

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS.....	i
RÉSUMÉ.....	ii
TABLE DES MATIÈRES.....	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTERATURE.....	3
1.1 Principaux procédés de séchage artificiel.....	3
1.2 Le programme de séchage.....	7
1.3 Le séchage à haute température.....	9
1.3.1 Avantages du séchage à haute température.....	9
1.3.2 Problèmes courants avec le séchage à haute température et moyens d’y remédier.....	14
1.3.3 Recherche du séchage à haute température dans l’est du Canada.....	28
1.4 Caractéristiques de la charge de bois qui affectent la qualité du séchage.....	34
CHAPITRE 2 MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	45
2.1 Matériel d’essai.....	45
2.1.1 Préparation du matériel d’essai.....	45
2.1.2 Sélection et préparation des planches témoins.....	46

2.2 Méthodes.....	47
2.2.1 Séchoir expérimental.....	47
2.2.2 Préparation de la pile de bois pour le séchage.....	48
2.2.3 Programmes de séchage.....	50
2.2.4 Suivi du séchage.....	51
2.2.5 Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique.....	51
2.2.6 Évaluation de la qualité du bois après séchage.....	52
2.2.7 Évaluation de la qualité du bois après refendage (contraintes résiduelles longitudinales).....	52
2.2.8 Mesure du gradient d'humidité suivant l'épaisseur.....	53
2.2.9 Évaluation des changements de la couleur.....	53
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET DISCUSSION	55
3.1 Séchage du bois d'épinette blanche.....	55
3.1.1 Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique.....	55
3.1.2 Courbes de séchage.....	56
3.1.3 Distribution des teneurs en humidité initiale et finale.....	59
3.1.4 Retraits de rive et de face.....	61
3.1.5 Gauchissement après séchage et rabotage.....	63
3.1.6 Gauchissement après refendage en largeur.....	64
3.1.7 Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité.....	65
3.1.8 Fendillement interne et décollement de nœuds.....	65
3.1.9 Évaluation de la couleur.....	66
3.2 Séchage du sapin baumier.....	68
3.2.1 Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique.....	68
3.2.2 Courbes de séchage.....	69
3.2.3 Distribution des teneurs en humidité initiales et finales.....	71
3.2.4 Retraits de rive et de face.....	73
3.2.5 Gauchissement après séchage et rabotage.....	74

3.2.6 Gauchissement après refendage en largeur.....	75
3.2.7 Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité.....	76
3.2.8 Fendillement interne et décollement de nœuds.....	76
3.2.9 Évaluation de la couleur.....	77
3.3 Séchage du peuplier faux-tremble.....	79
3.3.1 Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique.....	79
3.3.2 Courbes de séchage.....	80
3.3.3 Distribution des teneurs en humidité initiales et finales.....	82
3.3.4 Retraits de rive et de face.....	84
3.3.5 Gauchissement après séchage et rabotage.....	85
3.3.6 Gauchissement après refendage en largeur.....	86
3.3.7 Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité.....	86
3.3.8 Fendillement interne et décollement de nœuds.....	87
3.3.9 Évaluation de la couleur.....	87

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS.....	89
-------------------------------------	----

BIBLIOGRAPHIE.....	93
--------------------	----

ANNEXE

Tableau A1	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°1 de l'épinette blanche.....	104
Tableau A2	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°2 de l'épinette blanche.....	104
Tableau A3	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°3 de l'épinette blanche.....	105
Tableau A4	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°1 du sapin baumier.....	105
Tableau A5	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°2 du sapin baumier.....	106
Tableau A6	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°3 du sapin baumier.....	106

Tableau A7	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°1 du peuplier faux-tremble.....	107
Tableau A8	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°2 du peuplier faux-tremble.....	107
Tableau A9	Programme de séchage utilisé pour l'essai n°3 du peuplier faux-tremble.....	108
Tableau A10	Valeur des analyses statistiques pour l'épinette blanche.....	109
Tableau A11	Valeur des analyses statistiques pour le sapin baumier.....	110
Tableau A12	Valeur des analyses statistiques pour le peuplier faux-tremble.....	111

LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableaux 1.1	Teneur en humidité avant et après séchage et proportion des pièces rencontrant la norme de 19% H pour la teneur en humidité après séchage (d'après Fabris 1993).....	16
Tableaux 1.2	Écart moyen de teneur en humidité finale entre le centre et la surface des pièces (d'après Fabris 1993).....	17
Tableaux 1.3	Pourcentage de déclassement dû au gauchissement selon la température de séchage (adapté de Milota 2000).....	22
Tableaux 1.4	Retraits de rive et de face pour du 2 x 4 du pruche/sapin séché à différentes températures (adapté de Milota 2000).....	28
Tableaux 1.5	Programme de séchage à haute température utilisé par Tremblay (2003).....	31
Tableaux 1.6	Programme de séchage à haute température utilisé pour des madriers de peuplier (d'après Cech 1975).....	33
Tableaux 1.7	Comparaison de différents types d'empilage sur le niveau de gauchissement de colombages de pin du Sud (d'après Simpson et Tschernitz 1998).....	38
Tableaux 1.8	Susceptibilité de quelques espèces commerciales de l'Est du Canada à la formation de poches humides (Ward et Pong 1980).....	42
Tableaux 1.9	Variations de la teneur en humidité initiale entre les pièces de bois de sciage de pin gris, d'épinette noire et de sapin baumier (Garrahan et al. 1994).....	44
Tableaux 3.1	Valeurs moyennes des humidité initiale et finale obtenues pour les trois essais sur l'épinette blanche (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.....	60
Tableaux 3.2	Retrait moyen de rive (épaisseur et de face (largeur) pour le bois d'épinette blanche (écart-type) entre parenthèses).....	62
Tableaux 3.3	Gauchissement moyen de l'épinette blanche après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages subissant une perte de classe.....	64

Tableaux 3.4	Gauchissement moyen de l'épinette blanche après séchage et rabotage et refendage en largeur (écart-type entre parenthèses).....	65
Tableaux 3.5	Différence de teneur en humidité finale entre le centre et la surface des colombages d'épinette blanche (écart-type entre parenthèses)...	66
Tableaux 3.6	Valeurs des humidités initiales et finales mesurées pour les trois essais sur le sapin baumier (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.....	72
Tableaux 3.7	Retrait moyen de rive (épaisseur) et de face (largeur) pour le sapin baumier (écart-type entre parenthèses).....	74
Tableaux 3.8	Gauchissement moyen après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) du sapin baumier et proportion des colombages subissant une perte de classe.....	75
Tableaux 3.9	Gauchissement moyen après séchage et rabotage et refendage en largeur (écart-type entre parenthèses) du sapin baumier.....	75
Tableaux 3.10	Différence de teneur en humidité finale entre le cœur et la surface des colombages de sapin baumier (écart-type entre parenthèses)....	76
Tableaux 3.11	Valeurs des humidités initiales et finales mesurées pour les trois essais sur le peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.....	82
Tableaux 3.12	Retrait moyen de rive (épaisseur) et de face (largeur) pour le peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).....	84
Tableaux 3.13	Gauchissement moyen après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages subissant une perte de classe pour le bois de peuplier faux-tremble.....	85
Tableaux 3.14	Gauchissement moyen après séchage et refendage en largeur pour le bois de peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).....	86
Tableaux 3.15	Différence de teneur en humidité finale entre le cœur et la surface des colombages de peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).....	86

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Courbes de séchage à haute température et à moyenne température pour l'épinette de 38x140 mm (adapté de Cech 1975).....	11
Figure 1.2	Liens entre le temps d'apparition des défauts et le programme de séchage (d'après Ngangué 2000).....	15
Figure 1.3	Profils de teneur en humidité moyens dans les pièces d'épinette, et erreur standard-usine n°2 (n=399).a) Épaisseur ; b) Largeur (d'après Fabris 1993).....	18
Figure 1.4	Déformation et répartition de l'humidité à divers stades du séchage à haute température du bois d'érable (adapté de Cech 1964).....	25
Figure 2.1	Chargement de bois en place dans le séchoir avec les planches témoins.....	48
Figure 2.2	Colorimètre BYK Gardner utilisé pour les mesures de couleur.....	54
Figure 3.1	Droite de régression pour la correction des lectures des teneurs en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le bois d'épinette blanche.....	56
Figure 3.2	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois d'épinette blanche.....	57
Figure 3.3	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois d'épinette blanche.....	57
Figure 3.4	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois d'épinette blanche.....	58
Figure 3.5	Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais sur le bois d'épinette blanche.....	60
Figure 3.6	Distribution de l'humidité finale pour les trois essais sur le bois d'épinette blanche.....	61

Figure 3.7	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois d'épinette blanche.....	67
Figure 3.8	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois d'épinette blanche.....	67
Figure 3.9	Droite de régression pour la correction des lectures des teneurs en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le sapin baumier.....	68
Figure 3.10	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de sapin baumier.....	69
Figure 3.11	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de sapin Baumier.....	70
Figure 3.12	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de sapin baumier.....	70
Figure 3.13	Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais sur le bois de sapin baumier.....	72
Figure 3.14	Distribution de l'humidité finale pour les trois essais sur le bois de sapin baumier.....	73
Figure 3.15	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de sapin baumier.....	77
Figure 3.16	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de sapin baumier.....	78
Figure 3.17	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de sapin baumier.....	78
Figure 3.18	Droite de régression pour la correction des lectures des teneurs en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le peuplier faux-tremble.....	79
Figure 3.19	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	80
Figure 3.20	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	81

Figure 3.21	Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	81
Figure 3.22	Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais sur le bois de peuplier faux-tremble.....	83
Figure 3.23	Distribution de l'humidité finale pour les trois essais de séchage sur le bois de peuplier faux-tremble.....	83
Figure 3.24	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	87
Figure 3.25	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	88
Figure 3.26	Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de peuplier faux-tremble.....	88

INTRODUCTION

L'industrie du bois d'œuvre et du bois œuvré est un secteur très important de l'activité économique du Québec. En plus de contribuer à maintenir une balance commerciale positive, elle crée des emplois, suscite des investissements et ouvre de nouveaux marchés pour les produits finis du bois.

Cette industrie est dépendante des marchés canadien et américain. Ce problème est particulièrement épineux du fait que la presque totalité de la production est centrée sur les bois de construction de 50 mm (2 po) d'épaisseur et que ces produits sont visés par les taxes et les quotas à l'exportation imposés par les États-Unis sur les sciages provenant du Canada. Face à cette situation, l'industrie québécoise du bois de sciage résineux doit absolument diversifier sa production et hausser encore davantage ses niveaux de rendement et de qualité.

À ce titre, plusieurs usines de bois d'œuvre se sont lancées dans la production de bois d'ingénierie. D'autres envisagent d'orienter une partie de leur production vers des produits de seconde transformation exigeant un séchage encore plus poussé et possiblement un refendage après séchage. Évidemment, les normes de qualité relatives à la fabrication de ces produits sont beaucoup plus exigeantes que les normes régissant la transformation primaire du bois d'œuvre. Des changements importants au niveau des stratégies de production sont donc nécessaires, entre autres les stratégies de séchage.

Parmi les procédés de séchage industriels couramment utilisés, le séchage à haute température (température sèche supérieure à 100°C) est un procédé de séchage industriel couramment utilisé dans l'industrie du bois d'œuvre. La vitesse de séchage élevée et les conditions hygrothermiques très sévères régnant dans le séchoir en font cependant un

procédé difficile à contrôler. Malgré cela, l'effet bénéfique de la haute température sur la plastification du bois rend en principe le procédé particulièrement apte pour le séchage des bois résineux sujets au gauchissement. À cause de sa rapidité, le séchage à haute température possède aussi un potentiel intéressant pour les bois contenant de fortes teneurs en humidité à l'état vert, tels que les bois d'épinette blanche, de sapin baumier et de peuplier faux-tremble. Malheureusement, il n'existe pas de stratégies de séchage à haute température propres à ces espèces lorsque destinées à des produits à valeur ajoutée.

Le but ultime du présent projet de recherche est de développer des stratégies de séchage à haute température pour le colamage 2x4 d'épinette blanche, de sapin baumier et de peuplier faux-tremble en vue de sa transformation en produits à valeur ajoutée. Les objectifs spécifiques sont de développer pour chacune de ces espèces une stratégie de séchage à haute température qui :

- permette d'atteindre une teneur en humidité cible moyenne de 8% avec 90% des planches entre 6 et 10% H;
- minimise les déformations de gauchissement ainsi que les gerces et les fentes;
- minimise les contraintes résiduelles et les gradients de teneur en humidité dans le sens de l'épaisseur et de la longueur des planches;
- minimise les changements de la couleur du bois.

Ce mémoire est rédigé selon un format de type traditionnel. Le premier chapitre traite du séchage des bois de seconde transformation, des caractéristiques du séchage à haute température ainsi que de l'influence des caractéristiques de la charge de bois sur la qualité du séchage. Le chapitre 2 décrit la sélection du matériel d'essai ainsi que les procédures expérimentales. Le chapitre 3 présente les résultats de l'étude sur l'effet des différents programmes expérimentés sur le temps et la qualité du séchage. Une conclusion générale rappelle les objectifs du projet et les principales conclusions tirées de l'étude.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1. Principaux procédés de séchage artificiel

En fonction de la température d'opération, les divers procédés de séchage artificiel peuvent se classer en trois catégories selon le niveau de température sèche (T_s) de l'air utilisé :

- Le séchage à basse température ($T_s \leq 50^\circ\text{C}$) où on retrouve le pré-séchage, le séchage solaire et le séchage par déshumidification en début de cycle;
- Le séchage à moyenne température ($50^\circ\text{C} \leq T_s \leq 100^\circ\text{C}$) où on retrouve le séchage par déshumidification, le séchage par air chaud climatisé à moyenne température, dit aussi séchage conventionnel, et le séchage sous vide;
- Le séchage à haute température ($T_s \geq 100^\circ\text{C}$) où on retrouve le séchage par air chaud climatisé à haute température, le séchage par ondes radio et le séchage par micro-ondes.

Les procédés les plus utilisés dans l'industrie sont le séchage par déshumidification, dit aussi séchage par pompe à chaleur (PAC), le séchage à moyenne température, le séchage à haute température ainsi que le séchage sous vide. Le séchage PAC est basé sur le principe de la pompe à chaleur qui fournit et recycle une partie de l'énergie nécessaire au séchage. Le séchage PAC requiert en général un investissement en capital plus faible que le séchage conventionnel à air chaud climatisé. Sa consommation énergétique est également moindre, tout au moins pour les teneurs en humidité au-dessus du point de saturation des fibres (PSF). Il offre également une plus grande flexibilité d'opération quant à la capacité de séchage. Il est

plus approprié pour le séchage des espèces précieuses réfractaires au séchage et génère moins de pollution que les procédés conventionnels.

Par ailleurs, les temps de séchage de ce procédé sont jusqu'à deux fois plus longs (en système fermé) que le séchage par air chaud climatisé et la régulation du séchage est plus difficile à réaliser (moins de contrôle sur la température sèche (T_s) et la température humide (T_h) que dans les séchoirs à air chaud climatisé). À l'exception du cas où l'usine possède déjà une chaudière à vapeur, l'électricité est la seule source énergétique pouvant être normalement utilisée. Cette dernière demeure encore une source d'énergie plus coûteuse que les déchets de bois qui servent à chauffer plus de la moitié des installations de séchage du Québec (Clément et Fortin 1996). Également, si ce type de séchage se veut efficace, une isolation supérieure à celle des séchoirs traditionnels est requise. Les gains énergétiques réalisés en recyclant la chaleur latente de condensation sont souvent en partie annulés par le besoin de ventiler les enceintes de séchage dû à des montées trop fortes en température ou en humidité relative de l'air. L'absence fréquente d'un système d'humidification dans les séchoirs à circuit d'air fermé ne permet pas non plus le conditionnement du bois à la fin du cycle de séchage, et même en présence d'un tel système, les températures maximales pouvant être atteintes en fin de traitement ne favorisent pas un conditionnement optimal du bois.

Au Québec, ce procédé fut très utilisé au début des années 80 pour le séchage des feuillus de qualité et le pin blanc. Plusieurs des installations vieillissantes ont cependant fait place aux séchoirs conventionnels, les longs temps de séchage étant un inconvénient majeur de ce procédé. Le procédé hybride PAC/séchage conventionnel semble cependant créer un nouvel engagement pour l'utilisation de la pompe à chaleur (Pépin 2000).

Les temps de séchage typiques pour la planche 4/4 peuvent varier de 18 à 20 jours pour les résineux et les feuillus faciles à sécher, et sont d'environ 28 à 32 jours dans le cas des feuillus réfractaires comme le bois de chêne (Joly et More-Chevalier 1980).

Dans le cas du séchage à moyenne température, communément appelé séchage conventionnel, l'air extérieur est chauffé et humidifié au besoin pour atteindre une humidité

relative (HR) donnée et forcé à travers la pile de bois où il s'humidifie et se refroidit. À la sortie de la pile une partie de l'air humide est évacuée à l'extérieur, avec ou sans récupération de chaleur. Cette évacuation d'air humide est compensée par l'ajout d'air extérieur dans le séchoir. Ce processus ne se fait généralement pas en continu, plusieurs passages de l'air dans la pile de bois étant requis pour atteindre les seuils de T_s et HR exigeant un apport de chaleur ou une évacuation d'air humide.

Les temps de séchage à moyenne température sont relativement courts et les conditions climatiques sont contrôlées. Les étapes de conditionnement et d'équilibrage sont faciles à réaliser et la température maximale atteinte permet une stérilisation facile du bois. Par contre, c'est un procédé très gourmand en énergie, son investissement initial est également élevé et il est propice au développement de certains types de colorations chimiques vu les conditions propices pour les réactions d'oxydation des extractibles du bois. On retrouve sous ce procédé deux principaux types de séchoirs, soit les séchoirs à chauffage indirect à la vapeur et les séchoirs à feu direct au gaz.

Dans l'est du Canada et le nord-est des États-Unis, ce procédé est très utilisé pour le séchage des bois de toutes épaisseurs de feuillus et de pin blanc. Les temps de séchage typiques pour la planche 4/4 varient de 6 à 11 jours pour le pin blanc et l'érable et de 16 à 30 jours pour le chêne (Mc Millen et Wengert 1978, Simpson 1991).

Le séchage à haute température n'est pas une nouvelle technologie. Déjà en 1867, un brevet aurait été déposé afin de mettre cette idée en pratique (Allen et Campbell 1967, Cassen 1979). Tiemann (1920) a étudié et décrit le principe du séchage à haute température. Suite à son travail, les premiers séchoirs à haute température furent mis en fonction pour le séchage commercial des bois résineux dans le nord-ouest des États-Unis (Boone 1979).

Le principe de fonctionnement du séchage à air chaud climatisé à haute température (ACC(HT)) est le même que le procédé à moyenne température excepté qu'il nécessite une ventilation et une température plus élevées.

Le séchage à haute température est un procédé à pression atmosphérique à des températures de l'air au-dessus de 100°C, généralement entre 110 et 120°C pour les espèces moyennement perméables à perméables (e.g. épinette, pin gris), et jusqu'à 150°C pour les espèces très perméables (e.g. *Pinus radiata*). Le séchage se fait généralement en présence d'air (i.e. $T_h < 100$ °C). En absence d'air ($T_h > 100$ °C) on parle alors de séchage en vapeur surchauffée. Les vitesses de l'air dans la pile de bois doivent être de l'ordre de 5 à 6 m/s et la largeur des piles relativement faible afin d'obtenir un séchage homogène.

Bien que le séchage sous vide en soit encore à ses premiers pas dans l'est du Canada, il est très populaire en Europe depuis au moins 38 ans (Borrero 1998). Il existe plusieurs variantes du séchage sous vide, lesquelles se distinguent surtout par le mode de transmission de la chaleur au bois. La variante la plus ancienne est le procédé dit "en discontinu" où la chaleur est transmise par convection pendant la phase de réchauffement à la pression atmosphérique. Pour les procédés en continu, la chaleur est soit transmise par conduction (séchage par contact), par convection (séchage en vapeur surchauffée) ou par rayonnement (séchage à fréquences radio). Ce type de séchage sous vide est surtout caractérisé par la diminution de la température d'ébullition de l'eau, et donc par l'intensification de l'évaporation en surface, par l'augmentation de la conductivité hydrique du bois et par la présence de gradients de pression totale dans l'épaisseur de bois favorables au flux d'humidité (Defo et al. 1999, Clément 2001). Dans le cas des procédés par convection, les débits sont empilés sur des baguettes comme dans un séchage conventionnel. Par contre, les procédés par conduction ou par rayonnement n'impliquent pas de baguettage du bois, les débits étant en contact direct avec des plaques chauffantes ou étant empilés bois sur bois entre des électrodes disposées de chaque côté de la pile (Borrero 1998, Clément 2001).

Le séchage sous vide offre cependant une capacité de séchage limitée et l'investissement initial pour une telle installation est relativement important. De plus, la manipulation du bois est plus difficile, surtout pour les séchoirs sous vide à plaques chauffantes. Par contre, le séchage sous vide est beaucoup plus rapide et il permet de sécher une plus grande variété d'épaisseurs en même temps avec des niveaux de qualité comparables ou même supérieurs au procédé conventionnel. Dépendant de la variante utilisée, les temps de séchage sont de 2 à 10

fois plus rapides que le séchage conventionnel (Aléon et al. 1990, Borrero 1998). Pour le procédé continu en vapeur surchauffée, Clément (2001) a obtenu pour le hêtre et l'érable des temps de séchage d'environ deux fois plus courts que le séchage à moyenne température. Dépendant de la rigueur du programme de séchage utilisé, Tremblay et al. (2001) ont obtenu pour le chêne rouge de 25 mm d'épaisseur des temps de séchage variant de 6 à 10 jours.

1.2. Le programme de séchage

Le séchage du bois massif est un processus complexe qui consiste à amener le bois à une teneur en humidité précise, tout en respectant les contraintes de coût et de temps et en altérant le moins possible les propriétés du bois ainsi que la forme des produits à sécher. Pour arriver à cette fin, il faut adopter un programme qui maximise le taux de séchage et qui minimise les contraintes mécaniques et les variations d'humidité dans le bois. Un programme de séchage consiste en une série de températures sèche et humide permettant de soumettre le bois à des conditions variables de température et d'humidité relative adaptées aux différentes phases de séchage, à l'épaisseur des pièces et à l'espèce considérée.

De façon générale, l'opération de séchage peut se décomposer en six phases, soit la montée en température, l'étuvage, le réchauffage, le séchage proprement dit, l'équilibrage, le conditionnement et le refroidissement (Aléon et al. 1990). La montée en température consiste à réchauffer l'air de la cellule alors que le réchauffage constitue la montée en température progressive du bois. Cette étape doit être assez longue pour que le bois soit réchauffé dans toute sa masse. Aléon et al. (1990) rapportent que les espèces feuillues denses doivent subir un réchauffage plus long que les espèces résineuses. À l'état vert, un feuillu nécessite environ deux heures de réchauffage par centimètre d'épaisseur. Par contre, un résineux ne nécessite qu'environ une heure et demie.

L'étuvage consiste à traiter des sciages humides à la vapeur. En pratique, les bois sont exposés à de l'air saturé d'humidité à des températures variant entre 70 et 95°C. Ce traitement permet entre autres de relâcher les contraintes de croissance présentes dans la planche, d'accélérer le séchage et de rendre le bois plus apte à accepter les champs de

contraintes sans se déformer extérieurement (Fortin 2000). Cette opération permet aussi de stériliser le bois destiné à l'exportation à l'état vert et de détruire les insectes ou les champignons pouvant se trouver dans celui-ci. La première phase de séchage après étuvage tend à être plus rapide due à la présence d'un gradient de température favorable dans la masse du bois (Aléon et al. 1990).

La phase de séchage est la période pendant laquelle le bois perd son humidité. Cette phase peut être divisée en deux grandes périodes, soit celle au-dessus du point de saturation des fibres (PSF) avec l'extraction de l'eau libre où l'on évite des températures trop élevées et des teneurs en humidité d'équilibre trop faibles, soit celle en-dessous du PSF où l'extraction de l'eau liée requiert des températures plus élevées et un air de plus en plus sec (Joly et More Chevalier 1980).

Les pièces de bois destinées à être refendues doivent nécessairement passer par les étapes d'équilibrage et de conditionnement. Dans le premier cas, on cherche à minimiser les variations de teneur en humidité à l'intérieur des pièces et entre les pièces. Dans le deuxième, on cherche à libérer les contraintes mécaniques induites au cours du séchage. Ces deux étapes sont évidemment cruciales pour le bois séché à haute température à cause des fortes dispersions d'humidité en fin de cycle et des niveaux élevés de contraintes résiduelles (Boone 1984, Culpepper 1990). Notons que pour le bois de construction séché à une humidité moyenne de 15%, les étapes équilibrage et conditionnement sont souvent confondues dans une seule et même étape.

Durisova (1984) a testé les effets de l'équilibrage et du conditionnement sur la qualité de l'épinette de Norvège. Elle a trouvé que la période de 12 heures pour une épaisseur de 24 mm et que la celle de 26 heures pour une épaisseur de 50 mm (Règle Czech) peuvent être réduites et donner encore de bons résultats.

Maeglin et al. (1985) ont évalué les effets du séchage à haute température et la période d'équilibrage sur la réduction des contraintes longitudinales pour le peuplier jaune. Les températures expérimentées furent 93°, 116°, 127° et 143°C et les temps d'équilibrage furent

de 10, 20, 40 et 100 heures à 10% d'humidité d'équilibre. Les meilleurs résultats ont été obtenus avec un séchage à 116°C pendant 28 heures et un équilibrage de 20 heures. Cependant les résultats des traitements d'équilibrage ne furent pas très consistants.

Oliveira et Cai (2004) ont étudié l'effet de quatre périodes d'équilibrage et conditionnement (3, 6, 9 et 12 heures) et deux systèmes d'humidification (l'eau froide et la vapeur) sur la qualité finale et l'uniformité de la teneur en humidité lors du séchage du bois de construction du groupe EPS (épinette-pin-sapin). Ils ont trouvé que les périodes de traitement les plus longues (6, 9 et 12 heures) peuvent réduire la quantité de bois sous-séché et réduire aussi les contraintes résiduelles.

Finalement, la phase de refroidissement consiste à diminuer la température du bois dans le séchoir jusqu'à ce que la différence avec celle extérieure atteigne de 20 à 30°C. Ceci permet d'éviter un choc thermique qui pourrait provoquer des fentes à la surface du bois (Aléon et al. 1990).

1.3. Le séchage à haute température

1.3.1. Avantages du séchage à haute température

a) Consommation énergétique

On estime que le séchage du bois, jusqu'à une teneur en humidité moyenne de 15% utilise environ 70% de l'énergie totale requise pour la production du bois de sciage (Villière 1966). Cependant, la diminution des temps de séchage obtenue avec le procédé à haute température permet une réduction de la consommation énergétique de 25% à 60% (Schafer 1973, Boone 1984). Selon McCollum (1986), plus la durée du séchage est courte, moins il y aura de possibilités d'occasionner des pertes d'énergie au cours du procédé. Koch (1972) a effectué des expériences portant sur le séchage des pins du sud à haute température et rapporta une consommation en énergie deux fois moindre que celle requise pour le séchage à moyenne température (70-80°C). Par contre, Rosen (1979), Kininmonth et al. (1980) et Taylor (1982)

ont tous conclu que l'économie d'énergie réalisée en utilisant le séchage à haute température n'est que de l'ordre de 12 à 15%.

À cause des températures élevées, les séchoirs à haute température doivent d'une part, être isolés efficacement afin de limiter les pertes de chaleur par les parois et d'autre part, être construits avec des matériaux qui sont à la fois résistants à la chaleur et à la corrosion. La détérioration de ces équipements est toujours importante, particulièrement dans le cas du séchage d'espèces qui dégagent des acides organiques telles que le chêne rouge (Fiske 1990).

b) Temps de séchage

L'utilisation des hautes températures et de vitesses de l'air élevées dans le séchoir permettent de diminuer considérablement les temps de séchage (Boone 1984). Plus la température est élevée, plus l'évaporation est intense puisque l'air peut absorber plus de vapeur d'eau. Une température plus élevée accélère le passage de l'eau libre en phase gazeuse et contribue à augmenter le gradient de pression totale dans le bois et par le fait même le taux de séchage.

