

Abdelhakim DAOU1
Jérôme DOUZET²
Rémy MARCHAL²
Abdellatif ZERIZER¹

¹ Université M'Hamed Bougara
Laboratoire des matériaux minéraux
et composites (Lmmc)
Boumerdès
Algérie

² Ensam
Laboratoire bourguignon
des matériaux et procédés
(Labomap-EA3633)
Rue Porte de Paris
71250 Cluny
France

Valorisation du bois de pin d'Alep par déroulage : optimisation de son étuvage

Dans le cadre du programme d'action intégré franco-algérien Tassili, un des projets qui s'attachent à valoriser le bois de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) prévoit de démarrer en Algérie la production de contreplaqués et de Lvl (*laminated veneer lumber*). L'un des objectifs étant d'optimiser le déroulage, il convient de mettre au point la phase préalable : l'étuvage. Après l'étude de l'influence de la température d'étuvage sur quatre indicateurs (fentes à cœur, pertes en extractibles, profils d'humidité et efforts de coupe), l'article propose une température de compromis.



Échantillon de pin d'Alep de Draa El Mizan (Algérie)

RÉSUMÉ

VALORISATION DU BOIS DE PIN D'ALEP PAR DÉROULAGE : OPTIMISATION DE SON ÉTUVAGE

L'Algérie connaît un dynamisme démographique qui conduit à un plan de construction de logements très ambitieux. Le bois de construction est majoritairement importé d'Europe, alors que, parmi les ressources locales, les huit cent mille hectares de pin d'Alep algérien peuvent offrir une substitution partielle des matériaux bois importés. Des produits d'ingénierie bois d'intérêt pour la filière construction algérienne, le contreplaqué et le Lvl seraient potentiellement en bonne place. Ces deux produits sont issus du déroulage et, dans le cadre d'un projet Tassili qui vise la caractérisation et la valorisation du bois de pin d'Alep algérien, des essais exploratoires ont été menés pour déterminer les paramètres *ad hoc* pour cette essence. Ce premier article traite de la préparation hygrothermique préalable du bois avant déroulage en prenant en compte quatre familles d'indicateurs pour déterminer une température d'étuvage qui soit un bon compromis. Ces indicateurs concernent : la propagation des fentes de recouvrance à cœur ; le désenrésinement du bois lors de l'étuvage ; la répartition d'eau dans le bois, facteur déterminant pour une prédiction de la durée d'étuvage ; l'évolution des efforts de déroulage en fonction de la température du bois. Une température de traitement de 50 °C apparaît être un bon compromis, à l'instar de celui utilisé dans le cas du pin maritime.

Mots-clés : pin d'Alep, déroulage, étuvage, fente de recouvrance, humidité, extractible, Algérie.

ABSTRACT

OPTIMISATION OF STEAMING PRIOR TO ROTARY PEELING OF ALEPPO PINE

Algeria's dynamic population growth has led to a highly ambitious plan for new housing. Construction timber is mainly imported from Europe, despite the fact that, amongst local resources, Algeria's eight hundred thousand hectares of Aleppo Pine could offer a partial alternative to imported timber. Amongst the engineered timber products of interest to Algeria's construction industry, plywood and LVL are potentially well placed in this respect. Both are produced by rotary peeling and, in the context of a Tassili project aiming to characterise and make use of Algeria's Aleppo pine resources, exploratory tests have been conducted to determine *ad hoc* rotary peeling parameters for the species. This initial article describes the steaming and drying required to prepare timber for rotary peeling, in the light of four indicator families, in order to determine the steaming temperature that will offer the best compromise. These indicators concern: the propagation of shakes to the heartwood; desination of the wood during steaming; moisture distribution in the timber, which is a determining factor in predicting the duration of steaming; and changes in rotary peeling effort according to the temperature of the wood. A processing temperature of 50 °C, similar to that used for maritime pine, appears to offer a good compromise.

Keywords: Aleppo pine, rotary cutting, steaming, shakes, humidity, extractible, Algeria.

RESUMEN

VALORIZACIÓN DE LA MADERA DE PINO CARRASCO POR DESENLLO: OPTIMIZACIÓN DEL ESTUFADO

Argelia experimenta un incremento demográfico que ha conducido a un plan de construcción de viviendas muy ambicioso. La madera de construcción se importa mayoritariamente de Europa mientras que, dentro de los recursos locales, las ochocientas mil hectáreas de pino carrasco argelino pueden sustituir parcialmente a los materiales de madera importados. Dentro de los productos de ingeniería de la madera interesantes para el sector de la construcción argelino, el contrachapado y la madera microlaminada ocuparían potencialmente un buen lugar. Estos dos productos proceden del desenrollo y, en el marco de un proyecto Tassili cuyo objetivo es la caracterización y valorización de la madera de pino carrasco argelino, se efectuaron algunos ensayos exploratorios para determinar los mejores parámetros para desenrollar esta especie. Este primer artículo trata de la preparación higrotérmica previa de la madera antes del desenrollo, tomando en cuenta cuatro familias de indicadores para determinar una temperatura de estufado que suponga un buen compromiso. Estos indicadores conciernen: la propagación de rasgaduras medulares; la eliminación de la resina en el estufado; la distribución de agua en la madera, factor determinante para estimar la duración del estufado; la evolución de los esfuerzos de desenrollo en función de la temperatura de la madera. Una temperatura de tratamiento de 50 °C, al igual que para el pino marítimo, parece constituir un buen compromiso.

Palabras clave: pino carrasco, desenrollo, estufado, rasgadura medular, humedad, extraíble, Argelia.

Introduction

Le bois de pin d'Alep ne jouit pas d'une excellente réputation sur l'ensemble du pourtour du bassin méditerranéen, pour au moins trois raisons :

- L'arbre présente un port tourmenté, ce qui hypothèque un rendement matière correct en première transformation.
- Son bois est riche en résine, ce qui provoque l'encrassement des outils et détériore la mouillabilité des surfaces produites par usinage.
- Son bois présente de nombreux nœuds, défauts qui diminuent les résistances mécaniques du matériau et compliquent l'usinage quel qu'il soit (endommagement des outils et des surfaces obtenues).

Cependant, THIBAUT *et al.* (1992) ont montré sur un large échantillonnage réalisé en France que, finalement, ces caractéristiques ne rendaient pas ce bois « pire » que celui du pin maritime des Landes (*Pinus pinaster*) dont il est en tout point très proche. Un des débouchés de masse du bois de pin maritime étant le contreplaqué pour diverses applications en construction, il semble naturel d'envisager une telle valorisation pour le bois de pin d'Alep, pour l'heure pas ou peu utilisé en matériau. En effet, le pin d'Alep est essentiellement dirigé vers l'industrie papetière en France et n'est récolté qu'à la marge en Algérie pour des emplois mineurs en ameublement ou en construction.

Si en France les surfaces couvertes par le pin d'Alep représentent environ 2 % des surfaces forestières avec 300 000 ha, en revanche le pin d'Alep est la première essence d'Algérie ; avec 800 000 ha, il couvre près de 40 % des surfaces forestières de ce pays. Parallèlement, du fait de la sortie progressive de la crise politique des années 1990, de l'explosion démographique qui se poursuit et d'ambitieux programmes de

construction de logements, l'Algérie procède à des recours massifs aux importations de matériaux de construction en général et de bois en particulier (Scandinavie, France, Afrique tropicale humide).

La filière bois algérienne est riche d'une multitude d'entreprises publiques et privées à 90 % orientées vers la transformation des bois d'importation. Cela est dû à la fois à l'outil industriel formaté pour ces bois, à une politique forestière « conservatrice », parfois par principe (non-prise en compte de la fonction de production de la forêt par certaines directions forestières de wilaya) et d'autres fois par nécessité (forêts de protection incontestables, forêts non encore sécurisées).

