

Sécheresse à cœur du Douglas et aptitude au déroulage : recherche de procédés alternatifs d'étuvage. I. Répartition de l'eau dans le bois vert et réhumidification sous autoclave

Frédéric Mothe^{a,*}, Rémy Marchal^b et Wladimir Tilmant Tatischeff^c

^a ERQB - INRA, F-54280 Champenoux, France

^b LaBoMaP - ENSAM, F-71250 Cluny, France

^c ESB, F-44087 Nantes Cedex, France

(Reçu le 18 février 1999 ; accepté le 10 novembre 1999)

Résumé – L'analyse de la répartition de l'humidité sur des carottes de sondage, des planches fraîchement sciées et des placages déroulés de Douglas ont permis de confirmer la faible teneur en eau du duramen de cette essence. Quels que soient l'arbre et la position radiale dans le cerne, l'humidité est de l'ordre de 30 % dans le duramen alors qu'elle atteint 80 à 150 % dans l'aubier. La reprise d'humidité a ensuite été analysée sur des billons de 12 cm de long soumis à différents traitements hygrothermiques (bouillottage conventionnel, bain chaud/froid, cycles vide/pression). Seuls les traitements à base de vide et pression s'avèrent efficaces. L'humidité du duramen varie après traitement entre 50 % et 150 %, les plus fortes valeurs étant obtenues dans le bois initial.

bois / Douglas / déroulage / duramen / étuvage

Abstract – **Heart dryness of Douglas fir and ability to rotary cutting: Research of alternative boiling processes. I. Moisture content distribution inside green wood and water impregnation with an autoclave.** The analysis of the moisture content variations along Douglas fir increment cores, fresh cut logs and peeled veneers allowed to confirm the low level of moisture content inside Douglas fir heartwood. Whatever the tree and the inside ring location may be, the heartwood moisture content is about 30% vs. 80 to 150% for sapwood. Several hygrothermic treatments (conventional boiling, hot/cold baths, vacuum/pressure cycles) have been applied to 12 cm long bolts in view to measure the moisture content increasing. Only the treatments involving vacuum and pressure appeared efficient. The heartwood moisture content after such treatments ranged from 50% to 150%. The higher M.C. were obtained inside earlywood.

wood / Douglas / rotary cutting / heartwood / boiling proces

1. INTRODUCTION

Bien que le Douglas soit parmi les premières essences déroulées dans le monde la qualité des placages qu'il fournit s'avère parfois bien inférieure à celle

des bois tropicaux traditionnellement utilisés par les industries du déroulage en France. Plusieurs auteurs ont observé une dégradation de la qualité des placages dans le bois de cœur, ce qui se traduit par une plus forte rugosité [4, 5, 9].

* Correspondance et tirés à part
Tél. 03 83 39 41 45 ; Fax. 03 83 39 40 69 ; e-mail : mothe@nancy.inra.fr

Cette dégradation de la qualité s'explique par la différence très marquée d'humidité du bois vert entre l'aubier et le duramen. Ce phénomène existe chez la plupart des résineux ainsi que chez les Douglas américains [6] mais semble atteindre des niveaux de gravité accentués chez les Douglas introduits en Europe [2, 5, 7, 11]. Or le déroulage de bois à trop faible teneur en eau s'accompagne souvent d'arrachements, fissurations et déstructurations du placage [12].

Le rôle exact de l'humidité, tout comme le niveau minimal nécessaire pour garantir une coupe de qualité n'ont pas encore été clairement établis. Takano et Kinoshita [10] observent par exemple une décroissance de la rugosité de placages de Sugi avec l'humidité lorsque celle-ci varie entre 100 et 250 %. En ce qui concerne le Douglas, nos observations expérimentales nous conduisent à penser qu'une élévation de l'humidité du duramen minime - de l'ordre de +10% - mais homogène suffirait à améliorer significativement la qualité du déroulage.

L'étuvage (chauffe du bois à la vapeur ou par bouillottage) est pratiqué habituellement dans l'industrie du déroulage pour «plastifier» le bois¹ et fluidifier la résine, ce qui a pour effet de réduire les efforts de coupe et d'améliorer ainsi la durée de vie de l'outil et la qualité du placage. Le rôle traditionnel de l'étuvage n'est donc pas de réhumidifier le bois.

Il est néanmoins souvent admis que cette opération entraîne accessoirement une pénétration de l'eau, même dans un bois réputé difficilement imprégnable comme le duramen de Douglas. Notre propos est ici de vérifier cette hypothèse, et dans la négative de rechercher si une adaptation à moindre coût du procédé d'étuvage pourrait favoriser une reprise homogène d'humidité. Nous nous sommes pour cela limités à la technique du bouillottage par immersion dans l'eau en faisant varier principalement trois paramètres : la température, la durée d'immersion et la pression.

Pour constituer notre échantillonnage et comparer l'efficacité des différentes modalités d'étuvage, nous avons été amenés à établir des cartographies d'humidité avant et après chaque traitement. Nous présentons ici les observations qui en découlent concernant la répartition de l'humidité dans le bois vert et sa variabilité, bien que ces résultats dépassent largement notre objectif appliqué.

¹ Plus précisément, à rendre le bois plus facilement déformable en favorisant ainsi l'écoulement du copeau.

2. MATÉRIEL ET MÉTHODE

2.1. Échantillonnage

L'échantillonnage a été effectué dans un dispositif équienne de 42 ans mis en place par l'AFOCEL, à Cussy-en-Morvan (71). Des carottes de sondage ont été prélevées à la tarière de Pressler à 1m 30 de hauteur sur quarante arbres répartis sur deux placettes de ce dispositif.