Kollmann et Côté (1968) mentionnent qu'une pièce de bois résineux à l'état vert, de 25 mm d'épaisseur a pu être séchée jusqu'à une teneur en humidité de 10% en 24 heures. Selon Aléon et al. (1990), la durée du séchage à haute température pour le bois résineux et les feuillus très tendres de 25 mm d'épaisseur varie entre 24 et 48 heures. Pour les feuillus tendres, faciles à sécher, la période de séchage est de 48 à 72 heures.

Selon la figure 1.1, la durée du cycle de séchage peut être réduite de deux à trois fois avec l'utilisation du procédé à haute température comparativement à celui à moyenne température (Cech 1975). Le séchage à haute température du bois d'épinette noire selon Cech et Huffman (1971) requiert moins de 15 heures pour obtenir une teneur en humidité de 19% et environ 23 heures pour atteindre 12% H. Ceci représente une diminution de 70% du temps de séchage requis par le procédé à moyenne température, qui exige 60 et 80 heures respectivement pour atteindre ces mêmes teneurs en humidité. Aléon (1982) a pu sécher à haute température du pin maritime d'une épaisseur de 27 mm de l'état vert jusqu'à une teneur en humidité de 7%

en 35 heures. Suite à d'autres travaux, Aléon (1988) rapporte que le pin maritime peut être séché à 130°C de l'état vert jusqu'à une teneur en humidité de 10 à 12% en moins de 24 heures, à un coût de 25% inférieur à celui obtenu si une température de 70°C avait été utilisée. En séchant du sapin, de l'épinette et du pin sylvestre à haute température, Aléon et al. (1988) indiquent que par rapport au séchage à moyenne température, les temps de séchage sont généralement de trois à quatre fois plus courts selon l'espèce pour passer de teneurs en humidité de l'ordre de 80% H à 10-12% H.

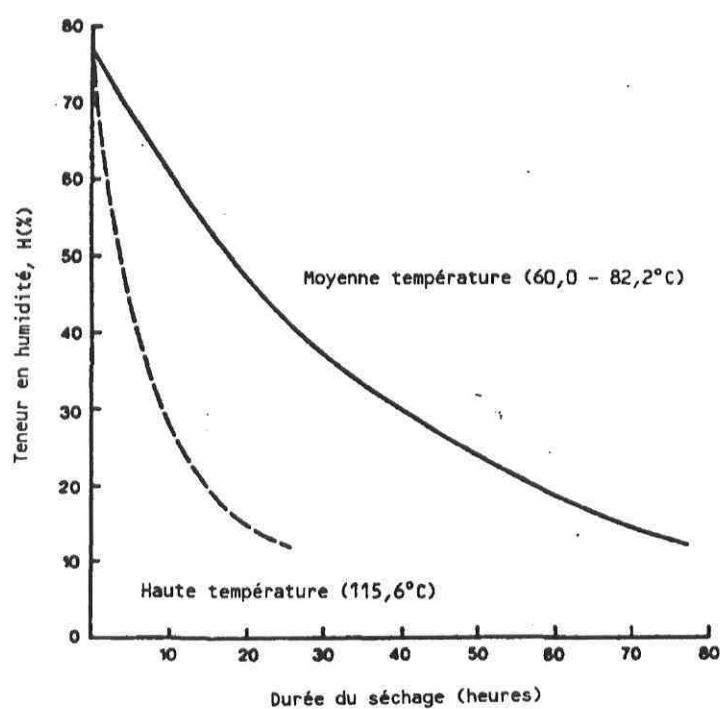


Figure 1.1. Courbes de séchage à haute et à moyenne températures pour l'épinette de 38 x 140 mm (adapté de Cech 1975).

McCollum (1986) indique que la productivité des séchoirs à haute température est de trois à quatre fois plus grande que celle des séchoirs conventionnels de dimensions comparables. Cette réduction du temps de séchage conduit donc à une diminution de la capacité du séchoir requise pour sécher un volume donné de bois annuellement (Schafer 1973, Boone 1979).

La vitesse de l'air à la surface du bois a une grande influence sur le taux de séchage au début du traitement lorsqu'il s'agit d'éliminer l'eau libre (Steinhagen 1972). Schafer (1973) indique que la durée du séchage à haute température peut être réduite en augmentant la vitesse de l'air dans le séchoir. Plus la vitesse de l'air est élevée plus grand est le débit d'air entre les rangées de planches. La quantité de chaleur disponible pour le bois par unité de temps est donc plus grande de même que la quantité de vapeur d'eau pouvant être absorbée par l'air. La vitesse de l'air a également un effet sur les coefficients de transfert de chaleur et de masse à l'interface bois-air. Des vitesses de l'air élevées donnent lieu à des écoulements d'air turbulents, ce qui favorise les transferts de chaleur et de masse entre le bois et l'air.

Pendant le séchage à haute température, les flux d'eau du centre des pièces vers la surface sont très élevés. Le débit d'air doit donc être suffisamment élevé pour absorber cette vapeur d'eau de la façon la plus uniforme possible d'un côté à l'autre des piles de bois. Pour le séchage à haute température du sapin Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirbel) Franco), Sumi et McMillen (1979) recommandent une vitesse de l'air de 4 m/s. Pour le séchage à haute température en général, Aléon et al. (1990) recommandent que la vitesse de l'air à travers la pile de bois soit de 5 à 6 m/s. Selon Steinhagen (1972), l'effet de la vitesse de l'air est plus prononcé pour certaines espèces que pour d'autres. Il ajoute que la vitesse de l'air a très peu d'effet sur la vitesse du séchage lorsque la teneur en humidité du bois est inférieure à 40%.

L'étuvage a été proposé afin de réduire davantage la durée du séchage à haute température. Ce traitement consiste à exposer le bois à la vapeur d'eau saturée pendant un certain temps. Ce prétraitement, tout comme la pré-congélation ou la précompression, peut considérablement accélérer le taux du séchage, surtout au début de ce procédé. L'étuvage peut être utilisé comme traitement de stérilisation du bois, détruisant efficacement les champignons, insectes et larves contenus dans le matériau. Dans certains cas, l'étuvage permet même de donner à certaines espèces une teinte déterminée (Villière 1966). C'est le cas par exemple du bois de hêtre. Cependant, afin de réduire au minimum une coloration non désirée, une température maximale de 60 à 90°C est recommandée. Villière (1966) recommande une durée d'étuvage de 18 heures par centimètre d'épaisseur. Aussitôt que ce

traitement est terminé et s'il n'y a aucun cycle de séchage prévu par la suite, une période de refroidissement de 5 à 6 heures doit être observée afin d'éviter l'affaissement du bois (Villière 1966).

Ce qui rend l'étuvage intéressant pour l'industrie est la facilité avec laquelle ce traitement peut être effectué avec les installations de séchage couramment disponibles. Peu de modifications dans les équipements ainsi que peu d'investissements sont nécessaires pour effectuer ce pré-traitement. Cependant, son efficacité dépend de l'espèce considérée (Simpson 1975). Selon Harris et al. (1989), l'étuvage a pour effet de réduire légèrement la teneur en humidité moyenne ainsi que de modifier la distribution de l'eau dans les pièces de bois.

c) Plastification du bois

Le séchage à haute température favorise la plastification du bois en début de cycle pour ainsi diminuer le gauchissement (à condition que le lestage soit suffisant). L'étuvage du bois de construction avant le séchage à haute température est une étape essentielle à une plastification efficace du bois. Ce traitement à la vapeur permet en effet à la surface du bois de maintenir un état de contrainte sécuritaire en s'ajustant par le biais du fluage aux contraintes mécaniques engendrées par le séchage rapide de la surface (Mackay et Rumball 1972).

Les connaissances existantes sur l'effet de l'humidité et de la température sur la plastification du bois permettent d'identifier une gamme de conditions hygrométriques à favoriser dans le séchoir pour profiter des avantages de ce phénomène. Pour une humidité de 27%, Goring (1963) a mesuré un point de transition vitreuse de la lignine autour de 90°C. Cet état de la lignine permet aux fibres de glisser les unes contre les autres, ce qui produit une réduction des contraintes induites. Le séchage à haute température rencontre facilement ces conditions en début de cycle. Cependant, comme l'humidité du bois diminue, le point de transition vitreuse de la lignine augmente considérablement. À des humidités de 13 et 4% H, Goring (1963) a rapporté des valeurs respectives de 115° et 159°C. Ceci corrobore les résultats de

Mackay (1973) qui a observé que les efforts de torsion minimaux de débits de pin radiata lors d'un cycle de séchage se produisaient entre 127 °C et 143 °C.

d) Stabilité dimensionnelle et hygroscopicité

Le séchage à haute température améliore la stabilité dimensionnelle du bois. L'hydrolyse des sucres imputable à l'utilisation des hautes températures affecte aussi les courbes de sorption du bois et abaisse d'environ 2% l'équilibre hygroscopique. Salamon (1969) rapporte que l'équilibre hygroscopique du sapin Douglas diminue significativement en fonction de l'augmentation de la température employée. Cette diminution de l'hygroscopicité augmente par le fait même la stabilité dimensionnelle du bois à l'usage.

1.3.2. Problèmes courants avec le séchage à haute température et moyens d'y remédier

Le séchage à haute température comporte aussi sa part d'inconvénients. Si le séchage est mal conduit, il risque fort en effet de mener à plusieurs types de défauts importants. Les défauts peuvent survenir avant, pendant et après le séchage. Il est important alors de connaître à quel moment les défauts pourraient survenir afin de pouvoir les éliminer. Le moment de détection des défauts est très important afin de mieux limiter les pertes monétaires lors du séchage. La figure 1.2 présente un programme de séchage type vis-à-vis les étapes critiques de production des défauts. Les principaux défauts susceptibles d'être rencontrés sont discutés dans les paragraphes qui suivent

a) Teneur en humidité finale variable

Les variations de teneur en humidité en fin de séchage suivant l'épaisseur ou la longueur des pièces peuvent causer des problèmes importants au cours de l'utilisation ultérieure du bois ou au cours des traitements de finition (refendage, peinture, collage etc.).

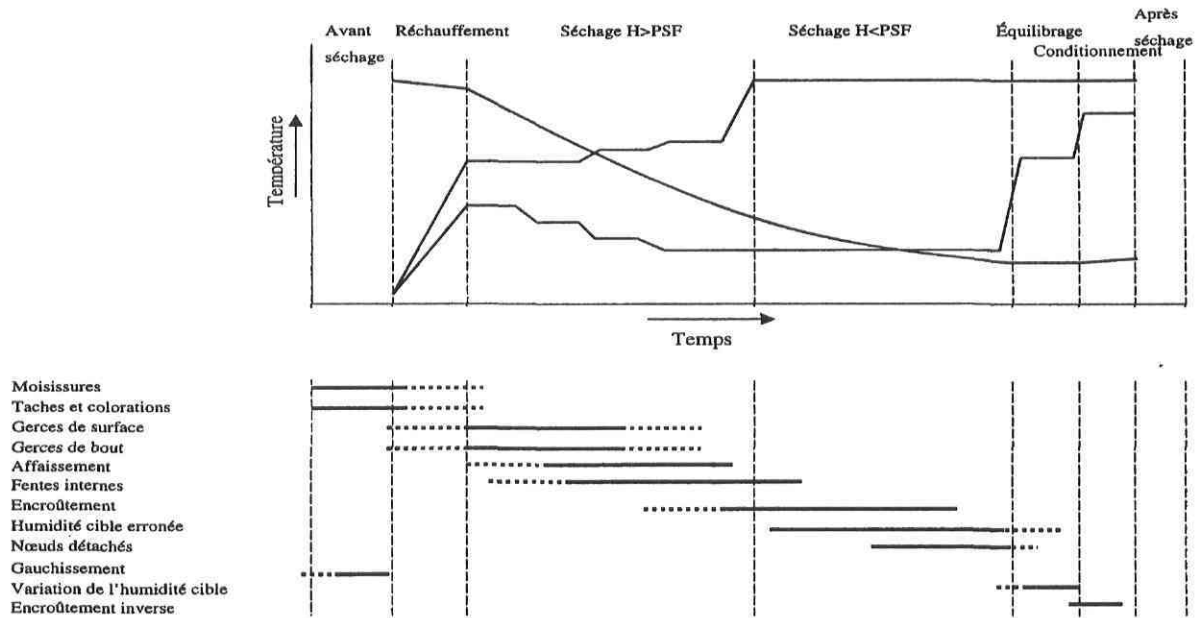


Figure 1.2. Liens entre le temps d'apparition des défauts et le programme de séchage (d'après Ngangué 2000).

Fabris (1993) a évalué la qualité du séchage à haute température du bois d'œuvre de l'est du Canada selon la norme N.L.G.A. (1987), de trois usines types, dont une travaillant avec l'épinette noire seulement, et les deux autres sur des proportions variées de sapin baumier et d'épinette noire. Cette norme exige que la teneur en humidité du bois de dimension à l'état sec soit de 19% ou moins, avec un maximum de 5% des pièces au-dessus de 19%. Le tableau 1.1 présente un résumé des teneurs en humidité mesurées avant et après séchage et la proportion des pièces qui rencontrent la norme de 19% H après séchage. Si on considère la totalité des pièces échantillonnées (sapin baumier et épinette), pour les usines n°1 et n°3, 63% de ces pièces avaient une teneur en humidité finale inférieure à 19 % H. D'autre part, pour l'usine n°2 seulement 33% des pièces échantillonnées avaient une teneur en humidité inférieure à 19%. Dans les trois cas la fourchette des teneurs en humidité finales excédait

Tableau 1.1. Teneur en humidité avant et après séchage et proportion des pièces rencontrant la norme de 19% H pour la teneur en humidité après séchage (d'après Fabris 1993).

Usine	Espèce	H moyenne avant séchage (M ₀ basée sur l'humidimètre) (%)	H moyenne après séchage (M ₀ basée sur la dessiccation) (%)	Proportion des pièces avec H < 19% après séchage (%)
1	Sapin baumier (n=115)	92,3±6,1 ¹ 33,6 ²	21,4±1,8 9,7	53
	Épinette (n=35)	66,6±11,6 35,0	12,6±0,8 2,4	97
	Sapin baumier et épinette (n=150)	86,3±5,7 35,5	19,3±1,5 9,4	63
2	Sapin baumier (n=17)	59,7±12,1 25,5	31,7±6,4 13,5	18
	Épinette (n=133)	38,5±1,3 7,6	20,6±0,7 4,1	35
	Sapin baumier et épinette (n=150)	40,9±2,1 12,9	21,9±1,1 6,9	33
3	Épinette (n=150)	42,5±1,1 7,0	18,5±0,5 3,1	63

¹ : moyenne + intervalle de confiance (au seuil de probabilités de 5%)

² : écart-type

donc largement celle admise par la norme N.L.G.A. (1987), en dépit du fait que cette norme soit déjà très tolérante.

Les normes régissant la production des produits à valeur ajoutée, sont beaucoup plus exigeantes au niveau de la variation de la teneur en humidité finale. Un traitement d'équilibrage adéquat est nécessaire pour homogénéiser l'humidité à travers les débits, d'autant plus que si le bois est destiné à la seconde transformation. Le pré-triage par classe d'humidité à l'état vert est également une mesure efficace pour diminuer la variation de la teneur en humidité finale.

b) Forts gradients d'humidité finale en épaisseur

Lors du séchage, des écarts de teneur en humidité entre la surface et le centre des pièces de bois se développent et persistent jusqu'à la fin de ce procédé. Ces écarts seront plus importants à mesure que l'épaisseur des pièces augmente. Des déformations risquent de s'ensuivre lors du ré-équilibrage à l'air, de l'usinage ou durant l'utilisation, ce qui cause inévitablement des pertes de qualité et de rendement. La figure 1.3 illustre les profils de teneur en humidité finale moyens déterminés par la méthode des lamelles dans le cadre de l'étude de Fabris (1993). Les profils de teneur en humidité selon l'épaisseur ont une forme parabolique, les différences de teneur en humidité entre la lamelle du centre et les lamelles de surface s'approchant de 10% H. Le tableau 1.2 présente pour l'ensemble des usines étudiées

Tableau 1.2. Écart moyen de teneur en humidité finale entre le centre et la surface des pièces (d'après Fabris 1993).

Usine	Espèce	n	Écart moyen H entre le centre et la surface (%)
1	Sapin baumier	115	15,0
	Épinette	35	2,8
2	Sapin baumier	17	20,0
	Épinette	133	7,9
3	Épinette	150	6,5

les valeurs moyennes des écarts maximums de teneurs en humidité finales en épaisseur. Les différences observées sont plus importantes dans le cas du sapin vu la plus grande fourchette de teneurs en humidité finales (tableau 1.1). On note un fait intéressant avec l'usine n°1 où l'écart maximum moyen est réduit à 2,8%. Le tableau 1.1 montre que l'humidité finale moyenne était alors de 12,6% avec une fourchette quand même assez étroite des teneurs en humidité individuelles.

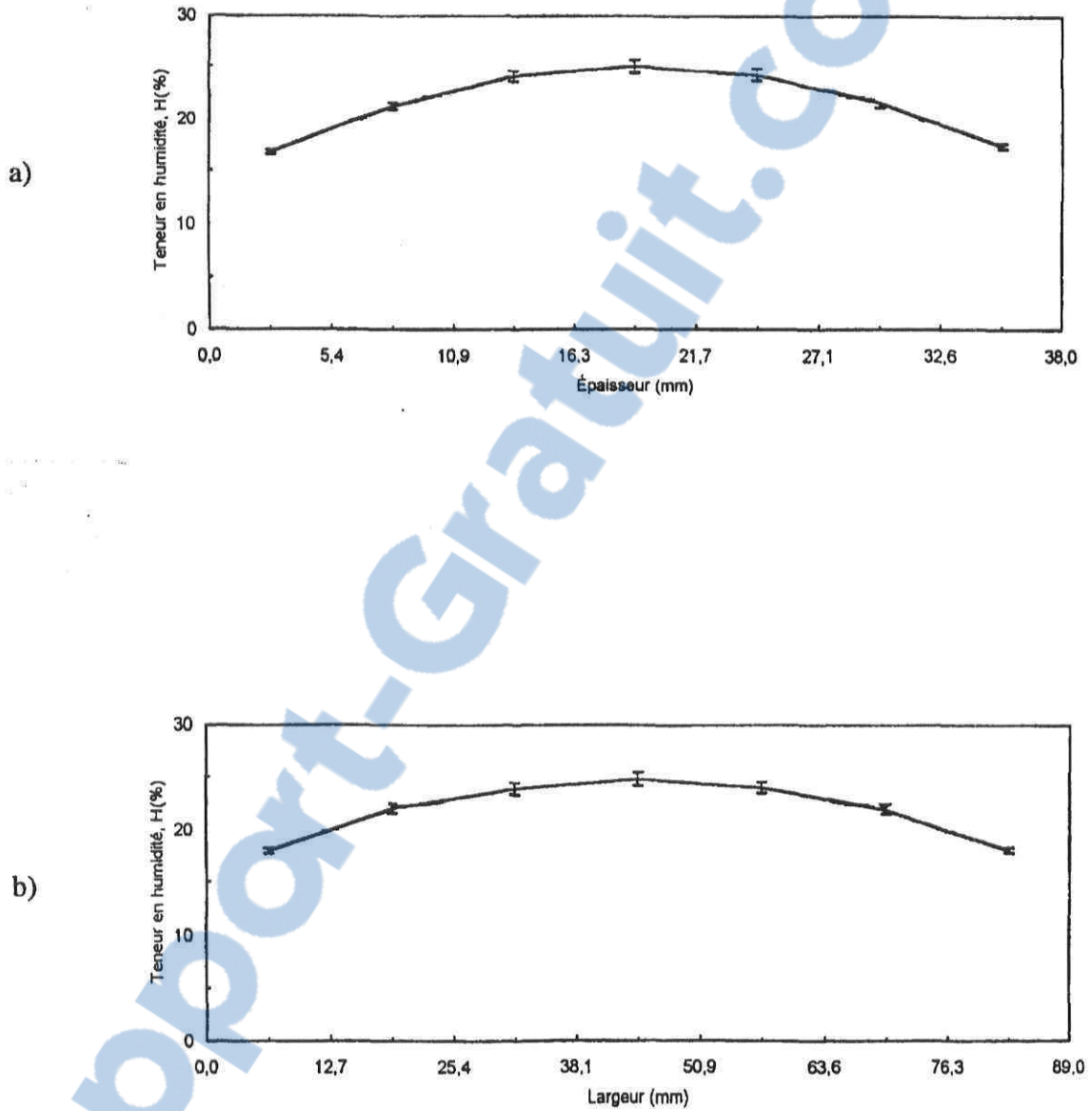


Figure 1.3. Profils de teneur en humidité moyens dans les pièces d'épinette et erreur standard-usine n°2 (n=399) : a) épaisseur; b) largeur (d'après Fabris 1993).

Même si l'humidité moyenne du bois a atteint le degré d'humidité finale désirée, le bois n'est pas pour autant en équilibre d'humidité avec l'air ambiant et n'est donc pas prêt pour une utilisation immédiate. Pour l'usinage ultérieur du bois, il est nécessaire que l'humidité soit homogène suivant toute son épaisseur. Par conséquent, l'équilibrage devient un traitement obligatoire pour réhumidifier les parties superficielles des pièces tout en continuant à diminuer l'humidité au centre.

c) Augmentation de la fréquence des gerces et fentes

Au début du séchage, la surface du bois tombe rapidement en dessous du point de saturation des fibres. Les zones superficielles tendent alors à se rétracter. Mais les zones internes restent pendant une proportion importante du temps de séchage au-dessus du point de saturation des fibres. Elles ne tendent donc pas à se rétracter et empêchent les zones superficielles de le faire. Il en résulte des contraintes de tension en surface du bois et, par réaction, des contraintes de compression à l'intérieur du bois.

Si les contraintes de tension en surface des échantillons sont supérieures à la résistance en traction en direction transversale, il se produit des gerces qui partent de la surface et qui progressent vers l'intérieur. Donc, les gerces qui apparaissent au début du séchage résultent de l'existence dans le bois d'un gradient d'humidité trop important, dû à une humidité relative de l'air trop basse.

La solution est de créer un climat plus humide tant que les zones internes du bois ont une humidité supérieure au PSF. Lorsque les gerces commencent à apparaître, il y a lieu d'humidifier légèrement les parties superficielles du bois. À cet effet, on peut relever la température légèrement (de 5 à 10°C) et porter l'état hygrométrique à 85-90%. La durée de l'opération est variable suivant l'essence et l'épaisseur; elle est de l'ordre d'une demie-heure à une heure. On doit arrêter l'opération lorsque les gerces se referment (Aléon et al. 1990). Ce défaut affecte surtout le bois à forte épaisseur et les feuillus à gros rayons (chêne, hêtre). Les gerces de surface ont tendance à se refermer en fin de séchage mais peuvent aussi parfois initier des gerces internes (Cech et Pfaff 1980).

À l'instar des gerces de surface, les gerces ou les fentes de bout sont le résultat d'une trop forte différence de retrait entre l'extrémité des pièces ($H < PSF$) et le centre plus humide de la planche. Plus la différence entre la perméabilité du bois en direction longitudinale et celle dans le plan transversal est grande, plus élevé est le danger de gerces ou fentes de bout. C'est notamment le cas du chêne rouge qui en plus possède des gros rayons qui constituent des plans de faiblesse pour la fissuration.

En général, les gerces de surface causent plus de dégradation pour le séchage à haute température que pour celui à moyenne température (Kimball et Lowery 1967). Les gerces de bout sont également plus profondes avec l'augmentation de la température (Sumi et McMillen 1979)

Dans une étude similaire au présent travail, Duplain et al. (2000) ont noté une présence importante de gerces internes sur le 2x3 d'épinette noire séché à haute température à une teneur en humidité d'équilibre de 10% H. La présence de fibres torse et un séchage trop rapide en début de cycle furent alors identifiés comme étant les deux causes principales du fendillement interne.

d) Collapse du bois

Le collapse du bois est caractérisé par des effondrements cellulaires localisés dus à des pressions capillaires trop élevées sur la paroi des cellules au moment où l'eau quitte les cavités cellulaires. L'affaissement se manifeste le plus souvent par une surface plus ou moins ondulée du bois. Si le collapse est sévère, il y a apparition de fentes internes dans le bois, invisibles de l'extérieur. Le collapse est associé à de hautes températures et à un taux de séchage élevé en début de séchage. Mullins (1981) rapporte que l'affaissement peut être évité en préséchant le bois à l'air libre jusqu'à une teneur en humidité adéquate. Arganbright (1981) propose de réduire la température sèche pendant le séchage afin de conserver le bois aussi résistant que possible et réduire la vitesse de séchage.

e) Augmentation du gauchissement.

Les principaux types de gauchissement sont la voilure, la cambrure, la torsion et le tirant à cœur. Le gauchissement est causé par des différences de retrait dans la pièce et par les champs de contraintes qui y sont associés. La voilure (voilement de face) désigne la courbure le long de la face d'une planche alors que la cambrure (voilement de rive) est une courbure le long de la rive d'une planche. Les deux derniers types de défauts sont causés par des différences de retrait longitudinal ou des contraintes de séchage axiales provoquées par la présence localisée de bois de réaction et de bois juvénile ou par la déviation du fil. Le tirant à cœur, causé par la différence entre le retrait radial et le retrait tangentiel, désigne la courbure de la face d'une planche. La torsion, souvent causée par la déviation du fil ou la fibre torse désigne un défaut caractérisé par le fait que les quatre coins d'une planche ne forment plus un plan (Joly et More-Chevalier 1980; Aléon et al. 1990).

Le bois juvénile et le bois de réaction amplifient ces phénomènes. Les pièces issues de bois de plantation, lesquelles contiennent généralement une forte proportion de bois juvénile, ainsi que celles obtenues à proximité de la moelle de la tige, sont donc particulièrement susceptibles de se déclasser sévèrement au séchage à haute température si un lestage adéquat n'est pas appliqué (Garrahan et Cane 1988).

Cependant, le séchage à haute température peut donner parfois de très bons résultats. Le tableau 1.3 présente le gauchissement moyen lors d'essais de séchage réalisés à différentes températures par Milota (2000). On peut observer que la voilure est le défaut le plus pénalisant, le deuxième étant la cambrure, suivie de près par la torsion, les trois gauchissements demeurant très faibles. A l'instar de Kimball et Lowery (1967), Milota (2000) n'a pas trouvé un plus fort déclassement à haute température qu'à moyenne température.

Tableau 1.3. Pourcentage de déclassement dû au gauchissement selon la température de séchage (adapté de Milota 2000).

Température (°C)	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)
82	3,20	3,33	1,98
115	2,72	1,96	1,78
124	2,18	2,18	1,40
132	2,64	2,06	1,73

Le voilement de face et de rive sont deux défauts dus généralement au retrait longitudinal plus fortement associé à la présence de bois de réaction ou de bois juvénile sur une face ou une rive de la pièce. Une pente du fil importante ou la présence de nœuds sur une rive peuvent également causer ces déformations.

On retrouve généralement de la torsion chez les pièces provenant de billes à fil spiralé ou chez les pièces dont la pente du fil est forte. Dans les deux cas, l'angle que forme le fil du bois avec la surface de la pièce a pour effet d'induire une composante du retrait radial ou tangentiel.

