

Caractérisation d'aboutages à entures multiples pour trois essences d'Algérie

Wassila DERBAL¹
Abdellatif ZERIZER¹
Jean GÉRARD²
Daniel GUIBAL²

¹ Université M'Hamed Bougara
Faculté des Sciences de l'Ingénieur
Unité de recherche Matériaux,
procédés et environnement (UR-MPE)
Équipe de Mécanique des matériaux
fibreux
35000 Boumerdès
Algérie

² CIRAD
UR Biomasse, bois, énergie,
bioproduits (BioWooEB)
TA B-114/16
73 rue J.-F. Breton
34398 Montpellier Cedex 5
France



Photo 1.
Chênes afarès, forêt d'Akfadou, Béjaïa.
Photo W. Derbal.

RÉSUMÉ

CARACTÉRISATION D'ABOUTAGES À ENTURES MULTIPLES POUR TROIS ESSENCES D'ALGÉRIE

Le pin d'Alep, *Pinus halepensis*, le chêne zéen, *Quercus canariensis*, et le chêne afarès, *Quercus afares*, sont trois essences parmi les plus abondantes en Algérie. Leur utilisation est cependant limitée par la présence de défauts dans le bois et par leur nervosité. Les techniques de reconstitution par collage, notamment l'aboutage, permettent de s'affranchir de ces problèmes par la fabrication de produits purgés de défauts et beaucoup plus stables que les bois massifs. Pour ces trois essences, le comportement des bois a été étudié en déterminant comparativement sur bois massifs et sur bois aboutés la masse volumique, le module d'élasticité longitudinal, le module de cisaillement transverse et la contrainte de rupture en flexion. Les essais ont montré que, pour les trois essences, les bois massifs et les bois aboutés ont des rigidités équivalentes. Les résistances en flexion des bois aboutés sont toujours inférieures à celles des bois massifs du fait de la qualité très variable des aboutages : séchage hétérogène des bois, profilage imprécis des entures, défaut de pression de serrage lors du collage. Malgré cela, les valeurs caractéristiques obtenues pour la contrainte de rupture en flexion sont globalement conformes aux préconisations de la norme-référence. Les résultats de l'étude montrent que l'application industrielle de la technique de l'aboutage est envisageable pour ce type d'essences peu utilisées, sous réserve d'être mise en œuvre dans le respect des règles de l'art. L'entreprise algérienne Transbois, en charge de la transformation des bois et de la fabrication des éprouvettes aboutées pour l'étude, va poursuivre les travaux engagés en passant à un stade de fabrication préindustrielle.

Mots-clés : aboutage à entures multiples, chêne afarès, chêne zéen, pin d'Alep, propriétés mécaniques, Algérie.

ABSTRACT

CHARACTERISATION OF FINGER JOINTS IN THREE ALGERIAN TIMBER SPECIES

The Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and two Algerian oaks (*Quercus canariensis* and *Quercus afares*) are among Algeria's most abundant tree species. However, their uses are limited by defects in the wood and by its grain direction. These problems can be overcome by jointing and bonding techniques, such as finger-jointing in particular, to manufacture high quality wood products that are far more stable than solid wood. We analysed the suitability of the three species for finger-jointing by comparing the bulk density, longitudinal elasticity modulus, transverse shear modulus and bending strength of solid and finger-jointed wood. The tests showed equivalent rigidity between the three species in solid and finger-jointed wood respectively. Bending strength in finger-jointed wood was always lower than in solid wood because of the highly variable quality of the joints (unevenly dried wood, lack of precision in joint profiles, insufficient pressure during bonding). Despite this, the characteristic values obtained for bending strength complied overall with benchmark recommendations. The results of our study show that industrial applications of the finger-jointing technique could be considered for these under-used species, provided that proper practice is observed in its implementation. The Algerian timber processing company *Transbois*, which was responsible for manufacturing the finger-jointed samples for the study, is to pursue the work undertaken by launching a pre-industrial manufacturing process.

Keywords: *Quercus canariensis*, *Quercus afares*, Aleppo pine, mechanical properties, Algeria.

RESUMEN

CARACTERIZACIÓN DE EMPALMES POR ENTALLADURAS MÚLTIPLES DE TRES ESPECIES DE ARGELIA

El pino carrasco, *Pinus halepensis*, el quejigo andaluz, *Quercus canariensis* y *Quercus afares* son tres de las especies más abundantes en Argelia. Sin embargo, su uso se ve limitado por la presencia de defectos en la madera y su nerviosismo. Las técnicas de reconstitución por encolado, especialmente por empalme, permiten superar dichos inconvenientes, realizando productos sin defectos y mucho más estables que los de madera maciza. Se estudió la adecuación de la madera de estas especies para el empalme comparando, en maderas macizas y empalmadas, la densidad, el módulo de elasticidad longitudinal, el módulo de elasticidad transversal y el esfuerzo de ruptura en flexión. Las pruebas mostraron que las maderas macizas y empalmadas de las tres especies tienen una rigidez equivalente. Las resistencias a flexión de las maderas empalmadas son siempre inferiores a las de la madera maciza debido a la gran irregularidad en la calidad de los empalmes: secado desigual de la madera, perfilado impreciso de entalladuras, presión de apriete inadecuada en el encolado. Pese a ello, los valores característicos logrados en esfuerzo de ruptura en flexión corresponden globalmente a las recomendaciones de la norma referenciada. Los resultados del estudio ponen de manifiesto que la técnica de empalme es viable en estas especies poco empleadas, siempre que se lleve a cabo de forma profesional. La empresa argelina *Transbois*, encargada de la transformación de las maderas y de la fabricación de probetas empalmadas para el estudio, continuará con las investigaciones ya iniciadas pasando a una fase de fabricación preindustrial.

Palabras clave: empalme por entalladuras múltiples, *Quercus afares*, quejigo andaluz, pino carrasco, propiedades mecánicas, Argelia.

