Variabilité des propriétés physico-mécaniques du bois de *Pistacia atlantica* en Algérie nord-occidentale

Propriétés physico-mécaniques de *Pistacia* en Algérie

Mots-clés

Algérie, nord-occidentale, amortissement, bois, densité, module d'élasticité, module spécifique, *Pistacia atlantica* Desf., provenance.

Manel Boudouaya (auteur correspondant)
Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès
Institut des Sciences Agronomiques
Département de Biotechnologie Agricole
Laboratoire d'Éco-Développement des Espaces
Route de Tlemcen, BP 89. 22000, Sidi Bel Abbès (Algérie)
E-mail : boudouayamanel@yahoo.fr

Fatima Zohra Bendimered-Mouri
Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie.
Laboratoire de Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation
Route de Tlemcen, BP 89. 22000, Sidi Bel Abbes (Algérie)
E-mail : fzrmouri@yahoo.fr

Hachemi Benhassaini
Université Djilali Liabes de Sidi Bel Abbès
Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie
Département des Sciences de l'Environnement.
Laboratoire de Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation
Route de Tlemcen, BP 89. 22000, Sidi Bel Abbes (Algérie)
E-mail : ecoreve@yahoo.fr

Frédéric Mothe
INRA-UMR 1092, LERFOB, 54280 Champenoux, France
E-mail : mothe@nancy.inra.fr

Meriem Fournier
AgroParisTech-UMR 1092, LERFOB, 54000 Nancy, France
E-mail : meriem.fournier@agroparistech.fr

Joseph Gril
Directeur de recherche au CNRS, Directeur GDR 3544 Sciences du Bois
Institut Pascal (UMR 6602), Univ. Clermont Auvergne
Campus des Cezeaux, 2 av. Blaise Pascal, TSA 60206, CS 60026
63178 Aubiere cedex, France
E-mail : joseph.gril@cnrs.fr

Bruno Clair
Chercheur au CNRS, UMR Écologie des Forêts de Guyane "EcoFoG"
Université des Antilles / Université de Guyane / AgroParisTech / Inra / Cirad)
Laboratoire Sciences des Bois de Guyane.
E-mail :bruno.clair@cnrs.fr

Résumé

Le bois de *Pistacia atlantica* Desf., espèce forestière résiliente des zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord, présente un potentiel d'utilisation encore peu valorisé. Cette étude vise à caractériser les relations entre la densité et les propriétés physico-mécaniques de ce bois, selon la provenance géographique et le type de bois (aubier, duramen, bois mixte). Des échantillons ont été prélevés sur six arbres provenant de deux régions bioclimatiques contrastées du nord-ouest algérien (Sidi Bel-Abbès et Tiaret), puis analysés par la méthode des vibrations forcées sans contact sur poutres flottantes. Soixante-douze éprouvettes standardisées (200 x 12 x 2 mm) ont été testées pour déterminer le module d'élasticité longitudinal (EL), le module spécifique (EL/ρ) et le coefficient d'amortissement (tanδ). Les résultats montrent que la densité est modérément corrélée au module de Young ($r = 0,454$), mais négativement au module spécifique ($r = –0,327$), indiquant que les bois plus légers présentent une meilleure rigidité massique. L'aubier se distingue par un module spécifique significativement plus élevé ($\rho < 0,001$), tandis que le duramen, plus dense, présente une rigidité brute supérieure. Le bois de Sidi Bel-Abbès se révèle globalement plus performant que celui de Tiaret (EL moyen respectif : 10,75 vs 8,82 GPa), bien que l'ANOVA révèle que l'effet de la provenance n'est significatif que pour l'aubier. Le coefficient d'amortissement, quant à lui, apparaît peu sensible à la densité, au type de bois ou à la provenance. Selon la norme NF B 51-008 (1985), le module de Young du pistachier le classe parmi les bois de rigidité moyenne. Ces résultats soulignent l'influence conjointe de la structure interne du bois et des conditions écologiques sur ses propriétés mécaniques, et ouvrent des perspectives pour une valorisation différenciée du bois de *Pistacia atlantica*, notamment pour des usages combinant légèreté, rigidité et stabilité vibratoire (facture instrumentale, menuiserie fine, construction générale).

Introduction

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) est une espèce autochtone du pourtour méditerranéen, remarquable par sa tolérance à la sécheresse et sa capacité d'adaptation à des environnements contraignants. Doté d'un système racinaire profond et puissant, cet arbre peut atteindre 20 mètres de hauteur et un mètre de diamètre (Boudy, 1955 ; Spina et Pennisi, 1957). Il prospère dans des milieux à faible indice d'évapotranspiration. Son rôle écologique dans la stabilisation des écosystèmes arides et semi-arides est largement reconnu (Monjauze, 1980).

Malgré son importance écologique, le bois de *Pistacia atlantica* demeure peu exploité et très peu documenté sur le plan technologique. Sa caractérisation physico-mécanique est essentielle pour envisager des usages adaptés, notamment en menuiserie, construction légère ou facture instrumentale. La densité du bois à 12 % d'humidité est couramment utilisée comme indicateur indirect des performances mécaniques, influençant la rigidité, l'élasticité, l'amortissement des vibrations et la durabilité du matériau (Brémaud, 2006). Cette propriété dépend de facteurs tels que les conditions de croissance, les pratiques sylvicoles, la structure anatomique, l'âge ou encore la localisation de l'arbre (Guitard et El Amri, 1987 ; Nepveu, 1993 ; Guitard, 1994 ; Keller, 1994, 1995).

Des approches non destructives innovantes, comme la méthode des vibrations forcées sans contact sur poutres flottantes, ont permis d'évaluer avec précision et rapidité les propriétés mécaniques du bois - en particulier le module d'élasticité longitudinal (EL), le module spécifique (EL/ρ) et le coefficient d'amortissement (tanδ) (Brancheriau et Baillères, 2002 ; Brémaud, 2006).

Dans ce contexte, cette étude vise à combler une lacune en apportant des données inédites sur les propriétés physico-mécaniques du bois de *Pistacia atlantica* issu de deux régions bioclimatiques distinctes du nord-ouest algérien : Sidi Bel-Abbès et Tiaret. Elle s'appuie sur une approche comparative entre trois types de bois (aubier, duramen, bois mixte) et deux provenances géographiques contrastées. Les objectifs poursuivis sont :

1. d’évaluer la variabilité des propriétés mécaniques selon la structure anatomique et la provenance géographique,
2. d’identifier les facteurs influençant la rigidité du bois,
3. de proposer des pistes de valorisation différenciée de cette ressource dans une logique d’exploitation durable et raisonnée.

Matériel et méthodes

1. Provenance du site d’étude et matériel végétal

L’étude a été conduite sur six individus matures de *Pistacia atlantica* Desf., répartis équitablement entre deux régions du nord-ouest algérien présentant des conditions bioclimatiques contrastées : Sidi Bel-Abbès (climat méditerranéen semi-aride à tendance continentale), Tiaret (climat semi-aride à influence saharienne).

La sélection des arbres s’est fondée sur des critères morphologiques stricts : sujets non fourchus, au port équilibré, exempts de défauts visibles et représentatifs de la structure locale. Ces arbres identifiés et géoréférencés au sein de placettes d’un hectare, ont fait l’objet de mesures dendrométriques de base, notamment la hauteur totale et le diamètre à 1,30 m du sol (Boudouaya *et al*., 2015, 2016) (figure 1).