Le gauchissement est relié aux propriétés physiques du bois et ne peut donc pas, en théorie, être imputé à l'opération de séchage en elle-même. Toutefois, la qualité des empilements a un effet majeur sur le gauchissement. Il est possible de limiter le gauchissement par une bonne technique d'empilage. Au contraire, une technique d'empilage inadéquate aura pour effet de l'amplifier, ceci étant dû à la baisse de résistance mécanique du bois associée aux températures élevées utilisées lors de l'opération de séchage. Cette baisse de résistance mécanique peut toutefois être avantageuse lors du séchage. En effet, il est connu que la charge appliquée sur les pièces de bois lors du séchage a un effet prépondérant sur le gauchissement. Garrahan et Cane (1988) ont démontré que le gauchissement est beaucoup plus sévère dans les 10 premiers rangs à partir du sommet que dans le reste des piles dans le cas du séchage des résineux du groupe d'espèces EPS. Ceci démontre le potentiel que

présente l'utilisation d'une charge morte au sommet des piles afin de réduire le gauchissement à condition que cette pratique s'avère être économiquement réalisable. Il faut toutefois mentionner que l'utilisation d'une charge morte implique que les empilements soient de très bonne qualité, sinon le gauchissement risque d'être plutôt amplifié par la charge. Par exemple, les variations en épaisseur des débits ou des baguettes risquent fort d'annuler l'effet bénéfique du lestage, voire de provoquer l'effet inverse.

f) Le bois tend à jaunir

On peut identifier deux types de colorations chimiques provenant du séchage (USDA 1988) :

- Les colorations dues aux réactions chimiques entre les extraits du bois et la vapeur d'eau contaminée par des dépôts de fer ou de sel.
- Les colorations dues aux réactions d'oxydation ou aux réactions enzymatiques entre les extraits du bois et l'air ambiant qu'on appelle taches (e.g. coloration brune du pin).

Salamon (1969) prétend que la coloration plus foncée du bois est une conséquence inévitable du séchage à haute température. Sumi et McMillan (1979) indiquent que le séchage du sapin Douglas à des températures de 100 à 110°C favorise la coloration superficielle du bois. Suite à une étude portant sur des pièces de 120 x 160 mm d'épinette séchées à haute température, Mauritz (1992) a observé une coloration plus foncée à travers l'épaisseur des pièces et une coloration brune foncée ou noire à la surface.

Lors du séchage à haute température de madriers d'épinette, Cech et Huffman (1971) ont noté une plus grande exsudation de résine et un plus fort brunissement à la surface des fibres qu'au séchage conventionnel. Par contre, après rabotage l'apparence des madriers était identique à celle du matériel séché à moyenne température. Le même phénomène fut observé par Sumi et McMillan (1979) pour le séchage du bois de construction de sapin Douglas. La profondeur du jaunissement ou brunissement du bois serait dépendante de l'espèce et de la durée de la période de pré-étuvage (Duplain et al. 2000).

Parmi les modifications attribuables à l'hydrolyse des sucres, les bois lors du séchage à haute température montrent généralement un changement de couleur prononcé à la surface des débits et faible suivant l'épaisseur du débit. En cours de séchage, les mouvements d'eau entraînent et concentrent à la surface du bois le contenu du lumen des trachéides et les sucres des parois cellulaires. La dégradation thermique qui s'ensuit (aussi appelée caramélisation), serait selon Sehlstedt-Persson (1995) à l'origine du changement de teinte d'apparence jaune-brun en surface du bois. La présence d'acides aminés et de radicaux libres contribue aussi aux changements de couleur observés. Cette teinte prononcée en surface disparaît en grande partie au rabotage. Par contre, l'ensemble du débit dans son épaisseur, conserve une teinte jaune pâle attribuable à la caramélisation des hémicelluloses. Ces changements de couleur sont difficilement perceptibles à moyenne température.

Pour remédier à ce phénomène on doit sécher plus rapidement pour déplacer la zone d'évaporation en dessous de la surface. Les extraits seront alors déposés dans cette zone (Mullins 1981). Aléon et al. (1990) proposent de sécher à basse température tant que la teneur en humidité du bois est supérieure à 30% afin de limiter la formation de taches.

g) Les contraintes résiduelles (encroûtement) de séchage peuvent être importantes

Cech (1964) a suivi le développement des contraintes de séchage dans le plan transversal lors du séchage à haute température du bois d'érable à sucre. La figure 1.4 montre l'évolution des déformations observées, lesquelles montrent bien le renversement des contraintes en cours de séchage pour terminer le cycle avec un état de compression en surface et de tension au centre de la planche. Sur la base de la loi de Hooke, on peut déduire que les contraintes résiduelles sont relativement importantes et que seul un conditionnement efficace est susceptible de les abaisser à un niveau acceptable.

L'encroûtement désigne un état de contraintes résiduelles que l'on retrouve dans les pièces vers la fin du cycle de séchage. C'est un état de déformations permanentes qui empêchent les contraintes de se libérer complètement lorsque les gradients de teneur en humidité deviennent

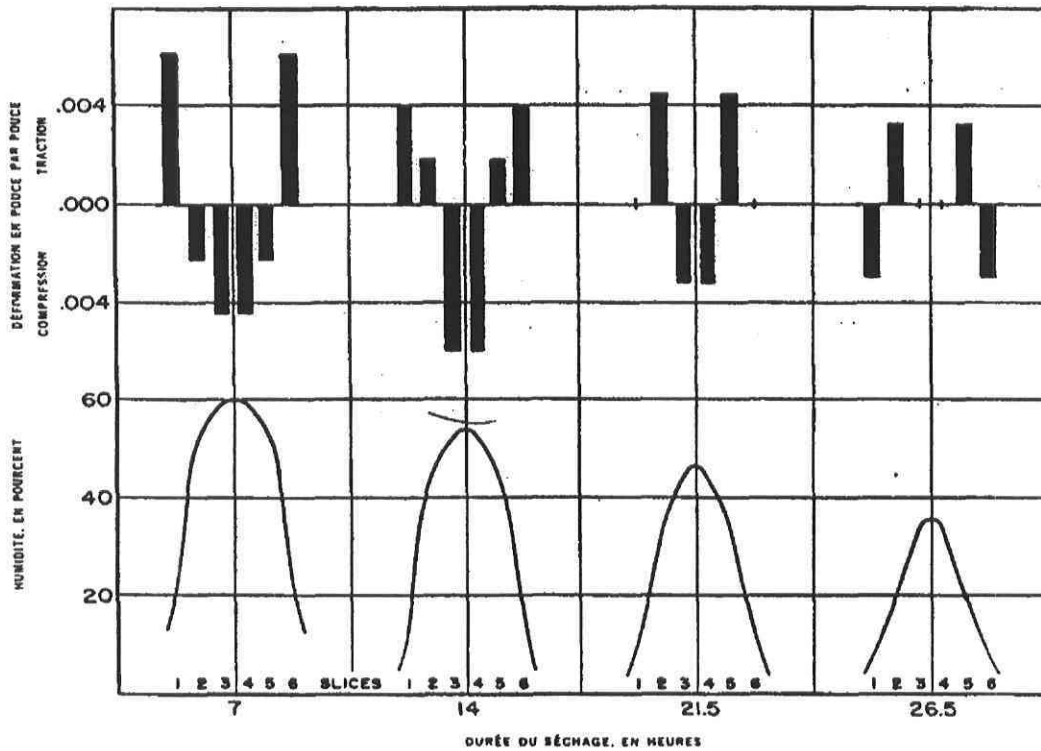


Figure 1.4. Déformation et répartition de l'humidité à divers stades du séchage à haute température du bois d'érable (adapté de Cech 1964).

nuls. Un début de séchage trop intense a pour effet de développer un gradient de teneur en humidité de la surface du bois vers le centre. On peut constater du retrait à la surface du bois seulement lorsque la teneur en humidité de cette dernière atteint le PSF. Par conséquent, une contrainte de tension se développe à la surface puisque le retrait ne peut s'effectuer librement tant que la teneur en humidité du centre demeure au-dessus du PSF. Si la contrainte de tension devient suffisamment élevée, une déformation permanente se produit à la surface du bois sous l'effet du phénomène de fluage. La surface est alors en tension contrairement au centre qui est en compression (Fabris 1993).

Vers la fin du séchage, il y a relâchement de la tension à la surface lorsque le retrait commence à se produire au centre de la pièce. En se contractant, le centre tire les surfaces vers l'intérieur. Une contrainte de tension se développe donc au centre puisque la déformation permanente à la surface ne permet pas au retrait de se produire librement au centre. Le bois à la surface est alors en état de compression.

Pour remédier à ce défaut il faut appliquer un traitement de conditionnement adéquat. Pour se faire, on augmente l'humidité d'équilibre de 3 à 4% au-dessus de la teneur en humidité cible, provoquant ainsi un gonflement de la surface de la planche de manière à amplifier davantage le phénomène d'encroûtement et à créer un fluage du bois en surface. Les contraintes sont alors relâchées partiellement. Une fois le traitement terminé, le bois est de nouveau exposé à une teneur en humidité d'équilibre qui correspond à celle de l'usage choisi. La teneur en humidité en surface s'abaisse donc lentement vers ce point d'équilibre, ce qui cause un retrait. Les contraintes finissent ainsi par se relâcher totalement. Il est important d'arrêter le conditionnement à temps pour ne pas causer le problème de l'encroûtement inverse (Fortin 2000).

h) Exsudation de résine

Aux températures élevées, les résines ont tendance à se liquéfier, produisant ainsi des exsudations à la surface du bois au cours ou après l'opération de séchage (Cech et al. 1973). Cech et Huffman (1971) mentionnent que le séchage à haute température cause davantage d'exsudation que le séchage à moyenne température. Par contre, ce problème peut être corrigé en rabotant le bois sur les quatre faces après le séchage.

i) Les nœuds non adhérents ont tendance à se détacher du bois.

Des nœuds détachés peuvent apparaître en fin du séchage lorsqu'une trop grande différence de retrait existe entre les nœuds non adhérents et le bois à proximité. Ce phénomène est amplifié par le séchage à haute température. Plus la teneur en humidité cible est faible, plus les nœuds non adhérents risquent de se détacher du bois.

Pour le séchage du bois de dimension de sapin Douglas, Sumi et McMillen (1979) rapportent que seulement quelques nœuds morts sont tombés hors des morceaux secs lors du séchage à moyenne température. Par contre, la plupart des nœuds vivants dans cette condition de séchage n'ont pas été affectés. Exception faite de petits nœuds vivants et quelques nœuds

morts, la majorité des nœuds du matériel séché à haute température sont tombés ou se sont desserrés.

Wang (2002) avait étudié le décollement des nœuds et elle a révélé que les planches d'épinette noire après refendage en épaisseur avaient une proportion de nœuds non adhérents beaucoup plus importante que les planches avant refendage. Le nombre et la proportion de ces nœuds augmentent avec le degré de siccité du bois, ce qui implique que le séchage à haute température des planches d'épinette noire à des teneurs en humidité en dessous de 9% risque de déclasser sérieusement le bois, et d'autant plus si la planche est refendue en épaisseur.

Les trous de nœuds sont une cause importante de dégradation du séchage à haute température car dépendant de l'usage prévu du bois, ceci peut invalider ou pas l'utilisation de cette méthode. Il n'y aurait aucune façon à ce jour d'éviter la chute de nœuds non adhérents, excepté le recours au séchage à basse température et à une humidité relative élevée.

j) Le retrait de rive augmente

Selon Milota (2000), le retrait de rive est généralement plus élevé avec le séchage à haute température qu'avec le séchage à moyenne température pour du bois séché à une teneur en humidité donnée. Le tableau 1.4 compare les retraits de rive et de face pour un chargement de pruche/sapin séché à haute température. Plus la température de séchage s'élève, plus le retrait de rive s'approche du retrait de face. Pour le séchage à haute température, il pourrait donc être nécessaire d'augmenter la dimension cible en épaisseur. Par exemple, pour une pièce de 40,1 mm d'épaisseur, Milota (2000) mentionne que la dimension cible en épaisseur pourrait devoir être augmentée de 0,13 mm à 0,25 mm.

Tableau 1.4. Retraits de rive et de face pour du 2 x 4 de pruche/sapin séché à différentes températures (adapté de Milota 2000).

Température (°C)	Retrait (%)	
	Rive	Face
82	3,05	3,66
115	3,26	3,74
124	3,47	3,73
132	3,52	3,69

Les travaux de Girard (2003) et de Duplain (2003) sur le bois d'épinette ont montré un effet beaucoup plus marqué du séchage à haute température sur l'augmentation du retrait de rive au détriment du retrait de face. Ceci s'explique par un plus fort fluage sur la face des débits causé par la température élevée, ce qui cause une diminution du retrait de face et, par effet de Poisson, une augmentation du retrait de rive.

1.3.3. Recherche du séchage à haute température dans l'est du Canada

Dans l'est du Canada, les espèces séchées le plus souvent par le procédé à haute température sont le pin gris, l'épinette noire, l'épinette blanche, le sapin baumier et le pin rouge (Cech et al. 1973; Huffman 1976). Le séchage à haute température des bois feuillus n'est cependant pas pratiqué, bien que la littérature y montre un certain potentiel. En général, les bois légers tels que le peuplier faux-tremble, le tilleul d'Amérique et l'érable rouge peuvent être séchés à haute température avec très peu de défauts (Boone 1984). Il n'en est pas de même pour le chêne rouge, l'érable à sucre, le hêtre d'Amérique ou le noyer noir. Ces bois, s'ils sont très humides, ne peuvent être séchés par ce procédé si on désire produire du bois exempt de fentes (Boone 1984). Ceux-ci doivent subir au préalable un pré-séchage afin d'abaisser leur teneur en humidité jusqu'à 30% (Villière 1966).

Quand la teneur en humidité initiale du bois varie beaucoup, surtout si on est en présence d'un mélange d'espèces, il est difficile de réaliser un séchage homogène à haute température. Afin de minimiser le sur ou le sous-séchage, Quarles et Wengert (1989) suggèrent de trier le bois au préalable selon la teneur en humidité.

Jusqu'à présent, le séchage à haute température en milieu industriel a été limité aux espèces dont la perméabilité est élevée et possédant une faible concentration en extraits. Les extraits ont souvent tendance à se déposer dans les ponctuations des parois cellulaires gênant ainsi au mouvement de l'eau pendant le séchage (Haygreen et Bowyer 1989). Pour ces espèces, l'affaissement est généralement faible lorsqu'elles sont exposées à une température élevée.

Wang (2002) a démontré qu'il est possible de sécher à haute température la planche d'épinette noire à 10% H avec 90% du chargement entre 8 et 12% H, et cela dans un temps raisonnable et avec peu de gauchissement et de contraintes résiduelles de séchage. Une période d'équilibrage de 15 h s'est montrée suffisante pour minimiser les variations d'humidité entre les planches et les gradients d'humidité en épaisseur. Le niveau de gauchissement avant et après refendage en largeur fut très similaire. L'effet du niveau de lestage $1,2 \text{ kN/m}^2$ et $4,8 \text{ kN/m}^2$ (25 et 100 lb/pi²) sur le gauchissement s'est avéré négligeable sauf pour la voilure après refendage en largeur.

Une étude similaire sur des colombages 2x4 d'épinette blanche de plantation a été effectuée par Girard (2003). Six chargements furent séchés sous lestage à une teneur en humidité cible de 10%, avec trois répétitions pour chacun des procédés à moyenne et à haute température. Le temps de séchage fut de 100 heures pour la moyenne température et 60 heures pour la haute température. Les deux procédés ont permis d'atteindre la teneur en humidité cible à l'intérieur de $\pm 0,5\%$ H avec plus de 90% des débits entre 8 et 12% H. Le séchage à haute température a permis de réduire le niveau moyen de voilure, de cambrure et de torsion par rapport au séchage à moyenne température mais pas de façon significative. Cependant, la quantité de colombages déclassés par le gauchissement fut significativement moindre pour le séchage à haute température (16,5%) que pour le séchage à moyenne température (27,3%).

Dans la même étude, le retrait en épaisseur fut plus élevé et celui en largeur fut plus faible pour le séchage à haute température que pour celui à moyenne température. La différence de teneur en humidité finale entre le cœur et la surface fut inférieure à 1,5% dans les deux cas. Les contraintes résiduelles de séchage à travers l'épaisseur et suivant le fil étaient cependant toujours présentes après conditionnement, mais pas à un niveau inquiétant pour l'usinage. Très peu de gerces de surface ou de gerces internes furent observées pour les deux procédés bien que le séchage à haute température ait causé plus de fendillement dans les nœuds.

Durant la même période, Duplain (2003) rapportait les résultats d'une étude sur le séchage à haute température du 2x3 d'épinette noire destiné aux produits à valeur ajoutée. Deux niveaux de lestage ($1,2 \text{ kN/m}^2$ et $9,6 \text{ kN/m}^2$; 25 et 200 lb/pi²) et deux temps d'étuvage (4 et 10 h) furent considérés. La stratégie de séchage adoptée a démontré qu'il est possible de sécher le 2x3 d'épinette noire à 10% H avec 90% du chargement entre 8 et 12% H et ce, avec un niveau minimum de gauchissement et de contraintes résiduelles de séchage. Le temps de séchage fut cependant le double que celui normalement observé pour le 2x3 destiné aux usages en construction. Un problème de gerces internes est apparu dans une proportion importante des débits. Cependant, un passage graduel du pré-étuvage au séchage à haute température a évité la formation de ces gerces. Une période d'équilibrage de 15 à 18 h semble suffisante pour minimiser les variations d'humidité entre les débits et les gradients d'humidité en épaisseur. La torsion et la cambrure furent les deux formes de gauchissement qui ont causé le plus de déclassement. En moyenne, 31% des débits ont perdu au moins une classe pour le lestage de $1,2 \text{ kN/m}^2$ (25 lb/pi²) comparativement à 8% seulement pour le lestage de $9,6 \text{ kN/m}^2$ (200 lb/pi²). Le niveau de gauchissement après refendage en épaisseur et en largeur fut comparable à celui avant refendage, sauf pour la cambrure après refendage en largeur, défaut qui semble imprévisible.

Tremblay (2003) a étudié le comportement du sapin baumier au séchage à haute température. Trois chargements furent utilisés afin d'obtenir une teneur en humidité finale de 15% H. Le premier comportait une étape préalable de séchage à l'air jusqu'à 50% H, Le deuxième comportait aussi une étape préalable de séchage à l'air jusqu'à 30% H. Le troisième chargement fut séché à haute température directement. Le programme de séchage de base

utilisé est montré au tableau 1.5. Les résultats ont montré une proportion élevée des pièces avec du collapse. Cependant, le pré-séchage à l'air jusqu'à environ 30% H fut bénéfique. L'effet de ce dernier traitement présentait moins de 2% des pièces avec collapse malgré l'emploi du programme à haute température par la suite. Donc, l'auteur a finalement conclu que le défaut de collapse observé lors du séchage de sapin baumier à haute température était causé par un séchage trop rapide en début de cycle.

Tableau 1.5. Programme de séchage à haute température utilisé par Tremblay (2003).

H (%)	Température sèche (° C)	Température humide (° C)	H _{éq} (%)
> 60	93	88	11,1
60-40	100	88	6,5
40-30	105	88	5,0
30-25	115	88	3,1
<25	115	82	2,5

Cech et al. (1974) dans une étude sur le séchage à haute température d'un mélange de trois espèces (épinette, pin et sapin baumier) ont rapporté que des mélanges de solives d'épinette et de pin gris avaient été séchés avec succès, soit de façon conventionnelle en 52 heures ou à haute température en 24 heures. Aussi, les lots de sapin baumier contenant beaucoup de poches d'humidité ne séchèrent pas bien lorsqu'ils étaient mélangés à l'épinette et au pin gris, sauf si on augmentait de beaucoup la durée du séchage. Cependant, ce séchage prolongé produisit une forte proportion de pièces sur-séchées d'épinette et de pin gris et diminua fortement leur qualité. De la même manière, le sapin baumier séché à haute température a développé des gerces de surface ainsi que du collapse dans les zones de poches humides.

Selon Langlois (1956), le peuplier faux-tremble est un bois qui sèche vite à haute température, sans difficulté particulière lorsque l'on a affaire à du bois normal et sain. De plus, il a remarqué une forte résistance au fendillement tant superficiel qu'interne, ce qui

permet de le sécher en utilisant de très hautes températures au thermomètre sec. Toutefois, à ces températures, une humidité relative trop basse retarde le séchage plutôt que de l'accélérer à cause de la cimentation intense que subit le bois. De plus le bois jaunit sur une faible épaisseur mais ce défaut disparaît avec un léger rabotage. Il est même possible d'éviter entièrement ce jaunissement.

Mackay (1974) a étudié le séchage à haute température ($T = 118^{\circ}\text{C}$; $T_h = 85^{\circ}\text{C}$) sur un mélange de 2x4 de peuplier faux-tremble et de peuplier baumier. Bien qu'au début le peuplier baumier était 50% plus humide que le peuplier faux-tremble, les deux essences ont pu se sécher ensemble jusqu'à 19% H. Le peuplier baumier serait ainsi plus perméable que le peuplier faux-tremble. Le principal défaut présenté sur ce dernier a été la cambrure.

Cech (1975) dans une étude sur le séchage à haute température (tableau 1.6) du bois de peuplier a obtenu un temps de 59 heures pour une humidité finale de 15%. Le degré de détérioration subi par les madriers était à peine plus élevé que celui obtenu avec un programme de séchage classique de 175 heures. Le comportement au séchage des madriers contenant des poches humides a été assez différent de celui des madriers normaux; ni le séchage à haute température, ni les traitements préliminaires ont permis le séchage des deux types de madriers ensemble sans que le matériel normal soit beaucoup trop asséché. De plus, l'auteur a constaté que la variation de l'humidité finale était plus élevée pour toutes les charges séchées à haute température.

Finalement, une étude intéressante fut réalisée par Ben Mhenni (2002) sur le séchage du mélèze laricin, bois considéré comme étant très réfractaire au séchage. Des planches de 32 mm d'épaisseur (5/4) destinées à la fabrication de parquets furent séchées sous un lestage de $7,5 \text{ kN/m}^2$ (150 lb/pi^2) par trois procédés de séchage différents (moyenne température, température élevée et haute température) à raison de deux répétitions par procédé. Le matériel était constitué d'un mélange de planches sciées sur dosse, sur quartier et à orientation des cernes inclinés. Un pré-rabotage a précédé le séchage dans tous les cas. Un pré-étuvage fut également appliqué dans le cas de procédés à température élevée et à haute

Tableau 1.6. Programme de séchage à haute température utilisé pour des madriers de peuplier (d'après Cech 1975).

Teneur en humidité (%)	Étapes de séchage	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
De l'état vert à 15%	Réchauffement 3 h	94	94	20,3
	Séchage	105	94	7,0
	Conditionnement 3 ½ h.	96	94	15,0

température. Les temps de séchage pour les procédés à haute température, température élevée et moyenne température ont été respectivement de 74, 122 et 172 heures. Les objectifs de teneur en humidité cible et de fourchette de teneurs en humidité finales n'ont pas été pleinement réalisés. Un séchage arrêté prématurément et une humidité d'équilibre de l'air ambiant trop élevée pendant la période d'équilibrage en seraient les causes principales. Les retraits moyens de rive et de face furent très similaires, et cela pour les trois procédés de séchage. Parmi les défauts de gauchissement, la cambrure s'est révélée le plus pénalisant, suivie de la torsion et puis de la voilure. L'analyse de variance n'a pu détecter un effet de procédé sur le gauchissement absolu mais elle a montré que les procédés à haute température et à température élevée causent moins de déclassement sur la base des normes N.L.G.A. Aucun effet significatif du procédé ne fut détecté sur la proportion de nœuds décollés. Enfin, le séchage à haute température a causé un jaunissement permanent du bois en épaisseur, ce qui pourrait s'avérer un élément positif pour la stabilité de la couleur du bois lors de la mise en service.

1.4. Caractéristiques de la charge de bois qui affectent la qualité du séchage.

a) Caractéristiques anatomiques du bois (espèce)

En plus d'être hygroscopique, le bois est un matériau hétérogène et anisotrope. Il est hétérogène puisqu'il est composé d'éléments variés résultant du métabolisme d'un être vivant: l'arbre. Il est anisotrope puisqu'il n'a pas les mêmes caractéristiques dans toutes les directions. De plus, les propriétés du bois varient entre les différentes espèces et entre les individus d'une même espèce. L'espèce et l'orientation par rapport à la tige d'origine ont donc un effet très marqué sur le comportement d'une pièce de bois lors du séchage.

Si on se déplace du centre vers l'écorce dans la section transversale d'une bille de bois, on remarque cinq zones distinctes : la moelle, le duramen, l'aubier, le cambium et l'écorce. Les trois premières zones ont une importance majeure relativement au séchage du bois. En effet, on retrouve une certaine quantité de bois juvénile à proximité de la moelle. Le bois juvénile est défini comme le xylème secondaire produit par le cambium sous l'influence des méristèmes apicaux (Rendle 1960). La production de bois juvénile a généralement lieu pendant les 5 à 25 premières années de la croissance de l'arbre. À mesure que le diamètre de l'arbre augmente, les méristèmes apicaux s'alignent du cambium et la production de bois juvénile s'estompe.

Le bois juvénile possède plusieurs caractéristiques jugées indésirables. Entre autres, l'angle des micro-fibrilles dans la couche S2 des parois cellulaires est plus grand que dans le cas du bois adulte. Ceci résulte en un retrait longitudinal pouvant être 9 à 10 fois plus grand que celui du bois adulte (Senft et al. 1986). La présence de bois juvénile sur l'une des faces d'une pièce pourra donc résulter en du gauchissement de rive ou de face (cambrure, voilure).

Dans le cas des résineux, le teneur en humidité du bois dans l'arbre vivant est généralement beaucoup plus élevée dans l'aubier que dans le duramen (Cech et Pfaff 1980). La proportion de bois d'aubier contenue dans une pièce aura donc un effet prépondérant sur sa teneur en

humidité initiale, du moins dans le cas des bois résineux. Cette composante peut induire une variation de teneur d'humidité finale cible importante dans la charge.

La conductivité hydrique effective du bois de duramen est en général plus faible que celle du bois d'aubier dû aux problèmes d'aspiration des torus des ponctuations aréolées, de la présence de dépôts d'extraits sur les membranes, des perforations ou de thylls dans les vaisseaux (Siau 1984). Donc, autant chez les résineux que chez les feuillus, la proportion de duramen et d'aubier contenue dans la pièce aura un effet sur son comportement lors du séchage.

Une caractéristique anatomique du bois de première importance lors du séchage est la présence de bois de réaction. On retrouve ce type de bois occasionnellement dans les tiges et régulièrement dans les branches (nœuds). Il est produit par l'arbre sous l'effet de sollicitations mécaniques généralement dues à une déviation de la tige par rapport à la verticale ou de la branche par rapport à l'angle qu'elle forme normalement avec la tige. Chez les résineux, le bois de réaction est formé dans les zones soumises à des contraintes de compression, d'où son nom de bois de compression. Chez les feuillus, on le retrouve dans les zones soumises à des contraintes de tension. On l'appelle donc bois de tension. Dans les deux cas, le bois de réaction a pour fonction de ramener la tige à la verticale ou la branche à sa position normale (Panshin et de Zeeuw 1980).

La présence de bois de réaction est indésirable dans le bois de sciage. Ceci s'explique par son retrait longitudinal supérieur. En effet, chez les résineux, le retrait longitudinal du bois de réaction peut atteindre jusqu'à 10 fois celui du bois normal alors que chez les feuillus, il peut être de 3 à 5 fois plus grand (Panshin et de Zeeuw 1980). La présence de bois de réaction sur une face ou une rive d'une pièce peut donc être la cause de gauchissement très sévère.