Introduction

L'Algérie dispose d'une ressource forestière caractérisée par une grande variabilité associée à toute la gamme de bioclimats méditerranéens, depuis le bioclimat humide jusqu'au bioclimat saharien (Louni, 1994). Malgré cette diversité, les forêts algériennes sont dominées par un nombre limité d'espèces ou de groupes d'espèces de plantation ou de forêt naturelle dont certaines fortement endémiques : pin d'Alep, *Pinus halepensis*, eucalyptus, *Eucalyptus* spp., chêne zéen, *Quercus canariensis*, chêne afarès, *Quercus afares*, cèdres, *Cedrus* spp., chêne vert, *Quercus rotundifolia*, pin maritime, *Pinus pinaster*, chêne-liège, *Quercus suber*.

Les surfaces occupées par ces espèces au niveau national sont très variables (tableau I).

Leurs potentialités et leurs perspectives de valorisation sont aussi très inégales et dépendent directement de la qualité de leur bois, sous-tendue par la qualité des arbres sur pied (rectitude, cylindricité et conicité des tiges, présence de défauts externes ou internes).

Ainsi, le pin d'Alep est l'espèce la plus abondante en Algérie mais son utilisation reste limitée à des emplois à faible valeur ajoutée, essentiellement l'emballage et la construction légère (Direction générale des forêts, 2000). Cette limitation de ses emplois potentiels est liée à sa forte nodosité, à la présence de résine à cœur, et à sa nervosité due à la présence de bois de compression (Thibaut *et al.*, 1992 ; Langbour *et al.*, 2011).

Le chêne zéen et le chêne afarès sont deux espèces à feuilles caduques, souvent associées au chêne-liège qu'elles ont tendance à supplanter dans certaines stations fraîches. Les qualités technologiques de leurs bois sont proches : fort retrait de séchage, dureté et propriétés mécaniques élevées. Compte tenu de leur faible stabilité dimensionnelle, l'usage de ces bois est limité à des pièces de forte section pour des emplois lourds et à faible valeur ajoutée : poteaux de mine, traverses de chemin de fer, charpente traditionnelle... (Ameels, 1989 ; Berrichi, 1993 ; Messaoudene *et al.*, 2008). Du fait de leurs similitudes, ces deux espèces sont donc souvent traitées de façon groupée dans les études forestières et technologiques.

Les carrelets trois plis sont constitués de trois lames de bois, aboutées ou non, collées entre elles sur face. Leur fabrication repose sur la maîtrise d'une double technologie : aboutage à entures multiples qui relève d'un processus industriel ; lamellation relevant d'une technologie plus simple et plus flexible que l'aboutage, davantage transposable à un processus semi-industriel.

Ces produits présentent des avantages multiples : leur fabrication permet de valoriser des bois de qualité secondaire purgés de leurs défauts et des coproduits de scierie ; leurs résistances mécaniques sont comparables à celles du bois massif ; ils sont prêts à l'emploi et ont une stabilité dimensionnelle supérieure à celle du bois massif (risques limités de déformations, fissurations et gerces durant la mise en œuvre).

Le développement de ces produits depuis quelques années est lié à la mise au point de nouvelles colles à bois très performantes qui permettent de s'affranchir en partie des contraintes technologiques imposées par certaines essences : bois très durs, « nerveux » (retraits de séchage élevés), à forts taux d'extraits.

Ces produits sont aujourd'hui acceptés par les entreprises de seconde transformation, notamment en menuiserie industrielle, et sont proposés par la quasi-totalité des opérateurs spécialisés dans le négoce, la revente et la distribution de matériaux-bois et produits dérivés (Le Névé, 2012).

L'application des techniques de collage par aboutage et lamellation est apparue *a priori* bien adaptée pour mieux valoriser des essences telles que le pin d'Alep et les chênes zéen et afarès du fait des problèmes technologiques posés par leur transformation directe en bois massif (Messaoudene *et al.*, 2008 ; Langbour *et al.*, 2011).

Cependant, l'aptitude de ces bois au collage et le comportement des produits reconstitués se devaient d'être étudiés afin de valider la faisabilité d'une telle fabrication, ceci avant d'envisager son application à un niveau industriel.

Le collage d'essences secondaires et la fabrication de bois massifs reconstitués ont fait l'objet de nombreuses études ayant pour finalité la valorisation de ressources forestières locales en utilisant des adhésifs de différents types (Dinkel, 1997 ; Bustos, 2003 ; Pommier et Muszynski, 2007). Les innovations les plus récentes ont concerné l'aboutage du bois vert à l'aide de colles assurant un collage chimique du

Tableau I.

Superficies des principales espèces forestières d'Algérie (compilation BNEDEK, 2009 ; Meddour-Sahar, 2012 ; FAO, 2013 ; Mellaoui-Murzeau, 2013).

Espèces inventoriées	Superficie (ha)
Chêne zéen - Chêne afarès (<i>Quercus canariensis</i> Willd. - <i>Q. afares</i> Pomel)	48 000
Chêne-liège (<i>Quercus suber</i> L.)	230 000
Chêne vert (<i>Quercus rotundifolia</i> Lam.)	108 000
Eucalyptus (<i>Eucalyptus</i> spp.)	43 000
Pin d'Alep (<i>Pinus halepensis</i> Mill.)	1 158 500
Pin maritime (<i>Pinus pinaster</i> Aiton)	31 000
Cèdre de l'Atlas (<i>Cedrus atlantica</i> (Manetti ex Endl.) Carrière)	16 000

bois mais dont la stabilité dans le temps après collage reste hypothétique (Dagenais, 2007 ; Coman, 2010).

Cet article présente les résultats de l'étude de l'aptitude à l'aboutage des trois essences testées (aboutage sans épaulement : entures usinées sur la totalité de la section des pièces) ; dans le processus de fabrication de produits lamellés-aboutés, l'aboutage est en effet l'opération la plus délicate à conduire car davantage sensible à la nervosité du bois et à ses défauts de structure que l'opération de lamellation.

Matériels et méthodes

Matériels

Origine des bois

Les bois étudiés ont été échantillonnés dans les deux stations forestières de Haizer (région de Bouira) pour le pin d'Alep et de Akfadou (région de Bejaïa) pour le chêne afarès et le chêne zéen.

Pour chaque espèce, quatre arbres de 8 à 12 m de hauteur et de 40 à 55 cm de diamètre ont été sélectionnés. L'âge des arbres est estimé compris entre 30 et 40 ans mais n'est pas connu précisément ; ces arbres sont considérés comme matures et constitués majoritairement de bois adulte.