Aussitôt après extraction, chaque carotte a été enveloppée dans du papier aluminium et insérée dans un tube étanche afin de la prémunir de l'évaporation.

Quelques heures après ce prélèvement, chaque carotte a été sectionnée en éléments de 10 mm qui ont ensuite été pesés à l'état vert puis après déshydratation pendant 24 h à 103 °C.

Après analyse des 40 profils d'humidité obtenus, deux arbres (arbre 2 dominé, arbre 12 dominant) jugés représentatifs par leur vigueur et leur profil d'humidité (*tableau I* et *figure 3*) ont été sélectionnés pour les essais d'étuvage sous autoclave.

Les deux arbres sélectionnés ont été abattus une semaine après le carottage et débités en billes de 2 m de long. Chacune des modalités d'étuvage décrites ci-dessous a été testée sur deux billons consécutifs de 120 mm de long prélevés sur une bille de 2 m (*figure 1*) issue de chacun des arbres.

Après traitement (étuvage), 2 rondelles de 20 mm (1 rondelle extérieure et la rondelle médiane) ont été prélevées sur le premier billon. Ces rondelles ont été déroulées en 1 mm d'épaisseur à l'aide d'une micro-dérouleuse de laboratoire. Un copeau de 20 mm × 20 mm a été récupéré à chaque tour sur un même rayon, pesé «brut de déroulage» puis déshydraté par un séjour de 24 h à l'étuve sèche à 103 °C. Cette opération donne accès à la densité du copeau, à la masse d'eau contenue et au taux d'humidité². Cette procédure a été répétée sur un disque

Tableau I. Quelques caractéristiques moyennes des arbres 2 et 12.

Arbre	2	12
Ø à 1,30 m (cm)	30	43
Volume (m ³)	0,9	1,85
H aubier (%)	145	180
H duramen (%)	30	30
Largeur cerne (mm)	3,7	5,4

² Du fait de la mise au rond préalable de la rondelle et de son entraînement par une griffe de 80 mm de diamètre, la série radiale comporte un nombre réduit de copeaux tant dans l'aubier qu'à proximité de la moelle.

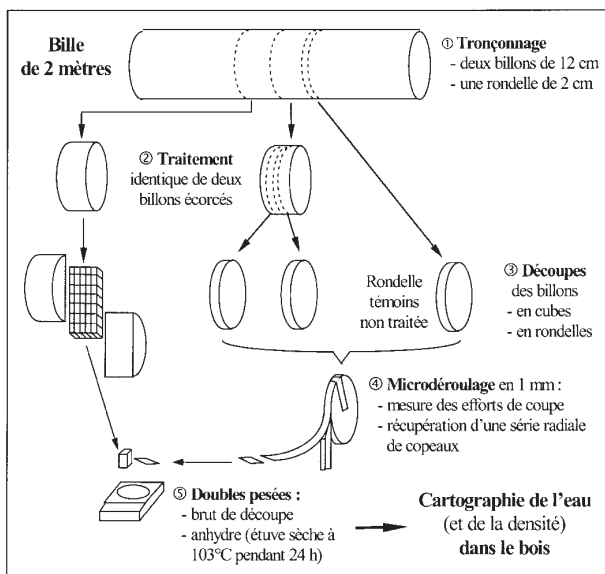


Figure 1. Mode opératoire pour l'établissement d'une cartographie de l'eau dans le bois.

témoin apparié au billon traité afin de connaître la répartition d'humidité de départ dans le bois vert.

Le second billon, étuvé de la même façon que le premier, a servi à établir une cartographie plus globale de l'humidité. À cette fin, une « planche » de cœur en pur quartier a été prélevée puis débitée en cubes de 20 mm d'arête soumis à une double pesée dans les mêmes conditions que précédemment.

Enfin, pour compléter ces données, 3 planches de cœur ont été prélevées sur 3 autres arbres issus du même dispositif et des doubles pesées ont été réalisées en scierie sur une centaine de cubes prélevés suivant le plan indiqué sur la figure 2.

2.2. Étuvage

Trois principales modalités d'étuvage ont été testées (tableau II) :

– des *bouillottages simples* (BS) : les billons sont placés dans de l'eau à 20 °C qui subit une courte période de chauffe jusqu'à la température de consigne de 50 °C (BS1) ou 80 °C (BS2). Les bois séjournent alors pendant 24 à 48 h dans le bain d'eau réglé à cette température.

– des *cycles chaud/froid* (CF) : l'amorce du cycle est similaire à ceux des BS, mais une fois la température de consigne de 60 °C (CF1) ou 80 °C (CF2) atteinte, le bois

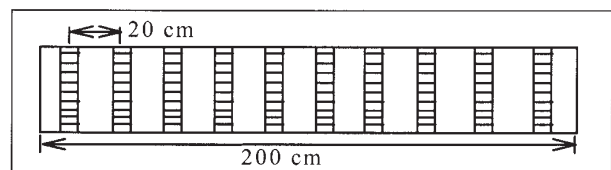


Figure 2. Plan de découpe des planches de cœur.

demeure dans l'eau maintenu à cette température pendant 12 h. On laisse ensuite refroidir l'ensemble dans l'atmosphère ambiante jusqu'à 20 °C, soit une période avoisinant 48 h. Un double cycle (cycle répété une fois) a été testé à 80 °C (CF3).