Certes, la forêt algérienne ne pourra à elle seule pourvoir aux importants besoins en bois du pays mais elle peut contribuer significativement à l'effort et cela participerait, d'une part, au financement de son expansion propre, le gouvernement demandant à la Direction générale des forêts (Dgf) de mettre en œuvre une augmentation des surfaces forestières de plus de 3 millions d'hectares en 30 ans... et, d'autre part, à la structuration d'une filière bois mieux intégrée à sa forêt.

Vu les besoins immenses de l'Algérie en matière de logements et le fort potentiel forestier mis à mal par les guerres du XX^e siècle, un projet de recherche a été lancé en 2004 dans le cadre du programme d'action intégré franco-algérien Tassili, visant des « développements de recherches et de transferts d'innovations technologiques en vue de la valorisation du bois de pin d'Alep algérien en matériau ». Ce projet se décline en cinq actions dont une concerne l'« optimisation et maîtrise globale du déroulage du pin d'Alep ».

Le présent article propose les premiers résultats de cette dernière action dont la finalité est de détermi-

ner les paramètres technologiques et industriels pour produire en Algérie des contreplaqués et des Lvl (*laminated veneer lumber*) à partir de pin d'Alep, ces matériaux permettant une valorisation particulièrement intéressante des bois de qualité secondaire (MARCHAL, 1995).

La première étape de la production de contreplaqué et de Lvl est l'opération de déroulage. Ce mode de première transformation est particulièrement intéressant, notamment par rapport au sciage, pour valoriser des bois de faibles diamètres ou mal conformés, car le copeau est le produit fini et un billonnage court permet de s'affranchir des défauts de forme de la grume.

Cette première étape est elle-même précédée par une opération essentielle : l'étuvage. En effet, afin d'être rendu apte à un déroulage de qualité (production d'un placage peu fissuré, d'épaisseur constante, avec un bon état de surface, pas ou peu tuilé), le bois rond en billons de 1 à 5 m de long doit faire l'objet d'un traitement hygrothermique préalable durant 12 à 72 h, à des températures comprises entre 50 à 90 °C suivant les essences. Ce traitement, appelé étuvage, se fait le plus souvent par immersion totale du bois vert dans de l'eau portée à température. Pour une essence donnée, cette température est souvent déterminée de manière empirique. L'étuvage permet de plastifier la lignine et donc de conférer au bois une déformabilité qui améliore la qualité du copeau (le placage) tout en réduisant les efforts de coupe. Ce traitement permet en outre de plastifier les nœuds, de fluidifier la résine, d'atténuer les différences entre bois de printemps et bois d'été (MARCHAL *et al.*, 1993).

L'optimisation de l'étuvage étant rarement faite de manière rationnelle en entreprise, nous proposons ici une démarche fondée sur l'analyse d'indicateurs objectifs.

Matériels et méthodes

Nous nous proposons de trouver une température de chauffe permettant une production de qualité tout en réduisant au maximum les consommations énergétiques et les usures mécaniques de la machine et de l'outil. Cette optimisation se fait en se fondant sur l'analyse parallèle des évolutions avec la température de différents indicateurs accessibles par quatre séries d'essais menés sur du bois de pin d'Alep français et algérien. Ces essais concernent :

- La mesure de la propagation des fentes à cœur dues à la recouvrance hygrothermique.
- L'estimation des pertes en résine lors de l'étuvage.
- L'établissement d'une cartographie de l'humidité dans le bois et l'évaluation de l'imprégnabilité à l'eau chaude du duramen.
- La mesure des efforts de coupe en déroulage.

Mesure de la propagation des fentes à cœur

Quelle que soit l'essence, la grume fraîchement abattue laisse apparaître des fentes, souvent au nombre de deux, partant de la moelle et qui sont l'expression de la libération d'un premier niveau de contraintes de croissance. Lorsque le bois vert subit un étuvage, ces fentes d'abattage tendent à se propager dans le plan RT en direction de l'écorce selon l'augmentation de température. Les variations dimensionnelles des cellules thermo-activées (une faible dilatation tangentielle ϵ_T inférieure à 1 % et une contraction radiale ϵ_R environ cinq fois plus faible) croissent avec la température et correspondent au « débridage » des cellules une fois la lignine, voire la cellulose, activée. Ce phénomène, appelé recouvrance hygrothermique (Rht), est décrit par GRIL *et al.* (1993). Ces variations s'opèrent également dans le sens

longitudinal du bois et toutes ces propagations s'effectuent de manière non linéaire avec la température. En théorie, on observerait deux accélérations de la propagation des fentes : l'une pour une température comprise dans la plage 40-60 °C (température de transition vitreuse T_g de la lignine) et l'autre dans la plage 60-80 °C (T_g de la cellulose).

Ces fentes de recouvrance contribuent à fragiliser fortement le billon (risque d'explosion du billon pendant la coupe, générant des arrêts de machines, des pertes de matière et des endommagements d'outils). Si l'on travaille sur billons courts, comme l'exige ici la forme tourmentée des grumes de pin d'Alep, le phénomène est aggravé. Le ratio surface générée par la fissuration/volume du billon prend alors des proportions importantes.

Il s'agit donc ici de trouver une température de compromis, réduisant au maximum le risque de fragilisation du billon soumis à l'action du couple d'entraînement des bois lors du déroulage tout en diminuant de manière déjà significative les efforts de coupe. Cette température se situe juste avant celle générant la plus importante transition.

Ces essais d'identification de la température de compromis ont été effectués sur six disques de 3 cm d'épaisseur issus de cinq arbres différents (trois arbres prélevés en France et deux arbres prélevés en Algérie ; tableau I). Avant les essais, ces disques ont été conservés à l'état vert, immergés dans de l'eau à une température ambiante de 20 °C.

Avant de démarrer les tests d'étuvage, on a relevé sur chaque disque les longueurs des fentes initiales d'abattage. Chaque disque a ensuite été immergé totalement dans un bain d'eau thermostaté à ± 1 °C en suivant les séquences d'étuvage et de mesure suivantes :

- Mise en chauffe à 30 °C.
- Maintien de cette température pendant 30 min.
- Mesure des nouvelles longueurs des fentes à cœur (figure 1).
- Mise en chauffe à 40 °C puis nouvelle immersion des disques.
- Maintien de cette température pendant 30 min.
- Mesure des nouvelles longueurs des fentes à cœur, et ce jusqu'à une température finale de 100 °C.

À la faveur des essais de déroulage en 1 et 3 mm effectués sur les billons issus d'un arbre prélevé à Juvignac dans l'Hérault (voir ci-après « Mesure des efforts de coupe en déroulage »), nous avons répété ces mesures sur 14 billons, cette fois de 60 cm de long, prélevés sur la grume fraîchement abattue. Deux billons témoins n'ont pas été étuvés et ont été déroulés chacun dans l'une des deux épaisseurs. Six autres paires de billons ont été étuvées respectivement à 40, 50, 60, 70, 80 et 90 °C pendant 24 h avant d'être déroulées. Au préalable, les fentes à cœur avaient été mesurées avant étuvage puis après étuvage, dans le plan transversal RT, sur chacune des deux faces de chaque billon. Ainsi, on a pu calculer pour chaque billon l'évolution de la longueur des fentes entre la température initiale (20 °C) et une seule température d'étuvage, ce qui diffère alors de la démarche sur les disques.

Parallèlement, on a cherché à évaluer la propagation de ces mêmes fentes dans le sens longitudinal, afin d'estimer la surface interne de décohésion et donc le risque de fragilisation du billon suivant la température d'étuvage. Pour ce faire, du bleu de méthylène a été injecté avec une seringue dans les fentes de recouvrance puis la mesure de propagation a été effectuée sur le noyau résiduel après le déroulage (figure 1b).

