

Table des matières

	Page
RÉSUMÉ.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 – REVUE DE LITTÉRATURE.....	3
1.1 Hygroscopicité et domaine hygroscopique.....	3
1.2 Hystérèse de la sorption d’humidité.....	5
1.3 Hystérèse à saturation d’humidité.....	9
1.4 Effet de l’hystérèse à saturation sur les propriétés du bois.....	11
CHAPITRE 2 – MATÉRIEL D’ESSAI.....	19
2.1 Espèces ligneuses.....	19
2.2 Préparation et sélection des éprouvettes.....	24
2.3 Jumelage et principales caractéristiques des éprouvettes.....	26
CHAPITRE 3 – MÉTHODE EXPÉRIMENTALE.....	29
3.1 Traitements préalables des éprouvettes.....	29
3.2 Essais de sorption.....	31
3.2.1 Caractéristiques générales.....	31
3.2.2 Méthode des solutions salines saturées.....	32
3.2.2.1 Bassins à température constante.....	32
3.2.2.2 Cellules de sorption.....	33
3.2.2.3 Durée de conditionnement.....	35

3.2.3 Méthode de la membrane poreuse sous pression.....	35
3.3 Essais mécaniques.....	38
3.3.1 Conditions hygrométriques à l'essai.....	38
3.3.2 Essais de compression.....	39
3.3.3 Mesures de déformation.....	41
3.4 Mesures des dimensions du bois.....	42
CHAPITRE 4 – EXÉCUTION DES ESSAIS.....	45
4.1 Sorption d'humidité.....	45
4.1.1 Méthode des solutions salines saturées.....	45
4.1.2 Méthode de la membrane sous pression.....	46
4.1.3 Détermination de la teneur en humidité d'équilibre.....	48
4.2 Compression tangentielle.....	49
4.3 Détermination du retrait.....	51
CHAPITRE 5 – PRÉSENTATION DES RÉSULTATS.....	53
CHAPITRE 6 – DISCUSSION DES RÉSULTATS.....	72
6.1 Précision des mesures et variabilité.....	72
6.2 Hygroscopicité du bois.....	74
6.3 Saturation des membranes.....	80
6.4 Relation entre l'humidité d'équilibre et le retrait du bois.....	81
6.5 Relation entre l'humidité d'équilibre et la compression tangentielle.....	83
CONCLUSION.....	85
BIBLIOGRAPHIE.....	88
ANNEXE A.....	93

Liste des tableaux

	Page
Tableau 1. Caractéristiques physico-mécaniques des espèces étudiées d'après la bibliographie.....	20
Tableau 2. Identification et jumelage des éprouvettes.....	27
Tableau 3. Caractéristiques des conditions de sorption d'humidité utilisées et destination des groupes d'éprouvettes.....	28
Tableau 4. Relation entre le potentiel hydrique, le degré hygrométrique et le rayon capillaire à 25°C.....	37
Tableau 5. Vitesses de déplacement de la traverse mobile de la machine à essai mécanique en fonction de la teneur en humidité moyenne de l'éprouvette.....	42
Tableau 6. Temps final requis pour l'obtention de l'équilibre d'humidité pour les trois espèces étudiées.....	47
Tableau 7. Changements de l'humidité d'équilibre du bois pendant l'essai mécanique.....	49
Tableau 8. Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite proportionnelle (σ^o_T) en compression tangentielle du bois de tornillo en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.....	54
Tableau 9. Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de tornillo.....	55
Tableau 10. Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de tornillo.....	56
Tableau 11. Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite	

	proportionnelle (σ°_T) en compression tangentielle du bois de pumaquiro en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.....	57
Tableau 12.	Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de pumaquiro.....	58
Tableau 13.	Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de pumaquiro.....	59
Tableau 14.	Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite proportionnelle (σ°_T) en compression tangentielle du bois de huayruro en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.....	60
Tableau 15.	Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de huayruro.....	61
Tableau 16.	Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de huayruro.....	62

Liste des figures

	Page
Figure 1. Isothermes de sorption d'humidité du bois d'érable à sucre à la température de 21°C (d'après Goulet 1968).....	6
Figure 2. Isothermes de sorption du bois d'érable à sucre aux températures de 5°, 21°, 35° et 50° (d'après Djolani 1970).....	8
Figure 3. 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).....	10
Figure 4. Teneur en humidité d'équilibre du bois d'aubier de l'érable à sucre en fonction du potentiel hydrique à 20° et 21°C. Les chiffres près des points de mesure représentent les valeurs correspondant au degré hygrométrique de l'air (d'après Bizoň 1995).....	12
Figure 5. Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de son humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à 25°C (d'après Stevens 1963).....	14
Figure 6. Coefficient de déformation s_{11} du bois d'érable à sucre en traction tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Goulet et Hernández 1991).....	15
Figure 7. Coefficient de retrait β_{UH} du bois d'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Bizoň 1995).....	17
Figure 8. Coefficient de déformation s_{11} du bois d'érable à sucre en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Bizoň 1995).....	18

Figure 9.	Coupes microscopiques du bois de tornillo : (A) coupe transversale (50x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).....	23
Figure 10.	Coupes microscopiques du bois de pumaquiro : (A) coupe transversale (100x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).....	23
Figure 11.	Coupes microscopiques du bois de huayruro : (A) coupe transversale (50x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).....	24
Figure 12.	Progrès du conditionnement des planchettes témoins du bois de tornillo, huayruro et pumaquiro à 20°C et 60% d'humidité relative.....	25
Figure 13.	Forme et dimensions de l'éprouvette de compression tangentielle.....	26
Figure 14.	Cylindre utilisé pour les cycles de pression	31
Figure 15.	Bassin de sorption à température constante.....	33
Figure 16.	Montage de l'appareil de sorption utilisé pour la technique de la membrane poreuse sous pression.....	38
Figure 17.	Schéma de l'enceinte reproduisant les conditions hygrothermiques.....	40
Figure 18.	Dispositif de mesure des déformations en compression tangentielle.....	43
Figure 19.	Dispositifs pour la mesure des dimensions des éprouvettes : (A) direction tangentielle; (B) direction radial et longitudinal.....	44
Figure 20.	Teneur en humidité d'équilibre du bois de tornillo en fonction du potentiel hydrique à 25°C.....	63
Figure 21.	Coefficient de retrait du bois de tornillo en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	64
Figure 22.	Coefficient de déformation du bois de tornillo en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	65
Figure 23.	Teneur en humidité d'équilibre du bois de pumaquiro en fonction du potentiel hydrique à 25°C.....	66

Figure 24. Coefficient de retrait du bois de pumaquiro en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	67
Figure 25. Coefficient de déformation du bois de pumaquiro en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	68
Figure 26. Teneur en humidité d'équilibre du bois de huayruro en fonction du potentiel hydrique à 25°C.....	69
Figure 27. Coefficient de retrait du bois de huayruro en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	70
Figure 28. Coefficient de déformation du bois de huayruro en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.....	71
Figure 29. Comparaison entre les teneurs en humidité d'équilibre de quatre espèces en fonction du potentiel hydrique à 25°C.....	77
Figure 30. Progrès de l'adsorption au-dessus de l'eau distillée pour les trois espèces à 25°C.....	81
Figure A1. Microphotographies de l'espèce tornillo: (A) ponctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) ponctuations dans le parenchyme longitudinal.....	94
Figure A2. Microphotographies de l'espèce pumaquiro : (A) ponctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) ponctuations dans les rayons; (C) ponctuation dans une cellule de rayon; (D) ponctuation dans la paroi d'une fibre.....	95
Figure A3. Microphotographies de l'espèce huayruro : (A) ponctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) ponctuations dans le parenchyme longitudinal; (C) ponctuation dans la paroi d'un élément de vaisseau; (D) ponctuation dans une cellule de parenchyme longitudinal.....	96

Introduction

Le bois est un matériau poreux et hygroscopique: il va ainsi perdre ou gagner de l'humidité en fonction de l'air ambiant qui l'entoure. Il obtiendra une condition d'équilibre d'humidité au-dessous de conditions hygrothermiques constantes au bout d'un certain temps. La connaissance du comportement du bois dans différentes conditions d'humidité est alors une condition très importante pour une bonne et adéquate utilisation du bois.

On a longtemps reconnu que la teneur en humidité d'équilibre affecte plusieurs propriétés du bois au-dessous de la saturation des fibres (PSF) et que, par contre, au dessus de celle-ci ces propriétés demeurent inchangées. Certains résultats de travaux de recherche ont toutefois montré que cette présomption ne serait pas toujours réaliste. En désorption, le retrait du bois ainsi que sa résistance en direction tangentielle sont affectés par l'équilibre d'humidité avant même d'atteindre le point de saturation des fibres. Ce comportement a été d'ailleurs relié au phénomène d'hystérèse à la saturation, que affecte la sorption d'humidité au-dessus de 60% d'humidité relative. L'équilibre hygroscopique du bois à des humidités relatives élevées est affecté d'une manière importante par l'espèce de bois. Ainsi, la valeur d'humidité limite au-dessous de laquelle débutent les changements des propriétés du bois devrait varier avec les espèces.

Le but de ce travail de recherche est donc d'étudier l'effet de l'humidité d'équilibre du bois de quelques espèces tropicales sur ses propriétés physico-mécaniques dans la zone de la saturation des membranes. Trois espèces ayant différents plan ligneux et deux méthodes de sorption d'humidité ont été utilisées sur des éprouvettes de grandes dimensions, soit: une sorption conventionnelle au-dessus de solutions salines saturées et une sorption réalisée au moyen d'une membrane poreuse sous pression. Ces essais de sorption ont été couplés avec des tests de résistance mécanique en compression tangentielle et de mesures de retrait du bois suivant ses directions principales.

À long terme, ce travail permettra de mieux comprendre le mécanisme fondamental de l'hygroscopicité du bois et du PSF, ce qui affectera favorablement la recherche en physique du bois. On peut aussi améliorer les essais normalisés du bois et utiliser le bois plus convenablement. Le but ultime est celui d'expliquer les phénomènes de l'hystérèse de la sorption et de l'hystérèse à la saturation d'humidité. Cela permettra de contrôler plus adéquatement la transformation et l'utilisation du bois.

Chapitre 1

Revue de littérature

1.1 Hygroscopicité et domaine hygroscopique

Le bois, comme la plupart des matériaux ligno-cellulosiques, 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, du degré hygrométrique de l'air ambiant (ψ), de l'histoire de sorption ainsi que de la pression (Bizoň 1995). Les échanges d'humidité entre le bois et l'air ambiant causent en général des altérations dans les propriétés physiques et mécaniques du bois.

Cependant, ces phénomènes ont lieu seulement dans le domaine hygroscopique, lequel s'étend de l'état anhydre ($H=0\%$) correspondant à un degré hygrométrique de l'air nul ($\psi=0\%$) jusqu'à l'état de saturation des membranes, connu plus couramment comme le point de saturation des fibres (PSF $\cong 30\%$ à 20°C). Cet état s'obtient à l'équilibre avec la tension de vapeur d'eau saturée ($\psi \cong 100\%$).

Le terme point de saturation des fibres a été défini par Tiemann (1906) comme l'humidité à laquelle les parois cellulaires du bois sont saturées d'eau hygroscopique tandis que les cavités cellulaires sont dépourvues d'eau liquide. Selon Stamm (1964), le point de saturation des fibres implique que les grands pores du bois, dont ses cavités cellulaires, ne

renferment pas d'eau liquide, alors que les espaces fins, situés surtout à l'intérieur des membranes, sont remplis d'eau.

D'après Stamm (1964) et Kollmann et Côté (1968), les molécules d'eau sont retenues dans le bois sous trois formes: celles liées au niveau monomoléculaire, celles sorbées à titre polymoléculaire et enfin celles retenues dans les capillaires fins des membranes par action des forces de capillarité.

Le point de saturation des fibres varie selon l'espèce ligneuse. Parmi les sources de variation de cette propriété, on retrouve la teneur en extraits, la masse volumique et le contrefil du bois (Arévalo 2002, Hernández 2004a). Selon Bodig et Jayne (1982) et Stamm (1971), 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. Ainsi, le PSF de la plupart des bois tropicaux est faible dû au fait que leur teneur en extraits est souvent élevée. Il y en ait de même pour l'humidité d'équilibre du bois dans tout le domaine hygroscopique (Siau 1984). Par ailleurs, la teneur en extraits provoque également une diminution du retrait du bois dans tout le domaine hygroscopique (Nearn 1955, Cooper 1974, Taylor 1974, Kryla 1980, Arévalo 2002, Hernández 2004c).

Kolin et Stevanovic (1996) ont étudié les effets de la température, de la masse volumique et de la composition chimique du bois de cinq espèces sur le PSF. Ils ont montré que cette propriété diminue au fur et à mesure que la masse volumique basale augmente. 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. D'autre part, Barkas (1949) a établi que les contraintes internes produites lors de la sorption affectent l'équilibre d'humidité. La masse volumique pourrait ainsi représenter le niveau de contraintes internes dans le bois (Hernández 2004b).

Le PSF déterminé par le biais d'une d'adsorption au-dessus de l'eau distillée est une méthode très utilisée, mais inadéquate (Kollmann et Côté 1968; Stamm 1971; Siau 1995). Une telle méthode s'est révélée inefficace pour quatre de neuf bois tropicaux étudiés par Hernández (2004b) lesquelles ne semblaient pas tendre vers un équilibre. La condensation d'eau dans les différentes dimensions capillaires du bois diminue légèrement l'humidité relative de l'air (Stamm 1971). Il existe donc plusieurs méthodes pour déterminer le point de saturation des fibres; Stamm (1971) en a présenté neuf. Plusieurs de ces méthodes sont fondées sur le principe que les changements des propriétés physiques et mécaniques du bois ne surviennent qu'au-dessus du PSF. Ainsi, la méthode de l'intersection du retrait en volume en fonction de l'humidité d'équilibre a été proposée par Kelsey (1956) pour déterminer le PSF. Cette méthode a été considérée par plusieurs chercheurs comme étant l'une des plus convenables (Hernández 1993a, Choong et Achmadi 1991, Arévalo 2002).

1.2 Hystérèse de la sorption d'humidité

On sait qu'à l'équilibre la teneur d'humidité du bois augmente avec le degré hygrométrique de l'air et diminue avec la température et que ces mêmes variables affectent toutes les principales caractéristiques physiques du bois. La température et le degré hygrométrique de l'air jouent ainsi un rôle très important dans les variations de l'hygroscopicité et de l'hystérèse de la sorption d'humidité dans le bois.

On peut supposer que pour une température fixe, une seule teneur en humidité correspond à un degré hygrométrique de l'air donné. En réalité il n'en est pas ainsi puisqu'il existe cependant des écarts considérables entre les teneurs en humidité d'équilibre obtenues suivant que le bois perd (désorption) ou gagne (adsorption) de l'humidité. Ce phénomène, connu depuis longtemps, est désigné comme hystérèse de la sorption d'humidité. La figure 1 présente cette hystérèse chez le bois d'érable à sucre à 21°C. Ce graphique montre les écarts entre l'adsorption à partir de l'état anhydre et la désorption depuis l'état de saturation des fibres.

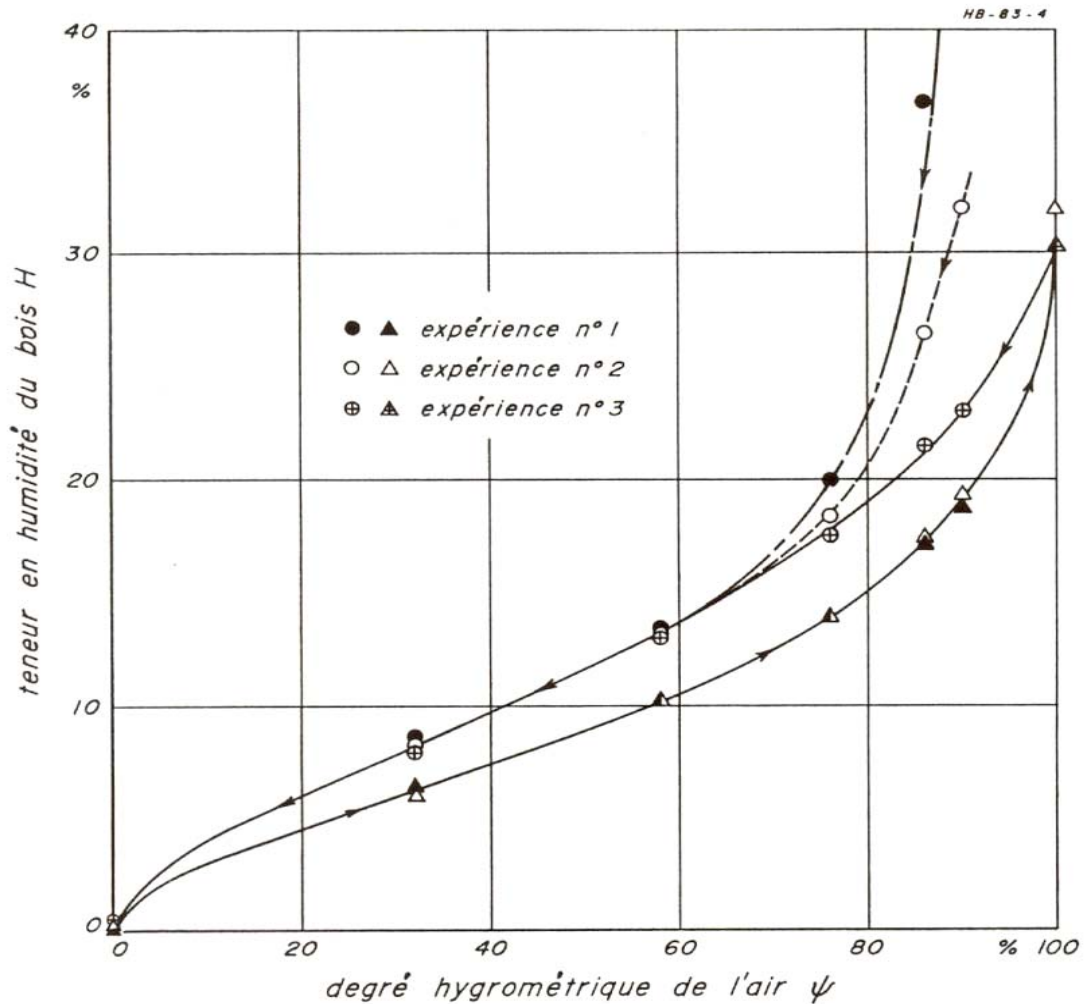


Figure 1. Isothermes de sorption d'humidité du bois d'érable à sucre à la température de 21°C (d'après Goulet 1968).

Plusieurs travaux ont porté sur les paramètres de l'hygroscopicité et de son hystérèse. Kollmann et Côté (1968) et Siau (1995) ont suggéré que les groupes hydroxyles de cellulose et de la lignine sont responsables pour l'effet d'hystérèse. D'autres hypothèses pour expliquer ce phénomène ont été proposées par plusieurs chercheurs et sont décrites par Skaar (1988).

Les études de Djolani (1970) sur érable à sucre entre 5°C et 50°C ont montré que l'hygroscopicité de ce bois et son hystérèse diminuent sensiblement avec la température

(figure 2). Une conclusion semblable a été obtenue par Ahmet et al. (2000) sur plusieurs espèces d'importance commerciale à trois différentes températures ainsi que Kolin et Stevanovic (1996) avec des espèces feuillues entre 20°C et 80°C et résineuses entre 20°C et 90°C. Ces derniers ont affirmé que ce phénomène pourrait être expliqué par des changements de la structure interne des microfibrilles de la cellulose.

Selon Djolani (1970), les oscillations de la température et du degré hygrométrique de l'air affectent la largeur apparente de la boucle mais leur effet réel est faible. Il reste que certains facteurs physiques peuvent influencer l'humidité d'équilibre et son hystérèse.

Les substances secondaires, présentes en quantités très variables dans les espèces de bois, affectent aussi l'hygroscopicité de ce matériau. Hernández (2004a,b,c,d) a réalisé une extraction par étapes successives qui a permis d'établir le rôle joué par ces composantes sur les principales caractéristiques physico-mécaniques des bois tropicaux. Cette méthode d'extraction a conduit à différencier trois genres d'extraits. Le premier, les substances solubles dans le cyclohexane, n'interviennent qu'à titre de charges inertes dans l'équilibre hygroscopique du bois car leur action sur le gonflement de la matière ligneuse et sur la résistance mécanique du bois est nulle. Les substances solubilisées ensuite 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 après extraction au cyclohexane des teneurs élevées en extractibles à l'acétone, sont moins hygroscopiques et moins gonflants que les espèces neutres. Une exception notable a toutefois été rencontrée chez le copaiba (*Copaifera sp.*) : ses extraits à l'acétone le rendent plus hygroscopique que les bois neutres, ce qui limite l'application des précédentes conclusions aux essences tropicales dans leur ensemble. Le dernier genre de substances solubilisé l'a été dans le méthanol. Ces composés, qui seraient localisés dans les régions les moins accessibles de membranes cellulaires, ont peu d'effet sur l'humidité d'équilibre mais ils sont responsables d'une réduction de la déformabilité tangentielle ainsi que d'une

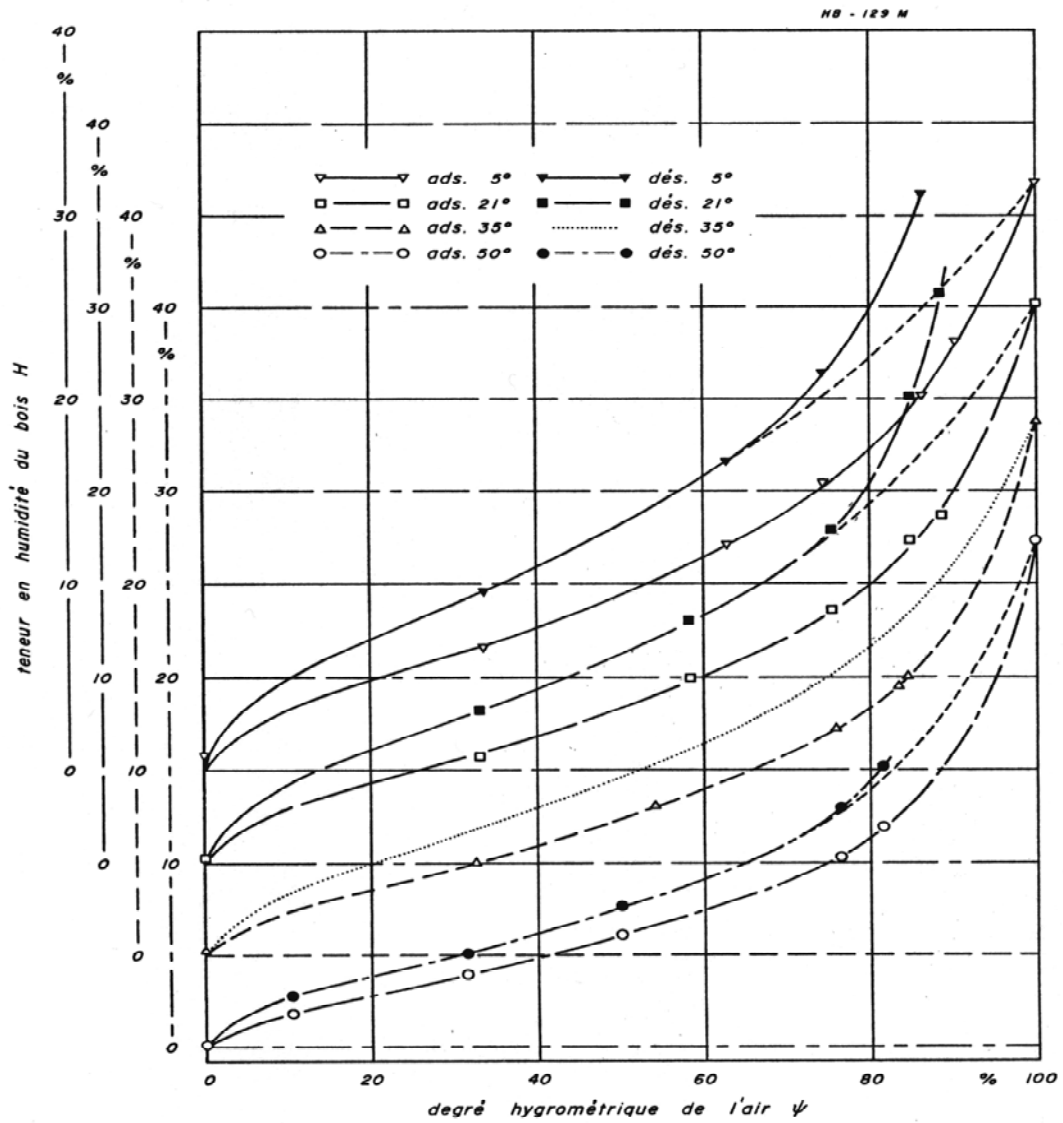


Figure 2. Isothermes de sorption du bois d'érable à sucre aux températures de 5°, 21°, 35° et 50° (d'après Djolani 1970).

montre également que les extraits à l'acétone sont responsables de la stabilité hygroscopique de certains bois tropicaux. De plus, ces mêmes substances et celles solubles dans le méthanol ont aussi un effet bénéfique propre sur la stabilité dimensionnelle de ces espèces (Hernández 2004c).

Les contraintes mécaniques altèrent aussi l'hygroscopicité du bois. Une compression abaisse la teneur en humidité à l'équilibre tandis qu'une traction l'augmente (Barkas 1949). L'orientation et les dimensions des éprouvettes affectent la vitesse des échanges d'humidité mais très peu la boucle de sorption (Djolani 1970; Goulet et Fortin 1975; Laforest et Plamondon 1976; Naderi et Hernández 1999). Par ailleurs, Hernández (1993a) a obtenu des valeurs d'hygroscopicité comparables sur deux types d'éprouvettes et dans trois conditions d'équilibre.

1.3 Hystérèse à saturation d'humidité

Un autre phénomène relié à la sorption d'humidité est celui que l'on appelle l'hystérèse à saturation. Il est défini comme étant la différence entre l'équilibre atteint suite à une désorption en présence d'eau liquide et celui atteint en désorption à partir d'une saturation des membranes. La figure 1 montre cette caractéristique dans trois expériences, lesquelles ont été réalisées à l'aide de la technique des solutions salines saturées. La désorption de l'expérience 3 a eu lieu suite à une saturation des membranes dans l'air humide (PSF), tandis que la désorption des expériences 1 et 2 a été précédée d'une saturation dans l'eau liquide. Selon Goulet (1968), cette divergence a lieu au dessus de 60% (ψ) et aurait un caractère reproductible. En effet, des études antérieures ont montré que l'hystérèse à saturation n'est pas limitée à la première désorption mais plutôt à une désorption en présence d'eau libre (Fortin, 1979, Cloutier et Fortin 1991, Goulet et Hernández 1991, Hernández et Bizoñ 1994, Defo et al. 1999).