La traçabilité des bois en provenance de chacun des quatre arbres n'a pas été suivie car l'objectif de l'étude n'était pas d'analyser les différences de comportement du bois inter-individus.

Sur le site même d'exploitation, les grumes ont été tronçonnées en billons de 1,30 m. Les billons ont été transportés dans l'entreprise Transbois (à Bejaïa) qui a pris en charge la totalité de la transformation, depuis le sciage des billons jusqu'à la fabrication des carrelats trois plis.

Cette entreprise se caractérise par une activité intégrée de transformation du bois, depuis le sciage jusqu'à la fabrication

de produits finis. Elle connaît des difficultés récurrentes à sécuriser son approvisionnement en bois, tant sur un plan qualitatif que quantitatif. De ce fait, elle est en recherche permanente de nouvelles essences potentiellement valorisables pour la fabrication de produits élaborés (*engineered wood products*), notamment des produits composites reconstitués par collage.

La chaîne de transformation du bois jusqu'à la fabrication des aboutages

La fabrication des aboutages à entures multiples résulte d'une succession d'opérations de transformation et conditionnement des bois :

1. Sciage des billons en plateaux de 35 mm d'épaisseur : sciage parallèle à l'aide d'une scie de tête Brenta (diamètre des volants : 1 800 mm ; largeur des frets des volants : 285 mm ; motorisation : 150 cv).
2. Délignage des plateaux en lamelles de 30 mm d'épaisseur et 50 mm de largeur (hauteur maximum de sciage : 100 mm ; diamètre des lames : 480 mm).
3. Pour les trois essences, séchage des lamelles en séchoir traditionnel durant quatre jours hors stabilisation, en utilisant un programme de séchage standard de l'entreprise (humidité initiale des bois : 60 % ; humidité finale : 8 à 10 % ; température maximum : 60 °C). Les lamelles de chêne avaient fait l'objet d'un préséchage à l'air de trois semaines afin de limiter la durée d'encombrement du séchoir, alors que celles de pin ont été directement séchées artificiellement.
4. Carroyage des lamelles à l'aide d'une 4-faces (photo 2).
5. Préparation de l'adhésif dans l'abouteuse : colle vinylique à un composant (colle Pattex – Henkel Algérie) ; cette colle est la seule utilisée par l'entreprise Transbois pour la fabrication industrielle des panneaux aboutés lattés du fait de ses facilités d'approvisionnement.
6. Usinage des entures sans épaulement (photo 3, abouteuse Dimter DK 14).



Photo 2.
Carroyage des lamelles.
Photo W. Derbal.



Photo 3.
Usinage des entures.
Photo W. Derbal.

7. Encollage des entures (photo 4) et assemblage par pressage.
8. Calibrage des pièces aboutées.

Pour valider la faisabilité de ce type de fabrication pour les bois sélectionnés et qualifier la tenue des aboutages, la résistance mécanique des bois aboutés a été comparée à celle des bois massifs.

Quatre caractéristiques de référence ont été étudiées :

- masse volumique ;
- module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®) ;
- contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points).

Échantillonnage des éprouvettes

Les éprouvettes ont été fabriquées conformément aux préconisations de la norme XP CEN/TS 13307-2 (AFNOR, 2010), « Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellés-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels », qui précise les dimensions des éprouvettes pour les essais de type initial de bois aboutés non structurels : essais de flexion statiques 4 points (figure 1).

Leurs dimensions sont les suivantes :

- longueur, 400 mm ;
- hauteur (face enturée), 25 mm ;
- largeur, 20 mm.

Pour chacune des trois essences, 40 éprouvettes ont été débitées pour le bois abouté et pour le bois massif. Elles ont été triées afin d'éliminer celles présentant des défauts internes identifiés après usinage ; ces défauts étaient particulièrement présents sur le chêne zéen et le chêne afarès.

Avant essai, les éprouvettes ont été stabilisées en salle climatisée à 20 °C et 65 % d'humidité relative (taux d'humidité théorique du bois de 12 %) durant 25 jours.

La géométrie des entures est celle utilisée de façon standard par l'entreprise Transbois (photo 5).

Méthodes

Masse volumique, module d'élasticité longitudinal et module de cisaillement transverse par méthode vibratoire (méthode BING®)

La méthode BING® s'appuie sur l'étude des vibrations d'une pièce de bois.

L'analyse spectrale des vibrations naturelles de flexion et/ou de compression permet d'identifier les fréquences propres d'une poutre à partir de sa réponse à une excitation impulsionnelle appliquée à une de ses extrémités.

La détermination d'une ou plusieurs fréquences de vibration du système permet de déduire les propriétés mécaniques de l'échantillon testé.

Le mode de sollicitation peut être en compression, en flexion sur chant ou en flexion à plat ; dans le cas présent, il s'agit d'une flexion sur chant.

Le Cirad a conçu, développé et mis en œuvre le dispositif BING® pour obtenir rapidement des modules d'élasticité en flexion (E_L) et des modules de cisaillement transverses (G)



Photo 4.
Entures en cours d'encollage.
Photo W. Derbal.

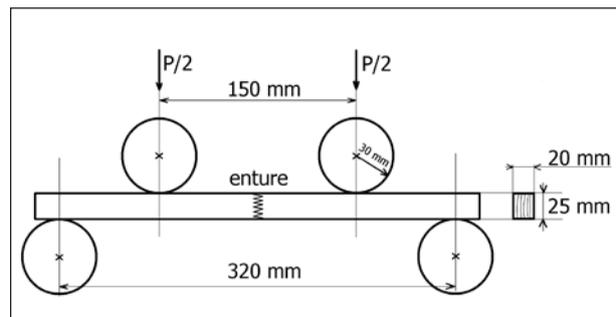


Figure 1.
Schéma du bâti d'essai de flexion.

par analyse et interprétation du spectre des vibrations naturelles d'une pièce en bois.

La chaîne de mesure est composée d'un laser, d'un amplificateur avec filtrage intégré, d'un convertisseur analogique numérique et du programme BING® installé sur un ordinateur. Dans la chaîne de mesure d'origine, l'enregistrement des vibrations des pièces testées était assuré par un microphone. Pour le dispositif de laboratoire du Cirad, ce microphone a été par la suite remplacé par un laser dont l'utilisation améliore la précision et la fiabilité de l'enregistrement des vibrations.

