

Chapitre 1

Revue de littérature

1.1. Hygroscopicité et domaine hygroscopique

Comme tous les autres matériaux ligno-cellulosiques, une des principales caractéristiques du bois est qu'il est hautement hygroscopique. Un matériau hygroscopique tend vers un équilibre de teneur en humidité avec l'air qui l'entoure, en lui restituant ou en lui prenant de la vapeur d'eau. Cet équilibre se manifeste par une teneur en humidité particulière, laquelle est fonction principalement de la température (T), de l'humidité relative de l'air ambiant (HR), de l'histoire de sorption ainsi que de la pression (Bizoň 1995).

La teneur en humidité d'équilibre (H_e) du bois augmente ainsi avec l'humidité relative de l'air et diminue avec l'augmentation de la température. Ces mêmes variables affectent considérablement les principales caractéristiques physiques du bois (Djolani 1970). Cela a principalement lieu dans le domaine hygroscopique, lequel s'entend de l'état anhydre ($H = 0\%$) qui constitue l'équilibre à une humidité relative de l'air très faible ($HR = 0\%$), jusqu'à celui dit de saturation des membranes ($PSF \approx 30\% H$ à $20^\circ C$), qui correspond à un équilibre en présence de vapeur d'eau saturée ($HR = 100\%$) (Hernández 1989).

Le point de saturation des fibres (PSF) fut défini au début du siècle par Tiemann (1906) comme la teneur en humidité à laquelle les parois des cellules sont complètement saturées d'eau hygroscopique tandis qu'il n'y a pas d'eau libre dans les cavités cellulaires. Selon Stamm (1964), les molécules d'eau sont retenues dans le bois de trois façons : celles liées au niveau monomoléculaire (correspondant à de faibles valeurs d'humidité relative), celles au niveau polymoléculaire (à humidités relatives intermédiaires), et enfin les molécules

retenues dans les capillaires très fins des membranes par action des forces de capillarité (à des valeurs élevées d'humidité relative avoisinant 100%).

Le point de saturation de fibres est affecté par plusieurs facteurs. Parmi les sources de variation de cette propriété, on retrouve la teneur en extraits, la masse volumique et le contrefil du bois, lesquels exercent un effet inversement proportionnel sur le PSF (Arévalo 2002; Hernández 2007a). Selon plusieurs auteurs, des bois ayant une teneur en extraits élevée présentent une faible valeur de PSF car ces substances occupent des espaces dans les parois cellulaires qui sont généralement disponibles pour l'eau (Wangaard et Granados 1967; Stamm 1971; Bodig et Jayne 1982). Il en serait de même le reste du domaine hygroscopique (Wangaard et Granados 1967; Choong et Achmadi 1991; Arévalo 2002; Hernández 2007b). Par ailleurs, la teneur en extraits provoque également une diminution du retrait du bois dans tout le domaine hygroscopique (Nearn 1955; Cooper 1974; Arévalo 2002; Hernández 2007c). De plus, le PSF diminue avec l'augmentation de la température entre 0 et 140°C, à un taux moyen de 0,93% (H) par élévation de 10°C (Siau 1995).

Les effets de la température, de la masse volumique et de la composition chimique du bois de cinq espèces sur le PSF ont été étudiés par Kolin et Stevanovic (1996). Ils ont montré que cette propriété diminue au fur et à mesure que la masse volumique basale et la température augmentent. Selon ces auteurs, la faible porosité des espèces denses pourrait limiter l'accès de l'eau aux groupes hydroxyles dans les microfibrilles de cellulose disponibles pour les liaisons hydrogènes.

Il existe différentes méthodes pour déterminer le PSF. Plusieurs de celles-ci sont fondées sur le principe que le PSF est la teneur en humidité sous laquelle les propriétés physiques et mécaniques du bois commencent à s'altérer (USDA 1974; Siau 1995). Ainsi, 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. La méthode de l'intersection du retrait volumique en fonction de la teneur en humidité d'équilibre pour déterminer le PSF a été proposée par Kelsey (1956). Étant donné 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 ce point d'intersection. Cette méthode a été considérée par plusieurs chercheurs comme étant l'une des plus adéquates (Hernández 1993a; Choong et Achmadi 1991; Arévalo 2002).

1.2. Hystérèse de la sorption d'humidité

Il est reconnu qu'à une température fixe et à une humidité relative de l'air donnée les équilibres atteints au terme d'une perte (désorption) ou d'une prise (adsorption) d'humidité diffèrent sensiblement les uns des autres (Hernández 1989). Ce phénomène, connu depuis longtemps, est désigné comme hystérèse de la sorption d'humidité, et il est montré à la figure 1, pour le bois d'érable à sucre à 21°C. Ce graphique montre les écarts entre l'adsorption d'humidité à partir de l'état anhydre et la désorption depuis l'état de saturation des membranes (expérience n°3).

Puisqu'elle est formée après des changements hygrothermiques entièrement de même sens, une telle boucle représente en principe l'enveloppe des variations possibles d'équilibre d'humidité d'un bois à la température considérée (Urquhart 1960). La boucle d'hystérèse de sorption s'obtient effectivement dans les conditions limites, dans le sens qu'elles tendent constamment à faire augmenter ou diminuer la teneur en humidité du bois. Néanmoins, en faisant varier la température ou l'humidité relative de l'air ou les deux à la fois, certains changements pourraient se manifester (Djolani 1970).

D'autre part, selon Djolani (1970), l'orientation et surtout les dimensions des éprouvettes n'affectent pas l'hystérèse de la sorption. Ces mêmes résultats ont été rapportés par Goulet et Fortin (1975) et Laforest et Plamondon (1976) qui mentionnent que l'orientation et surtout les dimensions des éprouvettes affectent la vitesse des échanges d'humidité, mais sans toutefois influencer l'hystérèse de sorption.

