | 96,782 | 0,032 |
| - 50 | - 5000 | 96,431 | 0,029 |
| - 60 | - 6000 | 95,733 | 0,024 |

* valeur obtenue par la formule : $\psi = \frac{RT \ln h}{M_w}$ où: ψ est le potentiel hydrique (J kg^{-1}); M_w est la masse moléculaire de l'eau ($18 \times 10^{-3} \text{ kg}_{\text{eau}} \text{ mol}^{-1}$); R est la constante des gaz parfaits ($8,31 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); T est la température (K) et h est la pression de vapeur relative de l'eau dans le bois.

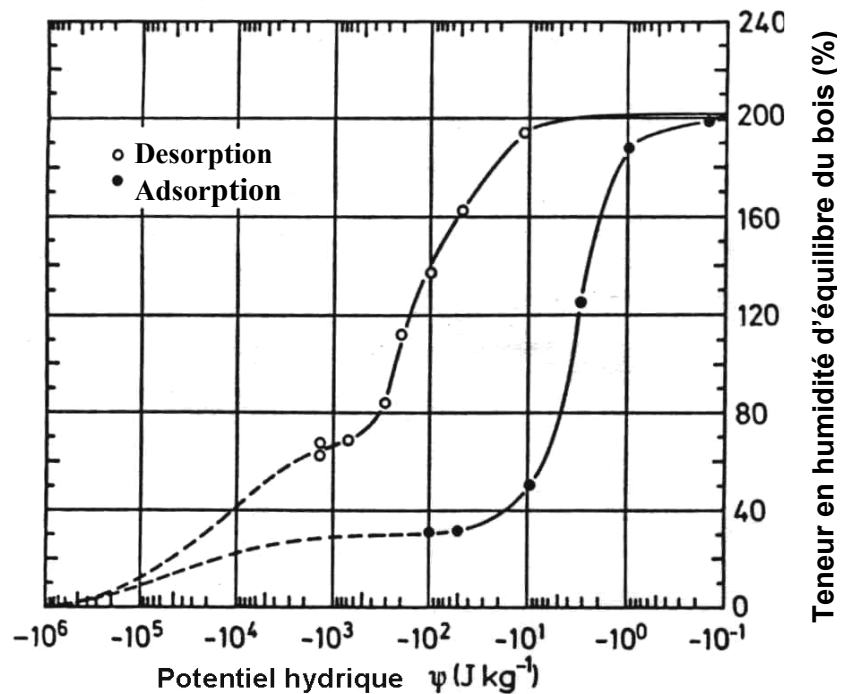


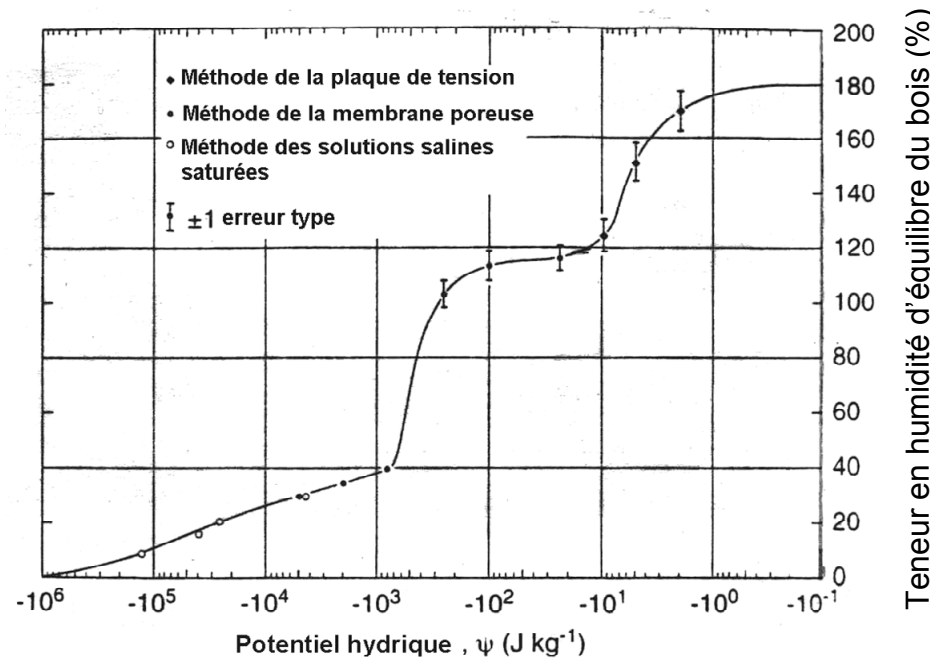
Figure 1.13. Humidité d'équilibre du bois en fonction du potentiel hydrique pour le bois d'aulne de l'ouest à 21°C (d'après Fortin 1979).