– des *cycles vide/pression* (VP) : le bois est placé dans un autoclave de laboratoire et subit un cycle vide et pression de type Bethell simplifié comprenant un vide initial d'une heure à - 0,7 bar suivi d'une période de pression de 2 h à + 7 bars. Un cycle a été conduit à température ambiante (VP1). Deux options ont été testées à 60 °C : un cycle pendant lequel le bois reste constamment dans l'eau (VP2) et un cycle dans lequel l'immersion n'intervient qu'après la période de vide partiel (VP3).

2.3. Microdéroulage

Pour établir des profils de variation de l'humidité à l'échelle du cerne sur les rondelles de 20 mm nous avons procédé par microdéroulage. La microdérouleuse utilisée est le banc d'essai dynamométrique d'usinage du LaBoMaP-ENSAM décrit par Butaud et al. [1]. Les déroulages ont été effectués avec une passe d'usinage de 1 mm, un angle de dépouille de 0,3°, sans barre de pression pour éviter les pertes d'eau pendant l'usinage.

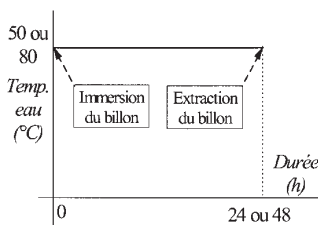
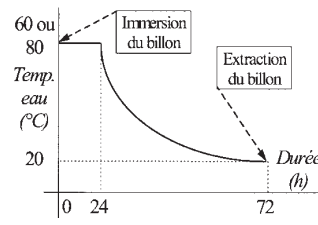
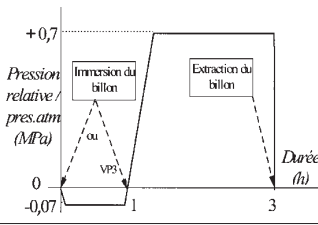
Il faut noter que, même s'ils nous ont permis quelques observations usuelles sur le comportement au déroulage des bois traités, ces essais sur des « billons » très courts demeurent trop éloignés des conditions de déroulage usuelles pour qu'il soit possible d'évaluer sur le ruban de placage produit un gain éventuel de qualité.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1. Répartition de l'humidité dans le bois vert

Les profils radiaux obtenus sur carottes de sondages (figure 3) font apparaître une chute brutale d'humidité lorsque l'on passe de l'aubier au duramen. Cette transition s'accompagne d'une dispersion des valeurs très

Tableau II. Principaux paramètres d'étuvage testés.

Types de cycle	Code	Température (°)	Durée (h)
	BS1	50	24
	BS2	80	48
Bouillottage Simple (BS)			
	CF1	60	12+48
	CF2	80	12+48
	CF3	80	2. × CF2
Chaud & Froid (CF)			
	VP1	20	1+2
	VP2	60	1+2
	VP3	60	1+2
Vide & Pression (VP)			

atténuée dans le duramen : les valeurs y sont majoritairement comprises entre 20 et 40 %.

Les niveaux d'humidité du bois vert sont comparables à ceux rapportés dans la bibliographie (*tableau III*). Cependant, si on se réfère aux valeurs obtenues sur planches (*figure 4*), ces mesures d'humidité sur carottes de sondage paraissent sous-estimées d'environ 5%. En effet, la durée de l'opération de découpe des carottes (≈ 5 mn) a pu suffire pour permettre un début de séchage des éprouvettes avant la première pesée à l'état vert.

Les mesures effectuées sur les placages montrent que les deux arbres étudiés présentent une humidité du duramen très stable, indépendante du profil de densité dans le cerne (*figure 5*). Il en résulte que la quantité d'eau par unité de volume est liée positivement à la densité du bois dans le duramen (*figure 6*).

Dans l'aubier, au contraire, les profils de densité et d'humidité sont opposés : les écarts sont très importants

entre bois de printemps et bois d'été, dans lequel l'humidité n'est que légèrement supérieure à celle du duramen. En définitive, le déficit d'eau du duramen semble provenir de la perte de l'eau capillaire dans le bois de printemps.

3.2. Efficacité des traitements de réhumidification

Les résultats concernant la reprise d'eau par l'action des différents traitements d'étuvage sont présentés dans la *figure 7* rassemblant des cartographies établies à partir du débit en cubes des planches de cœur.

D'une manière générale, il est difficile de discriminer des comportements liés à la vigueur d'accroissement même si l'arbre 12 à croissance « rapide » semble plus imprégnable.

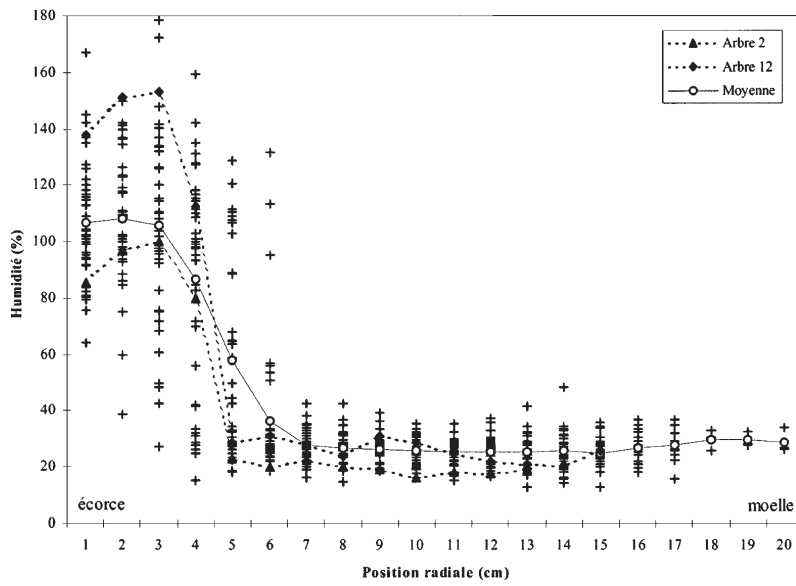


Figure 3. Variation avec la position radiale et dispersion des mesures d'humidité du bois obtenues sur carottes de sondage prélevées sur 40 Douglas (la courbe continue relie les moyennes par position radiale, les courbes en pointillés correspondent aux deux arbres sélectionnés).