2. Échantillonnage du bois

Sur chaque arbre, un billon de 50 cm a été prélevé à hauteur de poitrine (1,30 m), ainsi qu’une rondelle de souche de 15 cm d’épaisseur (figure 2, photo 1). Chaque billon a été codifié selon sa provenance : (S pour Sidi Bel-Abbès, T pour Tiaret), et le numéro de l’arbre (ex. : T2 pour le deuxième arbre de Tiaret). Le billon a ensuite été débité en cinq rondelles selon la méthode de Gelhaye et Mothe (2006) (figure 3), totalisant 36 rondelles (30 issues des billons, 6 des souches). Chaque rondelle a été affectée à un usage précis :

- Rondelle n°1 (3,5 cm) : prélèvement des barrettes pour l’analyse microdensitométrique,
- Rondelle n°2 (5 cm) : comptage et mesure des cernes,
- Rondelle n°3 et 5 : conservées en réserve,

- Rondelle n°4 (20 cm) : utilisée pour les essais mécaniques et colorimétriques

L'âge cambial des arbres a été estimé par comptage des cernes sur les rondelles de souche.

3. Préparation des éprouvettes

La découpe s'est focalisée sur la rondelle n°4. Quatre rayons opposés ont été tracés afin d'identifier les différents types de bois : bois de tension, bois opposé et bois normal (Bordonné, 1989 ; Boudouaya *et al.*, 2016). Douze éprouvettes rectangulaires par arbre (200 mm x 12 mm x 2 mm, selon les directions L x R x T) ont été débitées sur les deux rayons les plus longs, en évitant les défauts visibles (figure 4).

4. Conditionnement des échantillons

Le débitage des éprouvettes a été effectué au LERFoB (Nancy), en respectant l'orientation du fil du bois (photo 2). Le séchage à l'air libre a duré quatre semaines, jusqu'à stabilisation à 12 % d'humidité. Les essais ont ensuite été réalisés dans une salle climatisée (20 °C, 65 % HR) au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l'Université de Montpellier.

5. Dispositif expérimental

Les propriétés mécaniques ont été évaluées à l'aide d'un système de vibrations forcées sans contact comprenant :

- Un générateur de fonction,
- Un amplificateur audio,
- Un électroaimant,
- Un capteur laser de déplacement à triangulation,
- Un oscilloscope,
- Un ordinateur d'acquisition (figure 5).

Chaque éprouvette, suspendue horizontalement, a été soumise à un balayage fréquentiel permettant d'enregistrer la première fréquence de résonance.

6. Paramètres mesurés

Les paramètres extraits sont :

- Le module d'élasticité longitudinal (EL),
- Le module spécifique (EL/ρ),
- Le coefficient d'amortissement (tanδ), conformément à la méthode décrite par Brancheriau et Baillères (2002) (figure 5).

Les dimensions ont été mesurées au pied à coulisse (précision : 0,01 mm), et la masse pesée avec une précision de 0,0001 g, permettant le calcul de la densité (photo 3).

7. Traitement statistique

L'analyse statistique a été conduite selon les étapes suivantes :

- Analyse de la variance (ANOVA à 5 %) pour évaluer les effets de la provenance, du type de bois et de l'individu sur les propriétés mesurées,
- Calcul des coefficients de corrélation entre la densité et les propriétés mécaniques,
- Régression linéaires entre les variables quantitatives afin d'identifier les tendances structurelles.

Résultats

1. Influence de la densité sur les propriétés mécaniques

L'analyse des 72 éprouvettes révèle une relation significative entre la densité du bois et ses performances mécaniques (figure 6). Deux groupes se distinguent nettement : le duramen, plus dense (ρ = 1,151 g/cm^3) et mécaniquement plus rigide (EL = 10,180 GPa) ; l'aubier, moins dense (ρ ≈ 0,854 g/cm^3), se révèle mécaniquement plus souple (EL ≈ 9,661 GPa), tandis que le bois mixte occupe une position intermédiaire (ρ ≈ 1,007 g/cm^3 ; EL ≈ 9,789 GPa). Ces résultats soulignent le rôle structurant de la densité dans la variabilité des performances mécaniques.

Par ailleurs, l'analyse des relations linéaires (figure 6) montre que ces effets diffèrent selon le type du bois : l'aubier, notamment celui provenant de Sidi Bel Abbès, présente des

corrélations marquées entre densité et EL, traduisant une sensibilité mécanique élevée à la masse volumique. Le duramen, plus homogène, affiche une dispersion réduite des valeurs, tandis que le bois mixte montre une variabilité plus hétérogène. Ces observations confirment que la densité, au-delà de son effet direct sur la rigidité, constitue également un indicateur pertinent de l'organisation interne du matériau et de sa réponse mécanique.

2. Effet de la provenance géographique

Les différences entre les provenances sont significatives et reflètent l'influence des conditions édapho-climatiques sur les propriétés mécaniques du bois. Le bois de Sidi Bel Abbès présente une densité (ρ = 1,018) et un module d'élasticité (EL = 10,748 GPa) plus élevés que ceux de Tiaret (ρ = 0,881 ; EL = 8,818 GPa). Toutefois, les corrélations entre densité et propriétés mécaniques y sont plus faibles, voire absentes, contrairement aux échantillons de Tiaret qui montrent une meilleure linéaire entre ces variables. Cette disparité pourrait s'expliquer par une plus grande homogénéité du matériau dans les zones soumises à un stress climatique plus élevé, induisant une structure anatomique plus régulière.

3. Corrélations entre densité et propriétés mécaniques

Le tableau I présente les coefficients de corrélation calculés pour l'ensemble des échantillons, dont la densité moyenne est de 0,953 ± 0,160 g/cm^3. Une corrélation positive modérée est observée entre la densité et le module d'élasticité (EL) (r = 0,454), indiquant que les bois plus denses tendent à être mécaniquement plus rigides. En revanche, une corrélation négative apparaît entre la densité et le module spécifique (EL/ρ ; r = -0,327), suggérant que les bois plus légers offrent un meilleur rendement en termes de rigidité par unité de masse. Le coefficient d'amortissement (tanδ) montre quant à lui une très faible corrélation avec la densité (r = 0,137), traduisant une relative indépendance du comportement vibratoire par rapport à la masse volumique, avec un effet limité sur la capacité à dissiper l'énergie vibratoire.

4. Comparaison des propriétés selon le type de bois

Les moyennes par type de bois (tableau I) révèlent des différences marquées. Le duramen présente la densité la plus élevée (1,151 ± 0,059 g/cm^3) et un bon amortissement (tanδ = 0,014 ± 0,002), mais un module spécifique plus faible (8,829 ± 1,284 GPa). L'aubier, quant à lui, est plus léger (0,854 ± 0,083 g/cm^3), avec un module spécifique le plus élevé (11,222 ± 1,746 GPa), traduisant une excellente efficacité mécanique relative, et une forte corrélation entre densité et module d'élasticité (r = 0,794). Enfin, le bois mixte présente des valeurs intermédiaires avec des corrélations plus faibles, et parfois même négatives, entre densité et module spécifique.