Les figures 1.14 et 1.15 montrent la relation entre la teneur en humidité d'équilibre et le potentiel hydrique ($H_{\text{éq}} - \psi$) ainsi que la distribution des tailles des pores des bois de peuplier faux-tremble (Cloutier et Fortin 1991) et de pin rouge (Tremblay et al. 1996). Contrairement au pin rouge, la relation $H_{\text{éq}}-\psi$ du peuplier faux-tremble montre un plateau très marqué entre 110% et 120% $H_{\text{éq}}$. La distribution des tailles des pores (Figure 1.14 B) de cette espèce permet d'expliquer la présence de ce plateau, à savoir le fait de que seulement 10% du volume des pores ont une dimension entre 0,5 et 10 μm . Pour le pin rouge, la quantité des pores qui présentent une dimension entre 0,5 et 10 μm est d'environ 32%. Une distribution des pores plus uniforme, comme c'est souvent le cas chez les conifères, peut expliquer l'absence du plateau dans la relation $H_{\text{éq}}-\psi$, tel que montré à la figure 1.15 A.

La figure 1.16 montre la distribution des tailles des pores pour l'érable à sucre (Defo et al. 1999). On observe que lorsque la désorption a débuté, 34,5% des pores étaient vides et que ces pores ont une taille effective supérieure à 6,8 μm . Cette espèce présente 21% des vaisseaux avec un diamètre de 20 μm à 100 μm , ce qui signifie que tous les vaisseaux étaient vides lorsque la désorption a débuté.

Choong et Tesoro (1989) ont utilisé la méthode de centrifugation pour étudier la relation entre la pression capillaire et la teneur en humidité du bois sur huit espèces de différentes structures poreuses. La figure 1.17 montre que la pression capillaire augmente significativement à mesure que le rayon du capillaire diminue. Avec un rayon capillaire plus petit que 10 μm , la pression relative des capillaires est plus faible que 1, et l'humidité d'équilibre sera au-dessous du PSF. Tel que mentionné à la section 1.2.5 cette méthode n'est pas adéquate pour la détermination du PSF.

(A)



(B)

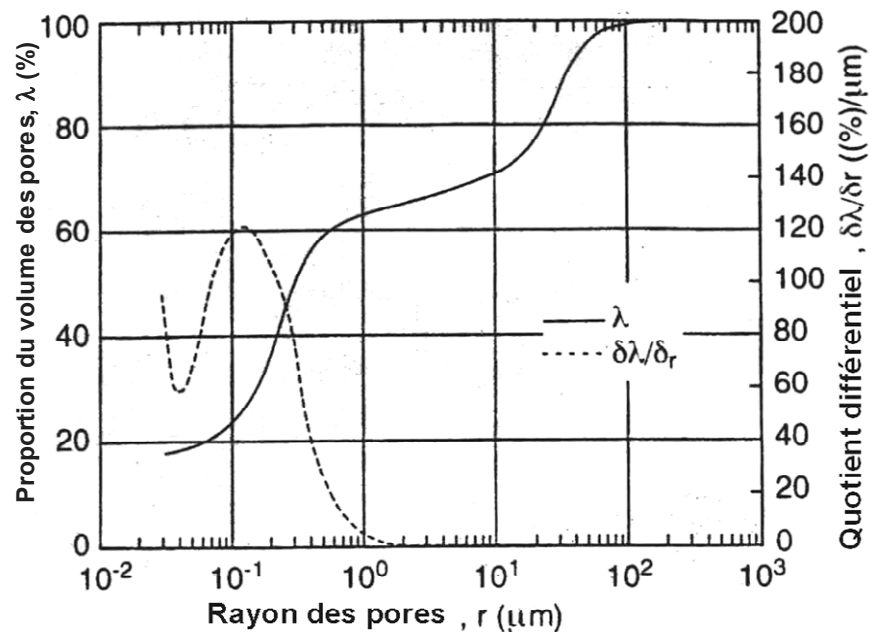


Figure 1.14. Relation entre les courbes de sorption et de porosité du bois de peuplier faux-tremble. (A) Teneur en humidité d'équilibre du bois \times potentiel hydrique. (B) Distribution des tailles des pores (d'après Cloutier et Fortin 1991).