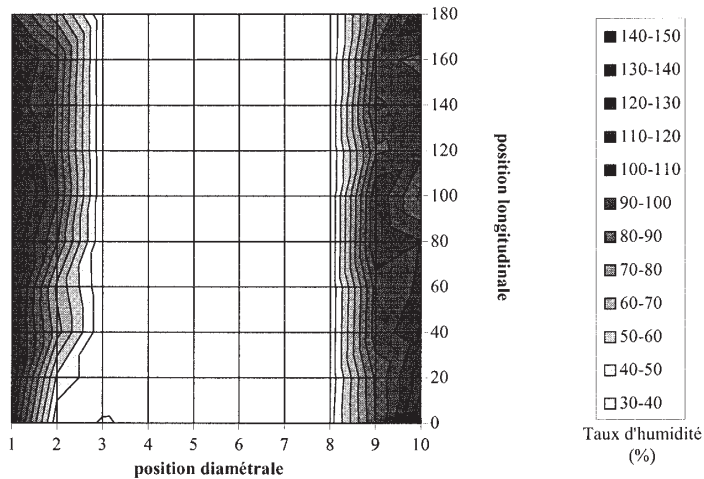


Figure 4. Cartographie de l'humidité établie sur une planche de cœur de 2 m en pur quartier (arbre 5).

Tableau III. Humidité du bois de Douglas dans la littérature.

Origine des arbres :	Humidité de l'aubier (%)	Humidité du duramen (%)
Douglas américains		
– Douglas « côtiers » (Kollmann et Coté [6])	115	37
Douglas introduits en Europe		
– Allemagne (Mothe [7])	110 à 160	25 à 35
(Hecker [5])	128 à 156	30 à 35
– Italie (Mothe [7])	130 à 250	35 à 45
– Autriche (Teischinger et Krenn [11])	70 à 130	30 à 35
– Grande Bretagne (Chalk et Bigg [2])	112 à 171	31 à 36
– France (Mothe [7])	120 à 165	35 à 45
Douglas introduits en Nlle Zélande		
(Crown [3])	100 à 140	40 à 55