5. Variabilité intra-provenance et inter-arbre

Le tableau II met en évidence des différences notables entre arbres d'une même provenance, illustrant une variabilité significative des propriétés. À Sidi Bel Abbès, l'aubier de l'arbre S3 présente un module d'élasticité élevé (11,581 GPa), tandis que le duramen de S1 affiche une corrélation parfaite entre densité et EL (r = 1,000). À Tiaret, les valeurs sont plus hétérogènes : l'aubier de T1 montre un EL particulièrement faible (6,716 GPa), traduisant une variabilité intra-régionale marquée.

L'analyse par arbre révèle des corrélations parfois très élevées entre densité et module de Young, comme pour le duramen de S1 et T1 (r = 1,00), suggérant une forte corrélation du matériau dans ces arbres. Cependant, pour d'autres échantillons, notamment le bois mixte, les corrélations sont faibles, voire inversées. L'ANOVA confirme l'effet significatif de l'arbre sur certaines combinaisons, en particulier dans l'aubier.

6. Analyse de variance (ANOVA)

Le tableau III présente les résultats de l'ANOVA, mettant en évidence un effet très significatif du type de bois sur le module de Young ($\rho < 10^{-10}$) et sur le module spécifique ($\rho < 10^{-5}$), avec des différences particulièrement marquées dans l'aubier. La provenance influence significativement le module de Young dans l'aubier ($\rho = 0{,}000032$), mais pas dans le duramen. Une variabilité inter-arbres significative est également observée, uniquement

dans l'aubier. En revanche, aucune variation significative n'a été détectée pour le coefficient d'amortissement (tanδ), que ce soit en fonction de la provenance, du type de bois ou de l'arbre.

Discussion

Les résultats obtenus confirment l'influence majeure de la densité sur le module d'élasticité longitudinal (EL), avec une corrélation positive modérée (r = 0,454). Cette observation est conforme aux travaux de Guitard et El Amri (1987), ainsi qu'à ceux de Keller (1995), qui soulignent la dépendance des propriétés mécaniques à la densité dans les bois feuillus. Zobel *et al*. (1989) rappellent également que la densité influence la qualité technologique des fibres et leur rendement. Par ailleurs, cette densité peut être modulée par les pratiques sylvicoles. Nepveu (1993) a notamment démontré l'effet de la fertilisation sur la croissance des arbres, influant ainsi sur la densité du bois. Toutefois, la différence de densité entre duramen et aubier ne s'accompagne pas toujours d'une amélioration proportionnelle du module de Young. Cela suggère que d'autres paramètres, tels que la teneur en extraits, la structure cellulaire ou la largeur des cernes, peuvent également intervenir (Gérard, 2008 ; Maatoug *et al*., 2004). Ce constat invite ainsi à relativiser l'usage de la densité comme indicateur unique de performance mécanique, et incite à considérer aussi la largeur des cernes, l'angle du fil et la présence éventuelle de bois de compression (Goy, 1992 ; Polge, 1973).

La supériorité mécanique du bois issu de Sidi Bel Abbès par rapport à celui de Tiaret (EL moyen de 10,748 GPa contre 8,818 GPa) met en évidence l'impact des conditions édapho-climatiques. Cette observation est cohérente avec les travaux de Hildebrandt (1960), Larson (1962) et Polge (1973), qui ont démontré l'effet de facteurs tels que le sol, l'altitude et le climat sur les propriétés du bois. Les sols riches en calcaire, le climat semi-aride frais et la moindre altitude à Sidi Bel Abbès pourraient favoriser une croissance plus homogène, générant un bois plus dense et rigide. Ce résultat appuie la nécessité de prendre en compte la provenance dans toute stratégie de sélection et de valorisation sylvicole (Goy, 1992).

L’analyse révèle une forte variabilité intra-arbre, en particulier dans l’aubier, avec des corrélations élevées entre densité et module d’élasticité pour certains arbres (ex. arbre S2 : r = 0,904). Cela corrobore les travaux de Guitard et Fournier (1994) et de Baillères *et al*., (2005), qui ont montré que les propriétés mécaniques du bois varient à la fois entre individus d’une même espèce et à l’intérieur d’un même arbre. Cette hétérogénéité traduit l’influence locale de facteurs tels que la croissance différentielle, l’exposition ou les contraintes mécaniques. À l’inverse, le duramen apparaît plus homogène, ce qui constitue un atout pour des usages industriels nécessitant une constance mécanique (menuiserie, pièces structurelles). Cependant, certaines anomalies sont observées, comme une corrélation négative entre densité et module spécifique chez certains individus de Tiaret (T3), traduisant une variabilité locale importante, possiblement liée à la structure anatomique ou à la présence de bois de compression.

Le module spécifique présente une corrélation négative avec la densité (r = -0,327), traduisant une réduction du rapport rigidité/masse avec l’augmentation de la densité. Ce résultat est particulièrement important pour les applications où la légèreté est un critère, comme en mobilier, construction légère ou facture instrumentale (Brémaud, 2006). Il révèle que des bois plus légers (ex. aubier de T2) peuvent offrir une rigidité spécifique compétitive. Ce compromis entre légèreté et rigidité ouvre des perspectives d’utilisation différenciée du bois de *Pistacia atlantica*, notamment dans des filières artisanales ou semi-industrielles à faible impact écologique.

Le coefficient d’amortissement (tanδ) a présenté une stabilité notable, indépendamment du type de bois, de la provenance géographique ou de l’individu (tableau III). Cette absence d’effet significatif des facteurs étudiés confirme les résultats de Brancheriau (2002), selon lesquels ce paramètre, notamment en direction axiale, est faiblement corrélé à la densité et reflète principalement les propriétés des parois cellulaires. Cette constance vibratoire du bois de *Pistacia atlantica* constitue un atout pour des applications nécessitant une faible dissipation d’énergie vibratoire, telles que la lutherie, les

éléments acoustiques ou les pièces soumises à des cycles résonants. La faible variabilité observée du tanδ pourrait également être liée à la présence de composés extractibles hydrophobes, comme cela a été rapporté dans certains feuillus tropicaux (Yano *et al*., 1994, 1995 ; Matsunaga *et al*., 1996). Ces composés sont connus pour modifier la teneur en eau à l'équilibre du bois et, par conséquent, influencer ses performances acoustiques.

Les performances mécaniques observées, notamment pour le bois issu de Sidi Bel Abbès, révèlent un potentiel intéressant pour des usages techniques requérant une rigidité moyenne à élevée. Conformément à la norme NF B 51-008 (1985), le module d'élasticité moyen supérieur à 10 000 MPa permet de classe *Pistacia atlantica* parmi les essences de rigidité moyenne, comparable à certains bois commerciaux couramment utilisés.

Ce potentiel, combiné à l'aptitude de l'espèce à croître en conditions arides et à sa variabilité anatomique (aubier/duramen), justifie sa valorisation dans des filières locales de transformation du bois. Une approche raisonnée pourrait s'appuyer sur une stratégie de tri différencié selon la structure anatomique et la provenance géographique, afin d'optimiser les usages en fonction des propriétés mécaniques spécifiques du matériau.

Conclusion

Cette étude a permis de caractériser les propriétés physico-mécaniques du bois de *Pistacia atlantica* Desf. en fonction de la structure anatomique (aubier, duramen, bois mixte) et de la provenance géographique (Sidi Bel Abbès et Tiaret), en s'appuyant sur une méthode non destructive par vibrations forcées sur poutres flottantes.