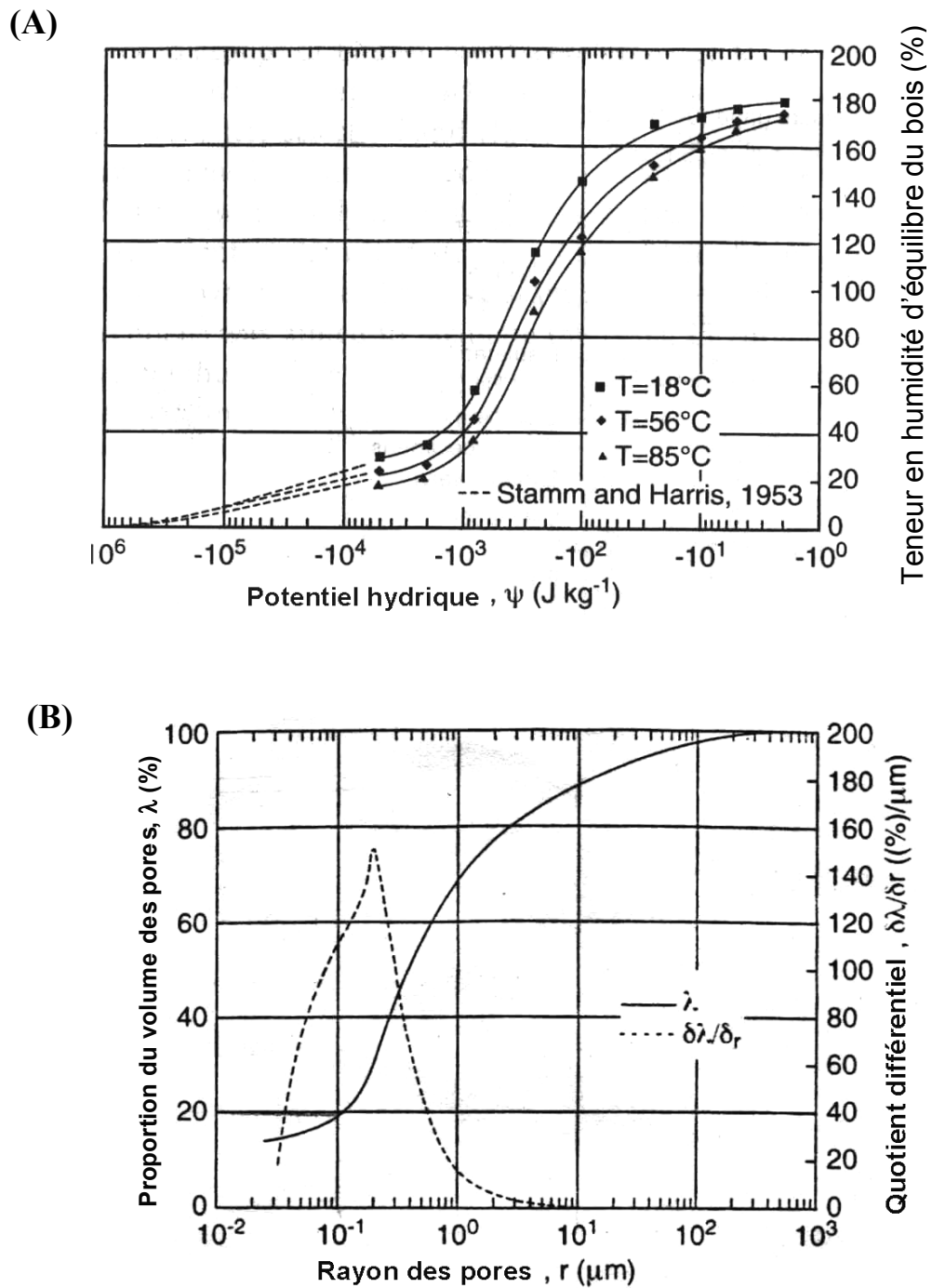


Figure 1.15. Relation entre les courbes de sorption et de porosité du bois de pin rouge. (A) Teneur en humidité d'équilibre du bois vs potentiel hydrique. (B) Distribution des tailles des pores (d'après Tremblay et al. 1996).

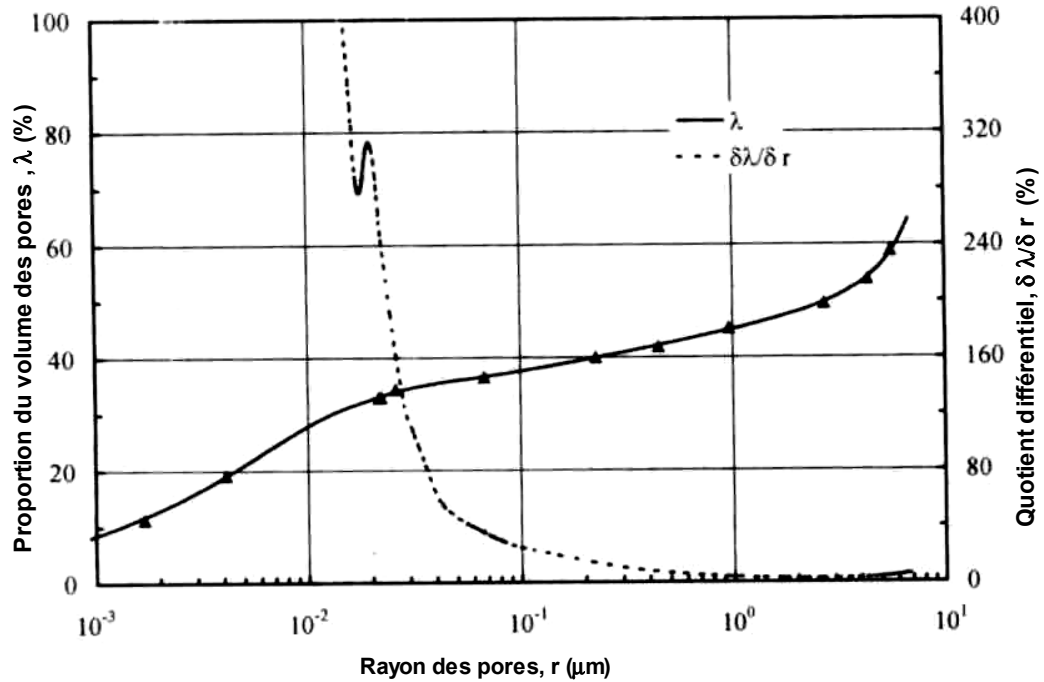


Figure 1.16. Distribution des tailles des pores d'érable à sucre (d'après Defo et al. 1999).