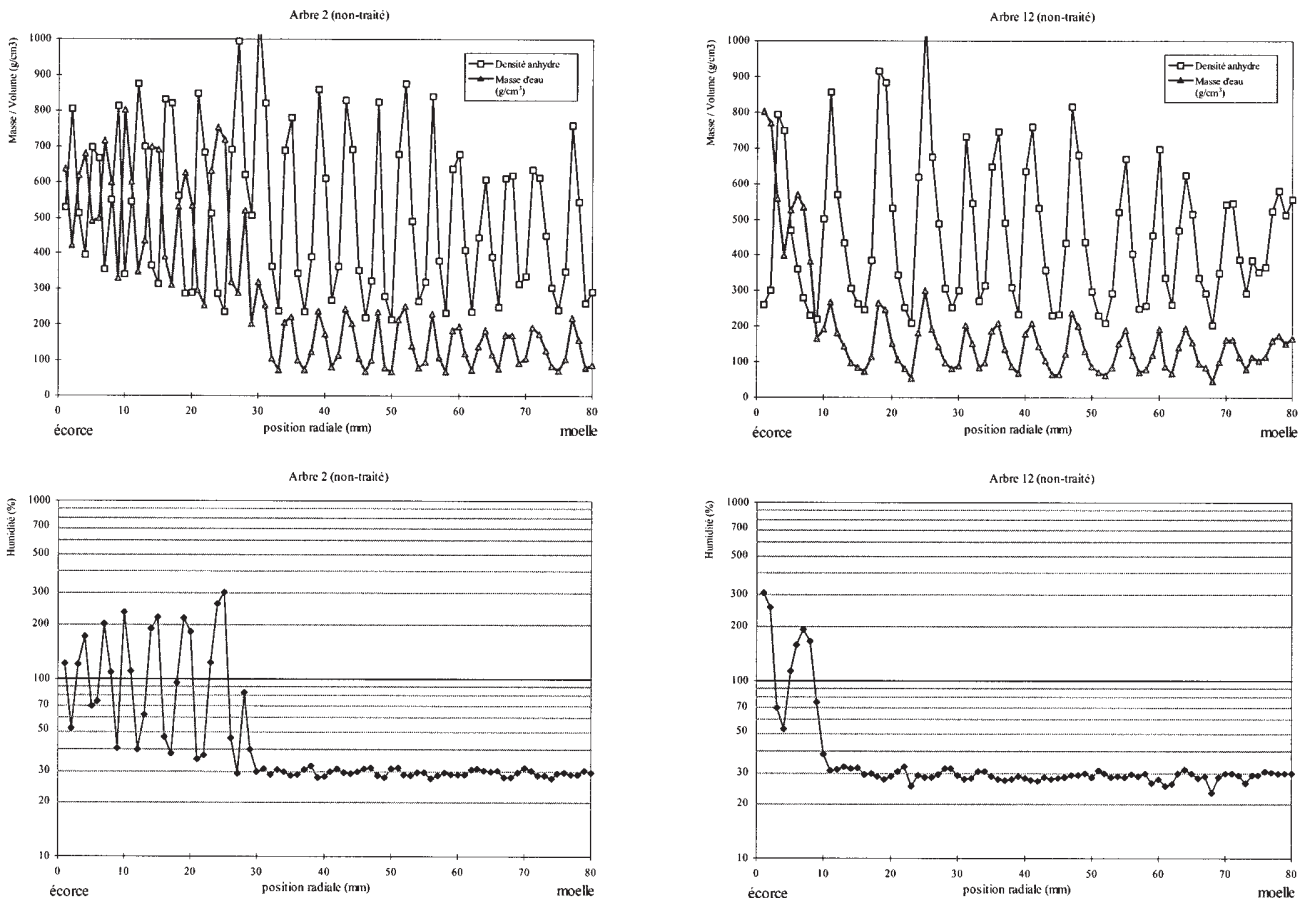


Figure 5. Répartition radiale de l'eau dans le bois vert des arbres 2 et 12. Mesures sur copeaux issus de microdéroutage.

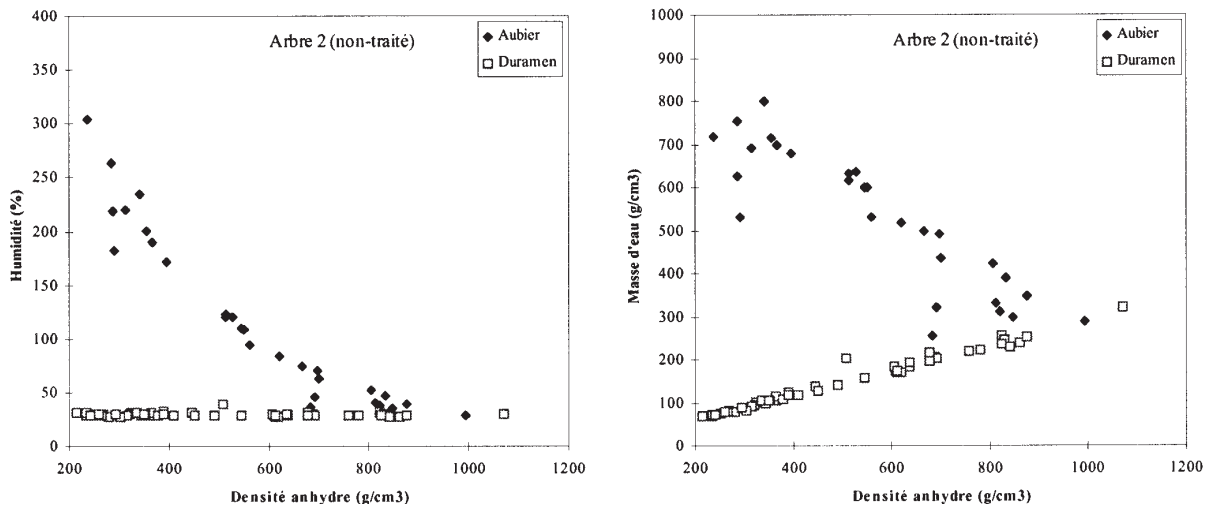


Figure 6. Relation obtenue sur l'arbre 2 à l'état vert entre la densité anhydre et l'humidité (à gauche) et la masse anhydre par unité de volume (à droite). Mesures sur copeaux issus de microdéroutage.