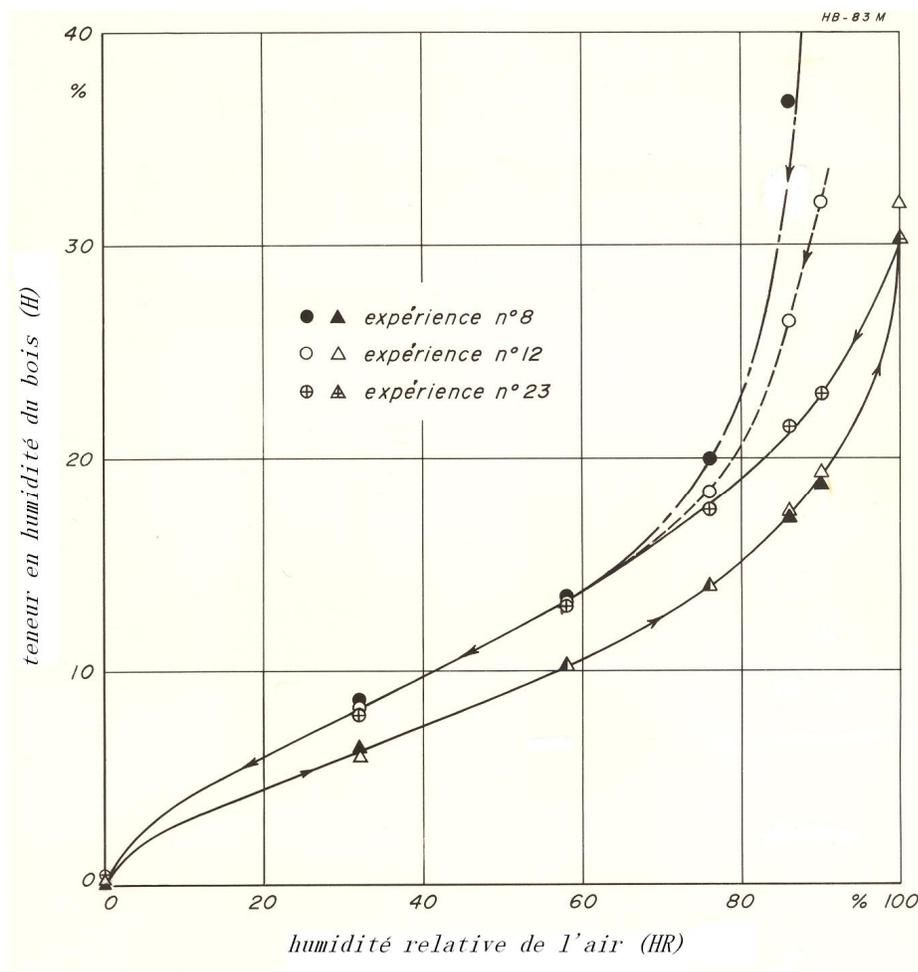


Figure 1. Isothermes de sorption d'humidité du bois d'érable à sucre à la température de 21°C (d'après Goulet 1968).

Plusieurs hypothèses ont été proposées pour expliquer le phénomène d'hystérèse de sorption. Selon Djolani (1970), une première théorie encore acceptée aujourd'hui est celle d'Urquhart et Williams (1924). Elle fait appel essentiellement aux liaisons hydrogènes des matières ligno-cellulosiques: ces dernières sont les principaux responsables de la sorption des molécules d'eau qu'elles attirent mais elles 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. Dans ces conditions, elles seraient

aussi plus nombreuses à l'adsorption qu'à la désorption, rendant aussi l'accès aux groupements hydroxyles 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 lignocellulosique dont l'effet pourrait être plus que proportionnel aux différences elles-mêmes (Ant-Wuorinen et Visapää 1960; Treloar 1963). Une autre théorie est celle de Malmquist (1958, 1959), qui fait appel à une "structure hystérésique" des membranes lignocellulosiques, c'est-à-dire à 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 de faibles valeurs de teneurs en humidité d'équilibre et selon Djolani (1970) les trois explications précédentes sont compatibles entre elles.

1.3. Hystérèse à saturation d'humidité

L'hystérèse à saturation est définie comme étant la différence entre les équilibres atteints en désorption aux humidités élevées et celui atteint à partir d'une saturation des membranes. Le phénomène a été noté auparavant par divers auteurs (Barkas 1949; Higgins 1957; Spalt 1957), bien que c'est Goulet (1967) qui nomme le phénomène «hystérèse à saturation d'humidité».

La figure 1 présente cette caractéristique pour trois expériences, lesquelles ont été réalisées à l'aide de la technique des solutions salines saturées. Pour l'expérience 3, la désorption a eu lieu à la suite d'une saturation des membranes dans l'air humide, tandis que dans les autres expériences, la désorption a été précédée d'une saturation dans l'eau liquide. Cette divergence arrive au dessus de 60% (HR), et a été considérée comme étant propre à la première désorption (Higgins 1957; Spalt 1957; Goulet 1968). Skaar (1988) a attribué à tort ce phénomène à une perte initiale irréversible de l'hygroscopicité du bois vert ou saturé d'eau. Cependant, plusieurs travaux démontrent que ce phénomène est plutôt reproductible (Goulet 1968; Djolani 1970; Fortin 1979; Hart 1984; Cloutier et Fortin 1991; Goulet et

Hernández 1991; Hernández et Bizoñ 1994; Almeida et Hernández 2006a, 2006b; Hernández et Pontin 2006).

Les isothermes de sorption du bois de la pruche de l'Ouest obtenues à l'aide de la technique de la membrane poreuse sous pression à 21°C, sont présentées à la figure 2. La technique de la membrane poreuse sous pression permet de mieux contrôler la quantité de vapeur d'eau à des humidités relatives élevées, en facilitant l'obtention des valeurs précises de teneur en humidité d'équilibre à proximité de la pression de vapeur d'eau saturée, soit au dessus de 96% (HR). Dans le domaine des humidités relatives élevées, la boucle d'hystérèse s'élargit grandement. Ainsi, la figure 2 montre un fort comportement hystérétique qui est attribué, selon Fortin (1979), à la présence du phénomène dit "de la bouteille d'encre" provoqué par la variation de la dimension des capillaires dans le bois. En effet, le bois est composé de cavités cellulaires interconnectées en série par des canaux plus étroits. Cette variation de la 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. La courbe de désorption est fortement influencée par le diamètre des canaux qui relie les cavités cellulaires, tandis que la courbe d'adsorption est surtout régie par le diamètre de ces cavités. Les données de teneur en humidité d'équilibre du bois à des humidités relatives si élevées sont très importantes puisque c'est dans cette région que les forces capillaires agissent sur l'eau libre dans le bois.

La technique de la membrane poreuse introduit le concept de potentiel hydrique (ψ), et elle a été utilisé auparavant par plusieurs chercheurs (Robertson 1965; Stone et Scallan 1967; Griffin 1977; Fortin 1979; Cloutier et al. 1995; Almeida et Hernández 2006a, 2006b; Hernández et Pontin 2006). Également une continuité entre les courbes de désorption obtenues à l'aide de la technique des solutions salines saturées et celle de la membrane poreuse sous pression à été démontrée par Cloutier et Fortin (1991), Hernández et Bizoñ (1994), Zhang et Peralta (1999), Almeida et Hernández (2006a, 2006b), Hernández et Pontin (2006). Cela confirme ainsi que la méthode de la membrane poreuse est adéquate pour la détermination de la teneur en humidité d'équilibre dans le bois dans des conditions élevées d'humidité relative (figure 3).