Les résultats confirment que la densité constitue un bon prédicteur du module de Young (EL) dans la majorité des cas, bien que cette relation soit atténuée dans certains types de bois ou provenances. Le duramen, plus dense, se distingue par une rigidité plus élevée, tandis que l'aubier, plus léger, présente une plus grande variabilité, notamment entre arbres d'une même provenance. Le module spécifique (EL/ρ), indicateur du compromis rigidité/légèreté, s'avère particulièrement influencé par la structure anatomique du bois, l'aubier se révélant globalement le plus performant. À l'inverse, le coefficient

d’amortissement (tanδ) demeure stable, indépendamment des facteurs étudiés, ce qui témoigne d’une homogénéité vibratoire favorable à certaines applications

Sur le plan géographique, le bois issu de la région de Sidi Bel Abbès présente de meilleures performances mécaniques que celui de Tiaret, suggérant une influence significative des conditions écologiques locales. Par ailleurs, l’analyse statistique (ANOVA) confirme des effets significatifs du type de bois, de la provenance et de l’arbre sur certaines propriétés, en particulier dans l’aubier.

Ces résultats confirment que la qualité mécanique du bois de *Pistacia atlantica* dépend à la fois de la structure interne du bois et des facteurs écologiques. Ils soulignent le potentiel de valorisation du bois de *Pistacia atlantica* dans des filières techniques et acoustiques, notamment pour la menuiserie fine, la construction légère ou la facture instrumentale. Ils incitent également à une meilleure prise en compte des variations intra- et inter-régionales pour une gestion durable de cette ressource. Des recherches complémentaires, intégrant l’analyse de la structure anatomique fine (angle du fil, microfibrilles, contenu en extraits) et une approche intégrée combinant sélection génétique, pratiques sylvicoles adaptées et transformation locale, permettraient d’optimiser l’usage de cette essence résilience dans les zones arides et semi-arides du Maghreb.

Remerciements

Nous remercions M^{me} Meriem FOURNIER, M. Frédéric MOTHE, M. Pierre GELHAYE et M. Alain MERCANTI pour leur encadrement et leur disponibilité, ainsi que l’ensemble de l’équipe pour leur accueil et leur appui technique. Nos remerciements vont également au Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC) de l’Université de Montpellier, en particulier à M. Joseph GRIL et M. Bruno CLAIR pour leur collaboration et leur intérêt constant pour l’étude des propriétés mécaniques.

Sources de financement

Cette étude a été financée par le *Ministère de l’Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique* de l’Algérie. Elle a été menée au sein du *Laboratoire d’Étude des Ressources*

Forêt-Bois (*LERFoB*), *INRA-ENGREF* de Nancy (France), en collaboration avec l'équipe "*Croissance, Production et Qualité des Bois*" (*UMR INRA-AgroParisTech, Centre INRA de Nancy*).

Bibliographie

Baillères H., Vitrac O., Ramananantoandro T., 2005. Assessment of continuous distribution of wood properties from a low number of samples: Application to the variability of modulus of elasticity between trees and within a tree. Holzforschung, 59 (5) 524-530. https://doi.org/10.1515/HF.2005.087.

Bordonné P.A., 1989. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois: mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Doctorat, Sciences du bois, Institut National Polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, France. 154p.

Boudouaya M., Benhassaini H., Bendimered-Mouri F. Z., Mothe F., Fournier M., 2015. Évaluation de la durabilité naturelle du bois de *Pistacia atlantica* Desf. du Nord de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 325(3): 49-58. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_325_49-58.pdf.

Boudouaya M., Benhassaini H., Bendimered-Mouri F. Z., Mothe F., Fournier M., 2016. Évaluation de la variabilité de la couleur du bois de *Pistacia atlantica* Desf. du Nord de l'Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 330(4): 23-35. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_330_23-35.pdf.

Boudy P., 1955. Économie forestière nord-africaine. Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Volume 1. Éditeur Larose. Paris, 370p.

Brancheriau L., 2002. Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique. Doctorat, Mécanique, option: Acoustique, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II. Ecole Supérieure de Mécanique de Marseille, Marseille, 267p.

Brancheriau L., Baillères H., 2002. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. Wood Science and Technology, 36: 347-365. https://doi.org/10.1007/s00226-002-0143-7.

Brémaud I., 2006. Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique : Étude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois contrastés en majorité tropicaux. Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire. Thèse de docteur de l'Université Montpellier II. 294p.

Gelhaye P., Mothe F., 2006. Densitométrie : Notices d'utilisation. Nancy, France, Inra, Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois de l'équipe Croissance, Production et Qualité des Bois (CPQB), 21p.

Gérard J., 2008. Propriétés des bois tropicaux : bases pour une utilisation rationnelle. *Bois et Forêts des Tropiques*, 295(1), 5–20.

Gérard, J., 1994. Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal, et de ´ formations de sciage chez les Eucalyptus de plantation. Thèse de Doctorat en Sciences du Bois, Université de Bordeaux 1. 149 pp.

Goy B., 1992. Prédiction de la rigidité de l'épicéa commun avec prise en compte de paramètres de croissance. Étude des pièces de petites dimensions sans nœud. Thèse de doctorat de l'Université de Nancy I, 128p.

Guitard D., et El Amri F., 1987. La fraction volumique en rayons ligneux comme paramètre explicatif de la variabilité de l'anisotropie élastique du matériau bois. Acte du 2ème Colloque Sciences et industrie du bois, ENGREF, Nancy. Édition ARBOLOR association pour la recherche en bois de Loraine, 405- 412p.

Guitard, D., et Fournier, M. 1994. Comportement mécanique du bois. In P. Jodin (Éd.), Le bois : matériau d'ingénierie. ARBOLOR, 91-125p.

Hildebrandt G., 1960. The effect of growth conditions on the structure and properties of wood. *in* Proceedings of the 5th world forestry congress, 29 août-septembre, Seattle, Washington: University of Washington Press, 3: 1348-1358p.

Keller R., 1994. La constitution du bois, Chapitre I, 14-52p *in*: Jodin P. (Editor), Le bois matériau d'ingénierie. ARBOLOR, Nancy, 433p.

Keller R., 1995. Le chêne pour la tonnellerie dans la forêt française. Journée technique de la station viticole Bureau National Interprofessionnel du Cognac. Cognac, 21.9.1995.

Larson P.R., 1962. A biological approach to wood quality. Tappi, vol. 45, n°6, June.

Maatoug M., Gérard J., et Dallal A., 2004. Effet du type de station forestière sur la rigidité du bois de thuya de Maghreb (*Tetraclinis articulata*). Application de la méthode acoustique dans les mesures de module de Young, Sciences et technologie C-N°22, pp.100-105.

Matsunaga M., Sugiyama M., Minato K., et Norimoto M., 1996. Physical and mechanical properties required for violin bow materials. Holzforschung, 50: 511-517.

Monjauze A., 1980. Connaissance du bétoum. (*Pistacia atlantica* Desf.). Revue forestière française, 32(4): 357-63.

Nepveu G., 1993. The possible status of wood in oak beeding programs (*Quercus petraea* L. and *Quercus robur* L.), Annales des sciences forestières. INRA- Station de recherches sur la qualité des bois- CRF de Nancy- Champenoux. 50(1): 388-394.

NF B 51-008, 1985. Bois - Flexion statique - Détermination de la résistance à la flexion statique sur éprouvettes sans défaut de petites dimensions.