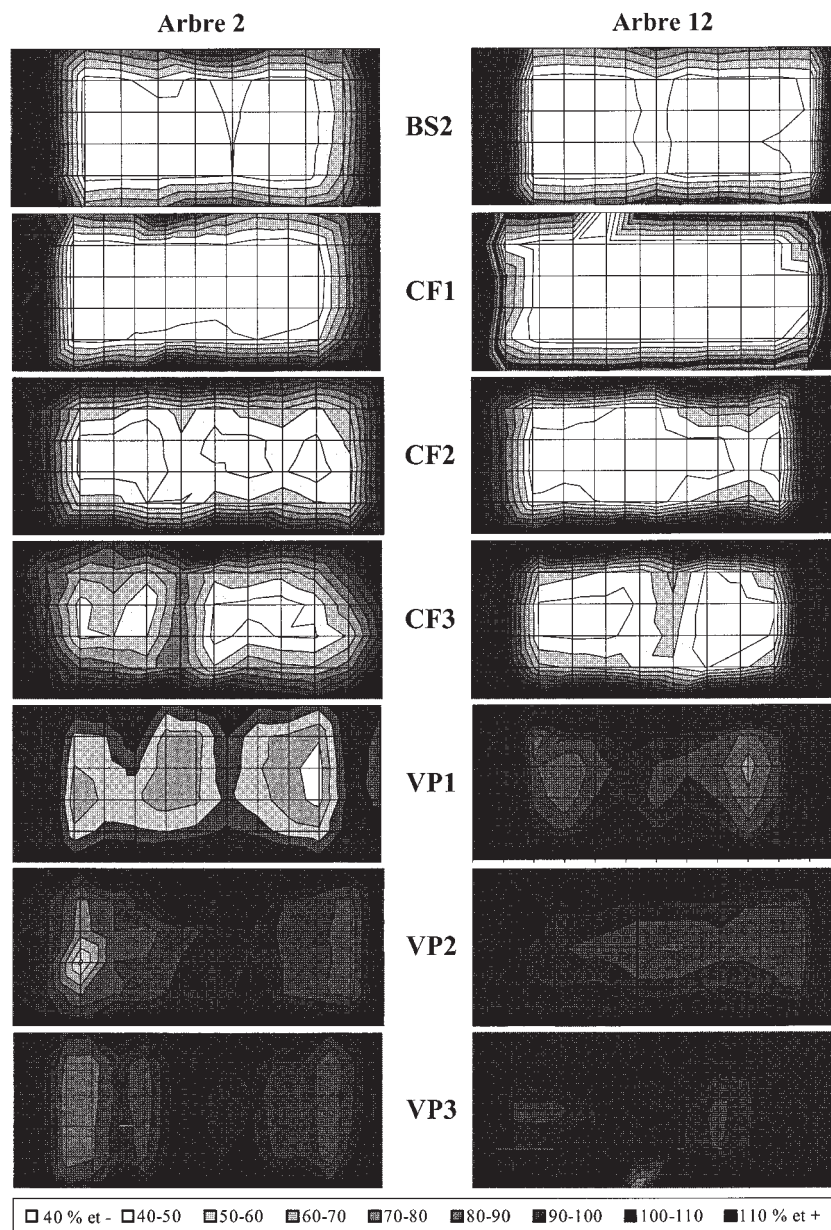


Figure 7. Cartographie de l'humidité dans des billons de 120 mm après divers traitements (en abscisse, la position radiale ; en ordonnée, la position longitudinale).

4. LES BOUILLOTTAGES SIMPLES (BS1 ET BS2)

Les bouillottages à 50°C (BS1, non représentés sur la figure 7) - couramment pratiqués sur les résineux pour

fluidifier la résine - ne laissent apparaître aucune amélioration sensible du taux moyen d'humidité, ni même de la répartition spatiale de l'eau. Ces résultats sont conformes à ceux de Sachsse et Rofael [9] ou Hecker [5] obtenus sur des Douglas d'Allemagne.

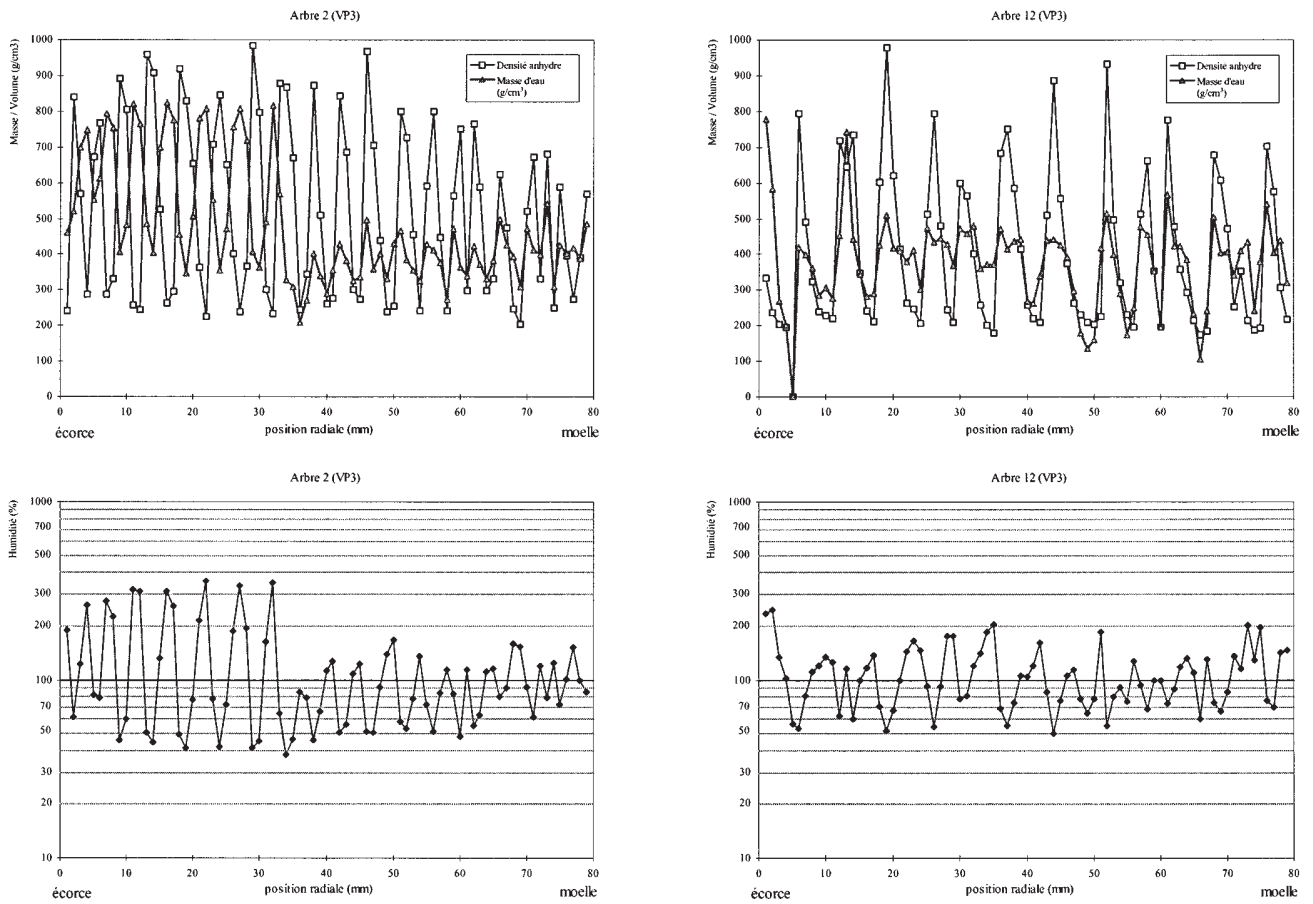


Figure 8. Répartition radiale de l'eau dans le bois des arbres 2 et 12 traité par un cycle vide et pression à 60 °C de type VP3. Mesures sur copeaux issus de microdéroutage.