Des essais comparatifs réalisés au Cirad ont montré une très bonne corrélation avec les résultats obtenus par des essais classiques de flexion (3 et 4 points) sur des éprouvettes en bois de toutes dimensions, de toutes sortes d'essences, avec et sans défaut (Brancheriau, 2011, 2013).

La masse volumique, nécessaire pour le calcul des deux caractéristiques mécaniques, est déterminée directement à partir de la mesure des dimensions et la pesée des éprouvettes, préalablement à leur mise en vibration.

Tableau II.

Comparaison bois massifs / bois aboutés pour les trois caractéristiques déterminées avec la méthode vibratoire.

(nombre d'éprouvettes testées)	Pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i> Mill.		Chêne afarès <i>Quercus afares</i> Pomel		Chêne zéen <i>Quercus canariensis</i> Willd.	
	Massif (28)	Abouté (28)	Massif (21)	Abouté (21)	Massif (24)	Abouté (24)
Module d'élasticité longitudinal moyen E_L (méthode Bing, en MPa) [écart-type]	10 940 [1 554]	10 100 [2 020]	14 400 [1 937]	14 000 [1 098]	14 600 [1 870]	14 450 [832]
Module de cisaillement transverse moyen G (MPa) [écart-type]	1 417 [1 996]	1 377 [591]	1 615 [1 027]	1 543 [316]	1 187 [199]	1 607 [291]
Masse volumique moyenne M_v (kg/m ³) [écart-type]	557 [24]	637 [36]	806 [42]	912 [75]	898 [83]	1 020 [68]

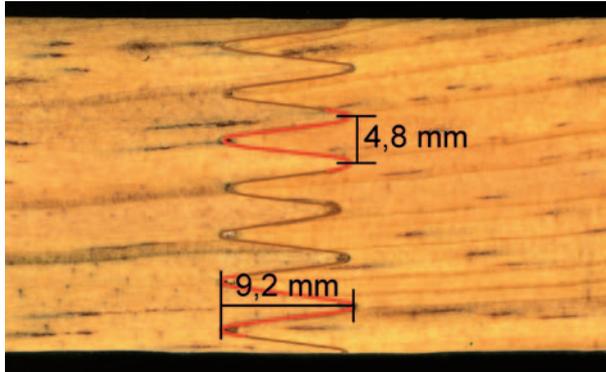


Photo 5.

Géométrie des entures multiples.
Photo D. Guibal.

Photo 6.

Bâti utilisé pour les essais de flexion.
Photo W. Derbal.

Contrainte de rupture en flexion longitudinale (flexion 4 points)

L'objectif de l'essai est d'évaluer la résistance des éléments aboutés par rapport aux éléments en bois massif (norme XP CEN/TS 13307-2, 2010-01-01).

Les caractéristiques de l'essai sont les suivantes :

- mesure en trois points de la largeur et de l'épaisseur de chaque éprouvette afin d'en déterminer une valeur moyenne ;
- positionnement des éprouvettes sur les rouleaux du bâti d'essais, l'espacement entre les rouleaux supérieurs devant être supérieur à six fois la hauteur de l'éprouvette : 150 mm dans le cas présent car la hauteur h des éprouvettes est de 25 mm (figures 1 et photo 6) ;
- positionnement de la zone d'entures des éprouvettes avec aboutages dans l'espacement central, les aboutages étant visibles sur la face latérale ;
- enregistrement de la force maximale pour obtenir la rupture de chaque éprouvette.

Résistance en flexion statique et valeurs caractéristiques

Selon la norme-référence (norme XP CEN/TS 13307-2, 2010-01-01), les valeurs caractéristiques de l'essai de rupture en flexion statique sont définies de la façon suivante.

- Résistance f_{mi} de chaque éprouvette i

$$f_{mi} = \frac{F_i \cdot L_i}{b_i \cdot t_i^2} \quad (1)$$

Avec :

- f_m : résistance en flexion, en MPa ;
- F : force maximale, en N ;
- L : espacement entre rouleaux, en mm ;
- b : largeur de la section transversale de l'éprouvette, en mm ;
- t : hauteur de l'éprouvette, en mm ;
- i : indice de la $i^{\text{ème}}$ éprouvette.

• Valeurs caractéristiques des échantillons aboutés

Valeur moyenne \bar{f}_m .

Écart-type et coefficient de variation CVa.

Valeur du 5^e percentile selon la formule :

$$f_{m05} = \bar{f}_m - 1,7 \cdot S_{fm} \quad (2)$$

Avec :

- f_{m05} : valeur du 5^e percentile de la résistance, en MPa ;
- \bar{f}_m : valeur moyenne de la résistance, en MPa ;
- S_{fm} : écart-type, en MPa.

• Valeurs caractéristiques des échantillons massifs

Valeur moyenne f_{mr} .

Écart-type e.t.

Coefficient de variation CVm.

Selon la norme XP CEN/TS 13307-2, l'interprétation des résultats nécessitera de plus la prise en compte du rapport Rb des valeurs moyennes de chacun des deux types d'éprouvettes :

$$Rb = \frac{f_{mr}}{f_m} \quad (3)$$

Qualification du collage et performances des entures

Selon la norme-référence (norme XP CEN/TS 13307-2, 2010-01-01), la qualité du collage des entures peut être considérée comme satisfaisante, comparativement à la résistance du bois massif, si les trois critères suivants sont respectés :

- $Rb \leq 2$ (Rb = rapport des valeurs moyennes des deux groupes d'éprouvettes, massives et aboutées) ;
- $f_{m05} \geq 17$ N/mm² ;
- variabilité de la résistance dans un lot d'éprouvettes inférieure à 20 % (résistances prises en compte uniquement lorsque la rupture s'est produite dans l'aboutage).

Tableau III.

Comparaison des caractéristiques mécaniques des bois massifs et aboutés : résultats du test (non paramétrique) de Mann-Whitney (test de rang).