Beard et al. (1993) ont évalué l'impact des caractéristiques de croissance sur la voilure pour 438 poutrelles de qualité n° 2 et 3 de catégorie structurale (bois de charpente de pin du Sud de dimensions 38 mm x 140 mm x 4,88 m). Le bois juvénile, l'orientation du fil, la masse volumique, le bois à croissance rapide, la quantité de nœuds, et la grosseur des nœuds n'ont

eu aucun impact significatif sur la magnitude de la cambrure, de la voilure ou de la torsion dans le bois de charpente évalué. Le bois de compression a cependant affecté de manière significative la cambrure et la voilure. Les auteurs concluent que la plupart de ces défauts ont été provoqués par des facteurs autres que les caractéristiques de croissance testées.

b) Type de débit

Les trois directions principales définissent les trois plans principaux du bois. Le plan transversal est défini par les directions radiale et tangentielle, le plan tangentiel est défini par les directions longitudinale et tangentielle et le plan radial est défini par les directions longitudinale et radiale. Le type de débit utilisé pour produire une pièce donnée détermine son orientation par rapport à la bille d'origine. Cette orientation a un effet sur le comportement de la pièce lors du séchage en ce qui a trait au taux de séchage. Le retrait en direction tangentielle est environ deux fois plus grand que celui en direction radiale (Jessome 1977). Le retrait en épaisseur et en largeur de la pièce sera donc fonction de son orientation. La conductivité hydrique effective est fonction de la direction considérée. Elle est plus grande en direction radiale qu'en direction tangentielle dans un rapport pouvant varier entre 1/1 et 25/1 en fonction de la teneur en humidité et de la température (Cloutier et Fortin 1993; Tremblay et al. 2000). Comme le mouvement de l'eau se produit surtout perpendiculairement à la grande face, le taux de séchage sera donc fonction de l'orientation de la pièce.

c) Teneur en humidité initiale

La teneur en humidité initiale doit être uniforme. Quand le séchoir est rempli avec une charge de teneur en humidité initiale très variable, le séchage sera d'abord basé sur les planches les plus humides, les planches les plus sèches prenant alors un temps plus long que nécessaire pour sécher, ce qui est le prix à payer pour uniformiser l'humidité finale du chargement. Cette stratégie est utilisée quand l'humidité finale voulue est de 8% ou moins. Il n'est pas pratique de sécher du bois d'œuvre dont l'humidité cible est de 15% et dont les valeurs d'humidité à l'état vert s'étendent par exemple de 50% pour les planches provenant du duramen à 170% pour les planches provenant de l'aubier. Avant que l'aubier atteigne

l'humidité cible, le duramen sera trop sec et il n'est pas économique de ré-humidifier des débits à 10% H et moins à des humidités de 12 à 15% (Savard 1999).

Le pré-triage du bois vert devient alors une solution intéressante et économique pour l'optimisation des temps et de la qualité du séchage. Notons que plusieurs usines de sciage pratiquent le pré-triage dans l'est du Canada, principalement dans le cas du sapin baumier qui montre des distributions très larges d'humidité à l'état vert.

d) Variations en épaisseur

Simpson et Tschernitz (1998) ont constaté que les variations extrêmes en épaisseur ont aggravé le gauchissement, particulièrement la torsion. Le tableau 1.7 montre les résultats de cette étude où on peut observer clairement que les avivés trop minces se sont déformés plus fortement que les avivés qui étaient en contact avec les baguettes. Cependant, même avec un bon contact entre les avivés et les baguettes, une quantité substantielle de voilement longitudinal s'est développée, ce qui indique que la réduction de la variation en épaisseur peut réduire mais n'élimine pas nécessairement le gauchissement. On a aussi observé que les avivés contenant de la moelle se déformaient plus que ceux sans moelle, et que les avivés sciés près du centre de l'arbre se déformaient plus que ceux éloignés du centre de l'arbre.

Les variations en épaisseur conduiraient à une plus grande plage de teneurs en humidité finales et seraient responsables d'une part importante du gauchissement au séchage (Simpson et Tschernitz 1998). Ces variations simultanées de l'humidité et de l'épaisseur favoriseraient en particulier la torsion qui en retour serait imputable au faible diamètre des tiges ainsi qu'à la présence simultanée de bois juvénile et de bois mature.

Tableau 1.7. Comparaison de différents types d'empilage sur le niveau de gauchissement de colombages de pin du Sud (d'après Simpson et Tschernitz 1998).

Variation en épaisseur	Voilement longitudinal (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)
Sans variation	7,94	5,24	1,99
Variation max.	10,00	6,03	3,55
Aléatoire	9,37	6,51	2,85

e) Caractéristiques des baguettes.

Les dimensions des baguettes et leur espacement dans la pile influencent fortement la qualité du séchage. Dans le cas des feuillus, l'épaisseur des baguettes serait idéalement plus faible (13 à 15 mm) de façon à limiter la circulation de l'air dans la pile en période de temps chaud et sec, évitant ainsi la formation de gerces ou de fentes. Quant aux résineux, il est préférable au contraire d'utiliser des baguettes épaisses (19 à 25 mm) afin d'augmenter la circulation de l'air dans la pile car le danger le plus à craindre est le développement de champignons de moisissure (*Penicillium* sp.; *Aspergillus* sp.) ou de coloration (*Aureobasidium* sp.; *Ceratocystis* sp.) et les taches de baguettes (colorations chimiques) (Chanrion et Davesne 1991).

En principe, l'épaisseur des baguettes devrait augmenter avec l'épaisseur des sciages, surtout s'il s'agit de bois perméables. En pratique cependant, on est généralement contraint à n'utiliser qu'une seule épaisseur de baguettes, soit l'épaisseur qui est utilisée en séchoir. Quant aux essences choisies pour la fabrication des baguettes, on doit d'abord rechercher du bois blanc (aubier) à faible teneur en extraits (eg. bouleau, érable, tremble, épinette) (Simpson 1991; Mc Millen et Wengert 1978).

Pour l'espacement des baguettes, règle générale, plus le bois est mince moins l'espacement est grand. Pour le séchage à l'air libre des feuillus, Chanrion et Davesne (1991) recommandent un écartement de 80 cm à 100 cm pour des bois de plus de 60 mm

d'épaisseur, de 50 à 70 cm pour des bois de 30 à 50 mm d'épaisseur, et de 20 à 30 cm pour des sciages de moins de 30 mm. Selon McMillen et Wengert (1978), l'espacement des baguettes de 41 à 61 cm est satisfaisant pour de nombreux bois de feuillus. Toutes les rangées de baguettes sont pleinement supportées et leur alignement est parfaitement vertical. Le bois de bonne qualité et particulièrement le matériel de faible épaisseur devraient bénéficier de l'espacement le plus proche possible, soit 30 cm.

Garrahan et Cane (1988) dans une étude portant sur les pertes encourues à l'étape du séchage à moyenne et à haute température, concluent qu'en moyenne 15,6% des sciages sont déclassés lors du séchage. Les auteurs attribuent une partie de ces pertes à l'interaction de plusieurs facteurs comme le mauvais alignement des baguettes ou des traverses de chariot, un manque de formation du personnel et des plages de teneurs en humidité finales trop grandes.

Wang (2002), a testé deux niveaux d'espacement des baguettes (30 cm et 60 cm) pour minimiser le gauchissement après séchage et après rabotage. Elle a trouvé que l'effet de l'espacement des baguettes est négligeable avant refendage mais significatif pour réduire la cambrure et la voilure après refendage en largeur.

f) Effet du lestage

L'effet bénéfique du lestage des piles sur la qualité du séchage est largement documenté dans la littérature. Mackay et Rumball (1972) ont constaté que le nombre de colombages de pin radiata rencontrant la catégorie "colombage" est passé de 13,4% en n'utilisant aucun lestage à 84,3% avec une charge morte de 10,5% kN/m² (220 lb/pi²). L'application de charges mortes sur le dessus des piles est maintenant commercialement utilisée en Australie et en Nouvelle Zélande avec le séchage du bois de construction de pin radiata. De plus en plus d'industriels québécois font aussi appel à cette stratégie de séchage.

Arganbright et al. (1978), lors d'essais de séchage à haute température sur des colombages de pin ponderosa, ont observé l'effet de la position en hauteur et l'effet du lestage 9,7 kN/m² (200 b/pi²) sur la diminution du gauchissement. Garrahan et Cane (1988) ont trouvé que la

qualité des colombages des rangées intérieures était supérieure à la qualité des colombages des rangées supérieures et que la voilure était à l'origine du déclassement du bois. La torsion était la forme de gauchissement la plus facile à contrôler suivie de la voilure alors que la cambrure était la plus difficile (Arganbright et al. 1978). Smith et Siau (1979) lors d'essais de séchage à haute température sur des colombages de 50 mm x 100 mm de pin rouge séché jusqu'à une teneur en humidité finale de 9% concluent qu'une charge de $9,7 \text{ kN/m}^2$ (200 lb/pi^2) réduit significativement toutes les formes de gauchissement. Aléon et al. (1988) lors d'essais de séchage à haute température sur des avivés de 48 mm x 68 mm de sapin, d'épicéa et de pin maritime, montrent que l'effet de l'application d'une charge de $7,5 \text{ kN/m}^2$ (155 lb/pi^2) cause une diminution du gauchissement de l'ordre de 30 à 40 % par rapport à des essais sur des avivés non lestés.

Tel que cité plus haut sur le 2x3 d'épinette noire, Duplain (2003) a trouvé que 31% des débits ont perdu au moins une classe pour le lestage de $1,2 \text{ kN/m}^2$ (25 lb/pi^2) comparativement à 8% seulement pour le lestage de $9,7 \text{ kN/m}^2$ (200 lb/pi^2).

g) Présence de poches humides

L'étude bibliographique de Hart et Thomas. (1967) confirme d'abord la présence fréquente de zones à teneur en humidité anormalement élevée dans plusieurs conifères. Ils définissent le "cœur humide" comme étant une zone interne du duramen sans caractère particulier autre que d'être plus humide que l'aubier adjacent; souvent même cette anomalie se rencontre sous la forme de zones quasi-saturées ayant un pourtour bien défini. Sa présence s'associe à certaines problèmes et défauts de séchage pour plusieurs espèces de bois.

Les données sur la résistance mécanique de bois à poches humides sont contradictoires. Certains auteurs ont mesuré des propriétés mécaniques plus faibles pour le bois à poches humides (Ward et Pong 1980) alors que d'autres ont mesuré des propriétés mécaniques plus élevées ou égales au bois sain (Wilcox 1968, Stojanov et Enthev 1968). Ward et Pong (1980) ont trouvé que la résistance mécanique de la lamelle moyenne était plus faible dans le bois à cœur humide que dans le bois normal. Ceci s'explique par la dégradation de la pectine

contenue dans la lamelle moyenne par la bactérie anaérobique *Clostridium*. Cette bactérie n'attaque ni la cellulose ni la lignine et en conséquence ne modifie pas la paroi secondaire des cellules (Shink et al. 1981).

À cause de la moins grande cohésion entre les cellules de bois à poches humides, certains défauts comme les roulures, le fendillement interne et l'affaissement se développent plus facilement dans ce bois que dans le bois sain et par conséquent affectent la qualité du séchage.

La plupart des espèces du genre *Abies* présentent du cœur humide. Sa distribution et quelques-unes de ses propriétés ont été décrites par divers auteurs, dont certains ont été cités au paragraphe précédent. Le bois humide se trouve ordinairement, bien que non exclusivement, dans le bois parfait à la base de la tige. De grandes quantités d'eau peuvent s'y accumuler et leur origine n'a pas encore été déterminée de façon concluante. Les chicots de branches mortes sont apparemment une porte d'entrée commune (Hart et al. 1967); la fréquente association entre un cœur humide et la pourriture du tronc ou des racines laisse croire que de telles blessures rendent possible la pénétration de l'eau de pluie ou du sol. Ces auteurs définissent comme cause possible, une production d'eau par les microorganismes, l'accumulation de cette eau résultant d'une faible perméabilité des tissus.

La présence et la fréquence de bois à cœur humide varient en fonction des espèces. Les poches humides apparaissent dans le bois des feuillus et des résineux, mais certaines espèces sont plus affectées que d'autres. Les espèces les plus affectées sont les peupliers (*Populus* spp.) et les sapins (*Abies* spp). Le degré d'infection varie selon les conditions des sites de croissance (Ward et Pong 1980). Le tableau 1.8 montre la susceptibilité de certaines espèces commerciales de l'est du Canada à la formation de poches humides. On remarque que la pruche de l'est et le sapin baumier sont les espèces les plus susceptibles aux poches humides.

Tableau 1.8. Susceptibilité de quelques espèces commerciales de l'est du Canada à la formation de poches humides (adapté de Ward et Pong 1980).

Espèce	Poches humides		
	Rares	Fréquente	Très fréquente
Pruche de l'est (<i>Tsuga canadenses</i> /L/(Carr.))			X
Sapin baumier (<i>Abies balsamea</i> L. Mill.)			X
Épinette blanche (<i>Picea glauca</i> (Moench.) Voss)	X		
Épinette noire (<i>Picea mariana</i> (Mill.) B.S.P.)	X		
Épinette rouge (<i>Picea rubens</i> Sarg.)	X		
Pin blanc (<i>Pinus strobus</i> L.)		X	
Pin gris (<i>Pinus banksiana</i> Lamb.)	X		
Pin rouge (<i>Pinus resinosa</i> Ait.)	X		
Mélèze laricin (<i>Larix laricina</i> (Du Roi) K.Koch)		X	
Chêne rouge (<i>Quercus rubra</i> L.)		X	
Chêne blanc (<i>Quercus alba</i> L.)	X		
Érable à sucre (<i>Acer saccharum</i> Marsh.)	X		
Érable argenté (<i>Acer saccharinum</i> L.)	X		
Érable rouge (<i>Acer rubrum</i> L.)		X	
Frêne blanc (<i>Fraxinus americana</i> L.)		X	
Frêne noir (<i>Fraxinus nigra</i> Marsh.)		X	
Hêtre à grandes feuilles (<i>Fagus grandifolia</i> Ehrh.)		X	
Peuplier faux tremble (<i>Populus tremuloides</i> Michx.)		X	
Bouleau à papier (<i>Betula papyrifera</i> Marsh.)		X	
Bouleau gris (<i>Betula populifolia</i> Marsh)		X	
Bouleau jaune (<i>Betula alleghaniensis</i> Britton)		X	

La perméabilité de bois à cœur humide peut être plus grande (Ward et Pong 1980, Ward 1986) ou plus faible que celle du bois de duramen normal (Chafe 1996, Lihra 1999). La capacité d'absorption d'eau est en général plus grande dans le cœur humide (Ward et Pong 1980, Ward 1986, Chafe 1996). Les facteurs responsables d'une baisse de la perméabilité sont l'aspiration des membranes des ponctuations aréolées chez les résineux (Ward et Pong 1980), la formation de thylles chez les feuillus et les dépôts de substances extractibles et du gel bactérien (sous forme d'une solution hypertonique) dans le lumen des cellules chez les résineux et les feuillus. Le gel bactérien ayant une pression osmotique plus élevée, il attire de l'eau du bois non-infecté et peut ainsi être responsable de la teneur en humidité élevée du bois à cœur humide (Chafe 1996). Une augmentation de la perméabilité est causée par la dégradation des membranes des ponctuations aréolées et par l'incrustation des torus (Ericksson et al. 1990). Cette incrustation diminue la grandeur des ouvertures dans le margo causant une diminution de la perméabilité des membranes des ponctuations non aspirées, mais elle évite l'aspiration complète des membranes des ponctuations. Le dernier aspect est dominant si la proportion de membranes de ponctuations aspirées est élevée.

Schneider et Zhou (1989) ont étudié le bois à cœur humide de quatre sapins baumiers de la région de Frédéricton, au Nouveau-Brunswick. Ces auteurs ont trouvé que la perméabilité longitudinale à l'air et à l'eau du bois à cœur humide est plus grande que celle du duramen normal et plus petite que celle du bois d'aubier. Ils ont calculé un ratio de 45 :6 :2 pour la perméabilité à l'eau du bois d'aubier, du cœur humide et du duramen normal. Le rapport pour la perméabilité à l'air à une pression de 50 kPa a été de 50 :9 :1. La faible perméabilité du duramen sain et du bois à cœur humide s'explique par l'aspiration des membranes des ponctuations. Des dépôts de substances cristallines sur les membranes des ponctuations du bois à cœur humide pourraient empêcher l'aspiration complète du torus et permettre un faible flux. Ceci est suggéré pour expliquer la plus grande perméabilité de bois à cœur humide par rapport à celle du duramen sain. La nature des dépôts n'a pas été déterminée par ces auteurs. La quantité de substances extractibles du bois à cœur humide est plus faible que celle contenue dans le duramen sain, mais plus grande que celle du bois d'aubier.

La teneur en humidité faible d'une pièce de bois séchée contenant des poches humides est très variable (Dokken et Lefebvre 1973, Ward et Pong 1980), diminuant ainsi sa qualité et sa valeur pour l'industrie des portes et fenêtres et du meuble où une distribution de teneur en humidité homogène est exigée. La qualité du collage du bois est également réduite puisqu'il y a un manque d'adhésion dans les zones de poches humides (Dokken et Lefebvre 1973, Ward et Pong 1980).

Garrahan et al. (1994) ont comparé la teneur en humidité initiale du pin gris, de l'épinette noire et du sapin baumier provenant du Québec. Un extrait des résultats obtenus est présenté au tableau 1.9. La teneur en humidité initiale moyenne ainsi que sa variabilité sont plus que deux fois supérieures à celles du pin gris et de l'épinette noire. Ceci est expliqué par la présence de poches humides dans le bois du sapin baumier.

Le fendillement interne, les roulures, les fentes et l'affaissement réduisent grandement la qualité du bois. Ces défauts sont plus souvent présents dans le bois à cœur humide que dans le bois normal et sont probablement reliés à l'affaiblissement de la lamelle moyenne tel que mentionné précédemment. Certains de ces défauts sont invisibles dans le bois vert et apparaissent seulement après le séchage.

Tableau 1.9. Variations de la teneur en humidité initiale entre les pièces de bois de sciage de pin gris, d'épinette noire et de sapin baumier (d'après Garrahan et al. 1994).

Espèce	Nombre d'échantillons	Teneur en humidité initiale moyenne (%)	Écart-type (%)	Valeur maximale (%)	Valeur minimale (%)
Pin gris	250	37	13	186	24
Épinette noire	245	45	14	176	27
Sapin baumier	253	114	34	207	41

CHAPITRE 2

MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1. Matériel d'essai

Les essais de séchage ont été réalisés sur trois espèces, soit l'épinette blanche (*Picea glauca* (Moench.) Voss.), le sapin baumier (*Abies balsamea* (L.) Mill.) et le peuplier faux-tremble (*Populus tremuloides* Michx.). Au total, neuf essais furent effectués à raison de trois essais par espèce (trois programmes différents). Cent colombages bruts furent utilisés pour chaque essai, six d'entre eux ayant servi de planches témoins.

2.1.1. Préparation du matériel d'essai

Les essais de séchage ont porté sur des colombages de dimensions nominales 2" x 4" x 8' (51 mm x 100 mm x 2,44 m). Le bois d'épinette blanche fut acheté dans une usine de la région de la Beauce. Le bois de sapin provenait d'une usine de la région de Québec. Les colombages de tremble provenaient d'une usine du bas du fleuve. Quatre lots de 100 colombages ont été jumelés pour les trois essences, le quatrième lot servant de groupe de réserve. Les colombages étaient en principe de grades 1 et 2, bien qu'un certain nombre de pièces étaient de grade 3, notamment dans le cas du sapin et du tremble. Tous les paquets furent placés dans un congélateur à -5°C jusqu'au moment des essais, en prenant soin de les recouvrir d'une toile de plastique afin de prévenir la perte d'humidité avant les essais. Juste avant chaque essai de séchage, les colombages furent éboutés à une longueur de 2,44 m et puis numérotés de 1 à 100.

2.1.2. Sélection et préparation des planches témoins

Avant de préparer le chargement pour le séchage, on devait d'abord effectuer la sélection des planches témoins pour faire le suivi du séchage. Cela fut fait sur la base de la masse à l'état vert. À partir d'un échantillon de 40 colombages choisi au hasard, deux planches étaient sélectionnées à ± 2 écarts-types de la masse moyenne (planches 1 et 6), deux planches à ± 1 écart-type de la masse moyenne (planches 2 et 5), et enfin deux planches autour de la masse moyenne (planches 3 et 4). Cette technique d'échantillonnage a permis d'obtenir six planches représentatives de l'échantillon sur la base de la courbe de distribution des masses initiales, ce qui normalement donne une assez bonne représentation de la fourchette des teneurs en humidité initiales.

Chaque planche témoin de 2,44 m de longueur fut sectionnée en deux parties égales dont les extrémités furent scellées au moyen d'une mince couche de silicone recouverte d'un papier d'aluminium. La première moitié (planchette A) a servi à la conduite du séchage par pesées périodiques. La planchette B a servi aux mesures de couleur (avant séchage, après séchage et après rabotage).

L'évaluation de la teneur en humidité initiale des planches témoins et de leur masse volumique basale fut effectuée en prélevant trois goujons de 10 mm de diamètre de la planchette A à trois positions suivant la longueur (0,3 m, 0,6 m, 0,9 m) et au tiers de la largeur. On numérotait ensuite les goujons pour les déposer immédiatement dans les pèses-filtres scellés pour éviter les pertes d'humidité. On remplissait les trous des goujons avec du silicone rouge qu'on appliquait également sur les extrémités des mêmes planches (le silicone était lui-même recouvert d'une feuille d'aluminium) pour empêcher le séchage en bout. On prenait soin de peser les planches avant et après l'application du scellant de bout pour estimer le facteur d'erreur sur le calcul de la masse anhydre. En dehors des manutentions, les planches témoins étaient gardées bien enveloppées dans une toile de plastique pour minimiser les pertes d'humidité. La dernière opération consistait à peser les pèses-filtres et les carottes puis à déterminer le volume des goujons par immersion dans l'eau. Par la suite

les goujons étaient séchés à l'étuve à 102°C et pesés 24 heures plus tard pour la détermination de leur masse anhydre.

2.2. Méthodes

2.2.1. Séchoir expérimental

Les essais ont été effectués dans un séchoir expérimental Cathild de 2,5 m³ de capacité qui est asservi à l'aide d'un régulateur de la compagnie MEC Inc. Le séchoir est équipé de deux ventilateurs à vitesse variable qui assurent la circulation de l'air à la vitesse désirée. Des déflecteurs en aluminium assurent l'homogénéisation du flux d'air à travers la charge de bois. Le chauffage est assuré par des radiateurs à vapeur placés horizontalement de chaque côté des ventilateurs. Les températures sèche et humide sont mesurées au cours du séchage à l'aide de deux paires de thermomètres sec et humide situés près des murs de chaque côté de la charge de bois. La régulation de l'humidité relative est assurée par l'injection de vapeur saturée et/ou d'eau froide à l'aide de rampes d'humidification situées sur les murs latéraux du séchoir.

Le suivi de la teneur en humidité fut effectué principalement par la pesée périodique des six planches témoins. Dix sondes à résistance électrique insérées au quart de l'épaisseur des colombages servirent également de guide au cours des périodes d'équilibrage et de conditionnement. Le séchoir possède également une série de thermocouples pour détecter la température du bois et de l'air à travers la pile. Toutes les données issues des thermocouples furent enregistrées en continu à l'aide d'un système d'acquisition de données indépendant du contrôleur du séchoir. Les thermocouples furent calibrés avant de débiter les essais. Notons que les données des thermocouples étaient recueillies pour usage ultérieur seulement.

La figure 2.1 illustre les caractéristiques du séchoir. Elle montre la charge en place, les déflecteurs d'air étant montés de façon à ce qu'ils ne s'appuient pas sur le chariot et la balance. Les planches témoins sont à moitié sorties de la pile pour montrer leur position.



Figure 2.1. Chargement de bois en place dans le séchoir avec les planches témoins.

2.2.2. Préparation de la pile de bois pour le séchage

Une fois les planches témoins sélectionnées, la masse humide des 60 morceaux restants fut mesurée à ± 1 g près pour la détermination de leur teneur en humidité initiale. Un échantillon de 40 morceaux fut alors choisi au hasard parmi les 94 colombages disponibles pour la mesure des dimensions (largeur et épaisseur) à $\pm 0,01$ mm près au centre et aux tiers points de la longueur afin d'évaluer les retraits de face et de rive. Les positions et le sens des mesures étaient marqués à l'aide d'un trait tiré au crayon indélébile. Ces mêmes 40 morceaux ont aussi servi à la mesure du gauchissement, soit la déformation de rive (cambrure), la déformation de face (voilure) et la torsion. Ces déformations furent mesurées au 1 mm près en utilisant une poutre d'acier en H comme base de référence. Pour la voilure et la cambrure, la flèche maximale fut mesurée, peu importe la position le long de la pièce. Pour la torsion, un bout du colombage était appuyé sur la surface plane à l'aide d'un poids et la différence d'éloignement des deux coins de l'extrémité libre du débit de la surface de la poutre d'acier constituait la déformation recherchée.

Dans le cas des trois essais du sapin et de l'essai n° 3 pour l'épinette et le tremble, un pré-rabotage fut utilisé pour uniformiser le plus possible l'épaisseur des colombages avant le séchage. Cette technique est largement utilisée pour les bois de feuillus et s'avère en général très profitable dans le cas des résineux également, surtout dans le cas du séchage à haute température. Dans le cas du sapin, les variations en épaisseur des sciages bruts furent jugées suffisamment importantes pour justifier un pré-rabotage dans les trois cas.

Le chargement comprenait 10 rangs à raison de 10 colombages par rang. L'espacement des baguettes fut celui normalement utilisé dans l'industrie, soit 0,6 m (2 pi). Les dimensions des baguettes étaient de 19 mm en épaisseur et de 50 mm en largeur. Les baguettes ont été confectionnées avec du bois d'épinette noire séché à 8% de teneur en humidité. Un vernis fut aussi appliqué aux baguettes afin de prolonger leur durée de vie et éviter les réactions chimiques avec les extraits du bois. Dans la mesure du possible, aucun espace latéral n'a été laissé entre les débits de façon à favoriser "l'effet blocage" suivant la largeur de la pile, opposant ainsi une plus forte résistance aux déformations de rive et de torsion. Une fois l'empilage terminé, la position de chaque colompage fut notée et les poids de lestage furent placés sur le dessus du paquet. Cinq blocs de béton de 406 mm de hauteur furent utilisés pour obtenir un lestage d'environ 7,2 kN/m² (150 lb/pi²). Le paquet mesurait environ 1 m de largeur par 0,9 m de hauteur.

Par rapport à la base du chariot, les planches témoins furent placées au 3^{ème} rang (témoins 5 et 6), 6^{ème} rang (témoins 3 et 4) et au 9^{ème} rang (témoins 1 et 2) dans les 3^{ème} et 8^{ème} colonnes en partant de la gauche (figure 2.1). Les thermocouples furent installés au coeur et à la surface de deux planches témoins (planchettes B) ainsi qu'au centre de l'espace d'air à cinq positions de la largeur de la pile juste au-dessus des planches témoins en question. L'étape suivante consistait à installer des capteurs d'humidité sur des débits de chaque côté de l'empilement comme seconde technique de suivi de la teneur en humidité en cours de séchage, principalement pour la période d'équilibrage en fin de cycle.

2.2.3. Programmes de séchage

Les programmes de séchage utilisés pour les trois essais de chacune des trois espèces sont présentés en annexe aux tableaux A1 à A9. Notons qu'il s'agit des programmes théoriques et que les températures réellement obtenues ont été quelque peu différentes à l'occasion. À l'exception de l'étape d'équilibrage, le premier programme utilisé pour l'épinette blanche ressemble de près à ce que l'industrie utilise pour le séchage du bois de construction. Pour le deuxième programme, l'étape du pré-séchage fut remplacée par une étape de pré-étuvage dans des conditions s'approchant de la saturation de l'air. De plus, un conditionnement intermittent fut effectué entre la période de séchage à haute température et l'équilibrage. Quant au troisième programme, il est identique au deuxième, la seule différence entre les deux essais étant au niveau du pré-rabotage du bois (essai n° 3). Rappelons ici que la teneur en humidité finale cible était de 8% avec 90% de débits entre 6 et 10% H.

Quant au sapin baumier, le programme du premier essai fut un programme typique du séchage à haute température comme dans le cas de l'épinette blanche, mais sans période d'équilibrage en fin de cycle. Pour les essais n°s 2 et 3, une combinaison de programme à température élevée (TE) et de programme à haute température (HT) fut utilisée. Le programme de l'essai n° 3 comportait en plus deux périodes de conditionnement intermittent dont le but était le relâchement des contraintes.

Pour le peuplier faux-tremble, les trois programmes ont comporté une période de pré-étuvage de longueur variée et tout le séchage fut effectué à haute température. Le programme n° 2 comportait une période de conditionnement intermittent entre les deux périodes de séchage à haute température.

Rappelons que le pré-étuvage a pour but de rendre le bois le plus malléable possible avant la période de séchage à haute température. Le bois ainsi plastifié serait plus en mesure de s'adapter aux contraintes de séchage par l'effet de fluage. Quant à l'équilibrage, une période de 15 heures semblait une durée minimale pour minimiser les gradients d'humidité dans

l'épaisseur du bois et pour l'obtention de la fourchette d'humidité finale recherchée (Duplain 2003). La vitesse de l'air effective fut en moyenne de 3,5 m/s pour toute la durée des essais.

