

Chapitre 6

Discussion des résultats

6.1. Précision des mesures et variabilité

Les tableaux 10, 11, 13 et 14 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 exprimées en proportion des moyennes des vingt éprouvettes.

La précision des moyennes a varié selon les particularités des paramètres étudiés. La teneur en humidité d'équilibre fut évaluée avec la meilleure précision possible 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 la teneur en humidité d'équilibre à 25°C. Par contre, la précision de H déterminée par la méthode de solutions salines fut environ trois fois moindre à 50°C qu'à 25°C. Le système de contrôle de la température des bassins à 50°C fut ainsi moins efficace que celui employé pour les bassins à 25°C. Cela a eu comme effet qu'à 50°C, la teneur en humidité d'équilibre fut déterminée avec le même niveau de précision pour les deux méthodes utilisées (solutions salines et membrane poreuse sous pression). Ces deux méthodes couvrent cependant différents intervalles d'humidité relative de l'air ambiant et sont donc complémentaires. La précision obtenue pour H à l'aide de solutions salines saturées pour le bouleau jaune et pour le hêtre à 25°C a été similaire à celle obtenue par Almeida (2006) pour des expériences de sorption semblables. Ces niveaux de précision à température ambiante ont été également obtenus par

Goulet et Hernández (1991), Hernández et Bizoñ (1994), Arévalo (2002), Hernández et Pontin (2006) et Hernández (2007b) pour d'autres espèces de bois.

Par ailleurs, la précision obtenue par la méthode de la membrane sous pression fut similaire à celle obtenue par Almeida (2006) pour les mêmes bois. 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. Ainsi, l'équilibre d'humidité dépendra davantage de la structure poreuse et de la structure anatomique du bois.

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 du matériel d'essai. Quant au retrait, on remarque que les conditions d'humidité ont affecté les précisions obtenues, notamment au-delà de 96% (HR) pour les deux températures et les deux espèces étudiées. Cependant, l'erreur élevée des mesures s'explique par la faible valeur du retrait autour de ces niveaux d'humidité. On s'aperçoit qu'en général la précision des mesures augmente à mesure que l'humidité relative de l'air ambiant diminue. De plus, le retrait tangentiel des deux 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 11 et 14). 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 4,4% pour le bouleau jaune et à 2,5% pour le hêtre. Ces niveaux d'erreur furent similaires pour les deux températures étudiées. La précision des valeurs de déformation mesurées sur toute la longueur de l'échantillon fut légèrement meilleure que celle obtenue pour la déformation mesurée dans sa partie médiane. Almeida (2006) a rapporté pour les mesures de déformabilité à 25°C des niveaux de précision supérieurs à ceux trouvés dans le présent travail, pour les mêmes espèces.

Finalement, 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). 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 Pontin (2005).

6.2. Hygroscopicité du bois

Les figures 22, 23, 28 et 29 illustrent la relation entre le potentiel hydrique et la teneur en humidité d'équilibre des bois de bouleau jaune et de hêtre à 25°C et 50°C. Ces figures montrent autant les humidités obtenues en désorption que celle obtenue suite à une saturation intégrale. Dans quasiment tous les cas, l'erreur de la moyenne des teneurs en humidité 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 d'humidité relative 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 pour la détermination de la teneur en humidité d'équilibre à des humidités relatives élevées. Cette correspondance de résultats entre les deux méthodes a été rapportée auparavant par plusieurs chercheurs (Cloutier et Fortin 1991; Hernández et Bizoñ 1994; Defo et al. 1999; Almeida et Hernández 2006a, 2006b; Hernández et Pontin 2006).

Les figures citées précédemment montrent la présence de l'hystérèse à la saturation à hautes valeurs d'humidité relative de l'air ambiant. Cette hystérèse a été définie 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. Ce phénomène est apparent lors de désorptions subséquentes, c'est-à-dire qu'il n'est pas limité au premier séchage mais plutôt à une désorption réalisée en présence d'eau libre (Barkas 1949; Goulet 1968; Goulet et Hernández 1991; Cloutier et Fortin 1991;

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

Dans la présente recherche, les essais de désorption ont été réalisés à partir de la saturation intégrale de manière 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; Hernández et Pontin 2006). Des résultats expérimentaux confirmant ce comportement ont été rapportés par Defo et al. (1999) pour le bois d'érable à sucre.

Almeida et Hernández (2006a, 2006b) ont obtenu pour le bouleau jaune et le hêtre des valeurs similaires de teneur en humidité d'équilibre en désorption à 25°C (figures 34 et 35). Par ailleurs, les figures 36 et 37 montrent que les écarts des valeurs de teneur en humidité d'équilibre des deux espèces étudiées sont relativement faibles entre 0% et 90% d'humidité relative de l'air ambiant, tandis qu'au dessus de cette valeur d'humidité les différences entre ces deux espèces sont plus marquées. Les différences d'équilibre entre les espèces augmentent donc au fur et à mesure que l'humidité relative de l'air augmente.

Tel qu'indiqué plus haut, la région entre 96% et 100% (HR) est très élargie lorsqu'on utilise le concept de potentiel hydrique pour la représentation des isothermes de sorption. Cette région est très importante dans l'étude des interactions bois-eau étant donné que celles-ci sont contrôlées par les forces capillaires et en conséquence par la microstructure du bois. Puisque le bois est un matériel poreux, un effet important à considérer pour l'interprétation des figures 22, 23, 28 et 29 est le phénomène dit de «la bouteille d'encre». 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

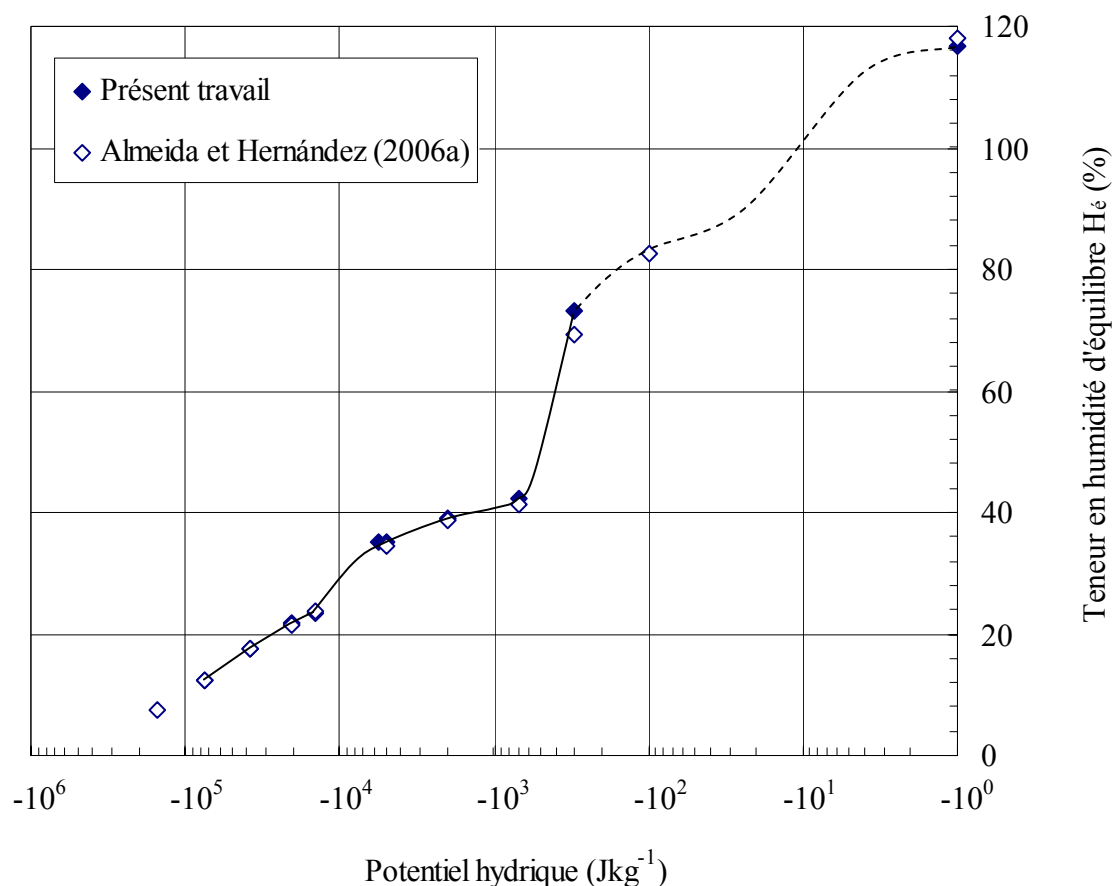


Figure 34. Comparaison des teneurs en humidité d'équilibre du bois de bouleau jaune mesurées dans le présent travail et dans celui d'Almeida et Hernández (2006a), en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

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 (Fortin 1979).

