Variabilité microdensitométrique du bois de *Pistacia atlantica* en fonction de la provenance et de l'âge en Algérie nord-occidentale

Densité du bois de *Pistacia atlantica* en Algérie

Mots-clés

Algérie nord-occidentale, âge des arbres, croissance radiale, densité du bois, largeur des cernes, microdensitométrie, *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

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-Abbès (Algérie)
E-mail : ecoreve@yahoo.fr

Fatima Zohra Bendimered-Mouri
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-Abbès (Algérie)
E-mail : fzrmouri@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)
meriem.fournier@agroparistech.fr

Résumé

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.), espèce ligneuse emblématique des zones arides d'Afrique du Nord, reste peu documenté quant à ses propriétés physiques, en particulier la densité du bois. Cette étude vise à caractériser la variabilité microdensitométrique du bois de cette espèce en fonction de la provenance et de l'âge cambial, dans deux régions bioclimatiques contrastées du nord-ouest algérien : Sidi Bel-Abbès et Tiaret. Six arbres ont été analysés par radiographie X haute résolution afin d'estimer la densité moyenne (DMoy), les densités maximale (DMax) et minimale (DMin), ainsi que la largeur des cernes (LC). Les résultats révèlent une variabilité significative de ces paramètres selon la provenance, l'âge cambial et la dynamique de croissance. À Sidi Bel-Abbès, les corrélations positives entre densité et largeur des cernes traduisent une croissance stable, probablement favorisée par un contexte écologique plus homogène. À l'inverse, à Tiaret, les relations sont plus faibles, voire inversées, suggérant une influence marquée des stress environnementaux. Une diminution progressive de la densité moyenne avec l'âge cambial a été observée dans les deux sites, reflétant des modifications anatomiques liées à la maturation du bois. L'effet de la provenance s'est révélé significatif, tandis que celui de l'individu est resté généralement non significatif, sauf cas particuliers à Tiaret. Ces résultats confirment l'influence déterminante des facteurs écologiques sur la croissance radiale et la structure du bois de *Pistacia atlantica*. L'analyse microdensitométrique s'impose ainsi comme un outil pertinent pour évaluer la qualité technologique du bois et la plasticité adaptative des essences ligneuses, dans une perspective de sélection, de valorisation et de gestion durable, notamment en contexte de changement climatique.

Introduction

Le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) est une espèce ligneuse caractéristique des zones arides et semi-arides d'Afrique du Nord. Apprécié pour sa longévité et sa résilience, il joue un rôle écologique majeur dans la stabilisation des sols, la préservation de la biodiversité et la lutte contre la désertification (Boudy, 1955). Malgré sa capacité d'adaptation à des faibles précipitations (150-250 mm/an), cette espèce présente une croissance lente et une régénération naturelle souvent déficiente, ce qui limite son exploitation et sa valorisation à grande échelle.

Si l'intérêt écologique de *Pistacia atlantica* est bien établi, ses propriétés physiques, notamment celles liées à la densité du bois et à la dynamique de croissance radiale, restent encore peu étudiées. Quelques travaux récents (Ifticene-Habani *et al*., 2016, 2018 ; Boudouaya *et al*., en cours de soumission) ont amorcé cette exploration, mais la variabilité des caractères du bois en fonction de l'âge cambial et des conditions environnementales demeure à approfondir, en particulier dans un contexte de changement climatique.

La densité du bois constitue un critère fondamental de qualité, directement influencé par l'âge, la provenance et les facteurs écologiques (Polge, 1992). L'analyse microdensitométrique, fondée sur l'absorption différentielle des rayons X, permet d'évaluer avec précision les variations intra-cerne et d'établir des relations avec les structures anatomiques du bois. Parallèlement, la largeur des cernes (LC), indicateur de la vitesse de croissance, est corrélée à la densité et à la qualité mécanique du bois (Nepveu, 1994).

L'étude de la variabilité microdensitométrique peut ainsi être menée à plusieurs échelles (intra-arbre, inter-individuelle, inter-provenance) pour mieux comprendre les réponses de l'arbre aux contraintes biotiques et abiotiques (Dedeckel, 1994 ; Bergès, 1998). Comme le suggèrent Polge (1978) et Nepveu (1998), l'association entre bois

dense et cernes larges pourrait constituer un critère pertinent pour la sélection d'individus à haut potentiel technologique et écologique.

Dans ce contexte, la présente étude vise à analyser les propriétés microdensitométriques du bois de *Pistacia atlantica* en fonction de l'âge cambial et de la provenance, à travers deux régions bioclimatiques contrastées du nord-ouest algérien : Sidi Bel-Abbès et Tiaret. Les objectifs sont les suivants :

- Évaluer l'effet de l'âge cambial sur la densité du bois et la largeur des cernes,
- Comparer les réponses densitométriques selon la provenance,
- Identifier les corrélations entre largeur des cernes et densité du bois, en tant qu'indicateurs potentiels de plasticité adaptive.

Nous faisons l'hypothèse que les composantes densitométriques (DMoy, DMax, DMin) varient en fonction de la croissance radiale et traduisent des stratégies adaptatives différenciées selon la provenance et les conditions environnementales locales.

Matériel et méthodes

1. Site d'étude et matériel végétal

L'étude a été menée dans deux régions bioclimatiques contrastées du nord-ouest algérien : Sidi Bel-Abbès (climat méditerranéen semi-aride) et Tiaret (zone de transition à influence saharienne aride). Trois arbres adultes de *Pistacia atlantica* ont été sélectionnés dans chaque région, soit un total de six individus.

La sélection s'est fondée sur des critères morphologiques stricts : arbres non fourchus, au port équilibré, exempts de défauts visibles et représentatifs de la structure locale. Les arbres provenaient de placettes d'un hectare, identifiées et géoréférencées, sur lesquelles des mesures dendrométriques de base (hauteur totale, diamètre à 1,30 m) ont été effectuées (Boudouaya *et al*., 2015, 2016) (figure 1).

2. Échantillonnage et préparation 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). Chaque billon a été codifié selon sa provenance : (S pour le site de Sidi Bel-Abbès, T pour le site de 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 : conservation,
- Rondelle n°4 (20 cm) : essais mécaniques et colorimétriques.