2.2.4. Suivi du séchage

Outre pour les étapes basées sur le temps, le suivi du séchage s'est réalisé principalement à partir des données de teneur en humidité moyenne et de sa distribution obtenues par la technique des pesées périodiques. Le séchoir expérimental est muni d'un système de fausses-portes qui permet la pesée périodique des planches témoins sans perturber le climat du séchoir.

La régulation du séchoir est assurée par un logiciel de la firme Séchoir MEC. Même si le séchoir peut être opéré de façon tout à fait automatique, nous avons effectué les changements d'étape manuellement de manière à s'assurer que ceux-ci se fassent au moment opportun. Ceci a évidemment impliqué une surveillance du séchoir jour et nuit pendant son fonctionnement. Notons qu'avant de passer à la période d'équilibrage, les six planches témoins étaient sorties du séchoir et refroidies à environ 40°C pour permettre la prise de lecture de teneur en humidité à l'aide de deux humidimètres, soit l'humidimètre à résistance électrique Delmhorst et l'humidimètre à capacité électrique Wagner. La moyenne des deux lectures donnait alors une bonne idée de l'humidité de chaque planche et permettait alors de décider s'il fallait passer ou pas à l'étape d'équilibrage.

2.2.5. Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique

Des températures de 82°C et plus affectent les propriétés électriques du bois et introduisent un biais dans l'estimation de la teneur en humidité avec l'humidimètre à résistance électrique. Selon Garrahan (1988), les tables de correction utilisées pour les bois séchés à moyenne température (tables utilisées pour le facteur de correction interne de l'appareil de mesure) tendent à surestimer la teneur en humidité finale du bois séché à haute température. Afin de minimiser cette erreur, un test de comparaison entre les lectures à l'humidimètre à résistance et les valeurs d'humidité obtenues à l'étuve fut effectué sur 15 pièces provenant de

chaque essai. La teneur en humidité était ainsi estimée avec un humidimètre aux tiers points de la longueur et au 1/5^{ème} de la profondeur de la pièce. Une section dont la longueur était délimitée par les marques des électrodes de l'humidimètre était ensuite découpée et placée à l'étuve afin d'obtenir sa teneur en humidité réelle. Une courbe de régression était enfin obtenue afin de déduire l'humidité réelle des pièces à partir des lectures effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance. Pour l'épinette et le sapin, les données d'étalonnage obtenues pour les trois essais furent regroupées pour tirer une seule équation d'étalonnage pour chacune des espèces en question. Dans le cas du peuplier faux-tremble, l'équation d'étalonnage fut obtenue à partir des essais n^{os} 2 et 3 seulement.

2.2.6. Évaluation de la qualité du bois après séchage

Après séchage, la pile de bois fut sortie du séchoir, recouverte d'une toile de plastique et refroidie à la température ambiante pendant 24 heures. La masse humide de tous les colombages fut alors notée et la teneur en humidité finale fut mesurée au quart de l'épaisseur et aux tiers points de leur longueur avec l'humidimètre à résistance. Par la suite, les mesures de largeur et d'épaisseur ainsi que les mesures de gauchissement furent prises sur l'échantillon de 40 colombages. Le bois fut finalement raboté et les mesures de gauchissement furent reprises de nouveau. Toutes les pièces ayant subi un déclassement dû au gauchissement furent l'objet d'une analyse spéciale quant à la position de la moelle, l'angle du fil et la présence de gros nœuds afin de tenter de trouver une explication à ce défaut de séchage.

2.2.7. Évaluation de la qualité du bois après refendage (contraintes résiduelles longitudinales)

Après les mesures de gauchissement, un lot de 10 débits fut refendu en largeur (délignage) au milieu de la section. La voilure, la cambrure et la torsion furent remesurées.

2.2.8. Mesure du gradient d'humidité suivant l'épaisseur

Un test de gradient d'humidité à travers l'épaisseur fut réalisé sur 15 débits par essai pour déterminer les profils de teneur en humidité finale. Ce test a consisté à couper deux sections de 25 mm de longueur de chaque débit et à redécouper ces sections en trois parties: une partie centrale et deux parties externes. On a ensuite déterminé leur teneur en humidité selon la méthode de séchage à l'étuve. La différence de teneur en humidité entre la partie centrale et les parties externes fut considérée comme représentative de la différence d'humidité entre le cœur et la surface.

2.2.9. Évaluation des changements de couleur

Sur chacune des six planchettes B des planches témoins, 10 mesures de couleur furent effectuées (5 sur chacune des faces) à trois reprises, soit une première fois avant séchage, une seconde fois immédiatement après le séchage et une dernière après le rabotage final. La distance entre chaque point de mesure était à peu près égale sans toutefois être mesurée de façon précise. Notons cependant que les mesures étaient effectuées exactement au même endroit d'une fois à l'autre. Tout défaut naturel du bois qui pouvait affecter la mesure de la couleur était évité en autant que possible (nœud, résine, fente, bois pelucheux).

Les mesures de couleur ont été réalisées avec un colorimètre BYK Gardner (figure 2.2). L'illuminant utilisé fut le D_{65} . L'appareil BYK Gardner fonctionne en mode 45/0, c'est-à-dire que l'éclairage de la pièce se fait de façon circulaire avec un angle de 45° et que l'observation se fait avec un angle de 0° . L'ouverture est de 20 mm. Cet appareil permet d'obtenir les trois paramètres du système CIE- L^*a^*b (Commission Internationale de l'Éclairage) de représentation tridimensionnelle de la couleur :

L^* = Luminance ou clarté ($L^* = 0$ pour le noir et $L^* = 100$ pour le blanc) ;

A^* = Chromaticité sur un axe rouge-vert ($a^* = +60$ pour le rouge et $a^* = -60$ pour le vert) ;

B^* = Chromaticité sur un axe bleu-jaune ($b^* = +60$ pour le jaune et $b^* = -60$ pour le bleu).



Figure 2.2 Colorimètre BYK Gardner utilisé pour les mesures de couleur.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Séchage du bois d'épinette blanche

3.1.1. Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique

La figure 3.1 montre la relation obtenue pour corriger les lectures de l'humidimètre à résistance électrique lors de la détermination de la teneur en humidité finale du bois d'épinette blanche. Rappelons que les lectures de l'humidimètre sont déjà corrigées à la base pour l'espèce et la température au moment de la mesure. L'équation de régression de la figure 3.1 apporte donc une simple correction à l'étalonnage de base de l'instrument.

La faible gamme de teneurs en humidité couverte par l'équation de régression de la figure 3.1 explique la valeur relativement faible du coefficient de détermination ($R^2 = 0,635$) bien que la relation demeure suffisamment fiable pour fins de prédiction. La relation obtenue montre que l'humidimètre à résistance sous-estime légèrement la teneur en d'humidité du bois d'épinette blanche séché à haute température dans la fourchette entre 6 et 10% H. Cependant le niveau de correction suggéré par l'équation de régression resterait à l'intérieur du degré de précision de l'appareil de mesure. Ces résultats vont dans le même sens que ceux rapportés par Girard (2003) pour l'épinette blanche de plantation.

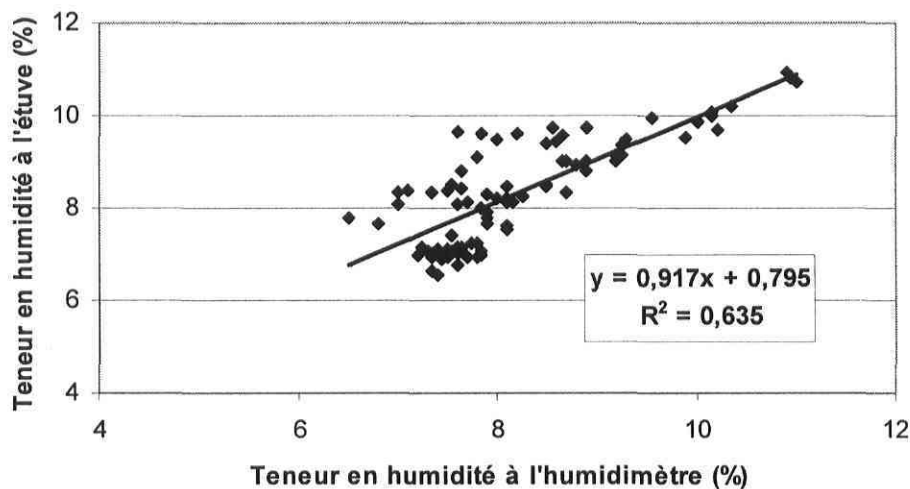


Figure 3.1. Droite de régression pour la correction des lectures de teneur en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le bois d'épinette blanche.

3.1.2 Courbes de séchage

Les figures 3.2 à 3.4 montrent les courbes de séchage obtenues pour les trois essais sur le bois d'épinette blanche. Les courbes de séchage des six planches témoins y sont représentées ainsi que la courbe moyenne. Le temps de séchage fut similaire dans les trois cas, soit environ 68 heures pour les essais n^{os} 1 et 2 et 71 heures pour l'essai n^o 3. L'allure générale des courbes de séchage des six planches témoins est très similaire d'un essai à l'autre, la seule véritable différence se situant au niveau du pré-séchage ou du pré-étuvage qui a affecté quelque peu l'allure des courbes au départ. En effet, la teneur en humidité du bois a peu changé au cours du pré-étuvage (essais n^{os} 2 et 3) alors qu'elle a diminué sensiblement au cours du pré-séchage (essai n^o 1). En réalité, l'humidité du bois devrait même en théorie augmenter au cours d'un pré-étuvage mais c'est rarement le cas en pratique à cause des difficultés à maintenir des conditions de saturation aux températures avoisinant le point d'ébullition. Notons que la condensation d'eau en surface durant l'étuvage ne nuit pas à la qualité du séchage si le bois est séché tombant de scie. Si par contre le bois montre avant séchage des gerces de surface dues à un pré-séchage prolongé à l'air, la condensation de vapeur d'eau en surface peut aggraver la situation.

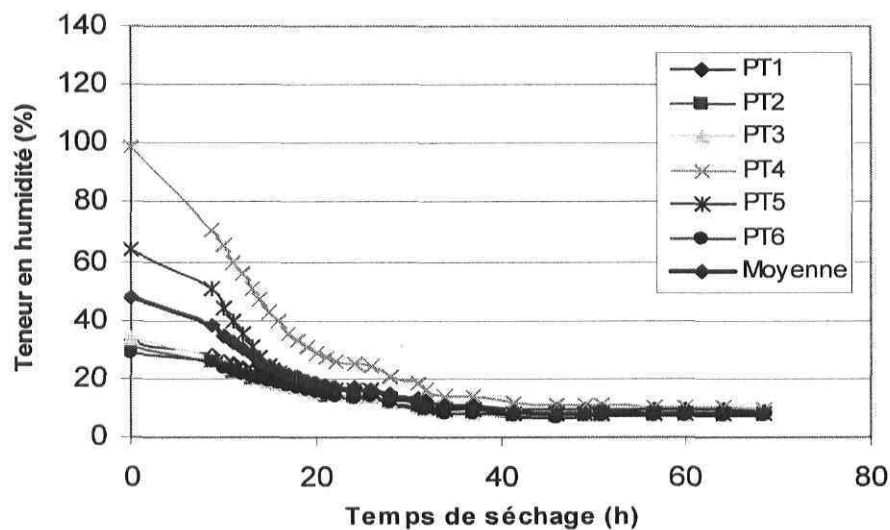


Figure 3.2 Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois d'épinette blanche.

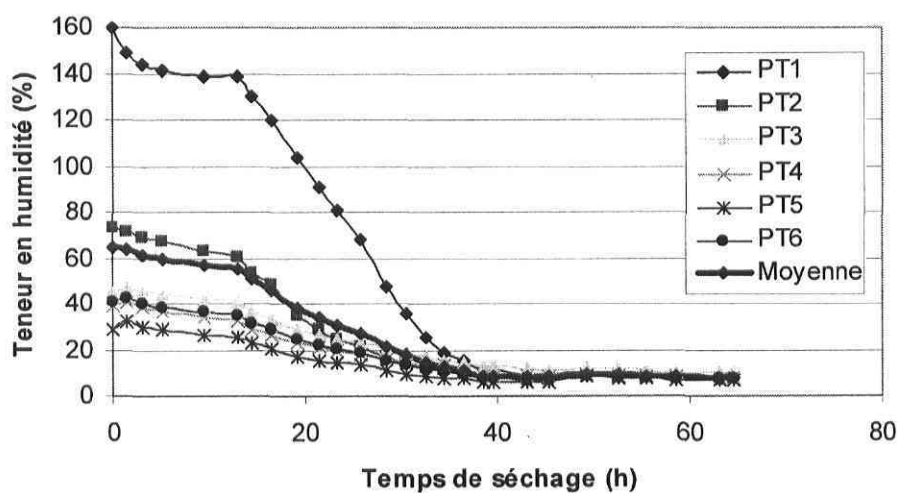


Figure 3.3 Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois d'épinette blanche.

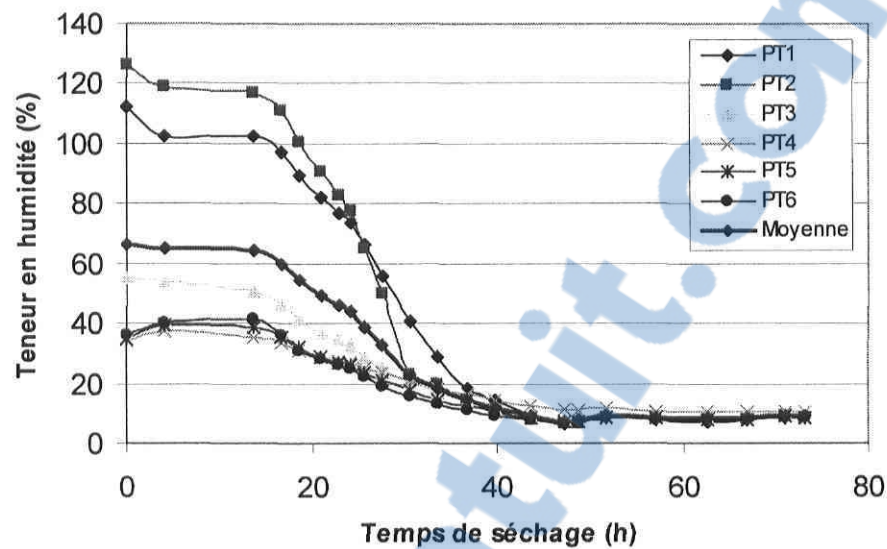


Figure 3.4 Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois d'épinette blanche.

Un autre point intéressant qui ressort de l'analyse de ces courbes de séchage est qu'en dépit du fait qu'aucun triage n'ait été effectué pour séparer initialement le bois en lots d'humidité homogène, toutes les planches témoins ont atteint la fourchette visée (entre 6 et 10% H) dans les temps voulus. Il est bien connu que dans le cas d'un séchage à une teneur en humidité cible sous le niveau de 10%, il n'est normalement pas requis d'effectuer un triage du bois au départ sur la base de la teneur en eau puisque tôt ou tard, les bois les plus humides rejoindront les bois les plus secs. Ceci ne vaut pas nécessairement pour toutes les espèces, mais dans le cas de l'épinette blanche et de l'épinette noire ça semble se concrétiser d'expérience en expérience (Wang 2002, Duplain 2003, Girard 2003). Le taux de séchage très élevé des planches témoins les plus humides dans les trois essais démontre bien la forte perméabilité du bois d'aubier de l'épinette blanche.

L'étape de séchage au-dessus du PSF a débuté à la 10^{ème} ou à la 13^{ème} heure, selon la durée de la période de pré-étuvage ou de pré-séchage, et s'est poursuivie pour une période d'environ 30 heures avant d'atteindre la teneur en humidité cible de 8%. Il s'agit là d'un

temps de séchage très respectable compte tenu du fait que la distribution de la teneur en humidité initiale était très large.

La période d'équilibrage qui a suivi n'a pas causé de changement important au niveau de l'humidité moyenne de la charge mais la variation de l'humidité entre les planches a diminué, de même que les gradients d'humidité suivant l'épaisseur du bois. Le séchage à haute température est bien reconnu pour donner de forts gradients d'humidité lorsqu'une période d'équilibrage de longueur appropriée n'est pas réalisée (Fabris 1993, Wang 2002, Duplain 2003).

Il est même très intéressant de noter que les résultats obtenus avec l'épinette blanche de forêt naturelle sont très similaires à ceux obtenus pour l'épinette blanche de plantation dans le cadre d'une étude antérieure (Girard 2003), ce qui rend encore plus grande la portée de l'étude, ces deux types de bois pouvant éventuellement être séchés ensemble moyennant l'utilisation d'une stratégie et d'un programme de séchage appropriés.

3.1.3 Distributions des teneurs en humidité initiale et finale

Le tableau 3.1 montre les valeurs moyennes des teneurs en humidité initiale (H_i) et finale (H_f) ainsi que les écarts-types correspondants pour les trois essais effectués. On y présente également la proportion des colombages se retrouvant à l'intérieur de la fourchette de teneurs en humidité finales visée. Une partie des résultats est représentée graphiquement aux figures 3.5 et 3.6. La teneur en humidité initiale montre une très large distribution avec une moyenne s'étalant entre 53 et 68% et un écart-type variant entre 24 et 36%. Malgré cette variation importante de la teneur en humidité initiale, la fourchette des teneurs en humidité finales est très respectable dans deux cas sur trois, l'essai n° 1 ayant malheureusement produit une proportion importante de colombages aux environs de 6% H. Quant à l'humidité cible moyenne, elle fut atteinte à l'intérieur de 1% dans tous les cas.

Tableau 3.1. Valeurs moyennes de l'humidité initiale et finale obtenues pour les trois essais sur l'épinette blanche (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.

Essai	H _i (%)	H _f (%)	Proportion entre 6 et 10% H
1	53,8 (35,8)	8,0 (1,4)	96
2	52,7 (24,2)	8,7 (1,1)	91
3	67,7 (32,2)	7,9 (1,3)	96

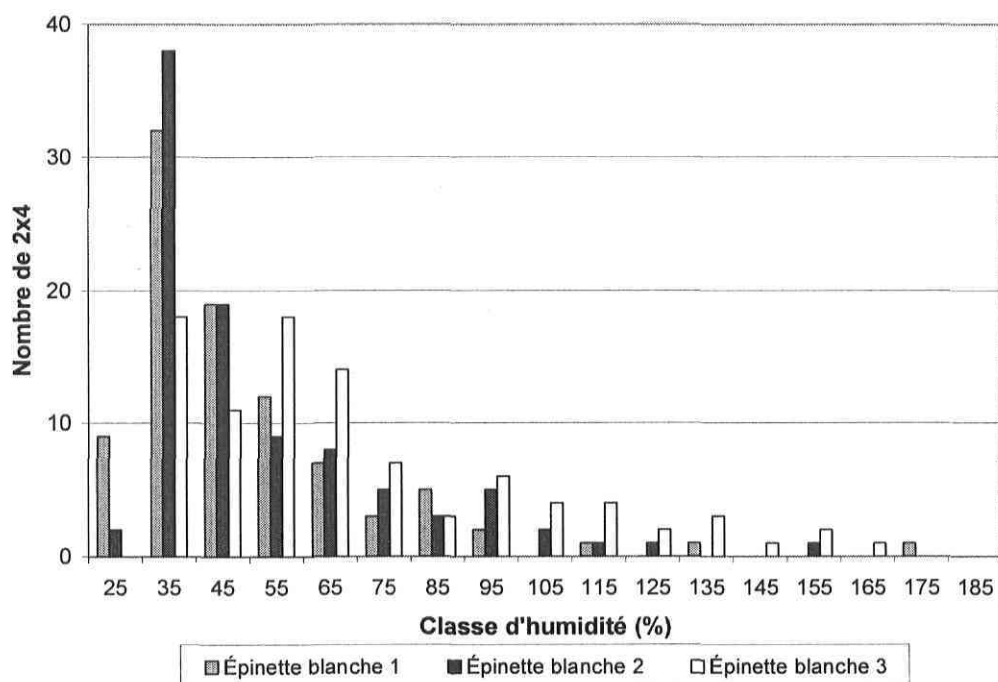


Figure 3.5 Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais sur le bois d'épinette blanche.

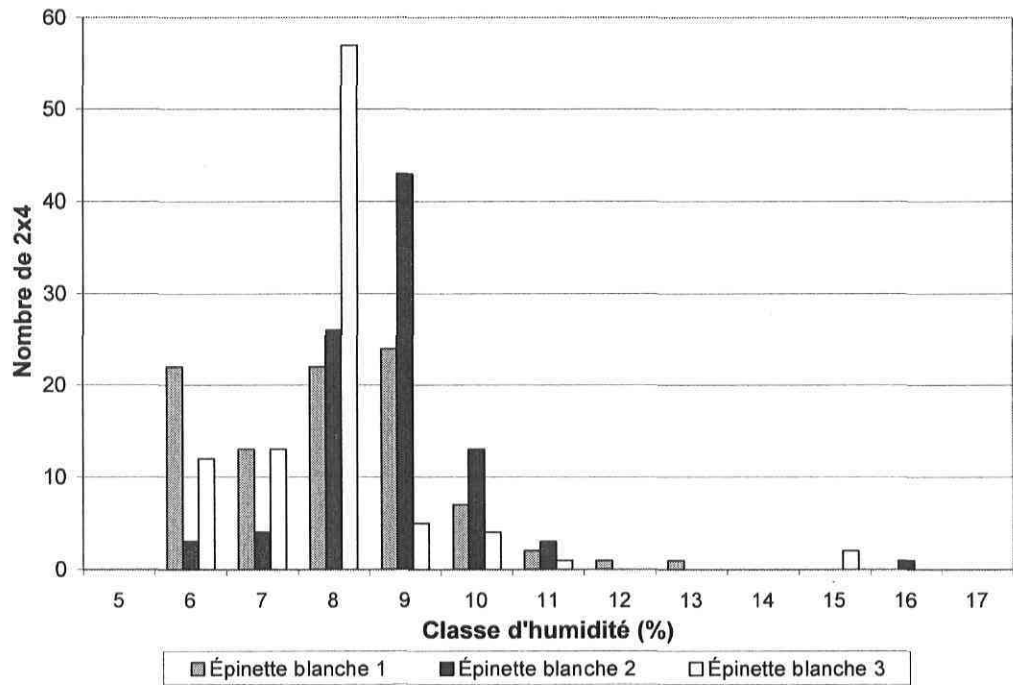


Figure 3.6 Distribution de l'humidité finale pour les trois essais sur le bois d'épinette blanche.

Si la distribution de l'humidité initiale s'éloigne beaucoup d'une distribution normale (figure 3.5), il est intéressant de noter que la distribution de l'humidité finale dans deux cas sur trois s'approche beaucoup d'une courbe de fréquence normale. Pour l'humidité finale, le test de Duncan (voir tableau A10 en annexe) a montré qu'il existe une différence significative entre l'essai n° 2 et les essais n° 1 et 3. Pour ces deux derniers, la différence de l'humidité initiale n'est pas significative.

3.1.4 Retraits de rive et de face

Les valeurs moyennes et écarts-types obtenus pour les retraits de rive et de face pour le bois d'épinette blanche sont présentés au tableau 3.2. Le retrait moyen de rive pour les trois essais a varié entre 4,4% et 4,7% alors que le retrait de face a varié entre 2,8% et 3,4%. Ces résultats sont très similaires à ceux rapportés pour l'épinette noire par Duplain (2003) et pour

Tableau 3.2. Retrait moyen de rive (épaisseur) et de face (largeur) pour le bois d'épinette blanche (écart-type entre parenthèses).

Essai	Retrait de rive (%)	Retrait de face (%)
1	4,4 (0,8)	3,4 (0,9)
2	4,5 (0,8)	2,8 (0,7)
3	4,7 (0,7)	2,9 (0,7)

l'épinette blanche de plantation par Girard (2003). Le phénomène observé est typique du séchage à haute température (Cech et Huffman 1971). Pour le séchage à moyenne température des bois à forte courbure de cernes comme le 2x3 et le 2x4, normalement les deux types de retrait sont à peu près équivalents, soit à mi-chemin entre le retrait radial et le retrait tangentiel, ce qui donnerait dans ce cas selon la littérature (Jessome 1977) environ 4,0%. En fait, le séchage à haute température suite au fluage important qui prend place à la surface de la planche en début de séchage provoquerait une réduction du retrait de face et une augmentation du retrait de rive. Puisque le séchage a surtout lieu sur la grande face du débit, celle-ci subit un fluage en tension qui se traduirait alors par un fluage en compression suivant la rive à cause de l'effet de Poisson. Ce phénomène pourrait avoir une incidence sur les dimensions cibles au sciage, notamment en épaisseur, où des omissions au rabotage seraient à craindre lorsque le bois est séché à de faibles teneurs en humidité.

Le test d'analyse de variance, suivi de celui de Duncan (tableau A10) a montré que le retrait de face pour l'essai n° 1 fut significativement supérieur à celui observé pour les essais n° 2 et 3, lesquels ont produit un retrait similaire. Ceci peut s'expliquer en partie par le fait que dans le cas de l'essai n° 1 une plus forte proportion des débits s'est retrouvée surséchée. Cependant, il est probable que la cause première soit le traitement de pré-étuvage effectué dans le cas des essais n° 2 et 3, lequel normalement contribue à diminuer le retrait de face et augmenter le retrait de rive tel qu'expliqué plus haut. Dans le cas du retrait de rive, le même test a montré qu'il n'existe pas de différences significatives entre les valeurs moyennes de chacun des essais.

3.1.5 Gauchissement après séchage et rabotage

Seulement les valeurs de gauchissement après séchage et rabotage seront présentées dans ce texte, les valeurs de gauchissement mesurées après séchage sur le bois brut présentant peu d'intérêt d'un point de vue pratique. Les analyses de variance (tableau A10) ont quand même été effectuées sur les valeurs de gauchissement après séchage de façon à détecter tout effet possible du rabotage sur le gauchissement final du bois séché. Le gauchissement moyen après séchage et rabotage a varié entre 5,5 et 7,1 mm pour la torsion, entre 3,1 et 3,6 mm pour la cambrure et entre 1,9 et 3,0 mm pour la voilure (tableau 3.3). La torsion fut donc tel que prévu le défaut de gauchissement le plus important suivi de la cambrure et enfin de la voilure. Les niveaux de cambrure et de torsion ont causé la perte d'une classe, soit de colombage à économie colombage, de 18% des morceaux pour l'essai n° 1, 28% pour l'essai n° 2 et 20% pour l'essai n° 3.

L'analyse de variance effectuée sur les valeurs de gauchissement après séchage et rabotage n'a indiqué aucun effet significatif entre les programmes de séchage utilisés, ni pour la voilure, la cambrure ou la torsion. Il est difficile de conclure ici sur l'effet bénéfique de l'une ou l'autre des stratégies de séchage utilisées sur la qualité du bois. Jugeant que l'humidité initiale était sensiblement plus élevée pour l'essai n° 3 que pour les deux autres, il semblerait cependant que le programme n° 3 combiné au pré-rabotage ait donné les meilleurs résultats, d'autant plus si on tient compte du fait que cet essai a donné une plus grande proportion de débits présentant une torsion nulle.

Il semble opportun de préciser ici que les mesures de gauchissement en laboratoire sont effectuées de façon très rigoureuse et comme l'ont démontré les travaux de Fabris (1993), le même classement effectué dans l'industrie aurait donné un pourcentage de perte de classe de beaucoup inférieur. D'ailleurs une bonne partie des colombages déclassés en torsion l'a été par seulement 1 à 2 mm du seuil toléré.

Tableau 3.3. Gauchissement moyen de l'épinette blanche après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages subissant une perte de classe.