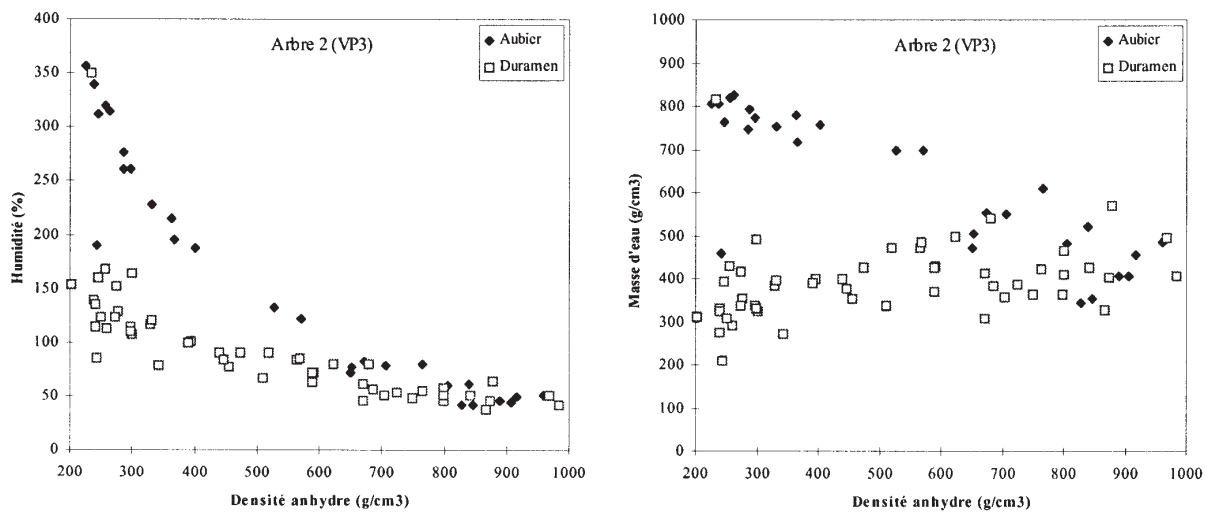


Figure 9. Relation obtenue sur l'arbre 2 après traitement par un cycle vide et pression à 60 °C de type VP3 entre la densité anhydre et l'humidité (à gauche) et la masse anhydre par unité de volume (à droite). Mesures sur copeaux issus de microdéroutage.

Les essais à 80 °C (BS2) ne sont pas beaucoup plus probants : la principale conséquence de ce traitement est l'apparition de fentes radiales dues à la recouvrance hygrothermique. Les voies de pénétration ainsi ménagées améliorent un peu l'imprégnation à coeur du billon mais entraîneront inévitablement une dégradation de la qualité du placage.

5. LES CYCLES CHAUD/FROID (CF1, CF2 ET CF3)

Les cycles à 60 °C (CF1) se révèlent également inefficaces. Une tendance à la pénétration longitudinale du duramen se dessine à 80 °C (CF2) et est confirmée à l'issue des essais à deux cycles (CF3) qui voient aussi une légère accentuation de la pénétration radiale. Cependant, aucun essai chaud/froid ne permet une imprégnation suffisante du duramen.

6. LES CYCLES VIDE/PRESSION (VP1, VP2 ET VP3)

Les essais sous autoclave sont de loin les plus efficaces, la combinaison des cycles vide/pression avec une augmentation de température se révélant intéressante. De plus, les essais à 60 °C avec immersion du bois retardée jusqu'à la mise en pression (VP3) semblent donner de meilleurs résultats (meilleure homogénéité de répartition) que lorsque les bois sont immergés tout le long du cycle (VP2).

Les figures 8 et 9 doivent être confrontées aux figures 5 et 6. On s'aperçoit alors que l'humidité du duramen suit cette fois un profil marqué comparable mais inversé par rapport au profil densitométrique, à l'instar de ce qui s'observe dans l'aubier.

Le niveau moyen de l'humidité dans le bois d'été est constant sur tout le profil et de l'ordre de 50 %. Celui du bois de printemps duraminisé est compris entre 100 et 130 % : le gain est donc important au regard des valeurs obtenues sur bois vert.

Toutefois, la cartographie d'humidité montre que des zones sèches subsistent, en particulier sur l'arbre 2. Les essais de microdéroutage laissent apparaître d'assez nombreux phénomènes de roulement de fibres et d'arrachement au voisinage de ces zones demeurées sèches.

Cela est d'autant plus préoccupant que nous travaillons sur des billons de très faible longueur. Il est probable que des billons en dimension d'emploi nécessiteraient des séjours beaucoup plus long en autoclave pour parvenir aux mêmes taux d'humidité.

Si le taux d'humidité relevé est toujours supérieur à 50 %, il n'est pas exclu que l'eau se trouve majoritairement à l'état libre et qu'il faille compter sur un délai supplémentaire pour qu'une partie de cette eau ne se combine à la paroi cellulaire. C'est *a priori* ce que l'on recherche en priorité afin de conférer au bois une rhéologie proche de celle du bois vert « naturellement » humide.