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

3. Préparation des barreaux et barrettes

Les rondelles n°1 ont été exclusivement destinées aux analyses microdensitométriques. À partir de chaque rondelle, quatre barreaux radiaux ont été découpés selon des axes rigoureusement définis, de manière à couvrir l'ensemble des principales directions radiales (rayons R1 à R4). Chaque barreau traverse la moelle jusqu'à l'écorce et se termine par une extrémité effilée (figure 4) :

- Rayon 1 : segment moelle-écorce selon le plus grand axe radial,
- Rayon 2 : diamétralement opposé au rayon 1,
- Rayon 3 : perpendiculaire au rayon 2, dans le sens horaire,
- Rayon 4 : opposé au rayon 3.

Les barreaux ainsi obtenus ont été conditionnés à une humidité relative de 12 %, puis débités en barrettes de 2 mm d'épaisseur (tolérance ±0,01 mm) selon un protocole en deux étapes :

- une première découpe longitudinale selon le plan orthotropique du bois (L∗R) (figure 5, photo 1) ;
- suivie d'une découpe transversale à l'aide de scies fraise jumelées, garantissant la parfaite parallélité des faces (figure 6, photo 2).

Les barrettes obtenues ont été étiquetées selon l'arbre, la rondelle et le rayon d'origine (ex. : T3.1.4 correspond à l'arbre T3, rondelle 1, rayon 4). Au total, 24 barrettes (4 barrettes x 6 arbres) ont été préparées pour les analyses microdensitométriques.

4. Analyse microdensitométrique

4.1. Acquisition des radiographies

Les barrettes ont été fixées sur un support standard, accompagnées d'un étalon en acétate de cellulose à trois niveaux d'épaisseur, puis exposées aux rayons X selon le protocole défini par Gelhaye et Mothe (2006). Les paramètres d'exposition étaient de 130 kV, 45 kV, 300 µA avec un détecteur numérique de type "Digisens" (photo 3).

4.2. Traitement des images

Les radiographies ont été traitées à l'aide d'une série de logiciels développés au LERFoB (INRA, Nancy) (Mothe *et al*., (1998) :

- **Image J :** homogénéisation et calibrage spatial des images à l'aide de l'étalon (photo 4).
- **CRAD (Calibrage-RAdiographie-Densité) :** identification des barrettes et conversion des niveaux de gris en valeurs de densité (photo 5).
- **CERD (CERne-Densité) :** détection semi-automatique des cernes et correction manuelle des erreurs éventuelles (photo 6).

– **CESD (CErne Synthétique en Densité) :** extraction des paramètres densitométriques synthétiques.

4.3. Paramètres analysés

Cinq paramètres microdensitométriques ont été retenus pour cette étude :

- Densité moyenne des cernes (DMoy),
- Densité maximale et minimale (DMax, DMin),
- Densité des 5 % extrêmes (DMax-5, DMin-5),
- Largeur moyenne des cernes (LC),
- Année de formation du cerne (An),

Chaque observation a été codifiée de manière unique afin d'assurer la traçabilité des mesures.

Résultats

1. Variabilité des paramètres microdensitométriques en fonction de la largeur des cernes (LC)

L'analyse des rayons radiaux des six arbres met en évidence une forte variabilité des composantes densitométriques - densité moyenne (DMoy), densité maximale (DMax) et densité minimale (DMin) - en fonction de la largeur des cernes (LC) et ce, selon la provenance (figures 7, 8 et 9).

Deux groupes de densité distincts ont été identifiés : un premier, à faible densité, correspondant à l'aubier, et un second, plus dense, associé au duramen. À Sidi Bel-Abbès, les densités augmentent rapidement pour des cernes étroits à modérément larges (environ 1 à 1,5 mm), avant de se stabiliser. À Tiaret, l'évolution est plus progressive et irrégulière, traduisant une dynamique de croissance moins homogène.

2. Corrélations entre la densité moyenne (DMoy) et la largeur des cernes (LC)

Les corrélations entre la densité moyenne (DMoy) et la largeur des cernes (LC) varient sensiblement selon les individus et les provenances (tableau I). À Sidi Bel-Abbès, elles sont globalement positives et significatives, en particulier chez l'arbre S2 où elles dépassent r = 0,60 sur l'ensemble des rayons (seuil de 1‰), tandis que les arbres S1 et S3 présentent également des corrélations significatives mais plus variables. En revanche, à Tiaret, les corrélations sont plus hétérogènes : l'arbre T2 affiche des relations négatives significatives sur deux rayons (r ≈ -0,43), et seul l'arbre T3 montre une corrélation positive marquée sur le rayon R3 (r = 0,62, seuil de 1‰).

Ces résultats suggèrent une relation plus cohérente entre la croissance radiale et la densité à Sidi Bel-Abbès, tandis qu'à Tiaret, cette relation apparaît plus aléatoire et dépendante des conditions individuelles.

3. Corrélations entre les densités maximale et minimale et la largeur des cernes

Les corrélations entre la largeur des cernes (LC) et les densités maximales (DMax) et minimales (DMin) (tableaux II et III) révèlent des tendances contrastées selon la provenance. À Sidi Bel-Abbès, ces corrélations sont majoritairement positives et significatives, notamment chez l'arbre S2 où tous les rayons présentent des valeurs supérieures à r = 0,65, tandis que les arbres S1 et S3 affichent également des relations significatives mais plus variables selon les composantes densitométriques et les rayons. En revanche, à Tiaret, les corrélations sont plus dispersées et parfois inverses : l'arbre T1 montre des relations opposées selon les directions radiales, et l'arbre T2 se caractérise par plusieurs corrélations négatives significatives, notamment entre LC et DMin. Seul l'arbre T3 se distingue par une forte corrélation positive entre LC et DMax sur le rayon R3 (r = 0,74). Ces résultats confirment une meilleure cohérence entre largeur des cernes et les paramètres de densité à Sidi Bel-Abbès, en contraste avec l'insatiabilité observée à Tiaret.

4. Évolution de la densité moyenne (DMoy) avec l'âge cambial

La figure 10 met en évidence une tendance générale à la diminution progressive de la densité moyenne avec l'âge cambial, aussi bien dans le duramen que dans l'aubier. Cette baisse, régulière chez les arbres de Sidi Bel-Abbès (corrélations allant jusqu'à -0,92 ; tableau IV), est légèrement atténuée à Tiaret. Une exception est toutefois observée chez l'arbre T3, où une légère augmentation de densité avec l'âge est notée.