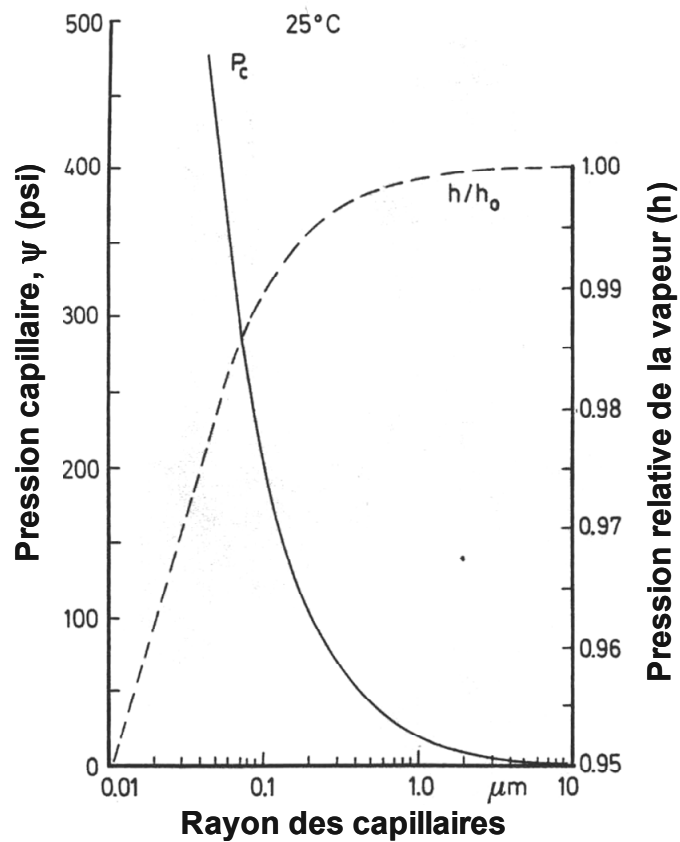


Figure 1.17. Relation entre la pression capillaire (P_c), le rayon capillaire et la pression relative du vapeur (d'après Choong et Tesoro 1989).

1.5 Influence de la teneur en humidité et des caractéristiques anatomiques du bois sur sa résistance mécanique

La teneur en eau du bois exerce une grande influence sur ses propriétés mécaniques, par exemple pour un bois sec à l'air (en équilibre hygroscopique avec le milieu ambiant) ses propriétés mécaniques chutent de 2 à 4% lorsque la teneur en eau du bois augmente de 1% (Jodin 1994). Ainsi, la perte de l'eau liée aux parois cellulaires résulte en une augmentation des propriétés mécaniques du bois. Par contre, le contraire peut se produire lorsque le bois est trop sec. Bodig et Jayne (1982) suggèrent qu'à des teneurs en humidité du bois au-dessous de 5%, il peut avoir une réduction de la résistance du bois due à des micro-fissures de la paroi cellulaire. Ces micro-fissures auraient quand même un caractère non permanent sur la résistance du bois en traction tangentielle (Goulet et Hernández 1991).

Reneaud et al. (1996) ont testé l'effet du taux de déformation et de l'humidité sur le module d'élasticité dans des essais de compression longitudinale, radiale et tangentielle. Ces auteurs ont observé qu'avec un faible taux de déformation les échantillons saturés étaient moins rigides que les échantillons secs. Le contraire a été observé avec l'application d'un taux de déformation élevé sur les échantillons testés en direction radiale et tangentielle. Les auteurs ont attribué ce résultat à la présence de l'eau liquide dans le lumen cellulaire qui se comporte comme un solide et contribue au renforcement de la structure, par conséquent l'effet d'amollissement produit par l'absorption de l'eau dans les parois des fibres peut être masqué. Ishimaru et al. (2001) ont constaté que les propriétés mécaniques (module d'élasticité (MOE) et module de rupture (MOR)) du bois conditionné en désorption à partir de la saturation intégrale sont plus faibles que celles du bois conditionné en-dessous du PSF. Cela serait dû à l'eau liquide contenue dans les échantillons provenant d'une saturation intégrale, qui génèrent des contraintes et des déformations locales qui affectent autres parties de l'échantillon et causent des contraintes et des déformations non homogènes et affaiblissent la résistance du bois face à des forces externes.

D'autres facteurs affectent les propriétés mécaniques du bois. La littérature présente une grande quantité des travaux portant sur l'effet de la masse volumique du bois sur ses propriétés mécaniques, tant au niveau inter-spécifique qu'au niveau intra-spécifique. Dans

le présent paragraphe seront cités quelques travaux portant sur ce sujet. Les propriétés mécaniques augmentent avec une augmentation de la masse volumique du bois, cette dernière dépend de la proportion relative des fibres par rapport aux éléments cellulaires, notamment les éléments de vaisseaux, ainsi que l'épaisseur propre de leur paroi (de 1,5 μm chez le balsa, à plus de 10 μm chez l'azobé) (Jodin 1994). Néanmoins, Leclercq (1981) a constaté que la masse volumique n'est pas un critère suffisant pour estimer avec précision les propriétés du bois puisqu'une même masse volumique peut correspondre à des échantillons de structure anatomique différente qui présentent des propriétés différentes. Cet auteur a étudié le rôle des éléments anatomiques sur la résistance mécanique du bois de hêtre et a constaté que la résistance à la compression axiale est influencée positivement par la proportion, la longueur et l'épaisseur des parois des fibres les moins poreuses et négativement par le diamètre des fibres. L'effort exercé en compression axiale est réparti sur toute la section mais est surtout repris par le tissu fibreux le plus résistant, en l'occurrence par les fibres les moins poreuses dont la proportion des fibres qui présentent des rayons entre 2,5 et 3,7 μm conditionne la résistance finale du bois sous l'effort. La correction de la masse volumique du bois par la proportion des substances secondaires peut se révéler intéressante lors de l'étude des bois à forte quantité de substances extractibles, comme c'est souvent le cas des espèces tropicales. Hernández (1989) a démontré que la masse volumique anhydre corrigée pour les substances secondaires est le facteur dominant des variations de la contrainte maximale (σ_L) et du coefficient de déformation en compression longitudinale (s_{22}). Cet auteur a donc souligné la nécessité de la détermination des extractibles pour relier les propriétés physico-mécaniques des bois tropicaux à leur masse volumique.