Fortin (1979) a obtenu les isothermes de sorption du bois de la pruche de l'ouest à l'aide de la technique de la membrane poreuse sous pression à 21°C (figure 3). Cette technique permet de contrôler avec précision la quantité de vapeur d'eau à des degrés hygrométriques de l'air élevés, soit au dessus de 96%. La boucle d'hystérèse s'élargit grandement à des degrés hygrométriques élevés. Fortin (1979) explique cette partie de l'hystérèse par la présence du

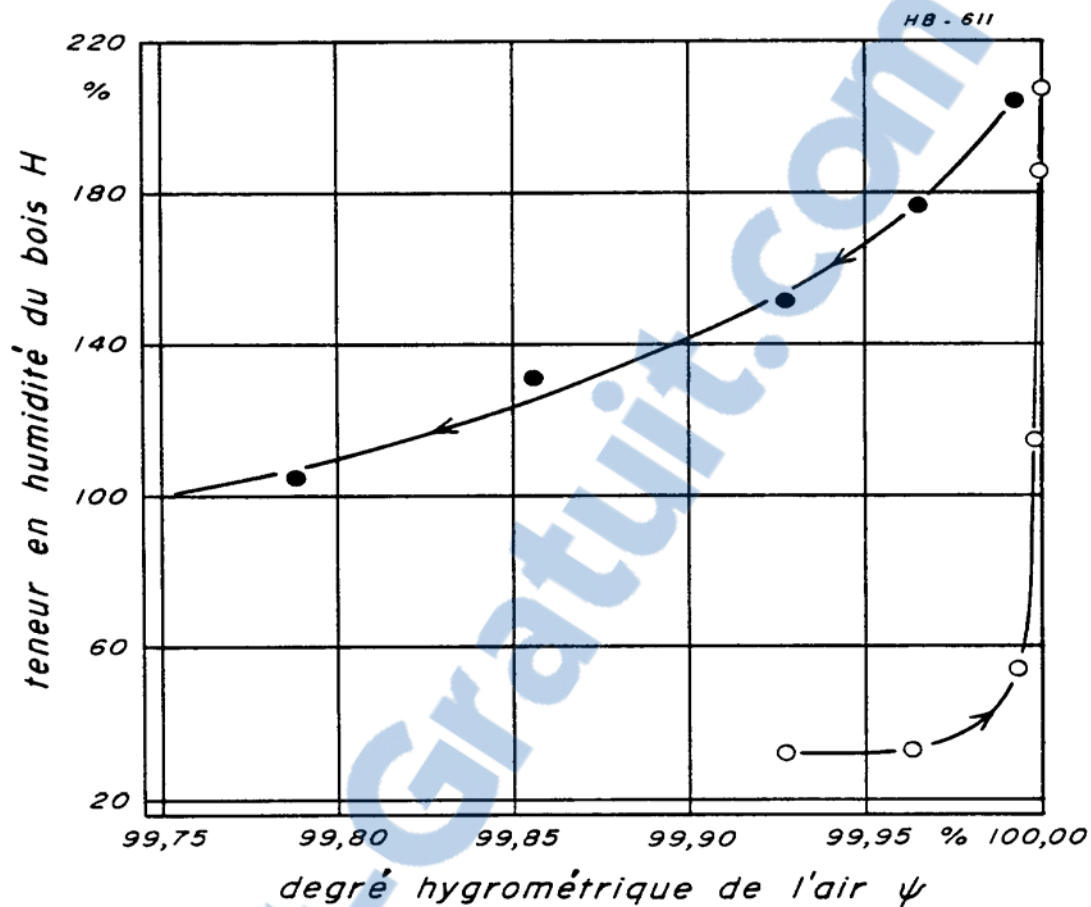


Figure 3. Équilibre hygroscopique moyen, établi à l'aide de la technique des plaques et membranes poreuses sous pression, aux humidités très élevées. Aubier de pruche de l'ouest à 21°C (d'après Fortin 1979).

phénomène dit de « la bouteille d'encre » provoqué par la variation de la dimension des capillaires dans le bois. Ainsi, la variation de la dimension entre les différents types de cavités connectées en série dans le bois, suggère que la désorption est contrôlée par les plus petits pores et l'adsorption par les plus gros pores. La courbe de désorption est alors 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.

Par ailleurs, Cloutier et Fortin (1991) et Bizoň (1995) ont montré 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 (figure 4). Ainsi, il est possible d'obtenir des valeurs précises d'humidité d'équilibre à proximité de la tension de vapeur d'eau saturée. La technique de la membrane poreuse sous pression a aussi été employée avec succès par Robertson (1965), Stone et Scallan (1967), Cloutier et al. (1995) et Defo et al. (1999). Ces derniers, en étudiant la relation entre l'humidité d'équilibre et le potentiel hydrique à deux températures, ont confirmé que pour une humidité d'équilibre donnée, le potentiel hydrique augmente avec la température et que l'équilibre d'humidité obtenu à partir de l'état vert est plus faible que celui obtenu à partir de la saturation maximale.

Cloutier et Fortin (1991) ont rapporté aussi qu'à des degrés hygrométriques élevés, une désorption en direction radiale produit une humidité d'équilibre inférieure à celle obtenue en direction tangentielle. Un manque d'équilibre des éprouvettes tangentielles était à l'origine de cet écart, car des travaux plus récents ont démontré que l'orientation des éprouvettes n'a pas d'effet sur l'équilibre hygroscopique du bois (Choong et Tesoro 1989; Cloutier et al. 1995).

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

Le point de saturation des fibres (PSF) est une propriété très importante du bois car il régit le comportement de la plupart de ses propriétés (Siau 1995). Bien qu'elle fut définie en 1906 par Tiemann, cette propriété demeure encore assez mal connue. Ainsi, il est connu que la résistance mécanique du bois augmente avec la diminution de l'humidité au-dessous de la saturation des membranes, alors qu'elle reste inchangée au-dessus de celle-ci (Bodig et Jayne 1982; USDA 1974; Skaar 1988). Une perte d'humidité des parois cellulaires provoque alors une augmentation des propriétés mécaniques tandis qu'une perte d'eau liquide logée dans les cavités cellulaires n'a aucun effet.

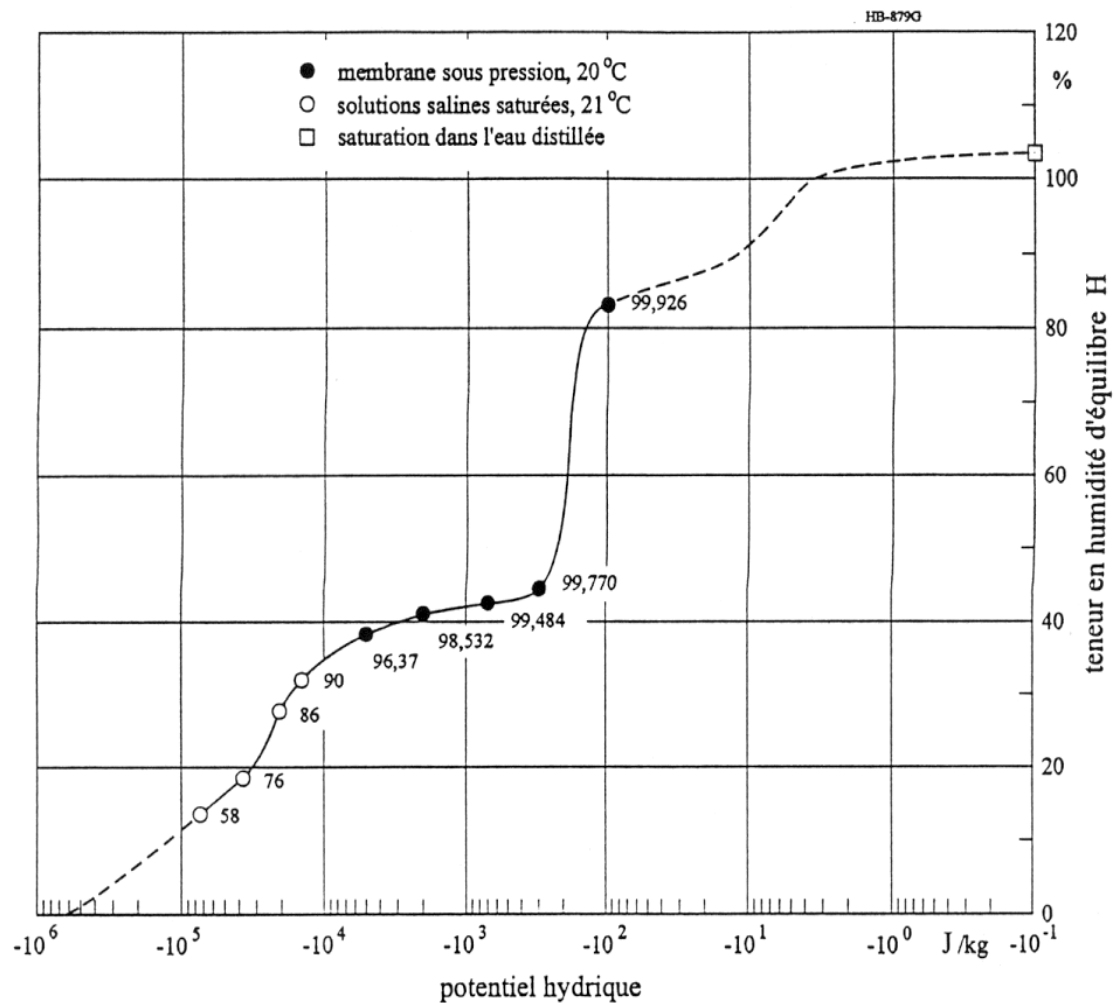


Figure 4. Teneur en humidité d'équilibre du bois d'aubier de l'érable à sucre en fonction du potentiel hydrique à 20° et 21°C. Les chiffres près des points de mesure représentent les valeurs correspondant au degré hygrométrique de l'air (d'après Bizoň 1995).

Le PSF est donc utilisé pour ajuster les cotes mécaniques du bois en fonction de la teneur en humidité (Bodig et Jayne 1982), de même que pour les modèles d'ajustement de la densité et du retrait du bois (Siau 1984; Skaar 1988; Tsoumis 1991; Siau 1995).

Cependant, des travaux plus récents ont démontré que cette affirmation ne serait pas toujours réaliste. Stevens (1963) a montré que le retrait du hêtre débute même au-dessus du PSF (figure 5).

Puisque le retrait a été obtenu à l'équilibre, la présence d'un gradient d'humidité comme étant la cause possible du début du retrait semble peu probable. Par ailleurs, Goulet et Hernández (1991) réalisèrent des mesures de traction tangentielle de l'érable à sucre à plusieurs conditions d'humidité dont certaines près du PSF. La figure 6 montre un effet d'hystérèse très marqué à hautes teneurs en humidité sur la résistance à la traction du bois. En effet, à une même humidité d'équilibre, la résistance en traction tangentielle entre 16% et 26% d'humidité (H) a été plus élevée lorsque l'équilibre fut obtenu à l'adsorption qu'à la désorption. Ce phénomène a été relié à l'hystérèse à saturation, laquelle affecte la désorption au-dessus de 60% de degré hygrométrique de l'air. Cependant, bien que la désorption n'avait été réalisée qu'au dessous de 26% (H), ces chercheurs ont suggéré par l'allure des courbes que l'effet de l'humidité sur la résistance mécanique du bois pourrait se prolonger même au-dessus du PSF. Goulet (1968) avait montré que la compression radiale du bois d'érable à sucre est affectée jusqu'à 37% (H), alors que son PSF est de 30% (H).

Les travaux de Goulet (1968) et Goulet et Hernández (1991) ont été faits sur un éventail large de degrés hygrométriques (0 à 100%). Un travail concentré à des degrés hygrométriques élevés (entre 90% et 100%) a été réalisé par Hernández et Bizoñ (1994) à l'aide de deux méthodes de sorption, soit celle des solutions salines saturées et celle de la membrane sous pression. Les résultats présentés aux figures 7 et 8, montrent clairement que le retrait et la compression tangentielle sont affectés même au-dessus du PSF. En désorption, la perte d'eau liée du bois d'érable à sucre a débuté à 42,5% (H) alors que le PSF a été évalué à 31,1% (H).

Il restait donc dans le bois encore 11,4% (H) d'eau sous forme liquide lorsque le retrait a commencé. L'analyse montre que l'humidité déclenchant les changements des propriétés physiques doit être fonction de l'espèce, notamment de la dimension et distribution des micro-pores dans le bois, ainsi que de la proportion de différents tissus ligneux. Hernández et Bizoñ (1994) ont ainsi suggéré que l'eau liquide au-dessous de 42,5% (H) pourrait être logée

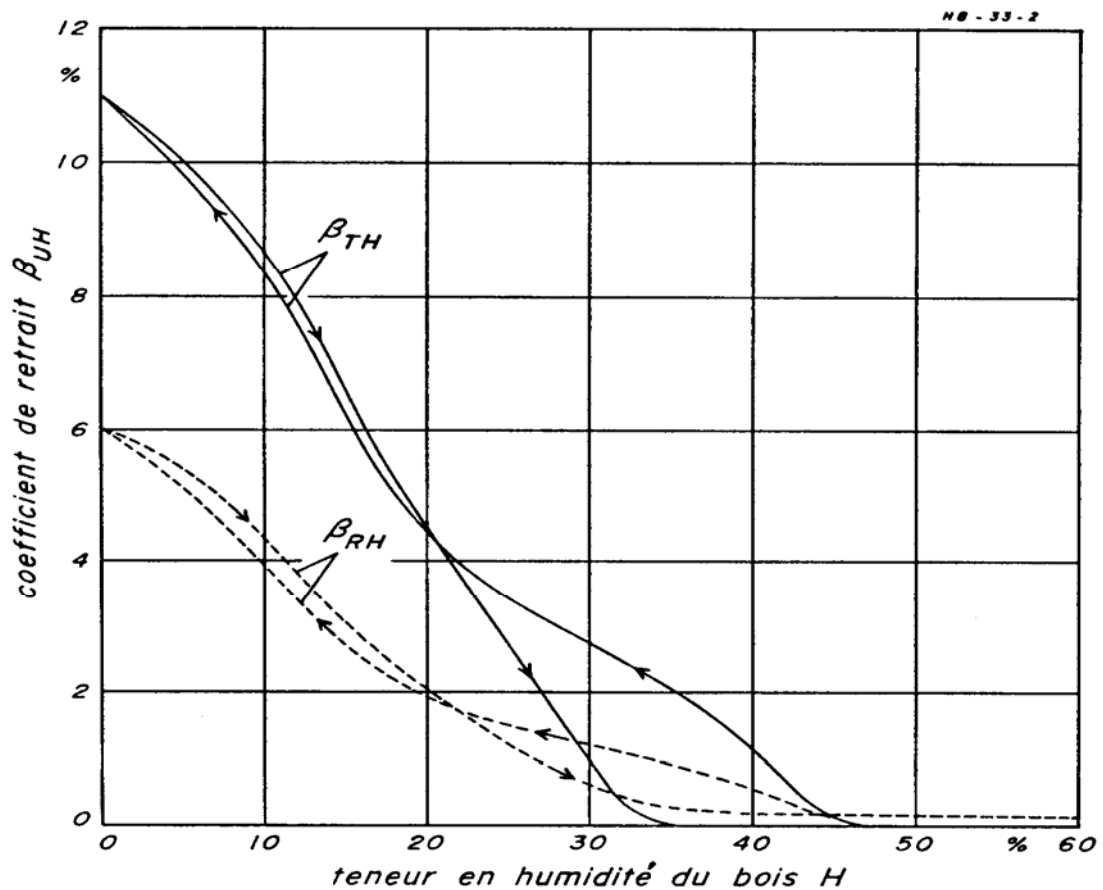


Figure 5. Retraits radial et tangentiel du bois de hêtre en fonction de son humidité d'équilibre en adsorption et en désorption à 25°C (d'après Stevens 1963).

dans les cellules du bois interconnectées par les plus petits capillaires, soit principalement dans les rayons du bois d'érable à sucre.

Il est fort probable que cette eau libre soit principalement logée dans les rayons car ces éléments du bois sont considérés comme étant les moins perméables dans le bois des feuillus (Teesdale et MacLean 1918, Wheeler 1982, Siau 1984). À ce sujet, Hart (1984) a rapporté que l'eau libre est retenue dans les cellules de parenchyme radial du bois de caryer et de chêne.

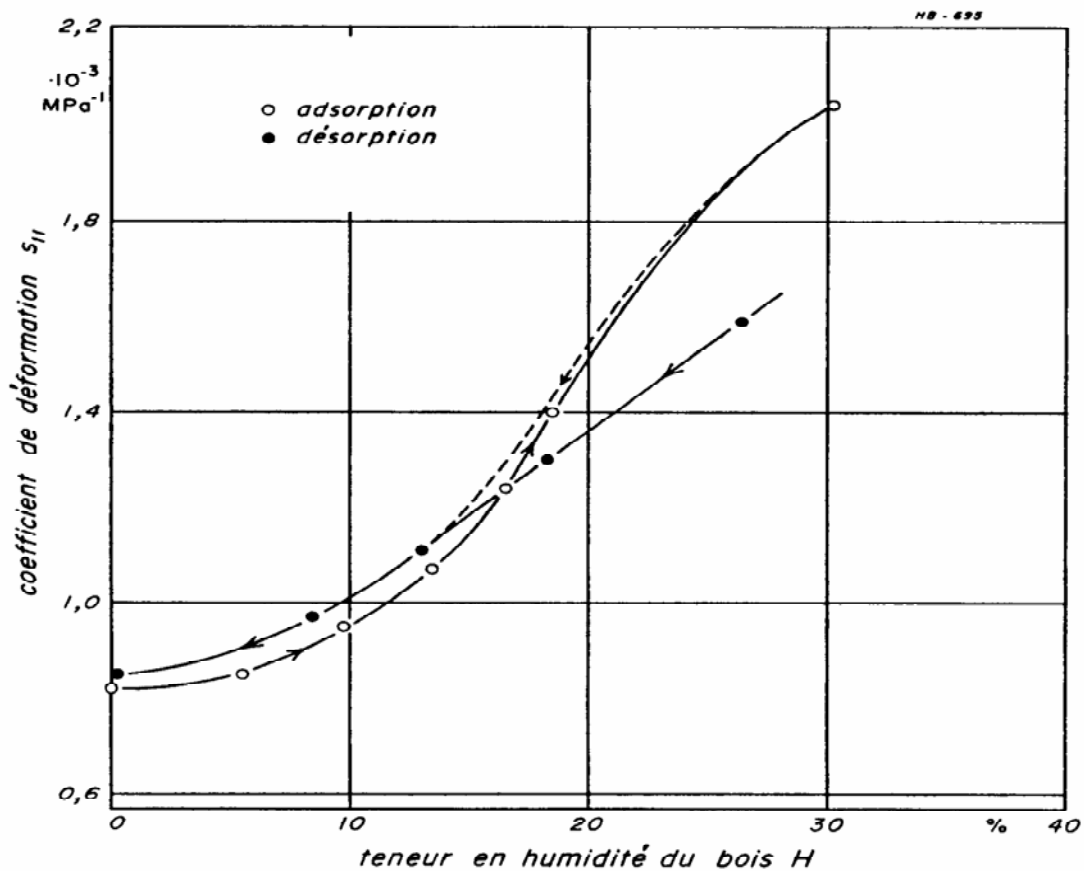


Figure 6. Coefficient de déformation s_{11} du bois d'érable à sucre en traction tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Goulet et Hernández 1991).

Cependant, l'effet de l'hystérèse à saturation sur les propriétés physiques et mécaniques du bois des espèces tropicales est encore inconnu. Le but de ce travail est donc d'étudier l'effet de l'humidité d'équilibre sur les propriétés du bois de trois espèces tropicales aux teneurs d'humidité élevées soit le tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), le pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* Mart.) et le huayruro (*Ormosia coccinea* Jackson). Deux techniques de sorption d'humidité seront utilisées, soit celle des solutions salines saturées (entre 0% et 90% ψ) et celle de la membrane poreuse sous pression (au-dessus de 96% ψ).

Les résultats des propriétés de retrait et de résistance mécanique couplés à des essais de sorption permettront d'évaluer les paramètres de coefficient de déformation (s_{11}), les retraits radial, tangential et volumétrique, aussi que l'équilibre d'humidité obtenu à la première adsorption et à la deuxième désorption à 25°C.

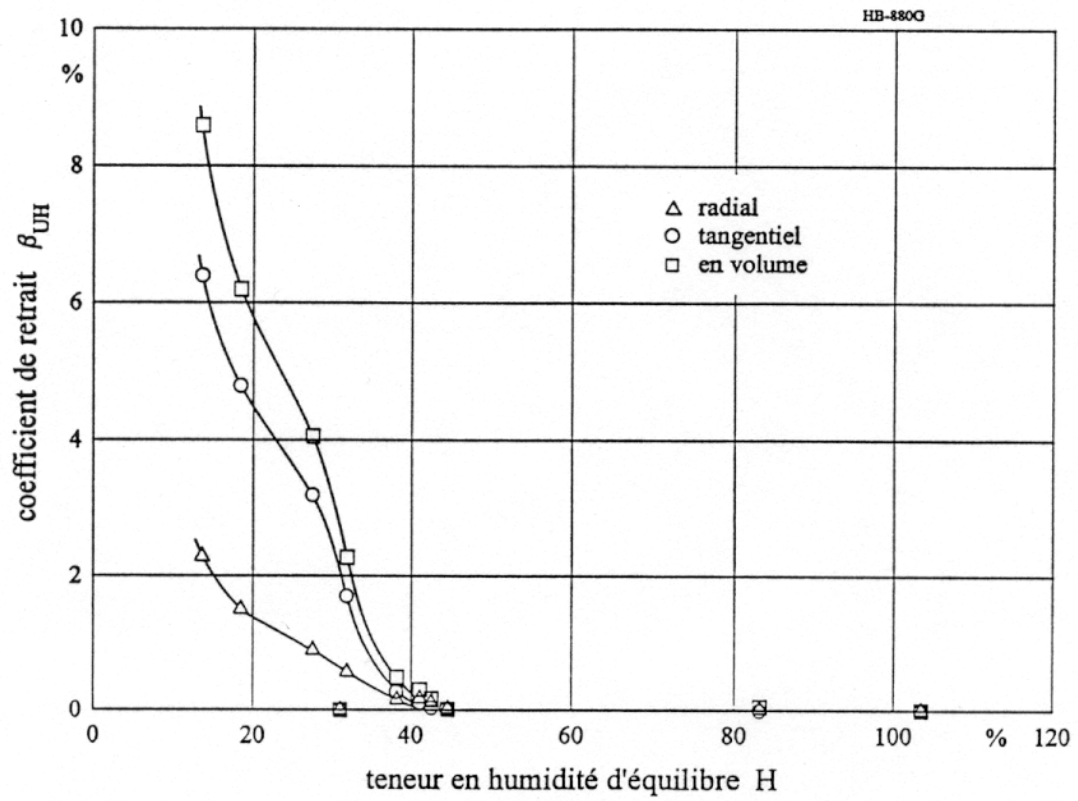


Figure 7. Coefficient de retrait β_{UH} du bois d'érable à sucre en fonction de la teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Bizoň 1995).

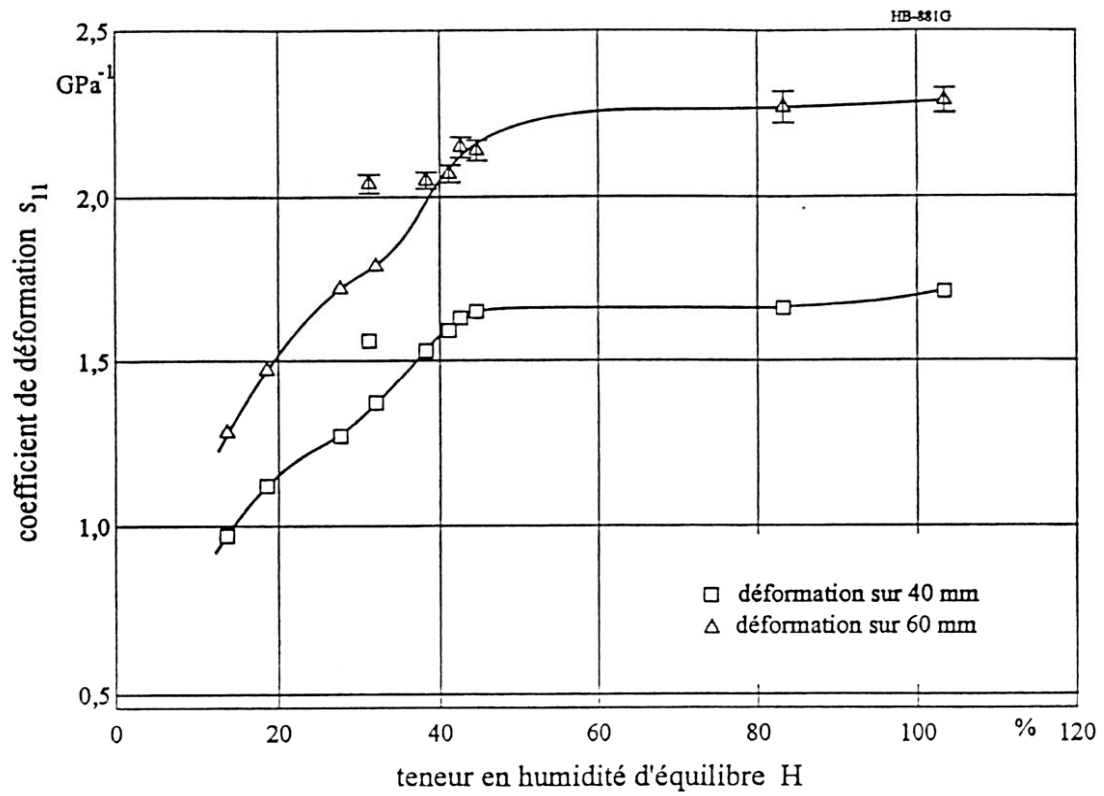


Figure 8. Coefficient de déformation s_{11} du bois d'érable à sucre en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 21°C (d'après Bizoň 1995).

Chapitre 2

Matériel d'essai

2.1 Espèces ligneuses

Trois espèces tropicales provenant de l'Amazonie péruvienne ont été utilisées soit le tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), le pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* Mart.) et le huayruro (*Ormosia coccinea* Jackson). Ces espèces présentent une grande importance commerciale dans la région Amazonienne. Leurs bois couvrent un grand intervalle de valeurs de masse volumique ainsi que des plans ligneux bien diversifiés. Le tableau 1 présente les données physico-mécaniques disponibles sur les bois de ces espèces.

La brève description de ces espèces, qui apparaît dans les paragraphes qui suivent, est extraite de la bibliographie et présentée à titre indicatif seulement. Des informations plus détaillées concernant ces bois peuvent être obtenues chez Aróstegui (1974, 1975, 1978, 1982) et Détienne et Jacquet (1983).

Tornillo :

Nom scientifique : *Cedrelinga cateniformis* Ducke

Famille : Mimosaceae

Autres noms : Cedrorana (Brésil), Achapo (Colombie), Seique (Équateur), Don cede (Guyane).

Description du bois : À l'état sec à l'air, l'aubier a une couleur rose clair et le duramen rose noir. Les anneaux de croissance sont peu différenciés, limités par des bandes foncées

Tableau 1. Données bibliographiques des caractéristiques physico-mécaniques des espèces étudiées.

Nom commun et nom scientifique	Masse volumique basale	Retrait total			Contrainte à la limite proportionnelle en compression perpendiculaire	Source
		Radial	Tangétiel	Volumétrique		
	(kg/m ³)		(%)		(MPa)	
Tornillo	-	3,8	7,0	-	-	Chichignoud et al. (1990)
<i>Cedrelinga cateniformis</i> Ducke	440	4,8	7,9	-	364,9	Aróstegui et Sato (1970)
	440	3,2	6,9	9,9	559,2	JUNAC (1981)
Pumaquiro	-	6,4	10,2	-	-	Chichignoud et al. (1990)
<i>Aspidosperma macrocarpon</i> Mart	610	3,6	7,1	12,0	775,0	Aróstegui (1974)
	670	4,1	8,0	11,8	941,8	JUNAC (1981)
Huayruro	570	3,7	7,9	10,5	667,1	Aróstegui (1975)
<i>Ormosia coccinea</i> Jackson	600	3,2	6,4	9,3	686,7	JUNAC (1981)

en forme irrégulière. Bois de droit fil ou à contre-fil léger. Il présente une texture grossière et un lustre moyen (Acevedo et Kikata 1994).

Description anatomique (figure 9): Bois à porosité diffuse. Pores visibles à l'œil nu, isolés ou accolés radialement par 2 à 4, avec 1 à 5 pores/mm². Parenchyme, visible avec loupe 10x. Rayons visibles avec loupe 10x, avec 5 à 11/mm et présence abondante des gommés. (Acevedo et Kikata 1994). Parenchyme ligneux dispersé et pores disséminés, isolés et très gros (Détienne et Jacquet 1983).