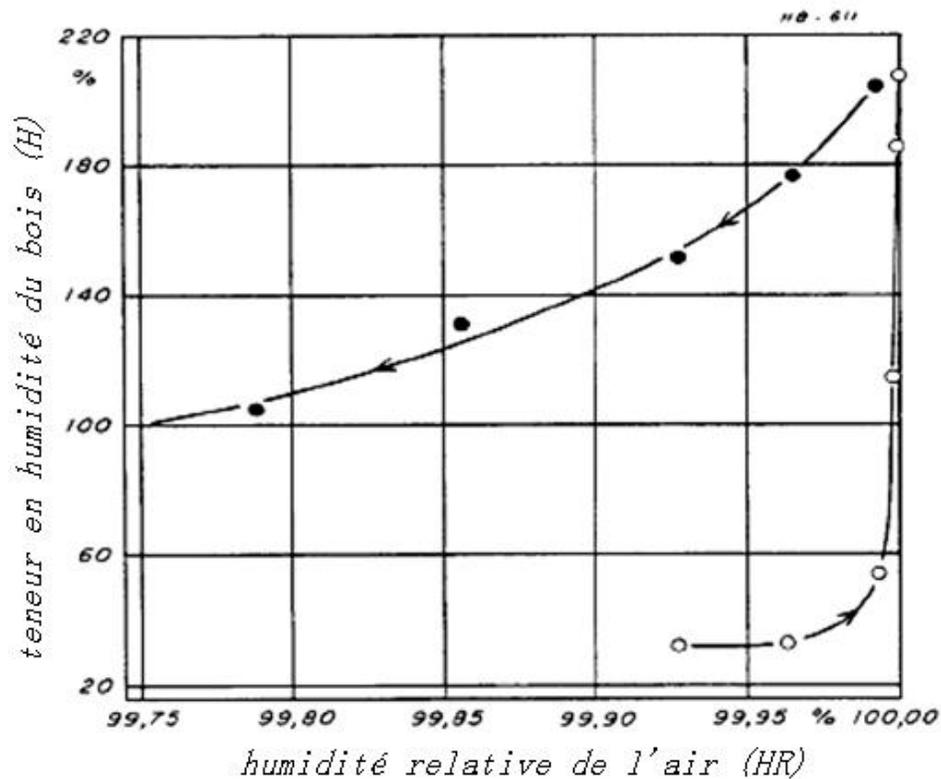


Figure 2. Équilibre hygroscopique moyen, établi à l'aide de la technique des plaques et membranes poreuses sous pression, aux humidités très élevées. Aubier de pruche de l'ouest à 21°C (d'après Fortin 1979).

D'ailleurs, la figure 4 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 (Zhang et Peralta 1999). L'adsorption et la désorption capillaire sont étroitement liées à la structure poreuse. De cette manière, à des valeurs élevées d'humidité relative la boucle d'hystérèse est reliée à la taille et à la distribution de pores dans le bois.

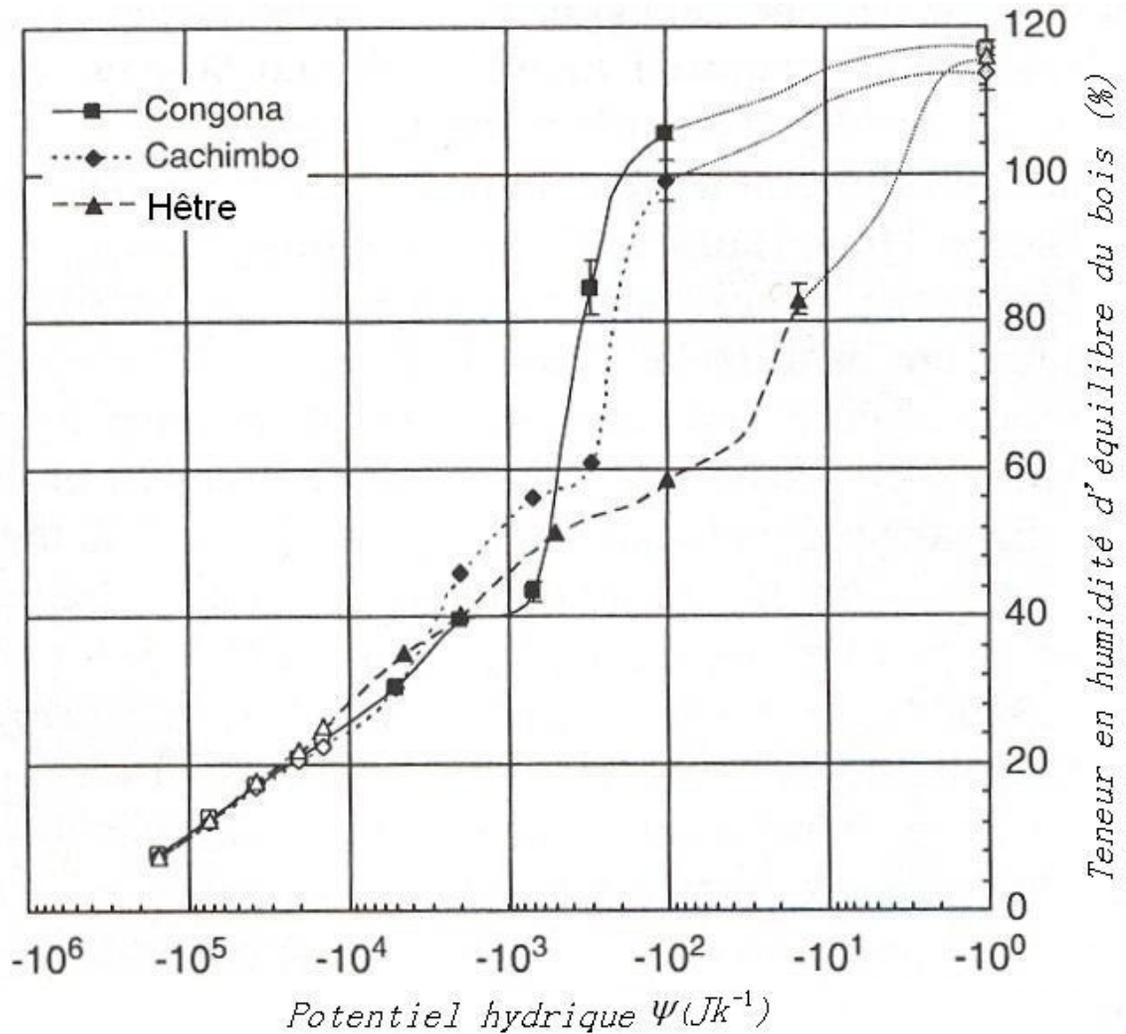


Figure 3. Teneur en humidité d'équilibre en fonction du potentiel hydrique du bois de congona, cachimbo, et hêtre à 25°C (d'après Almeida et Hernández 2006b). Les valeurs à -100ψ représentent la saturation maximale en-dessous de l'eau distillée; les symboles noirs sont les valeurs obtenues par la méthode de la membrane poreuse sous pression et les symboles blancs sont les valeurs obtenues par la méthode de solutions salines saturées (l'erreur type est montrée seulement quand elle dépasse la taille du symbole).