Polge H., 1973. Facteurs écologiques et qualité du bois. Annales des sciences forestières, Station de recherches sur la qualité des bois, CNRF- INRA, Champenoux. Annales des sciences forestières, 30(3): 307-328.

Spina P, et Pennisi F., 1957. La culture du pistachier en Sicile. Riv. Ortoflorofrutticult. Ital. 19: 533-557.

Yano H., Kajita H., et Minato K., 1994. Chemical treatment of wood for musical instruments. Journal of the acoustical society of america, 96(6): 3380-3391p.

Yano H., Kyou K., Furuta Y., et Kajita H., 1995. Acoustic properties of Brazilian rosewood used for guitar back plate (in Japanese). *Mokuzai Gakkaishi*, 41(1), 17-24.

Zobel B.J., et Van Buijtenen J.P., 1989. Wood variation. Its causes and control. Springer Series in wood science. Springer Verlag, Berlin, Germany. 355-363p.

Tableau I. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation entre la densité et les propriétés physico-mécaniques (module de Young, module spécifique et coefficient d'amortissement) pour l'ensemble des échantillons, ainsi que pour les trois types de bois de *Pistacia atlantica*, selon chaque provenance

Propriétés			**Densité (ρ en rho)**	**Module de Young (E_L en GPa)**				**Module spécifique (E_L/ρ en GPa)**				**Coefficient d'amortissement (tanδ)**			
Indicateurs statistiques			Moyenne et écart-type ρ	Moyenne et écart-type EL	Coefficient de corrélation de la densité avec EL	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)	Moyenne EL/ρ	Coefficient de corrélation de la densité avec EL/ρ	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)	Moyenne de tanδ	Coefficient de corrélation de la densité avec tanδ	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)
Ensemble des échantillons			0,953 ±0,160	9,834 ±1,954	0,454	0,037	0,588	10,424 ±1,959	-0,327	-0,027	1,231	0,013 ±0,002	0,137	9,424	0,829
Provenance		**S**	1,018 ±0,142	10,748 ±1,244	0,098	0,011	0,897	10,740 ±1,802	-0,745	-0,059	1,650	0,013 ±0,002	0,217	12,584	0,852
		T	0,881 ±0,149	8,818 ±2,113	0,449	0,032	0,602	10,074 ±2,098	-0,184	-0,013	1,012	0,013 ±0,002	0,049	3,268	0,838
Type de bois pour l'ensemble des échantillons		**A**	0,854 ±0,083	9,661 ±2,072	0,794	0,032	0,548	11,222 ±1,746	0,543	0,026	0,566	0,013 ±0,002	0,044	1,598	0,834
		D	1,151 ±0,059	10,180 ±1,695	0,532	0,019	0,962	8,829 ±1,284	0,265	0,012	1,044	0,014 ±0,002	-0,247	-6,059	1,234
		Mix	1,007 ±0,135	9,789 ±1,894	0,442	0,032	0,698	9,783 ±1,752	-0,297	-0,023	1,232	0,014 ±0,003	-0,341	-17,88	1,254
Type de bois par provenance	**S**	**A**	0,904 ±0,047	10,808 ±0,953	0,281	0,014	0,754	11,964 ±1,068	-0,286	-0,013	1,056	0,013 ±0,002	0,408	8,347	0,798
		D	1,166 ±0,062	10,670 ±1,587	0,482	0,019	0,966	9,139 ±1,196	0,158	0,008	1,092	0,014 ±0,003	-0,258	-6,160	1,251
		Mix	1,097 ±0,106	11,378 1,369	0,281	0,021	0,849	10,425 ±1,427	-0,480	-0,035	1,469	0,013 ±0,002	-0,770	-35,83	1,551
	T	**A**	0,813 ±0,083	8,732 ±2,278	0,804	0,029	0,557	10,621 ±1,970	0,604	0,025	0,542	0,013 ±0,002	-0,068	-2,453	0,845
		D	1,117 ±0,037	9,119 ±1,524	0,277	0,007	1,056	8,158 ±1,308	0,096	0,003	1,095	0,014 ±0,002	-0,453	-7,795	1,223
		Mix	0,940 ±0,118	8,597 ±1,242	-0,226	-0,021	1,124	9,301 ±1,905	-0,740	-0,046	1,365	0,015 ±0,003	0,215	9,772	0,797

Tableau II. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation entre la densité et les propriétés physico-mécaniques (module de Young, module spécifique et coefficient d'amortissement) des trois types de bois de *Pistacia atlantica*, par arbre et provenance

Propriétés			Densité (ρ en rho	Module de Young (E_L en GPa)				Module spécifique (E_L/ρ en GPa)				Coefficient d'amortissement (tanδ)			
Indicateurs statistiques			Moyenne et écart-type ρ	Moyenne et écart-type E_L	Coefficient de corrélation de la densité avec E_L	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)	Moyenne et écart-type E_L/ρ	Coefficient de corrélation de la densité avec E_L/ρ	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)	Moyenne e écart-type de tanδ	Coefficient de corrélation de la densité avec tanδ	Pente (a) de la droite de régression (y=ax+b)	Constante (b) de la droite de régression (y=ax+b)
A	**S**	**S1**	0,947 ±0,019	10,660 ±0,571	0,158	0,005	0,892	11,253 ±0,609	-0,210	-0,006	1,020	0,0139 ±0,0028	0,575	3,815	0,894
		S2	0,852 ±0,034	9,908 ±0,950	0,904	0,033	0,528	11,616 ±0,710	0,757	0,037	0,426	0,0118 ±0,0020	-0,560	-9,836	0,968
		S3	0,889 ±0,031	11,581 ±0,762	0,245	0,010	0,774	13,026 ±0,863	-0,272	-0,010	1,017	0,0120 ±0,0014	0,118	2,589	0,858
	T	**T1**	0,726 ±0,074	6,716 ±0,766	0,692	0,067	0,276	9,263 ±0,785	-0,265	-0,025	0,959	0,0127 ±0,0026	-0,270	-7,580	0,823
		T2	0,881 ±0,026	11,002 ±1,160	0,430	0,010	0,773	12,490 ±1,204	0,161	0,004	0,836	0,0126 ±0,0009	0,703	20,038	0,627
		T3	0,811 ±0,064	7,866 ±1,851	0,664	0,023	0,630	9,649 ±1,769	0,428	0,015	0,661	0,0134 ±0,0032	-0,064	-1,289	0,828
D	**S**	**S1**	1,173 ±0,021	9,539 ±0,811	1,000	0,025	0,931	8,126 ±0,549	1,000	0,037	0,869	0,0136 ±0,0016	-1,000	-12,770	1,346
		S2	1,130 ±0,051	10,678 ±1,502	0,795	0,027	0,843	9,421 ±1,041	0,623	0,030	0,844	0,0134 ±0,0030	-0,553	-9,435	1,257
		S3	1,226 ±0,047	11,222 ±2,019	0,253	0,006	1,160	9,151 ±1,607	0,057	0,002	1,211	0,0144 ±0,0027	-0,523	-8,999	1,356
	T	**T1**	1,108 ±0,050	9,368 ±1,092	1,000	0,016	0,957	8,400 ±1,412	1,000	0,021	0,934	0,0136 ±0,0026	-1,000	-18,831	1,363
		T2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		T3	1,122 ±0,037	8,995 ±0,787	-0,781	-0,037	1,455	8,037 ±0,923	-0,874	-0,035	1,405	0,0135 ±0,0023	-0,188	-3,002	1,162
Mix	**S**	**S1**	1,146 ±0,108	11,278 ±1,762	0,981	0,060	0,465	9,803 ±0,660	0,915	0,150	-0,326	0,0127 ±0,0031	-0,891	-31,51	1,547
		S2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		S3	0,995 ±0,035	12,035 ±1,109	-	-	-	12,088 ±0,694	-	-	-	0,0137 ±0,0002	-	-	-
	T	**T1**	0,895 ±0,126	8,394 ±1,635	-0,376	-0,029	1,138	9,577 ±1,507	-0,737	-0,037	1,251	0,0158 ±0,0028	0,332	14,99	0,656
		T2	0,948 ±0,089	9,166 ±0,646	0,788	0,109	-0,056	9,691 ±0,548	-0,640	-0,105	1,964	0,0126 ±0,0010	0,527	48,965	0,333
		T3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau III. Moyennes et écart-types des propriétés physico-mécaniques mesurées sur 72 éprouvettes prélevées aux deux rayons de la rondelle 4 de trois arbres de *Pistacia atlantica*, issus de deux provenances, et résultats de l'ANOVA au seuil de 5%