5. Corrélations entre la densité moyenne (DMoy) et l'âge

Les corrélations entre la DMoy et l'âge cambial sont systématiquement négatives et significatives au seuil de 1 ‰ pour l'ensemble des arbres et des rayons (tableau IV), confirmant une diminution régulière de la densité au fil du temps. Les coefficients les plus élevés sont observés à Sidi Bel-Abbès (jusqu'à r = -0,92), reflétant une modification progressive de la structure du bois liée au vieillissement cambial.

6. Évolution de la largeur des cernes (LC) avec l'âge

La figure 11 révèle une variabilité interindividuelle de LC en fonction de l'âge cambial. Les arbres S2 et S3 présentent une diminution progressive de LC, traduisant un ralentissement de l'activité cambiale avec l'âge. En revanche, les autres arbres, notamment ceux de Tiaret, montrent des fluctuations plus erratiques, probablement influencées par les aléas climatiques annuels.

7. Effets de la provenance et de l'arbre sur la densité moyenne

Les analyses statistiques présentées dans le tableau V indiquent un effet significatif de la provenance sur la densité moyenne du bois ($p < 0,05$), à l'exception du rayon R2 pour lequel l'effet n'est pas significatif. Cependant, l'effet de l'individu (arbre) semble globalement non significatif dans la majorité des cas, sauf pour les rayons R1 et R4 à Tiaret, suggérant une variabilité intra-provenance plus marquée dans les environnements écologiquement contraignants.

Discussion

Les résultats indiquent une diminution progressive de la largeur des cernes (LC) avec l'augmentation de l'âge cambial, traduisant une réduction de l'activité du cambium au cours du temps. Ce schéma, caractérisé par une croissance juvénile rapide suivie d'un ralentissement, est conforme aux observations de Bisset *et al*., (1951) et d' Olesen (1982), qui associent ce déclin à la baisse de l'activité méristématique et à une densité maximale (DMax) élevée durant les premières années. Cette tendance est particulièrement marquée chez les arbres S2 et S3. Toutefois, la variabilité interindividuelle observée, plus prononcée à Tiaret, souligne l'effet combiné des conditions écologiques locales et des contraintes climatiques. De telles différences intra-provenance ont également été rapportées par Nepveu (1982, 1987), qui attribue la variabilité de la croissance radiale à la génétique de l'espèce, aux caractéristiques stationnelles, à la fertilité des sols et aux pratiques sylvicoles. Par ailleurs, Dilem (1992) et Bakour (2003) insistent sur l'impact des fluctuations climatiques interannuelles sur cette dynamique. La comparaison inter-provenances révèle une croissance plus stable à Sidi Bel-Abbès, probablement en lien avec une relative constance climatique. À l'inverse, la croissance plus erratique observée à Tiaret traduit une plus grande sensibilité aux stress environnementaux. Ces résultats corroborent les travaux de Fritts (1976) et Zhang *et al*. (2011), qui soulignent le rôle déterminant de la disponibilité en eau et de la température dans le contrôle de la croissance radiale et de la structure anatomique du bois.

L'analyse conjointe des paramètres microdensitométriques (DMoy, DMax, DMin) en fonction de la largeur des cernes (LC) révèle des interactions contrastées selon la provenance. À Sidi Bel-Abbès, les corrélations généralement positives suggèrent une croissance harmonieuse et équilibrée, probablement favorisée par des conditions édapho-climatiques favorables. Ce comportement peut s'expliquer par une proportion relativement constante de bois final, même dans les cernes larges,

phénomène typique des feuillus à porosité initiale (Zobel et van Buijtenen, 1989 ; Bakour, 2003). L'influence du contexte écologique sur les relations entre croissance radiale et densité est également rapportée par Bernhard (1964) et de Zhang *et al*. (2011). En revanche, à Tiaret, les corrélations apparaissent plus faibles, variables, voire négatives, reflétant une croissance perturbée par des stress hydriques récurrents et des contraintes édaphiques marquées. Dans ce type d'environnement instable, la relation entre croissance et densité peut être altérée ou inversée (Rozenberg et Cahalan, 1997 ; Wimmer, 2002). La diminution de la proportion de bois final dans les cernes larges pourrait aussi expliquer la baisse de densité observée à Tiaret (Bernhard, 1964).

Du point de vue anatomique, plusieurs études montrent que les cernes étroits présentent généralement une densité plus élevée, en raison d'une proportion accrue de bois tardif, intrinsèquement plus dense (Zobel et van Buijtenen, 1989). Nos résultats confirment cette tendance, avec des DMax plus élevées dans les cernes étroits, tandis que DMin diminue dans les cernes larges, traduisant la prédominance du bois initial, moins dense. Par ailleurs, à Sidi Bel-Abbès, une diminution notable de la densité moyenne est observée avec l'élargissement des cernes, en accord avec les travaux de Bouriaud *et al*. (2005) sur les essences à croissance zonée. Cette baisse pourrait résulter d'une augmentation de la proportion de fibres à parois fines dans les cernes larges. À l'opposé, cette relation apparaît plus instable à Tiaret, vraisemblablement en raison d'une dynamique de croissance altérée par les contraintes climatiques.

Ces résultats soulignent la pertinence des paramètres microdensitométriques comme indicateurs sensibles des réponses adaptatives de l'arbre, intégrant à la fois les dimensions environnementales et anatomiques de la croissance.

La diminution progressive de la DMoy avec l'âge cambial observée dans les deux provenances est cohérente avec les données de la littérature (Huber, 1991 ; Zobel et Sprague, 1998 ; Lachenbruch *et al*. 2011). Ce phénomène est généralement

attribué à la transition entre bois juvénile dense et bois mature moins compact, associée à l'élargissement des trachéides, à l'amincissement de leurs parois (Zhang *et al*.1996) et à la baisse relative des tissus denses (fibres et rayons ligneux) (Bergès, 1998 ; Bergès *et al*., 2000 ; Guilley, 2000). L'importance des corrélations négatives observées, notamment à Sidi Bel-Abbès, traduit une évolution anatomique marquée avec l'âge. Toutefois, l'augmentation atypique de DMoy chez T3 pourrait refléter une réponse individuelle particulière à des facteurs microclimatiques ou génétiques (Cown, 1992 ; Chave *et al*., 2009).