Propriétés physiques : Masse volumique basale de 440 kg/m³, retrait tangentiel total de 6,9%; retrait radial total de 3,2 % et retrait volumétrique total de 9,9% (JUNAC 1981).

Transformation : Le séchage naturel est rapide et le séchage artificiel a un bon comportement avec un programme fort. Bonne résistance aux insectes et à la pourriture à cause de la présence des substances repoussantes. Très difficile à imprégner (Aróstegui, 1982). Il a un bon comportement à l'usinage (Aróstegui 1975).

Utilisations : coffrage, moulures, articles tournés, menuiserie intérieure, panneau lattés, meubles, pâte à papier, lambris, menuiserie extérieure, panneaux de fibres ou particules, charpentes.

Pumaquiro :

Nom scientifique : *Aspidosperma macrocarpon* Mart.

Famille : Apocynaceae

Autres noms : Peroba (Brésil), Volador (Mexique), Canelo (Colombie), Amargo (Venezuela), Bois macaque (Guyane).

Description du bois : À l'état sec à l'air, duramen brun orange et aubier brun pâle. Anneaux de croissance différenciés par de bandes plus foncées de tissus fibreux. Contrefil fréquent, texture fine, lustre moyen et bois sans odeur et sans goût. Bandes rubanées sur les faces radiales. Pores très nombreux presque invisibles (Acevedo et Kikata 1994).

Description anatomique (figure 10): Pores disséminés, isolés, quelques-uns accolés, avec 32 à 56 pores/mm² et très fins (diamètre moyenne de 85μ). Parenchyme dispersé, en chaînettes et cellules isolées. Rayons de structure homogène, très nombreux (Détienne et Jacquet, 1983).

Propriétés physiques : Masse volumique basale de 670 kg/m³, retrait tangentiel total de 8,0%; retrait radial total de 4,1% et retrait volumétrique total de 11,8% (JUNAC 1981).

Transformation: Le séchage est en général assez rapide, aussi bien à l'air qu'en séchage artificiel, avec une stabilité moyenne. Il a un bon comportement à l'usinage, présentant toutefois des difficultés pour le perçage et le toupillage. Bonne résistance aux insectes et aux champignons.

Utilisations : Excellent bois pour toutes sortes d'usages : construction navale, menuiserie extérieure, escaliers, parquets, ébénisterie massive ou plaquée, manches d'outils, artisanat, meubles. Il a été proposé comme substitut de l'érable à sucre (Aróstegui 1974).

Huayruro :

Nom scientifique : *Ormosia coccinea* Jackson

Famille : Fabaceae

Autres noms : Tento et Tinctoria (Brésil), Chocho (Colombie), Caracará (Guyane), Keonia (Venezuela).

Description du bois : À l'état sec à l'air, aubier crème et duramen violet en peu jaunâtre. Anneaux de croissance différenciés par des bandes foncées en forme régulière. Bois à contre-fil, texture grossière et lustre moyen (Acevedo et Kikata 1994).

Description anatomique (figure 11): Bois à porosité diffuse. Pores légèrement visibles à l'œil nu, isolés et accolé radialement de forme ovale, avec 1 à 6 pores/mm². Présence des gommés de couleur violette foncée. Parenchyme et rayons visibles à l'œil nu, avec rayons de 1 à 9/mm (Acevedo et Kikata 1994). Chaînes axiales de cristaux dans des éléments recloisonnés en loges, parenchyme ou fibres (Détienne et Jacquet 1983).

Propriétés physiques : Masse volumique basale de 600 kg/m³, retrait tangentiel total de 6,4%; retrait radial total de 3,2 % et retrait volumétrique total de 9,3% (JUNAC 1981).

Transformation : Vitesse de séchage moyenne. Imprégnation difficile. Il a un bon comportement à l'usinage et facile à travailler (Aróstegui, 1982). Aubier est susceptible à l'attaque des insectes.

Utilisation : parquets, structures, meubles, carrosserie, charpentes.

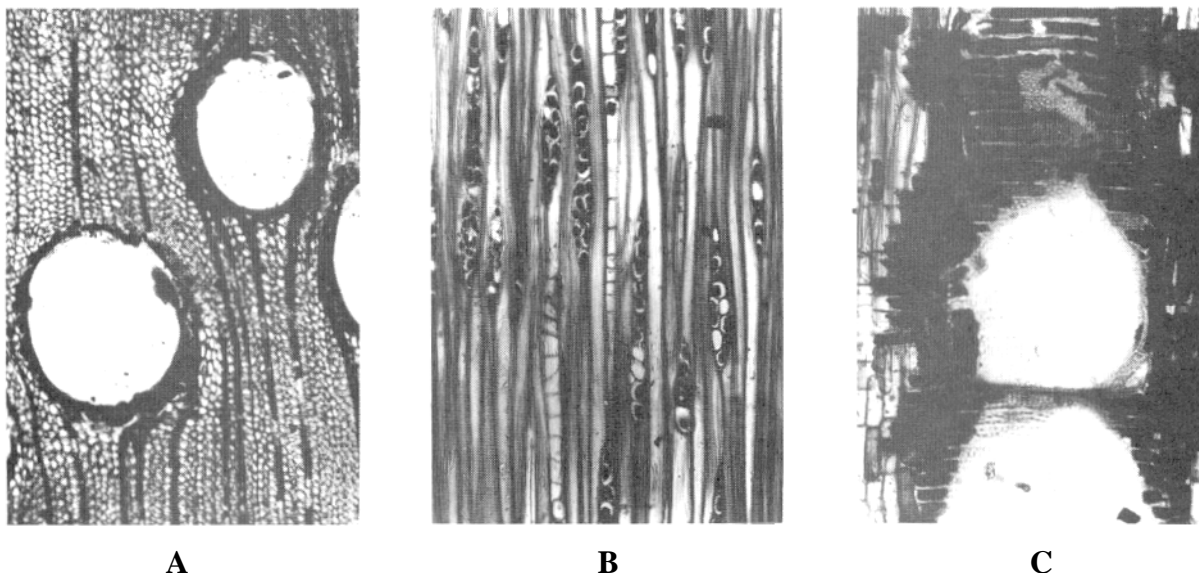


Figure 9. Coupes microscopiques du bois de tornillo : (A) coupe transversale (50x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).

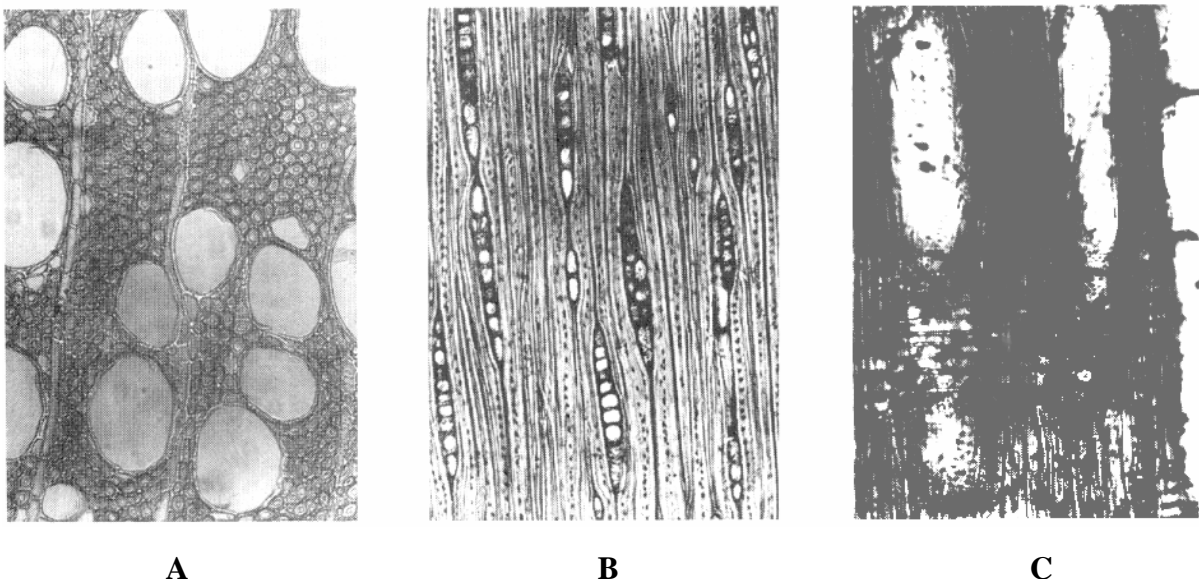


Figure 10. Coupes microscopiques du bois de pumaquiro : (A) coupe transversale (100x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).

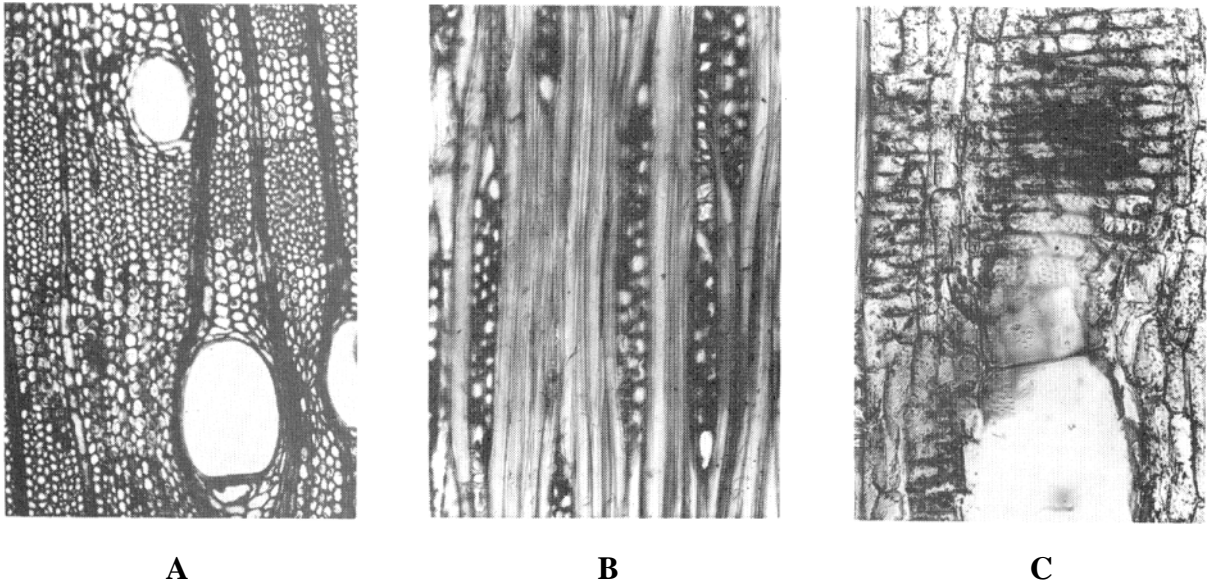


Figure 11. Coupes microscopiques du bois de huayruro : (A) coupe transversale (50x); (B) coupe tangentielle (100x); (C) coupe radiale (100x) (d'après Acevedo et Kikata 1994).

2.2 Préparation et sélection des éprouvettes

Un total de 122 planchettes ayant de sections d'environ 97 x 100 mm pour tornillo, 82 x 100 mm pour pumaquiro et 76 x 100 mm pour huayruro ont été préparées à l'Universidad Nacional Agraria La Molina, Pérou, en mai 2002. Ces planches ont été paraffinées les deux bouts, emballées et envoyées aux laboratoires de l'Université Laval. À leur arrivée, les planches ont été placées dans une chambre à climat constant, soit à 20°C et 60% de degré hygrométrique de l'air pendant 80 jours, afin qu'elles atteignent leur humidité d'équilibre. La figure 12 montre le suivi du conditionnement des échantillons témoins de chacune des espèces. Cette figure présente une teneur en humidité calculée avec une masse anhydre estimée à partir de la masse volumique basale moyenne du bois. La teneur en humidité d'équilibre fut d'environ 13% pour le tornillo et 11% pour le huayruro et pumaquiro.

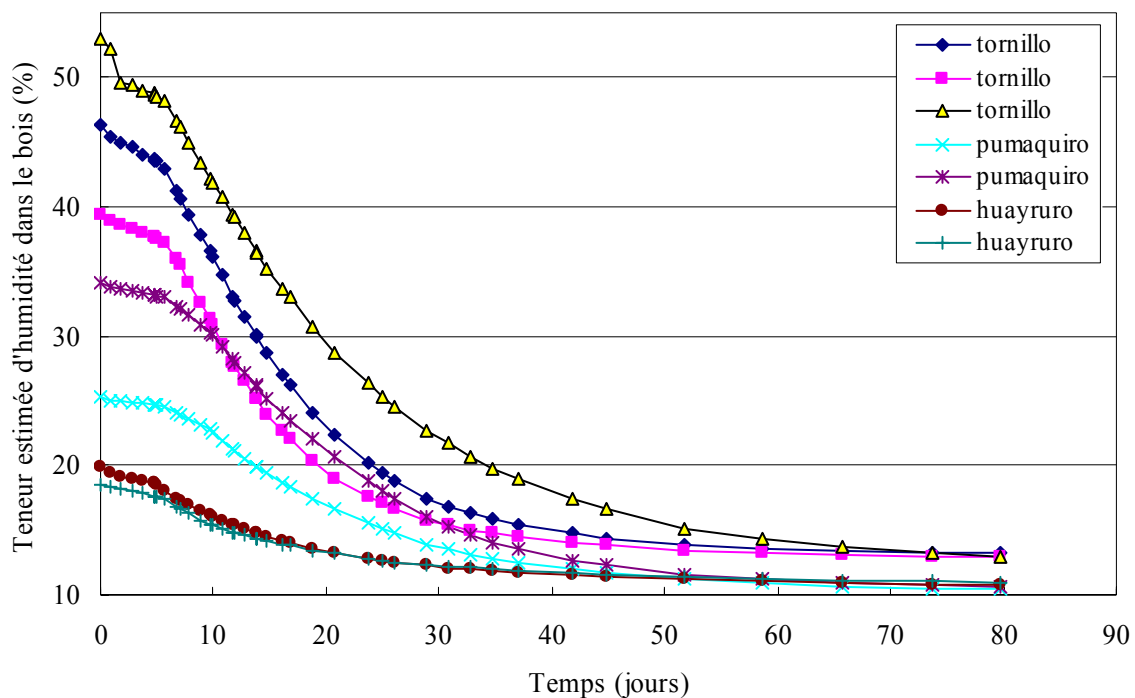


Figure 12. Progrès du conditionnement des planchettes témoins du bois de tornillo, pumaquiro et huayruro à 20°C et 60% d'humidité relative.

Lorsque les planchettes ont atteint l'équilibre, une sélection du matériel d'essai de ces trois espèces a été faite en fonction des qualités apparentes des planchettes en éliminant les défauts et l'irrégularité du fil et des cernes. Les quinze planchettes choisies de chacune des espèces ont été ensuite tronçonnées en deux pour obtenir trente planchettes. Celles-ci ont été préparées en tenant compte de la meilleure orientation des cernes dans la section transversale.

La préparation proprement dite des éprouvettes a consisté à dégauchir les pièces pour les orienter et à les tirer d'épaisseur et de largeur jusqu'à l'équarrissage final de 20 mm par 60 mm. Finalement, la forme et dimensions des éprouvettes d'essai ont été obtenues par éboutage de la planchette à tous les 20 mm suivant le fil. La section droite de l'échantillon présenté à la figure 13 a été de 20 mm (L) par 20 mm (R) avec une longueur de 60 mm (T). Ce type d'échantillon a été utilisé avec succès dans des expériences précédentes faites au Département (Hernández 1993a,b; Hernández et Bizoñ 1994).

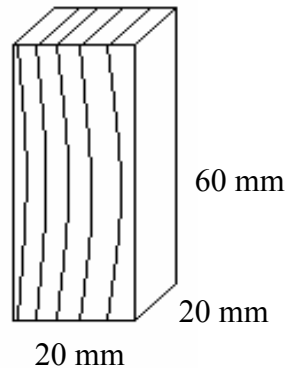


Figure 13. Forme et dimensions de l'éprouvette de compression tangentielle.

Le choix du matériel d'essai a été fait d'abord en fonction de ses caractéristiques apparentes : absence de défauts d'usinage (marques de couteaux ou marques de scie), nœuds, courbures des cernes, régularité du fil et des cernes, absence de bois de tension ou de piqûres. Le second choix a consisté à conserver intactes les séquences de quinze éprouvettes aux cernes les mieux orientés. Seules des anomalies mineures au niveau de la couleur, de l'usinage et de l'uniformité des cernes ont été tolérées. Le choix final a consisté à retenir les 20 séries de 15 éprouvettes qui paraissaient les meilleures.

2.3 Jumelage et principales caractéristiques des éprouvettes

L'attribution à un groupe séparé d'une seule éprouvette par planchette a conduit à la formation de quinze groupes d'échantillons par espèce. Ces groupes ont été comparables les uns aux autres. Deux de ces groupes ont servi comme matériel de réserve pour les trois espèces. À titre d'exemple, le tableau 2 montre le jumelage qui en a résulté pour une espèce donnée.

Ensuite, la masse des échantillons a été établie au moyen d'une balance à plateau avec une précision de 0,001g. Leurs dimensions initiales dans les trois directions principales ont été mesurées à l'aide de micromètres Mitutoyo de 0,001 mm de précision.

Tableau 2. Identification et jumelage des éprouvettes.

Numéro de planchette	Numéro de groupe														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
3	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45
4	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
5	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75
6	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
7	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105
8	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115	116	117	118	119	120
9	121	122	123	124	125	126	127	128	129	130	131	132	133	134	135
10	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	149	150
11	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165
12	166	167	168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180
13	181	182	183	184	185	186	187	188	189	190	191	192	193	194	195
14	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	207	208	209	210
15	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225
16	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240
17	241	242	243	244	245	246	247	248	249	250	251	252	253	254	255
18	256	257	258	259	260	261	262	263	264	265	266	267	268	269	270
19	271	272	273	274	275	276	277	278	279	280	281	282	283	284	285
20	286	287	288	289	290	291	292	293	294	295	296	297	298	299	300

Le matériel a été enveloppé dans des sacs de polyéthylène et conservé dans la chambre de climatisation à climat constant jusqu'au début des essais de sorption.

Le tableau 3 résume la destination au hasard de chaque groupe d'échantillons par espèce en fonction des conditions de sorption et du degré hygrométrique de l'air ambiant utilisées dans les expériences. La masse volumique basale moyenne des espèces utilisées furent 490 kg/m^3 pour le tornillo, 585 kg/m^3 pour le pumaquiro et 640 kg/m^3 pour le huayruo.

Tableau 3. Caractéristiques des conditions de sorption d'humidité utilisées et destination des groupes d'éprouvettes.

Espèce et numéro du groupe			État de sorption	Solution saturée	Degré hygrométrique (%)	Potentiel hydrique (Jkg ⁻¹)
<i>Tornillo</i>	<i>Pumaquiro</i>	<i>Huayruro</i>	<i>Équilibre sur la membrane poreuse à 25°C</i>			
2	1	5	Désorption	-	99,927	-100
12	5	6	Désorption	-	99,782	-300
7	2	10	Désorption	-	99,492	-700
13	12	4	Désorption	-	98,557	-2000
4	13	12	Désorption	-	96,431	-5000
			<i>Équilibre sur des solutions salines saturées à 25 °C</i>			
6	10	13	Désorption	ZnSO ₄	90	-14495
11	9	11	Désorption	KCl	86	-20750
3	4	9	Désorption	NaCl	76	-37756
8	6	1	Désorption	NaBr	58	-74942
10	3	2	Désorption	MgCl ₂	33	-152526
5	7	7	Désorption	P ₂ O ₅	0	-950346
9	8	3	Adsorption	H ₂ O	≈ 100	-
			<i>Saturation totale dans l'eau distillée</i>			
1	11	8	Saturation	H ₂ O	100	0

Chapitre 3

Méthode expérimentale

Le dispositif expérimental a consisté à coupler des essais de retrait et de compression tangentielle à des expériences de sorption d'humidité. Ce type de dispositif a été élaboré par Goulet (1968) et a été utilisé par la suite par d'autres chercheurs. Cependant, les présentes expériences ont eu certaines adaptations.

3.1 Traitements préalables des éprouvettes

Les groupes jumelés d'éprouvettes ont été placés, soit en première adsorption au-dessus de l'eau distillée (saturation des membranes), soit en deuxième désorption réalisée sous onze conditions d'équilibre (tableau 3). Les éprouvettes destinées à la désorption ont été humidifiées jusqu'à la saturation intégrale. Elles avaient une teneur en humidité initiale moyenne de 12,4% pour le tornillo; 13,3% pour le pumaquiuro et 13,1% pour le huayruro. La saturation intégrale a été réalisée par étapes afin de diminuer la formation de contraintes internes (Naderi et Hernández 1997). Ainsi, les éprouvettes ont subi une adsorption au-dessus d'une solution saturée de KCl durant 30 jours suivi d'une étape au-dessus de l'eau distillée durant 60 jours. Ces deux étapes ont été faites dans des dessiccateurs dans la chambre à climat constant, soit à $20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Chaque dessiccateur comportait quarante échantillons sauf ceux utilisés pour le contrôle de masse qui en avaient vingt, dont dix servaient à ce propos. Ce contrôle était fait pour chaque espèce à l'aide d'une balance à plateau de 0,001 g de précision. Au-dessus d'une solution saturée de KCl, les échantillons ont atteint environ 18% d'humidité pour les trois espèces étudiées. Au-dessus de l'eau

distillée, la teneur en humidité atteinte fut d'environ 30% pour le tornillo et 27% pour le pumaquiuro et huayruuro.

Les échantillons, à l'exception de ceux destinés à l'adsorption, ont été ensuite immergés dans l'eau distillée durant vingt-quatre heures. Un cycle de vide sous l'eau d'une durée de 24 heures a été conduit, suivi d'un autre cycle d'environ 24 heures à pression atmosphérique.

Les espèces ont suivi par la suite un cheminement différent afin d'attendre la saturation intégrale. Les échantillons de pumaquiuro ont été saturés avec trois cycles de 100 kPa de pression d'une durée d'une heure chacun. La pression atmosphérique était amenée durant 2 heures entre les cycles de pression. L'humidité à la saturation intégrale du pumaquiuro fut en moyenne de 102% (H).

Le tornillo et le huayruuro se sont avérés des espèces moins perméables. On a donc dû utiliser plusieurs cycles à des pressions plus élevées, lesquels ont été faits dans un cylindre de 600 kPa de pression de capacité (figure 14). La pression était augmentée par des paliers de 100 kPa d'une durée de 45 minutes chacun jusqu'à atteindre 400 kPa. Ensuite celle-ci était amenée à 500 kPa et maintenue durant 5 heures. La pression était ensuite relâchée jusqu'au lendemain où un autre cycle commençait. Il a fallu dix cycles (dix jours) pour atteindre la saturation intégrale des échantillons, laquelle fut en moyenne de 132% (H) pour le tornillo et 88% (H) pour l'huayruuro.

Les six groupes de chacune des espèces destinés à la méthode des solutions salines saturées ont été saturés ensemble. Les autres groupes destinés à la désorption par la méthode de la membrane poreuse et ceux de la saturation intégrale ont été saturés individuellement à mesure que chaque condition de sorption débutait.

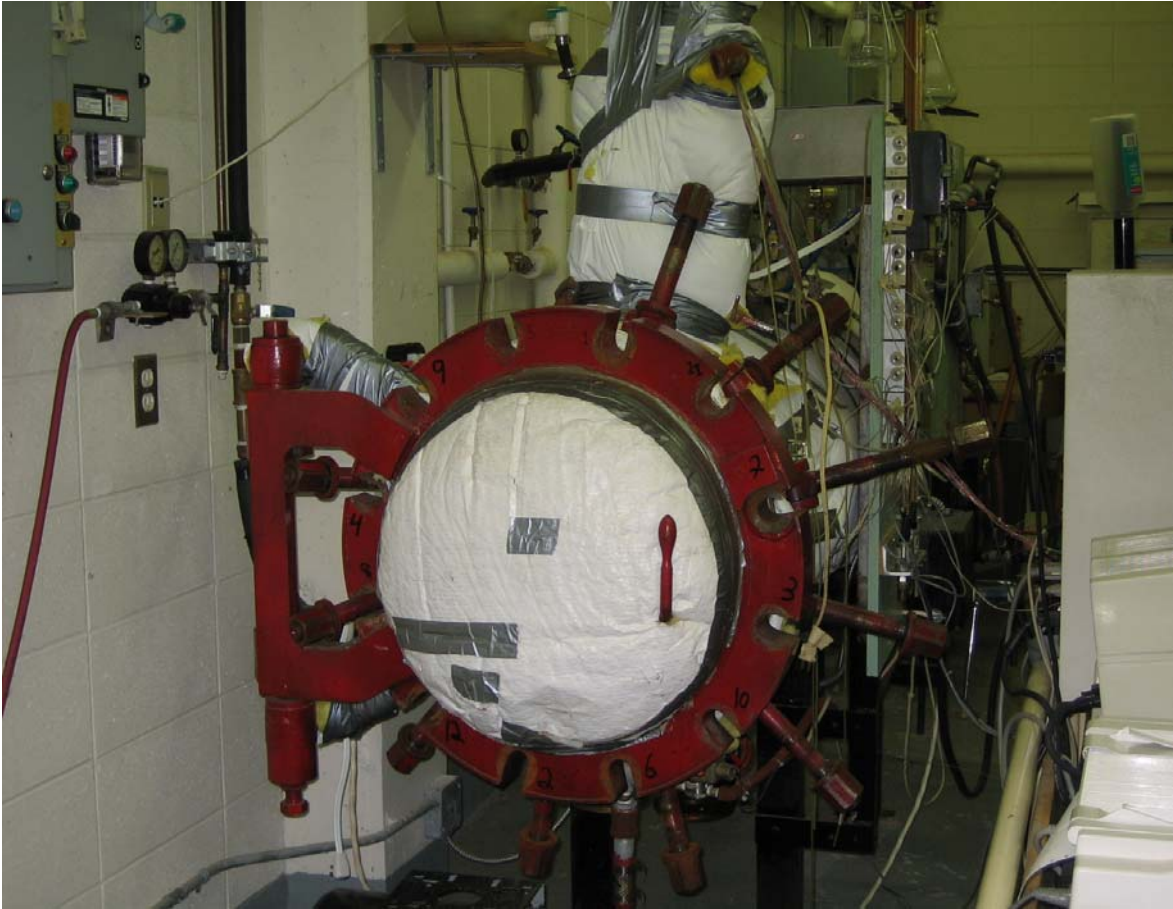


Figure 14. Cylindre utilisé pour la saturation de tornillo et huayruro.

Après la saturation intégrale des échantillons, la masse était prise à l'aide d'une balance de 0,001 g de précision. Ensuite, les directions radiale (d_{RS}), tangentielle (d_{TS}) et longitudinale (d_{LS}) étaient mesurées à l'aide des micromètres Mitotoyo de 0,001 mm de précision.

3.2 Essais de sorption

3.2.1 Caractéristiques générales

Il aurait été intéressant de réaliser un essai complet de sorption d'humidité comme à la figure 1, c'est-à-dire, des expériences en adsorption et en désorption couvrant tout le

domaine hygroscopique. Par contre, nos expériences se sont concentrées sur des degrés hygrométriques élevés et pour un seul état de sorption. C'était une deuxième désorption réalisée suite à une désorption partielle (jusqu'à environ 60% ψ) suivie d'une saturation intégrale du bois. Une expérience de saturation des membranes et une autre de saturation intégrale ont également été conduites.