**Figure 1.**

Mesure de la longueur des fentes de recouvreance :

- a, sur disque, dans le plan transversal (cas de deux provenances algériennes à 20 °C, puis après étuvage à 100 °C) ;
- b, sur billon dans le sens longitudinal, après marquage au bleu de méthylène.

Tableau I.
Matériel utilisé pour les différents essais.

Station	Échantillons analysés	Âge de l'arbre (ans)	Diamètre à 1,30 m de hauteur (mm)	
Algérie	Draa El Mizan, wilaya de Bouïra	1 disque pour les fentes de Rht*	17	180
	Buinan, wilaya de Blida	1 disque pour les fentes de Rht et la mesure des pertes de masse	28	235
	Zemmouri, wilaya de Boumerdès	1 disque pour les essais de pertes de masse sur des cubes de 3 cm d'arête	50	280
	Aïn El G'sab, wilaya de Saïda	Carottes de sondage issues de 5 arbres pour établir un profil radial d'humidité	-	400 à 450
	Mimouna 1, wilaya de Saïda	Carottes de sondage issues de 5 arbres pour établir un profil radial d'humidité	-	370 à 500
	Mimouna 2, wilaya de Saïda	Carottes de sondage issues de 5 arbres pour établir un profil radial d'humidité	-	170 à 500
France	Montferrier (Hérault)	Arbre A 1 disque pour les fentes de Rht	30	250
		Arbre B 1 disque dans le billon de pied pour les fentes de Rht 1 disque dans la première surbille pour les fentes de Rht	50	350
	Juvignac (Hérault)	14 billons de 60 cm issus du même arbre pour les fentes de Rht et le déroulage Disque pour établir des profils d'humidité	95	330

Rht : recouvrance hygrothermique.

Mesure de la perte en extractibles

L'étuvage entraîne l'élimination d'une certaine quantité d'extractibles à l'eau. Parmi ces extractibles figure la résine dont la présence en grande quantité dans le bois de pin d'Alep est assez défavorable à la qualité du processus et du produit final, du fait de l'encrassement des outils et de la diminution de la mouillabilité des surfaces obtenues (diminution de l'aptitude au collage).

Lors des essais de mesure de propagation des fentes à cœur menés sur les deux provenances algériennes, Draa El Mizan et Buinan, nous avons pesé chaque disque pour chaque palier de température entre 20 et 100 °C et avons constaté une perte de masse que nous avons imputée pour partie à une extraction de la résine (figure 2).

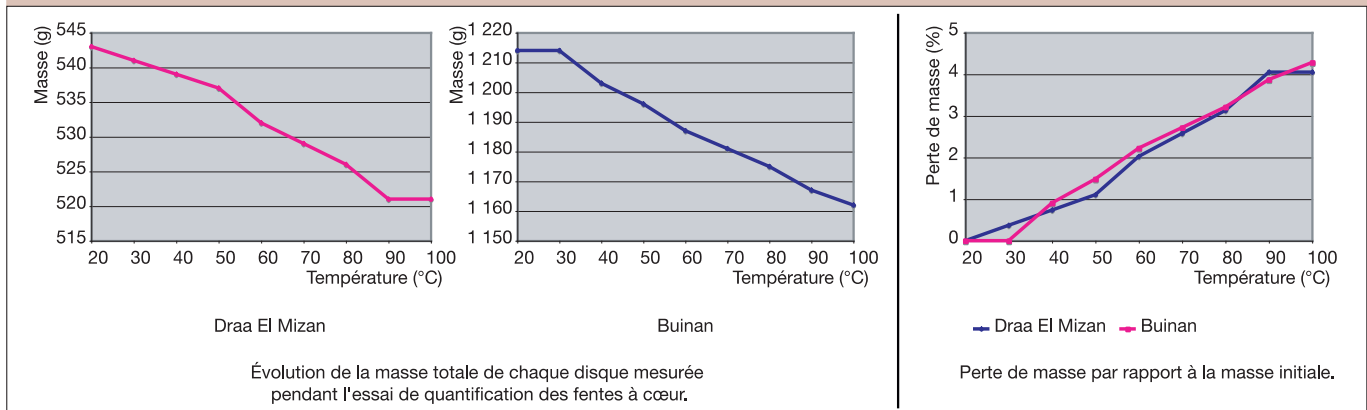
Dans ces premiers essais, la température ayant été maintenue constante durant 30 minutes seulement pour chaque palier, nous avons complété le dispositif par une nouvelle série d'essais menés tous les 10 °C entre 40 et 90 °C sur un bois d'une nouvelle provenance algérienne (Zemmouri, tableau I) afin d'apprécier, d'une part, l'influence de la durée du traitement et, d'autre part, l'importance du phénomène de perte en masse suivant la position dans le plan transversal du bois.

Un essai préliminaire conduit sur 48 h avait révélé que plus de 80 % du phénomène de perte de masse pendant l'étuvage intervenait au cours des deux premières heures. Cependant, nous avons fait le choix de mener tous nos essais sur 8 h, en opérant des relevés de masse de manière plus fréquente durant les deux premières heures.

Pour mener ces essais, nous avons fractionné un disque de provenance Zemmouri suivant le plan de découpe présenté à la figure 3, permettant un repérage spatial du bois par rapport à l'excentration du cœur ainsi que dans le sens radial (trois positions : aubier, intermédiaire, vieux duramen). Nous avons obtenu 36 cubes de 3 cm d'arête. Chaque cube a fait l'objet d'un traitement à une température d'étuvage constante puis de pesées régulières sur les huit heures de l'essai.

L'enceinte thermorégulée a été nettoyée avant chaque nouvel essai puis remplie de la même quantité d'eau adoucie (7 l) pour chaque essai, afin de pouvoir mener une analyse des différentes eaux d'étuvage, toutes choses égales par ailleurs.

À chaque fin de cycle et pour une température donnée, de l'eau

**Figure 2.**

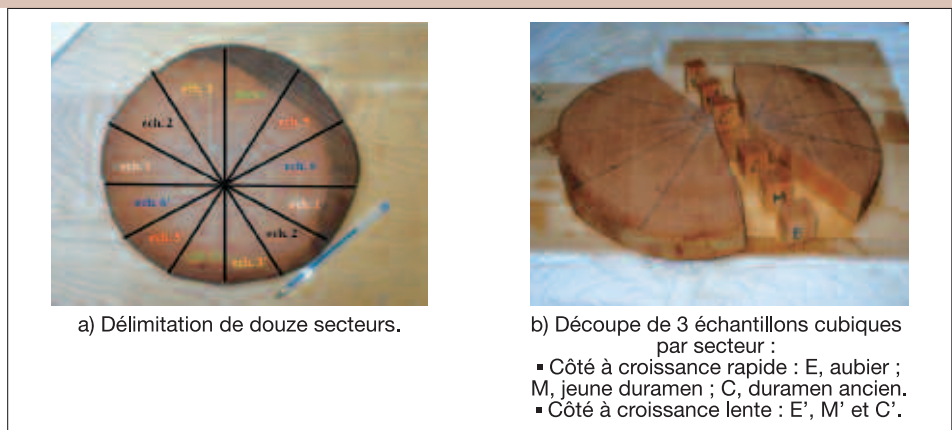
Pertes de masse observées pendant l'étuvage, par paliers de 30 min, pour deux provenances algériennes, Draa El Mizan et Buinan.

d'étuvage a été prélevée afin de mesurer la conductivité électrique du liquide puis de la corrélérer aux taux d'extractibles éliminés.