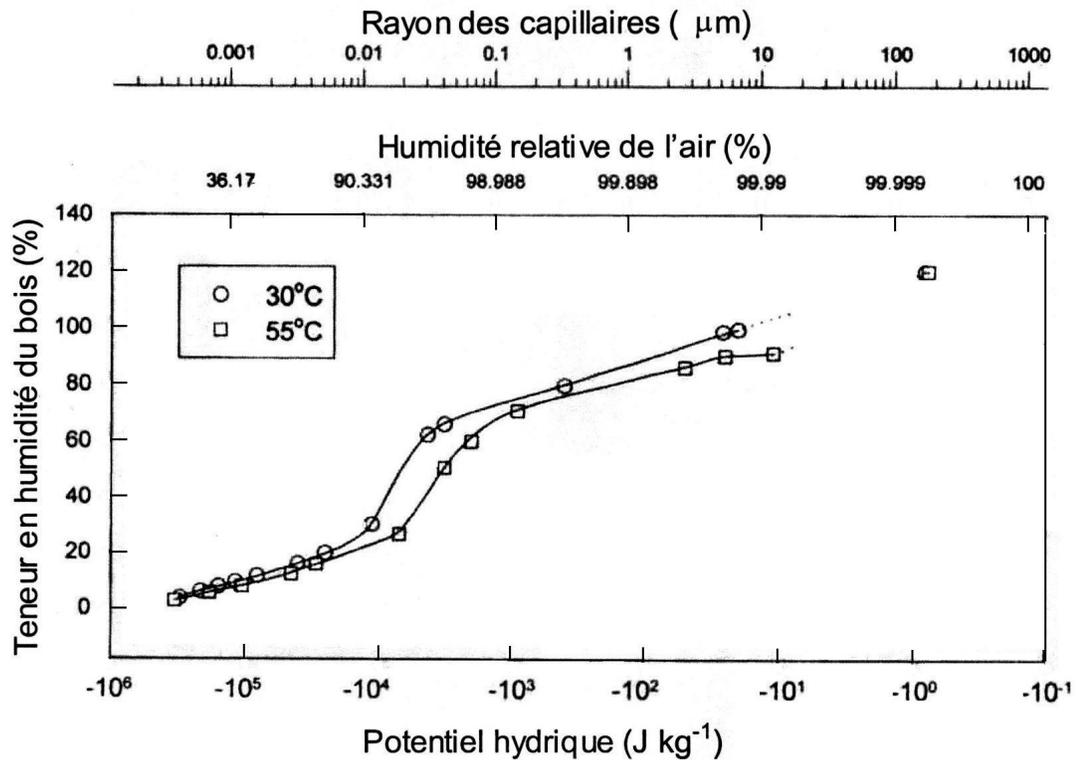


Figure 4. Isothermes de désorption en fonction du potentiel hydrique du bois de chêne rouge à 30 et 55°C (d'après Zhang et Peralta 1999).

1.4. Effet de l'hystérèse à saturation sur les propriétés du bois

Il est reconnu que la teneur en humidité d'équilibre affecte plusieurs propriétés du bois au-dessous de la saturation de membranes, tandis qu'au-dessus de celle-ci ces propriétés demeurent inchangées (USDA 1974; Siau 1984; Skaar 1988). Ainsi, il y a une augmentation de la résistance mécanique du bois avec la diminution de la teneur en humidité au-dessous de la saturation de membranes, alors qu'elle reste inchangée au-dessus de celle-ci (Bodig et Jayne 1982). Une perte d'humidité des parois cellulaires provoque une augmentation des propriétés mécaniques tandis qu'une perte d'eau liquide logée dans les cavités cellulaires n'a aucun effet. Ce paramètre est souvent utilisé dans les modèles d'ajustement des propriétés mécaniques en fonction de la teneur en humidité du bois

(Bodig et Jayne 1982), de même que pour les modèles d'ajustement de la densité et du retrait du bois (Skaar 1988; Tsoumis 1991; Siau 1995).

Toutefois, la validité de cette affirmation a été remise en question suite à des travaux qui ont montré des résultats divergents. Par exemple, Stevens (1963) a rapporté que le retrait du bois de hêtre a débuté au-dessus du PSF (figure 5). 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. Goulet (1968) a constaté que la compression radiale du bois d'érable à sucre est affectée à 37% ($H_é$), alors que la saturation de membranes de ce bois est d'environ 30% (H) (figure 6). Également, Goulet et Hernández (1991) ont mesuré l'influence de la teneur en humidité sur la traction tangentielle du bois d'érable à sucre à plusieurs conditions d'humidité dont certaines près de son PSF. Bien que ses résultats à la désorption n'ont été réalisés que jusqu'à 26% ($H_é$), l'allure de courbes obtenues par ces auteurs leur a permis de supposer que l'effet de la teneur en humidité du bois pourrait se prolonger même au-dessus de la saturation des membranes. Ce phénomène a été relié à l'hystérèse à la saturation, laquelle affecte la sorption du bois au-dessus de 63% (HR), (Hernández 1983). Cette hystérèse implique que durant la désorption, la perte d'eau hygroscopique commence avant que toute l'eau liquide soit enlevée du bois.

Un travail concentré à des humidités relatives élevées, entre 90% et 100%, fut réalisé par Hernández et Bizoň (1994) à l'aide de deux méthodes de sorption, soit celle des solutions salines saturées et celle de la membrane sous pression. Les résultats montrent que le retrait et la compression tangentielle du bois d'érable à sucre sont affectés même au-dessus du PSF. En désorption, la perte d'eau hygroscopique de ce bois a débuté à environ 42,5% ($H_é$), alors que le PSF a été évalué à 31,1% (H). L'analyse montre que cette humidité devrait être fonction de l'espèce et surtout de la dimension et distribution des micro-pores dans le bois, ainsi que de la proportion de différents tissus ligneux du bois. En conséquence ces auteurs ont suggéré que l'eau liquide au-dessus de 42,5% (H) pourrait être logée dans les cellules du bois interconnectées par les plus petits capillaires, soit principalement dans les rayons du bois d'érable à sucre.