	Pin d'Alep <i>Pinus halepensis</i> Mill.		Chêne afarès <i>Quercus afares</i> Pomel		Chêne zéen <i>Quercus canariensis</i> Willd.	
	E_L	G	E_L	G	E_L	G
U (stat. de Mann-Whitney)	479	302	279	141	270	49
Espérance	392	392	221	221	288	288
Variance (U)	3724	3723	1580	1580	2351	2351
p-value (bilatérale)	0,156	0,14	0,145	0,047*	0,718	< 0,0001*
alpha	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Hypothèse nulle H_0 : la différence de position des échantillons est égale à 0. Ho est rejetée si p-value < alpha.						

* : p-value < alpha.

E_L : modules d'élasticité en flexion (en MPa) ; G : modules de cisaillement transverses (en MPa).

Résultats et discussion

Comparaison des modules d'élasticité longitudinaux, des modules de cisaillement et des masses volumiques des bois massifs et aboutés

Les résultats obtenus pour les trois essences et les deux types de bois (massifs et aboutés) sont donnés dans le tableau II.

La masse volumique des bois aboutés est systématiquement supérieure à celle des bois massifs pour les trois essences ; l'écart de masse volumique observé peut être lié à l'effet de la variabilité du bois (différence de qualité des bois sélectionnés pour le collage) auquel s'ajoute, dans une moindre mesure, la densification des bois aboutés due à la colle ; cet écart ne peut pas s'expliquer par des différences d'humidité entre les deux catégories de bois car les bois massifs et les bois aboutés ont été stabilisés de la même façon en chambre climatique avant les essais.

Pour chacune des trois essences, les deux propriétés mécaniques E_L et G obtenues sur bois massif sont comparées à celles sur bois abouté.

Compte tenu de la taille relativement limitée des six échantillons, les distributions de valeurs ont été comparées deux à deux à l'aide d'un test non paramétrique : un test de Mann-Whitney a été retenu (test de rang applicable pour comparer deux échantillons).

Les résultats obtenus pour les trois essences sont repris dans le tableau III.

Pour le module d'élasticité longitudinal, la différence entre le bois massif et le bois abouté est non significative pour les trois essences (l'hypothèse nulle est acceptée dans les trois cas).

Pour le module de cisaillement transverse, la différence entre le bois massif et le bois abouté est non significative pour le pin d'Alep ; elle est très significative au seuil 5 % pour le

chêne zéen et peu significative pour le chêne afarès (l'hypothèse nulle est rejetée dans les deux cas).

Pour le chêne zéen, le module de cisaillement moyen du bois massif est remarquablement bas. Cette faible valeur pourrait être liée à la structure particulière de ce bois dont la maillure est très marquée (rayons ligneux très importants) et dont le fil est très irrégulier, ainsi qu'à la présence de défauts internes (fentes) dans les éprouvettes massives.

Excepté pour cette caractéristique pour le chêne zéen, on peut considérer que les comportements des bois massifs et aboutés sont comparables.

Comparaison du comportement à la rupture en flexion des bois massifs et des bois aboutés

Résultats généraux

Les figures 2, 3 et 4 (*notched box plots* ; « boîte à moustaches à encoches ») présentent les distributions des contraintes de rupture en flexion pour les trois essences et pour les deux types de bois, massif et abouté.

Pour chacune des trois essences, les contraintes de rupture des bois aboutés sont systématiquement inférieures à celles obtenues sur bois massif.

Les deux distributions « bois massif » et « bois abouté » sont décalées, le décalage entre les encoches (*notches*) des « boîtes à moustaches » indique que la différence de position entre les médianes des distributions est significative.

Bois massifs

Le comportement à la rupture des trois essences et les niveaux de contraintes obtenus correspondent aux résultats disponibles dans la littérature (Messoudene *et al.*, 2008 ; Ameels, 1989 ; Berrichi, 1993 ; Langbour *et al.*, 2011 ; Thibaut *et al.*, 1992) : les moyennes des contraintes à la rupture pour le pin d'Alep, le chêne afarès et le chêne zéen sont respectivement de 85, 108 et 121 MPa.

Ces résultats couplés à ceux obtenus pour la masse volumique et le module d'élasticité montrent que : le pin d'Alep testé est un bois léger aux propriétés mécaniques faibles à moyennes ; le chêne afarès est un bois mi-lourd à lourd aux propriétés mécaniques moyennes ; le chêne zéen est un bois lourd associé à des propriétés mécaniques moyennes à élevées.

Les essais ont porté sur des petites éprouvettes normalisées sans défaut, ce qui a limité la variabilité des résultats due à la présence aléatoire des défauts, et a permis d'obtenir pour les trois essences des faciès de rupture homogènes, associés à des courbes force-déplacement types en rupture en flexion 4 points (figure 5).

Bois aboutés

Pour les bois aboutés, les valeurs de contrainte à la rupture en flexion sont en moyenne plus faibles que celles des bois massifs, respectivement 59 MPa pour le pin d'Alep, 68 MPa pour le chêne afarès et 75 MPa pour le chêne zéen.

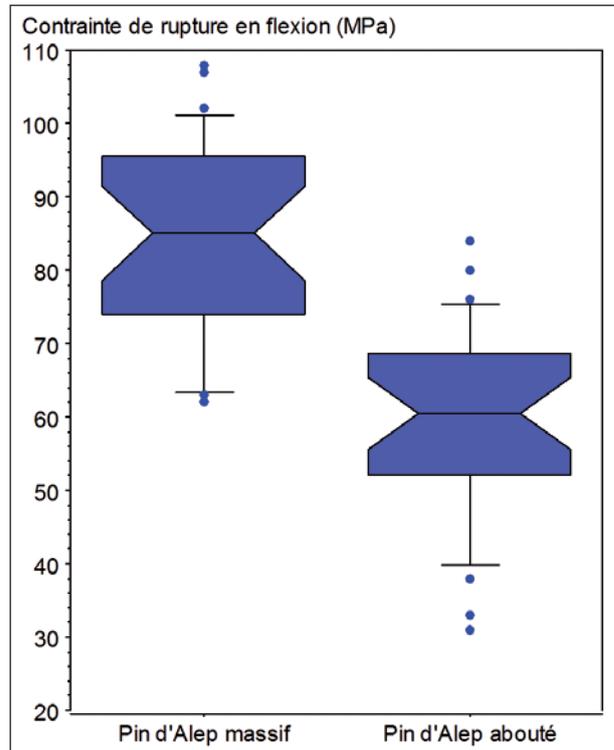


Figure 2.
Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill.