L'effet significatif de la provenance sur la densité moyenne confirme l'importance des conditions environnementales dans la formation du bois chez *Pistacia atlantica*. À Sidi Bel-Abbès, les relations entre LC et DMoy sont plus stables et cohérentes, tandis qu'à Tiaret, les réponses sont plus contrastées. Ces résultats rejoignent ceux de Rozenberg et Cahalan (1997) et de Wimmer (2002), qui insistent sur l'impact des contraintes climatiques et pédologiques sur la structure anatomique du bois. L'effet de l'arbre individuel, en général non significatif, suggère une variabilité intra-provenance limitée, sauf dans quelques cas à Tiaret, où des conditions plus stressantes pourraient accentuer les différences individuelles. La provenance se confirma ainsi comme le facteur majeur expliquant la variabilité densitométrique.

Les paramètres microdensitométriques (DMoy, DMax, DMin), associés à la largeur des cernes (LC), se révèlent être des indicateurs fiables de la plasticité adaptative des arbres face aux contraintes environnementales. Leur variabilité reflète des réponses physiologiques différenciées selon les contextes écologiques locaux. À Sidi Bel-Abbès, les corrélations généralement positives entre croissance radiale et densité suggèrent des conditions de croissance relativement stables, favorisant une production ligneuse régulière. Ce constat rejoint les observations de De Kort *et a*l. (1991), qui associent la formation des cernes étroits à forte DMax à une croissance homogène, ainsi que celles de Polge (1978), pour qui la combinaison entre largeur des

cernes et densité élevée constitue un critère de sélection pertinent pour la qualité du bois. À l'inverse, les corrélations plus faibles, voire négatives, observées à Tiaret traduisent des perturbations de la croissance liées à de stress hydriques et édaphiques récurrents. Ces contraintes limitent l'initiation et le développement du bois final, induisant une diminution de la densité ligneuse (Fritts, 1976 ; Bouriaud *et al*., 2005 ; Drew *et al*., 2009). L'analyse conjointe des paramètres LC, DMoy, DMax et DMin permet ainsi d'évaluer la sensibilité écologique de l'espèce étudiée et son aptitude à s'adapter à des environnements variables. Ces variables pourraient être intégrées dans des programmes de sélection génétique visant à identifier les génotypes à forte résilience adaptative, notamment dans la perspective d'un renforcement des capacités d'adaptation au changement climatique.

Conclusion

Cette étude met en évidence une variabilité marquée des paramètres microdensitométriques du bois de *Pistacia atlantica,* en lien avec la provenance, l'âge cambial et la dynamique de la croissance radiale. Les résultats indiquent une diminution progressive de la densité moyenne du bois avec l'âge, traduisant des modifications anatomiques liées à la maturation du cambium.

La largeur des cernes, ainsi que sa relation avec la densité, apparaissent comme un indicateur sensible de la stabilité ou des perturbations de la croissance, sous l'influence des conditions édapho-climatiques. À Sidi Bel-Abbès, des corrélations positives et stables entre largeur des cernes et densité témoignent d'une croissance harmonieuse sous des conditions relativement favorables. En revanche, à Tiaret, les relations plus hétérogènes, voire inversées, suggèrent une croissance altérée par des contraintes hydriques et édaphiques plus marquées. L'effet de la provenance se révèle donc prépondérant, tandis que la variabilité individuelle reste secondaire, sauf en situation de stress.

L'approche microdensitométrique s'est avérée particulièrement efficace pour caractériser la qualité du bois et évaluer la plasticité adaptative de l'espèce. Elle offre des perspectives concrètes pour la sélection de génotypes tolérants aux conditions arides, en appui aux stratégies de reboisement, de conservation et de valorisation durable de *Pistacia atlantica*, dans un contexte de changement climatique.

Remerciements

Nous remercions particulièrement M^me^ Meriem FOURNIER, M. Frédéric MOTHE, M^elle^ Charline FREYBURGER, M. Pierre GELHAYE, M. Alain MERCANTI, M^elle^ Fleur LONGUETAUD et M^elle^ Nathalie MOREL pour leur encadrement et leur disponibilité, ainsi que l'ensemble de l'équipe pour son accueil et son appui technique.

Sources de financement

Ce travail a été financé par le *Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique* de l'Algérie. Il a été réalisé 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*).

Références bibliographiques

Bakour R., 2003. Influence de l'espèce et de la provenance des deux principaux chênes français (*Quercus robur* L. ; *Quercus petraea* Liebl.) sur la structure anatomique et les propriétés physiques du bois de Merrain, Thèse de doctorat en Sciences Forestières, à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy, 250 p. https://www.theses.fr/2003ENGR0006.

Bergès L., 1998. Variabilité individuelle et collective de la croissance et de la densité du bois de *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. en relation avec les facteurs écologiques. Thèse de docteur en Sciences Forestières, ENGREF Nancy, 347 p. https://www.theses.fr/1998ENGR0043.

Bergès L., Dupouey J-L., Franc A., 2000. Long-term changes in wood density and radial growth of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. in northern France since the middle of the nineteenth century, Trees: Structure and function 14, pp 398-408. https://doi.org/10.1007/s004680000055.

Bernhard A., 1964. Übert die Rohdichte von Fichtenholz. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 22(6): 215-228. https://doi.org/10.1007/BF02608455.

Bisset I.J.W., Dadswell H.E., et Wardrop A.P., 1951. Factors influencing tracheid length in conifer stems. Journal Australian Forestry, Vol. 15. N° 1: 17-30.

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, 370 p.

Bouriaud O., Leban J.-M., Bert D., et Deleuze C., 2005. Intra-annual variations in climate influence growth and wood density of Norway spruce. Tree physiology, 25 (6) : 651-660. https://doi.org/10.1093/treephys/25.6.651.

Chave J. Coomes D., Jansen S., Lewis S. L., Swenson N. G., et Zanne A. E. 2009. Towards a worldwide wood economics spectrum. *Ecology Letters*, 12(4): 351-366. https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2009.01285.x.

Cown D. J., 1992. Corewood (juvenile wood) in *Pinus radiata* - Should we be concerned? *New Zealand Journal of Forestry Science*, 22(1): 87-95p.

De Kort I. A. T., Baas P., et Richter H. G., 1991. The structure of wood in relation to its mechanical properties. IAWA Bulletin, 12(4): 337-343p.