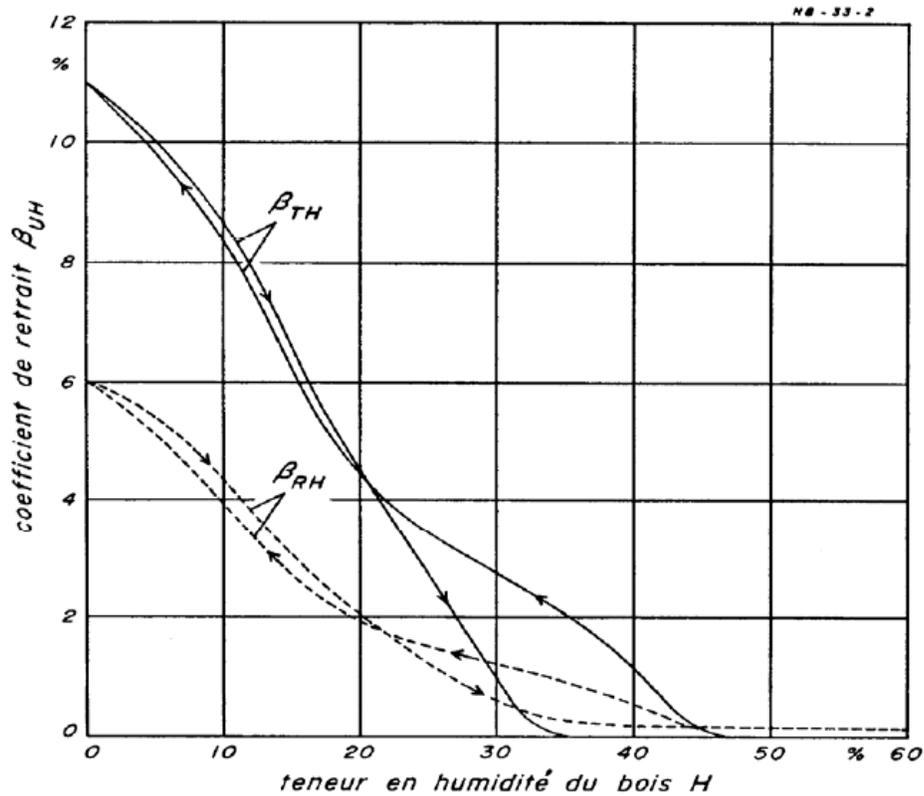


Figure 5. Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à 25°C (d'après Stevens 1963).

Les rayons sont considérés comme étant les éléments les moins perméables dans le bois des feuillus (Teesdale et MacLean 1918; Wheeler 1982; Siau 1984, 1995). Ces éléments sont si imperméables que la perte d'eau hygroscopique par diffusion commence dans les tissus plus perméables du bois.

Almeida et Hernández (2006a) ont constaté que le retrait et la compression tangentielle du bois de bouleau jaune sont affectés aussi au-delà du PSF. Durant la désorption, la perte de l'eau liée débute à environ 41% (H_e), alors que le PSF estimé a été de 31% (H) (figures 7 et 8).

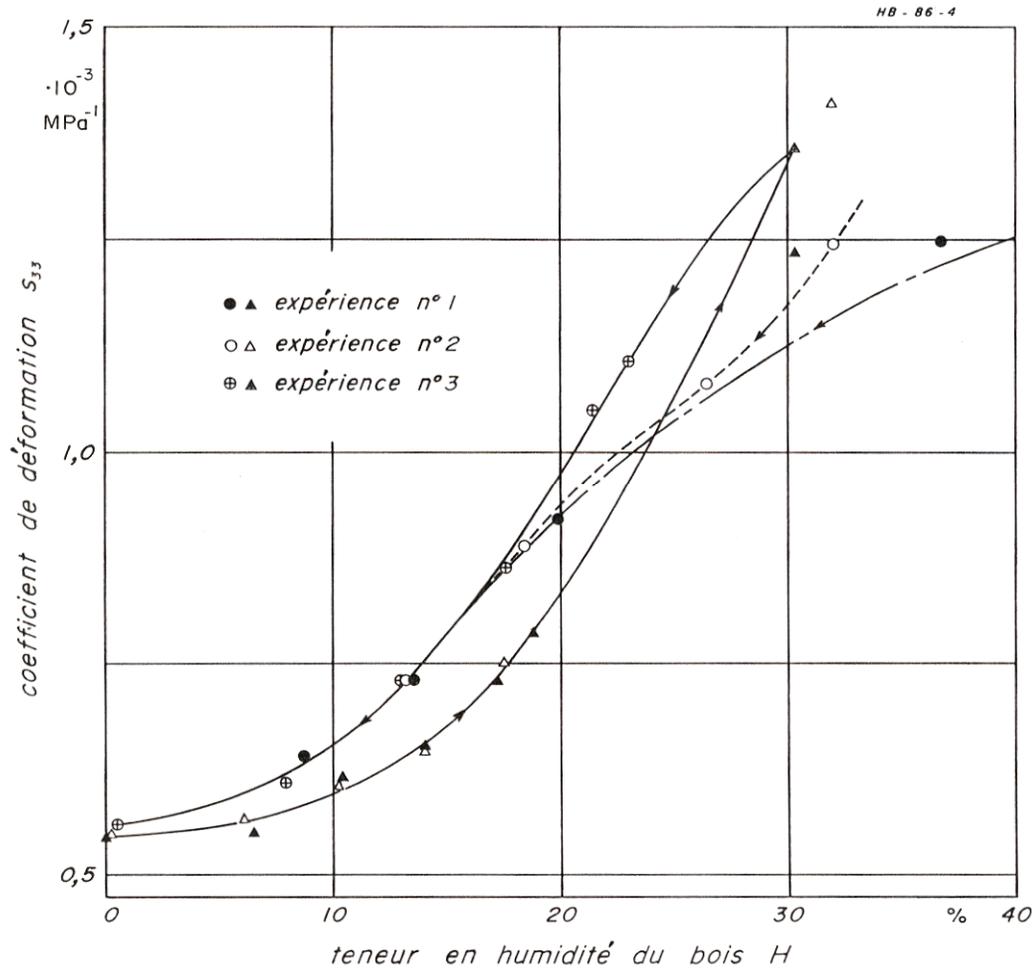


Figure 6. Coefficient de déformation du bois d'érable à sucre en compression radiale en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Goulet 1968).