La sorption a fait donc appel à deux techniques complémentaires utilisées dans des travaux antérieurs (Cloutier et Fortin 1991; Hernández et Bizoñ 1994): une sorption conventionnelle avec des solutions salines saturées et une sorption réalisée au moyen d'une membrane poreuse sous pression. La technique de solutions salines saturées a été utilisée pour six conditions d'équilibre (de 0% à 90% ψ). De plus, cinq autres conditions ont été réalisées par la technique de la membrane poreuse sous pression. Le tableau 3 précise les degrés hygrométriques utilisés pour les deux techniques mentionnées. Ces degrés hygrométriques ont permis de représenter convenablement la gamme des humidités situées à proximité de la saturation des membranes.

3.2.2 Méthode des solutions salines saturées

3.2.2.1 Bassins à température constante

Entre 0% et 90% ψ , la sorption a été réalisée dans une chambre dont la température était d'environ 1°C inférieure à celle de l'expérience soit 25°C. Le matériel a été disposé dans trois bassins à température constante comportant chacun dix cellules de sorption (figure 15). Ces bassins, sont de grandes cuves en tôle, remplis d'eau, et comportant des ouvertures circulaires à leur partie supérieure. Dans ces ouvertures sont logés des vases de pyrex qui constituent les cellules de sorption. L'ensemble est isolé de tous côtés par un panneau de polystyrène expansé de 25 mm d'épaisseur qui est enfermé à son tour, sauf au-dessus, par une enceinte en bois. D'autres couches de polystyrène expansé sont moulées aux couvercles de vases de pyrex et assurent l'isolation du dessus du bassin. Lorsque la



Figure 15. Bassin de sorption à température constante.

température s'abaisse, le thermomètre à contact, logé au milieu du bassin actionne les agitateurs disposés aux extrémités; l'agitation produit un léger échauffement de l'eau qui maintient la température constante à $\pm 0,01^{\circ}\text{C}$ durant des périodes prolongées. Cela assure ainsi le maintien de l'humidité relative dans les cellules de sorption. Deux thermomètres différentiels placés près des extrémités ont servi à contrôler la température de l'eau et son uniformité au millième de degré près.

3.2.2.2 Cellules de sorption

Les cellules de sorption sont constituées d'un vase à couvercle rodé, en pyrex, servant généralement comme dessiccateur à vide. Au fond de chaque cellule sont placées des

solutions salines saturées ou de l'eau, lesquelles règlent le degré hygrométrique de l'air. Ainsi, lorsqu'un soluté est ajouté à l'eau, le degré hygrométrique de l'air au-dessus de la solution est réduit en fonction de la fraction molaire du soluté comme le stipule la loi de Raoult (Siau 1995). Pour une solution saturée, le degré hygrométrique de l'air demeurera constant si la température est maintenue constante. Vingt éprouvettes de chaque groupe ont donc été déposées immédiatement au-dessus de ces solutions en deux rangées séparées l'une de l'autre par un treillis métallique enduit de vinyle, l'ensemble étant tenu à environ cinq centimètres du fond du dessiccateur par une plaque de porcelaine perforée. Un même volume de solution saline a été utilisé pour chaque cellule de sorption soit 500 ml, sauf pour la solution de $MgCl_2$ qui avait 600 ml à cause de sa grande solubilité. Cependant, dans les cas particuliers où l'on a procédé au contrôle des masses en cours d'essais, dix échantillons étaient placés sur une cage en plexiglas dans une deuxième rangée. Les échantillons étaient appuyés sur la face tangentielle et leur position finale dans les cellules a été notée afin d'évaluer l'influence éventuelle de cette position sur l'équilibre atteint.

Les sels ont été choisis pour obtenir les conditions d'équilibre désirées. Il s'est agi de pentoxyde de phosphore (P_2O_5) et de solutions aqueuses saturées de chlorure de magnésium ($MgCl_2$), de bromure de sodium ($NaBr$), de chlorure de sodium ($NaCl$), de chlorure de potassium (KCl) et de sulfate de zinc ($ZnSO_4$). Les caractéristiques de ces sels ont été établies entre autres pour Hedlin et Trofimenkoft (1965). D'après ces auteurs, les valeurs indiquées ne doivent pas s'écarter de plus de 1% (ψ) des valeurs réelles, ce qui est suffisant dans le présent contexte.

Par ailleurs, les conditions de sorption ont été effectuées généralement dans une seule étape. Cependant, les groupes au-dessus de P_2O_5 et $MgCl_2$ ont subi une étape préalable dans une chambre à climat constant soit 20°C et 40% (ψ). Le matériel d'essai a été disposé dans dix cellules de sorption réparties dans trois bassins.

3.2.2.3 Durée de conditionnement

La sorption a été contrôlée directement dans une des cellules par la mesure de la masse de dix échantillons. Les échantillons étaient disposés sur un support en méthacrylate de méthyle dont un fil reliait à une balance de 0,001 g de précision. Cela a permis d'obtenir des pesées précises en peu de temps sans modifier les conditions de la sorption. Ce type de contrôle a été utilisé avec succès par plusieurs chercheurs (Bizoň 1995, Arévalo 2002).

Les pesées ont été effectuées à des intervalles réguliers ce qui a permis de suivre le conditionnement durant la sorption. L'équilibre d'humidité a été considéré comme atteint lorsque le changement d'humidité était d'au plus 0,007% H par jour. À ce moment, les éprouvettes ont été retirées des dessiccateurs pour prendre immédiatement leur masse et leurs dimensions et effectuer par la suite les essais de compression tangentielle.

3.2.3 Méthode de la membrane poreuse sous pression

Au-dessus de 90% ψ , la sorption a été réalisée selon la méthode de la membrane poreuse sous pression. Cette méthode a été initialement développée pour étudier la relation entre la teneur en humidité et la pression appliquée dans les sols. Celle-ci permet le contrôle très précis de hautes valeurs de degré hygrométrique de l'air. Il a été ainsi possible d'obtenir cinq points de mesure entre 96% et 100% de degré hygrométrique de l'air, intervalle visé spécialement par ce travail. Une description détaillée de cette méthode est présentée par Fortin (1979) ainsi que par Cloutier et Fortin (1991).

La méthode utilise le concept de potentiel hydrique, lequel est décrit en détail par Siau (1984,1995). Ce concept est dérivé de la thermodynamique classique et il est défini comme étant la différence entre l'énergie libre de Gibbs spécifique de l'eau à l'état sous étude et celle à l'état de référence. L'état de référence généralement utilisé est une nappe d'eau libre et pure à la pression atmosphérique, à une élévation donnée et à la température de l'eau à

l'état sous étude (Fortin 1979, Cloutier et Fortin 1991). Ces derniers auteurs ont considéré le gradient de potentiel hydrique comme étant la force motrice du mouvement de l'humidité dans le bois. Ce concept peut aussi être appliqué à l'étude de l'effet des forces de capillarité sur le mouvement de l'eau liquide dans le bois (Siau 1995). Le potentiel hydrique est normalement exprimé en terme d'énergie par unité de masse, soit en J kg^{-1} . La relation entre le potentiel hydrique, le degré hygrométrique de l'air et le rayon de courbure de l'interface entre l'eau et l'air à 25°C est présentée au tableau 4. Selon Cloutier et Fortin (1991), le potentiel hydrique augmente avec la température et l'humidité d'équilibre.

La figure 16 illustre l'appareil de sorption qui a été utilisé dans le cadre du présent travail. Les parties principales sont l'enceinte à pression ou extracteur, la membrane poreuse, une source d'air à haute pression et un système de régulation de la pression. La membrane utilisée est constituée d'une feuille d'acétate de cellulose ayant des pores dont le diamètre moyen est de 24 \AA , ce qui lui permet de résister à des pressions d'air pouvant aller jusqu'à 10000 kPa sans se désaturer. La méthode est alors conçue sur le principe que les pores dans la membrane sont suffisamment petits pour retenir une certaine quantité d'eau grâce aux forces capillaires, et cela même sous l'effet de la pression appliquée. La membrane demeure ainsi perméable à l'eau mais imperméable à l'air. Les échantillons de bois humide en contact avec la membrane poreuse perdent de l'eau jusqu'à ce qu'ils s'équilibrent avec le potentiel hydrique imposé grâce à la pression appliquée (Cloutier et Fortin 1991).

Les échantillons saturés sont placés dans l'enceinte hermétique sur la membrane poreuse saturée d'eau. L'air entourant les échantillons est maintenu saturé de vapeur d'eau afin de prévenir toute perte par évaporation. La membrane est recouverte d'une couche d'argile d'environ 2 mm d'épaisseur pour assurer un bon contact hydraulique entre les éprouvettes et la membrane. Une pression d'air connue est alors appliquée dans l'enceinte pendant que l'eau sous la membrane est maintenue à la pression atmosphérique. La teneur en humidité des échantillons est obtenue lorsque le volume d'eau extrait est en équilibre. Ce processus est répété pour différents gradients de pression de façon à obtenir une courbe d'humidité d'équilibre en fonction du potentiel hydrique. Dans la présente étude, la méthode de la membrane sous pression a été utilisée dans la gamme de potentiel hydrique de -100 à -5000

Tableau 4. Relation entre le potentiel hydrique, le degré hygrométrique et le rayon capillaire à 25°C.

Potentiel hydrique		Degré hygrométrique	r
(J Kg ⁻¹)	(KPa)	(%)	(μm)
0	0	100	∞
-1	-1,373	99,999	104,850
-6	-5,494	99,996	26,210
-10	-9,614	99,993	14,980
-21	-20,603	99,985	6,990
-51	-50,826	99,963	2,830
-72	-71,437	99,948	2,020
-100	-100,3	99,927	1,440
-204	-203,4	99,852	0,708
-300	-299,7	99,782	0,480
-509	-507,7	99,631	0,284
-700	-699,5	99,492	0,206
-1018	-1016,0	99,263	0,142
-2000	-1996,3	98,557	0,072
-5000	-4991,4	96,431	0,029
-14495	-14470,5	90	-
-20750	-20714,4	86	-
-37756	-37691,9	76	-
-74942	-74814,3	58	-
-152526	-157838,3	33	-
-950346	-948730,4	0,1	-

J kg⁻¹ (tableau 3). Cette gamme a été complémentaire à celle obtenue avec la méthode des solutions salines. Quatre de ces dispositifs ont été montés dans une chambre ayant une température de 25°C ± 1°C. Vingt éprouvettes par groupe dont leur dimensions et masse avaient été prises préalablement ont été placées dans ces dispositifs.

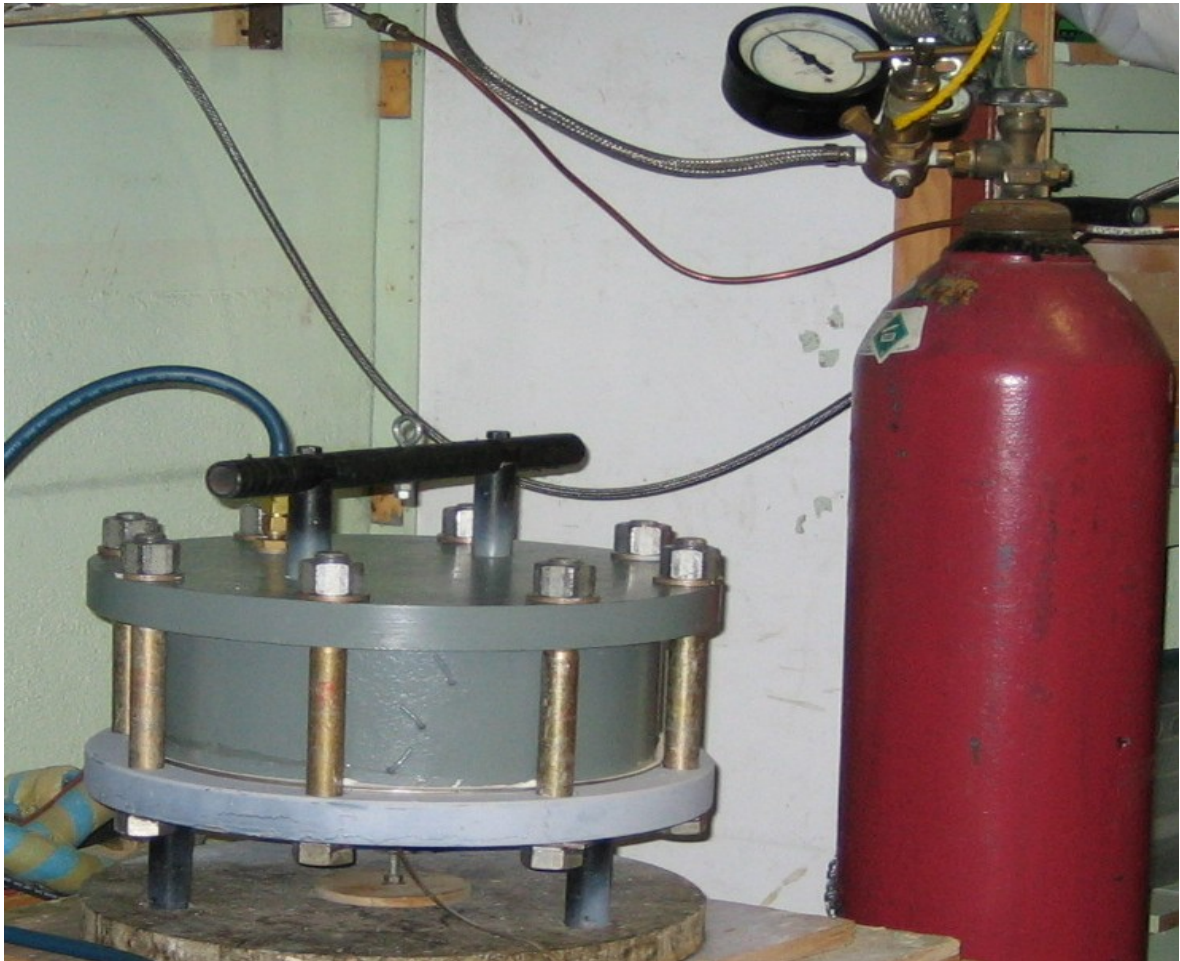


Figure 16. Montage de l'appareil de sorption utilisé pour la technique de la membrane poreuse sous pression.

3.3 Essais mécaniques

3.3.1 Conditions hygrothermiques à l'essai

Étant donné l'importance de la teneur en humidité des échantillons dans le cadre de ce travail, plusieurs précautions ont été prises afin d'assurer le contrôle des conditions hygrothermiques durant les essais mécaniques.

Aussitôt sorties des cellules de sorption ou de l'extracteur, les vingt éprouvettes ont été rapidement emballées en groupes de cinq dans de bandes de polyéthylène. Elles ont été ensuite placées dans une enceinte (figure 17), qui se trouvait près de la machine à l'essai. Cette enceinte, faite en méthacrylate de méthyle était composée principalement d'une gaine étanche offrant un espace intérieur; ce dernier contenait à sa base un réceptacle pour verser un liquide et, par le haut, sur un support grillagé, un espace pour y déposer les éprouvettes. Pour les essais au-dessous de 96% ψ , une solution saline correspondant aux conditions où venait de s'effectuer la sorption était versée dans le réceptacle. Pour les essais au-dessus de 96% ψ , de l'eau a été placée dans le réceptacle afin de conserver un degré hygrométrique élevé. La température de l'enceinte a été maintenue à 25°C au dixième de degré près, en faisant circuler du polyéthylène glycol dans la gaine à l'aide d'un bassin thermostatique.

Pendant l'essai, les échantillons étaient entourés dans du coton hydrophile conditionné au dessus de mêmes conditions hygrométriques que le bois. Ce coton servait de régulateur hygrothermique à la surface des éprouvettes. Un tel système a été utilisé préalablement par Bizoň (1995) et Arévalo (2002).

3.3.2 Essais de compression

Les essais de compression tangentielle ont été réalisés sur les machines MTS ALLIANCE RT/50 pour le huayruro et MTS Q TEST/5 ELITE CONTROLLER pour le pumaquiro et tornillo. Elles ont une capacité maximale de 50 kN et 5 kN respectivement. Ces machines sont équipées d'une base, deux colonnes verticales, d'une plaque supérieure fixée à la traverse mobile par en dessous et d'un mécanisme de control. Une pièce de plus faible diamètre est vissée à la plaque supérieure pour faciliter le positionnement et centrage de l'échantillon tandis qu'un joint hémisphérique de grand rayon rend cette plaque facilement orientable pour tenir compte du manque de parallélisme des faces mises en contact. Les précautions prises à cet égard ont consisté à mouvoir la plaque orientable selon deux directions perpendiculaires l'une à l'autre à mesure que la charge initiale était appliquée.

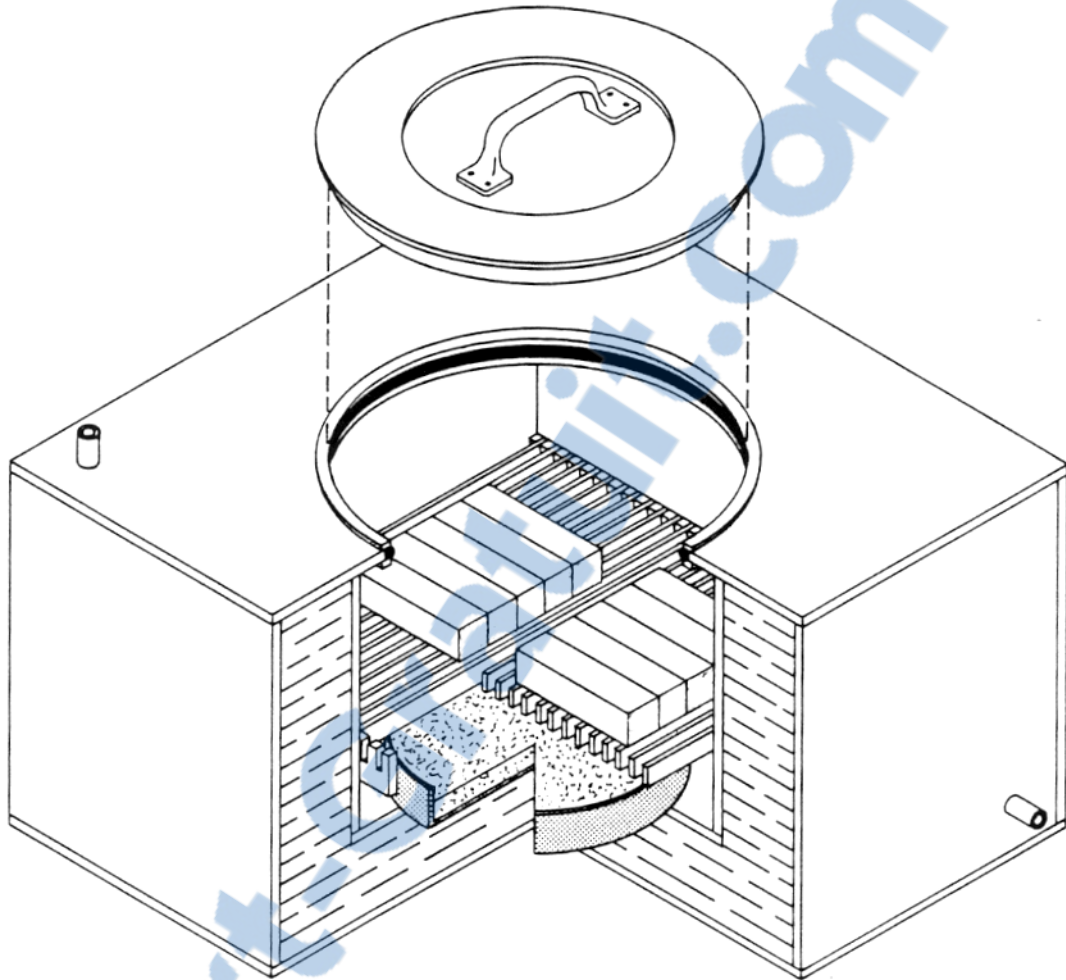


Figure 17. Schéma de l'enceinte reproduisant les conditions hygrothermiques.

Une base inférieure de même diamètre que la supérieure, sert aussi à positionner et centrer l'éprouvette.

La machine est reliée à un ordinateur par un câble IEEE 1284. Le logiciel Test Works 4 sert à la manipulation de la machine et à la prise des données. Ce logiciel d'acquisition de données a créé un fichier de données brutes de charge et de déformation.

Il a été décidé d'utiliser un taux de déformation assez constant pour toutes les conditions d'humidité, afin de limiter les effets de ce paramètre sur la déformabilité du bois (Sliker 1978). Des essais préliminaires faits sur des échantillons représentatifs de la masse volumique basale moyenne ont conduit au choix des vitesses de déplacement de la traverse mobile qui sont précisées au tableau 5. Ces vitesses ont donné des taux de déformation élastique de l'ordre de 1% à la minute dans la partie médiane (40 mm) de l'éprouvette.

3.3.3 Mesure des déformations

Le dispositif montré à la figure 18 a servi à mesurer les déformations de compression simple en direction tangentielle. Un gabarit a été utilisé pour fixer l'extensomètre de façon à ce que les pointes de contact soient montées de manière uniforme sur les éprouvettes. Ces pointes ont été enfoncées à l'aide des écrous papillon sur la face transversale du bois.

Pour tenir compte de l'hypothèse de Barré de Saint-Venant sur le caractère local de la triple contrainte près des points d'application des charges, l'extensomètre a été monté dans la partie médiane des barreaux. Cet appareil comporte un système de leviers articulé à une extrémité alors que l'autre porte un capteur linéaire Sangamo DG1.0 (figure 18). Les pointes fixées au barreau d'essai se trouvant à la mi-longueur des leviers, l'extensomètre amplifie les déformations par un facteur deux. Cet extensomètre étant en aluminium, il n'a pas été nécessaire de compenser son poids pour préserver l'équilibre au cours des mesures.

À titre supplémentaire, la déformation totale a aussi été mesurée directement via le déplacement de la machine. Les mesures ont été effectuées dans la gamme de 5 kN pour le tornillo et le pumaquiro et dans celle de 50 kN pour le huayruro, et cela à des intervalles de lectures qui dépendaient de l'humidité des échantillons.

Tableau 5. Vitesses de déplacement de la traverse mobile de la machine à essai mécanique en fonction de la teneur en humidité moyenne de l'éprouvette.

Degré hygrométrique de l'air (%)	Vitesse de la traverse (mm/min)		
	tornillo	pumaquiro	huayruro
0	0,96	1,09	1,00
33	0,95	1,05	0,98
58	0,93	1,01	0,96
76	0,93	0,98	0,95
86	0,92	0,97	0,95
90	0,91	0,94	0,94
96,431	0,90	0,90	0,92
98,557	0,90	0,90	0,92
99,492	0,90	0,90	0,92
99,782	0,90	0,90	0,92
99,927	0,90	0,90	0,92
100	0,90	0,90	0,92

3.4 Mesure des dimensions du bois

Les dispositifs utilisés pour mesurer les dimensions suivant les directions principales du bois sont illustrées à la figure 19. Ces mesures ont été faites à 0,001 mm près à l'aide de micromètres Mitutoyo. Des gabarits en méthacrylate de méthyle ont permis d'établir les dimensions à partir des centres géométriques des surfaces des échantillons, améliorant ainsi la reproductibilité des mesures.

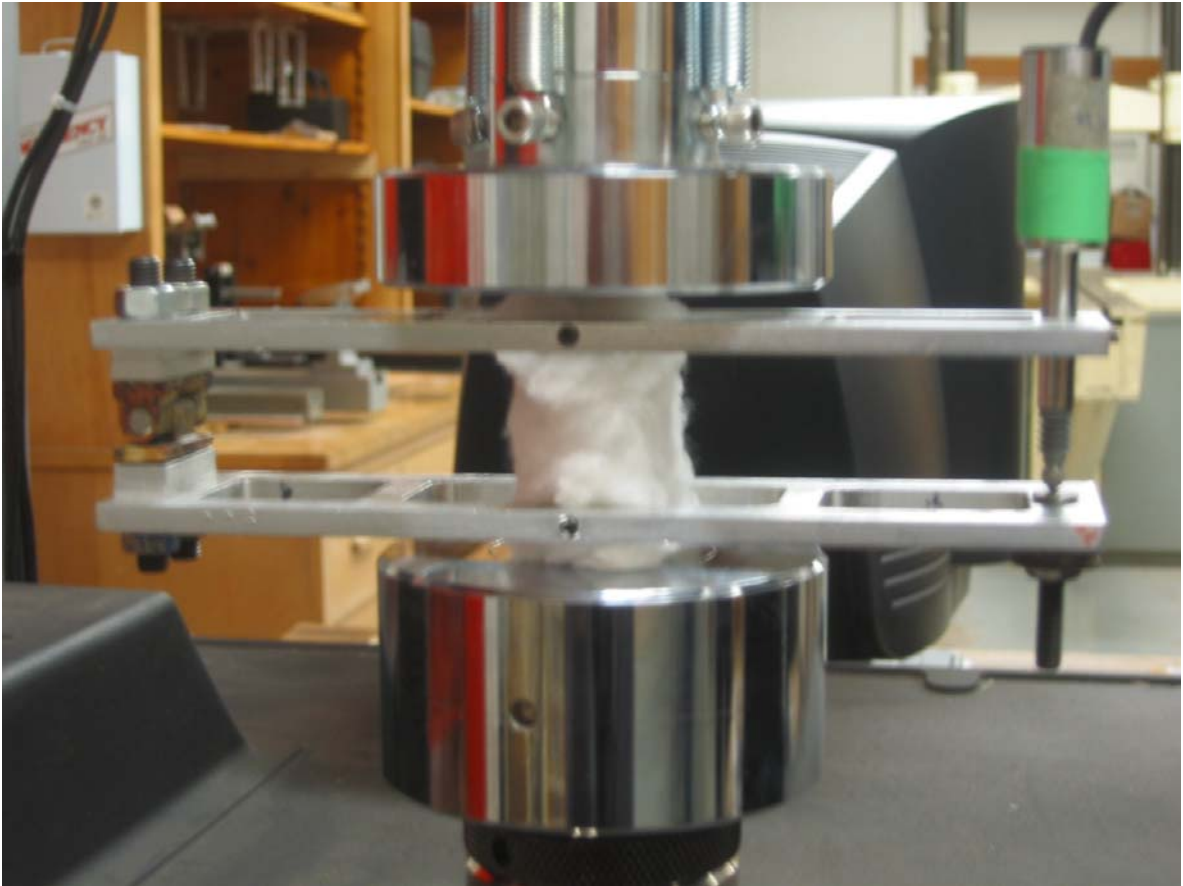


Figure 18. Dispositif de mesure des déformations en compression tangentielle.

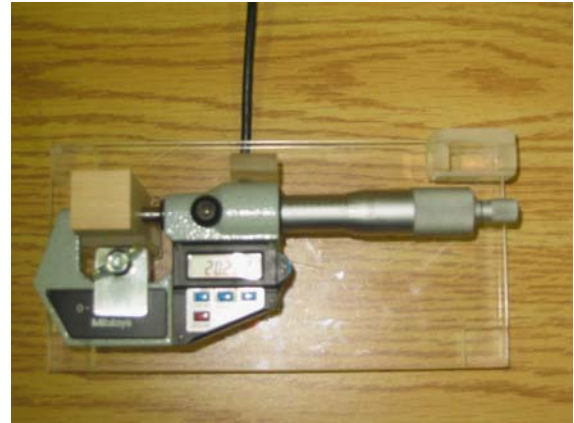
**A****B**

Figure 19. Dispositifs pour la mesure des déformations des éprouvettes : (A) direction tangentielle; (B) direction radial et longitudinal.

Chapitre 4

Exécution des essais

4.1 Sorption d'humidité

4.1.1 Méthode des solutions salines saturées

La sorption a été réalisée dans trois bassins dont l'équilibre de la température avait été atteint depuis déjà quelque temps. Les solutions salines saturées avaient été préparées quatre jours à l'avance et versées dans les cellules de sorption. La sorption a été réalisée dans une seule étape sauf pour les échantillons conditionnés au-dessus de MgCl_2 et de P_2O_5 . Après saturation intégrale, ces groupes ont été placés dans une chambre à 20°C et 40% d'humidité relative pendant neuf jours, avant d'être transférés dans les cellules de sorption. Cependant, il a fallu répéter le groupe au-dessus de MgCl_2 du tornillo, car les résultats n'étaient pas appropriés. Cette répétition a été ainsi réalisée dans une seule étape directement dans les bassins de sorption dans deux dessiccateurs contenant 10 échantillons chacun.