Les courbes de désorption entre 0 et $-5000 \text{ J kg}^{-1} \psi$ furent alors différentes pour les deux espèces étudiées, étant donné qu'à hautes valeurs d'humidité, 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, Almeida et Hernández 2006b). De plus, la variation

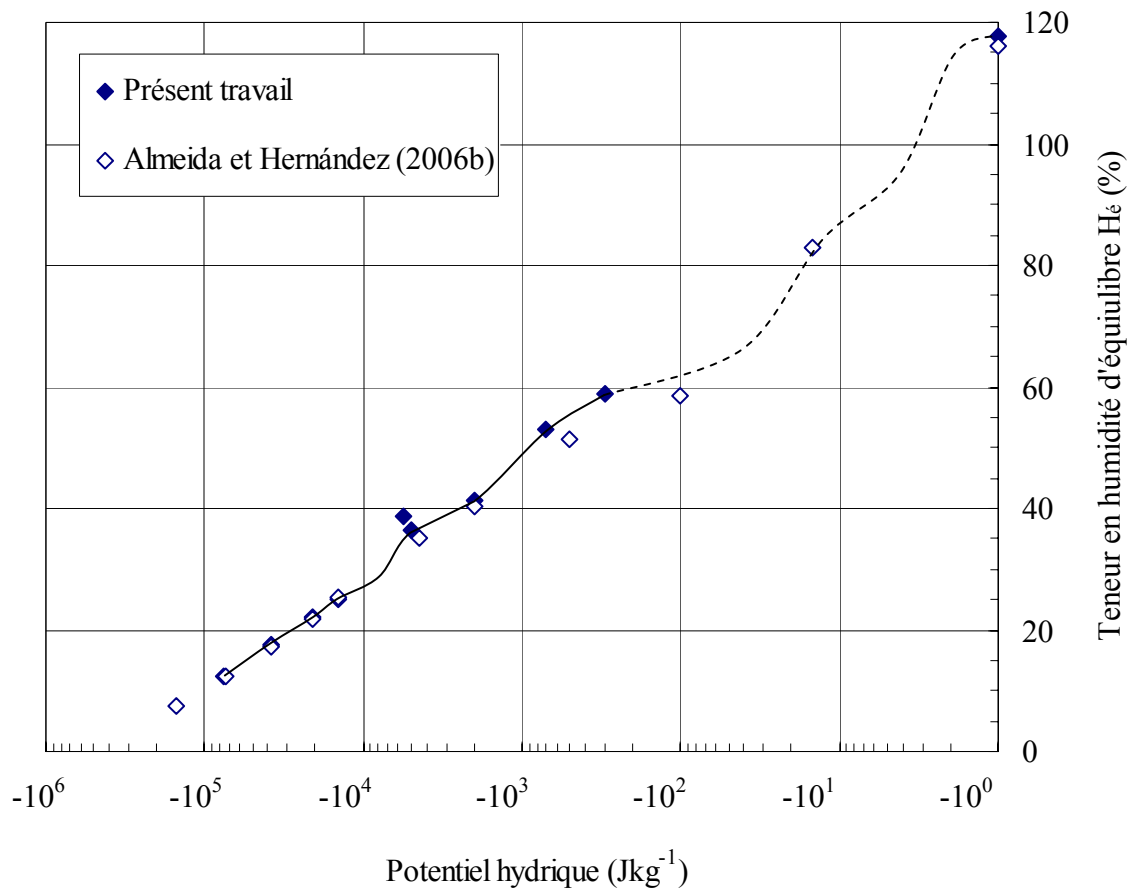


Figure 35. Comparaison des teneurs en humidité d'équilibre du bois de hêtre mesurées dans le présent travail et dans celui d'Almeida et Hernández (2006b) en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

de la structure anatomique entre les espèces doit contribuer également à expliquer ces différences.

Les figures 38 et 39 montrent que le drainage d'eau entre la saturation maximale et $-300 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ fut d'environ 43,7% et 56,2% (H) pour le bouleau jaune, et de 59,4% et 58,2% (H) pour le hêtre, à 25°C et 50°C respectivement. Selon des études antérieures, la perte initiale d'eau dans le bois devrait avoir lieu dans les capillaires les plus larges, notamment ceux des lumens des vaisseaux (Hernández et Bizoň 1994; Almeida et Hernández 2006a; Hernández

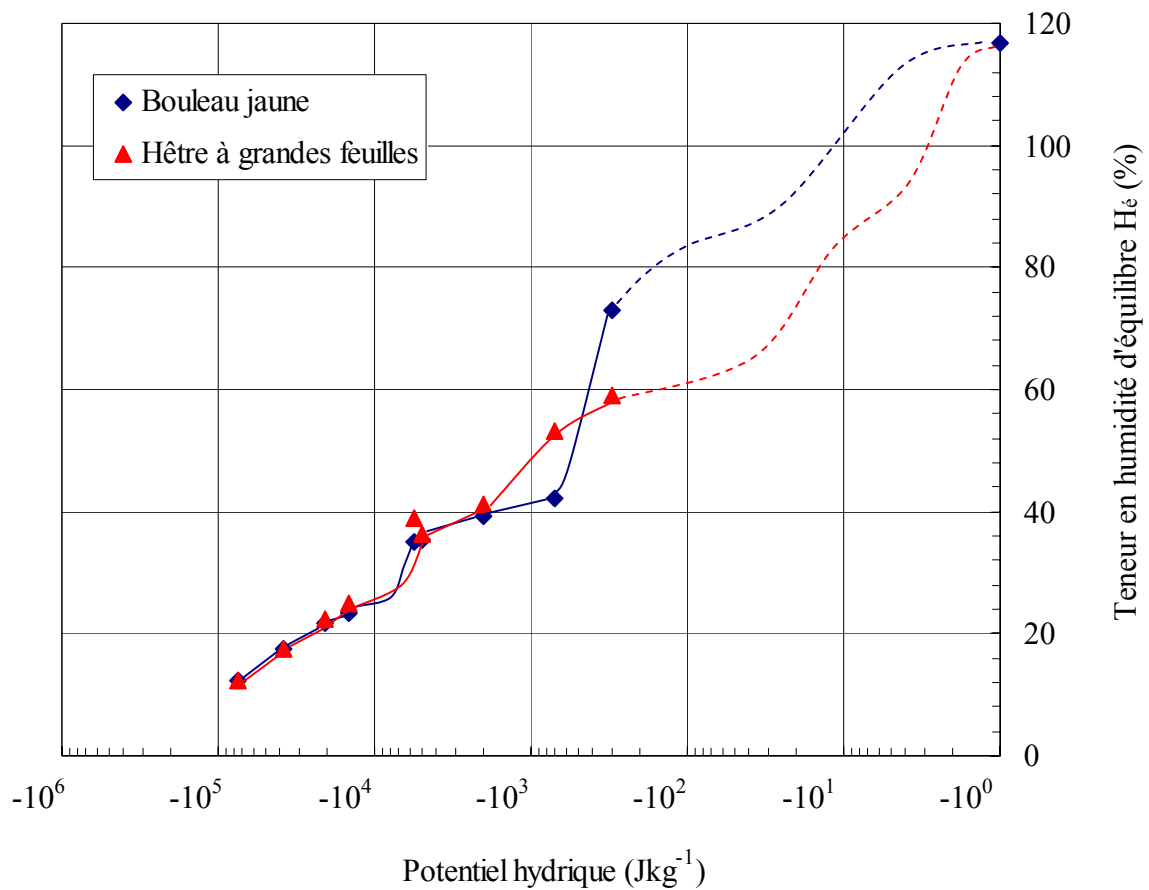


Figure 36. Teneur en humidité d'équilibre du bois de bouleau jaune et hêtre à grandes feuilles en fonction du potentiel hydrique à 25°C.