Afin de préciser la cause des pertes de masse observées, nous avons procédé au dosage d'extractibles résiduels dans le bois sur les 6 x 4 éprouvettes étuvées (40, 60, 70 et 80 °C) et sur six éprouvettes témoins (une série diamétrale entière) issues d'un disque de Zemmouri non étuvé (figure 4). Nous avons extrait la quasi-totalité des extractibles des échantillons à l'aide d'un solvant organique, afin de quantifier les pertes réelles d'extractibles aux différentes températures (DOUZET, 2006). Pour ce faire, nous avons conduit sur environ 1 g de bois de chaque échantillon, à l'aide d'un Soxhlet, trois essais d'extraction en utilisant une solution d'acétone.

Profils d'humidité

Le bois étant un très bon isolant thermique, l'eau libre dans le bois vert constitue le vecteur principal de chaleur permettant la chauffe volumique du bois immergé dans l'eau chaude. Pour une estimation de la cinétique de chauffe, il importe donc de connaître la répartition de l'eau dans le billon à l'état vert initial, et l'imprégnabilité de ce bois à l'eau chaude sous pression atmosphérique.

**Figure 3.**

Découpe d'un disque en 36 éprouvettes (12 secteurs x 3 positions radiales) pour l'analyse de la perte de masse en cours d'étuvage.

Une première campagne a consisté à carotter 15 arbres dans trois stations forestières de la wilaya de Saïda (Ain El G'sab, Mimouna 1, Mimouna 2) à raison de cinq arbres par station (tableau II). Les carottes ont un diamètre de 15 mm et ont été prélevées radialement, suivant la direction sud-ouest/nord-est, à 1,30 m de hauteur et sur une longueur de 150 mm environ. Juste après extraction, chaque carotte a été fractionnée en 7 à 10 portions d'environ 20 mm de long (figure 5a), immédiatement pesées avant d'être séchées à l'étuve sèche à 102 °C pendant 24 h afin d'obtenir leur masse anhydre.

Un second essai a été conduit sur un disque extrait du milieu d'un billon de l'arbre fraîchement abattu à

Juvignac, Hérault. De ce disque ont été extraites deux barrettes suivant le grand et le petit diamètre du disque (figure 5b) et chaque barrette a été débitée en parallélépipèdes qui, comme pour les carottes, ont fait l'objet d'une double pesée. On trace alors les courbes des taux d'humidité le long des deux diamètres.

Enfin, lors des essais d'étuvage des billons de Juvignac (voir ci-avant « Mesure de la propagation des fentes à cœur »), chaque billon a été pesé avant et après étuvage pour estimer la reprise en eau globale due à l'étuvage et donc l'imprégnabilité à l'eau pour différentes températures.

Tableau II.
Caractéristiques des 15 arbres carottés en wilaya de Saïda

Station	Arbre	Diamètre à 1,30 m de hauteur (cm)	Hauteur totale (m)	Inclinaison (cm) (écart du tronc / verticale à 2,10 m) et orientation	Hauteur première branche verte (m)	Position dans le peuplement
Ain El G'sab ▪ Espacement entre les arbres : 6 m ▪ Pente moyenne ▪ Pin d'Alep seulement	1	42	14	0	6	Au milieu, dominant
	2	45	15	10 / sud	7	
	3	40	10	15 / sud	7	
	4	45	11	20 / sud-ouest	4	
	5	40	9	0	2,5	
Mimouna 1 ▪ Espacement entre les arbres : 6 à 7 m ▪ Pente accentuée ▪ Mélange	1	40	10	20 / nord	2,5	Au bord, dominant
	2	50	13	0	5	
	3	50	12	0	4	Au milieu, dominant
	4	47	11,5	90 / nord	6	
	5	37	7	0	2,5	
Mimouna 2 ▪ Espacement entre les arbres : 2 à 3 m ▪ Pente moyenne ▪ Mélange	1	50	12	40 / nord-est	7	Au milieu, dominé
	2	38	9	0	3	
	3	35	10	50 / nord	5	
	4	25	6	0	2,5	
	5	17	6	10 / sud	1	

(toutes les carottes ont été prélevées suivant l'orientation sud-ouest / nord-est)

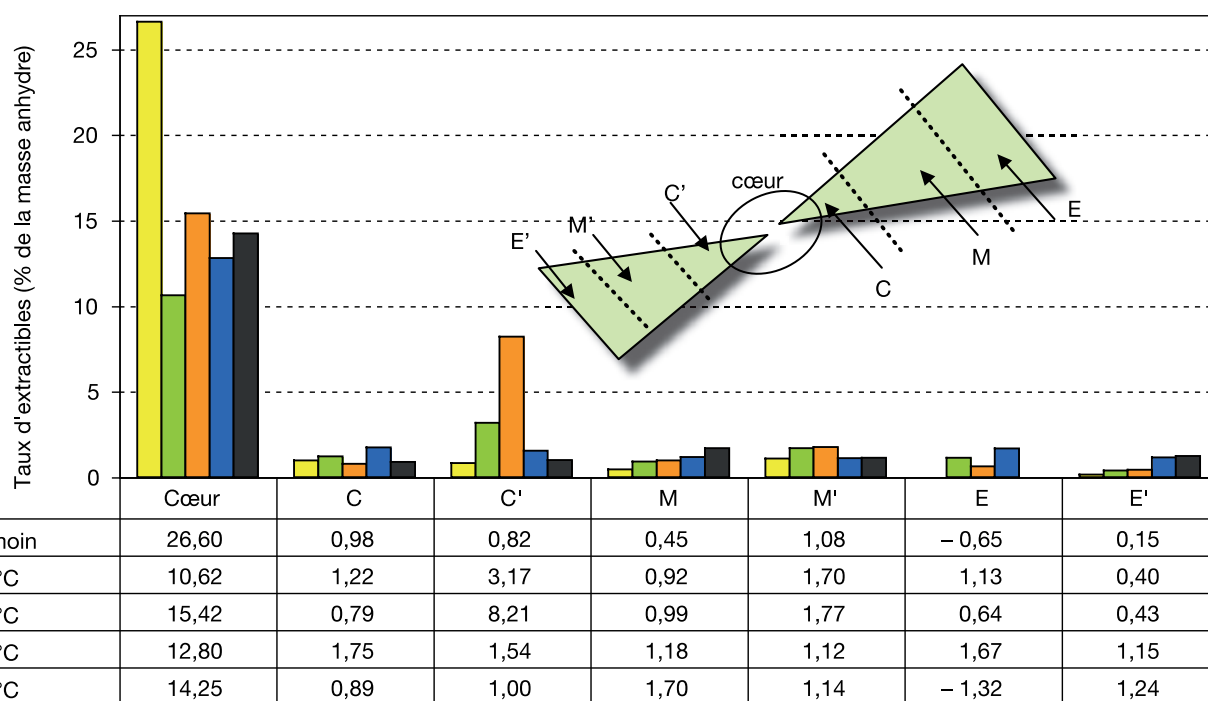


Figure 4.
Taux d'extractibles après étuvage à quatre températures différentes, pendant 8 h (provenance algérienne : Zemmouri).