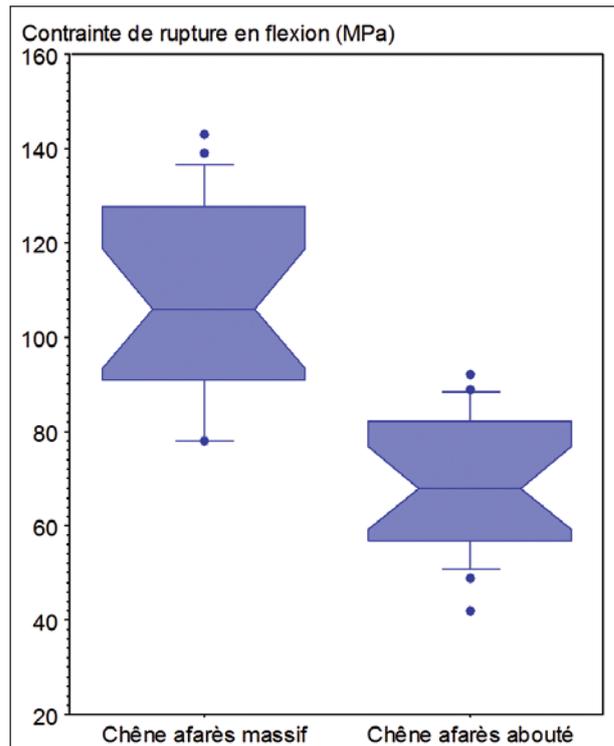


Figure 3.
Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chêne afarès, *Quercus afares* Pomel.

La diminution de contrainte sur bois aboutés est plus faible pour le pin d'Alep que pour les deux chênes (diminution respectivement de 31 % pour le pin d'Alep contre 37 %

et 38 % pour les deux autres essences) ; ceci est lié à la moins bonne qualité du collage et de l'assemblage des entures pour les deux chênes.

En effet, pour les trois essences, la qualité des aboutages réalisés dans l'entreprise s'est révélée fluctuante du fait d'un profilage des entures insuffisamment précis et/ou d'une pression insuffisante de serrage lors du collage (photos 7 et 8).

De plus, pour les trois essences, le séchage du bois a pu présenter une certaine hétérogénéité, avec pour certaines pièces des taux d'humidité supérieurs à ceux préconisés pour l'emploi d'une colle vinylique à un composant. Cette hypothèse n'a cependant pas pu être vérifiée car le taux d'humidité des bois n'a pas été systématiquement mesuré avant aboutage.

Les aboutages avaient été cependant triés préalablement aux essais, ce qui a permis de limiter la dispersion des résultats.

La pression de serrage lors de la fabrication des aboutages est celle habituellement utilisée par l'entreprise de façon indifférenciée pour toutes les essences ; les plus fréquemment utilisées, les résineux.

De ce fait, les aboutages des deux essences les plus dures, le chêne zéen et le chêne afarès, ont été les plus pénalisés par ce défaut de fabrication.

Valeurs caractéristiques de la contrainte de rupture en flexion statique

Le tableau IV reprend les valeurs caractéristiques déterminées à l'issue des essais de contrainte de rupture en flexion statique.

Ces valeurs sont indicatrices de la qualité du collage considérée ou non comme satisfaisante conformément aux préconisations de la norme de référence XP CEN/TS 13307-2.

Les résultats contenus dans le tableau IV montrent que pour les trois essences, les valeurs caractéristiques obtenues sont conformes aux préconisations de la norme, excepté pour la variabilité de la résistance du chêne afarès abouté, très légèrement supérieure à 20 % (20,3 %).

Pour les autres caractéristiques, on a bien :

- $R_b \leq 2$ (R_b = rapport des valeurs moyennes des deux groupes d'éprouvettes, massives et aboutées) ;
- $f_{m05} \geq 17 \text{ N/mm}^2$;
- $CV \leq 20 \%$.

Les éprouvettes présentant des défauts d'aboutage visibles (aboutages non jointifs en fond d'enture) ont été écartées car non conformes à ce que doit être ce type d'assemblage.

Cependant, les éprouvettes conservées pour les essais car apparemment conformes ont pu aussi être pénalisés par de mauvaises conditions de collage (pression de serrage insuffisante, imprécision de l'usinage des entures).

Une fabrication des aboutages avec un meilleur respect des règles de l'art aurait très probablement donné de meilleurs résultats même si ceux obtenus dans le cas présent peuvent être considérés comme satisfaisants.

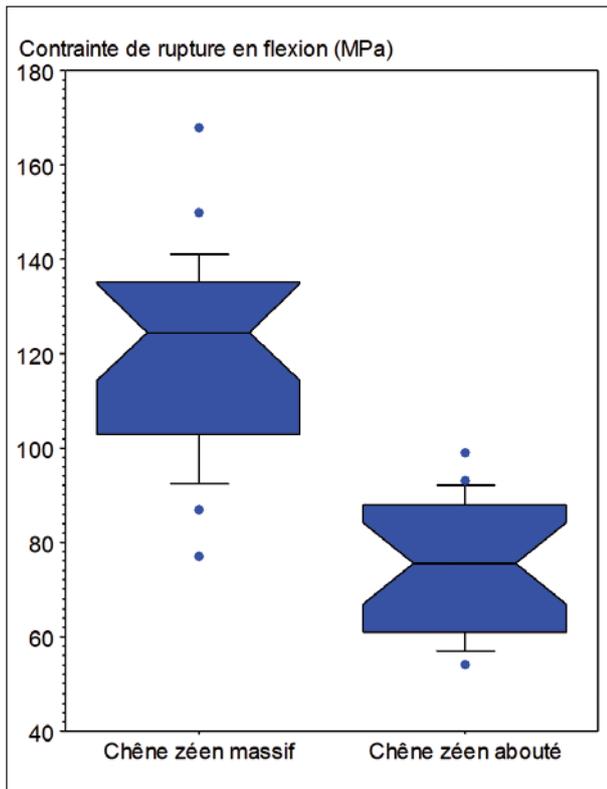


Figure 4.
Distribution des contraintes de rupture en flexion pour le chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd.