Des résultats semblables ont été observés par Almeida et Hernández (2006b) pour les bois de hêtre, congona et cachimbo (figures 9 et 10), et par Hernández et Pontin (2006) pour les bois de tornillo, pumaquiro et huayruro. Ces travaux ont été tous réalisés à la température ambiante (25°C).

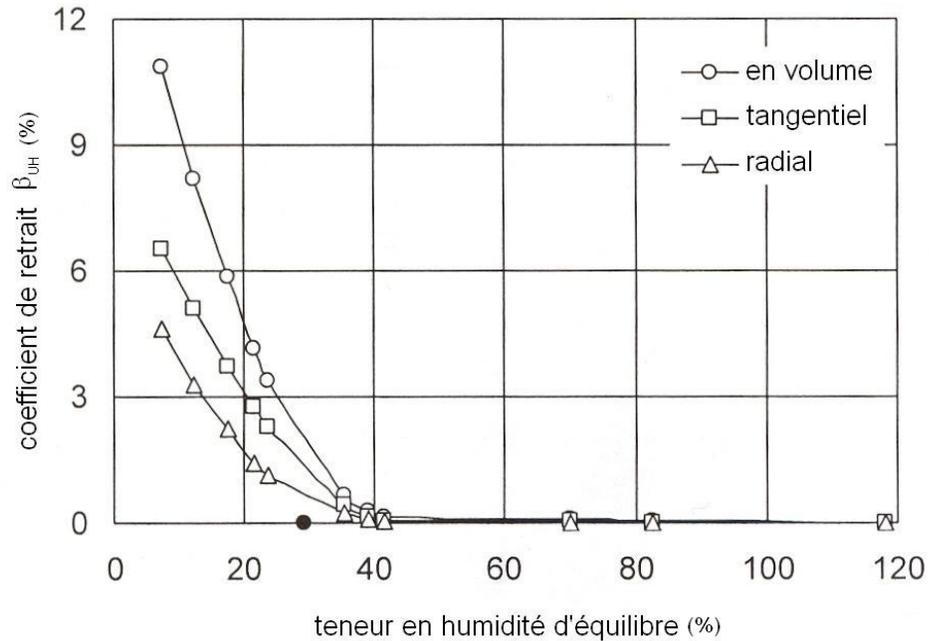


Figure 7. Coefficient de retrait β_{UH} du bois de bouleau jaune en fonction de la teneur en humidité d'équilibre à 25°C (d'après Almeida et Hernández 2006a).

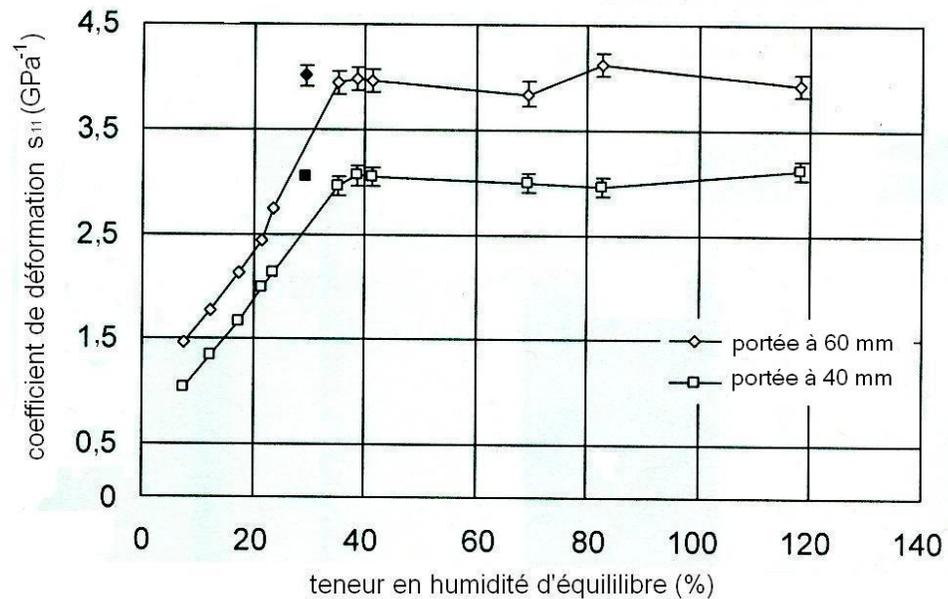


Figure 8. Coefficient de déformation s_{11} du bois de bouleau jaune en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 25°C (d'après Almeida et Hernández 2006a).

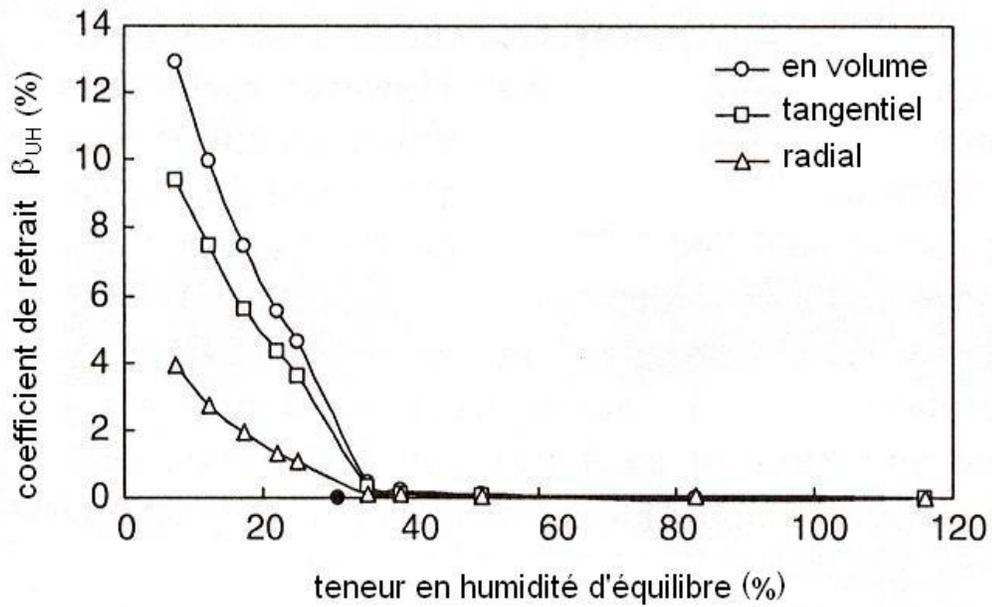


Figure 9. Coefficient de retrait β_{UH} du bois de hêtre en fonction de la teneur en humidité d'équilibre à 25°C (d'après Almeida et Hernández 2006b).