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)	Pourcentage des colombages subissant une perte de classe
1	1,9 (1,7)	3,6 (3,0)	5,5 (3,3)	18
2	3,0 (2,1)	3,1 (2,3)	7,1 (5,9)	28
3	2,6 (2,9)	3,1 (3,0)	5,8 (3,4)	20

3.1.6 Gauchissement après refendage en largeur

Le tableau 3.4 présente les résultats sur le gauchissement après le refendage suivant la largeur. Tel que prévu, les valeurs de gauchissement obtenues pour la voilure sont du même ordre de grandeur que les valeurs correspondantes avant refendage. Par contre, dans le cas de la cambrure, la moyenne a plus que doublé pour l'essai n° 3. Des travaux antérieurs ont montré le même phénomène (Girard 2003, Duplain 2003), la cambrure résultant d'un refendage en largeur étant tout à fait imprévisible. Quant à la torsion, les valeurs sont beaucoup plus faibles qu'avant refendage, ce qui est normal puisque la pièce est deux fois plus mince.

Concernant l'effet des traitements, l'analyse de variance (tableau A10) a montré que pour les trois types de gauchissement après refendage en largeur, il n'existe aucune différence significative entre les trois essais de séchage. Les résultats de la cambrure indiquent cependant l'existence de contraintes de séchage résiduelles longitudinales importantes sur certains débits.

Tableau 3.4. Gauchissement moyen de l'épinette blanche après séchage et rabotage et refendage en largeur (écart-type entre parenthèses).

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)
1	1,4 (1,0)	3,3 (2,5)	1,5 (1,1)
2	3,1 (3,2)	4,6 (3,1)	0,8 (1,0)
3	0,9 (1,3)	7,0 (5,2)	1,3 (1,1)

3.1.7 Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité

L'essai de la fourchette a démontré la presque absence de contraintes résiduelles transversales. Quant aux gradients d'humidité suivant l'épaisseur, la plupart des colombages séchés ont montré une différence d'humidité entre la surface et le cœur inférieure à 2%, au maximum 3% (tableau 3.5).

3.1.8 Fendillement interne et décollement de nœuds

Des dix pièces sectionnées pour les tests de contraintes transversales, la presque totalité était exemptes de gerces internes visibles. Un certain nombre de nœuds adhérents montraient un léger fendillement. Quant aux nœuds non adhérents, une partie de ceux-ci ont décollé complètement au cours du refendage, ce défaut étant évidemment typique du séchage à haute température.

Tableau 3.5. Différence de teneur en humidité finale entre le centre et la surface des colombages d'épinette blanche (écart-type entre parenthèses).

Humidité finale (%)	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3
Cœur	7,4 (0,6)	8,4 (1,7)	9,1 (3,0)
Surface	7,4 (0,3)	7,9 (0,7)	8,2 (2,1)

3.1.9 Évaluation de la couleur

Les figures 3.7 et 3.8 montrent les mesures de la couleur (facteur L) des six éprouvettes avant séchage, après séchage et après rabotage pour les essais n^{os} 2 et 3. Les résultats de l'essai n° 1 ont été éliminés à cause d'un problème lors de l'utilisation de l'appareil de mesure.

Les résultats démontrent tel que prévu que le séchage à haute température cause un jaunissement sensible du bois en surface. Cependant, au rabotage le bois regagne jusqu'à 50% de la blancheur perdue en surface au cours du séchage.

Les analyses statistiques ont montré qu'il n'y a pas eu des différences significatives entre les traitements au niveau de la couleur au début des essais (tableau A10). Par contre, après séchage et après rabotage, les analyses ont révélé une différence significative entre les essais n^{os} 2 et 3. Puisque les deux traitements en question étaient identiques, on ne peut cependant trouver d'explications plausibles pour cette différence de comportement, si ce que la variabilité naturelle de la matière première.

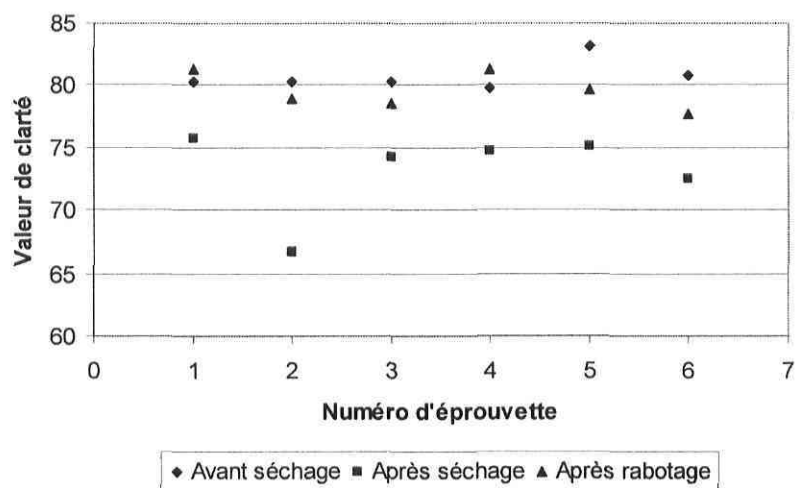


Figure 3.7 Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois d'épinette blanche.

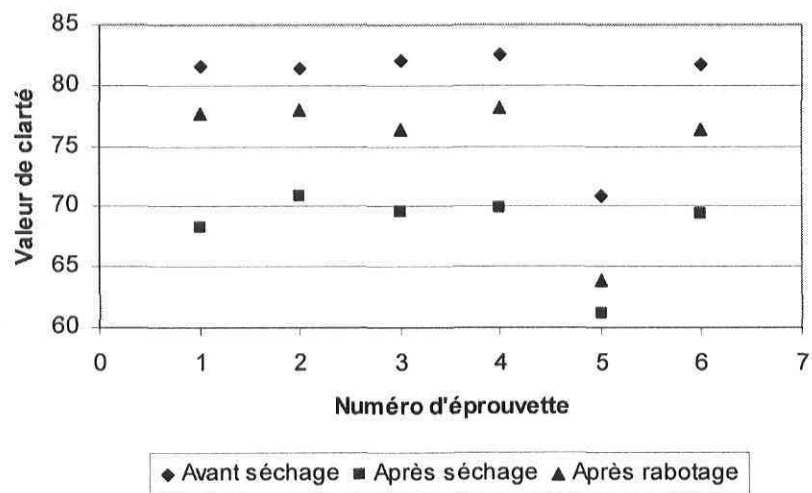


Figure 3.8 Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois d'épinette blanche.

3.2. Séchage du sapin baumier

3.2.1. Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique

La figure 3.9 montre la relation obtenue pour corriger les lectures de l'humidimètre à résistance électrique lors de la détermination de la teneur en humidité finale du bois de sapin baumier. Compte tenu de la gamme importante de teneurs en humidité couverte par le test d'étalonnage, nous avons obtenu dans ce cas un pouvoir de prédiction plus important avec un coefficient de détermination égal à 0,86. La relation obtenue indique une correction très similaire à celle obtenue par Duplain (2003) pour l'épinette noire, soit une surestimation sensible de l'humidité au-dessus de 6% H, laquelle augmente à mesure que la teneur en humidité s'élève. Cette analyse montre la pertinence de corriger les lectures de l'humidimètre à résistance pour le cas du bois de sapin baumier séché à haute température.

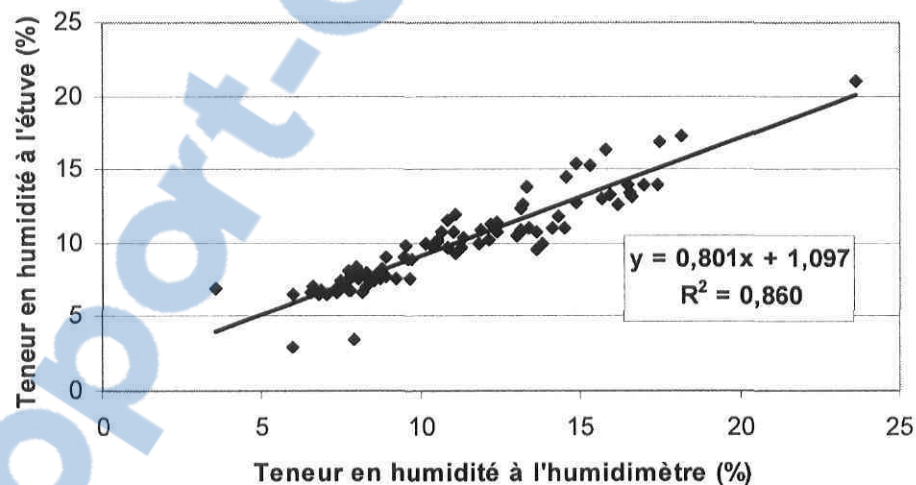


Figure 3.9 Droite de régression pour la correction des lectures de teneur en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le sapin baumier.

3.2.2. Courbes de séchage

Les figures 3.10 à 3.12 montrent les courbes de séchage obtenues pour les trois essais effectués sur le sapin baumier. Les courbes des six planches témoins y sont représentées ainsi que la courbe moyenne. Le temps de séchage fut de 76 heures pour l'essai n° 1, 91 heures pour l'essai n° 2 et 116 heures pour l'essai n° 3. La différence des temps de séchage entre l'essai n° 1 et l'essai n° 2 s'explique simplement par l'absence de la période d'équilibrage dans le premier cas. Quant à l'essai n° 3, son prolongement est dû à un départ beaucoup plus doux et une humidité de la charge plus élevée. Il semble que le bois qui était stocké dans le fond du congélateur ait subi moins de pertes d'humidité que les piles supérieures bien qu'au départ, les piles aient été en principe d'humidité homogène. Quant à l'allure des courbes de séchage, elle est similaire d'un essai à l'autre sauf que pour les essais n°s 1 et 2, au moins une planche témoin sur six termine le séchage avec une humidité supérieure à 10%, ce qui indique qu'environ 16% du chargement risque de s'être comporté de la même façon.

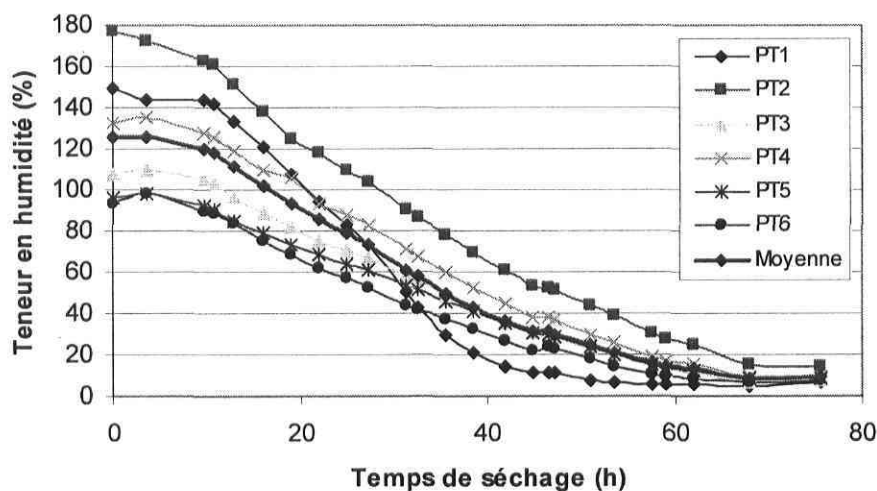


Figure 3.10

Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de sapin baumier.

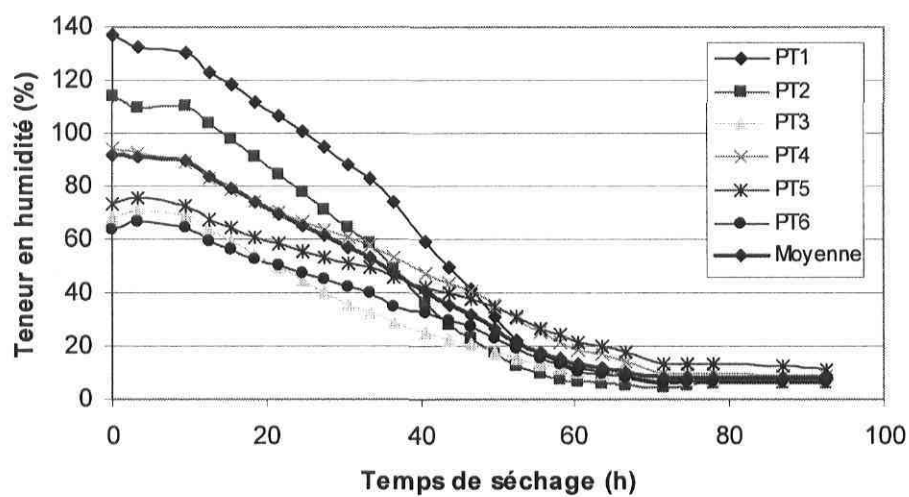


Figure 3.11 Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de sapin baumier.

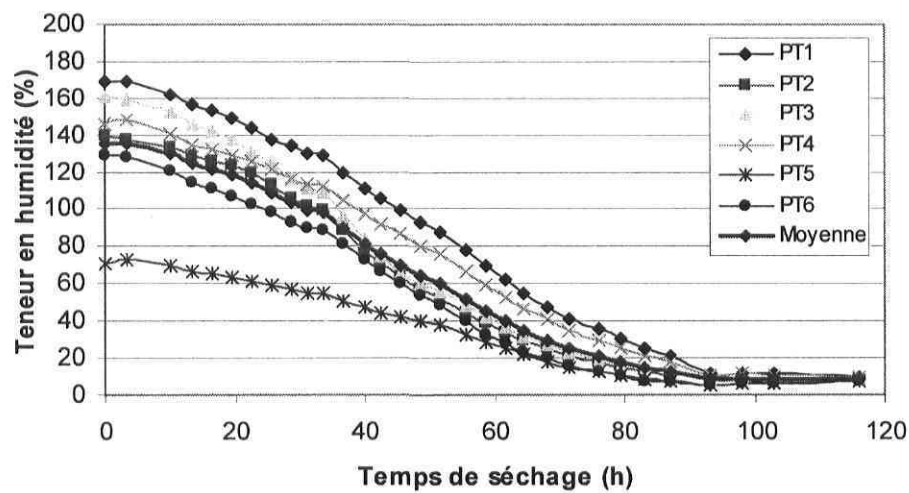


Figure 3.12 Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de sapin baumier.

3.2.3. Distributions des teneurs en humidité initiales et finales

Le tableau 3.7 montre les valeurs moyennes des teneurs en humidité initiales et finales ainsi que les écarts-types correspondants pour les trois essais effectués sur le sapin baumier. On y présente également la proportion des colombages se retrouvant à l'intérieur de la fourchette de teneurs en humidité finales visée. Les figures 3.13 et 3.14 représentent graphiquement une partie de ces résultats.

La teneur en humidité initiale montre une très large distribution avec une moyenne s'étalant entre 109% et 116% et un écart-type variant entre 23% et 26%. La teneur en humidité initiale élevée s'est malheureusement manifestée par une fourchette assez large de l'humidité finale et une humidité finale moyenne de 1% à 3% supérieure à l'humidité cible. On a noté de 27% à 47% des débits au-dessus de 10% H, avec des humidités maximales pouvant atteindre près de 20% H. Ceci indique clairement que les colombages à cœur humide sont très difficiles à sécher et auraient requis plus de temps pour parvenir à l'humidité cible ou une stratégie de séchage différente aurait dû être utilisée. Par exemple, comme on le fait dans la pratique pour le bois de construction, le séchage du sapin pour la seconde transformation impliquerait un pré-triage sur la base de l'humidité initiale et la présence de cœur humide. Un pré-séchage doux jusqu'aux environs du PSF serait également une autre avenue à favoriser pour faciliter le séchage du sapin à cœur humide (Tremblay 2003). C'était d'ailleurs le but visé par le programme n° 3 (tableau A6) du sapin baumier qui a donné les meilleurs résultats parmi les trois programmes étudiés. Cependant, il semble que la période de pré-séchage se soit déroulée à une température trop élevée, ce qui a été néfaste pour les colombages contenant du cœur humide.

Tableau 3.6. Valeurs des humidités initiales et finales mesurées pour les trois essais sur le sapin baumier (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.

Essai	H_i (%)	H_f (%)	Proportion entre 6 et 10% H
1	116,3 (24,5)	9,4 (4,9)	73
2	109,3 (26,3)	10,9 (4,6)	53
3	117,3 (22,8)	8,8 (3,0)	76

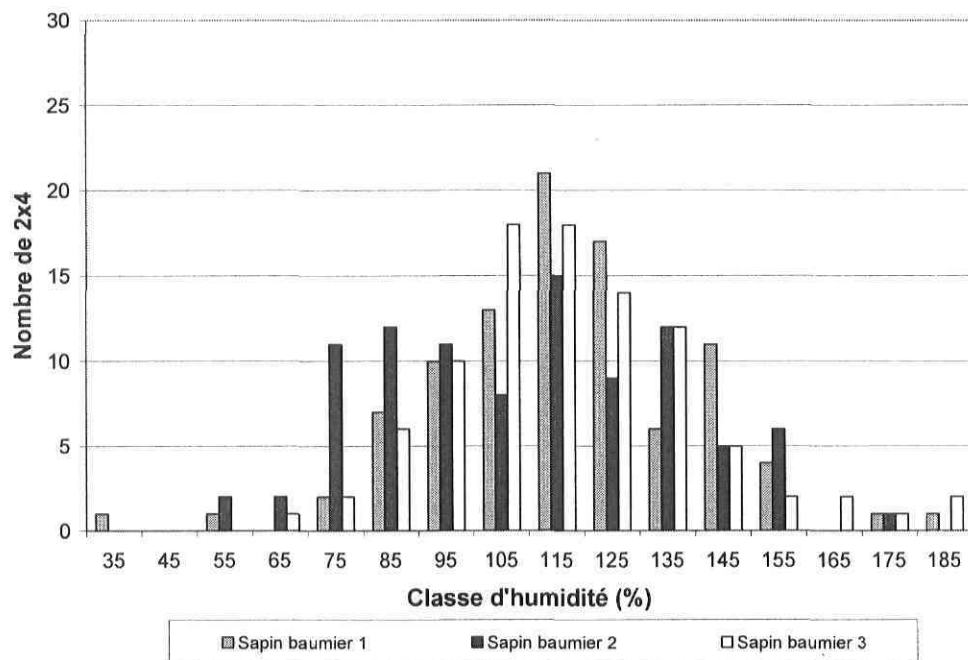


Figure 3.13. Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais sur le bois de sapin baumier.

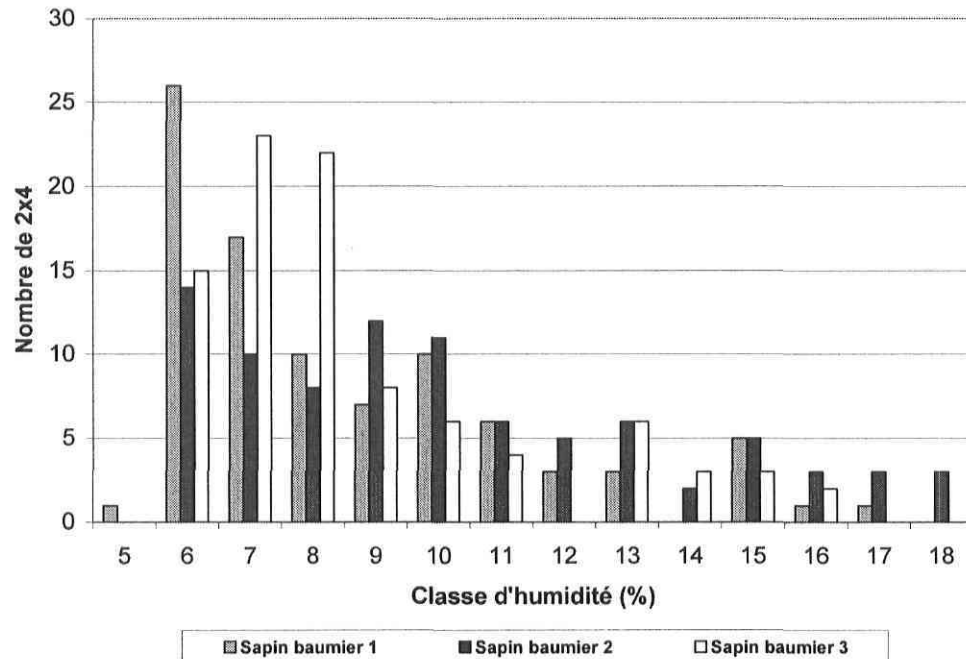


Figure 3.14. Distribution de l'humidité finale pour les trois essais sur le bois de sapin baumier.

Dans le cas de l'humidité finale le test de Duncan nous montre qu'il n'existe pas de différences significatives pour les moyennes d'humidité finale des essais n^{os} 1 et 3. Par contre, l'humidité finale de l'essai n^o 2 diffère significativement de celle des deux autres essais (tableau A11).

3.2.4. Retraits de rive et de face

Les retraits moyens de rive et de face pour le sapin baumier sont présentés au tableau 3.7. Le retrait de rive a varié entre 5,3% et 5,9% alors que le retrait de face a varié entre 2,9 et 3,0%. Ces résultats démontrent un retrait de rive encore plus important que dans le cas de l'épinette blanche et indiquent même la présence probable de collapse dans l'épaisseur du colombage. On a en effet noté la présence de fendillement interne important sur certains débits, particulièrement dans le cas de l'essai n^o 3. Ce phénomène semble avoir été surtout présent sur les colombages contenant des signes de carie, de roulures ou de poches d'eau. Quant aux analyses statistiques, elles n'ont indiqué aucune différence significative entre le retrait de

face pour les trois essais, mais un retrait de rive significativement différent des deux autres pour l'essai n° 3 (tableau A11).

Tableau 3.7. Retrait moyen de rive (épaisseur) et de face (largeur) pour le sapin baumier (écart-type entre parenthèses).

Essai	Retrait de rive (%)	Retrait de face (%)
1	5,1 (1,3)	2,9 (0,9)
2	5,3 (1,2)	3,0 (0,8)
3	5,9 (1,1)	2,8 (0,8)

3.2.5. Gauchissement après séchage et rabotage

Le gauchissement moyen après séchage et rabotage a varié entre 3,5 et 3,8 mm pour la torsion, entre 2,5 et 3,1 mm pour la cambrure et entre 1,9 et 2,0 mm pour la voilure (tableau 3.8). Le défaut de torsion s'avère encore une fois le type de gauchissement le plus important, mais en valeur absolue il est beaucoup moins important que dans le cas de l'épinette blanche. Ceci se manifeste sur le déclassement du bois après séchage lequel fut très faible dans tous les cas. Donc, si le séchage à haute température du sapin n'a pas donné tous les résultats escomptés en ce qui a trait à la dispersion de l'humidité finale, il a donné de très bons résultats quant à la rectitude des pièces.

Au niveau des analyses statistiques, les résultats obtenus ne montrent aucun effet significatif des traitements sur le gauchissement, ni après séchage ni après séchage et rabotage.

Tableau 3.8. Gauchissement moyen après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) du sapin baumier et proportion des colombages subissant une perte de classe.

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)	Pourcentage des colombages subissant une perte de classe
1	2,0 (3,2)	3,1 (2,7)	3,5 (2,8)	5
2	1,9 (3,5)	2,5 (1,6)	3,8 (3,1)	5
3	1,9 (2,6)	2,6 (1,8)	3,7 (3,0)	5

3.2.6. Gauchissement après refendage en largeur

Le tableau 3.9 présente les résultats sur le gauchissement après le refendage en largeur. Contrairement à l'épinette, les valeurs de gauchissement obtenues suggèrent que les contraintes résiduelles de séchage longitudinales étaient très faibles ou absentes suivant le séchage à haute température, la cambrure n'ayant pas augmenté et la torsion ayant diminué de moitié tel que prévu. Quant à la voilure, elle a augmenté pour l'essai n° 2, qui diffère d'ailleurs significativement des deux autres essais (tableau A11), mais de façon relativement faible.

Tableau 3.9. Gauchissement moyen après séchage et rabotage et refendage en largeur (écart-type entre parenthèses) du sapin baumier.

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)
1	1,8 (1,0)	3,4 (4,6)	1,3 (1,2)
2	2,8 (2,3)	1,9 (1,4)	1,4 (1,3)
3	1,1 (0,7)	2,9 (3,4)	1,0 (0,8)

3.2.7. Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité

Le test de la fourchette a démontré des contraintes résiduelles importantes dans le plan transversal pour le premier essai, des contraintes moins importantes pour l'essai n° 2 et des contraintes presque nulles pour l'essai n° 3. Quant aux gradients d'humidité dans l'épaisseur du bois, le tableau 3.10 indique des différences assez importantes entre le cœur et la surface, ce qui a été le cas principalement pour les débits dont l'humidité moyenne a varié entre 11 et 18%. Ces différences sont moindres que celles notées par Fabris (1993) pour le sapin séché pour le bois de construction mais demeurent encore trop élevées pour le bois destiné aux produits à valeur ajoutée.

Tableau 3.10. Différence de teneur en humidité finale entre le cœur et la surface des colombages de sapin baumier (écart-type entre parenthèses).

Humidité finale (%)	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3
Coeur	12,3 (2,3)	11,4 (3,7)	11,3 (5,2)
Surface	8,3 (3,5)	8,6 (1,7)	8,0 (1,6)

3.2.8. Fendillement interne et décollement de nœuds

Tel que mentionné plus haut, les pièces sectionnées pour les tests de contraintes transversales comportaient plusieurs gerces internes et gerces de surface. Ce phénomène s'est atténué de beaucoup suite à l'utilisation d'un programme hybride (température élevée/haute température) pour les deux autres essais, mais n'a pu être éliminé complètement. Enfin, comme dans le cas de l'épinette, une partie des nœuds non adhérents ont décollé complètement au cours du refendage.

3.2.9. Évaluation de la couleur

Les figures 3.15, 3.16 et 3.17 montrent les résultats des mesures de couleur (facteur L) des six éprouvettes avant et après séchage et après séchage et rabotage. À l'instar du bois d'épinette, le sapin baumier subi un jaunissement sensible du bois au cours du séchage à haute température, mais une bonne partie de la blancheur perdue du bois est retrouvée au rabotage. Les différences de couleur avant et après séchage et rabotage demeure quand même significatives (tableau A11) et ne peuvent être évitées. Cependant, d'un débit à l'autre, l'effet est relativement similaire, ce qui rend le défaut moins apparent à l'œil nu.

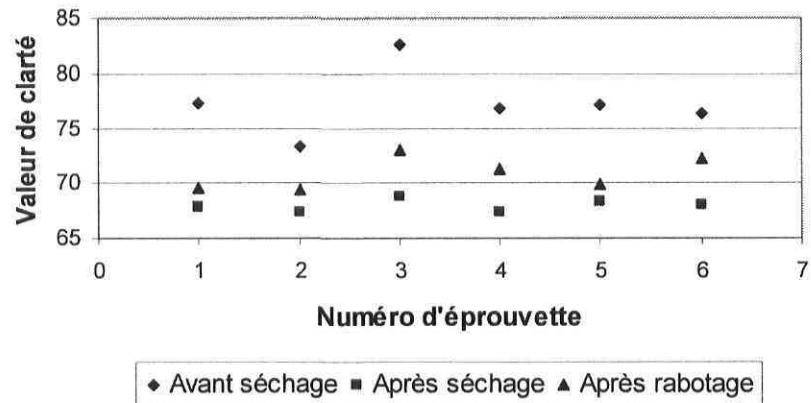


Figure 3.15 Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de sapin baumier.

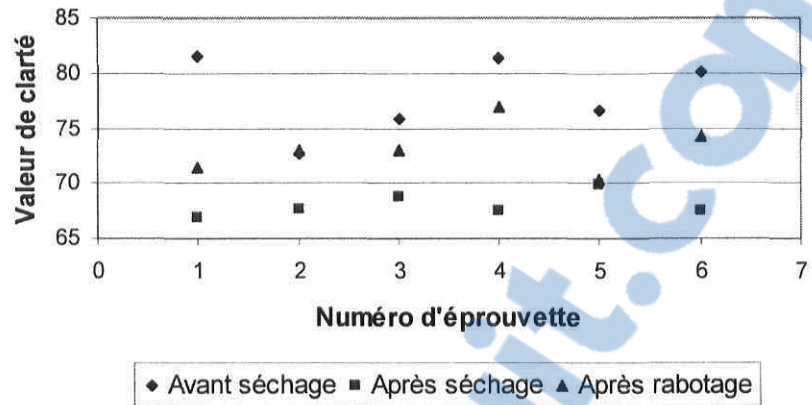


Figure 3.16. Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de sapin baumier.