Indicateurs statistiques	Types du bois	Provenances								Effet provenance (P=)
		Sidi Bel Abbès				Tiaret				
		Arbres			Effet arbre (P=)	Arbres			Effet arbre (P=)	
		S_1	S_2	S_3		T_1	T_2	T_3		
Module de Young (GPa)	Aubier (A)	10,6596 ±0,5709	9,9082 ±0,9498	11,5808 ±0,7620	**0,010317 ****	6,7161 ±0,7657	11,0019 ±0,1603	7,8661 ±1,8509	**0,32. 10^{-4} *****	**0,11.10^{-7} *****
	Duramen (D)	9,5388 ±0,8107	10,6779 ±1,5020	11,2217 ±2,0194	0,512749 NS	9,3678 ±3,0920	-	8,9946 ±0,7872	0,512749 NS	0,324471 NS
	Bois mixte (Mix)	11,2785 ±1,7621	-	12,0348 ±1,1092	0,707904 NS	8,3940 ±1,6353	9,1660 ±0,6459	-	0,610332 NS	0,082315 NS
	Effet type (p=)	**0,166.10^{-10} *****				**0,881 NS**				**0,5434.10^{-5} *****
Module spécifique (GPa)	Aubier (A)	11,2533 ±0,6093	11,6159 0,7097	13,0262 ±0,8631	**0,19.10^{-2} ****	9,2632 ±0,7846	12,4898 ±1,2036	9,6495 ±1,7695	**0,34. 10^{-3} *****	**0,15. 10^{-5} *****
	Duramen (D)	8,1265 ±0,5487	9,4212 ±1,0410	9,1513 ±1,6067	0,438386 NS	8,3999 ±2,4125	-	8,0371 ±0,9232	0,438386 NS	0,426786 NS
	Bois mixte (Mix)	9,8031 ±0,6604	-	12,0884 ±0,6947	**0,048563 ***	9,5770 ±2,5075	9,6909 ±0,5480	-	0,514447 NS	0,299629 NS
	Effet type (p=)	**0,107.10^{-5} *****				**0,0177 *****				**0,8537.10^{-5} *****
Coefficient d'amortissement (tanδ)	Aubier (A)	0,0139 ±0,0028	0,0118 ±0,0020	0,0120 ±0,0014	0,220333 NS	0,0127 ±0,0026	0,0126 ±0,0009	0,0134 ±0,0032	0,77825 NS	0,599 NS
	Duramen (D)	0,0136 ±0,0016	0,0134 ±0,0030	0,0144 ±0,0027	0,438386 NS	0,0136 ±0,0026	-	0,0135 ±0,0023	0,847902 NS	0,981263 NS
	Bois mixte (Mix)	0,0127 ±0,0031	-	0,0137 ±0,0002	0,626379 NS	0,0158 ±0,0028	0,0126 ±0,0010	-	0,214211 NS	0,280894 NS
	Effet type (p=)	**0,4678 NS**				**0,21 NS**				**0,4088 NS**

Légende :
NS : Non significatif
*****,**, * : Niveau de signification selon l'ANOVA** *(**** = très significatif, ** = significatif, * = faiblement significatif)

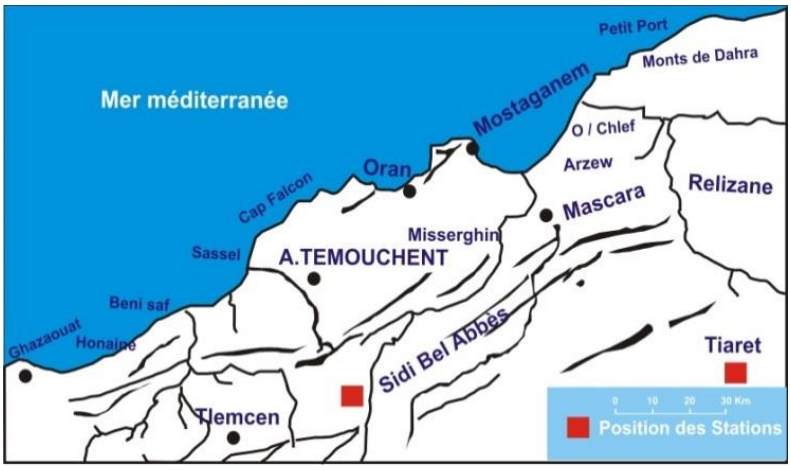


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage de *Pistacia atlantica* Desf. dans le nord-ouest de l'Algérie : Sidi Bel-Abbès (climat semi-aride méditerranéen) et Tiaret (zone de transition à influence saharienne aride)

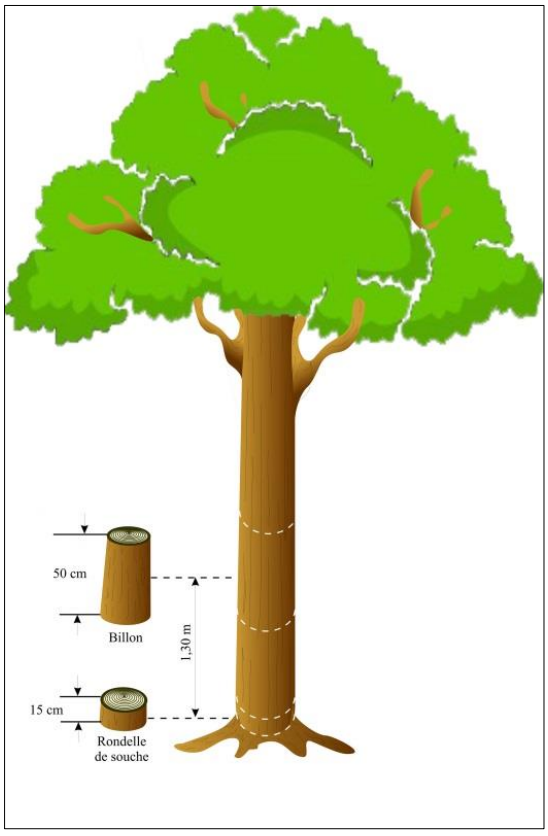


Figure 2. Billon et rondelle de souche prélevés sur *Pistacia atlantica*.