1.6 Détermination de la distribution d'humidité dans le bois par des méthodes non destructives

Un des objectifs de ce travail est la détermination de la distribution de l'eau liquide dans les cavités cellulaires au voisinage du PSF. Dans cette section nous allons faire une brève description des méthodes qui rendent possible l'analyse non destructive de la distribution d'eau dans un matériau.

L'utilisation des méthodes non destructives pour analyser principalement les relations eau - bois (la teneur en humidité, le mouvement de l'eau dans le bois, la détermination de l'eau liée et de l'eau liquide, etc.) a fait l'objet de plusieurs études.

Pour réaliser des analyses non destructives, les méthodes les plus utilisées sont la tomographie informatisée (*computed tomography* ou *computerized axial tomography*) et les techniques qui utilisent la résonance magnétique nucléaire (RMN) ou l'imagerie par résonance magnétique (IRM). La différence entre ces deux méthodes se situe au niveau de l'échelle des informations obtenues. La méthode la plus utilisée est le tomographe qui dispose d'une résolution d'environ 240 μm . Un problème particulier de cette méthode est la nécessité de connaître le profil de densité de l'échantillon pour pouvoir calculer la teneur en humidité des échantillons. La méthode la plus prometteuse pour obtenir des informations sur l'eau contenue dans des structures biologiques est la technique RMN, car la détermination des temps de relaxation permet de séparer et de quantifier les différents types d'eau. En raison de la grande précision de séparation des différents types d'eau dans le bois obtenue grâce à la technique RMN, une révision plus approfondie de cette technique est proposée dans les paragraphes suivants.

1.6.1 Résonance magnétique nucléaire (RMN)

Le principe de la RMN consiste à soumettre un échantillon à un champ magnétique fixe de forte intensité et à appliquer un champ magnétique tournant à la fréquence de résonance, afin de provoquer la résonance des moments magnétiques nucléaires. Cette résonance est repérée grâce à l'émission par les noyaux d'un rayonnement dans le domaine des fréquences radio (Demeure 1999).

En effet, le moment magnétique d'une population de noyaux placée dans un champ magnétique B_0 constitue un véritable oscillateur caractérisé par une fréquence propre ω_0 . Lorsque cet oscillateur est soumis à l'action d'un champ tournant de fréquence appropriée, il absorbe son énergie et cette adsorption est maximale lorsque la fréquence de l'onde est égale à ω_0 . Le noyau est ainsi soumis à l'action simultanée du champ B_0 fixe et du champ radiofréquence B_1 tournant autour de B_0 dans un plan perpendiculaire (Figure 1.18) (Bernard et al. 1988).

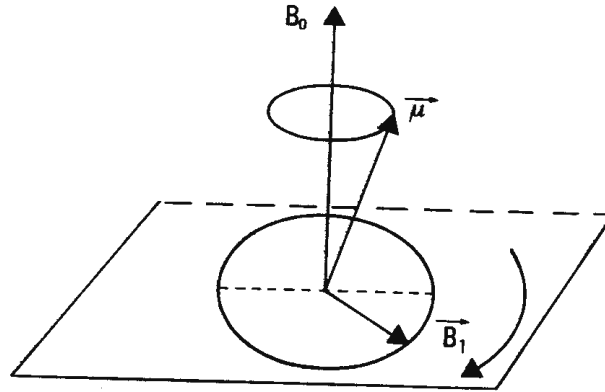


Figure 1.18. Actions des champs B_0 et B_1 en mécanique classique (d'après Bernard et al. 1988).

Après arrêt du champ tournant B_1 , l'énergie absorbée par le système magnétique est dissipée par relaxation ce qui rend le phénomène observable. De façon plus détaillée, après disparition du champ qui a perturbé le système de spins et déplacé le moment magnétique macroscopique \vec{M} , les noyaux tendent à retrouver l'équilibre par relaxation (\vec{M} va rejoindre sa position initiale c'est-à-dire parallèle à B_0). Le nouvel équilibre n'est pas obtenu instantanément mais se produit progressivement: on appelle phénomènes de relaxation cette évolution conduisant à un retour à l'équilibre initial (Bernard et al. 1988). Le retour à l'équilibre est dû à un très grand nombre d'interactions soit entre les noyaux eux-mêmes, soit entre les noyaux excités et le reste de la matière. Ces phénomènes sont régis par les lois du hasard et leur évolution temporelle peut être décrite par une loi exponentielle décroissante caractéristique des phénomènes aléatoires. Deux temps de relaxation sont définis:

- le temps de relaxation longitudinale (T_1) ou temps de relaxation spin-réseau correspond au retour à l'état initial par transfert d'énergie entre le système de spins et le milieu environnant appelé réseau.
- le temps de relaxation transversale (T_2) ou temps de relaxation spin-spin caractérise les interactions entre les divers spins de l'échantillon. Il traduit la perte de cohérence de phase des spins après arrêt du champ B_1 .