et Pontin 2006). Le tableau 5 montre que à $-300 \text{ J kg}^{-1} \psi$, les capillaires ayant un rayon plus grand que $0,48 \text{ } \mu\text{m}$ à 25°C et $0,45 \text{ } \mu\text{m}$ à 50°C sont déjà vides. Des mesures d'anatomie quantitative réalisées par Almeida et Hernández (2006c) montrent que le diamètre tangentiel moyen des vaisseaux est de $86 \text{ } \mu\text{m}$ pour le bouleau jaune et de $40 \text{ } \mu\text{m}$ pour le hêtre. La proportion des vaisseaux dans le volume total du bois était de 15% pour le bouleau jaune et de 25% pour le hêtre. On confirme donc en effet que les vaisseaux constituent la première voie de drainage de l'eau dans le bois, à cause de leur taille ainsi que de leur proportion élevée dans le bois de ces espèces. Le hêtre, qui présente un volume

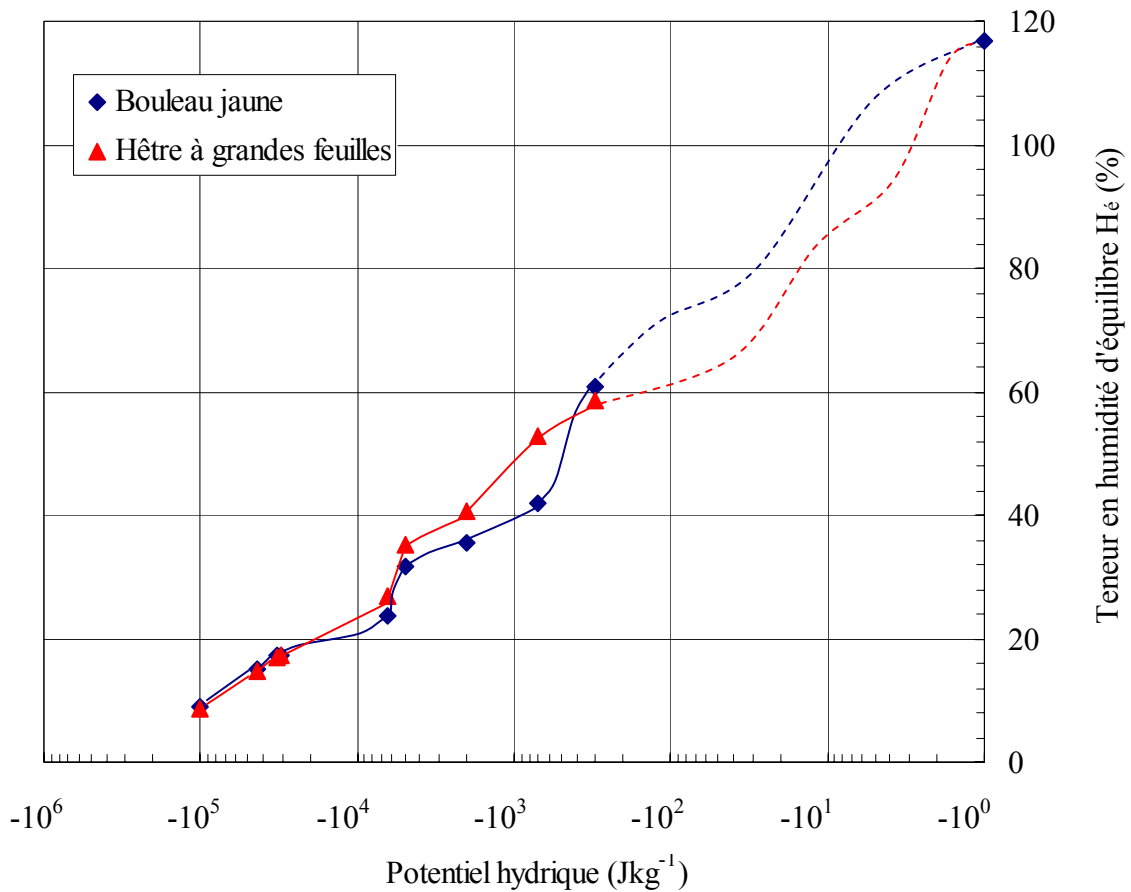


Figure 37. Teneur en humidité d'équilibre du bois de bouleau jaune et de hêtre à grandes feuilles en fonction du potentiel hydrique à 50°C.

de vaisseaux plus grand que le bouleau jaune, montre ainsi un changement plus abrupt de la courbe de teneur en humidité d'équilibre entre 0 et -300 Jkg⁻¹ ψ (figures 36 et 37).

Par ailleurs, la courbe de désorption limite à 25°C pour le bouleau jaune change de façon abrupte entre -300 Jkg⁻¹ et -700 Jkg⁻¹ ψ et plafonne entre -700 Jkg⁻¹ et -5000 Jkg⁻¹ ψ (figure 38). Puisque le bouleau jaune a une proportion des fibres assez élevée, cette baisse de teneur en humidité semble indiquer que le drainage complet des cavités de fibres serait accompli à -700 Jkg⁻¹ ψ . Ce drainage dépendra de la taille des ouvertures dans les membranes des ponctuations connectant les fibres. Cela signifie que le rayon moyen de ces

ouvertures pourrait être plus grand que $0,21 \mu\text{m}$ ($-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$) pour cette espèce (tableau 5). Le même résultat fut obtenu par Almeida et Hernández (2006a) pour le bouleau jaune à 25°C . Le plateau observé entre -700 Jkg^{-1} et $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ (figure 38) indique que les ouvertures qui contrôlent la rétention et drainage de l'eau liquide sont peu abondantes entre 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 5). Le plateau montré pourrait correspondre à la transition entre le drainage des cavités de fibres et celui des parois cellulaires et des lumens des cellules de parenchyme longitudinal et radial. Un plateau similaire a été déjà observé sur le bois d'érable à sucre par Hernández et Bizoñ (1994). Selon Hart (1984) une partie importante de l'eau liquide présente au-dessous de $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ pourrait être logée dans les cellules de parenchyme. À $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$, on distingue une très bonne correspondance entre les deux méthodes de sorption utilisées à 25°C . En effet, les valeurs de teneur en humidité d'équilibre obtenues à $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ (membrane poreuse) et à $-5619 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ (solution saline saturée de K_2SO_4) sont très rapprochées.

Par ailleurs, la courbe de désorption du bouleau jaune à 50°C est inférieure à celle obtenue à 25°C , à l'exception de la condition d'équilibre à $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ (figure 38). En fait, la désorption à 50°C suit le même comportement de drainage d'eau que la courbe à 25°C jusqu'à $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$. À $-300 \text{ Jkg}^{-1} \psi$, la différence entre les valeurs de teneur en humidité d'équilibre à 25°C et 50°C est de 12% (H). Cette perte en humidité plus élevée à 50°C qu'à 25°C pourrait s'expliquer par une plus grande perméabilité des tissus du bois favorisée par l'élévation de la température. Cependant, l'intervalle entre -300 Jkg^{-1} et $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ montre une diminution particulière de l'humidité d'équilibre. Sachant que la conductivité de l'eau augmente avec la température (Tremblay et al. 1996), le temps pour atteindre l'équilibre d'humidité est inversement proportionnel à la température, à un niveau de potentiel hydrique déterminé. Cependant, à $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$, le temps fut plus long à 50°C qu'à 25°C . La valeur H à $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ et 50°C pourrait alors être légèrement affectée par une source inconnue. Il se pourrait aussi que ce niveau de potentiel hydrique établisse