Notons enfin que, dans tous ces essais, la pénétration de l'eau a été souvent améliorée par des ruptures mécaniques telles que les très nombreuses fentes radiales présentes dans le bois de printemps (fentes de sécheresse décrites par Polge [8]) ou les fentes à coeur dues à la recouvrance hygrothermique. À partir de ces zones, l'eau a diffusé localement pour créer des poches de forte humidité.

7. CONCLUSIONS

L'humidité à l'état vert du duramen des Douglas observés dans cette étude, de l'ordre de 30 %, s'avère remarquablement constante d'un arbre à l'autre et le long du rayon dans un arbre donné. Bien que les arbres étudiés ici soient tous issus de la même plantation, les résultats comparables rapportés par d'autres auteurs laissent présager que la variabilité interstationnelle de l'humidité du duramen de Douglas est également faible.

Plusieurs de ces auteurs ont démontré par ailleurs l'impact négatif de cette sécheresse relative du duramen sur la qualité du déroulage. Nous avons montré ici que, contrairement à une opinion répandue, les techniques d'étuvage traditionnelles par immersion ne permettent pas une reprise d'humidité significative sur des billons de Douglas, même de très courte longueur. Seule l'imprégnation sous autoclave permet d'atteindre un niveau et une homogénéité d'humidité acceptable pour prétendre à un déroulage de qualité.

Avant d'envisager une transposition industrielle de ce procédé, il reste toutefois à vérifier que la reprise d'humidité resterait satisfaisante sur des billons en dimension d'emploi et que l'investissement nécessaire (les bacs d'étuvage traditionnels sont conçus pour fonctionner à pression ambiante) serait justifiable économiquement.

Le rôle de l'eau libre dans le bois comme facteur améliorant la qualité du déroulage n'a pas été abordé dans le cadre de cette étude. Il est généralement admis que les propriétés mécaniques du bois ne varient pas dans une gamme d'humidité assez large située bien au delà du point de saturation des fibres et bien en deçà de la saturation complète (de l'ordre de 50 à 80 % d'humidité par exemple) [12]. Dans la plage de 30 à 50 % d'humidité dans laquelle se place souvent le duramen du Douglas,

l'influence directe de l'eau libre sur les propriétés mécaniques n'est donc pas exclue. Mais Thibaut [12] montre que l'eau intervient surtout dans les mécanismes de coupe en réduisant le coefficient de frottement bois-métal. D'autre part, il est probable qu'en dehors de ce rôle de lubrifiant, la présence d'eau libre facilite les transferts de chaleur pendant l'étuvage : le manque d'eau dans le duramen générerait ainsi l'efficacité de l'étuvage traditionnel. On peut dès lors se demander si un étuvage traditionnel mais de plus longue durée, ou l'emploi de techniques de chauffage différentes ne suffiraient pas à obtenir des résultats analogues à une imprégnation forcée du duramen. La seconde partie de cet article décrira une technique de chauffe par effet Joule expérimentée dans cet esprit.

Ce travail a été conduit dans le cadre du projet « Douglas Bourgogne » cofinancé par l'état et la région de Bourgogne.

RÉFÉRENCES

- [1] Butaud J.C., Decès-Petit C., Marchal R., An Experimental Device for the Study of Wood Cutting Mechanisms: the Microlathe. Proceedings of the 12th International Wood Machining Seminar, October 2-4, 1995, Kyoto, pp. 479-485
- [2] Chalk L., Bigg J.M., The distribution of moisture in the living stem in Sitka spruce and Douglas-fir, *Forestry* 29 (1956) 1, 5-21.
- [3] Crown D.J., New Zealand Radiata Pine and Douglas-fir. Suitability for processing. Part three - The wood quality of Douglas-fir: a review, *FRI Bull.* 168 (1992) 74.
- [4] George P., Miller D.G., Detection of roughness in moving Douglas-fir, *For. Prod. J.* 20 (1970) 7, 53-59.
- [5] Hecker M., 1995, Peeled veneer from Douglas-fir. Influence of round wood storage, cooking and peeling temperature on surface roughness. Proceedings of 12th International Wood Machining Seminar, October 2-4, 1995, Kyoto, pp. 92-101.
- [6] Kollmann F.P., Coté W.A., Principle of wood science and technology. I: solid wood. Springer-Verlag 1968, p. 592.
- [7] Mothe F., 1994, Suitability for rotary cutting and plywood production of pruned Norway spruce and Douglas-fir in connection with ring width. EEC Forest Project "Silvicultural control and non-destructive assessment of plantation grown Spruces and Douglas-fir", Final report of task 9, 1994, p. 31.
- [8] Polge H., Quelques observations sur les fissures radiales dans le bois de Douglas, *Ann. Sci. For.* 39 (1982) 399-406.
- [9] Sachsse H., Roffael E., Untersuchung des Schäl furnier-Eignung von in Deutschland erwachsenem Douglasienholz, *Holz als Roh- und Werkstoff* 51 (1993) 167-176.
- [10] Takano T., Kinoshita N., The effect of annual ring and moisture content on veneer quality in soft wood peeling, *Wood Ind.* 47 (1992) 1, 14-19.
- [11] Teischinger A., Krenn K., Das Holz von in Österreich gewachsener Douglasie, *Holzforshung-und-Holzverwertung* 37 (1985) 4, 61-67.
- [12] Thibaut B., Le processus de coupe du bois par déroulage, Thèse d'état en Sciences, Université des Sciences et Techniques du Languedoc, 1988, Montpellier, p. 354.