Plusieurs travaux ont utilisé les techniques RMN pour déterminer les quantités d'eau dans le bois. Ce matériau est un bon candidat pour les études quantitatives de RMN à cause de sa structure régulière et robuste qui permet de simplifier l'interprétation des résultats. Le signal RMN du bois vert peut être séparé en trois composantes majeures: le bois solide, l'eau des parois cellulaires et l'eau dans les lumens. Le signal du bois solide revient à zéro en une dizaine de microsecondes, ce qui facilite sa séparation avec l'eau des parois cellulaires, qui elle a un T_2 d'environ une milliseconde. Par contre, selon la taille des pores, le signal de l'eau dans le lumen cellulaire peut résonner entre des dizaines et des centaines de millisecondes (Araujo et al. 1993). La figure 1.19 montre la distribution des T_2 pour un échantillon de bois sec (A) et de bois vert (B). Dans cette figure, les différences de distributions observées pour les temps de relaxation de l'eau liquide dépendent notamment de la compartimentation de l'eau à l'intérieur des cellules de bois (Techoueyres et al. 2005).

Menon et al. (1987) ont utilisé le RMN et le microscope électronique à balayage pour déterminer la quantité d'eau liée et d'eau liquide présente dans différentes cellules des bois de sapin douglas et de cèdre de l'ouest lors du séchage. La figure 1.9 montre le pourcentage d'eau perdue pendant le séchage. Comme mentionné à la section 1.2.5, Menon et al. (1987) ont observé que lorsque l'eau commence à sortir des membranes cellulaires (environ à 31% de teneur en eau) il reste encore de l'eau liquide dans les rayons et les trachéides. L'eau liquide serait complètement sortie des vides du bois seulement à 9% de teneur en eau.

Les différents temps de relaxation observés lors de l'analyse de RMN permettent aussi de déterminer la quantité de l'eau localisée dans les différentes structures du bois (Menon et al. 1989 ; Flibotte et al. 1990 ; Xu et al. 1996). La figure 1.20 montre le travail de Menon et al. (1989) sur le bois de cèdre de l'ouest. Trois images séparées y sont montrées selon la masse volumique de l'eau de l'échantillon en gcm^{-3} . Selon ces chercheurs, le T_2 moyen correspond au bois final (BF), le T_2 long correspond au bois initial (BI) et l'eau liée (PC) correspond très bien à la densité des parois cellulaires du bois.

Labbé et al. (2002) ont aussi utilisé la technique RMN pour déterminer la quantité d'eau liée et liquide dans les cellules de cœur et d'aubier à différentes températures et teneurs en humidité du bois de pin maritime. Selon la quantité de l'eau liquide observée, ces chercheurs ont pu différencier les bois d'aubier et de duramen. Des pics additionnels, dus à