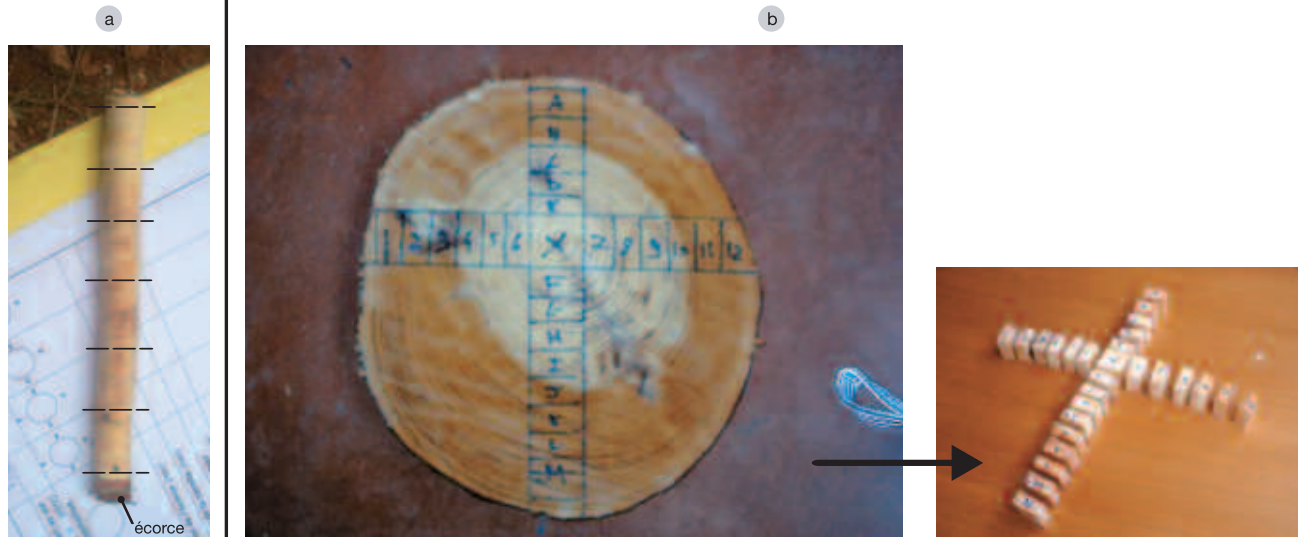


Figure 5.

Préparation des éprouvettes soumises à une double pesée pour établir des profils d'humidité :

- a, découpe de la carotte en secteurs ;
- b, découpe d'un disque en deux séries diamétrales de parallélépipèdes.

Mesure des efforts de coupe en déroulage

Un des intérêts majeurs de l'étuvage étant de diminuer les efforts de coupe et donc l'usure de l'outil et de la machine, nous avons conduit une série d'essais de déroulage en 1 et 3 mm sur la dérouleuse Sem de l'Ensam, machine industrielle instrumentée (mesure des composantes orthogonales des efforts de coupe exercés sur l'outil et des efforts de compression exercés par la barre de pression sur le billon ; figure 6).

Ainsi, les 14 billons de 60 cm provenant de l'arbre abattu à Juvignac (voir « Mesure de la propagation des fentes à cœur ») ont été déroulés après un étuvage de 24 h dans une bouilloteuse, respectivement à 40, 50, 60, 70, 80 et 90 °C, ainsi qu'à température ambiante pour deux billons témoins. Pour chaque température de traitement, nous avons déroulé deux billons adjacents dans la grume : l'un en 1 mm et l'autre en 3 mm. Les paramètres de coupe ont été les suivants :

- Vitesse de coupe, 1 m/s.
- Angle de dépouille, 0,5° en 1 mm, 0° en 3 mm.
- Cote verticale de la barre de pression, 0,6 mm.
- Cote horizontale de la barre de pression, respectivement 0,8 mm et 2,4 mm pour les épaisseurs 1 et 3 mm (taux de compression de 20 %).

Les efforts de coupe ont été mesurés une fois seulement le régime établi de coupe atteint.

Entre deux essais, le couteau n'a pas été réaffûté car l'usure n'est pas significative sur 14 déroulages. En effet, en industrie, un affûtage est réalisé dans le pire des cas toutes les deux heures de production et au mieux toutes les huit heures, soit après le déroulage de plusieurs centaines de billons. Cependant, lors de nos essais, l'outil a été légèrement pierré entre chaque essai pour atténuer de légers retournements d'arête localisés. La série d'essais a été terminée par les deux déroulages à 20 °C, la température ambiante, car il s'agissait de la modalité la plus susceptible d'endommager l'arête de l'outil.

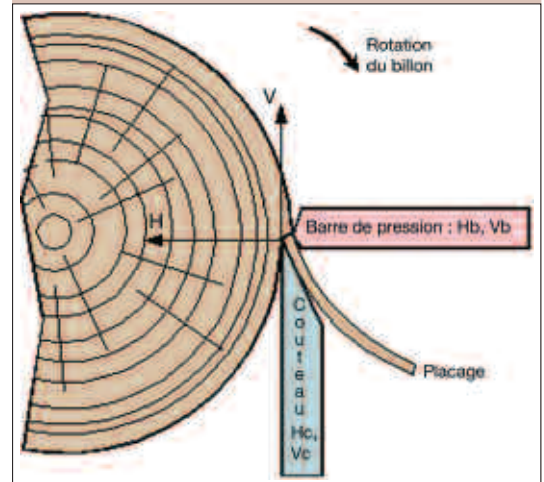
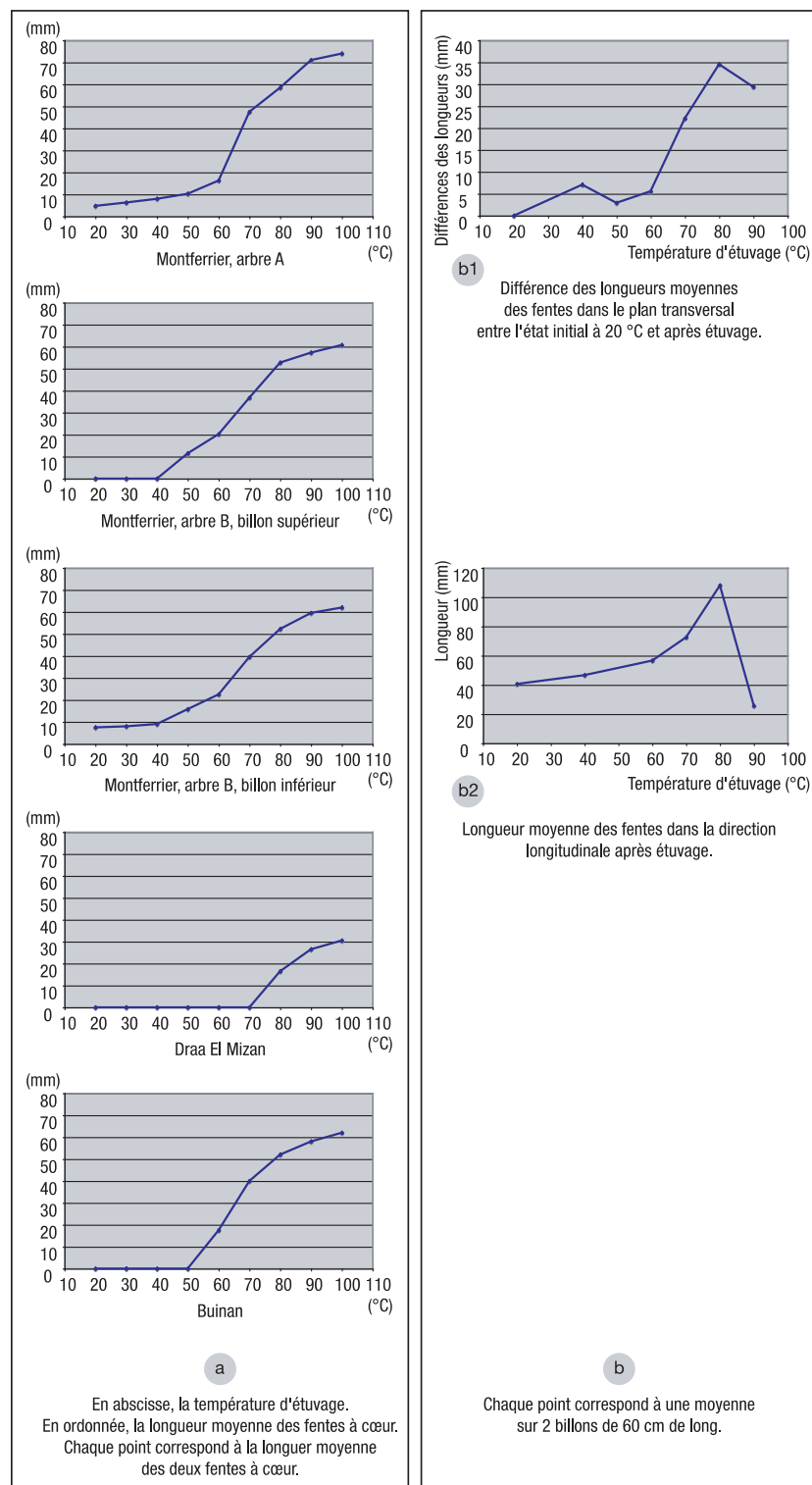


Figure 6.