Dedeckel A., 1994. La densité du bois de Douglas (Pseudotsuga menziesii (MIRB.) Franco) : La variabilité des composantes microdensitométriques et l'effet génétique. DEA Sciences du Bois. INRA Equipe de Recherches sur la Qualité des Bois-ENGREF, Nancy, 49 p. https://hal.inrae.fr/hal-02845791v1.

Dilem A., 1992. Contribution à l'étude du déterminisme de quelques propriétés de base du bois de pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.). Conséquence pour la sélection, la sylviculture et l'évaluation de la qualité de la ressource en Algérie (région de Saïda et de Djelfa). Thèse de doctorat en Sciences du bois, INPL, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy-Champenoux, 12 octobre, 144 p.

Drew D. M., Downes G.M., et Evans R., 2009. Climate impacts on wood properties. Wood Science and Technology, 43(3): 287-301. https://doi.org/10.1007/s00226-008-0222-3.

Fritts H. C. 1976. Tree Rings and Climate. Academic Press. 568p. https://doi.org/10.1002/qj.49710443923.

Gelhaye P. et Mothe F., 2006. Densitométrie : Notices d'utilisation, Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois de l'Équipe Croissance, Production et Qualité des Bois (CPQB), INRA, Mode Opératoire n° : MO-QB124, Version : 0, 21 p.

Guilley E., 2000. La densité du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.). Élaboration d'un modèle pour l'analyse des variabilités intra- et inter-arbre ; Origine et évaluation non destructive de l'effet « arbre » ; Interprétation anatomique du modèle proposé. Thèse de doctorat en Sciences forestières, ENGREF, 206 p. https://hal.inrae.fr/ tel-02839402.

Huber F., 1991. Modélisation de l'infradensité du bois en fonction de la largeur de cerne et de l'âge médullaire chez les chênes indigènes (*Quercus robur* L., *Quercus petraea* Liebl.). Annexe au Compte-rendu final du contrat CEE « Genetics and

Breeding of Oaks », Station de Recherche sur la Qualité des bois, CRF-INRA. Champenoux. 21p.

Ifticene-Habani N., Messaoudène M., 2016. Croissance radiale et sensibilité au climat du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., en Algérie. Bois et Forêts des Tropiques, 329 (3) : 3-15. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_329_3-15.pdf

Ifticene-Habani N., Abdoun F., 2018. Croissance radiale et réponse au climat du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) dans le Parc national de Theniet El Had (Algérie). Bois et forêts des tropiques, 335 (1) : 3-13. http://bft.cirad.fr/cd/BFT_335_3-13.pdf.

Lachenbruch B., Moore J. R., et Evans R., 2011. Radial variation in wood structure and function in Woody Plants, and Hypotheses for Its Occurrence. Springer, Dordrecht, Pays-Bas, pp 121-164. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1242-3_5.

Mothe F., Duchanois G., Zannier B., et Leban J-M., 1998. Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données utilisée à l'INRA-ERQB (programme Cerd). Annales des sciences forestières, 55 (4): 437-449.

Nepveu G., 1982. La variabilité de la qualité du bois : variabilité dans l'arbre, variabilité entre arbre ; ses incidences pour les utilisateurs et les chercheurs. Colloque « Sciences et industries du bois », Grenoble, 20 - 22/ 09, Groupe de travail n° 1 : La matière première, 55-70.

Nepveu G., 1987. Propositions pour l'étude des relations entre stations et qualité du bois. station de recherches sur la qualité des bois, INRA-CRF de Nancy Champenoux, document à distribution limitée, n° 2, 17p.

Nepveu G., 1994. Chapitre IV: Variabilité. Le bois matériau d'ingénierie. Nancy, A.R.BO.LOR : 127- 177 p.

Olesen P.O., 1982. The effect of cyclophysis on tracheid width and basic density in Norway spruce. Forest tree improvement, Vol. 15: 1-80p.

Polge H., 1978. Étude de la qualité du bois de pin pignon. Document à distribution limitée, Station de recherches sur la qualité des bois, CNRF- INRA, Champenoux. N°2 : 10 p.

Polge H., 1992. Le bois de pin d'Alep. Forêt méditerranéenne, t. XIII, n°3, 234-237p.

Rozenberg P., et Cahalan C., 1997. Spruce and wood density: Genetics and siviculture implications. Forest Genetics, 4(2): 85-102p.

Wimmer R., 2002. Wood anatomical features in tree rings as indicators of environmental change. *Dendrochronologia*, 20(1-2): 21-36p.

Zhang S. Y., Chauret G., Ren H.Q., et Desjardins R., 1996. Impact of growth rate on wood density and anatomical structure of black spruce and jack pine. *Wood Science and Technology*, 30(1): 63-79p. https://doi.org/10.1007/BF00225363.

Zhang S. Y., Yu Q., Chauret G., et Koubaa A., 2011. Effects of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology*, 45(1): 1-16p. https://doi.org/10.1007/s00226-010-0318-5.

Zobel B. J., et Sprague J.P., 1998. Juvenile wood in forest trees. Springer-Verlag, Berlin. 300p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-72126-7.

Zobel B. J., et van Buijtenen J.P., 1989. Wood variation: Its causes and control. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 363 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-74069-5.

Tableau I. Corrélations entre la densité moyenne du bois (DMoy) et la largeur des cernes (LC) selon les deux provenances (n = 927 observations)

Provenance	Échantillon	Rayon R1	Rayon R2	Rayon R3	Rayon R4
Sidi Bel-Abbès	S1	-0,05NS	0,61**	0,11NS	0,44*
	S2	0,63***	0,63***	0,61***	0,61***
	S3	0,49***	0,41**	0,29NS	0,58***
Tiaret	T1	0,37NS	-0,35NS	-0,37NS	0,47*
	T2	-0,43*	-0,42*	-0,32NS	-0,34NS
	T3	0,23NS	0,15NS	0,62***	-0,02NS

Les seuils de signification du test statistique adopté sont les suivants :

NS : Non significatif au seuil de 5 %

* : Significatif au seuil de 5 %

** : Significatif au seuil de 1 %

*** : Significatif au seuil de 1 ‰

Tableau II. Corrélations entre les densités extrêmes du bois (maximale et minimale) et la largeur des cernes de croissance (LC) : provenance de Sidi Bel-Abbès (n = 473 observations)