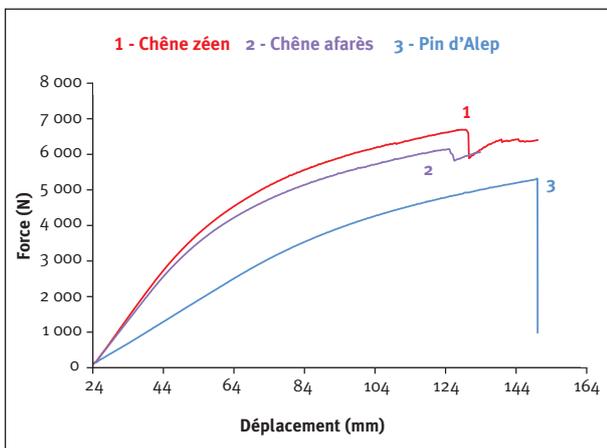


Figure 5.
Courbe force-déplacement type pour la rupture en flexion des bois massifs du pin d'Alep, *Pinus halepensis* Mill., du chêne afarès, *Quercus afares* Pomel, et du chêne zéen, *Quercus canariensis* Willd.

Tableau IV.
Valeurs caractéristiques pour la contrainte de rupture en flexion statique (bois massifs et bois aboutés).

Valeurs caractéristiques	Pin d'Alep	Chêne afarès	Chêne zéen
Bois massif	28 épreuves	21 épreuves	24 épreuves
f_{mr} (MPa)	84,2	108,0	121,3
e.t. (MPa) CVm (%)	13,7 16,2	20,3 18,8	21,0 17,3
Bois abouté	28 épreuves	21 épreuves	24 épreuves
\bar{f}_m (MPa)	58,7	68,2	75,2
S_{fm} (MPa)	11,2	13,8	13,9
CVa (%)	19,0	20,3	18,5
f_{m05} (MPa)	39,6	44,7	51,6
$Rb \left(= \frac{f_{mr}}{\bar{f}_m} \right)$	1,43	1,58	1,61

Conclusion

Cette étude a permis de caractériser l'aptitude à l'aboutage de trois essences algériennes sous-utilisées malgré leur importante disponibilité sur le territoire national : le pin d'Alep *Pinus halepensis*, le chêne zéen *Quercus canariensis*, et le chêne afarès *Quercus afares*.

Les travaux ont été axés sur la qualification des aboutages dont la fabrication est délicate à conduire car soumise à de nombreux paramètres liés au séchage, à l'usinage et au collage des bois. Cette fabrication a été assurée par l'entreprise Transbois.

La qualité de la tenue des aboutages a été étudiée en comparant leurs caractéristiques mécaniques à celles des bois massifs.

Les caractéristiques physiques et mécaniques des bois massifs pour les trois essences correspondent aux résultats disponibles dans la littérature : bois de pin d'Alep léger et faiblement à moyennement résistant, bois de chêne afarès mi-lourd à lourd et moyennement résistant, et bois de chêne zéen lourd et moyennement à très résistant.

Pour les trois essences, les bois massifs et les bois aboutés ont une rigidité équivalente.

En revanche, les résistances en flexion des bois aboutés sont toujours inférieures à celles des bois massifs. Ces résultats sont dus aux performances très variables des aboutages, liées notamment à l'hétérogénéité du séchage peu compatible avec l'emploi d'une colle vinylique à un composant.

Malgré ces contraintes liées au processus de fabrication, les valeurs caractéristiques obtenues pour la contrainte de

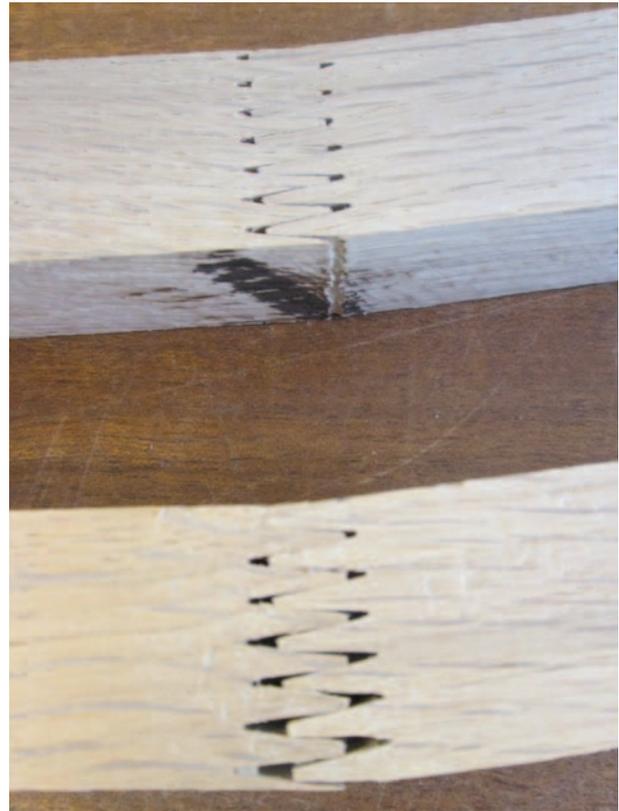


Photo 7.

Défauts d'aboutages (entures mal profilées ou pression de serrage insuffisante) : les entures ne sont pas ajustées.
Photo W. Derbal.

rupture en flexion sont globalement conformes aux critères de qualité des aboutages.

Un séchage des bois mieux suivi, couplé à une fabrication des aboutages dans un meilleur respect des règles de l'art, aurait très probablement permis d'améliorer la qualité des produits finis. La réussite de la valorisation industrielle des trois essences étudiées est directement conditionnée par les performances de ces produits reconstitués par collage.

Les résultats obtenus à l'issue de cette étude sont encourageants car ils montrent que la fabrication de produits reconstitués, en particulier par l'application de la technique de l'aboutage, est possible, ouvrant une piste supplémentaire pour mieux valoriser ces essences sous-exploitées qui ne font l'objet d'aucune sylviculture, au détriment de la qualité de leur bois.

L'entreprise Transbois va continuer l'expérience en initiant un processus de fabrication préindustrielle envisageable compte tenu de la disponibilité de la ressource.