Repères orthogonaux (H et V) utilisés pour décomposer l'effort de la coupe (Hc et Vc) et celui exercé par la barre de pression (Hb et Vb).

**Figure 7.**

Évolution de la longueur des fentes de recouvrance hygrothermique :

- a, dans le plan transversal au départ de la moelle, sur six disques issus de cinq arbres (trois d'origine française, Montferrier, et deux d'origine algérienne, Draa El Mizan et Buinan) ;
- b, dans le plan transversal au départ de la moelle (b₁) et dans la direction longitudinale (b₂), sur les 14 billons issus de l'arbre récolté à Juvignac (France).

Résultats et discussion

Mesure de la propagation de la fente de recouvrance hygrothermique

Les courbes de propagation des fentes transversales provoquées sur disques (figure 7a) ne font apparaître qu'une seule zone de transition comprise entre 40 et 70 °C, à l'exception toutefois de la provenance Draa El Mizan.

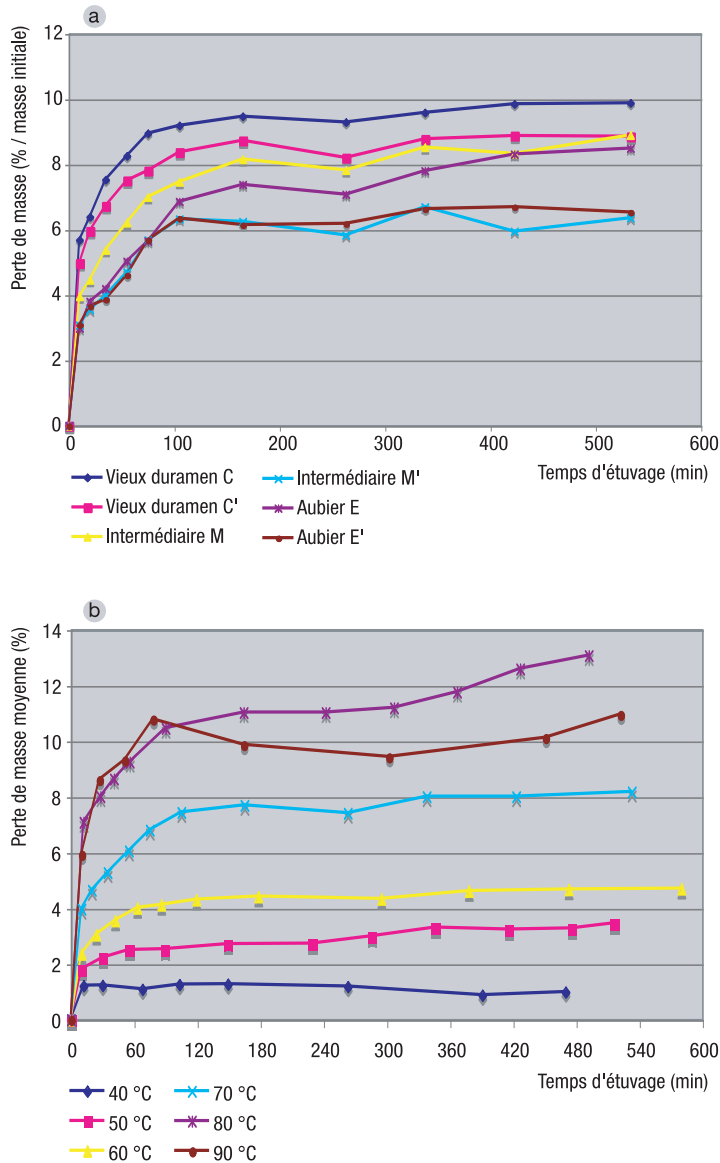
Sur les billons longs de Juvignac (figure 7b), la même remarque prévaut, y compris dans la direction longitudinale. Toutefois, les mesures effectuées sur les billons chauffés à 90 °C font apparaître des longueurs de fentes plus faibles que pour les essais à 80 °C. Cela met en évidence l'importante variabilité de la réponse du bois aux fentes de recouvrance. Le taux de décohesion (rapport surface diamétrale du billon/surface de bois fendu) atteint un maximum de 10 % à 80 °C.

Mesure de la perte en extractibles

La figure 2 indique sur les deux disques provenant de Draa El Mizan et de Buinan (essais de 30 min pour chaque palier de température entre 20 et 100 °C) des pertes de masse évoluant de manière quasi linéaire avec la température et atteignant 4 % de la masse initiale à la fin du cycle d'essais à 100 °C.

Les essais conduits sur une longue durée font apparaître que :

- Les pertes tendent à augmenter de l'extérieur du bois vers l'intérieur (figure 8a pour les essais à 70 °C). Cela est conforme aux observations d'un gradient de résines augmentant de la périphérie au cœur de l'arbre (THIBAUT *et al.*, 1992).
- Toujours sur disque, la perte de masse se stabilise au bout d'environ 2 h de traitement quelles que soient la position radiale (figure 8a) et la température (figure 8b).
- La perte de masse s'accroît fortement au-delà de 60 °C (figure 8b).

**Figure 8.**

Pertes de masse du bois (provenance algérienne : Zemmouri) :

▪ a, suivant la position de l'échantillon dans le plan transversal, lors de l'étuvage à 70 °C. Côté du disque à croissance rapide : C, vieux duramen ; M, jeune duramen ; E, aubier. Côté à croissance lente : C', M' et E'.

▪ b, valeurs moyennes par température (chaque point est la moyenne des valeurs des six positions).

Bien que l'imprégnabilité du bois de pin d'Alep soit globalement faible (voir ci-après « Profils d'humidité »), à l'instar de la plupart des résineux, un essai exploratoire sur un disque a mis en évidence, à la température de 20 °C, une aptitude du bois de pin d'Alep à reprendre de l'eau par simple trempage. Ainsi, les

pertes de masse mesurées précédemment sont en fait le bilan de deux phénomènes qui vont en sens inverse : une perte de matière réelle due à l'extraction de résines et une reprise d'eau d'importance moindre. Les essais de dosage des extractibles demeurant dans les échantillons de Zemmouri après différents traite-

ments et pour différentes positions radiales font apparaître un certain nivellement des valeurs (figure 4), mais les faibles taux mesurés sur le témoin non étuvé posent question sur le choix judicieux de ce témoin.

Nous pouvons toutefois conclure de ces essais, d'une part, que la plupart des extractibles sont concentrés dans la partie centrale (proche du cœur) de l'arbre (jusqu'à près de 27 % avant étuvage, ce qui est conforme aux résultats de THIBAUT *et al.*, 1992) et, d'autre part, que l'étuvage a bel et bien un rôle d'extraction des parties très chargées en extractibles : plus la température d'étuvage est élevée, plus la quantité extraite est importante.