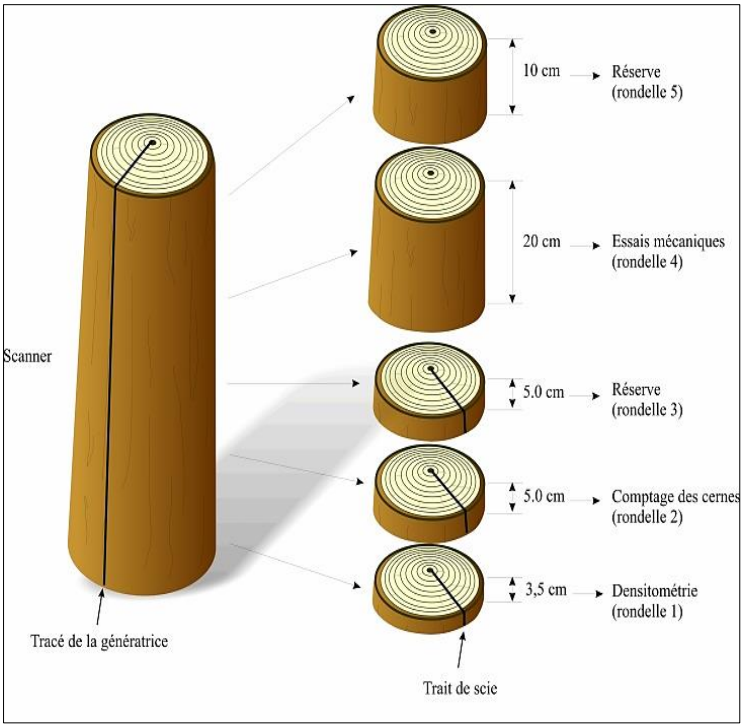


Figure 3. Découpe d'un billon de pistachier en cinq rondelles

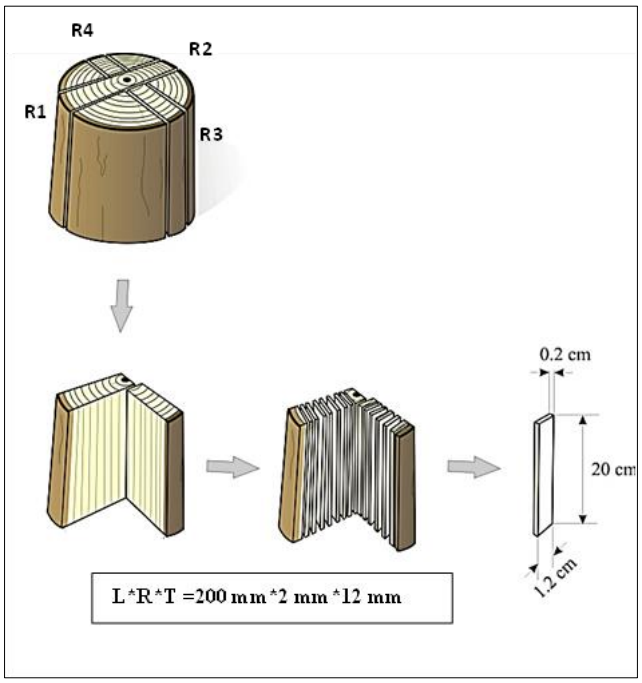


Figure 4. Découpe de la rondelle de bois n°4 en éprouvettes pour les essais mécaniques selon quatre rayons repérés

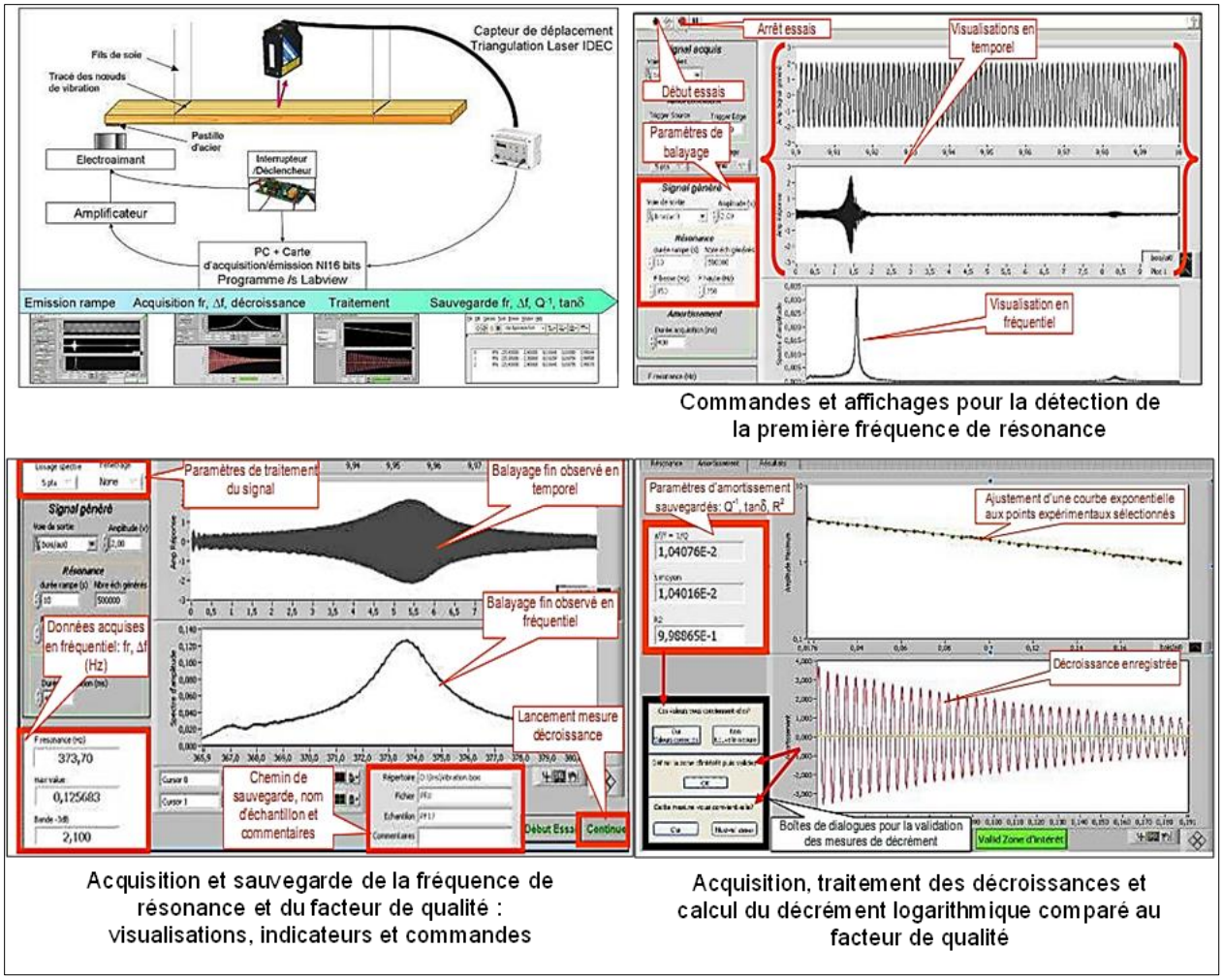


Figure 5. Dispositif expérimental de vibration forcée sans contact (Brémaud, 2006)