LC (mm)	Composantes	R1	R2	R3	R4
S1	DMax (kg/m³)	0,07NS	0,67***	0,20NS	0,46*
	DMax-5	0,04NS	0,65***	0,17NS	0,43*
	DMin (kg/m³)	-0,10NS	0,58**	0,06NS	0,92***
	DMin-5	-0,08NS	0,61**	0,09NS	1,00***
S2	DMax (kg/m³)	0,68***	0,70***	0,68***	0,65***
	DMax-5	0,67***	0,69***	0,67***	0,64***
	DMin (kg/m³)	0,55***	0,56***	0,53***	0,55***
	DMin-5	0,56***	0,57***	0,55***	0,58***
S3	DMax (kg/m³)	0,57***	0,54***	0,46**	0,67***
	DMax-5	0,56***	0,53***	0,45**	0,66***
	DMin (kg/m³)	0,43**	0,34*	0,16NS	0,50***
	DMin-5	0,43**	0,36*	0,17NS	0,51***

Tableau III. Corrélations entre les densités extrêmes du bois (maximale et minimale) et la largeur des cernes de croissance (LC) : provenance de Tiaret (n = 454 observations)

LC (mm)	Composantes	R1	R2	R3	R4
T1	**DMax (kg/m³)**	0,66***	-0,22NS	-0,29NS	0,57**
	DMax-5	0,65***	-0,23NS	-0,30NS	0,57**
	DMin (kg/m³)	0,02NS	-0,48**	-0,46*	0,09NS
	DMin-5	0,04NS	-0,46*	-0,45*	0,09NS
T2	**DMax (kg/m³)**	-0,25NS	-0,20NS	-0,14NS	-0,17NS
	DMax-5	-0,27NS	-0,22NS	-0,16NS	-0,20NS
	DMin (kg/m³)	-0,58***	-0,50**	-0,48**	-0,48**
	DMin-5	-0,55***	-0,49**	-0,46**	-0,45**
T3	**DMax (kg/m³)**	0,28NS	0,28NS	0,74***	0,08NS
	DMax-5	0,26NS	0,25NS	0,73***	0,04NS
	DMin (kg/m³)	0,14NS	0,04NS	0,44**	-0,00NS
	DMin-5	0,17NS	0,06NS	0,48**	-0,04NS

Tableau IV. Corrélations entre la densité moyenne du bois (DMoy) et l'âge selon les deux provenances (n = 927 observations)

Année (âge)	DMoy (kg/m³)	R1	R2	R3	R4
Sidi Bel-Abbès	**S1**	-0.89***	-0.86***	-0.88***	-0.84***
	S2	-0.80***	-0.83***	-0.83***	-0.81***
	S3	-0.92***	-0.91***	-0.86***	-0.88***
Tiaret	**T1**	-0.77***	-0.79***	-0.82***	-0.71***
	T2	-0.78***	-0.82***	-0.80***	-0.77***
	T3	-0.84***	-0.90***	-0.81***	-0.89***

Tableau V. Effets de la provenance et de l'arbre sur la densité moyenne du bois (DMoy) (au seuil 5 %)

Facteur	R1	R2	R3	R4
Effet provenance	**$0{,}1163 \times 10^{-7}$***	0,1059 NS	**$0{,}1381 \times 10^{-4}$***	**$0{,}5689 \times 10^{-7}$***
Effet arbre				
S (p=)	0,6666 NS	0,1491 NS	0,064 NS	0,6881 NS
T (p=)	**$0{,}1154 \times 10^{-3}$***	0,329 NS	0,0546 NS	**$0{,}1588 \times 10^{-5}$***

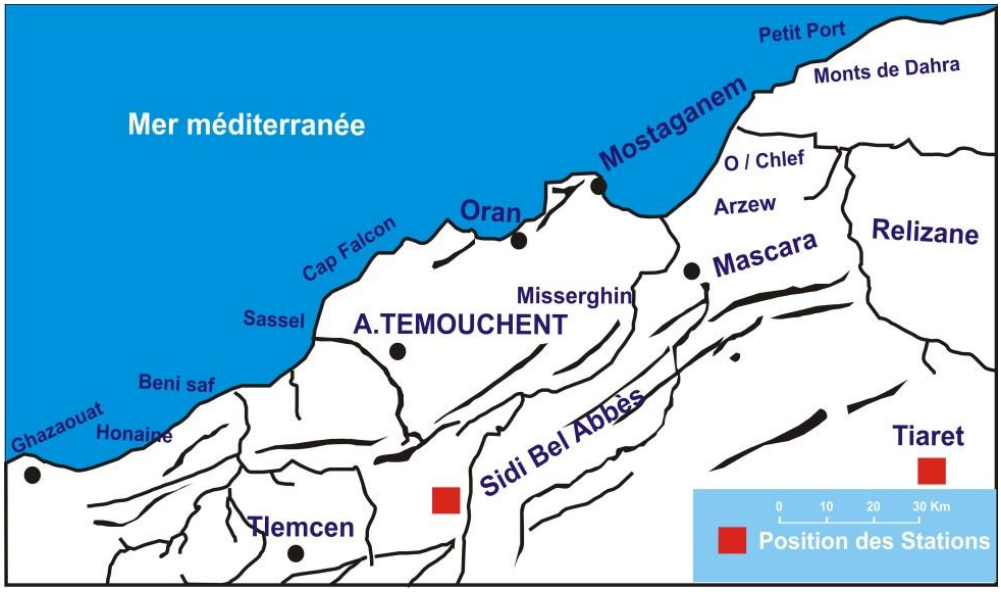


Figure 1. Localisation des sites d'échantillonnage de *Pistacia atlantica* Desf. dans le nord-ouest de l'Algérie : Sidi Bel-Abbès (climat semi-aride méditerranéen) et Tiaret (zone de transition à influence saharienne aride)