Un total de vingt trois cellules de sorption ont été utilisées, soit deux bassins complets (10 cellules chacun) et trois cellules additionnelles placées dans un troisième bassin.

La température de l'eau, qui a été contrôlée quotidiennement, a resté en général constante à $\pm 0,01^\circ\text{C}$ près, exceptionnellement à $\pm 0,02^\circ\text{C}$. Ces derniers écarts sont attribuables à des bris mineurs d'appareillage. La plupart ont eu lieu pendant les étapes initiales de la sorption

étant donc considérés comme négligeables. La pesée des échantillons à intervalles réguliers a permis de suivre le progrès de la sorption et de contrôler la durée nécessaire pour atteindre l'équilibre hygroscopique.

4.1.2 Méthode de la membrane sous pression

La sorption a été réalisée dans quatre extracteurs placés dans une chambre dont la température était de l'ordre de $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$. Avant de placer les échantillons dans l'extracteur, ils ont été pesés et leurs dimensions dans les trois dimensions principales ont été mesurées. Ensuite, vingt éprouvettes ont été placées dans chaque extracteur avec la face transversale appuyée sur l'argile. La membrane avait été au préalable immergée dans l'eau distillée et saturée complètement dans un dessiccateur par un cycle de vide d'une heure. Le matériel a ensuite été placé dans l'extracteur, lequel était par la suite fermé à l'aide des vis de serrage. La pression a alors été appliquée en ouvrant les valves contrôlant l'entrée de l'azote. Le taux d'application de la pression a varié en fonction du niveau désiré. La pression de 1 bar a été atteinte dans une période de trente minutes tandis que celles plus élevées ont été atteintes plus lentement. L'eau extraite commençait à couler par le tube de caoutchouc dans les burettes aussitôt que le gradient de pression était établi. Le contrôle de conditionnement était fait en mesurant la quantité d'eau écoulée dans la burette. L'équilibre a été considéré comme étant atteint lorsqu'il n'y avait plus d'écoulement dans les burettes durant sept jours, ainsi que lorsque la courbe de la quantité d'eau sortie en fonction du temps écoulé plafonnait. À ce moment, on procédait à l'ouverture de l'extracteur.

La durée de l'essai pour chaque extracteur a été entre sept jours et soixante dix jours, dépendant de l'espèce et la condition de désorption utilisée. Sauf pour les cas de faible pression, la durée de l'essai augmentait avec le niveau de pression utilisé. La vitesse de la sorption a varié aussi en fonction de l'espèce. Les temps requis pour toutes les conditions utilisées sont présentés au tableau 6.

Tableau 6. Temps final requis pour l'obtention de l'équilibre d'humidité pour les trois espèces étudiées.

Degré hygrométrique de l'air (%)	État	Tornillo	Pumaquiro (jours)	Huayruro
0	désorption	133	133	133
33 ⁽¹⁾	désorption	105	114	127
58	désorption	125	116	106
76	désorption	152	152	152
86	désorption	221	194	194
90	désorption	249	237	212
96,431 ⁽²⁾	désorption	63	24	25
98,557 ⁽²⁾	désorption	30	13	15
99,492 ⁽²⁾	désorption	18	6	5
99,782 ⁽²⁾	désorption	6	14	2
99,927 ⁽²⁾	désorption	5	9	1
100 ⁽³⁾	adsorption	212	194	194

(1) sorption en deux étapes pour pumaquiro et huayruro et en une étape pour tornillo.

(2) temps à partir duquel l'écoulement d'eau arrêta.

(3) les essais ont été arrêtés avant que l'équilibre soit atteint.

4.1.3 Détermination de la teneur en humidité d'équilibre

La masse humide (M_H) des éprouvettes était mesurée après leur transfert, par groupes de vingt, dans la salle d'essais mécaniques. Une fois les vingt pesées prises, les échantillons ont été enveloppés et placés dans l'enceinte climatisée près de la machine à essai. Après l'essai mécanique, on a établi à nouveau la masse afin de vérifier l'efficacité de l'enceinte et celle du coton hydrophile qui servaient à contrôler l'humidité avant et pendant l'essai. Les pertes de teneur en humidité durant l'essai mécanique ont varié entre 0,06% et 1,47% H (tableau 7). Ces changements d'humidité ont été plus importants pour les degrés hygrométriques de l'air ambiant élevés pour les trois espèces.

Une fois l'essai mécanique terminé, les échantillons ont été placés dans une étuve à 103°C pendant 24 heures. Ils ont ensuite été laissés dans un dessiccateur sur pentoxyde de phosphore durant trente minutes pour y refroidir avant d'établir leur masse anhydre. Cette masse et la masse à la fin de sa sorption ont servi pour déterminer la teneur en humidité d'équilibre H, définie comme suit :

$$H = \frac{M_H - M_o}{M_o} \times 100 \quad (\%)$$

où : H = teneur en humidité d'équilibre du bois

M_H = masse de l'éprouvette à l'état humide

M_o = masse de l'éprouvette à l'état anhydre

Des mesures au milligramme près ont permis d'obtenir une précision de l'ordre 0,01% (H). Cette variation a été acceptable puisqu'elle était inférieure aux erreurs expérimentales, la véritable précision provenant des moyennes des groupes.

Tableau 7. Changements de l'humidité d'équilibre du bois pendant l'essai mécanique.

Degré hygrométrique de l'air (%)	État de sorption	Tornillo	Pumaquiro (%)	Huayruro
0	désorption	0,31 ^(*)	0,22 ^(*)	0,17 ^(*)
33	désorption	0,04	0,07 ^(*)	0,05 ^(*)
58	désorption	-0,09	-0,06	-0,10
76	désorption	-0,26	-0,16	-0,20
86	désorption	-0,38	-0,36	-0,25
90	désorption	-0,51	-0,34	-0,27
96,431	désorption	-1,47	-0,89	-0,68
98,557	désorption	-0,82	-0,67	-0,74
99,492	désorption	-0,65	-0,58	-0,65
99,782	désorption	-0,51	-0,61	-0,81
99,927	désorption	-0,74	-0,68	-0,59
100	adsorption	-0,47	-0,41	-0,32
100	Saturation intégrale	-0,77	-1,03	-0,86

(*) les valeurs positives indiquent un gain d'humidité et celles négatives une perte

4.2 Compression tangentielle

Les échantillons ont été transférés à la salle d'essais mécaniques enveloppés dans des feuilles de polyéthylène formant quatre paquets. Une fois la pesée et la mesure des dimensions de tous les échantillons réalisées, l'essai de compression débutait avec la fixation de l'échantillon dans l'extensomètre à l'aide du gabarit, puis la pose du coton hydrophile climatisé autour de l'échantillon et enfin, la pose du capteur de déformation

(LVDT) dans l'extensomètre. On vérifiait que la course initiale du LVDT soit dans la région de plus grande précision (environ $-0,90$ V). L'ensemble éprouvette-extensomètre était ensuite placé sur la base de la machine à essai à l'aide de l'anneau de centrage. Une charge initiale était appliquée afin d'assurer que toute la surface du bois soit en contact avec la base de la machine. Enfin, on réglait la vitesse de l'essai dans le programme de contrôle en fonction des conditions d'humidité de l'essai (tableau 5).

L'essai était terminé lorsque la charge à la limite de proportionnalité était dépassée en compression tangentielle. Cette charge ainsi que la vitesse de déplacement avaient été déterminées pour chaque espèce suite à des essais préliminaires. La durée totale de l'essai mécanique pour une éprouvette a été d'environ trois minutes.

Ces essais ont servi à évaluer le coefficient de déformation tangentielle (s_{11}) du bois, l'inverse de ce paramètre étant par définition le module d'Young tangentiel (E_T), soit :

$$s_{11} = \frac{1}{E_T} = \frac{\Delta L}{\Delta P} \times \frac{A}{L} \quad (\text{MPa}^{-1})$$

où: $\Delta L / \Delta P$ = pente de la courbe effort-déformation, établie par régression simple sur la partie linéaire de la courbe.

L = longueur sur laquelle est faite la mesure de ΔL ou distance entre les pointes de l'extensomètre

A = aire de la section droite de l'éprouvette (plan radial-longitudinal)

À partir de la courbe sollicitation-déformation, la charge à la limite proportionnelle (P^0_T) a été définie par convention comme étant celle où les mesures réelles s'éloignent de un pour cent de celles estimées par régression à partir des valeurs lues dans la partie linéaire de la courbe. Des détails à propos d'une telle limite ont été donnés par Goulet et Veer (1975). L'établissement de cette charge a permis de calculer la contrainte à la limite proportionnelle en compression tangentielle (σ^0_T), soit :

$$\sigma_T^0 = \frac{P_T^0}{A} \quad (\text{MPa})$$

Les paramètres s_{11} et σ_T^0 ont aussi été évalués pour les déformations mesurées sur toute la longueur (environ 60 mm) du barreau comprimé.

Les calculs de s_{11} et de σ_T^0 ont été réalisés à l'aide d'une macro-commande préparée sur le logiciel Microsoft Excel pour les déformations à 40 mm et 60 mm des échantillons (Michaud et Almeida 2004).

4.3 Détermination du retrait

Les dimensions saturées établies avant les essais de sorption et celles mesurées à l'équilibre hygroscopique avant l'essai de compression, ont servi à calculer les coefficients de retrait partiels du bois de la façon suivante :

$$\beta_{UH} = \frac{d_{US} - d_{UH}}{d_{US}} \times 100 \quad (\%)$$

où : β_{UH} = coefficient de retrait, de l'état saturé jusqu'à la teneur en humidité H, suivant la direction U

d_{US} = dimension de l'échantillon à l'état saturé, suivant la direction U

d_{UH} = dimension correspondante à la teneur en humidité H

Un cas particulier fut celui des échantillons qui étaient sur pentoxyde de phosphore, lesquels ont passé de l'état saturé à l'état anhydre. Ces derniers, ont permis d'obtenir le retrait total, à savoir :

$$\beta_U = \frac{d_{US} - d_{U0}}{d_{US}} \times 100 \quad (\%)$$

où : d_{U0} = dimension correspondante à l'état anhydre

En remplaçant dans l'équation précédente la direction U par les dimensions longitudinales, radiales et tangentielles, on obtient les formules de calcul des coefficients de retrait de fil ou longitudinal (β_{LH}), radial (β_{RH}) et tangentiel (β_{TH}) respectivement. Quant au retrait en volume (β_{VH}), il a été établi par la formule suivante :

$$\beta_{VH} = \beta_{TH} + \beta_{RH} - (\beta_{TH} \times \beta_{RH}) \times 100 \quad (\%)$$

Les mesures du volume saturé et de la masse anhydre ont également permis de calculer la masse volumique basale (D_b) de la manière suivante :

$$D_b = \frac{M_0}{d_{TS} \times d_{RS} \times d_{LS}} \quad (\text{kg/m}^3)$$

La masse volumique basale du bois est un paramètre de base de son comportement physique, donc de sa résistance mécanique et de son retrait.

Chapitre 5

Présentation des résultats

Les principaux résultats de mesure du bois des trois espèces étudiées sont consignés aux tableaux 8 à 10 pour le tornillo, 11 à 13 pour le pumaquiro et 14 à 16 pour le huayruro. Les tableaux 8, 11 et 14 présentent la moyenne arithmétique des propriétés physico-mécaniques étudiées, pour chacune des conditions d'humidité. On y trouve la teneur en humidité d'équilibre (H), les coefficients de retrait tangentiel (β_{TH}), radial (β_{RH}) et volumétrique (β_{VH}), ainsi que le coefficient de déformation tangentiel (s_{11}) et la contrainte à la limite de proportionnalité (σ°_T) en compression tangentielle. Ces valeurs de propriétés physico-mécaniques ont été obtenues avec vingt répétitions.

La variabilité des résultats expérimentaux relatifs aux propriétés étudiées fait l'objet des tableaux 9, 10, 12, 13, 15 et 16. Les valeurs des coefficients de variation de mesures sont présentées aux tableaux 9, 12 et 15 tandis que l'erreur relative de la moyenne est consignée aux tableaux 10, 13 et 16. Ces deux paramètres sont exprimés en proportion de la moyenne (en %).

Pour faciliter l'analyse, les données physico-mécaniques sont reproduites intégralement aux figures 20 à 22 pour le tornillo, 23 à 25 pour le pumaquiro et 26 à 28 pour le huayruro. Ainsi, les figures 20, 23 et 26 présentent la teneur en humidité d'équilibre en fonction du potentiel hydrique pour chaque espèce séparément. Le retrait de ces trois espèces en fonction du teneur en humidité d'équilibre est montré également dans les figures 21, 24 et 27. Enfin, la déformation en compression tangentielle en fonction de la teneur en humidité d'équilibre est présentée aux figures 22, 25 et 28.

Tableau 8. Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite proportionnelle (σ^o_T) en compression tangentielle du bois de tornillo en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.

Degré hygrométrique ψ (%)	Humidité d'équilibre H (%)	Coefficients de retrait			Coefficient de déformation s_{11} sur :		Contrainte à la limite proportionnelle σ^o_T sur :	
		tangentiel β_{TH}	radial β_{RH} (%)	volumétrique β_{VH}	40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
(10 ⁻³ MPa ⁻¹)								
(MPa)								
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	0	6,08	3,78	9,63	1,33	1,83	2,45	6,68
33	7,59	5,06	2,74	7,66	1,60	1,99	2,52	5,43
58	12,11	3,81	2,08	5,80	1,49	2,23	4,51	4,06
76	16,73	2,87	1,47	4,30	2,06	2,47	1,47	2,84
86	20,44	2,12	0,96	3,06	2,13	2,62	1,62	2,34
90	23,22	1,63	0,69	2,31	2,63	3,02	1,55	1,89
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	36,48	0,08	0,09	0,17	2,87	3,63	1,21	1,90
98,557	51,50	0,10	0,09	0,19	2,82	3,40	1,07	2,03
99,492	95,63	0,02	0,01	0,04	2,78	3,16	0,95	1,72
99,782	114,11	0,02	-0,05	-0,03	2,28	3,18	0,94	1,99
99,927	119,54	0,02	0,02	0,04	2,08	2,98	0,96	2,05
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	30,91	0	0	0	2,80	3,51	1,12	1,81
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	130,56	0	0	0	2,22	2,93	1,12	2,09

Tableau 9. Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de tornillo.

ψ	H	Coefficient de variation (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	260,00	5,78	8,76	5,92	10,16	7,24	13,93	10,79
33	1,58	6,72	11,31	7,18	14,85	10,70	26,09	13,73
58	1,90	8,54	13,57	8,62	13,28	9,96	10,81	13,46
76	1,91	7,46	9,67	6,74	14,63	9,51	17,38	10,32
86	1,81	8,36	17,40	7,19	15,02	11,07	29,63	12,39
90	1,59	10,04	34,34	13,85	12,93	9,60	39,35	11,11
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	3,10	247,07	212,22	164,71	18,38	12,84	48,24	19,49
98,557	11,42	98,62	223,19	126,32	13,50	9,90	19,81	17,27
99,492	5,19	63,12	452,50	175,00	15,52	12,40	17,83	17,56
99,782	5,87	161,89	412,84	666,67	14,04	10,25	17,99	19,03
99,927	4,19	200,00	1150,00	575,00	9,13	7,72	38,54	15,61
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	2,10	-	-	-	15,26	13,14	44,99	15,28
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	5,16	-	-	-	11,52	9,91	32,15	12,13

Tableau 10. Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de tornillo.

ψ	H	Erreur relative de la moyenne (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	58,14	1,29	1,96	1,32	2,27	1,62	3,12	2,41
33	0,35	1,50	1,53	1,61	3,32	2,30	5,83	3,07
58	0,42	1,91	3,03	1,93	2,97	2,23	2,42	3,01
76	0,43	1,67	2,16	1,51	3,27	2,13	3,89	2,31
86	0,40	1,87	3,89	1,61	3,36	2,48	6,63	2,77
90	0,36	2,25	7,68	3,10	2,89	2,15	8,80	2,48
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	0,69	55,25	47,45	36,83	4,11	2,87	10,79	4,36
98,557	2,55	22,05	49,91	28,25	3,02	2,21	4,43	3,86
99,492	1,16	14,11	101,18	39,13	3,47	2,77	3,99	3,93
99,782	1,31	36,20	92,31	149,07	3,14	2,29	4,02	4,26
99,927	0,94	44,72	257,15	128,57	2,04	1,73	8,62	3,49
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	0,47	-	-	-	3,41	2,94	10,06	3,42
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	1,15	-	-	-	2,58	2,22	7,19	2,71

Tableau 11. Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite proportionnelle (σ^o_T) en compression tangentielle du bois de pumaquiro en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.

Degré hygrométrique ψ (%)	Humidité d'équilibre H (%)	Coefficients de retrait			Coefficient de déformation s_{11} sur :		Contrainte à la limite proportionnelle σ^o_T sur :	
		tangentiel β_{TH}	radial β_{RH}	volumétrique β_{VH}	40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
			(%)		$(10^{-3}MPa^{-1})$		(MPa)	
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	0,20	7,44	4,34	11,46	0,96	1,33	4,30	8,85
33	6,51	5,69	3,27	8,77	0,89	1,34	7,93	7,45
58	12,37	3,78	1,86	5,58	0,99	1,37	5,90	5,39
76	16,55	2,14	1,12	3,23	1,20	1,42	2,50	4,71
86	19,20	1,22	0,70	1,92	1,24	1,57	2,56	4,11
90	21,80	0,65	0,37	1,03	1,30	1,60	2,82	4,22
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	33,07	0,10	0,27	0,37	1,35	1,86	4,31	4,12
98,557	36,35	0,06	0,25	0,31	1,36	1,80	4,13	3,76
99,492	44,80	0,01	0,10	0,11	1,42	1,87	4,41	3,81
99,782	49,72	-0,01	-0,02	-0,03	1,40	1,89	4,48	4,09
99,927	52,87	0,01	0,01	0,01	1,44	1,84	2,42	3,72
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	27,52	0	0	0	1,50	1,85	3,04	3,73
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	101,15	0	0	0	1,46	1,82	2,70	3,75

Tableau 12. Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de pumaquiro.

ψ	H	Coefficient de variation (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	30,00	3,06	6,74	3,14	10,85	8,28	17,28	10,71
33	0,92	3,84	8,08	3,88	12,09	7,10	11,23	13,78
58	0,49	4,83	12,57	5,02	6,09	8,72	7,40	8,64
76	0,54	6,45	14,45	6,50	13,73	9,19	33,62	9,52
86	0,63	8,79	19,91	8,33	11,29	7,64	47,66	16,30
90	1,42	17,11	54,92	25,24	10,00	4,38	41,49	15,40
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	9,31	46,72	62,85	48,91	10,12	8,25	7,19	10,04
98,557	9,02	57,32	70,32	58,06	10,14	8,61	8,36	11,31
99,492	6,38	1512,00	327,72	309,09	10,84	7,34	9,26	15,58
99,782	4,20	265,17	803,16	-566,67	11,92	9,57	7,95	7,57
99,927	5,11	-2019,64	-3684,20	3100,00	13,89	5,98	54,55	24,73
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	7,41	-	-	-	9,19	7,47	32,08	16,68
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	4,26	-	-	-	8,91	8,62	34,98	17,95

Tableau 13. Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de pumaquiro.

ψ	H	Erreur relative de la moyenne (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	6,71	0,68	1,51	0,70	2,43	1,85	3,86	2,40
33	0,21	0,86	1,81	0,87	2,70	1,59	2,51	3,08
58	0,11	1,08	2,81	1,12	1,36	1,95	1,66	1,93
76	0,12	1,44	3,23	1,45	3,07	2,05	7,52	2,13
86	0,14	1,97	4,45	1,86	2,52	1,71	10,66	3,65
90	0,32	3,83	12,28	5,64	2,24	0,98	9,28	3,44
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	2,08	10,45	14,05	10,94	2,26	1,85	1,61	2,24
98,557	2,02	12,82	15,72	12,98	2,27	1,92	1,87	2,53
99,492	1,43	338,09	73,28	69,11	2,42	1,64	2,07	3,48
99,782	0,94	59,29	179,59	-126,71	2,66	2,14	1,78	1,69
99,927	1,14	-451,60	-823,81	693,18	3,11	1,34	12,20	5,53
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	1,66	-	-	-	2,06	1,67	7,17	3,73
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	0,95	-	-	-	1,99	1,93	7,82	4,01

Tableau 14. Teneur en humidité d'équilibre (H), coefficients de retrait (β_{UH}), ainsi que le coefficient de déformation (s_{11}) et la contrainte à la limite proportionnelle (σ^o_T) en compression tangentielle du bois de huayruro en fonction des conditions de sorption d'humidité à 25°C.

Degré hygrométrique ψ (%)	Humidité d'équilibre H (%)	Coefficients de retrait			Coefficient de déformation s_{11} sur :		Contrainte à la limite proportionnelle σ^o_T sur :	
		tangentiel β_{TH}	radial β_{RH} (%)	volumétrique β_{VH}	40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	1,11	7,23	4,43	11,34	0,64	0,89	4,88	12,69
33	6,31	5,49	3,42	8,71	0,73	0,92	4,74	10,82
58	12,09	3,44	1,97	5,34	0,69	0,90	9,04	8,42
76	16,02	1,91	1,22	3,11	0,79	0,94	3,53	6,91
86	18,37	0,98	0,74	1,72	0,87	1,02	3,74	6,40
90	19,97	0,52	0,40	0,92	0,93	1,03	3,87	6,29
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	25,01	0,14	0,29	0,44	0,99	1,10	2,79	5,77
98,557	48,55	0,06	0,23	0,29	0,95	1,12	2,72	5,38
99,492	77,29	0,03	0,15	0,19	0,88	1,08	1,82	4,31
99,782	79,69	0,02	0,15	0,17	0,86	1,11	1,58	5,02
99,927	81,65	0	0,11	0,11	0,94	1,15	2,05	5,45
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	27,19	0	0	0	1,00	1,13	3,34	5,65
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	89,00	0	0	0	0,99	1,16	2,53	5,41

Tableau 15. Coefficient de variation des mesures des propriétés étudiées du bois de huayruro.

ψ	H	Coefficient de variation (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	3,60	6,75	9,79	7,06	11,07	7,87	21,29	10,77
33	1,27	8,65	7,58	7,69	6,37	6,66	18,65	11,38
58	1,41	11,56	14,76	11,24	9,80	7,64	14,00	10,42
76	2,12	12,21	22,49	13,08	7,28	6,27	19,24	9,09
86	2,61	11,84	33,98	15,12	7,22	6,14	18,22	12,40
90	3,10	8,18	59,94	25,00	7,82	7,93	26,77	11,19
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	8,36	42,86	72,41	47,73	11,11	7,27	59,14	12,13
98,557	7,85	50,00	147,83	113,79	12,63	7,14	37,87	11,52
99,492	5,25	100,00	113,33	89,47	6,82	6,48	14,29	23,20
99,782	5,12	200,00	120,00	105,88	6,98	7,21	13,29	13,75
99,927	4,73	695,83	241,17	245,45	7,45	7,83	28,29	9,91
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	14,97	-	-	-	8,16	6,37	21,73	10,75
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	5,99	-	-	-	11,44	7,50	26,44	9,43

Tableau 16. Erreur relative de la moyenne des paramètres étudiés du bois de huayruro.

ψ	H	Erreur relative de la moyenne (%)						
		β_{TH}	β_{RH}	β_{VH}	s_{11}		σ°_T	
					40 mm	~ 60 mm	40 mm	~ 60 mm
<i>Désorption sur solutions salines saturées</i>								
0	0,81	1,51	2,19	1,58	2,47	1,76	4,76	2,41
33	0,28	1,93	1,70	1,72	1,42	1,49	4,17	2,55
58	0,31	2,58	3,30	2,51	2,19	1,71	3,13	2,33
76	0,47	2,73	5,03	2,93	1,63	1,40	4,30	2,03
86	0,58	2,65	7,60	3,38	1,61	1,37	4,07	2,77
90	0,69	1,83	13,40	5,59	1,75	1,77	5,99	2,50
<i>Désorption sur membrane poreuse</i>								
96,431	1,87	9,58	16,19	10,67	2,48	1,63	13,22	2,71
98,557	1,75	11,18	33,05	25,44	2,82	1,60	8,47	2,58
99,492	1,17	22,36	25,34	20,01	1,52	1,45	3,19	5,19
99,782	1,14	44,72	26,83	23,68	1,56	1,61	2,97	3,07
99,927	1,06	155,59	53,93	54,89	1,67	1,75	6,33	2,22
<i>Adsorption au-dessus de l'eau distillée</i>								
100	3,35	-	-	-	1,82	1,42	4,86	2,40
<i>Saturation intégrale</i>								
H ₂ O	1,34	-	-	-	2,56	1,68	5,91	2,11

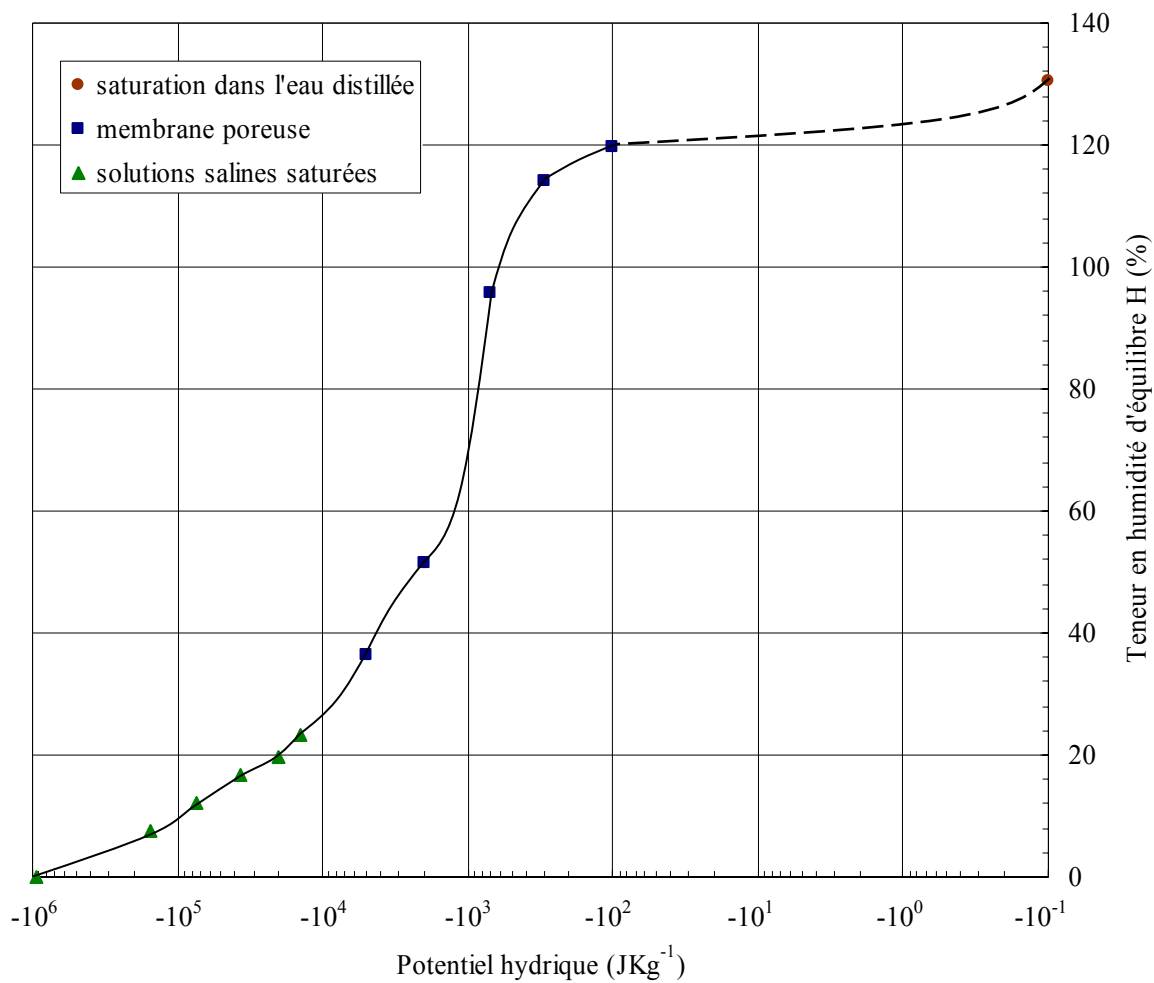


Figure 20. Teneur en humidité d'équilibre du bois de tornillo en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