Il serait nécessaire d'aller plus loin dans la détermination de la composition chimique et de la nature réelle des extractibles, qui ne sont sans doute pas limités aux seules résines.

Toutefois, il est important de noter que, quelle que soit la température d'étuvage, les billons longs de Juvignac ont tous repris entre 2,5 et 4 % de masse lors de l'étuvage. Cela confirme que le fait de travailler sur disque introduit un biais important, la surface de contact bois/eau étant bien supérieure sur disque à ce qu'elle serait dans le cas de billons en grandeur d'emploi.

Enfin, l'analyse des eaux d'étuvage indique une tendance intéressante : la conductivité électrique des eaux tend à augmenter avec la perte de masse du bois et donc avec le taux d'extractibles dans l'eau (figure 9). Cette observation, à confirmer sur un plus grand nombre d'essais, suggère qu'il serait possible de suivre en ligne le taux de « désenrésinement » du bois lors de l'étuvage.

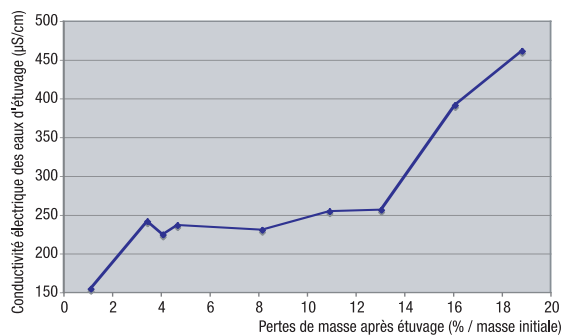


Figure 9. Évolution de la conductivité électrique à 20 °C des eaux d'étuvage, avec la perte de masse du bois pour des étuvages à différentes températures, dans 7 l d'eau et pendant 8 h.

Profils d'humidité

Les carottes prélevées en Algérie étant courtes par rapport au diamètre des arbres, nous ne disposons que de peu de points de mesure dans le duramen. Toutefois, les profils radiaux d'humidité obtenus (figure 10) indiquent un aubier très humide (entre 60 et 100 %) et un duramen proche du point de saturation des fibres (entre 30 et 40 %). Ces résultats et ordres de grandeur sont confirmés par ceux obtenus sur l'arbre échantillonné à Juvignac (figure 11).

Cette « sécheresse » du duramen est défavorable dans le cas du déroulage car le temps d'étuvage devra, par conséquent, être augmenté (peu d'eau libre pour servir de vecteur de chaleur) et la coupe par déroulage est toujours de moindre qualité sur bois sec que sur bois saturé (déformabilité moins importante du bois générant des fissurations et arrachements). Toutefois, cela est assez classique chez la plupart des résineux à aubiers différenciés (MOTHE *et al.*, 2000).

Mesure des efforts de coupe

La figure 12 visualise les évolutions des efforts de coupe et de compression avec la température du bois pour le cas de déroulages en 1 et 3 mm d'épaisseur.

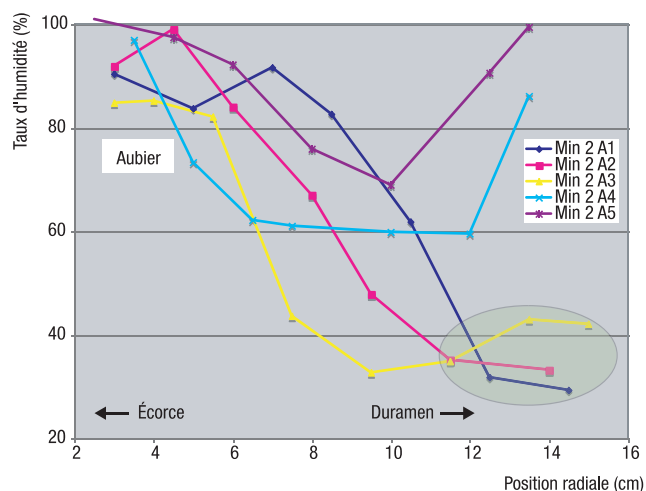
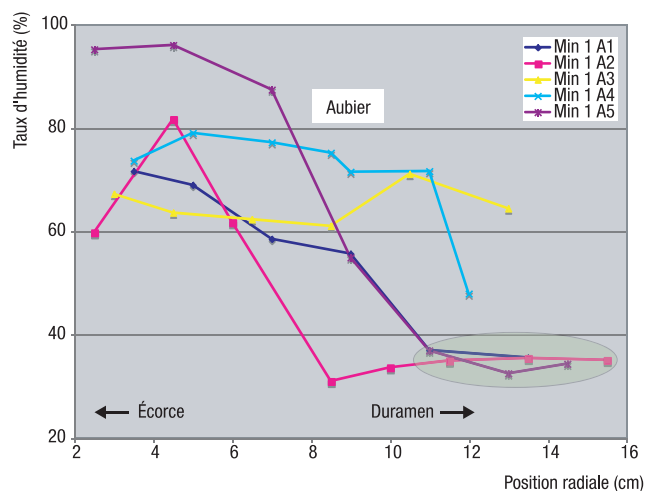
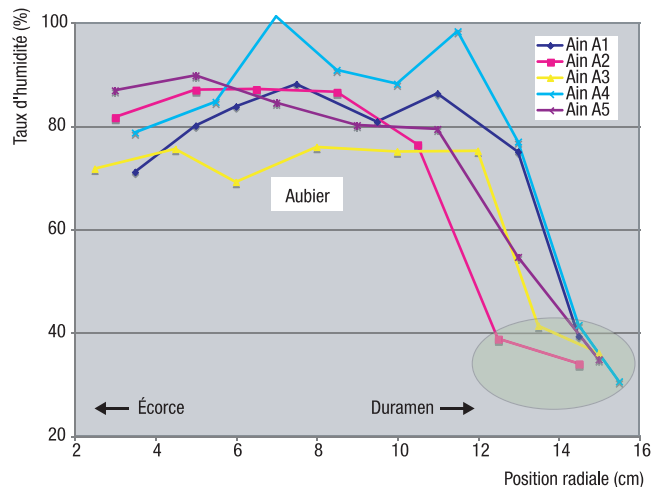
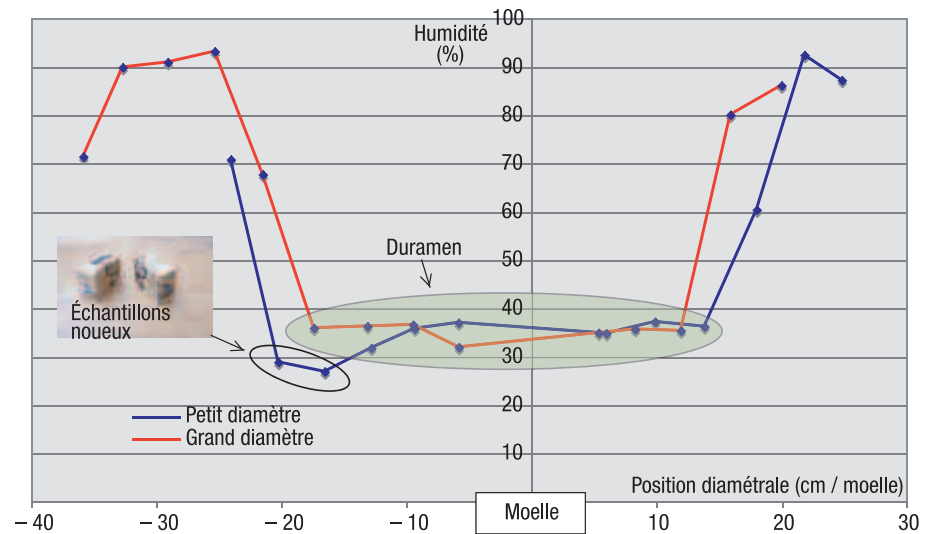


Figure 10. Évolution du taux d'humidité du bois vert mesuré sur des carottes radiales prélevées sur 15 arbres (Ain : Ain El G'sab ; Mim 1 ou 2 : Mimouna 1 ou 2).