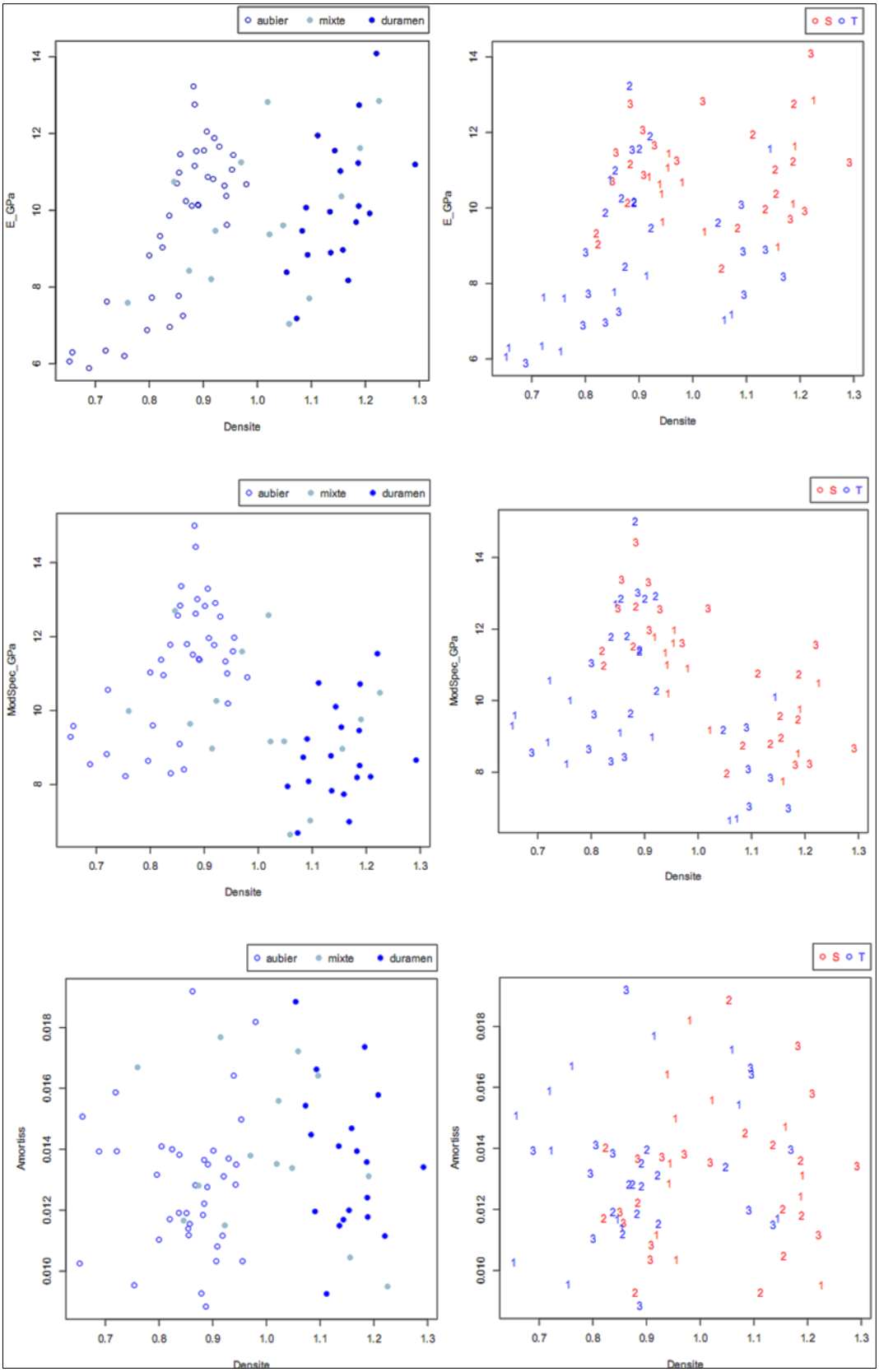


Figure 6. Relations entre la densité et les propriétés mécaniques des trois types de bois (aubier, duramen et bois mixte) provenant de trois arbres (numérotés 1 à 3) issus de deux provenances (S : Sidi Bel Abbès et T : Tiaret)



Photo 1. Billon issu d'un pistachier de l'Atlas après découpe

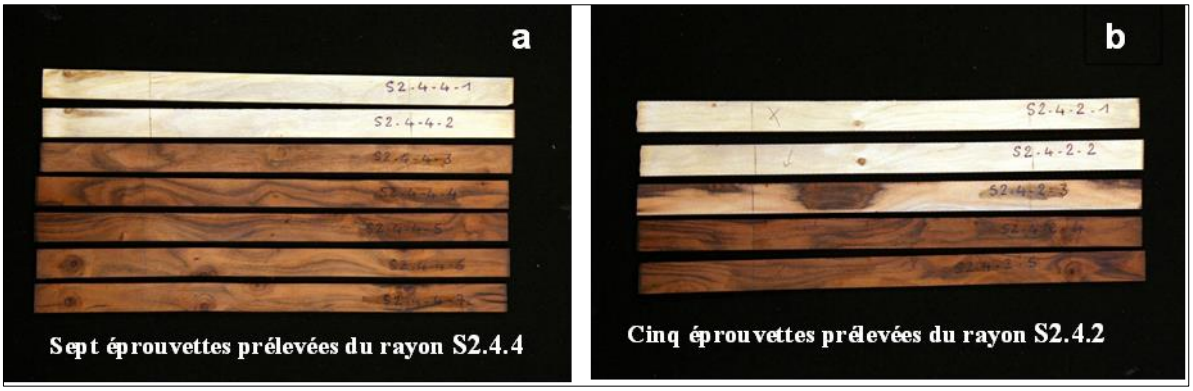


Photo 2. Douze éprouvettes de bois du pistachier prélevées dans l'aubier, le duramen et le bois mixte sur deux rayons de la rondelle n°4

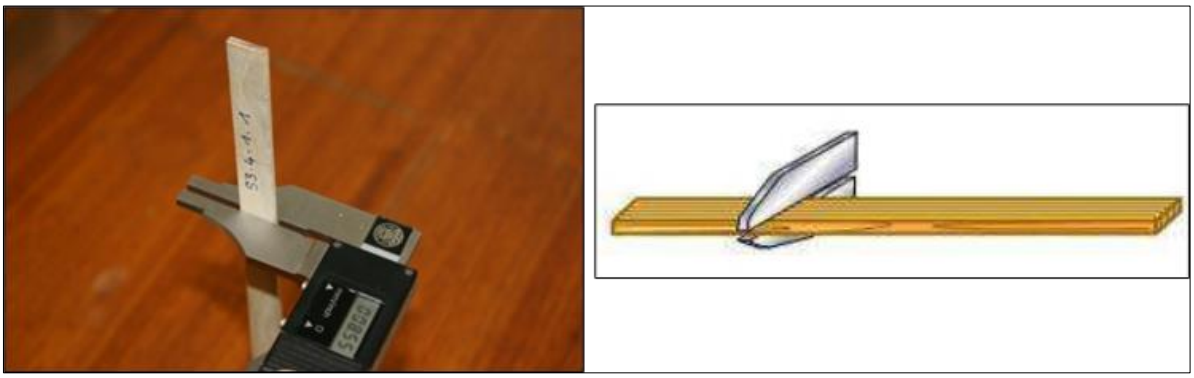


Photo 3. Éprouvette de bois placée entre les mâchoires d'un pied à coulisse