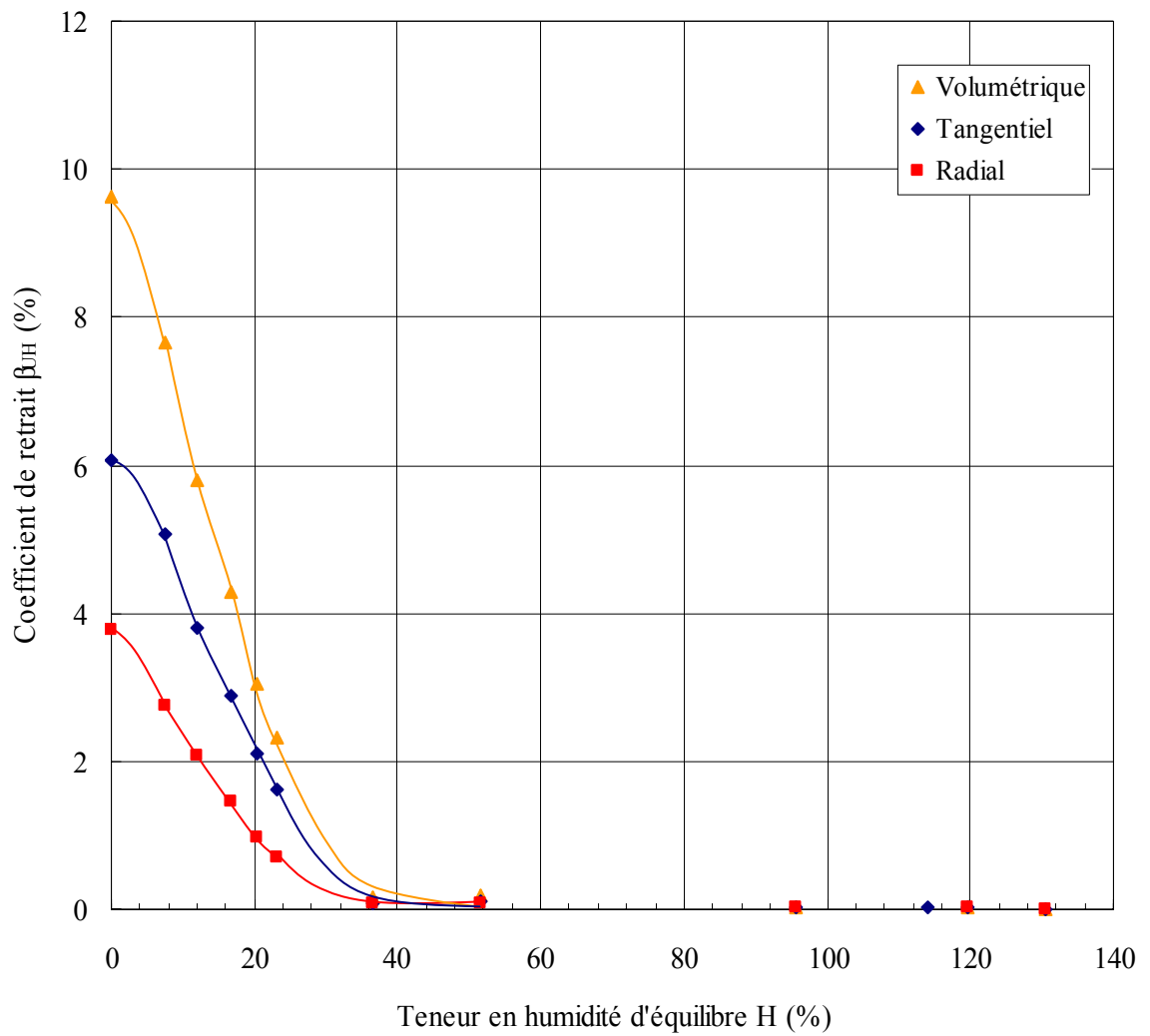


Figure 21. Coefficient de retrait du bois de tornillo en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

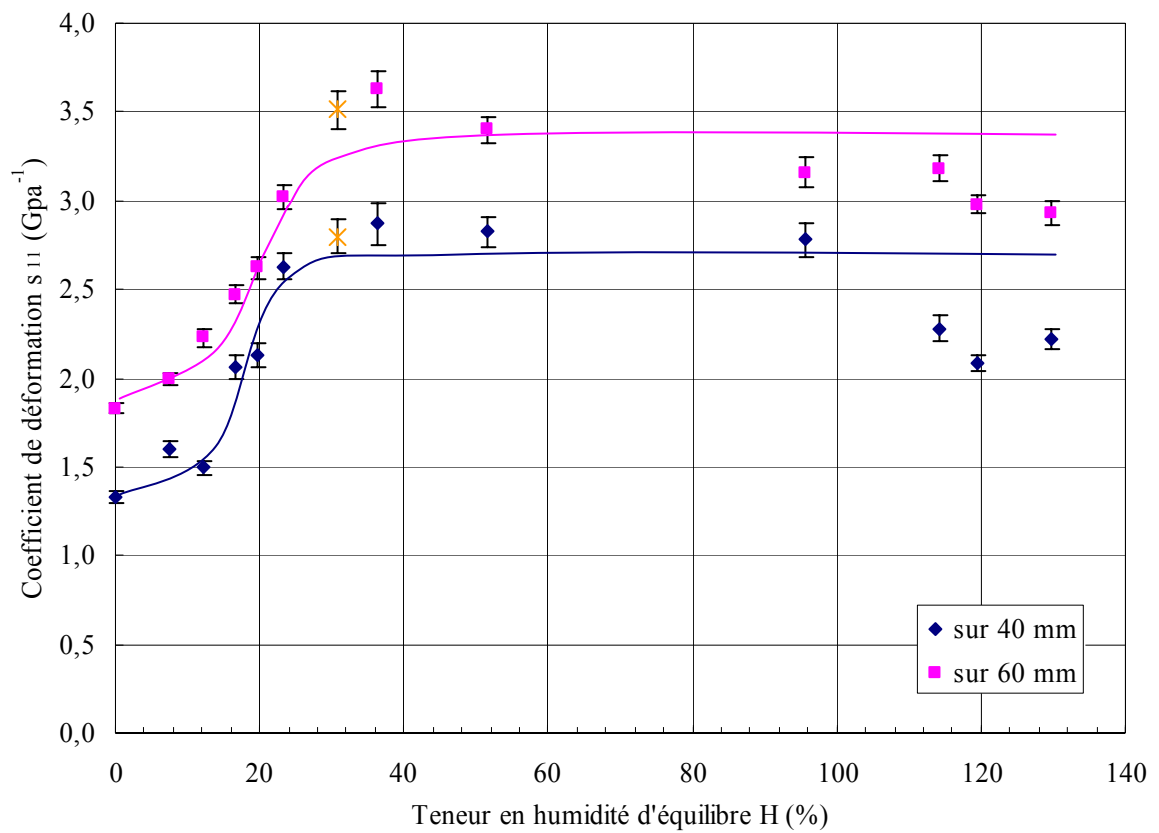


Figure 22. Coefficient de déformation du bois de tornillo en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

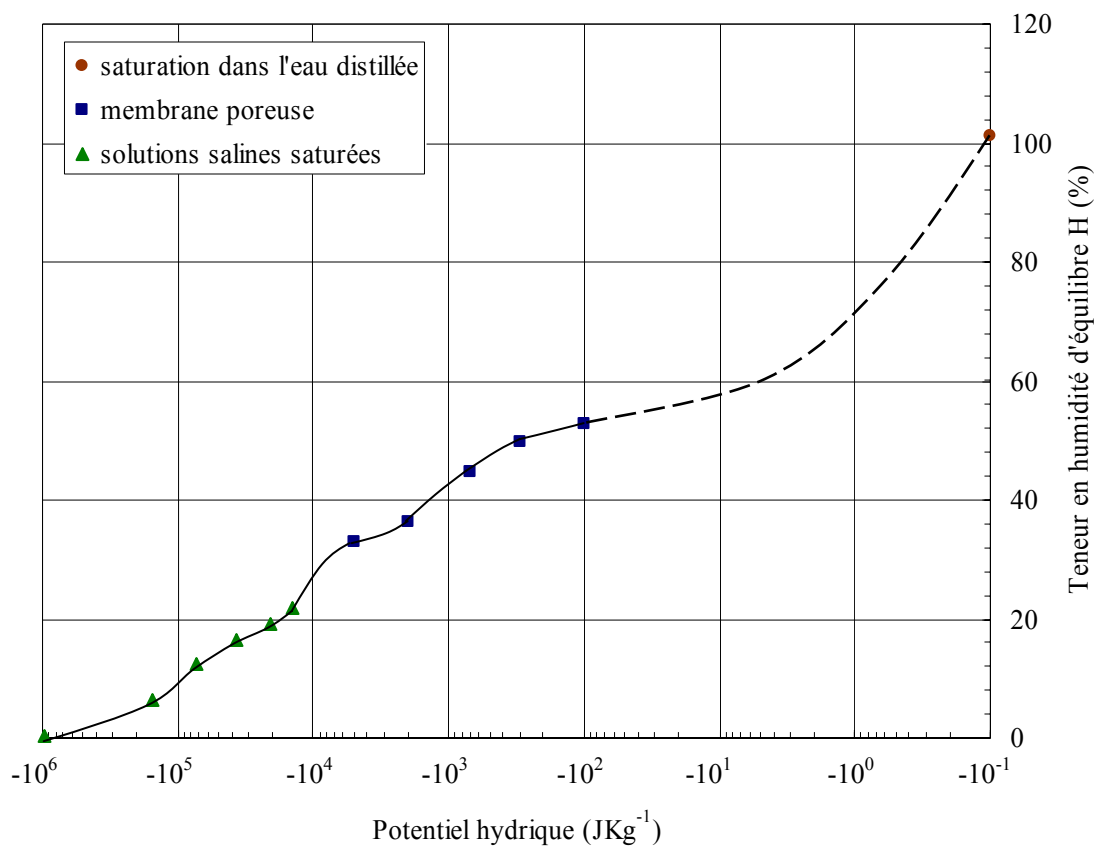


Figure 23. Teneur en humidité d'équilibre du bois de pumaquiro en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

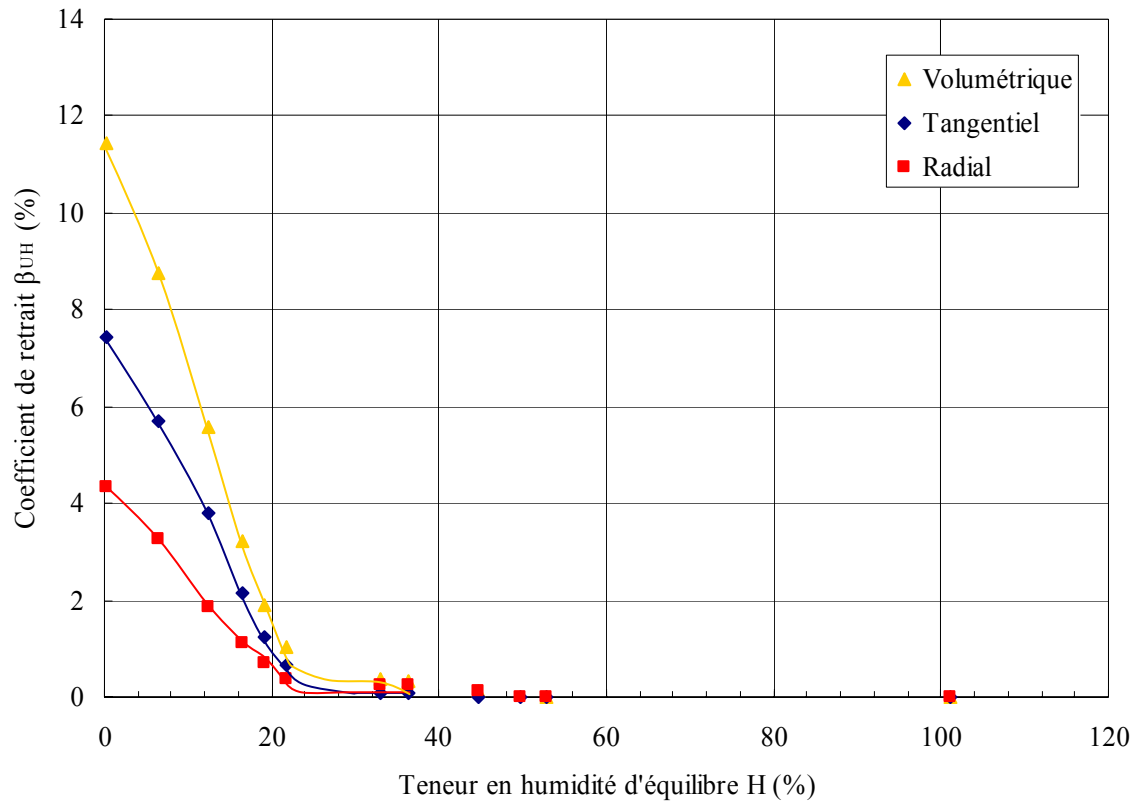


Figure 24. Coefficient de retrait du bois de pumaquiro en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

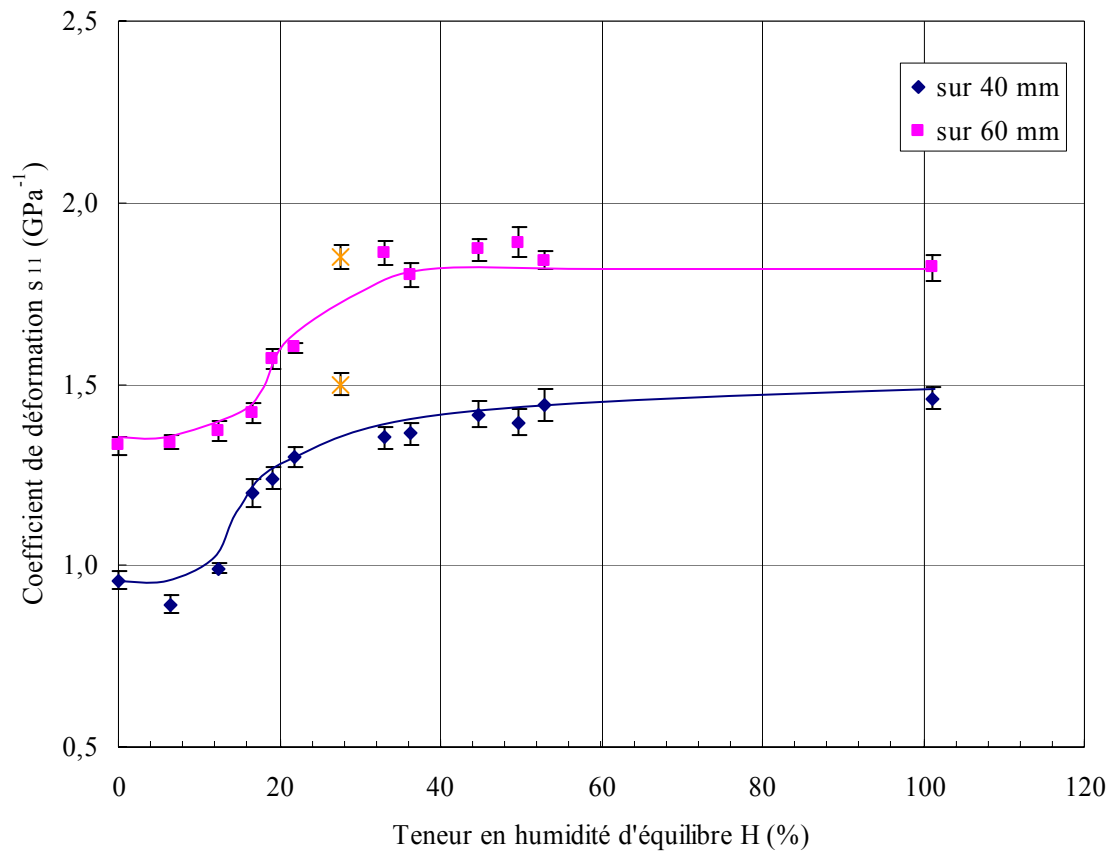


Figure 25. Coefficient de déformation du bois de pumaquiro en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

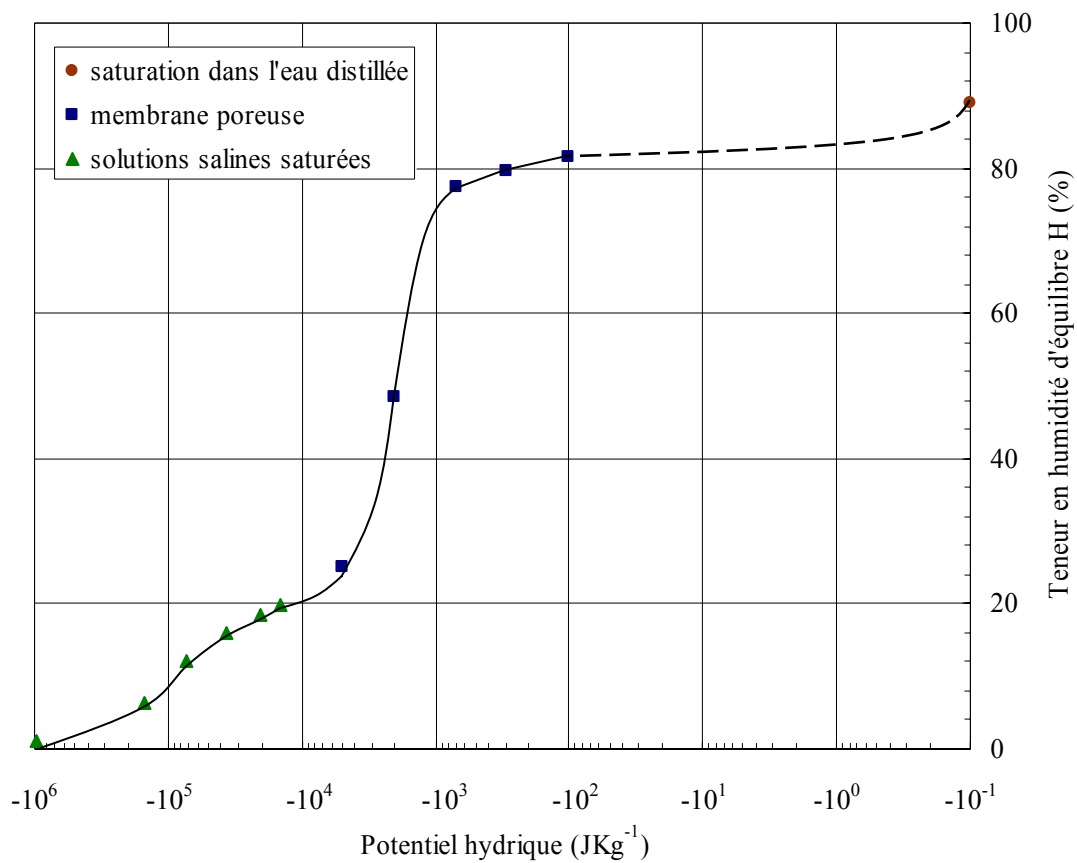


Figure 26. Teneur en humidité d'équilibre du bois de huayruro en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

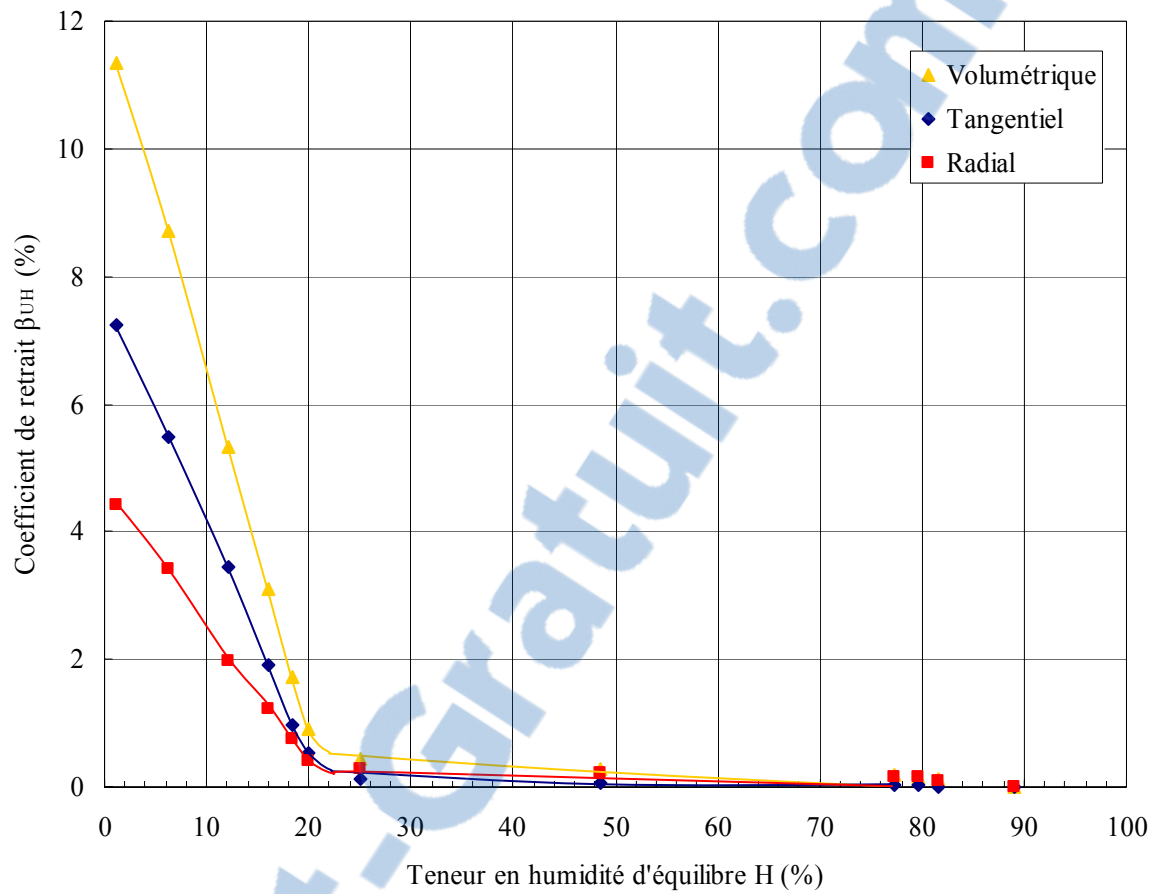


Figure 27. Coefficient de retrait du bois de huayruro en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

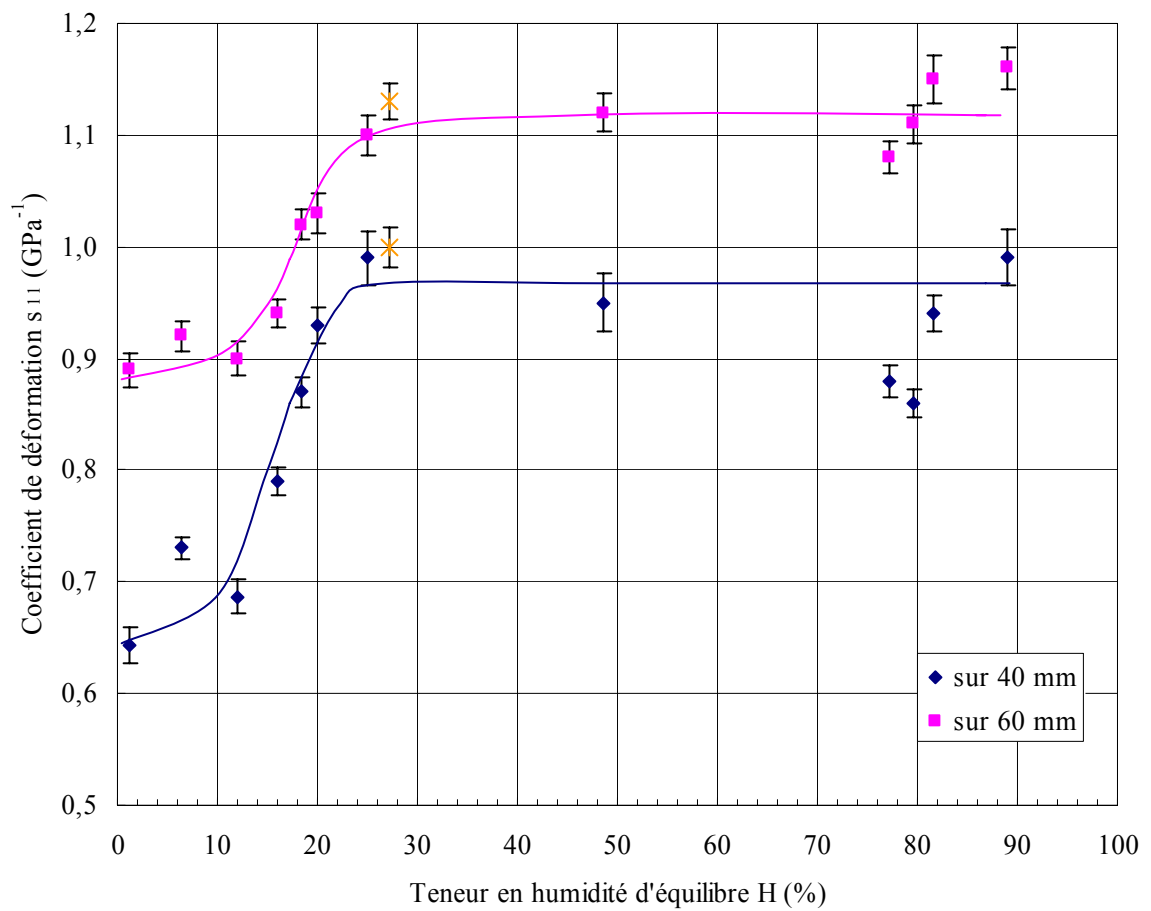


Figure 28. Coefficient de déformation du bois de huayruo en compression tangentielle en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre.

Chapitre 6

Discussion des résultats

6.1 Précision des mesures et variabilité

Les tableaux 9, 10, 12, 13, 15 et 16 indiquent les coefficients de variation et les erreurs des moyennes des principaux paramètres ayant fait l'objet des mesures. Pour fins de comparaison, ces données statistiques sont exprimés en proportion des moyennes respectives qui concernent chacune vingt éprouvettes.

La précision des moyennes a varié selon les particularités des paramètres étudiés. La teneur en humidité d'équilibre a été évaluée avec la meilleure précision parmi les propriétés étudiées. La méthode des solutions salines saturées s'est avérée plus précise que celle de la membrane poreuse sous pression pour la détermination de l'humidité d'équilibre. Cependant, ces deux méthodes couvrent différents intervalles d'humidité relative de l'air ambiant et sont donc complémentaires. L'humidité d'équilibre obtenue à l'aide des solutions salines saturées a été déterminée avec une erreur généralement inférieure à 0,3% pour le pumaquiro, à 0,4% pour le tornillo et à 0,6% pour le huayruro. Une précision similaire pour le bois de pumaquiro a été obtenue par Hernández (2004a) sur des expériences de sorption semblables. Ces niveaux de précision ont été également obtenus par Laforest (1981), Goulet et Hernández (1991), Hernández et Bizoñ (1994), Arévalo (2002) et Hernández (2004a) pour d'autres espèces de bois. La plus grande variation obtenue pour le bois de huayruro pourrait être due à sa plus grande teneur en extraits (Hernández 2004a).