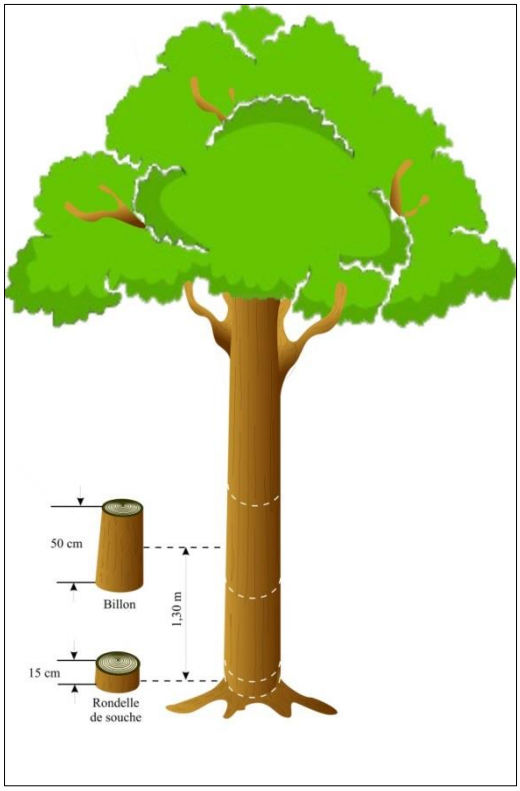


Figure 2. Billon et rondelle de souche prélevés sur *Pistacia atlantica*

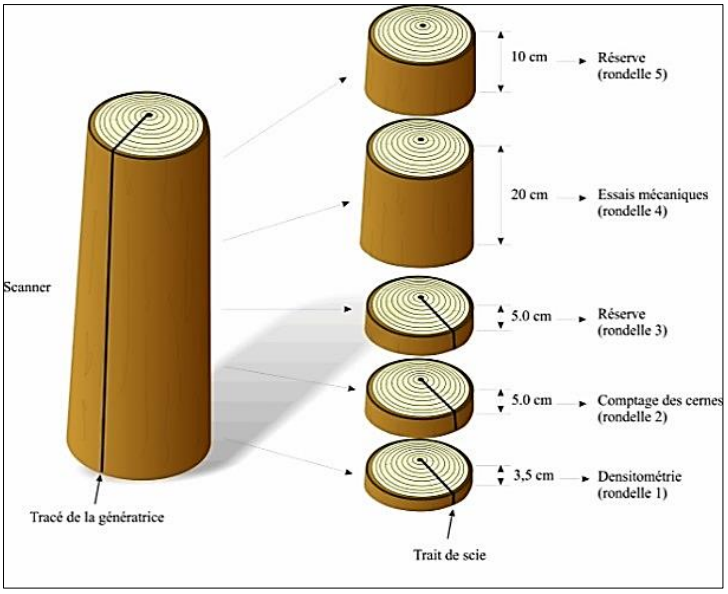


Figure 3. Découpe du billon en cinq rondelles

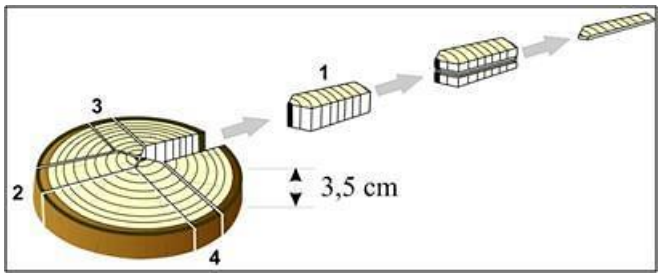


Figure 4. Découpe de la rondelle de bois n°1 en barreaux et barrettes

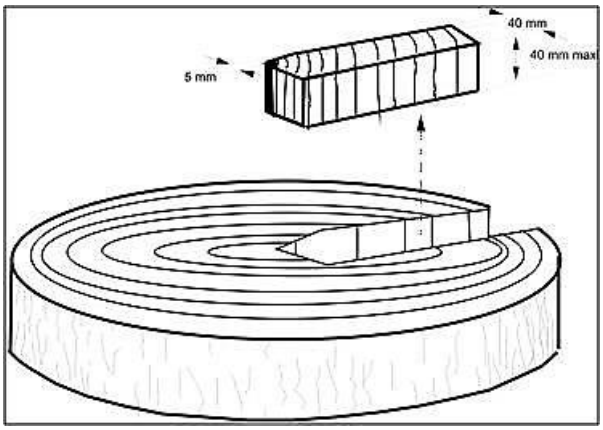


Figure 5. Découpe d'un barreau de bois selon la direction (L*R)