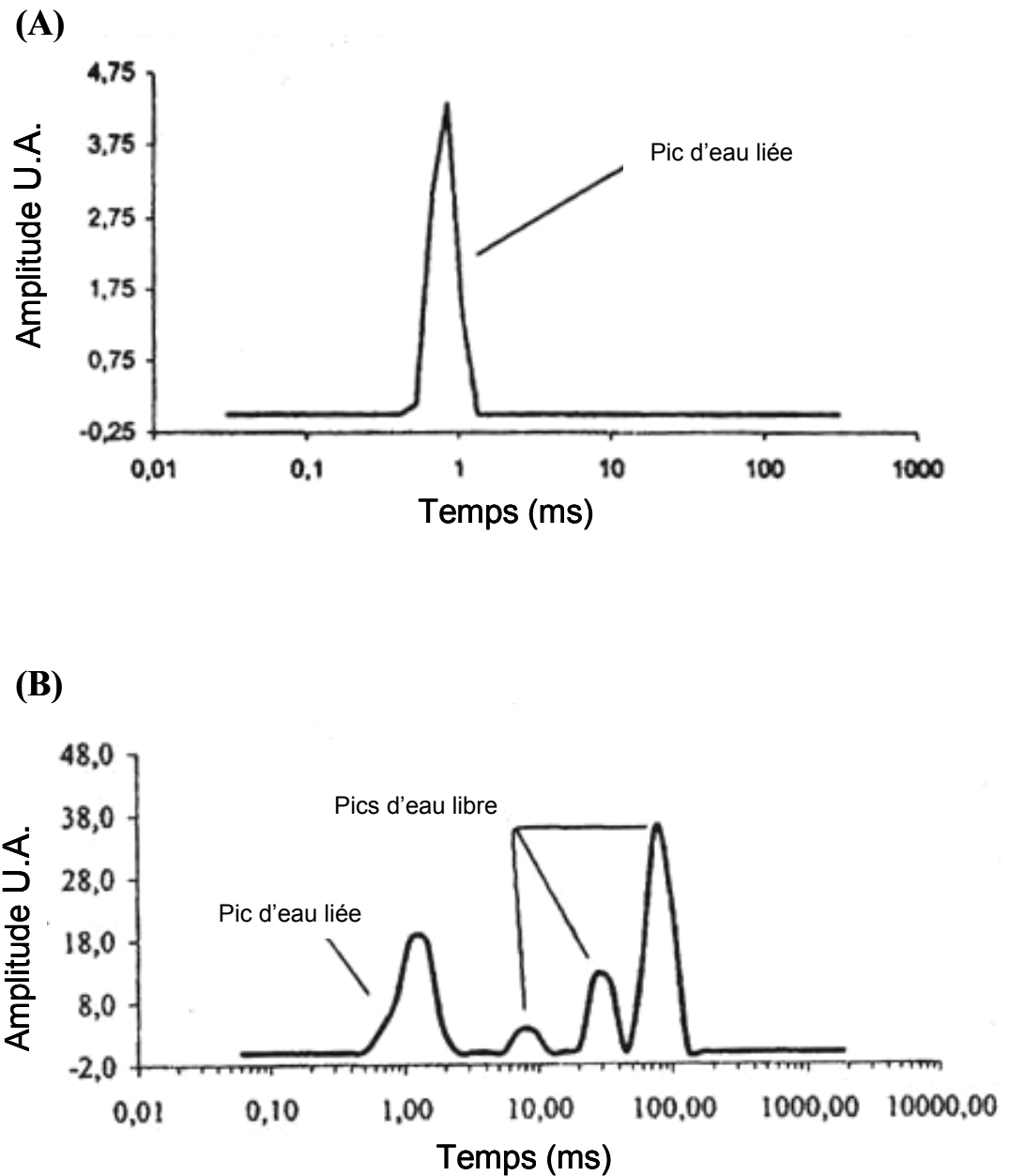


Figure 1.19. Distribution des temps de relaxation (T_2) pour un échantillon de bois sec (A) et vert (B) (d'après Techoueyres et al. 2005).

la présence d'oléorésine, ont été observés sur les échantillons de duramen riches en résine et des échantillons présentant des nœuds.