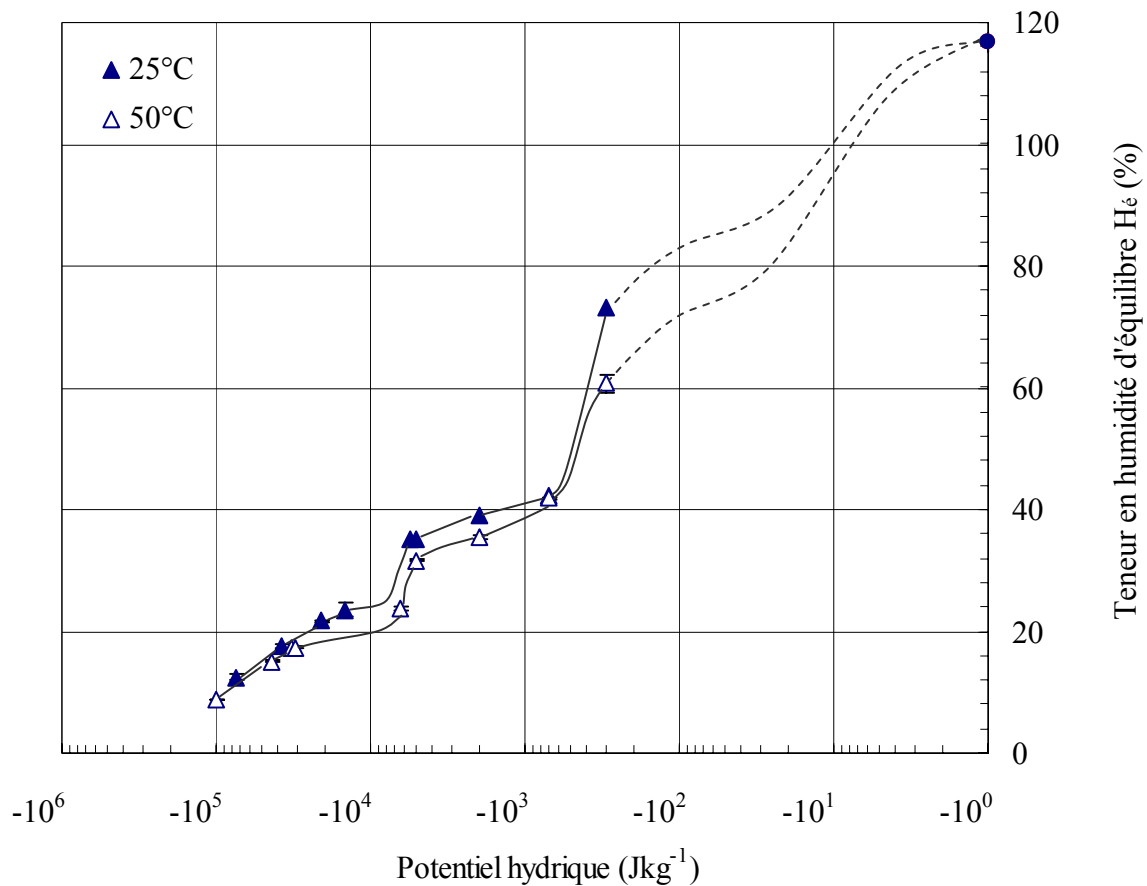


Figure 38. Teneur en humidité d'équilibre du bois de bouleau jaune en fonction du potentiel hydrique à 25°C et 50°C.

véritablement la limite du drainage complet des cavités cellulaires des fibres. Cette limite devrait être égale pour les deux températures étudiées. Il en résulte qu'à 50°C la teneur en humidité d'équilibre a diminué de manière plutôt constante entre -300 Jkg^{-1} et -5000 Jkg^{-1} ψ . En revanche, la région entre -5000 Jkg^{-1} et -6370 Jkg^{-1} ψ à 50°C présente un changement abrupt de la teneur en humidité d'équilibre, ce qui pourrait correspondre avec le drainage de l'eau liquide dans les rayons ligneux. Ce résultat n'a pas été observé à 25°C car l'intervalle de potentiel hydrique utilisé dans cette région fut plus grand.

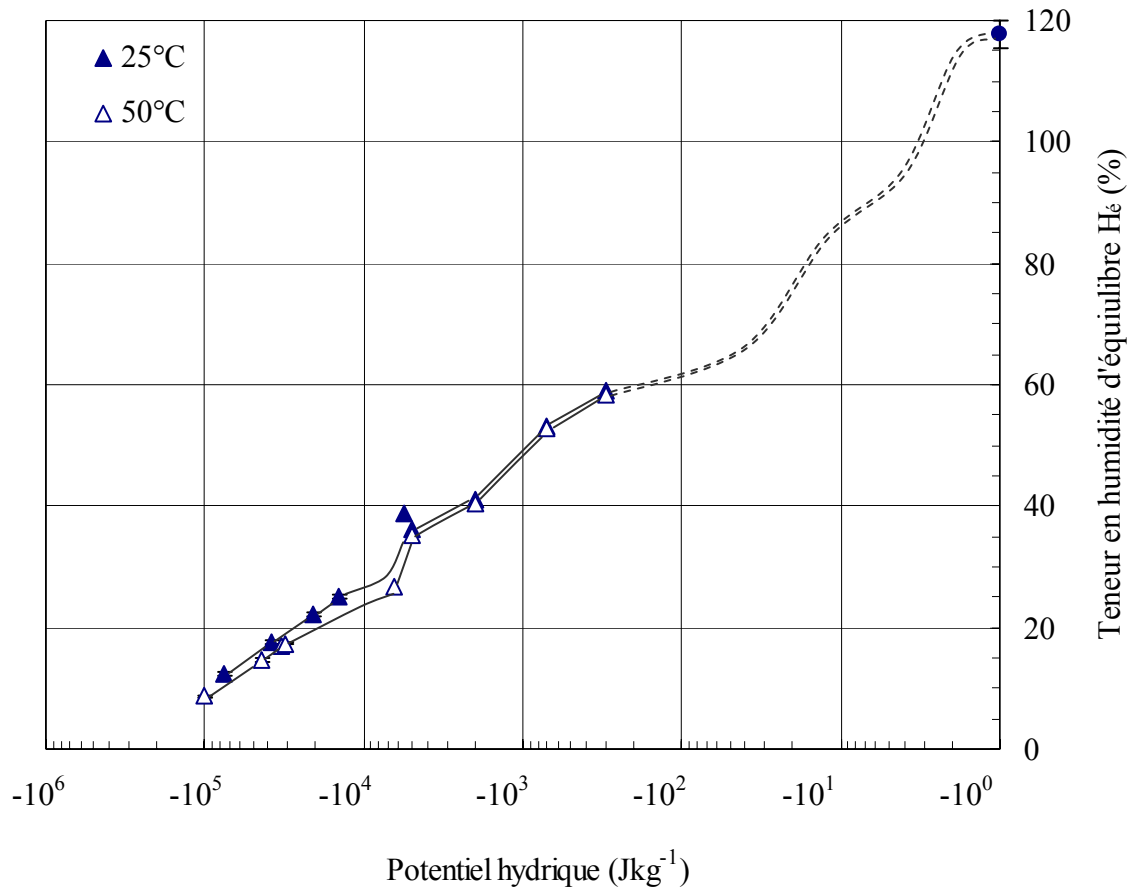


Figure 39. Teneur en humidité d'équilibre du bois de hêtre en fonction du potentiel hydrique à 25°C et 50°C.