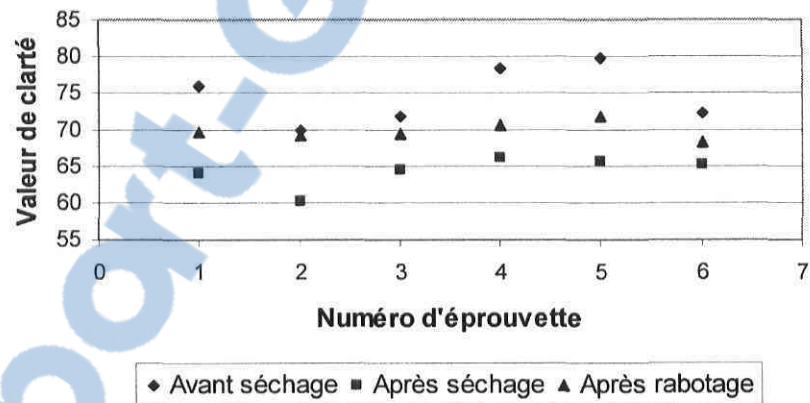


Figure 3.17. Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de sapin baumier.

3.3. Séchage du peuplier faux-tremble

3.3.1. Vérification de l'étalonnage de l'humidimètre à résistance électrique

La figure 3.18 montre la relation obtenue pour corriger les lectures de l'humidimètre à résistance électrique lors de la mesure de la teneur en humidité finale sur le bois de peuplier faux-tremble. À l'instar du bois d'épinette blanche, la gamme d'humidités couverte par le test d'étalonnage fut plutôt restreinte ce qui a limité la force de prédiction de l'équation ($R^2 = 0,71$). La relation obtenue indique que l'humidimètre à résistance surestime la teneur en humidité du bois de peuplier faux-tremble séché à haute température pour des valeurs en dessous de 8% H et sous-estime cette humidité pour des valeurs au-dessus de ce seuil. Le niveau de correction est de l'ordre de $\pm 0,7\%$ H dans la fourchette d'humidité entre 6 et 12% H, ce qui peut être considéré comme négligeable.

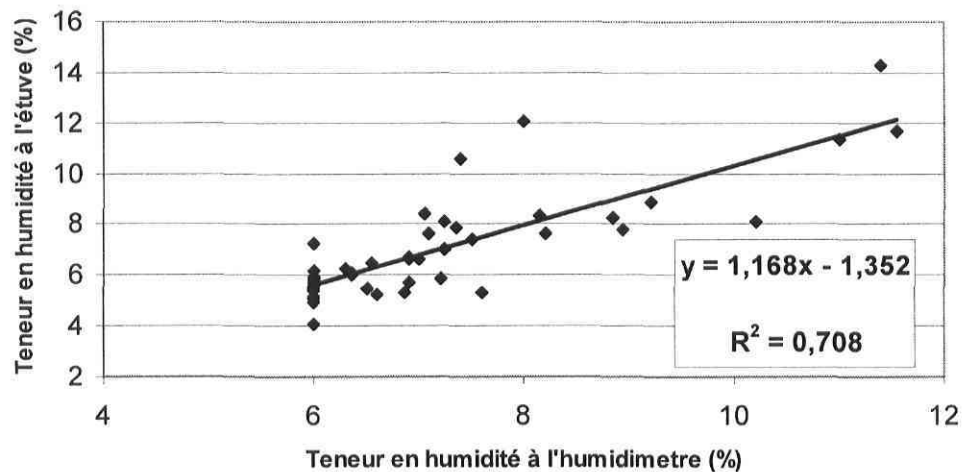


Figure 3.18 Droite de régression pour la correction des lectures de teneur en humidité finale effectuées à l'aide de l'humidimètre à résistance électrique pour le peuplier faux-tremble.

3.3.2. Courbes de séchage

Les figures 3.19 à 3.21 montrent les courbes de séchage obtenues pour les trois essais sur le bois de peuplier faux-tremble. Le temps de séchage fut de 86 heures pour l'essai n° 1, 99 heures pour l'essai n° 2 et 100 heures pour l'essai n° 3. La différence des temps de séchage entre l'essai n° 1 et les essais n° 2 et 3 s'explique en grande partie par un programme de séchage un peu plus rigoureux dans le premier cas. Dans les trois cas, l'une des planches témoins n'a pas complété le séchage. À l'instar du sapin baumier, on a observé que les planches témoins en question contenaient la présence de cœur humide (poches d'eau), ce qui a rendu le bois très difficile à sécher. Ceci a eu comme conséquence que dans chaque lot, de 10 à 15% des colombages n'ont pas atteint la fourchette d'humidités finales désirée. De plus, la présence de collapse fut notée sur plusieurs pièces, corroborant ainsi l'hypothèse du bois humide.

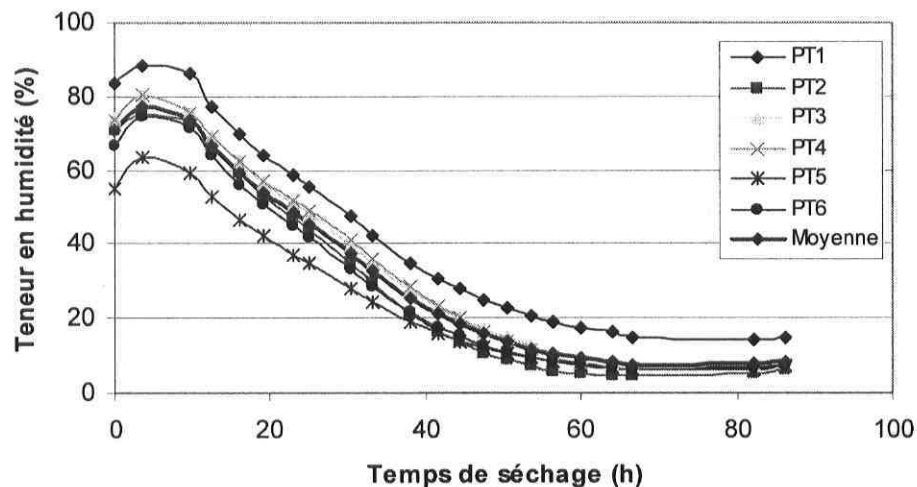


Figure 3.19. Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de peuplier faux-tremble.

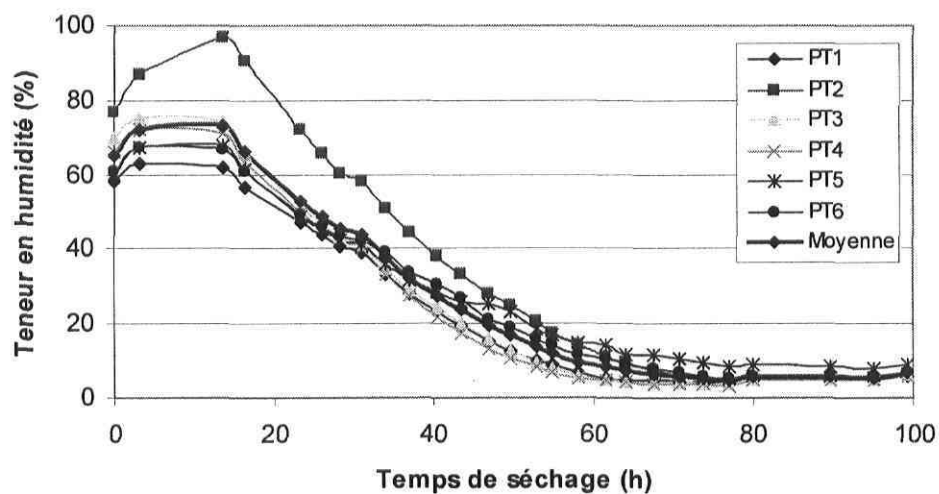


Figure 3.20. Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de peuplier faux-tremble.

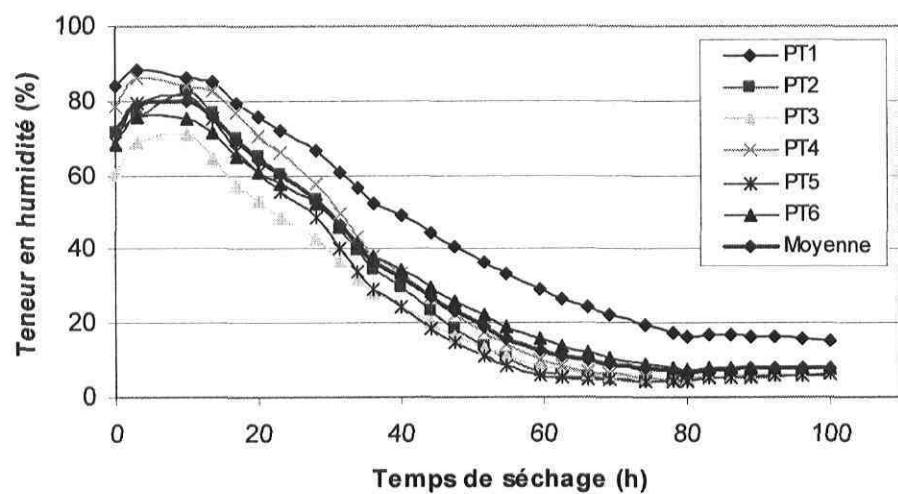


Figure 3.21. Courbes de séchage obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de peuplier faux-tremble.

3.3.3. Distributions des teneurs en humidité initiales et finales

Le tableau 3.11 montre les valeurs moyennes des teneurs en humidité initiales et finales ainsi que les écarts-types correspondants pour les trois essais effectués sur le peuplier faux-tremble. On y présente également la proportion des colombages se retrouvant à l'intérieur de la fourchette de teneurs en humidité finales visée. Les figures 3.22 et 3.23 représentent graphiquement une partie de ces résultats.

Les trois lots de bois avaient une teneur en humidité initiale moyenne presque identique avec une fourchette quand même assez importante. La teneur en humidité finale moyenne obtenue fut très proche de la valeur cible de 8% mais l'écart-type demeure plutôt large, de 12 à 20% des colombages ayant une humidité finale excédant la fourchette des humidités finales visée.

Tableau 3.11. Valeurs des humidités initiales et finales mesurées pour les trois essais sur le bois de peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages se retrouvant dans la fourchette entre 6 et 10% H.

Essai	H _i (%)	H _f (%)	Proportion entre 6 et 10% H
1	76,9 (18,3)	7,3 (3,3)	85
2	76,2 (16,4)	8,1 (2,7)	87
3	72,3 (15,0)	7,7 (2,3)	88

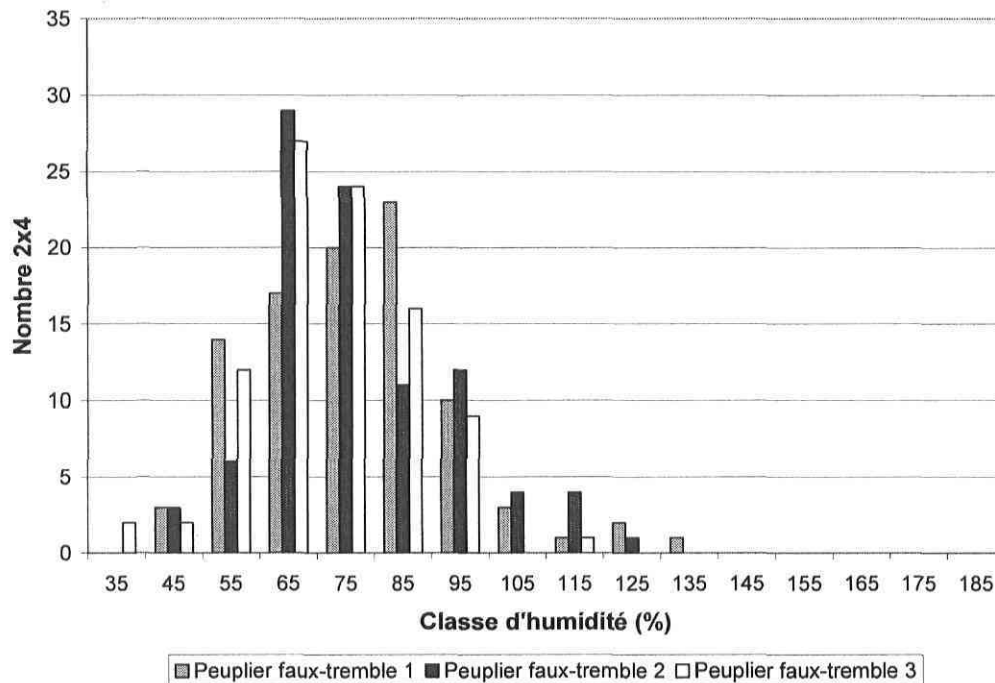


Figure 3.22. Distribution de l'humidité initiale pour les trois essais de séchage sur le bois de peuplier faux-tremble.

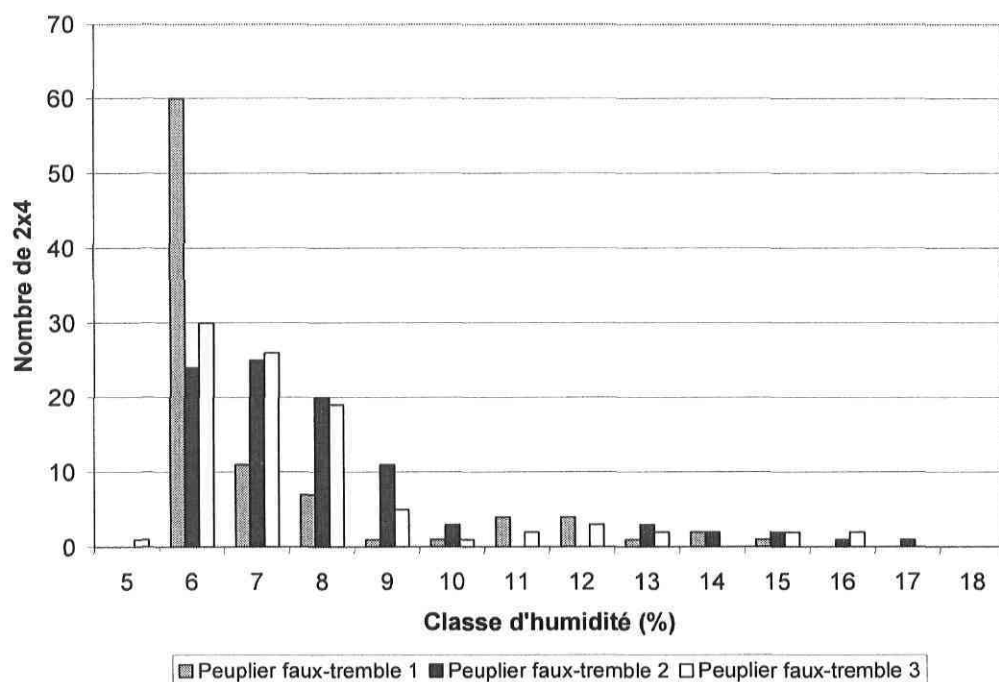


Figure 3.23. Distribution de l'humidité finale pour les trois essais de séchage sur le bois de peuplier faux-tremble.

De plus, la présence de bois à cœur humide nous a forcé à étirer la période de séchage, ce qui a provoqué inévitablement un léger sur-séchage du bois, surtout dans le cas de l'essai n° 1. Les programmes de séchage n^{os} 2 et 3 ont donc définitivement donné les meilleurs résultats, lesquels sont très similaires dans les deux cas.

3.3.4. Retraits de rive et de face

Les retraits moyens de rive pour les trois essais sur le bois de peuplier faux-tremble ont varié entre 4,8 et 5,7% alors que le retrait de face a varié entre 3,4% et 3,5% (tableau 3.12). Ces résultats démontrent un retrait de rive très important, le collapse de certaines pièces ayant probablement contribué à amplifier encore davantage la différence entre le retrait de rive et le retrait de face. D'ailleurs, certaines omissions notées au rabotage seraient le résultat de ce fort retrait en épaisseur. Ceci implique donc que la dimension cible au débitage en épaisseur devrait être augmentée légèrement pour le séchage à haute température ou encore mieux on devrait améliorer la précision du débitage, les morceaux les plus minces étant évidemment les plus sujets aux omissions au rabotage.

Tel que révélé par l'analyse de variance, on ne peut déceler aucun effet de traitement sur le retrait de face. Par contre, les retraits de rive des essais n^{os} 1 et 3 diffèrent significativement

Tableau 3.12. Retrait moyen de rive (épaisseur) et de face (largeur) pour le peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).

Essai	Retrait de rive (%)	Retrait de face (%)
1	5,5 (1,2)	3,5 (1,0)
2	4,8 (1,0)	3,5 (1,0)
3	5,7 (1,2)	3,4 (1,0)

du retrait de rive de l'essai n° 2. On ne peut cependant trouver aucune explication plausible pour cette différence de comportement.

3.3.5. Gauchissement après séchage et rabotage

Le gauchissement moyen après séchage et rabotage a varié entre 1,5 et 1,7 mm pour la torsion, entre 1,6 et 2,7 mm pour la cambrure et entre 2,3 et 3,5 mm pour la voilure (tableau 3.13). Contrairement aux deux autres espèces, la torsion s'avère dans ce cas le défaut de gauchissement le moins important, suivi de la cambrure et de la voilure. La cambrure fut responsable de tous les cas de déclassement, et cela pour les trois essais. Ce comportement semble donc typique du peuplier faux-tremble et serait relié à de fortes déviations locales du fil dans des pièces débitées sur quartier.

Tableau 3.13. Gauchissement moyen après séchage et rabotage (écart-type entre parenthèses) et proportion des colombages subissant une perte de classe pour le bois de peuplier faux-tremble.

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)	Pourcentage des colombages subissant une perte de classe
1	3,5 (1,8)	2,7 (2,6)	1,7 (1,3)	10
2	3,7 (1,4)	2,7 (2,2)	1,5 (1,2)	13
3	2,3 (1,9)	1,6 (2,3)	1,5 (1,6)	7

Quant à l'effet de traitement, à première vue il semble que l'essai n° 3 a donné les meilleurs résultats au niveau du gauchissement et ceci fut confirmé par les tests statistiques, du moins pour ce qui est de la cambrure et de la voilure (tableau A12). Le pré-rabotage pourrait alors avoir contribué à diminuer les défauts de voilure et de cambrure en créant un lestage plus efficace de la charge.

3.3.6. Gauchissement après refendage en largeur

Le tableau 3.14 présente les résultats sur le gauchissement après le refendage en largeur. Comme dans le cas de l'épinette, l'augmentation de la cambrure après le refendage en largeur indique la présence de contraintes résiduelles de séchage en direction longitudinale. Ceci est difficile à éviter dans le cas de pièces contenant de fortes déviations locales du fil. Les contraintes axiales auraient été cependant moins importantes dans le cas de l'essai n° 3.

Tableau 3.14. Gauchissement moyen après séchage et refendage au largeur pour le bois de peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).

Essai	Voilure (mm)	Cambrure (mm)	Torsion (mm)
1	2,4 (0,8)	4,3 (2,4)	0,8 (0,4)
2	3,5 (1,6)	4,1 (2,8)	0,5 (0,7)
3	2,3 (1,6)	2,2 (2,3)	1,1 (0,7)

3.3.7. Contraintes résiduelles transversales et gradients d'humidité

Le test de la fourchette n'a pas démontré des contraintes résiduelles importantes dans le plan transversal pour les trois essais. Quant aux gradients d'humidité dans l'épaisseur du bois, le tableau 3.15 indique des différences assez importantes entre le cœur et la surface pour l'essai n° 1 mais relativement faibles pour l'essai n° 3.

Tableau 3.15 Différence de teneur en humidité finale entre le cœur et la surface des colombages de peuplier faux-tremble (écart-type entre parenthèses).

Humidité finale (%)	Essai n° 1	Essai n° 2	Essai n° 3
Coeur	10,8 (7,3)	6,4 (3,7)	6,0 (1,2)
Surface	8,8 (7,0)	6,2 (1,4)	5,7 (0,6)

3.3.8. Fendillement interne et décollement de nœuds

La présence de collapse s'est manifestée chez les colombages affectés par la présence de fendillement interne plus ou moins sévère.

3.3.9. Évaluation de la couleur

Les figures 3.24, 3.25 et 3.26 montrent les résultats de mesures de la couleur (facteur L) des six éprouvettes avant et après séchage ainsi qu'après rabotage pour les trois essais. Comme pour les deux autres espèces, on peut noter un jaunissement sensible du bois au séchage. Dans ce cas, le rabotage a cependant eu moins d'effet sur la récupération de la blancheur du bois. Quant aux analyses statistiques pour la variation de la couleur, on peut noter au tableau A12 une différence significative entre les trois traitements après séchage mais cette différence s'estompe après rabotage.

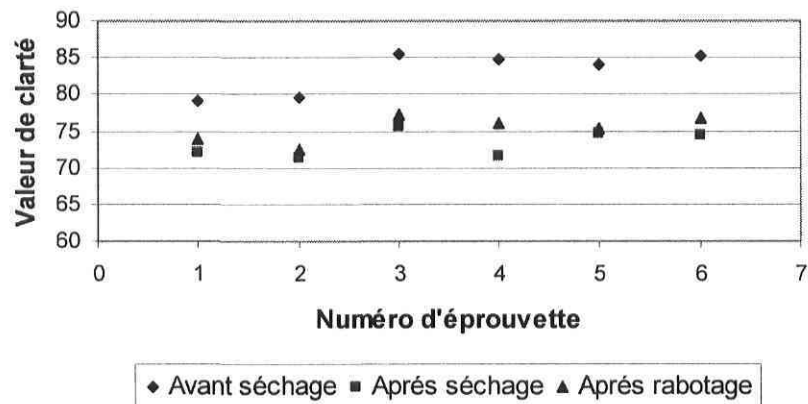


Figure 3.24. Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 1 sur le bois de peuplier faux-tremble.

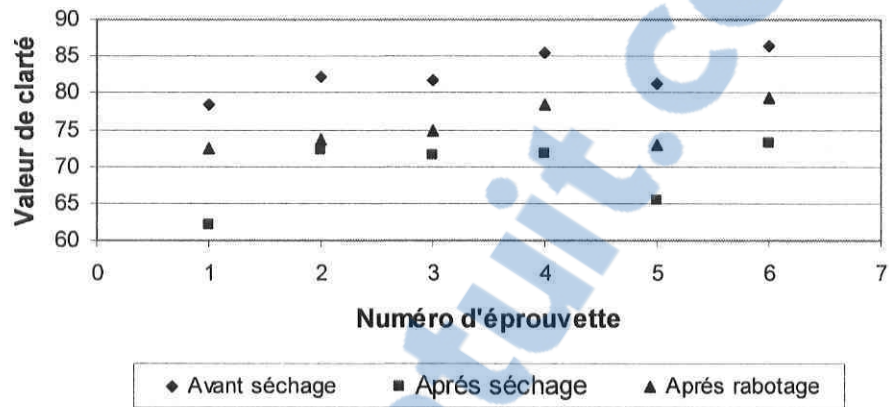


Figure 3.25. Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 2 sur le bois de peuplier faux-tremble.

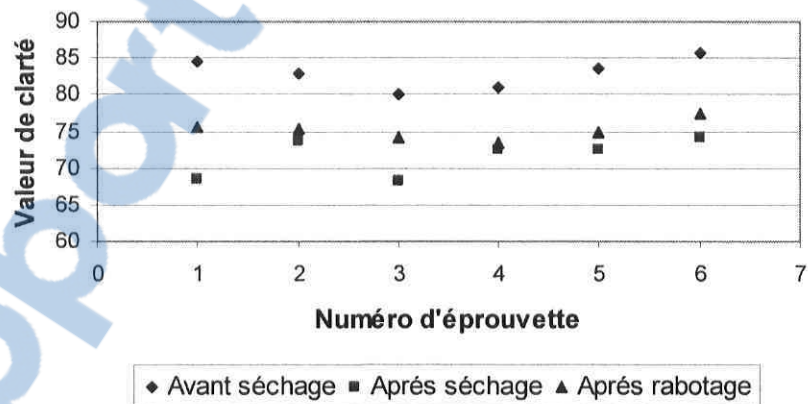


Figure 3.26. Distribution des couleurs obtenues pour l'essai n° 3 sur le bois de peuplier faux-tremble.

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

La présente étude avait pour but de développer une stratégie de séchage à haute température (HT) pour les colombages de 2x4 d'épinette blanche, de sapin baumier et de peuplier faux-tremble en vue de leur transformation en produits à valeur ajoutée. Cette stratégie de séchage devait permettre de sécher les colombages à une teneur en humidité (H) cible moyenne de 8%, avec 90% du chargement entre 6 et 10%, tout en minimisant les temps de séchage et les défauts comme le retrait dimensionnel, le niveau de gauchissement, la présence de gerces et fentes, les gradients de teneur en humidité, les contraintes de séchage résiduelles ainsi que la variation de la couleur. Neuf essais de séchage, soit trois programmes par espèce, ont été réalisés à cet effet. Chaque chargement était composé de 100 colombages de 51 mm x 100 mm x 2,44 m de dimensions. Le suivi du séchage s'est effectué par la pesée périodique de six planches témoins ainsi que par la mesure en continu de la teneur en humidité par des sondes à résistance électrique. La qualité de séchage fut évaluée sur la base de la distribution de la teneur en humidité finale, du retrait dimensionnel, du gauchissement avant et après séchage, après rabotage et refendage, du gradient de teneur en humidité, de la fréquence de gerces et fentes, ainsi que du changement de couleur du bois.

Pour le bois d'épinette blanche, la stratégie de séchage proposée dans cette étude a permis d'obtenir des teneurs en humidité finales moyennes entre 7,9 et 8,7% avec plus de 90% des colombages dans la fourchette entre 6 et 10% H. Les temps de séchage ont varié entre 68 et 71 heures, incluant une période de pré-séchage ou pré-étuvage et une période d'équilibrage d'environ 15 heures. La distribution de l'humidité finale dans les chargements démontre clairement que le pré-triage du bois en classes d'humidité initiale n'est pas requis dans le cas de l'épinette blanche si la teneur en humidité finale cible est en dessous de 10%.

Tel que prévu, le retrait de rive fut beaucoup plus élevé que le retrait de face, conséquence directe du séchage à haute température, le traitement de pré-étuvage amplifiant encore davantage le phénomène en provoquant un fluage important sur la face des débits en début de cycle.

Concernant le gauchissement après séchage et rabotage, la torsion et la cambrure ont affiché les gauchissements absolus les plus importants et se sont révélées les deux principales causes du déclassement qui fut entre 18 et 28% selon les programmes utilisés. Le programme de séchage précédé d'un pré-rabotage et d'une période de pré-étuvage semble avoir donné les meilleurs résultats bien que les tests statistiques n'aient démontré aucune tendance nette en ce sens. Par contre, les valeurs de gauchissement mesurées après refendage en largeur ont indiqué la présence de contraintes de séchage résiduelles longitudinales plus importantes pour le programme en question que pour les deux autres programmes. Quant aux gradients d'humidité dans l'épaisseur du bois en fin de séchage, les trois programmes ont montré des différences très faibles de teneur en humidité entre le cœur et la surface.

L'évaluation de la couleur a montré que le séchage à haute température peut induire un léger jaunissement du bois en profondeur. Cependant, l'opération de rabotage après séchage a indiqué que l'effet est plus prononcé en surface qu'en profondeur.

Quant au sapin baumier, la stratégie de séchage proposée pour cette essence a permis d'obtenir des teneurs en humidité finales moyennes entre 8,8 et 10,9% avec seulement 53% à 76% des débits entre 6 et 10% H. Les temps de séchage ont varié entre 76 et 116 heures, le temps le plus court référant au programme n° 1 qui n'incluait pas de période d'équilibrage en fin de cycle. Les observations visuelles sur les débits qui n'ont pas atteint la fourchette des humidités finales visée démontraient dans la plupart des cas des traces évidentes de la présence de cœur humide dans ce matériel à l'état vert. Le programme n° 3 qui incluait une période de pré-séchage a donné les meilleurs résultats pour la distribution de l'humidité finale bien que le pré-séchage en question aurait probablement conduit à une fourchette d'humidités finales plus étroite s'il avait été effectué à plus faible température.