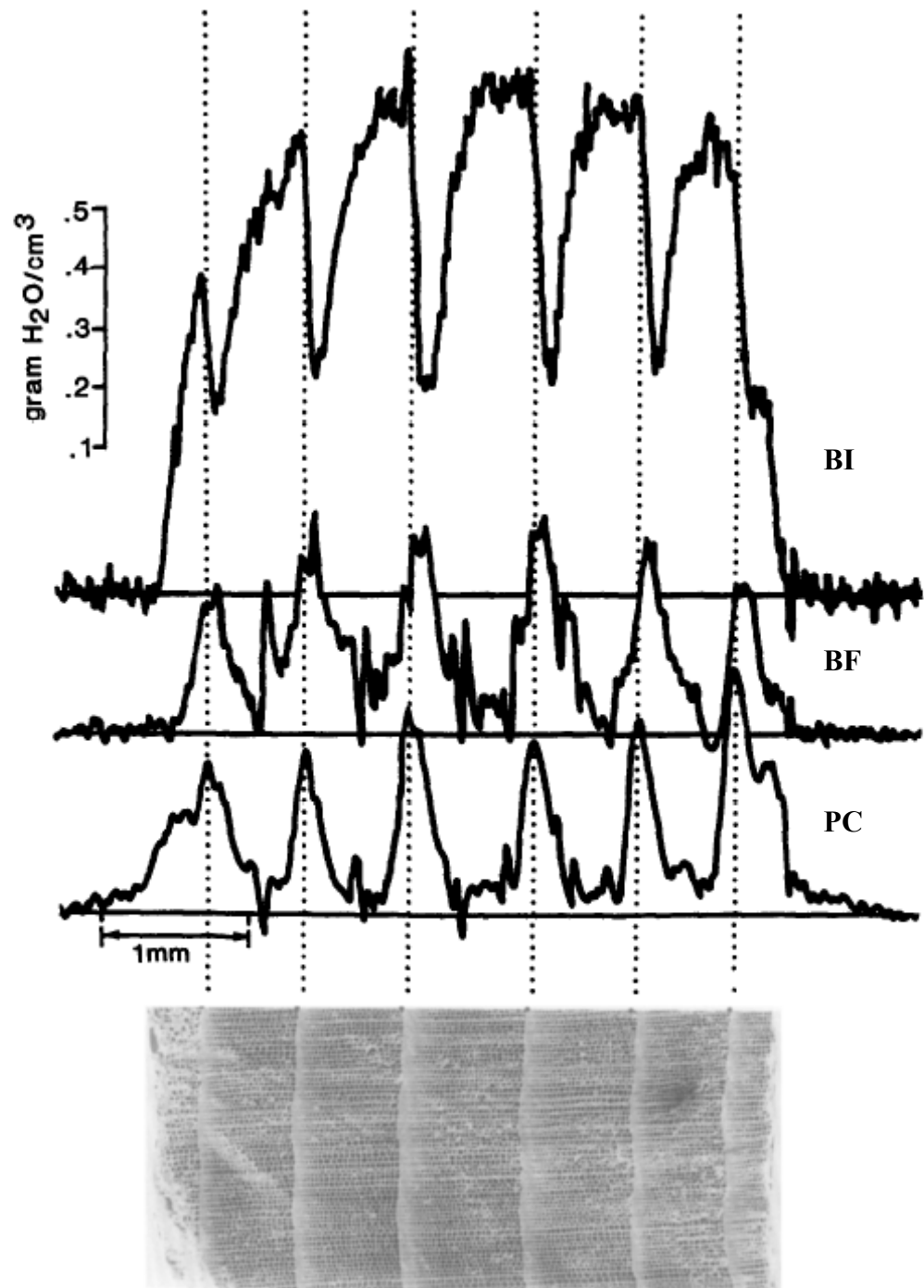


Figure 1.20. Comparaison entre une micrographie MEB du bois de cèdre d'ouest et les images séparées de l'eau présente dans les lumens des trachéides de bois initial (BI), dans les lumens des trachéides de bois final et des rayons (BF) et l'eau liée aux parois cellulaires (PC) (d'après Menon et al. 1989).

Hall et al. (1986) ont été un des premiers groupes de chercheurs à utiliser l'imagerie par résonance magnétique (IRM) pour étudier le bois. Ils ont été capables de différencier le bois initial du bois final du tremble. Le bois initial présente une coloration plus claire, soit parce que cette région contient plus d'eau soit parce que l'eau présente dans le bois initial possède des propriétés de relaxation différentes de celle dans le bois final. Les régions plus denses du bois ont pu être différenciées, celles-ci présentant une couleur plus foncée.

L'IRM a été également utilisée pour déterminer le comportement du bois lors de son séchage. Rosenkilde et Glover (2002) ont analysé des échantillons de *Pinus sylvestris* de 14 mm (diamètre) x 20 mm (largeur) avec une teneur en humidité initiale de 116%. Le volume de bois mesuré était de 0,3 mm x 5 mm (épaisseur; diamètre) et la résolution de l'image était de 13 μm . Des images au microscope électronique ont été faites pour analyser la surface des échantillons. Les auteurs ont observé que pour une épaisseur supérieure à 90 μm le profil d'humidité devient plat à des teneurs en humidité au-dessus de 50%. Au-dessous de 50% H, un gradient d'humidité est observé depuis la surface du bois jusqu'à 0,3 mm d'épaisseur. Ilvonen et al. (2001) ont utilisé des jeunes plants de *Pinus sylvestris* pour étudier le mouvement de l'eau dans le xylème. Étant donné la structure plus simple des jeunes plants, leur analyse par IRM est moins compliquée que celle du bois mature. Dans ce travail, la résolution obtenue était de 0,31 x 0,31 mm et des images microscopiques ont été faites pour mesurer la taille du lumen des cellules.

1.7 Objectifs et hypothèses du présent travail

L'analyse des travaux antérieurs a dégagé les aspects et problématiques suivants:

- il y a une incertitude liée au concept de « point de saturation des fibres »;
- l'hypothèse largement utilisée de qu'au-dessus du PSF les propriétés dimensionnelles et mécaniques du bois sont inchangeables;
- la grande influence des éléments anatomiques sur la relation $\psi \times H_{\text{éq}}$, surtout à des teneurs élevées d'humidité relative de l'air;
- la porosité du bois affecte grandement les forces capillaires dans ce matériau, et
- la possibilité d'utilisation des analyses non destructives pour l'étude de la distribution de l'eau liquide dans le bois.

Les hypothèses du présent travail sont alors les suivantes:

1) Hypothèse principale:

Le concept du « point de saturation des fibres » n'est pas adéquat puisque l'eau liquide et l'eau liée co-existent même en-dessous de ce point.

2) Hypothèses secondaires:

- Les changements dimensionnels et mécaniques du bois ne sont pas limités à des teneurs en humidité en-dessous du PSF.
- L'eau liquide qui reste dans le bois au-dessous du PSF est localisée dans les tissus moins perméables, soit les cellules de parenchyme radial.
- La structure anatomique du bois influence la quantité de l'eau liquide qui reste dans le bois au-dessous du PSF.

Afin de vérifier ces hypothèses, le présent travail de recherche comportera trois volets principaux:

- Le premier volet consiste à coupler des essais de compression tangentielle à des expériences de sorption d'humidité. Cette partie est traitée dans les chapitres 2 et 3 avec les bois de bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton), hêtre (*Fagus grandifolia* Ehrhart), cachimbo (*Cariniana domesticata* (C. Martius) Miers) et congona (*Brosimum alicastrum* Swartz).
- Le deuxième volet fera appel à des techniques de résonance magnétique nucléaire afin de déterminer la distribution de l'eau liquide dans les cavités cellulaires. Ce sujet est présenté au chapitre 4 sur les espèces d'érable à sucre (*Acer saccharum* Marsh.), hêtre et huayruro (*Robinia coccinea* Aublet).
- Le troisième volet de recherche consistera à réaliser des analyses d'anatomie quantitative et de porosimétrie au mercure de façon à aider à la compréhension des phénomènes hygroscopiques étudiés. Cette partie est principalement discutée aux chapitres 5 à 7 sur deux espèces tempérées (bouleau jaune et hêtre) et cinq espèces tropicales (cachimbo, congona, huayruro, pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* C. Martius) et tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke)).

[MCCours.com](https://www.mccours.com)