Dans le cas du hêtre à 25°C, la courbe de désorption limite en-dessous de $-300 \text{ J kg}^{-1} \psi$ présente une diminution assez constante de la teneur en humidité d'équilibre durant la désorption, sans présence d'aucun plateau intermédiaire (figure 39). Ce résultat a été observé antérieurement par Almeida et Hernández (2006b). Dans le cas de bois de conifères, Fortin (1979) et Tremblay et al. (1996) ont rapporté des courbes de drainage sans plateau intermédiaire. Une distribution plus uniforme des ouvertures de pores peut expliquer l'absence de plateau dans ces espèces. Ces résultats confirment qu'à des humidités élevées, la relation teneur en humidité d'équilibre-potentiel hydrique est fortement dépendante des espèces. Au niveau de la transition entre la méthode de la membrane poreuse et celle des solutions salines saturées, le point correspondant à -5619

$\text{Jkg}^{-1} \psi$ (K_2SO_4) à 25°C a été considéré inexact car la valeur de teneur en humidité obtenue fut supérieure à celle à $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ (tableau 12; figure 28). Cette valeur dépasse également la courbe de désorption limite rapportée pour cette même espèce par Almeida et Hernández (2006b) (figure 35). Le calcul de la teneur en humidité fut, dans ce cas, faussé par une diminution de la masse subie par les échantillons suite à l'action des agents de moisissure et/ou pourriture. Cette attaque fut favorisée par le niveau d'humidité relative et par le temps de conditionnement trop long (530 jours).

À 50°C , les valeurs de teneur en humidité d'équilibre pour le hêtre sont légèrement inférieures à celles à 25°C , et comme dans le cas du bouleau jaune, la courbe de désorption se comporte de manière semblable à celle à 25°C jusqu'à $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$. À $-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ la courbe change brusquement tel que observé pour le bouleau jaune. Cela pourrait ainsi correspondre avec le vidage de l'eau liquide présente dans les rayons ligneux. En résumé, la discussion montre que l'équilibre hygroscopique est plus faible à 50°C qu'à 25°C pour les deux espèces étudiées, ce qui confirme l'influence qui a la température sur cette propriété.

En dessous de -14502 Jkg^{-1} et de $-6370 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ à 25°C et à 50°C respectivement, pour le bouleau jaune (figure 38) et pour le hêtre (figure 39), la teneur en humidité d'équilibre diminue lentement. En-dessous de -37775 Jkg^{-1} (76% HR) et de -44057 Jkg^{-1} (74% HR) ψ à 25°C et à 50°C respectivement, les courbes de désorption de ces deux espèces sont quasiment accolées. On prévoyait ce comportement puisque la désorption de l'eau liquide à ces niveaux d'humidité relative de l'air est quasiment terminée. Plus précisément, Hernández (1983) a démontré que la perte d'eau liquide pour l'érable à sucre serait accomplie à environ 63% (HR), valeur que correspond à 14% de teneur en humidité d'équilibre. Il est reconnu que la désorption de l'eau liée est presque similaire entre les différents bois tempérés.

Dans les cas de certaines espèces de bois, il est souvent difficile 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 canaux interconnectant les cavités cellulaires des différents tissus composant le bois. Le choix spécifique des niveaux de potentiel hydrique à étudier, ainsi que leur nombre, est également très important.

Finalement, pour le cas spécifique du hêtre, les valeurs de retrait obtenues aux conditions de $-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ à 25°C et 50°C et de $-5619 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ à 25°C, ainsi que celle de teneur en humidité à $-5619 \text{ Jkg}^{-1} \psi$ à 25°C ont été mises dans les tableaux à titre indicatif seulement. Elles n'ont pas été considérées dans la discussion du retrait à cause de leur manque de consistance. De plus, la désorption au-dessus de ZnSO_4 à 50°C ne fut pas réalisée de la même manière que les autres. La grande solubilité de ce sel nous a forcés à placer dix échantillons par cellule de sorption au lieu de 20. La valeur d'humidité relative de ZnSO_4 à 50°C a été déterminée par estimation à partir des valeurs de Rockland (1960). Cette valeur a été très semblable à celle obtenue avec la solution de KCl à 50°C. Il en résulte que les valeurs de teneur en humidité d'équilibre et de retrait ont été similaires pour les deux solutions à 50°C.

6.3. Le point de saturation des fibres

Le point de saturation des fibres pour les deux espèces à deux températures a été estimé à partir de la méthode du point d'intersection du retrait volumétrique en fonction de la teneur en humidité d'équilibre (Kelsey 1956). Le PSF est ainsi défini comme la teneur en humidité du bois où le prolongement de la portion linéaire de la droite retrait-teneur en humidité d'équilibre coupe la ligne de retrait nul (Stamm 1964; Skaar 1988; Siau 1995). Pour cette estimation, seulement les valeurs de retrait volumique obtenues entre 58% et 76% (HR) à 25°C et entre 50% et 74% (HR) à 50°C, ont été utilisées. Cela tient compte de la non linéarité de la courbe de retrait à des teneurs en humidité basses (Kelsey 1956) ainsi que de l'effet de l'hystérèse à saturation sur le retrait à des teneurs en humidité élevées (Hernández et Bizoň 1994).

Le point de saturation des fibres estimé fut d'environ 30,7% et 29,1% (H) pour le bouleau jaune, et de 29,9% et 30,3% (H) pour le hêtre, à 25°C et 50°C respectivement. Pour les mêmes espèces, Almeida et Hernández (2006a, 2006b) ont établi le point de saturation de fibres à environ 29% et 31% pour le bouleau jaune et hêtre respectivement, à 25°C. Le PSF devrait diminuer avec une augmentation de la température à un taux moyen de 0,93% (H) par élévation de 10°C (Siau 1995). Alors, le PSF a diminué à 50°C par rapport à 25°C dans les cas du bouleau, nonobstant que la différence entre les deux valeurs est très faible. Par contre, le PSF pour le hêtre est quasiment le même pour les deux températures, même légèrement plus grand à 50°C qu'à 25°C. Cet effet pourrait être expliqué par la présence d'un léger collapse dans le bois de hêtre à 50°C (Kelsey 1956). Ainsi, ce collapse a dû affecter la linéarité de la relation retrait-teneur en humidité d'équilibre aux teneurs en humidité utilisées pour la détermination du PSF. L'effet du taux de désorption pourrait également être en cause. En effet, la désorption a été réalisée dans une seule étape pour 25°C et 50°C. Le taux de sorption a donc varié pour ces deux températures. Il est reconnu que ce taux affecte le niveau d'équilibre d'humidité (Christensen et Kelsey 1959).

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

Les relations entre la teneur en humidité d'équilibre et le retrait tangentiel, radial et volumétrique du bois pour le bouleau jaune et hêtre, à 25°C et 50°C, sont présentées aux figures 24, 25, 30 et 31. Les courbes présentées ont été tracées à main levée et prennent en compte l'état de sorption. Ainsi, la valeur du point de saturation de fibres est aussi présentée pour fins d'analyse et elle n'est pas unie avec les autres points.

À une teneur en humidité donnée, le retrait du bois de bouleau jaune est similaire à 25°C et à 50°C (figure 40). La température n'aurait donc pas d'effet sur le retrait de ce bois. Des résultats semblables ont été rapportés par Djolani (1970) pour le bois d'érable à sucre entre 5°C et 50°C. La température pour ces deux espèces n'affecte que l'équilibre hygroscopique du bois. Son effet sur le retrait ne serait donc qu'indirect. Toutefois, pour le hêtre la