La teneur en humidité obtenue par la méthode de la membrane sous pression fut déterminée avec une erreur généralement inférieure à 2% pour le pumaquiro et le huayruro et à 3% pour le tornillo. Ces précisions furent ainsi plus grandes que celles obtenues antérieurement pour le bois d'érable à sucre (Hernández et Bizoñ 1994). L'intervalle d'humidité relative couvert par cette méthode correspond à la zone où le phénomène de sorption est régi par les forces de capillarité dans le bois. L'équilibre d'humidité dépendra ainsi davantage de la structure poreuse et de la structure anatomique du bois. La variation de ces propriétés serait ainsi plus importante pour les trois espèces tropicales étudiées dans le cadre de ce travail que pour l'érable à sucre (un bois qui est considéré comme étant très homogène du point de vue de la structure anatomique).

La précision obtenue lors de la détermination de la teneur en humidité d'équilibre s'explique par le nombre de répétitions utilisé (20) et par la sélection poussée du matériel d'essai. Toutefois, les erreurs à 0% ψ représentent un cas particulier pour toutes les espèces. Leur faible valeur d'humidité d'équilibre fait augmenter sa variabilité et ses erreurs, principalement pour le tornillo dont l'erreur relative de la moyenne fut de 58%.

Quant au retrait, on remarque que les conditions d'humidité ont affecté les précisions obtenues, notamment au-delà de 96,431% ψ , pour les trois espèces étudiées. Cependant, l'erreur élevée des mesures s'explique par le début du retrait autour de ces niveaux d'humidité. On s'aperçoit qu'en général la précision des mesures augmente à mesure que le degré hygrométrique de l'air ambiant diminue. Par ailleurs, le retrait tangentiel des trois espèces a été évalué avec plus de précision que le retrait radial. Cela s'explique par le fait que le premier ait été favorisé par la plus grande dimension tangentielle des éprouvettes (tableaux 10, 13 et 16). Le retrait volumétrique a été calculé sans considérer le retrait dans la direction longitudinale puisque ces valeurs étaient si faibles qu'elles étaient grandement affectées par l'erreur expérimentale.

Les coefficients de déformation s_{11} à 40 mm ont été établis avec une erreur généralement inférieure à 3,8% pour le tornillo; 2,9% pour le pumaquiro et 2,4% pour le huayruro. La

précision des valeurs de déformation mesurées sur toute la longueur de l'échantillon fut généralement plus grande que pour celle obtenue pour la déformation mesurée dans sa partie médiane. On note que la dispersion des mesures de ces coefficients a resté constante dans l'intervalle du domaine hygroscopique étudié. Hernández et Bizoñ (1994) ont rapporté une précision analogue pour les deux mesures de déformation (40 mm et 60 mm) pour le bois d'érable à sucre.

Enfin, certaines propriétés ont montré une imprécision élevée que le mode de mesure a pu amplifier mais qui correspond à leur variabilité propre. Il en est ainsi du retrait longitudinal (non montré) et de la contrainte à la limite de proportionnalité. Le coefficient de variation du retrait longitudinal s'est avéré très élevé, comme l'ont déjà constaté Goulet et Fortin (1975), Hernández et Bizoñ (1994) et Hernández (2004c). La moyenne de la contrainte à la limite de proportionnalité en compression tangentielle fut moins précise que celle du coefficient de déformation correspondant (tableaux 10, 13 et 16). Sa définition comme limite entre le domaine élastique et celui des ruptures l'expose à divers aléas de la part du matériau et de l'expérimentation, dont sont protégées apparemment les autres mesures mécaniques.

6.2 Hygroscopicité du bois

Les figures 20, 23 et 26 illustrent la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en humidité d'équilibre des bois de tornillo, pumaquiro et huayruro, respectivement. Ces figures montrent les humidités obtenues en désorption, cette dernière réalisée soit par la méthode de solutions salines saturées, soit par celle de la membrane poreuse sous pression. La valeur obtenue suite à une saturation intégrale y est également montrée. Dans tous les cas, l'erreur de la moyenne des humidités d'équilibre ne dépasse pas la grandeur du symbole utilisé. Cette représentation graphique à l'échelle logarithmique élargit de façon importante la région du domaine hygroscopique à hautes valeurs de degré hygrométrique de l'air. On remarque ainsi une excellente continuité entre les valeurs mesurées par les deux

méthodes de sorption ce qui confirme l'utilité de la méthode de la membrane poreuse. Cette correspondance de résultats entre les deux méthodes a été rapportée précédemment par plusieurs chercheurs (Cloutier et Fortin 1991; Hernández et Bizoñ 1994; Defo et al. 1999).

Les figures 20, 23 et 26 laissent entrevoir la présence de l'hystérèse à la saturation à hautes valeurs de degré hygrométrique de l'air ambiant. Cette hystérèse a été décrite par Goulet et Hernández (1991) comme étant la différence entre l'équilibre obtenu suite à une désorption en présence d'eau liquide et celui atteint en désorption à partir de la saturation des membranes. Certains chercheurs ont indiqué que des plus grandes valeurs d'humidité d'équilibre sont obtenues lorsqu'on utilise des échantillons à l'état vert, soit lors de la première désorption (Higgins 1957; Spalt 1988). Skaar (1988) a attribué ce comportement à une perte initiale irréversible de l'hygroscopicité suite à un séchage initial du bois vert ou saturé d'eau. Cependant, plusieurs études ont démontré que cet effet est apparent lors de désorptions subséquentes (Barkas 1949; Goulet 1968; Fortin 1979; Hart 1984; Goulet et Hernández 1991, Cloutier et Fortin 1991; Hernández et Bizoñ 1994). L'hystérèse à saturation n'est donc pas limitée au premier séchage, mais plutôt à une désorption réalisée en présence d'eau libre.

L'importance de cette hystérèse sera fonction de l'humidité initiale du bois. Dans la présente recherche, les essais de désorption ont été réalisés à partir de la saturation intégrale de telle façon que les courbes obtenues représentent les teneurs d'humidité d'équilibre maximales atteintes pour chaque condition d'humidité. Le terme courbe de désorption limite est alors utilisé pour décrire ce phénomène. Une autre courbe de désorption obtenue à partir d'une humidité plus faible devrait être située au-dessous d'une telle courbe de désorption limite (Hernández et Bizoñ 1994). Des résultats expérimentaux confirmant ce comportement ont été rapportés par Defo et al. (1999) pour le bois d'érable à sucre.

Hernández (2004a) a obtenu pour le pumaquiro une valeur d'humidité d'équilibre de 11,18% en désorption à 58% ψ , laquelle diffère de celle obtenue dans le présent travail (12,37% H). Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que la désorption fut réalisée à

partir de la saturation des membranes, d'une part, et à partir de la saturation intégrale, d'autre part. Par ailleurs, la figure 29 montre que les écarts des valeurs d'humidité d'équilibre des trois espèces étudiées sont relativement faibles entre 0 et 90% de degré hygrométrique de l'air ambiant. Cette figure montre également que les différences d'équilibre entre les espèces de bois augmentent au fur et à mesure que le degré hygrométrique augmente.

Les courbes de désorption entre 0 et -5000 J kg^{-1} de potentiel hydrique furent alors différentes pour les trois espèces étudiées. Le bois de pumaquiro a présenté un drainage plus distinct que les deux autres espèces dans cette région d'humidité. Entre 0 et -100 J kg^{-1} de potentiel hydrique, le drainage d'eau fut d'environ 11% (H) pour le tornillo (figure 20), 48% (H) pour le pumaquiro (figure 23) et 7% (H) pour le huayruro (figure 26). À hautes valeurs d'humidités, les valeurs d'équilibre seront davantage fonction du volume, de la distribution et de la dimension des pores dans le bois des différentes espèces (Fortin 1979). La variation de la structure anatomique entre les espèces doit contribuer également à expliquer ces différences.

Fortin (1979) a rapporté une boucle d'hystérèse très large pour l'aubier de la pruche de l'ouest à hautes teneurs en humidité en utilisant la membrane poreuse sous pression pour des essais d'adsorption et de désorption. Il a suggéré que cette hystérèse serait provoquée par le phénomène dit de « la bouteille d'encre ». Selon cet auteur, le système capillaire du bois est composé de cavités cellulaires interconnectées en série par des canaux plus étroits. La variation des dimensions entre les différents types de cavités connectées en série suggère que la désorption est contrôlée par un potentiel hydrique plus faible, lequel est régi par les plus petits pores. D'autre part, les conditions d'adsorption sont contrôlées par un potentiel hydrique plus fort, lequel dépend des plus gros pores. Ainsi, la courbe de désorption dépend du diamètre des canaux qui relient les cavités cellulaires, tandis que la courbe d'adsorption est surtout régie par le diamètre de ces cavités.

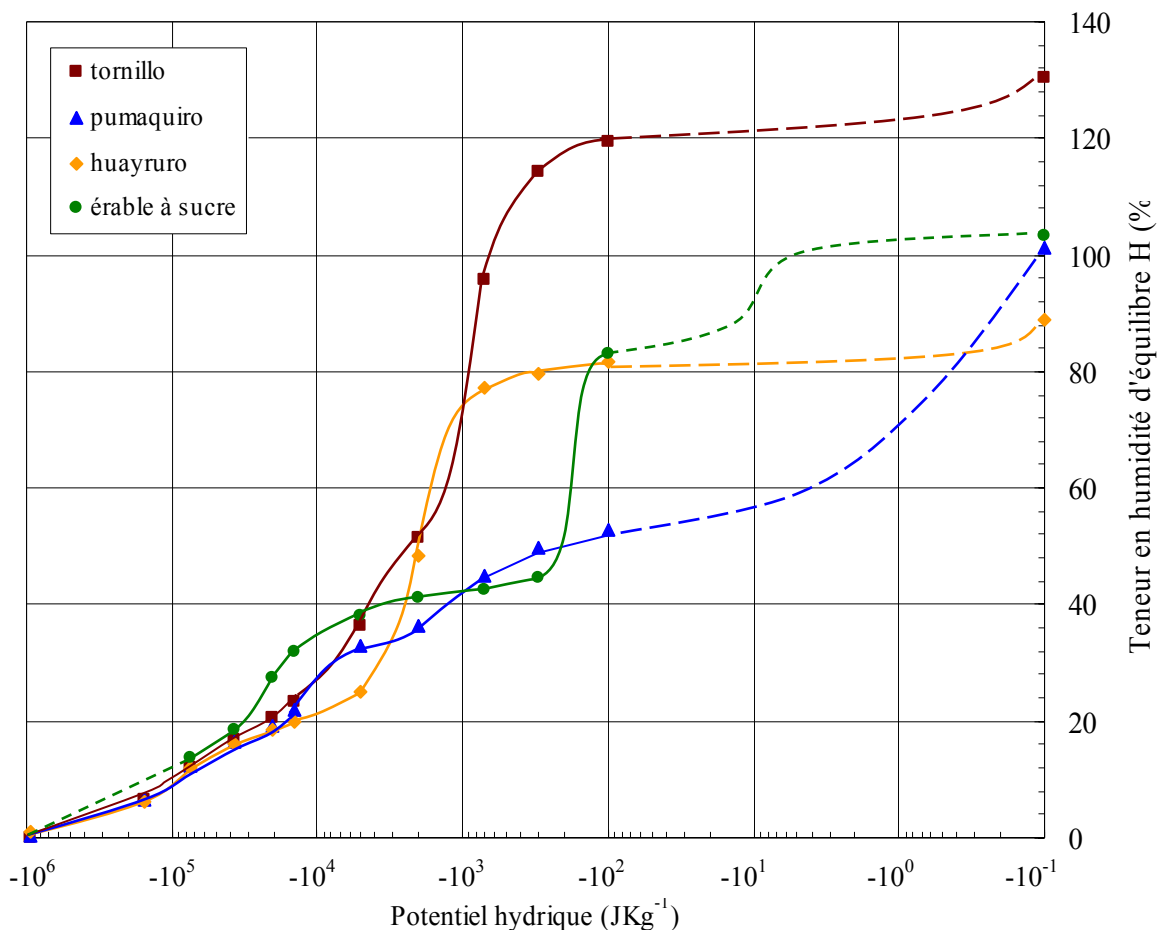


Figure 29. Comparaison entre les teneurs en humidité d'équilibre de quatre espèces en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

À partir de la discussion de Fortin (1979), on peut déduire que la perte initiale d'eau du bois, soit entre 0 et -100 J kg^{-1} de potentiel hydrique, va avoir lieu dans les capillaires les plus larges, principalement ceux des lumens des vaisseaux (Hernández et Bizoñ 1994). Cela est d'autant plus vrai que les expériences de désorption ont été principalement conduites suivant le fil du bois. Le pumaquiro, qui présente un très grand volume de vaisseaux, montre ainsi un changement abrupt de la courbe de l'humidité d'équilibre entre 0 et -100 J kg^{-1} de potentiel hydrique, soit une perte de 48% (H), ce qui n'a pas été le cas pour les deux autres espèces (figure 29). Ainsi, le tornillo dispose de vaisseaux de très grand diamètre (diamètre tangentiel moyen de $308 \mu\text{m}$) bien que peu nombreux (Junac 1981; Acevedo et Kikata 1994). La perte

d'humidité d'environ 11% (H) entre 0 et -100 J kg^{-1} de potentiel hydrique devrait alors correspondre au volume d'eau liquide logée dans ces éléments. Par ailleurs, le bois de huayruo dispose également de vaisseaux de grand diamètre (diamètre tangentiel moyen de $213 \mu\text{m}$) mais aussi peu nombreux (Junac 1981). On peut déduire d'après les résultats de Junac (1981) et Acevedo et Kikata (1994) que la proportion de vaisseaux du bois de huayruo serait moindre que celle du tornillo. La perte d'humidité pour le huayruo entre 0 et -100 J kg^{-1} de potentiel hydrique fut ainsi moindre, soit d'environ 7% (H). Le drainage des éléments de vaisseaux de cette espèce pourrait alors être accompli également à ce niveau de potentiel hydrique. De cette manière, les différences de drainage indiqueraient que le volume de vaisseaux et/ou le diamètre des perforations intervasculaires varient entre les trois espèces étudiées. La présence plus ou moins importante des extrémités des vaisseaux dans les éprouvettes devrait affecter également la valeur d'humidité d'équilibre (Petty 1978). Par ailleurs, le dépôt de substances extractibles dans les parois de tissus réduit le diamètre réel des capillaires, affectant par le fait même le drainage. Il est par exemple connu que le huayruo possède des dépôts de gommés dans les lumens de vaisseaux (Junac 1981).

Par ailleurs, la courbe de désorption limite du pumaquiro montre un taux de drainage assez constant entre -100 et -2000 J kg^{-1} pour plafonner ensuite entre -2000 et -5000 J kg^{-1} de potentiel hydrique (figure 23). Ce plateau pourrait indiquer, qu'entre ces niveaux de potentiel hydrique, les ouvertures qui contrôlent la rétention et drainage de l'eau liquide sont peu abondantes. À ces niveaux de potentiel hydrique, l'eau restante dans le bois pourrait être localisée dans les capillaires ayant un rayon égal ou plus petit qu'environ $0,029 \mu\text{m}$ (tableau 4). Tel qu'il est mentionné plus loin, ce plateau pourrait correspondre à la transition entre le drainage des cavités des fibres et celui des parois cellulaires et des lumens des cellules de parenchyme longitudinal et radial. Ce genre de plateau fut observé également sur le bois d'érable à sucre par Hernández et Bizoñ (1994) (figure 29). Selon Hart (1984) l'eau libre présente au-dessous de -700 J kg^{-1} de potentiel hydrique pourrait être retenue dans les cellules de rayon. Des microphotographies des trois espèces étudiées ont été prises afin de nous aider à clarifier le mécanisme de désorption de l'eau liquide dans le bois (Annexe A). Le diamètre moyen des cavités de punctuations du côté éléments de vaisseau fut d'environ $1,2 \mu\text{m}$ pour le tornillo, $3 \mu\text{m}$ pour le pumaquiro et $6 \mu\text{m}$ pour le huayruo. Les figures A1 à A3 montrent

également des ponctuations dans les parois de cellules de parenchyme longitudinal et radial de même que dans celles des fibres. Toutefois, l'analyse par microscopie électronique au balayage n'a pas permis d'observer les ouvertures dans les membranes des ponctuations, lesquelles doivent régir la rétention et le drainage du bois par le phénomène dit de la bouteille d'encre (Fortin 1981).

Les courbes de désorption limite des bois de tornillo et huayruro, lesquels présentent une proportion importante de parenchyme longitudinal, changent de façon abrupte à un potentiel hydrique d'environ -300 J kg^{-1} pour le tornillo et de -700 J kg^{-1} pour le huayruro. La perte d'humidité de ces bois présente ensuite une allure assez constante jusqu'à -5000 J kg^{-1} de potentiel hydrique, sans présence d'un plateau comme fut le cas pour le bois de pumaquiro. L'absence d'un tel plateau a été également aperçue par Cloutier et Fortin (1991) pour le bois de tremble. Il paraît donc difficile, dans le cas de ces deux espèces, d'identifier l'emplacement de l'eau liquide dans les différents tissus ligneux en fonction du potentiel hydrique en cause. Il est même probable qu'il se produise un drainage simultané de l'eau liquide dans les divers éléments du bois. Il y aurait donc un chevauchement entre les dimensions des canaux interconnectant les cavités cellulaires des différents tissus composant le bois. La figure 29 montre également que, contrairement à l'érable à sucre et au pumaquiro, une bonne partie du drainage des bois de tornillo et huayruro a lieu à des valeurs de potentiel hydrique beaucoup plus faibles (courbes décalées vers la gauche). Les ouvertures des tissus composant le bois de ces espèces régissant la désorption à ces niveaux de potentiel hydrique seraient donc plus petites que celles du bois d'érable à sucre et de pumaquiro.

Par ailleurs, la comparaison des courbes de désorption des trois espèces laisse entrevoir quelle serait l'aptitude de ces bois à atteindre la saturation intégrale. Le tornillo et le huayruro furent moins perméables et donc plus difficiles à saturer d'eau (cf. paragraphe 3.1). Ces espèces ont ainsi présenté une perte initiale d'humidité très faible (figure 29). En revanche, le pumaquiro s'est comporté comme étant un bois très perméable et fut donc saturé facilement. Il a ainsi montré une perte d'eau importante déjà au tout début de la désorption (figure 29).

6.3 Saturation des membranes

La détermination du PSF à l'aide d'une expérience d'adsorption au-dessus de l'eau distillée est considérée une méthode incorrecte (Stamm 1971) qui ne convient pas à tous les bois (Hernández 2004b). Le contrôle de la masse au cours de la sorption au-dessus de l'eau distillée a permis de suivre le comportement particulier des trois espèces sous étude. Ces bois ne semblaient pas tendre vers un équilibre même après 212 jours de conditionnement pour le tornillo et 194 jours pour le pumaquiro et huayruro (figure 30). Un tel comportement a déjà été rencontré par Hernández (2004b) pour quatre bois tropicaux, y compris le pumaquiro. Selon cet auteur, l'humidité adsorbée après le temps requis pour atteindre la saturation réelle des membranes, serait déposée sous forme liquide dans les cavités cellulaires du bois. La connaissance de la distribution des pores dans le bois pourrait donc aider à expliquer ce phénomène.

L'humidité à la saturation de membranes de chaque espèce a été donc estimée à partir de la méthode du point d'intersection du retrait volumétrique en fonction de l'humidité d'équilibre (Kelsey 1956). Cette valeur a été ainsi estimée à 28% pour le tornillo, 22,5% pour le pumaquiro et 21,5% pour le huayruro. En tenant compte des résultats de Hernández (2004b), le H_{sm} plus élevé du tornillo pourrait être dû à sa plus faible masse volumique, couplé à son faible taux d'extraits. D'autre part, les valeurs faibles de H_{sm} pour le pumaquiro et huayruro seraient dues à leur plus grande masse volumique et à une teneur en extraits plus élevée.

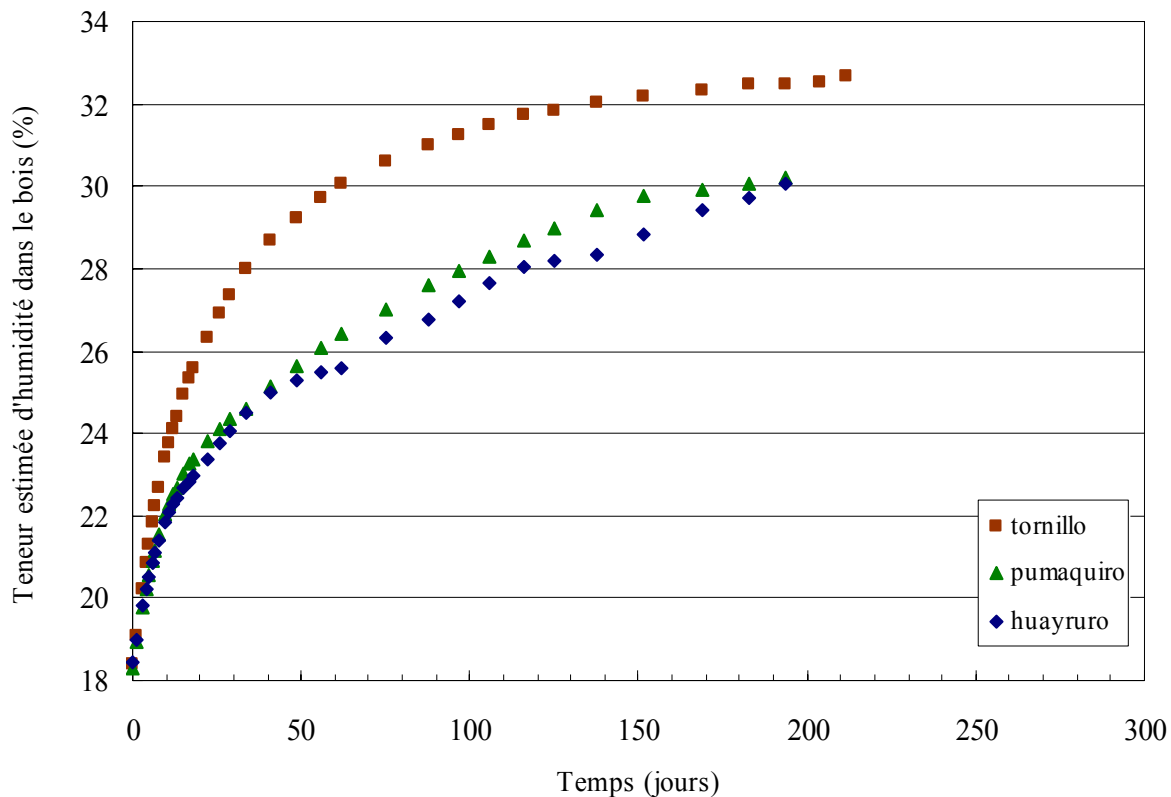


Figure 30. Progrès de l'adsorption au-dessus de l'eau distillée pour les trois espèces à 25°C.

6.4 Relation entre l'humidité d'équilibre du bois et le retrait

La relation entre l'humidité d'équilibre et le retrait tangentiel, radial et volumétrique du bois pour chaque espèce séparément fait l'objet des figures 21, 24 et 27. Les courbes présentées ont été tracées à main levée et on note que les erreurs des moyennes des retraits n'ont pas dépassé la grandeur du symbole utilisé.

Le tableau 8 et la figure 21 montrent que le retrait du bois de tornillo a débuté déjà à une humidité d'équilibre au-dessus du PSF (estimé à 28% H). Pour les deux directions principales, et par conséquent aussi pour le volume, le retrait est déjà apparent à environ 51,5% d'humidité d'équilibre, ce qui correspond à -2000 J kg^{-1} de potentiel hydrique

(98,557% de degré hygrométrique de l'air). Le retrait volumétrique moyen a été à ce moment de l'ordre de 0,19%, avec un écart-type de la moyenne de 0,05%. Cela confirme que, même à l'équilibre, le début et une partie du retrait se fait en présence d'eau libre et de celle liée.

Le pumaquiro et huayruo ont montré un comportement similaire (tableaux 11 et 14). La figure 24 montre que le retrait de pumaquiro est déjà apparent à 36,3% d'humidité d'équilibre, ce qui correspond à -2000 J kg^{-1} de potentiel hydrique (98,557% de degré hygrométrique de l'air). Par ailleurs, le retrait de huayruo semble déjà être initié à 77,3% d'humidité d'équilibre, ce qui correspond à -700 J kg^{-1} de potentiel hydrique (99,492% de degré hygrométrique de l'air) (figure 27). La quantité totale d'eau liée ou humidité à la saturation des membranes du pumaquiro a été évaluée à 22,5% H et du huayruo à 21,5% H, tel que mentionné plus haut. Il est ainsi évident que même à l'équilibre, le début et une partie du retrait se fait en présence d'eau libre et de celle liée. Hernández et Bizoñ (1994) ont rapporté un retrait déjà avant le H_{sm} chez l'érable à sucre. Ils ont établi que même à l'équilibre, une perte d'eau liée dans les parois cellulaires provoque le début du retrait du bois avant même que toute l'eau libre ait été évaporée. Tout récemment, des résultats similaires ont été reproduits pour le bois de bouleau jaune par Almeida et Hernández (2005).

Il est ainsi établi par cette recherche, que le tornillo retient encore 23,5% d'humidité sous forme liquide lorsque le retrait est tout près de commencer. Cette valeur est estimée à 13,8% et 55,8% de teneur en humidité pour le pumaquiro et huayruo, respectivement. Hernández et Bizoñ (1994) et Almeida et Hernández (2005) ont estimé que l'eau retenue était d'environ 11,4% (H) pour l'érable à sucre et de 12% (H) pour el bouleau jaune. Ils ont de plus conclu que cette eau pourrait être retenue dans les cellules du bois qui sont interconnectées par les plus petits capillaires ou canaux, soit entre les cellules de parenchyme radial. La perte de toute l'eau liquide pour l'érable à sucre aurait lieu lorsque le degré hygrométrique de l'air descend jusqu'à environ 63%, ce qui correspond à une humidité d'équilibre d'autour de 14% (Hernández 1983). Menon et al. (1987) ont estimé que cette perte serait accomplie à 9% (H) pour le bois de thuya géant (*Thuja plicata* Donn.).

Néanmoins, aucune information n'est encore disponible sur les bois tropicaux étudiés dans le cadre de ce travail. Il serait donc intéressant de connaître la distribution de cette eau libre dans le bois. Des techniques de microscopie par résonance magnétique nucléaire sont utilisées à ce propos (Menon et al. 1987; Araujo et al. 1992). Des mesures de porosimétrie ainsi que d'anatomie quantitative de ces bois devraient aider également à mieux comprendre les phénomènes observés. Ce genre d'analyse sera présenté prochainement dans le cadre du travail de doctorat d'Almeida (2005).

6.5 Relation entre l'humidité d'équilibre et la compression tangentielle

Les figures 22, 25 et 28 montrent la relation entre l'humidité d'équilibre et le coefficient de déformation s_{11} des trois espèces de bois. Ces figures présentent le coefficient de déformation mesuré dans la partie médiane de l'échantillon (40 mm) et celui estimé sur toute sa longueur. Le point obtenu en adsorption au-dessus de l'eau distillée y est également montré (symbole en forme de X). Les erreurs des moyennes du coefficient de déformation ne sont montrées que lorsqu'elles excèdent la grandeur du symbole utilisé. Les résultats des essais mécaniques obtenus toute de suite après la désorption réalisée par la méthode de la membrane poreuse se sont avérés inconsistants pour le tornillo et le huayruro. Malheureusement, l'extensomètre pour la mesure de la déformation avait subi un bris au début des expériences. Certaines conditions d'humidité évaluées initialement ont alors été affectées par ce bris. D'autres conditions ont été mesurées une fois que l'extensomètre fut remis à neuf. Les courbes à main levée ont alors été tracées en tenant compte de ces contraintes. Ces dernières, ainsi que la variabilité propre des coefficients de déformation, n'ont pas permis d'obtenir des relations claires concernant l'effet de la teneur en humidité d'équilibre sur la déformabilité du bois. Il en a résulté que l'on n'a pas pu déterminer, comme fut le cas pour le retrait, la teneur en humidité au-dessous de la quelle les caractéristiques de déformabilité sont affectées par les changements hygroscopiques.