Le retrait moyen de rive fut dans ce cas également beaucoup plus important que le retrait de face, le retrait de rive étant même supérieur au retrait théorique tangentiel du sapin baumier. Ce retrait anormal s'explique en grande partie par la présence de collapse sur une certaine proportion des débits.

Concernant le gauchissement mesuré après séchage et rabotage, la torsion a affiché les déformations absolues les plus importantes mais le déclassement global causé par les trois formes de gauchissement fut seulement de 5% pour les trois essais. Le gauchissement après refendage en largeur fut également très faible, indiquant par là que les contraintes de séchage longitudinales étaient très faibles. Le séchage à haute température a donc un effet très bénéfique sur la rectitude du bois de sapin baumier après séchage.

Les différences d'humidité moyennes entre le cœur et la surface furent de 3 à 4% H. Ceci serait acceptable pour le bois de construction mais ne l'est certainement pas pour le bois à valeur ajoutée. Une période d'équilibrage plus longue aurait certainement été préférable. Par contre, comme on le fait déjà dans l'industrie, un pré-triage du sapin baumier avant séchage en deux ou trois classes d'humidité initiale réglerait une grande partie de ce problème qui est associé aux débits trop humides en fin de cycle.

Un jaunissement comparable à celui du bois d'épinette blanche fut observé sur les colombages de sapin baumier. Une partie de la blancheur du bois perdue au séchage est cependant retrouvée après rabotage.

Enfin, dans le cas du peuplier faux-tremble, les trois programmes proposés ont conduit à des humidités finales moyennes variant entre 7,3% et 8,1% avec plus de 85% des débits dans la fourchette entre 6 et 10% H. Les temps de séchage ont varié entre 86 et 100 heures. Les deux programmes comportant trois étapes à haute température, soit les deux programmes les plus doux, ont donné les meilleurs résultats. Cependant, la présence de cœur humide indique dans ce cas également qu'un pré-triage avant séchage serait souhaitable pour le peuplier faux-tremble.

Les retraits moyens de rive et de face furent du même ordre de grandeur que dans le cas du sapin baumier, le collapse ayant contribué à amplifier sensiblement le retrait de rive sur une certaine proportion des débits. Quant au gauchissement, la cambrure fut le principal défaut et a causé un déclassement du bois de 7 à 13% des débits échantillonnés. Le gauchissement après refendage indiquait, comme dans le cas de l'épinette, la présence probable de contraintes de séchage résiduelles non négligeables dans le sens du fil.

Les gradients de teneur en humidité finale dans l'épaisseur du bois furent plus faibles que dans le cas du sapin baumier bien qu'encore trop importants pour les bois à valeur ajoutée. Un plus long équilibrage combiné à des chargements plus homogènes en humidité initiale serait donc une stratégie à adopter dans ce cas également. Quant au changement de couleur, le peuplier faux-tremble a affiché un jaunissement plus prononcé sur le bois raboté que celui observé pour les deux autres espèces mais ceci est surtout dû au fait que le bois était plus claire au départ.

BIBLIOGRAPHIE

- Aléon, D. 1982. Séchage du pin maritime à haute température. *Courrier de l'industrie du bois de l'ameublement*. 40:1-11.
- Aléon, D. 1988. Séchage du pin maritime à haute température. Dans: Actes du 2^e colloque. Sciences et industrie du bois, Nancy, 22-24 avril, 1987. pp. 13-21.
- Aléon, D., Nigrié, D.J., Pérez, J. et Snieg, O. 1988. Séchage de sapin, épicéa et de pin sylvestre à haute température. Rapport de recherche 42, novembre 1988. C.T.B.A., Paris.
- Aléon, D., Nigrié, D.J., Pérez, J. et Snieg, O. 1990. Séchage du bois: Guide pratique. C.T.B.A. 105 p.
- Allen, C.F. et Campbell, L.W. 1967. Apparatus for drying and seasoning lumber by superheated steam. U.S. Patent N°64. 398 p.
- Arganbright, G.D. 1981. Post drying operations-defects analysis and schedule adjustment-keys to quality control. Proceedings of a Western Dry Kiln Club, Oregon State University, Corvallis, Oregon, 6-8 mai 1981, pp 48-55.
- Arganbright, G.D., Venturino, J.A. et Gorvad, M. 1978. Warp reduction in young-growth ponderosa pine studs dried by different methods with top-load restraint. *Forest Prod. J.* 28(8):47-52.

- Beard, J. S., Wagner, F.G., Taylor, F.W. et Seale, R.D. 1993. The influence of growth characteristics grades of southern pine lumber. *Forest Prod. J.* 43(6):51-56.
- Ben Mhenni, A. 2002. Développement d'une stratégie de séchage pour le bois de mélèze laricin destiné aux produits de finition intérieure. Mémoire de maîtrise. Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval, Québec. 137 p.
- Boone, R.S. 1979. An introduction to high temperature drying: past research efforts and definition of terms and procedures. Proceedings of a symposium on a high temperature drying of hardwoods, New Albany, Indiana, 22 mars 1979, pp. 1-9.
- Boone, S. 1984. High-temperature kiln-drying of 4/4 lumber from 12 hardwood species. *Forest Prod. J.* 34(3):10-18.
- Borrero, M. 1998. Effet de bout et évolution des profils des paramètres intrinsèques lors du séchage sous vide discontinu. Mémoire de maîtrise, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 114 p.
- Cassen, D.L. 1979. High temperature drying of hardwoods. Proceedings of a Symposium, New Albany, Indiana, 22 mars 1979, 78 p.
- Cech, M.Y. 1964. Development of drying stresses during high temperature kiln drying. *Forest Prod. J.* 14(2)8:69-76.
- Cech, M.Y. 1975. La situation du séchage à haute température dans l'Est du Canada. Laboratoire des Produits Forestiers de l'Est. 16 p.
- Cech, M.Y. et Huffman, D.R. 1971. High temperature kiln-drying of spruce joist. *Forest Prod J.* 21(10):55-60.

- Cech, M.Y., Pfaff, F. et Huffmann, D.R. 1973. Seasoning methods to eliminate resin exudation in red pine lumber. *Forest Prod. J.* 23(11):42-46.
- Cech, M.Y., Pfaff, F. et Huffmann, D.R. 1974. High Temperature drying of mixed Spruce, Jack pine and Balsam fir. Department of the Environment. Canadian Forestry Service. Publication No.1337. Ottawa. 15 p.
- Cech, M.Y. et Pfaff, F. 1980. Manuel d'opérateur de séchoir à bois de l'Est du Canada. Forintek Canada Corp., Laboratoire des produits forestiers de l'Est. 209 p.
- Chafe, S.C. 1996. Drying in thin section of wetwood infected hoop pine. *Holzforschung.* 50: 55-61.
- Chanrion, P. et Davesne, A. 1991. Le séchage des feuillus. Cahier L049.C.T.B.A., Paris, 42 p.
- Clément, C. 2001. Évolution des profils de teneur en humidité, de température et de pression au cours du séchage sous vide en vapeur surchauffée. Mémoire de maîtrise, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 94 p.
- Clément, C. et Fortin, Y. 1996. Calcul de la consommation énergétique au cours du séchage du bois. Compte rendu des Ateliers-conférences sur le séchage de l'A.M.B.S.Q., 2^{ème} éd., 25-26 avril 1996, Québec.
- Cloutier, A. et Fortin, Y. 1993. A model of moisture movement in wood based X on water potential and the determination of the effective water conductivity. *Wood Sci. Technol.* 27(42):95-114.
- Culpepper, L. 1990. High temperature drying: enhancing kiln operations. Miller Freeman Publications, Inc., San Francisco. 316 p.

- Defo, M., Fortin, Y. et Cloutier, A. 1999. Determination of the effective water conductivity of sugar maple sapwood and the white spruce heartwood under vacuum. *Wood Fiber Sci.* 31(4):343-35.
- Dokken, M. et Lefebvre, R. 1973. Drying veneer peeled from seven New Brunswick balsam fir logs. Eastern forest Products Laboratory Ottawa, Report OPXOE, 20 p.
- Duplain, G. 2003. Séchage à haute température du 2x3 d'épinette noire destiné aux produits à valeur ajoutée. Mémoire de maîtrise. Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval, Québec. 122 p.
- Duplain G., Fortin, Y. et Laforest, P. 2000. High temperature drying of black spruce for value-added products. Communication orale présentée au XXI^e congrès mondial de L'IUFRO, tenu à Kuala Lumpur, Malaisie, du 7 au 12 Août 2000, 11 p.
- Durisova, V. 1984. Influence of conditioning on the quality of seasoned wood. *Holztechnologie* 25(1):23-24.
- Ericksson, K.E.L., Blanchette, R.A. et Ander, P. 1990. Microbial and enzymatic degradation of wood and wood components. Springer Verlag, 407 p.
- Fabris, S. 1993. Le séchage à haute température dans l'Est du Canada : Conditions de séchage utilisées et qualité du bois. Mémoire de maîtrise. Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval, Québec. 141 p.
- Fiske, L.M. Jr. 1990. Are the kilns the problem? Proceedings of a conference on: Causes and control of corrosion in lumber dry kiln buildings, University of Tennessee, Knoxville, 13-14 november 1990, pp. 19-23.

- Fortin, Y. 2000. Notes de cours de séchage et préservation SBO-17192, Département des sciences des bois et de la forêt, Université Laval.
- Garrahan, P. et Cane, D. 1988. Analyse des niveaux de déclassement causés par le séchage des sciages de dimensions spécifiées d'épinette-pin-sapin. Forintek Canada Corp., Ottawa. 33 p.
- Garrahan, P.A., Savard, M. et Cane, D.A. 1994. Sorting and drying eastern SPF on the basis of initial moisture content. Forintek Canada Corp. Report projet n^o. 3743k441. 118 p.
- Girard, B. 2003. Évaluation de l'aptitude du bois d'épinette blanche de plantation au séchage à moyenne et à haute température. Mémoire de maîtrise. Département des sciences du bois et de la forêt. Université Laval, Québec. 88 p.
- Goring, D.A. 1963. Thermal softening of lignin, hemicellulose and cellulose. Pulp and Pap. Mag. Can. 64(12):T517-T527.
- Harris, R.A., Schroeder, J.G. et Addis, S.C. 1989. Steaming of red oak prior to kiln drying : Effects on moisture movement. Forest Prod. J. 39(11/12):70-72.
- Hart, C.A. et Thomas, R.J. 1967. Mechanism of bordered pits aspiration as caused by capillarity. Forest Prod. J. 17(11):61-68.
- Haygreen J.G. et Bowyer, J.L. 1989. Forest products and wood science: An introduction. Iowa State University Press. Ames, Iowa. 500 p.
- Huffman, D.R. 1976. High-temperature drying effect on the bending strength of spruce pine-fir joists. Forest Prod. J. 27(3):55-57.

- Jessome, A. P. 1977. Résistance et propriétés connexes de bois indigènes du Canada. Rapport technique de foresterie N° 21, Laboratoire des produits forestiers de l'Est, Ottawa. 37p.
- Joly, P. et More-Chevalier, F. 1980. Théorie, pratique et économie du séchage des bois. Éditions H. Vial. 204 p.
- Kimball, K.E. et Lowery, D.P. 1967. Quality of studs kiln-dried by high and conventional temperatures. *Forest Prod J.* 17(9):81-85.
- Kininmonth, J.A., Miller, W.A. et Riley, S. 1980. Energy consumption in lumber drying. Dans: Proc. Wood Drying Papers presented at the IUFRO Division V Conference, Oxford, England. New Zealand For. Serv., For. Res. Inst., Publication F.S.G. 33.p. 1-18.
- Kininmonth, J.A. et Williams, D.H. 1984. High temperature drying of radiate pine- New Zealand experience. *Australian Forest Ind. J.* 13(6): 45-47.
- Koch, P. 1972. Utilisation of the southern pines. USDA Forest Service, Agri. Handb. N°. 420. 991 p.
- Kollmann, F. et Côté, W.A. 1986. Principles of wood science and technology. Tome I, Springer – Verlag, New York. 496 p.
- Langlois, R. 1956. Tableaux de séchage du tremble (*Populus tremuloides* Michx). Thèse de baccalauréat. Université Laval.
- Lihra, T. 1999. Détermination de la perméabilité du bois de sapin baumier par les poches humides. Mémoire de maîtrise, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 80 p.

- Mackay, J.F.G. et Rumball, B.L. 1972. Plasticizing distorsion-prone softwood studs prior to high-temperature seasoning. *Forest Prod. J.* 22(6):27-28.
- Mackay, J.F.G. 1973. The influence of drying conditions and other factors on twist and torque in *Pinus radiata* studs. *Wood Fiber Sci.* 4(4):264-271.
- Mackay, J.F.G. 1974. High temperature kiln drying of northern aspen 2 by 4 inch light framing lumber. *Forest Prod. J.* 24 (10):32-35.
- Maeglin, R.R., Liu, J.Y. et Boone, R.S. 1985. High temperature drying and equalizing: Effects on stress relief in yellow- poplar lumber. *Wood Fiber Sci.* 17(2):240-253.
- Mauritz, R. 1992. First results with high temperature drying of large sized structural wood. Dans: 3rd IUFRO International wood drying conference. Vienna, August 18-21. (Vanek, M.). pp 374-378.
- McCollum, M.P. 1986. Effect of high temperature drying on the grade yield and shrinkage of southern pine lumber. *Forest Prod. J.* 36(3):51-53.
- McMillen, J.M. et Wengert, E.M. 1978. Drying eastern hardwood lumber. *USDA Agriculture Handbook N°528.* 42.
- Milota, M. 2000. Warp and shrinkage of hem-fir stud lumber dried at conventional and high temperatures. *Forest Prod. J.* 50(11/12):79-84.
- Mullins, E.J. 1981. *Canadian woods: their properties and uses.* Toronto. University of Toronto and Environment Canada, Government of Canada. Centre de publications. 17-18 p.

- Ngangué, Y. 2000. Les défauts liés au séchage : à quel moment du processus? Textes des conférences prononcées dans le cadre du séminaire sur le séchage des bois d'apparence. Q-Web, Ste Foy, 5 décembre 2000. pp 1-9.
- NLGA. 1987. Standard grading rules for Canadian Lumber. National Lumber Grades Authority, Vancouver, Canada. 207 p.
- Oliveira, C. L. et Cai, L. 2004. Equalizing and conditioning spruce-pine-subalpine fir lumber. Forest Prod. J. 54 (12):126-131.
- Panshin A.J. et de Zeeuw, C. 1980. Textbook of wood technology. Vol. 1 McGraw- Hill, Inc., New York. 643 p.
- Pépin, G. 2000. Séchage hybride: Combinaison de séchage conventionnel et d'humidification. Compte rendu du séminaire sur le séchage des bois d'apparence (Q-Web, Forintek Canada Corp., AMBS, MRN), Ste –Foy, 5 décembre 2000.
- Quarles, S.L. et Wengert, E.M. 1989. Applied drying technology, 1978 to 1988. Forest Prod. J. 39(6):25-38.
- Rendle, B. J. 1960. Fifty years of timber research: A short history of the Forest Products Research Laboratory. Prices Risborough.
- Rosen. 1979. Energy requirements in high temperature and conventional kilns. Dans : Proc. High temperature drying of hardwoods. Purdue University, West Lafayette, Ind. pp. 41-54.
- Salamon, M. 1969. High temperature drying and its effect on wood properties. Forest Prod. J. 19(3):27-34.

- Savard, M. 1999. Analyse des stratégies de prétriage pour le séchage de l'Éps. Compte rendu des Ateliers-Conférences sur le séchage du bois, 5^e éd. Québec 21-23 avril 1999.
- Schafer, R.F. 1973. What you should know about high-temperature drying?. *Canadian Forest Industries* 93(10):70-71.
- Schneider, M. H. et Zhou, L. 1989. Characterization of wetwood from four balsam fir trees. *Wood Fiber* 21 (1):1-16.
- Sehlstedt-Persson, S.M.B. 1995. High temperature drying of Scots pine, A comparison between HT- and LT-Drying. *Holz-als-Roh-und-Werkstoff*. 53(2):95-99.
- Senft, J. F., Benftsnet, B.A. et Galligan, W.L. 1986. Weak Wood: fast-grown trees make problem lumber. *Journal of Forestry* 83(8):477-484.
- Shink, B., Ward, J.C. et Zeikus, J.G. 1981. Microbiology of wetwood: Importance of pectin degradation and clostridium species in living trees, *Applied and Environmental Microbiology*, pp. 526-532.
- Siau, J. F. 1984. Transport processes in wood. Springer series in Wood Sciences. 245 p.
- Simpson, W.T. 1975. Effect of steaming on the drying rate of several species of wood. *Wood Sci.* 7(3):247-255
- Simpson, W.T. 1991. Dry Kiln operator's manual. Agriculture Handbook 88. USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison. Vol. I. 274 p.
- Simpson, W.T. et Tschernitz, J.L. 1998. Effects of thickness variation on warp in high-temperature drying plantation-grown loblolly pines 2 by 4's *Wood Fiber Sci.* 30(2):165-174.

- Smith, W.B. et Siau, J.F. 1979. High-temperature drying of red pine. *Journal of the Institute of Wood Science* 8(3):129-133.
- Stevens. 1961. Drying with and without restraint. *Forest Prod. J.* 11(8):348-366.
- Steinhagen, H. 1972. Effect of kiln air velocity, at various moisture content levels, on drying rate of 4/4 yellow- poplar sapwood. *Forest Prod. J.* 24(4):45-47.
- Stojanov, V. et Enthev, E. 1968. Properties of silver fir wetwood. *Gorskostop Nauka Sofija S(S)*, P.61-73 Danr : Ward , J-C. et W.Y. Pong, 1980. Wetwood in trees: A Timber Ressource problem. USDA report PNW-112, 56 p.
- Sumi, H. et Mc Millen, J.M. 1979. High-temperature drying of Douglas-fir dimension lumber. *Forest Prod. J.* 29(1):25-33.
- Taylor, F.W. 1982. A comparison of energy requirements for kiln-drying temperatures. *Wood Fiber* 14(4):247-253.
- Tiemann, H.D. 1920. *The kiln drying of lumber.* Lippincot Co. Philadelphia.
- Tremblay, C., Cloutier, A. et Fortin, Y. 2000. Determination of the effective water conductivity of red pine sapwood. *Wood Sci. Technol.* 34(2):109-124.
- Tremblay, C., Lavoie, V. et Savard, M. 2001. Étude comparatrice du séchage du chêne rouge 4/4 par le procédé sous vide à vapeur surchauffée et le procédé conventionnel. Projet N° 2293A, Forintek Canada Corp.

- Tremblay, C. 2003. Essais de séchage et pré-séchage à l'air libre dans le cadre du projet "Revue et optimisation des options de séchage du sapin baumier". Projet N° 3259, Forintek Canada Corp.
- USDA. 1988. Dry kiln operator's manual. Forest Prod. Lab., U.S. Dep. of Agric. Memphis.TN, 342 p.
- Villière, A. 1966. Séchage du bois. Sixième édition, Dunod Paris. 409 p.
- Wang, X.D. 2002. Séchage à haute température de la planche 1x4 d'épinette noire destinée aux produits à valeur ajoutée. Mémoire de maîtrise, Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec. 115 p.
- Ward, J.C. et Pong, W.Y. 1980. Wetwood in trees: A lumber resource problem. USDA Report PNW-112, 56 p.
- Ward, J.C. 1986. The effect of wetwood on lumber drying times and rates: An exploratory evaluation with longitudinal gas permeability. Wood Fiber 18(2):288-307.
- Wilcox, W.W. 1968. Some physical and mechanical properties of wetwood in white fir. Forest Prod. J. 18(12): 27-31.

Annexe

Tableau A1. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 1 de l'épinette blanche.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		97	95	17,4
2- Préséchage	6		95	90	11,4
3- Séchage HT 1		>35	105	94	6,2
4- Séchage HT 2		35 - 8	115	90	3,5
5- Refroidissement	2		115-90		
6- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
7- Conditionnement	4		90	84,0	11
8- Refroidissement	3		40		

Tableau A2. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 2 de l'épinette blanche.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		97	95	17,4
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage HT 1		>35	105	94	6,2
4- Séchage HT 2		35 - 8	115	90	3,5
5- Refroidissement	2		115-90		
6- Conditionnement	2		90	84,0	11
7- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
8- Conditionnement	4		90	84,0	11
9- Refroidissement	3		40		

Tableau A3. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 3 de l'épinette blanche.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		97	95	17,4
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage HT 1		>35	105	94	6,2
4- Séchage HT 2		35 - 8	115	90	3,5
5- Refroidissement	2		115-90		
6- Conditionnement	2		90	84,0	11
7- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
8- Conditionnement	4		90	84,0	11
9- Refroidissement	3		40		

Tableau A4. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 1 du sapin baumier.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		99	98	17,7
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage HT 1		100 - 20	105	92	6,3
4- Séchage HT 2		20 - 8	115	90	3,5
5- Refroidissement	2		115-90		
6- Conditionnement	4		90	84,0	11
7- Refroidissement	3		40		

Tableau A5. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 2 du sapin baumier.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		99	98	17,7
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage TE 1		100 - 70	95	88	10,5
4- Séchage HT 1		70 - 20	105	94	6,2
5- Séchage HT 2		20 - 8	115	90	3,5
6- Refroidissement	2		115-90		
7- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
8- Conditionnement	4		90	84,0	11
9- Refroidissement	3		40		

Tableau A6. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 3 du sapin baumier.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		97	95	17,4
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage TE 1		>100	90	86	13,8
4- Séchage TE 2		100 - 70	95	88	10,5
5- Conditionnement	2	-	95	95	21,2
6- Séchage HT 1		70 - 20	105	94	6,2
7- Séchage HT 2		35 - 8	115	90	3,5
8- Conditionnement	2		90	84,0	11
9- Refroidissement	2		115-90		
10- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
11- Conditionnement	4		90	84,0	11
12- Refroidissement	3		40		

Tableau A7. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 1 du peuplier faux-tremble.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		99	98	17,7
2- Pré-étuvage	6		95	95	21,2
3- Séchage HT 1		72 - 38	105	92	6,3
4- Séchage HT 2		38 - 8	115	90	3,5
5- Refroidissement	1		115-90		
6- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
7- Conditionnement	4		90	84,0	11
8- Refroidissement	3		40		

Tableau A8. Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 2 du peuplier faux-tremble.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1-Réchauffage	4		99	98	17,7
2- Pré-étuvage	10		95	95	21,2
3- Séchage HT 1		73 - 45	105	92	6,3
4- Conditionnement		45 - 42	105	99	9,9
5- Séchage HT 2		42 - 8	115	90	3,5
6- Refroidissement	1		115-90		
7- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
8- Conditionnement	4		90	84,0	11
9- Refroidissement	3		40		

Tableau A9: Programme de séchage utilisé pour l'essai n° 3 du peuplier faux-tremble.

Étape	Durée (h)	Teneur en humidité moyenne (%)	T _s (°C)	T _h (°C)	H _{éq} (%)
1- Réchauffage	4		97	95	15,5
2- Pré-étuvage	7		95	95	17,4
3- Séchage HT 1		70 - 54	105	94	6,2
4- Séchage HT 2		54 - 40	115	95	4,3
5- Séchage HT 3		40 - 8	115	90	3,5
6- Refroidissement	1		115-90		
7- Équilibrage	15		90	75,6	7,1
8- Conditionnement	4		90	84,0	11
9- Refroidissement	3		40		

Tableau A10. Résultats des analyses statistiques pour l'épinette blanche.

Source de variation	Valeurs de l'Anova		Homogénéité de la variance		Traitement – test de comparaison des moyennes de Duncan entre les programmes de séchage		
	F	Pr > F	F	Pr > F	Epinette blanche 1	Epinette blanche 2	Epinette blanche 3
Humidité finale	10,900	0,0001	0,320	0,727	B	A	B
Retrait de face	5,940	0,004	1,620	0,203	A	B	B
Retrait de rive	1,230	0,295	0,470	0,625			
Gauchissement après séchage							
Voilure	13,210	0,0001	2,300	0,108	A	A	B
Cambrure	4,100	0,019	1,220	0,298	A	B	B
Torsion	0,060	0,938	2,110	0,127			
Gauchissement après rabotage							
Voilure	1,890	0,157	2,110	0,127			
Cambrure	1,260	0,287	0,510	0,603			
Torsion	0,820	0,442	2,140	0,123			
Gauchissement après refendage-largeur							
Voilure	3,120	0,069	0,880	0,432			
Cambrure	2,660	0,093	3,220	0,060			
Torsion	1,160	0,328	0,020	0,985			
Gradient d'humidité							
Coeur	2,970	0,062	1,380	0,263	B	A,B	A
Surface	3,640	0,035	1,680	0,198	B	A,B	A
Couleur- facteur L							
Avant séchage	1,060	0,305	3,560	0,062			
Après séchage	12,860	0,001	1,250	0,266		A	B
Après rabotage	32,190	0,000				A	B

Tableau A11. Résultats des analyses statistiques pour le sapin baumier.

Source de variation	Valeurs de l'Anova		Homogénéité de la variance		Traitement – test de comparaison des moyennes de Duncan entre les programmes de séchage		
	F	Pr > F	F	Pr > F	Sapin baumier 1	Sapin baumier 2	Sapin baumier 3
Humidité finale	6,360	0,002	2,130	0,121	B	A	B
Retrait de face	0,330	0,722	0,080	0,919			
Retrait de rive	4,570	0,012	0,090	0,913	B	B	A
Gauchissement après séchage							
Voilure	2,130	0,123	0,570	0,565			
Cambrure	2,060	0,132	0,940	0,392			
Torsion	0,130	0,879	0,740	0,478			
Gauchissement après rabotage							
Voilure	0,490	0,614	0,590	0,558			
Cambrure	0,020	0,983	0,710	0,492			
Torsion	0,070	0,937	0,140	0,868			
Gauchissement après refendage-largeur							
Voilure	5,12	0,0141	2,34	0,118	A	A,B	B
Cambrure	0,500	0,613	1,180	0,323			
Torsion	0,360	0,701	0,590	0,563			
Gradient d'humidité							
Coeur	0,300	0,740					
Surface	0,230	0,798	0,840	0,439			
Couleur- facteur L							
Avant séchage	8,420	0,000	0,600	0,550	A	A	B
Après séchage	31,300	0,000	1,160	0,315	A	A	B
Après rabotage	21,620	0,000	2,7	0,0702	A	B	C

Tableau A12. Résultats des analyses statistiques pour le peuplier faux-tremble.

Source de variation	Valeurs de l'Anova		Homogénéité de la variance		Traitement – test de comparaison des moyennes de Duncan entre les programmes de séchage		
	F	Pr > F	F	Pr > F	Peuplier faux-tremble 1	Peuplier faux-tremble 2	Peuplier faux-tremble 3
Humidité finale	2,190	0,114	1,080	0,341	B	A	A,B
Retrait de face	0,250	0,770	0,350	0,709	A	A	A
Retrait de rive	6,970	0,001	0,700	0,498	A	B	A
Gauchissement après séchage							
Voilure	1,660	0,194	0,410	0,662			
Cambrure	2,310	0,104	0,330	0,718			
Torsion	1,450	0,239	1,320	0,271			
Gauchissement après rabotage							
Voilure	5,830	0,004	0,480	0,621	A	A	B
Cambrure	4,020	0,021	0,250	0,779	A	A	B
Torsion	0,160	0,849	0,770	0,464	A	A	A
Gauchissement après refendage-largeur							
Voilure	2,350	0,115	0,740	0,485			
Cambrure	2,150	0,136	0,190	0,829			
Torsion	0,320	0,732	0,940	0,403			
Gradient d'humidité							
Coeur	4,560	0,015	2,800	0,072	A	B	B
Surface	2,440	0,099	1,490	0,238	A	A	A
Couleur- facteur L							
Avant séchage	0,190	0,825	1,670	0,191			
Après séchage	16,680	0,0001			A	B	C
Après rabotage	0,130	0,882			A	A	A