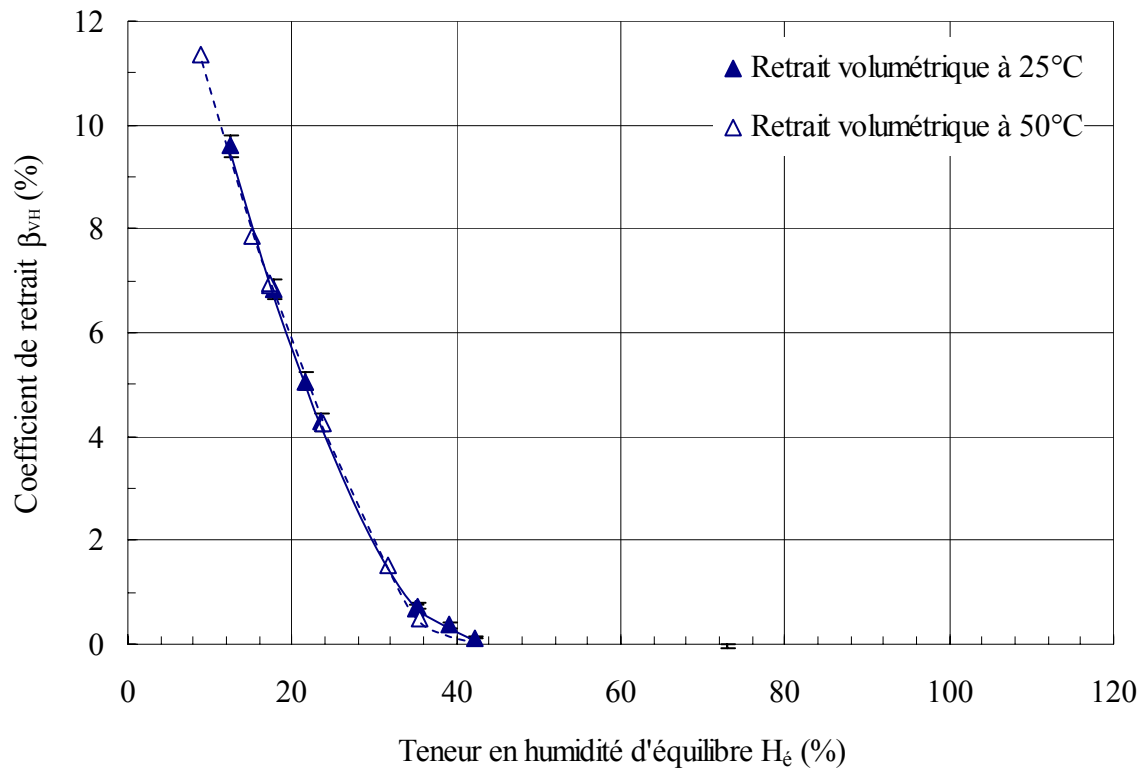


Figure 40. Coefficient de retrait volumétrique de bois de bouleau jaune en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 25°C et 50°C.

présence du collapse (expliqué plus loin) aurait provoqué un retrait plus grand à 50°C qu'à 25°C.

Chez les deux espèces, les retraits tangentiel, radial et volumétrique commencent avant que le point de saturation de fibres soit atteint. Afin de déterminer la teneur en humidité d'équilibre à laquelle le retrait commence, les différences entre les dimensions à saturation maximale et celles à chaque condition d'équilibre étudiées ont été calculées. Cela a été réalisé pour les dimensions tangentielle et radiale. Puisque les dimensions à saturation maximale et celles à chaque condition d'équilibre étudiée ont été prises sur le même échantillon, un test T student par paires a été réalisé (SAS Institute 2002-2003). Ce test a déterminé si le changement en dimension entre ces deux conditions d'équilibre est

Tableau 15. Analyse statistique de la différence en dimension des échantillons après saturation maximale et à la condition d'équilibre étudiée pour le bouleau jaune à 25°C et 50°C.

T (°C)	H _é ¹ (%)	Direction tangentielle ²				Direction radiale ³			
		T _{SM} (mm)	T _H (mm)	Diff T (mm)	Valeur t	R _{SM} (mm)	R _H (mm)	Diff R (mm)	Valeur t
25	42,3	63,84	63,81	0,03	4,14**	20,92	20,90	0,02	3,10**
	73,0	63,83	63,82	0,01	2,98**	20,89	20,90	-0,01	-1,68 n.s.
50	35,4	63,88	63,67	0,21	13,15**	20,91	20,88	0,03	5,46**
	41,8	63,84	63,81	0,03	4,51*	20,92	20,93	-0,02	-1,71 n.s.

¹ Teneur en humidité d'équilibre à laquelle DiffT (différence entre dimension T_{SM} et T_H) et DiffR (différence entre dimension R_{SM} et R_H) fut statistiquement supérieure à zéro.

² Moyenne de 20 mesures: T_{SM} = dimension tangentielle à saturation maximale, T_H = dimension tangentielle à l'humidité d'équilibre.

³ Moyenne de 20 mesures: R_{SM} = dimension radiale à saturation maximale, R_H = dimension radiale à l'humidité d'équilibre.

(*) Statistiquement significatif à au moins 5% de niveau de probabilité.

(**) Statistiquement significatif à au moins 1% de niveau de probabilité.

(n.s.) Non statistiquement significatif à 5% de niveau de probabilité.

Tableau 16. Analyse statistique de la différence en dimension des échantillons après saturation maximale et à la condition d'équilibre étudiée pour le hêtre à 25°C et 50°C.

T (°C)	H _é ¹ (%)	Direction tangentielle ²				Direction radiale ³			
		T _{FS} (mm)	T _H (mm)	Diff T (mm)	Valeur t	R _{FS} (mm)	R _H (mm)	Diff R (mm)	Valeur t
25	36,3	65,11	64,79	0,32	23,16**	20,74	20,70	0,04	3,45**
	41,2	65,03	64,98	0,05	10,34**	20,75	20,75	0,00	-0,24 n.s.
	59,0	65,10	65,09	0,01	2,19*	20,77	20,78	-0,01	-0,83 n.s.
50	40,5	65,17	64,96	0,20	11,29**	20,74	20,71	0,03	3,26**
	58,4	65,20	65,23	-0,03	-2,88 n.s.	20,77	20,74	0,03	2,48*

¹ Teneur en humidité d'équilibre à laquelle DiffT (différence entre dimension T_{SM} et T_H) et DiffR (différence entre dimension R_{SM} et R_H) fut statistiquement supérieure à zéro.

² Moyenne de 20 mesures: T_{SM} = dimension tangentielle à saturation maximale, T_H = dimension tangentielle à l'humidité d'équilibre.

³ Moyenne de 20 mesures: R_{SM} = dimension radiale à saturation maximale, R_H = dimension radiale à l'humidité d'équilibre.

(*) Statistiquement significatif à au moins 5% de niveau de probabilité.

(**) Statistiquement significatif à au moins 1% de niveau de probabilité.

(n.s.) Non statistiquement significatif à 5% de niveau de probabilité.

statistiquement plus grand que zéro, à un niveau de probabilité de 0,05. Les tableaux 15 et 16 résument les principaux résultats de cette analyse pour les deux espèces à 25°C et 50°C. La teneur en humidité d'équilibre à laquelle le retrait a été plus grand que zéro varie entre les deux espèces, étant donné que le drainage d'eau à des teneurs en humidité élevées dépend de la structure du bois.

Pour le bois de bouleau jaune, le retrait à 25°C a débuté déjà à une teneur en humidité d'équilibre au-dessus du PSF, estimé à 30,7% (H). Le retrait est ainsi déjà significatif à environ 73,0% (H_e) ($-300 \text{ Jkg}^{-1} \psi$) en direction tangentielle, et à environ 42,3% (H_e) ($-700 \text{ Jkg}^{-1} \psi$) en direction radiale. Il en résulte que le retrait volumique est déjà apparent à environ 42,3% (H_e). À 50°C, le retrait a débuté aussi à une teneur en humidité d'équilibre au-dessus du PSF, estimé à 29,1% (H). Le retrait en direction tangentielle et radiale, et donc en volume, est significatif à 35,4% (H_e) ($-2000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$). Ces résultats confirment que même à l'équilibre, la perte d'eau liée des parois cellulaires provoque le retrait dans le bois avant que toute l'eau liquide soit perdue. Ainsi, le début du retrait se fait en présence d'eau libre et d'eau liée. On déduit ainsi que le bouleau jaune retient encore 11,6% (H) à 25°C et 6,3% (H) à 50°C sous forme liquide lorsque le retrait est tout près de commencer. Almeida et Hernández (2006a) ont estimé que le retrait volumique du bouleau jaune commence déjà à 41% (H_e) et que l'eau retenue était d'environ 12% (H) à 25°C. 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, les mêmes qui ont été considérées par Siau (1995) comme les éléments les moins perméables dans le bois de feuillus. Puisque les membranes des ponctuations entre parenchyme-parenchyme sont plus épaisses que les membranes des ponctuations entre vaisseaux et entre fibres, elles sont considérées comme les voies les moins efficaces pour le flux de liquides (Wheeler 1982). Par ailleurs, on peut voir qu'effectivement une augmentation de la température influence la teneur en humidité d'équilibre à laquelle le retrait commence : la valeur H de départ du retrait se rapproche de celle de la saturation des fibres.