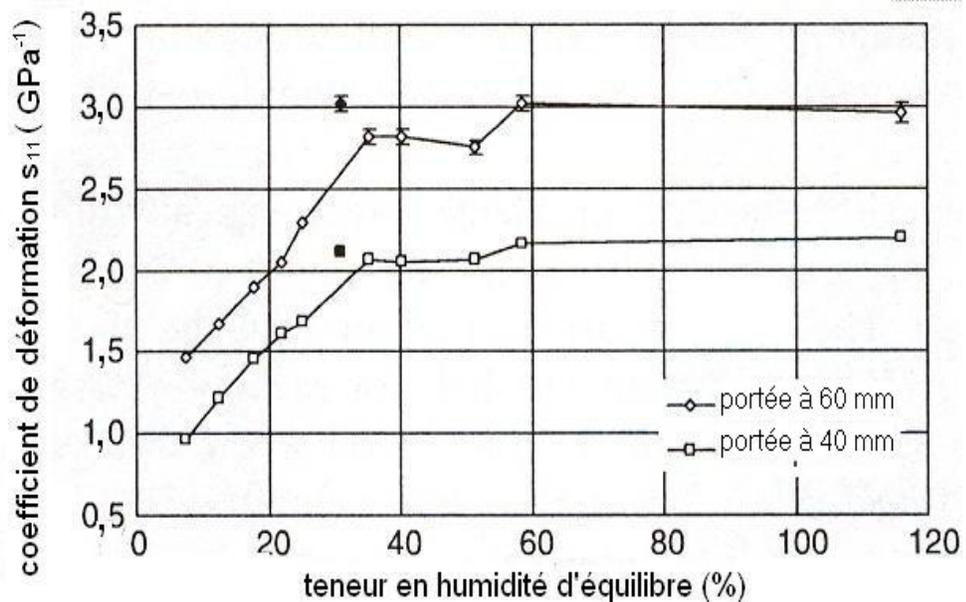


Figure 10. Coefficient de déformation s_{11} du bois de hêtre en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 25°C (d'après Almeida et Hernández 2006b).

1.5. Effet de la température sur les propriétés du bois

La teneur en 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 (Djolani 1970). Une conclusion semblable de l'effet de la température sur la teneur en humidité d'équilibre a été obtenue par Kolin et Stevanovic (1996) avec des espèces feuillues entre 20 et 80°C et des espèces résineuses entre 20 et 90°C, et par Ahmet et al. (2000) sur plusieurs espèces d'importance commerciale à trois températures. Ces derniers ont rapporté aussi une réduction de l'hygroscopicité d'environ 0,1% (H) par degré Celsius d'augmentation. D'ailleurs, Siau (1995) mentionne que le point de saturation des fibres diminue avec une augmentation de la température. Cette diminution est de l'ordre de 0,93% (H) par 10°C d'augmentation.

Weichert (1963) a étudié l'effet de la température sur les isothermes de sorption d'humidité du bois de hêtre. Ses résultats montrent que l'hystérèse de désorption est fortement affectée par la température: à 50°C elle est déjà trois ou quatre fois moindre qu'à 25°C et elle disparaît même entre 75 et 100°C. Ce dernier résultat a été confirmé par Engelhardt (1979) qui mentionne que la boucle d'hystérèse du bois de hêtre devrait disparaître autour de 100°C. Il mentionne aussi que les traitements thermiques diminuent la capacité de sorption du hêtre de façon irréversible, déjà à partir de 80°C. Cependant, l'ampleur de ces effets dépend de l'intensité du traitement en termes de température, d'humidité relative de l'air et de durée, mais il est aussi lié à l'espèce ligneuse et aux dimensions de l'échantillon.

Les expériences de Goulet et Fortin (1975) et de Laforest et Plamondon (1976) faites sur l'érable à sucre montrent que les traitements thermiques à moins de 100°C, affectent de manière sensible seulement l'équilibre hygroscopique mais non l'hystérèse de sorption. D'autre part, les études de Djolani (1970) sur érable à sucre à quatre températures entre 5 et 50°C ont montré que l'hygroscopicité de ce bois et son hystérèse de sorption d'humidité diminuent sensiblement avec la élévation de température sans pour autant laisser prévoir la

disparition de la boucle aux alentours de 75 et 80°C (figure 11). Le même auteur mentionne que l'élévation de la température diminue la résistance du bois en fonction de sa teneur en humidité.

Cloutier et Fortin (1991) ont étudié la relation entre la teneur en humidité d'équilibre en désorption et le potentiel hydrique du bois de tremble à trois températures (20, 35, et 50°C). Le potentiel hydrique augmente avec la température à une valeur déterminée de teneur en humidité (figure 12). Des résultats similaires ont été rapportés pour le pin rouge par Tremblay et al. (1996), pour l'érable à sucre par Defo et al. (1999), et pour le pin taeda et chêne rouge par Zhang et Peralta (1999). Comme dans le cas des sols, l'augmentation du potentiel hydrique avec la température ne peut pas être expliquée seulement par l'influence de la température sur la tension de surface de l'eau. La théorie de l'air emprisonné suggérée par Chahal (1965) pour les sols, mentionne qu'une certaine quantité d'air peut être emprisonnée dans l'échantillon durant la saturation. Si la température du bois qui est visée est atteinte avant de commencer la désorption, l'air emprisonné se répand et déplace une quantité correspondante d'eau, résultant en une baisse de la teneur en humidité pour des températures élevées pour une valeur de potentiel hydrique donnée. De plus, la présence de contaminants actifs de surface dans l'interface air-eau pourrait être aussi une autre explication de ce comportement (Saha et Tripathi 1981).

1.6. Objectifs et hypothèses du travail

Les hypothèses du présent travail sont:

- Les changements dimensionnels et mécaniques du bois ne sont pas limités à des teneurs en humidité en-dessous du PSF.
- Une augmentation de la température augmente la perméabilité du bois en facilitant la désorption de l'eau liquide à des humidités relatives élevées.

- Une augmentation de la température diminuera la teneur en humidité d'équilibre limite déclenchant le début des changements des propriétés du bois.

Le but de ce travail est donc d'étudier l'effet de la teneur en humidité d'équilibre sur les propriétés du bois de deux espèces feuillues tempérées aux teneurs en humidité élevées soit le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrhart), aux températures de 25°C et 50°C. Deux techniques de sorption d'humidité seront utilisées, soit celle des solutions salines saturées (entre 50% et 96% HR) et celle de la membrane poreuse sous pression (au-dessus de 96% HR).

Les résultats des propriétés de retrait et de résistance mécanique couplés à des essais de sorption permettront d'évaluer le coefficient de déformation (s_{11}) ainsi que les retraits radial, tangentiel et volumétrique.