La plupart de ces peuplements forestiers tendent à vieillir sur pied car leur production est actuellement supérieure aux prélèvements. Leur exploitation créatrice de valeur ajoutée devrait inciter à améliorer les pratiques sylvicoles associées, sous réserve de la mise en place d'une gestion durable garantissant la pérennisation de cette ressource.

**Photo 8.**

Le manque d'ajustement des entures provoque un décollement des joints de colle sur les trois essences.
Photo W. Derbal.

Remerciements

Cette étude a été réalisée grâce à l'implication majeure de l'entreprise Transbois qui a pris en charge l'intégralité des opérations de transformation des bois, depuis le sciage des billons jusqu'à la fabrication des carreaux trois plis. Nous tenons à remercier ici l'ensemble des personnels, dirigeants et techniciens, pour leur participation et leur soutien sans faille durant cette phase amont de l'étude. Nous remercions aussi le ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique d'Algérie et l'Université M'Hamed Bougara de Boumerdès, d'une part, et le Cirad, d'autre part, pour leur soutien financier qui a permis la réalisation de ces travaux.

Références bibliographiques

AFNOR, 2010. Ébauches et profilés semi-finis en bois lamellés-collés et assemblés par entures multiples pour usages non structurels. Partie 2 : contrôle de production. Norme XP CEN/TS 13307-2 (2010). La Plaine Saint-Denis, France, Afnor Éditions, 27 p.

Ameels M., 1989. Étude des propriétés technologiques et anatomiques de *Quercus canariensis* Willd. des massifs forestiers de l'Akfadou et de Beni-Ghobri en Algérie. Mémoire d'ingénieur, Université de Louvain, Belgique, 127 p.

Berrichi M., 1993. Contribution à l'étude de la production et de la qualité du bois de trois espèces du genre *Quercus* : chêne vert (*Q. rotundifolia* Lamk.) ; chêne-liège (*Q. suber* L.) ; chêne zéen (*Q. faginea* Lamk.) : cas des monts de Tlemcen. Thèse magister, Ina, El-Harrach (Alger), Algérie, 175 p.

BNEDER (Bureau national d'études pour le développement rural), 2009. Plan national de développement forestier (PNDF). Rapport de synthèse nationale. Alger, Algérie, 87 p.

Brancheriau L., 2011. Vibrations de poutre. Caractérisation acoustique du matériau bois pour son utilisation en structure. Sarrebrück, Allemagne, Éditions universitaires européennes, 240 p.

Brancheriau L., 2013. Caractérisation acoustique et ultrasonore des produits bois et composites. Habilitation à diriger des recherches, Mécanique, Université Montpellier 2, Montpellier, France, 122 p.

Bustos A. C., 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette noire. Thèse de doctorat en sciences du bois, Faculté de foresterie et géomatique, Université Laval, Québec, Canada, 157 p.

Bustos C., Beauregard R., Mohammad M., Hernández R. E., 2003. Structural performance of finger-jointed black spruce lumber with different joint configurations. *Forest Products Journal*, 53 (9): 72-76.

Bustos C., Hernández R. E., Beauregard R., Mohammad M., 2004. Influence of machining parameters on the structural performance of finger-jointed black spruce. *Wood and Fiber Science*, 36 (3): 359-367.

Coman R., 2010. Effet des paramètres de coupe sur l'aboutage de l'épinette noire à haute masse volumique. Mémoire de maître ès sciences (M.Sc.), Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 85 p. [En ligne] www.theses.ulaval.ca/2010/27092/27092.pdf

Dagenais C., 2007. Aboutage de l'érable à sucre pour la fabrication de produits de bois d'ingénierie structuraux. Mémoire de maître ès sciences (M.Sc.), Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, Québec, Canada, 131 p. [En ligne] www.theses.ulaval.ca/2007/24607/24607.pdf

Dinkel O., 1997. Étude et modélisation de l'endommagement d'un assemblage collé bois-bois sollicité en traction. Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur, Université Paul Verlaine, Metz, France, 164 p.

Direction générale des forêts (DGF), 2000. Étude prospective du secteur forestier en Algérie. Alger, Algérie, 86 p.

FAO (Food and Agriculture Organization), 2013. FAOSTAT, Annuaire statistique de la FAO, Algérie. Rome, Italie, FAO.

Langbour P., Gérard J., Guibal D., Mahlani K., 2011. Caractérisation technologique et valorisation en bois d'œuvre du pin d'Alep de la région Provence-Alpes-Côte d'Azur. Forêt Méditerranéenne, 32 (3): 263-270.

Le Névé S., 2012. Dossier bois reconstitués – Différents profils pour plus de valeur ajoutée. Le Bois International, 35 : 9-12.

Louni D., 1994. Les forêts algériennes. Forêt méditerranéenne, 15 (1) : 59-63.

Loyche Wilkie M., 2010. Évaluation des ressources forestières mondiales. Algérie, Rapport national FAO, 57 p.

Mellaoui-Murzeau F., 2013. Analyse de la politique du secteur forestier et des secteurs connexes. Rapport technique du Projet Régional Silva Mediterranea – PCFM. Algérie, Direction Générale des Forêts (DGF), Ministère de l'Agriculture et du Développement Rural –81 p.

Messaoudene M., Tafer M., Loukkas A., Marchal R., 2008. Propriétés physiques du bois de chêne zéen de la forêt des Aït Ghobri (Algérie). Bois et Forêts des Tropiques, 298 (4) : 37-48.

[En ligne] http://bft.cirad.fr/cd/BFT_298_37-48.pdf

Meddour-Sahar O., Derridj A., 2012. Bilan des feux de forêts en Algérie : analyse spatio-temporelle et cartographie du risque (période 1985-2010). Science et Changements Planétaires / Sécheresse, 23 (2) : 133-141.

Pommier R., Muszynski L., 2007. Évaluation du comportement d'un assemblage bois collé par méthodes de caractérisation optiques. 25^{es} rencontres de l'AUGC, Bordeaux, France, 23-25 mai 2007, 8 p.

Thibaut B., Loup C., Chanson B., Dilem A., 1992. La valorisation du pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) en zone méditerranéenne française. Forêt Méditerranéenne, 13 (3) : 226-233.