Pour le cas du hêtre, le retrait à 25°C a débuté déjà à une teneur en humidité d'équilibre au-dessus du PSF, estimé à 29,9% (H). Le retrait est ainsi déjà significatif à environ 41,2%

(H_e) ($-2000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$) en direction tangentielle et à environ 36,3% (H_e) ($-5000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$) en direction radiale. Le retrait volumique est alors déjà apparent à environ 36,3% (H_e) à 25°C. À 50°C, le retrait a débuté aussi à une teneur en humidité d'équilibre au-dessus du PSF, estimé à 30,3% (H). Le retrait en direction tangentielle et radiale et en volume est significatif à 40,5% (H_e) ($-2000 \text{ Jkg}^{-1} \psi$). On déduit que le bois de hêtre retient 6,4% (H) à 25°C sous forme liquide lorsque le retrait commence. Almeida et Hernández (2006b) ont estimé que le retrait volumique du hêtre commence à 40,2% (H_e) et que l'eau retenue était d'environ 9% (H) à 25°C. À 50°C, le début du retrait peut être attribué partiellement à une perte d'eau liée dans les parois cellulaires en présence d'eau libre mais également à la présence d'un faible collapse. Cela a conduit au fait que la valeur de la teneur en humidité à laquelle le retrait commence soit supérieure à celle obtenue à 25°C.

Des études ont montré que les rayons constituent un facteur important d'anisotropie (Schniewind 1959; Boutelje 1962). Chez le hêtre, coexistent à la fois de petits et de gros rayons ligneux. Cela semble provoquer dans ce bois un grand retrait et un grand comportement anisotrope (Teissier du Cros et al. 1981; Almeida 2006). Ainsi, la grande proportion des rayons dans cette espèce affecte ses propriétés dimensionnelles et en même temps la teneur en humidité d'équilibre à laquelle le retrait débute. Une augmentation de la température jusqu'à 50°C aurait apparemment provoqué un léger collapse dans les cellules du parenchyme, ce qu'aurait occasionné que le retrait à 50°C ait débuté à une teneur en humidité supérieure à celle obtenue à 25°C.

En général, le collapse a lieu au-dessus du point de saturation des fibres par action de l'eau liquide, tandis que le retrait normal se produit seulement au-dessous du PSF par perte de l'eau liée dans les parois cellulaires (Hart 1984). Certains auteurs ont rapporté la présence d'un phénomène de collapse localisé dans les cellules de parenchyme au-dessus du PSF (Demanet et Morlier 2000; Wu et al. 2005). Tiemann (1951) suggère que le collapse provient d'un écrasement de cellules dû à des forces de tension hydrostatique à l'intérieur des lumens des cellules lesquelles sont remplis d'eau et sans perforation. À mesure que cette eau est enlevée, les parois cellulaires sont poussées vers l'intérieur des lumens. L'eau libre dans les lumens partiellement remplies ou dans les cellules suffisamment perforées,

est évaporée sans causer de collapse. D'ailleurs, Greenhill (1938) a trouvé pour l'*Eucalyptus regnans* que des températures élevées et des teneurs en humidités élevées provoquent de plus grands collapses. Hernández et Pontin (2006) en étudiant le retrait de bois tropicaux au-dessus et en-dessous du PSF, ont rapporté un retrait prématuré dans le bois de huayruro à des humidités relatives élevées. Les forces de tension capillaire à ce niveau d'humidité relative pourraient être trop basses pour générer la perte d'eau liée dans le bois. Cependant, elles pourraient être suffisantes pour engendrer un certain collapse dans les parois cellulaires minces de parenchyme axial (Hart 1984).

La sensibilité du bois de hêtre au collapse a été déjà signalée (Keylwerth 1951). Ce phénomène se caractérise par des déformations très importantes au séchage, qui ont lieu lors du départ de l'eau des lumens des fibres, donc largement au-dessus du PSF. Le collapse, bien connu sur chez les eucalyptus, pourrait chez certains hêtres expliquer l'augmentation très sensible des déformations (Teissier du Cros et al. 1981). Keller et Thiercelin (1975) ont constaté que les gros rayons du bois de hêtre ont une action défavorable sur les retraits radial et tangentiel. De la même manière, McIntosh (1957) étudiant l'effet de gros rayons sur les propriétés dimensionnelles du bois de hêtre et de chêne rouge, a rapporté que les gros rayons possèdent un retrait tangentiel relativement large. Tel que discuté plus haut, le bois de hêtre a également affiché un retrait plus grand à 50°C qu'à 25°C, pour une même teneur en humidité (figure 41). L'écart entre les valeurs de retrait à ces deux températures peut donc être attribué au collapse. Ce collapse peut donc être considéré comme étant léger et donc probablement limité aux tissus les plus faibles du bois (en l'occurrence les rayons ligneux).

6.5. Relation entre la teneur en humidité d'équilibre et la compression tangentielle

Les figures 26, 27, 32 et 33 montrent la relation entre la teneur en humidité d'équilibre et le coefficient de déformation s_{11} des bois étudiés à 25°C et 50°C. Ces figures présentent le coefficient de déformation mesuré dans la partie médiane de l'échantillon (40 mm) et celui

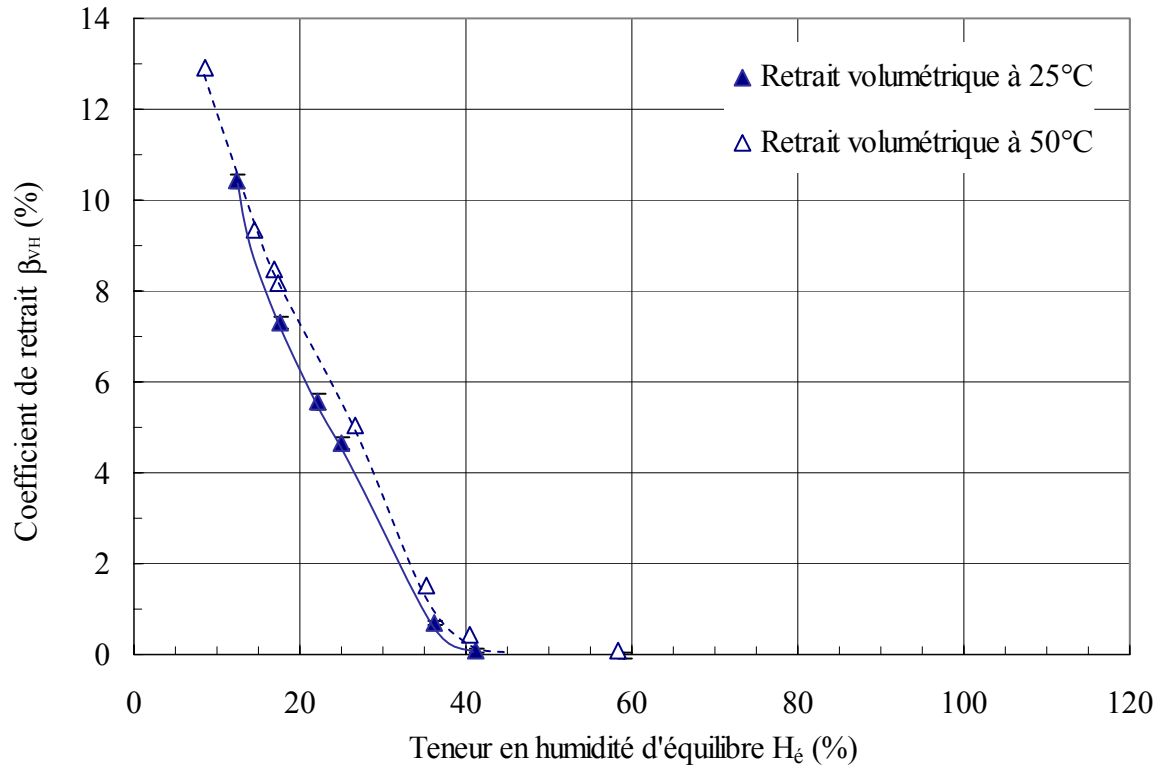


Figure 41. Coefficient de retrait volumétrique de bois de hêtre en fonction de sa teneur en humidité d'équilibre à 25°C et 50°C.

estimé sur toute sa longueur (60 mm). Les erreurs des moyennes du coefficient de déformation ainsi que des courbes à main levée y sont aussi montrées.