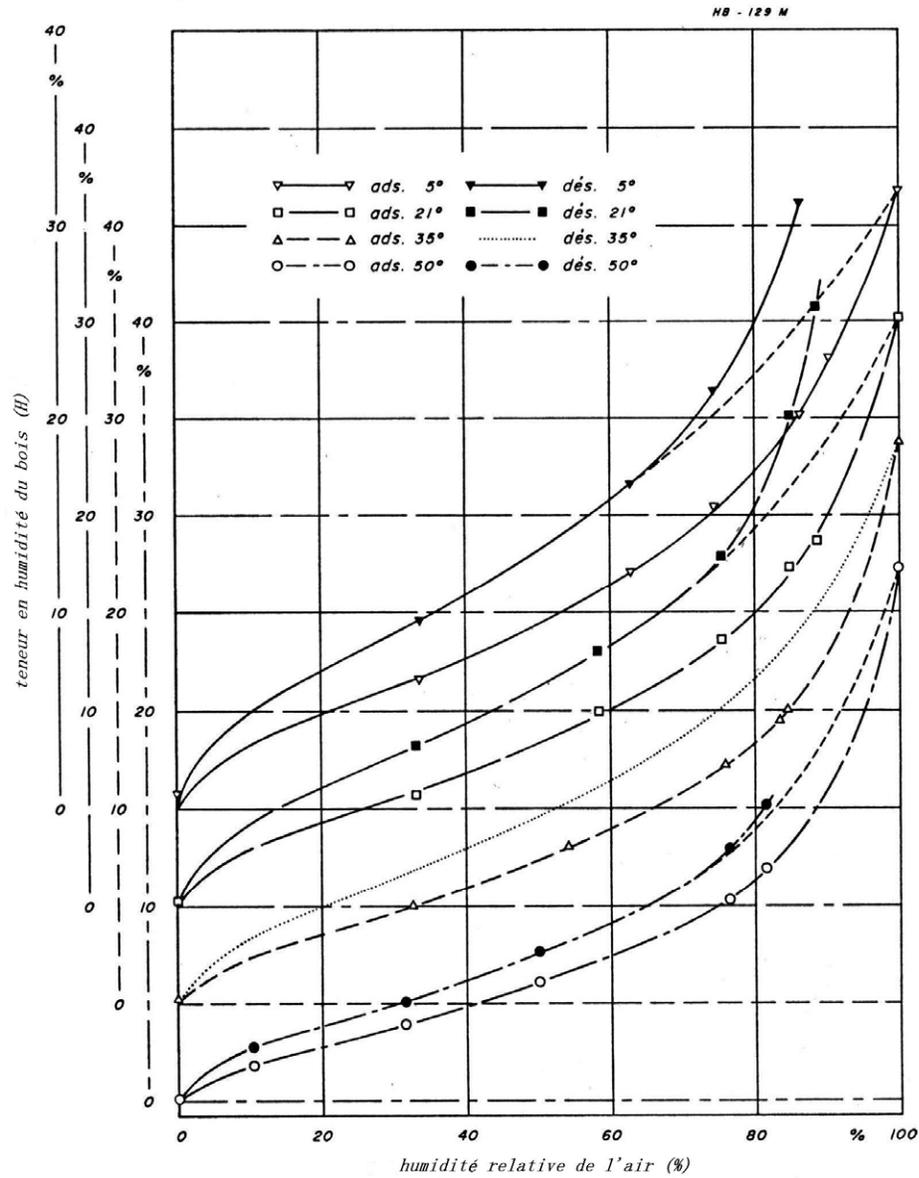


Figure 11. Isothermes de sorption du bois d'érable à sucre aux températures de 5, 21, 35, et 50°C (d'après Djolani 1970).

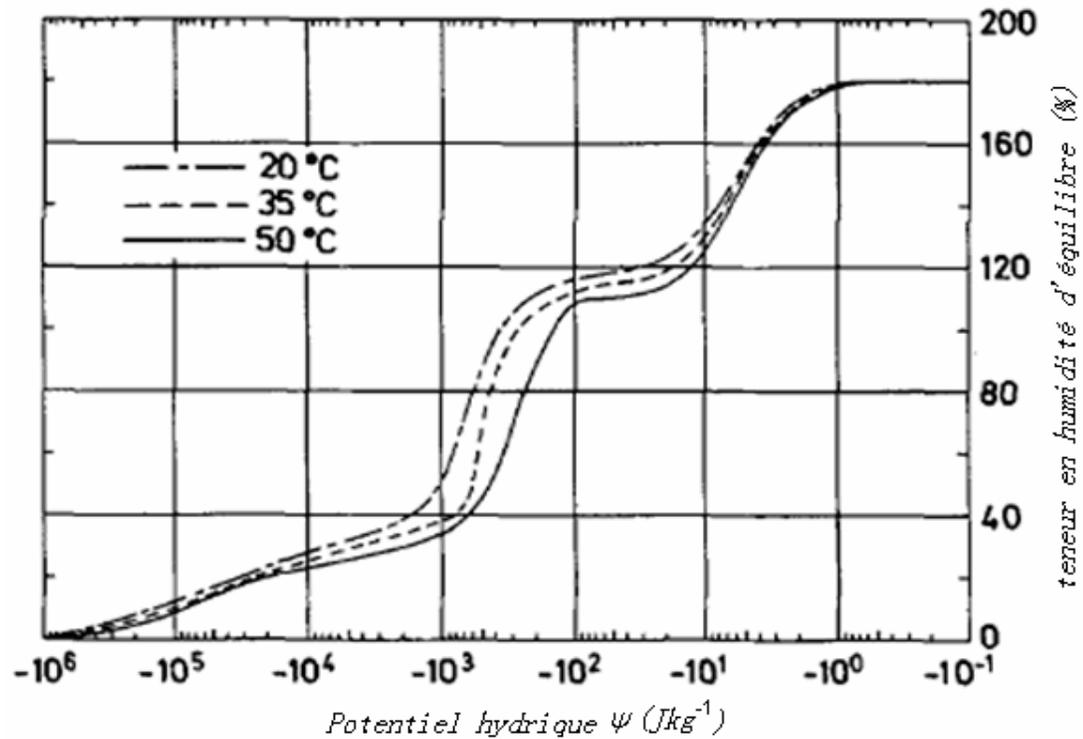


Figure 12. Relation teneur en humidité d'équilibre – potentiel hydrique du tremble au long de la courbe de désorption limite en direction radiale à 20, 35, et 50°C (d'après Cloutier et Fortin 1991).