Par ailleurs, les deux courbes de chacune de ces figures présentent une distribution non uniforme de la déformation à l'intérieur du barreau d'essai. Le coefficient de déformation s_{11} mesuré sur toute la longueur a été plus élevé que celui mesuré sur la partie centrale. Ce comportement fut déjà noté par Hernández (1993b) et Hernández et Bizoñ (1994). Cet écart entre les déformations peut être expliqué partiellement par la concentration des contraintes induites par les restrictions latérales à proximité des bouts de l'échantillon, lesquels sont en contact avec la machine à essai (Bodig et Jayne 1982). Les méthodes d'essais normalisés préconisent l'utilisation de la partie médiane de l'échantillon pour la mesure de la déformation. Finalement, le pumaquiro a présenté des résultats similaires à ceux de Hernández (2004d). Le coefficient de déformation s_{11} en désorption à 58% ψ fut de $0,97.10^{-3}\text{MPa}^{-1}$, tout près de $0,99.10^{-3}\text{MPa}^{-1}$ obtenu dans le cadre de ce travail.

Conclusion

L'objectif des expériences de ce mémoire était d'étudier l'effet de l'humidité d'équilibre, principalement à proximité de la saturation des membranes, sur les propriétés physico-mécaniques du bois de trois espèces tropicales, soit: le tornillo (*Cedrelinga cateniformis* Ducke), le pumaquiro (*Aspidosperma macrocarpon* Mart.) et le huayruro (*Ormosia coccinea* Jackson). La recherche a consisté à déterminer le coefficient de déformation (s_{11}) mesuré en compression tangentielle. Les mesures de la masse et des dimensions des barreaux d'essai ont permis de déterminer la teneur en humidité d'équilibre et leurs coefficients de retrait au terme de la sorption.

L'équilibre d'humidité des éprouvettes fut obtenu à l'aide de deux méthodes de sorption, soit celle des solutions salines saturées, soit celle de la membrane poreuse sous pression. Ces techniques expérimentales ont servi à déterminer l'humidité à la saturation des membranes, en adsorption au-dessus de l'eau distillée, ainsi que des valeurs à la désorption au-dessous et au-dessus de celle-ci. La désorption a été réalisée à partir de la saturation intégrale du bois. Une excellente continuité fut observée entre les valeurs mesurées par les deux méthodes qui couvraient différents intervalles d'humidité relative de l'air ambiant. Cela a confirmé l'utilité de la méthode de la membrane poreuse sous pression dans l'intervalle de degré hygrométrique employé.

Les résultats de ce mémoire ont servi à établir le rôle joué par l'hystérèse à saturation sur les différentes propriétés du bois. Les courbes de désorption entre 0 et -5000 J kg^{-1} de potentiel hydrique ont été différentes pour chaque espèce étudiée. À hautes valeurs d'humidité, les valeurs d'équilibre sont davantage fonction de la structure poreuse et de la structure anatomique du bois. La variation de celle-ci entre les trois espèces étudiées, observée dans les microphotographies prises à partir d'un microscope électronique à

balayage, ont aussi contribué à expliquer ce phénomène et à clarifier le mécanisme de désorption de l'eau liquide dans le bois.

La détermination de la saturation des membranes par adsorption au-dessus de l'eau distillée s'est avérée une méthode inefficace, dans le sens qu'elle ne convient pas à tous les bois. Le bois des espèces étudiées dans le cadre de ce mémoire ne semblaient pas tendre vers un équilibre même après plusieurs jours de conditionnement. L'humidité à la saturation de membranes de chaque espèce fut donc estimée à partir de la méthode du point d'intersection du retrait volumétrique en fonction de l'humidité d'équilibre. Cette valeur a été ainsi estimée à 28% (H) pour le tornillo, 22,5% (H) pour le pumaquiro et 21,5% (H) pour le huayruro.

Les résultats de retrait ont montré qu'à l'équilibre, les retraits radial et tangentiel, et en conséquence le retrait volumétrique débutent significativement au-dessus de la saturation des membranes cellulaires. Ainsi, à la désorption, la perte de l'eau hygroscopique semble déjà apparente à environ 51,5% (H) pour le tornillo; 36,3% (H) pour le pumaquiro et 77,3% (H) pour le huayruro; soit encore en présence d'eau libre. Ces résultats confirment l'hypothèse dans les travaux antérieurs et ceux tous récents en ce qui a trait au rôle joué par l'hystérèse à saturation sur les propriétés physico-mécaniques du bois dans la zone des humidités élevées. Les résultats montrent donc que le tornillo retient encore 23,5% d'humidité sous forme liquide lorsque le retrait est tout près de commencer. Cette valeur est estimée à 13,8% et 55,8% de teneur en humidité pour le pumaquiro et huayruro, respectivement. Il est ainsi confirmé qu'il existe en désorption de l'*eau liquide en surplus*, qui n'intervient pas dans les changements des propriétés du bois. La perte de toute l'eau libre pour l'érable à sucre serait accomplie à environ 14% (H). Néanmoins, aucune information n'est encore disponible pour d'autres espèces. Il serait donc intéressant de connaître la distribution de cette eau libre dans le bois des espèces étudiées. Des techniques de microscopie par résonance magnétique nucléaire et des mesures de porosimétrie ainsi que d'anatomie quantitative de ces bois devraient aider à mieux comprendre les phénomènes observés.

D'autre part, les résultats des essais mécaniques de ce travail se sont avérés inconsistants. Certaines conditions d'humidité évaluées initialement ont été affectées par le bris de l'extensomètre utilisé pour la mesure des déformations. Contrairement au cas du retrait, on n'a pas pu déterminer la teneur en humidité au-dessous de laquelle les caractéristiques de déformabilité sont affectées par les changements hygroscopiques.

Finalement, il est confirmé que l'on doit désormais tenir compte des phénomènes liés à l'hystérèse à saturation dans les essais mécaniques et physiques normalisés lorsqu'il s'agit du bois vert ou humide de façon à éviter une surestimation ou sous-estimation des propriétés concernées.

Bibliographie

- Almeida, G. 2005. Influence de la structure du bois sur ses propriétés physico mécaniques à des teneurs en humidité élevées. Thèse de doctorat en rédaction, Université Laval.
- Almeida, G. et R. Hernández. 2005. Changes in physical properties of yellow birch below and above the fiber saturation point. Wood and Fiber Science (soumis).
- Araujo, C.D., A.L. Mackay, J.R.T. Hailey et K.P. Whittall. 1992. Proton magnetic resonance techniques for characterization of water in wood: application to white spruce. Wood and Science Technology, 26:101-113.
- Ahmet, K., G. Dai, R.Tomlin, P. Kaczmar et S. Riddiough. 2000. The equilibrium moisture content of common U.K. species at three conditions of temperature and relative humidity. Forest Products Journal, 50(6):64-68.
- Aróstegui, A. et A. Sato. 1970. Estudio de las propiedades físico-mecánicas de la madera de 16 especies forestales del Perú. Revista Forestal del Perú, 4(1-2): 13-24.
- Aróstegui, A. 1974. Estudio tecnológico de maderas del Perú, Vol. I: Características tecnológicas y usos de la Madera de 145 especies del país. Universidad Nacional Agraria-Ministerio de Agricultura, Lima, Pérou.
- Aróstegui, A. 1975. Estudio tecnológico de maderas del Perú. Vol. III : Características tecnológicas y usos de la madera de 40 especies del Bosque Nacional Alexander von Humboldt. Universidad Nacional Agraria-Ministerio de Agricultura, Lima, Pérou.
- Aróstegui, A. 1978. Estudio integral de la madera para la construcción. Universidad Nacional Agraria-Ministerio de Agricultura, Lima, Pérou.
- Aróstegui, A. 1982. Recopilación y análisis de estudios tecnológicos de maderas peruanas. Proyecto PNUD/FAO/PER/81/002. Documento de trabajo n°2. Lima, Pérou.
- Acevedo, M.M. et Y. Kikata. 1994. Atlas de maderas del Perú - Atlas of Peruvian woods. Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú - Universidad de Nagoya, Japon.
- Barkas, W.W. 1949. The swelling of wood under stress. H. M. Stationery Office, Londres.

- Bizoň, M. 1995. Effet de l'humidité d'équilibre sur les propriétés physico-mécaniques du bois dans la zone de saturation des membranes. Mémoire de M.Sc., Département des sciences du bois, Université Laval.
- Bodig, J. et B.A. Jayne. 1982. Mechanics of wood and wood composites. Van Nostrand Reinhold, New York.
- Choong, E.T. et F.O. Tesoro. 1989. Relationship of capillary pressure and water saturation in wood. *Wood Science and Technology*, 23(2):139-150.
- Choong, E.T. et S.S. Achmadi. 1991. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. *Wood and Fiber Science*, 23(2):185-196.
- Cloutier, A. et Y. Fortin. 1991. Moisture content-water potential relationship of wood from saturated to dry conditions. *Wood Science and Technology*, 25(4):263-280.
- Cloutier A., C. Tremblay et Y. Fortin. 1995. Effect of specimen structural orientation on the moisture content – water potential relationship of wood. *Wood Science and Technology*, 29(5):235-242.
- Cooper, G.A. 1974. The effect of black walnut extractives in sorption, shrinkage, and swelling. *Wood Science*, 6(4):380-385.
- Defo, M., Y. Fortin et A. Cloutier. 1999. Moisture content-water potential relationship of sugar maple and white spruce wood from green to dry conditions. *Wood and Fiber Science*, 31(1):62-70.
- Détienne, P. et P. Jacquet. 1983. Atlas d'identification des bois de l'Amazonie et des régions voisines. Centre Technique Forestier Tropical, France.
- Djolani, B. 1970. Hystérèse et effets de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois aux températures de 5°, 21°, 35° et 50°C. Note de recherches n°8, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- Fortin, Y. 1979. Moisture content-matric potential relationship and water flow properties of wood at high moisture contents. Thèse de Ph.D. Université de British Columbia, Vancouver.
- Goulet, M. 1968. Phénomènes de second ordre de la sorption d'humidité dans le bois au terme d'un conditionnement de trois mois à température normale. Seconde partie: Essais du bois d'érable à sucre en compression radiale. Note de recherches N°3, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- Goulet, M. et G. Veer. 1975. Pressions d'affaissement à température ambiante des bois de chêne, de bouleau et d'épinette. Note technique n°7, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.

- Goulet, M. et Y. Fortin. 1975. Mesures du gonflement de l'éérable à sucre au cours d'un cycle de sorption d'humidité à 21°C. Note de recherches n°12, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- Goulet, M. et R. Hernández. 1991. Influence of moisture sorption on the strength of sugar maple wood in tangential tension. *Wood and Fiber Science*, 23(2):197-206.
- Hart, C.A. 1984. Relative humidity, EMC, and collapse shrinkage in wood. *Forest Products Journal*, 34(11/12):45-54.
- Hedlin, C.P. et F.N. Trofimenkoff. 1965. Relative humidities over standard solutions of nine salts in the temperature range from 0° to 90°F. Dans: *Humidity and Moisture. Comptes rendus du Symposium international sur l'humidité*, Washington D. C., 1963, tome III, p. 519-520, New York.
- Hernández, R. 1983. Relations entre l'état de sorption et la résistance du bois d'éérable à sucre en traction tangentielle. Thèse de M.Sc., Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- Hernández, R. 1993a. Influence of moisture sorption history on the swelling of sugar maple wood and some tropical hardwoods. *Wood Science and Technology*, 27(5):337-345.
- Hernández, R. 1993b. Influence of moisture sorption on the compressive properties of hardwoods. *Wood and Fiber Science*, 25(1):103-111.
- Hernández, R. et M. Bizoň. 1994. Changes in shrinkage and tangential compression strength of sugar maple below and above the fiber-saturation point. *Wood and Fiber Science*, 26(3):360-369.
- Hernández, R. 2004a. Influence of extraneous substances, wood density and interlocked grain on the physical and mechanical properties of some tropical hardwoods. Part I: Moisture sorption properties. *Holzforschung* (soumis).
- Hernández, R. 2004b. Influence of extraneous substances, wood density and interlocked grain on the physical and mechanical properties of some tropical hardwoods. Part II: Fiber saturation point. *Holzforschung* (soumis).
- Hernández, R. 2004c. Influence of extraneous substances, wood density and interlocked grain on the physical and mechanical properties of some tropical hardwoods. Part III: Swelling properties. *Holzforschung* (soumis).
- Hernández, R. 2004d. Influence of extraneous substances, wood density and interlocked grain on the physical and mechanical properties of some tropical hardwoods. Part IV: Compressive properties. *Holzforschung* (soumis).
- Junta del acuerdo de cartagena 1981. Tablas de propiedades físicas y mecánicas de la madera de 20 especies del Perú.

- Kelsey, K.E. 1956. The shrinkage intersection point – Its significance and the method of its determination. *Forest Products Journal*, 6:411-417.
- Kolin, B. et T. Stevanovic. 1996. The effect of temperature, density and chemical composition upon the limit of hygroscopicity of wood. *Holzforschung*, 50:263-268.
- Kollmann, F.F. et W.A. Côté. 1968. Principles of wood science and technology. Tome I : Solid wood. Springer-Verlag, New York.
- Kryla, J.M. 1980. Characteristics of carbonized wood affected by extraction. *Wood Science*, 13(1):18-25.
- Laforest, P. et A. Plamondon. 1976. Effet d'une pression hydrostatique élevée sur les membranes du bois. Seconde partie : Propriétés hygroscopiques et mécaniques du bois. Note de recherches No 15, Département d'exploitation et utilisation des bois, Université Laval.
- Menon, R.S., A.L. Mackay, J.R.T. Hailey, M. Bloom, A.E. Burgess et J.S. Swanson. 1987. An NMR determination of the physiological water distribution in wood during drying. *Journal of Applied Polymer Science*, 33:1141-1155.
- Michaud, F. et G. Almeida. 2004. Macro-commande Microsoft Excel de détermination des coefficients de complaisances et des contraintes à la limite proportionnelle des échantillons de bois. Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval.
- Naderi, N et R. Hernández. 1997. Effect of re-wetting treatment on the dimensional changes of sugar maple wood. *Wood and Fiber Science*, 29(4):340-344.
- Naderi, N et R. Hernández. 1999. Effect of the planing on physical and mechanical properties of sugar maple wood. *Wood and Fiber Science*, 31(3):283-292.
- Nearn, W.T. 1955. Effect of water soluble extractible on the volumetric shrinkage and equilibrium moisture content of eleven tropical and domestic woods. Bulletin 598. Agricultural Experiment Station, Pennsylvania State University, University Park, Pennsylvania.
- Petty, J.A. 1978. Fluid flow through the vessels of birch wood. *Journal of Experimental Botany*, 29(113):1463-1469.
- Robertson, A.A. 1965. Investigation of the cellulose-water relationship by the pressure plate method. *Tappi*, 48(1):568-573.
- Siau, J.F. 1984. Transport processes in wood. Springer-Verlag, New York.
- Siau, J.F. 1995. Wood: Influence of moisture on physical properties. Virginia Polytechnic Institute and State University, VA.

- Skaar, C. 1988. Wood-water relations. Springer-Verlag, New York.
- Sliker, A. 1978. Strain as a function of stress, stress rate, and time at 90° to the grain in sugar pine. Wood Science, 10(4):208-219.
- Stamm, A.J. 1964. Wood and cellulose science. Ronald Press, New York.
- Stamm, A.J. 1971. Review of nine methods for determining the fiber saturation points of wood and wood products. Wood Science, 4(2):114-128.
- Stevens, W.C. 1963. The transverse shrinkage of wood. Forest Products Journal, 13(9):386-389.
- Stone, J.E. et A.M. Scallan. 1967. The effect of component removal upon the porous structure of the cell wall of wood. II. Swelling in water and the fiber saturation point. Tappi, 50(10): 496-501.
- Taylor, F.W. 1974. Effect of extraction on the volume dimensions and specific gravity of solid wood blocks. Wood Science, 6(4):396-404.
- Teesdale, C.H. et J.D. MacLean. 1918. Relative resistance of various hardwoods to injection with creosote. U.S.D.A. Bulletin n°606. Cité par Wheeler (1982).
- Tiemann, H.D. 1906. Effect of moisture upon the strength and stiffness of wood. U.S.D.A. Forest Service, Bulletin 70.
- Tsoumis, G. 1991. Science and Technology of Wood. Structure, Properties, Utilization. Van Nostrand Reinhold. New York.
- U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 1974. Wood handbook: Wood as an engineering material. USDA Agriculture Handbook 72. Rev. U. S. Dep. Agric., Washington, D.C.
- Wheeler, E.A. 1982. Ultrastructural characteristics of red maple (*Acer rubrum* L.) wood. Wood and Fiber, 14(1):43-53.

Annexe A

Une analyse microscopique a été utilisée afin de reproduire des microphotographies du bois des trois espèces étudiées dans le cadre de ce mémoire afin d'aider à clarifier leur mécanisme d'hygroscopicité. Ces microphotographies prises à partir d'un microscope électronique à balayage sont montrées aux figures A1 pour le tornillo; A2 pour le pumaquiro et A3 pour le huayruro.

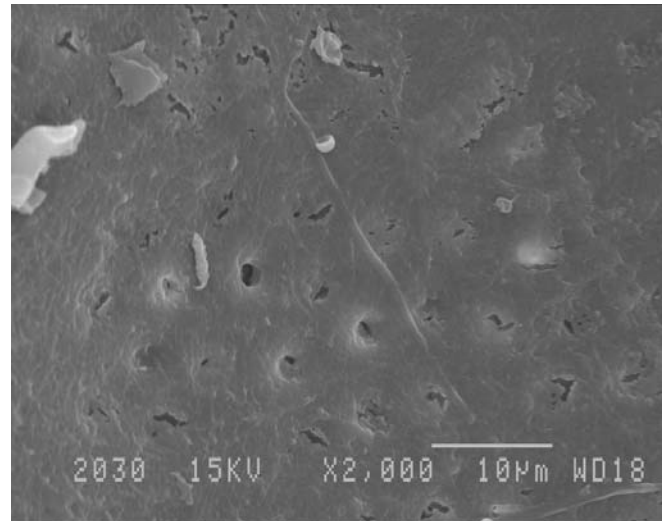
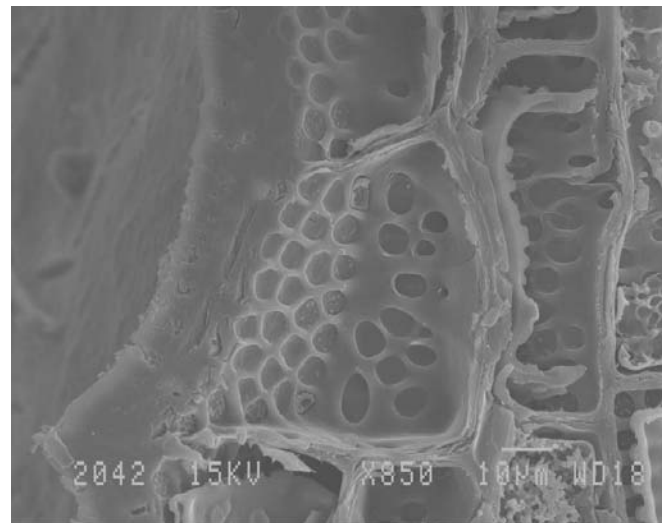
**A****B**

Figure A1. Microphotographies de l'espèce *tornillo*: (A) punctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) punctuations dans le parenchyme longitudinal.

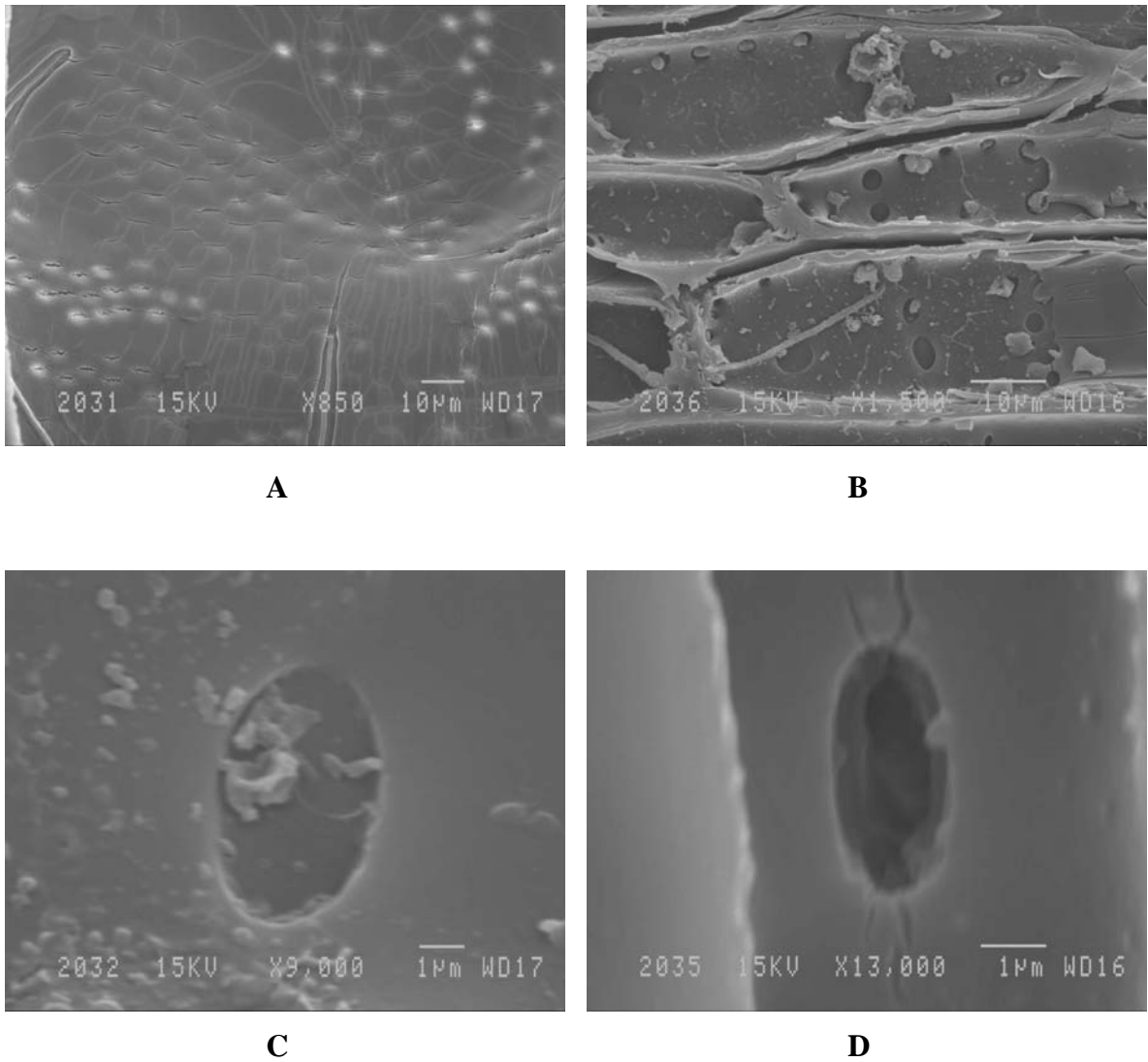


Figure A2. Microphotographies de l'espèce pumaquiro : (A) ponctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) ponctuations dans les rayons; (C) ponctuation dans une cellule de rayon; (D) ponctuation dans la paroi d'une fibre.

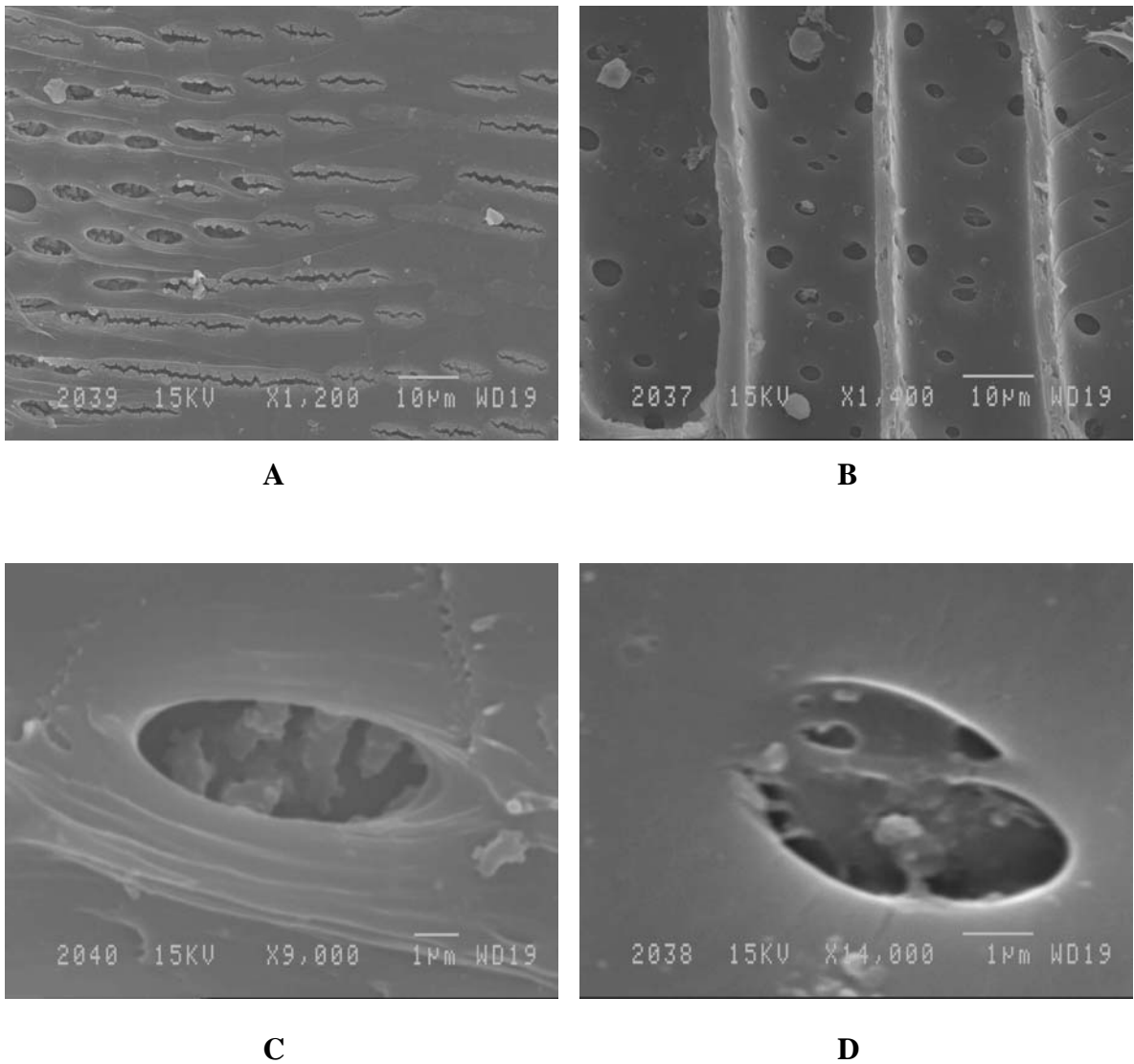


Figure A3. Microphotographies de l'espèce huayruro : (A) ponctuations dans la paroi d'un élément de vaisseau; (B) ponctuations dans le parenchyme longitudinal; (C) ponctuation dans la paroi d'un élément de vaisseau; (D) ponctuation dans une cellule de parenchyme longitudinal.