Tel qu'observé auparavant par Hernández (1993b), Hernández et Bizoň (1994), Almeida et Hernández (2006a, 2006b) et Hernández et Pontin (2006), les courbes obtenues dans la partie centrale et celles obtenues dans la totalité de l'échantillon montrent une distribution hétérogène de la déformation à l'intérieur du barreau d'essai, cela pour les deux espèces et pour les deux températures. Le coefficient de déformation s_{11} mesuré sur toute la longueur a été plus élevé que celui mesuré sur la partie centrale de 34% pour le bouleau jaune et de 41% pour le hêtre à 25°C. Almeida et Hernández (2006a, 2006b) ont trouvé que cette différence était en moyenne de 30% et 37% pour le bouleau et pour le hêtre respectivement,

à 25°C. Cette hétérogénéité a augmenté à 51% pour le bouleau jaune et à 55% pour le hêtre à 50°C. Les écarts entre les déformations peuvent être expliqués 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 normalisées recommandent l'utilisation de la partie médiane de l'échantillon pour la mesure de la déformation.

D'ailleurs, on peut distinguer aussi que la température a un effet sur le coefficient de déformation s_{11} . Ainsi, une élévation de la température augmente la déformabilité du bois en direction tangentielle. En même temps, la différence entre les courbes obtenues dans la partie centrale et dans la totalité de l'échantillon devient plus prononcée pour les deux espèces. D'ailleurs, si l'on compare le coefficient de déformation du bois de bouleau jaune et celui du hêtre, on constate que le hêtre est plus rigide que le bouleau jaune. Dans les bois feuillus, il est évident que les rayons ont une influence sur l'anisotropie transversale (Schniewind 1959; Beery et al. 1983; Burgert et al. 1999). Également, certaines études ont démontré que les rayons et leur proportion sont en liaison directe avec la dureté et la résistance en compression axiale et transversale (Myer 1922), et ils contribuent à augmenter la charge maximale à la limite élastique, ainsi que le module d'élasticité radial (Kennedy 1968). Ainsi, sachant que la masse volumique du bouleau et de hêtre sont similaires, ce résultat pourrait avoir été causé par la présence des gros rayons dans le bois de hêtre, tel qu'il a été déjà mentionné antérieurement.

Finalement, la variabilité propre des coefficients de déformation n'a pas permis d'obtenir des conclusions claires au sujet de la teneur en humidité au-dessous de laquelle les caractéristiques de déformabilité du bois sont affectées par les changements hygroscopiques. À 25°C, cette détermination était plus difficile à identifier. Cependant, à 50°C l'effet de la teneur en humidité d'équilibre sur la déformabilité du bois a été plus évident, et cette valeur d'humidité a pu être déterminée. Ainsi, on a confirmé que la déformabilité du bois commence à être affectée aux mêmes valeurs de teneur en humidité d'équilibre que le retrait du bois, soit 35,4% (H_e) pour le bouleau jaune et 40,5% (H_e) pour le hêtre.

Conclusion

Ce travail de recherche avait pour objectif d'étudier l'effet de la teneur en humidité d'équilibre sur les propriétés du bois de deux espèces feuillues tempérées, soit le bouleau jaune (*Betula alleghaniensis* Britton) et le hêtre à grandes feuilles (*Fagus grandifolia* Ehrhart), aux températures de 25°C et 50°C. La région près du point de saturation des fibres (PSF) a été particulièrement visée. Ainsi, la teneur en humidité d'équilibre, les coefficients de retrait et le coefficient de déformation (s_{11}) en compression tangentielle ont été déterminés. La teneur en humidité d'équilibre en désorption a été obtenue à l'aide de deux méthodes, soit celle des solutions salines saturées, soit celle de la membrane poreuse sous pression. Cette désorption a été réalisée à partir de la saturation intégrale du bois, couvrant différents niveaux d'humidité relative de l'air, ce qui a mené à une excellente continuité entre les deux méthodes.

L'influence que l'hystérèse à saturation exerce sur les différentes propriétés du bois a pu être déterminée dans nos résultats. Les courbes de désorption à des humidités relatives élevées ont été différentes pour chaque espèce et pour chaque température étudiée. À ces niveaux d'humidité, les valeurs d'équilibre sont davantage fonction de la structure poreuse et de la structure anatomique du bois. Ainsi, les phénomènes liés à l'hystérèse à saturation dans les essais physiques et mécaniques normalisés doivent être considérés lorsqu'il s'agit du bois vert ou humide de façon à éviter une surestimation ou sous-estimation des propriétés concernées. Par ailleurs, la teneur en humidité au point de saturation des fibres de chaque espèce fut estimée à partir de la méthode du point d'intersection du retrait volumétrique en fonction de la teneur en humidité d'équilibre. Cette valeur fut ainsi de 30,7% et 29,1% (H) pour le bouleau jaune et de 29,9% et 30,3% (H) pour le hêtre, à 25°C et 50°C respectivement. Cependant dans le cas du hêtre à 50°C, la détermination du PSF semble avoir été affectée par la présence d'un léger collapse dans le bois.

Les résultats montrent qu'à l'équilibre, les retraits radial et tangentiel, et en conséquence le retrait volumétrique débutent au-dessus de la saturation des membranes suite à une perte

d'eau liée en présence d'eau liquide. Ainsi, à la désorption, la perte de l'eau hygroscopique semble déjà apparente à environ 42,3% (H_e) à 25°C et 35,4% (H_e) à 50°C pour le bouleau jaune et 36,3% (H_e) à 25°C pour le hêtre. Les résultats montrent donc que le bouleau retient encore 11,6% (H) à 25°C et 6,3% (H) à 50°C sous forme liquide lorsque le retrait est tout près de commencer. Cette valeur est estimée à 6,4% (H) à 25°C pour le hêtre. Il est ainsi confirmé qu'en désorption, au début des changements des propriétés du bois, il existe de l'eau liquide en surplus. Cette eau, qui n'intervient pas dans les changements de ces propriétés, serait à ce moment localisée dans les tissus les moins perméables. Une augmentation de la température augmenterait la perméabilité de ces tissus, facilitant ainsi la désorption de l'eau liquide restante. Ainsi, la teneur en humidité d'équilibre marquant le début des changements des propriétés du bois diminue avec une augmentation de la température. Cette valeur se rapprocherait ainsi du PSF au fur et à mesure que la température s'élève. Pour le cas du hêtre à 50°C, la teneur en humidité à laquelle le retrait commence serait affectée également par la présence d'un collapse localisé dans le parenchyme axial.

D'autre part, les résultats des essais mécaniques montrent que le coefficient de déformation s_{11} est plus élevé à 50°C qu'à 25°C, à des teneurs en humidité égales. Cependant, les résultats à 25°C n'ont pas permis déterminer la teneur en humidité au-dessous de laquelle les caractéristiques de déformabilité sont affectées par les changements hygroscopiques. En revanche, les essais à 50°C montrent que cette déformabilité commence à être affectée à partir des mêmes valeurs de teneur en humidité d'équilibre que le retrait correspondant, soit 35,4% (H_e) pour le bouleau jaune et 40,5% (H_e) pour le hêtre.

Finalement, pour les deux espèces étudiées, l'équilibre hygroscopique en désorption fut plus faible à 50°C qu'à 25°C, ce qui confirme l'influence de la température sur l'hygroscopicité du bois. L'effet de la température sur le retrait mesuré s'est avéré nul pour le bois de bouleau jaune. Par contre, il fut légèrement plus grand à 50°C qu'à 25°C pour le bois de hêtre. Ce comportement a été associé à une plus grande vitesse de sorption à 50°C, ce qui a mené à un léger collapse localisé dans les zones les plus faibles de ce bois.