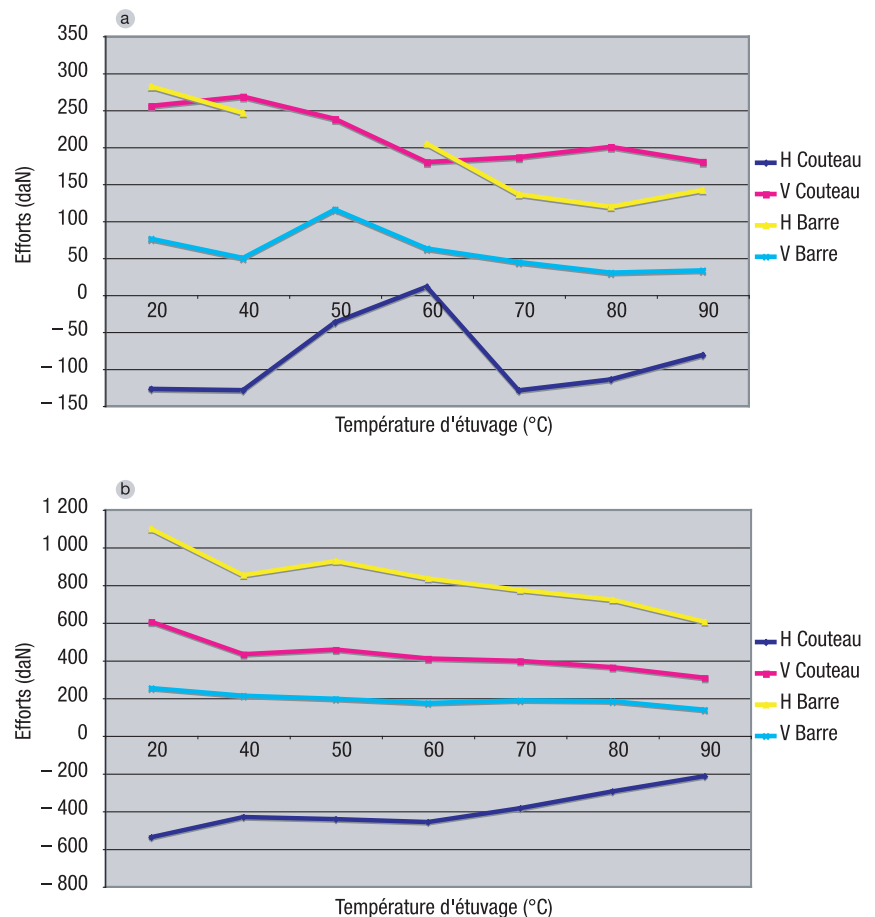
**Figure 11.**

Évolution du taux d'humidité dans le pin d'Alep vert récolté à Juvignac (France), suivant deux diamètres.

Les évolutions des efforts pour la coupe en 1 mm laissent apparaître des valeurs atypiques pour les températures de 50 et 60 °C. Cela peut venir, d'une part, du fait que plus la coupe est mince, plus les efforts mis en jeu sont faibles et plus une perturbation même minime de la coupe (présence de singularités, réglage non optimisé) peut entraîner une dérive importante, et, d'autre part, pour ces deux températures, du fait que l'angle de dépouille a été laissé à 0° comme pour les essais en 1 mm, d'où une situation allant même jusqu'à une légère plongée d'outil ($H_c > 0$) pour l'essai à 60 °C. Pour tous les autres essais en 1 mm, l'angle de dépouille a bien été correctement réglé à 0,5°.

En faisant abstraction de ce dernier problème, la tendance générale est globalement à la décroissance des efforts, toutes les caractéristiques mécaniques du bois diminuant quand sa température augmente. Les écarts-types de ces valeurs diminuent également, témoignant d'une stabilité accrue de la coupe.

La diminution des efforts la plus importante s'observe en 3 mm entre 20 et 40 °C. Au-delà, la diminution relative est plus modeste, alors que parallèlement la consommation énergétique nécessaire pour la chauffe du bois s'accroît fortement.

**Figure 12.**

Évolution des efforts de coupe et de compression (moyennes et écarts-types) avec la température d'étuvage lors du déroulage de billons (60 cm de long) en deux épaisseurs : 1 mm (a) ou 3 mm (b).

Conclusion et perspectives

L'objectif était, à la lumière des quatre familles d'indicateurs ci-dessus, de proposer une température d'étuvage du pin d'Alep qui constitue un bon compromis.

Ainsi, au vu de nos essais exploratoires, la bonne température serait de :

- 40 à 50 °C si l'on considère les fentes de recouvrance.
- 80 à 90 °C si l'on considère les pertes de résines.
- 80 à 90 °C si l'on cherche à chauffer au plus vite le duramen pauvre en eau libre et peu imprégnable.
- 50 à 60 °C si l'on cherche une diminution significative des efforts de coupe.

Cependant, ces indicateurs ne pèsent pas tous du même poids dans la décision finale. La perte en résine devant être assez marginale à l'échelle d'un billon en dimension d'emploi, ce critère ne sera pas prépondérant. En revanche, nous favoriserons le critère « fentes de recouvrance » car, du fait du billonnage court à préconiser sur des grumes à port tortueux, ce défaut doit être réduit autant que faire se peut pour ne pas mettre en péril l'intégrité des billons lors de la chauffe et, surtout, lors de la coupe.

Par conséquent, nous retiendrons 50 °C comme la plus haute température jugée acceptable pour ce qui est de la propagation des fentes, tout en permettant une diminution des efforts de coupe de l'ordre de 50 % par rapport au déroulage à température ambiante.

Cette recommandation, déjà appliquée dans l'industrie du déroulage de pin maritime, sera validée lors de nouveaux essais en cours, en laboratoire en France et en industrie en Algérie, en vue de l'optimisation des paramètres de coupe en déroulage.

Remerciements

Les auteurs remercient le Programme d'action intégré franco-algérien Tassili pour le financement de cette étude, les Conservations des forêts des wilayas de Tiaret, Saida et Tizi-Ouzou et la Chambre d'agriculture de l'Hérault pour leur aide à la fourniture des bois nécessaires à ces essais.

Bibliographie

DOUZET J., 2006. Optimisation de l'étuvage du pin d'Alep algérien en vue de sa valorisation par déroulage. Rapport de Projet de fin d'études de l'Ensam, 55 p., 16 annexes.

GRIL J., THIBAUT B., BERRADA E., MARTIN G., 1993. Recouvrance hygrothermique du bois vert. I. Influence de la température. Cas du Jujubier (*Ziziphus lotus* L. Lam.). Ann. Sci. For., 50 (1) : 57-70.

MARCHAL R., 1995. Une alternative pour les bois feuillus de qualité secondaire : les LVL (Laminated Veneer Lumber), lamellés-collés de placages. Revue Forestière Française, 47 (4) : 375-382.

MARCHAL R., JULLIEN D., MOTHE F., THIBAUT B., 1993. Mechanical aspects of heating wood in rotary veneer cutting. Proceedings of the 11th international wood machining seminar, Honne (Norvège), 25-27 mai 1993, p. 257-278.

MOTHE F., MARCHAL R., TILMANT TATISCHIEFF W., 2000. 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. Ann. For. Sci., 57 (2000) : 219-228.

THIBAUT B., LOUP C., CHANSON B., DILEM A., 1992. La valorisation du pin d'Alep en zone méditerranéenne française. Forêt Méditerranéenne, 13 (3) : 226-233.