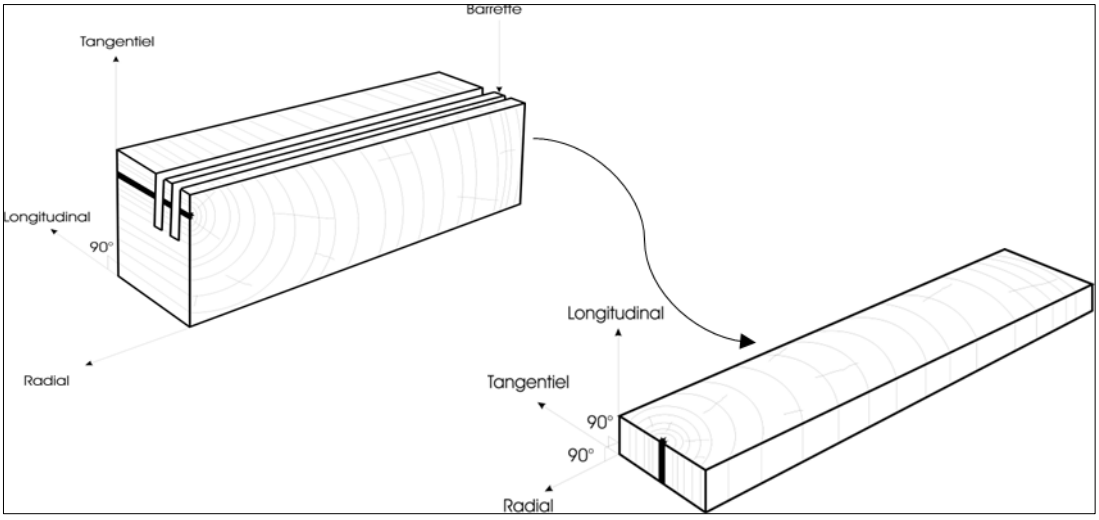


Figure 6. Barrette de 2 mm découpée selon le plan orthotrope du bois

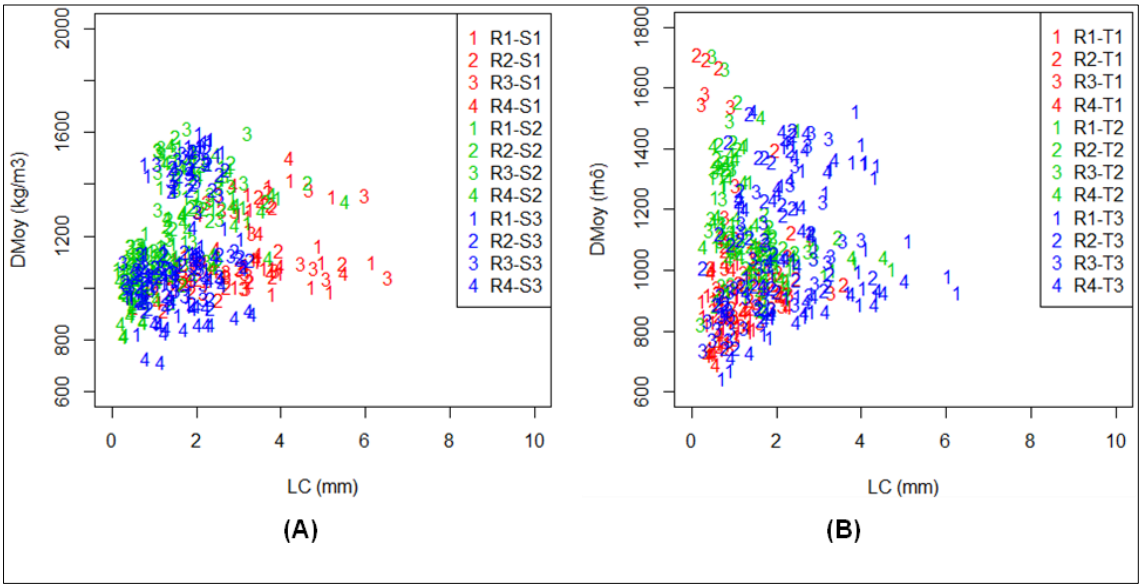


Figure 7. Variabilité de la densité moyenne du bois (DMoy) en fonction de la largeur des cernes (LC) pour les rayons radiaux (R1 à R4) des trois arbres analysés dans chaque provenance : (A) Sidi Bel-Abbès (473 cernes) et (B) Tiaret (454 cernes)

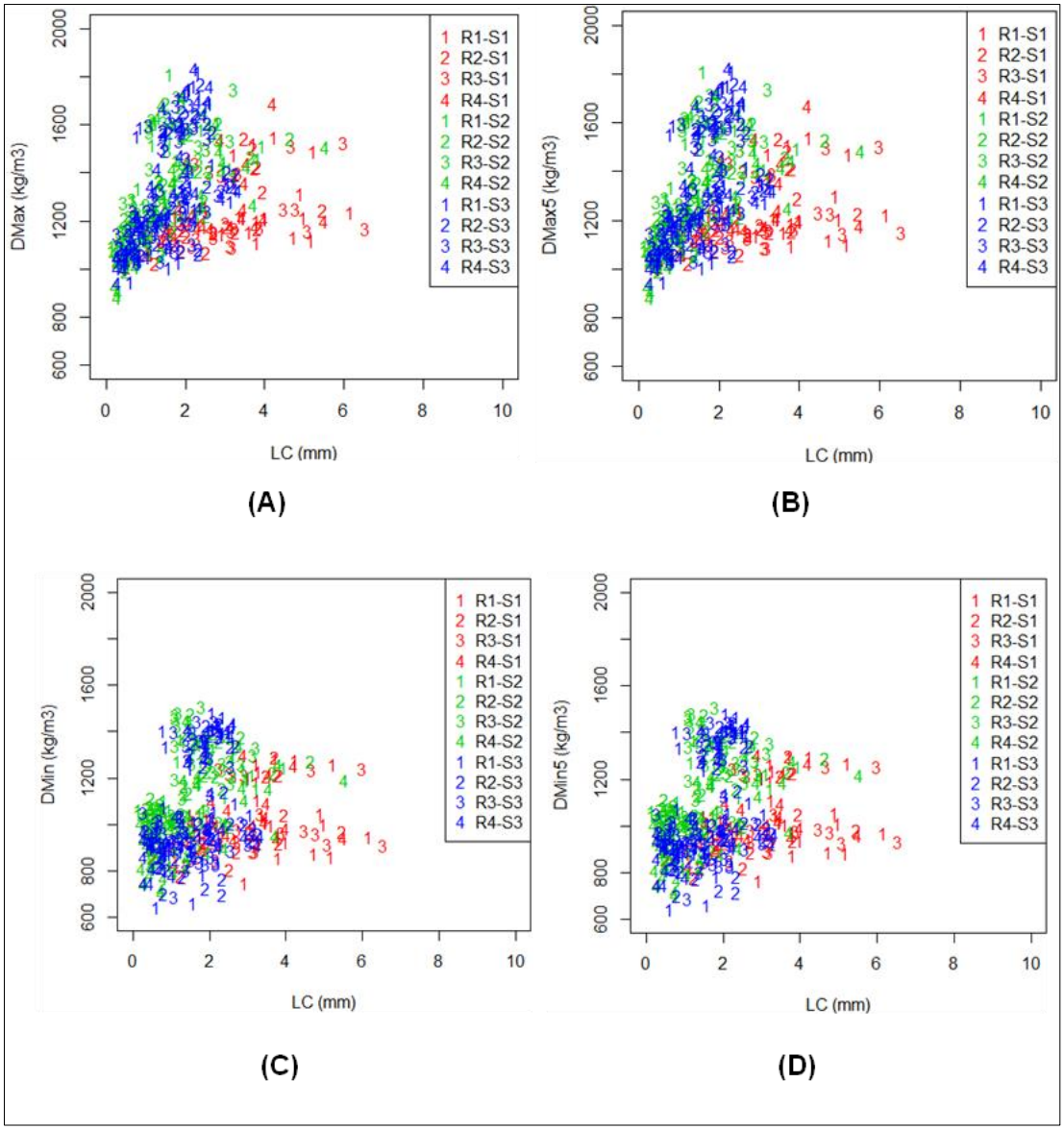


Figure 8. Variabilité des densités maximale (DMax) et minimale (DMin) du bois en fonction de la largeur des cernes (LC), selon les rayons radiaux (R1 à R4) des arbres issus de la provenance de Sidi Bel-Abbès (S1 à S3). Chaque sous-figure (A à D) représente les résultats obtenus pour un rayon distinct (473 cernes par sous-figure)

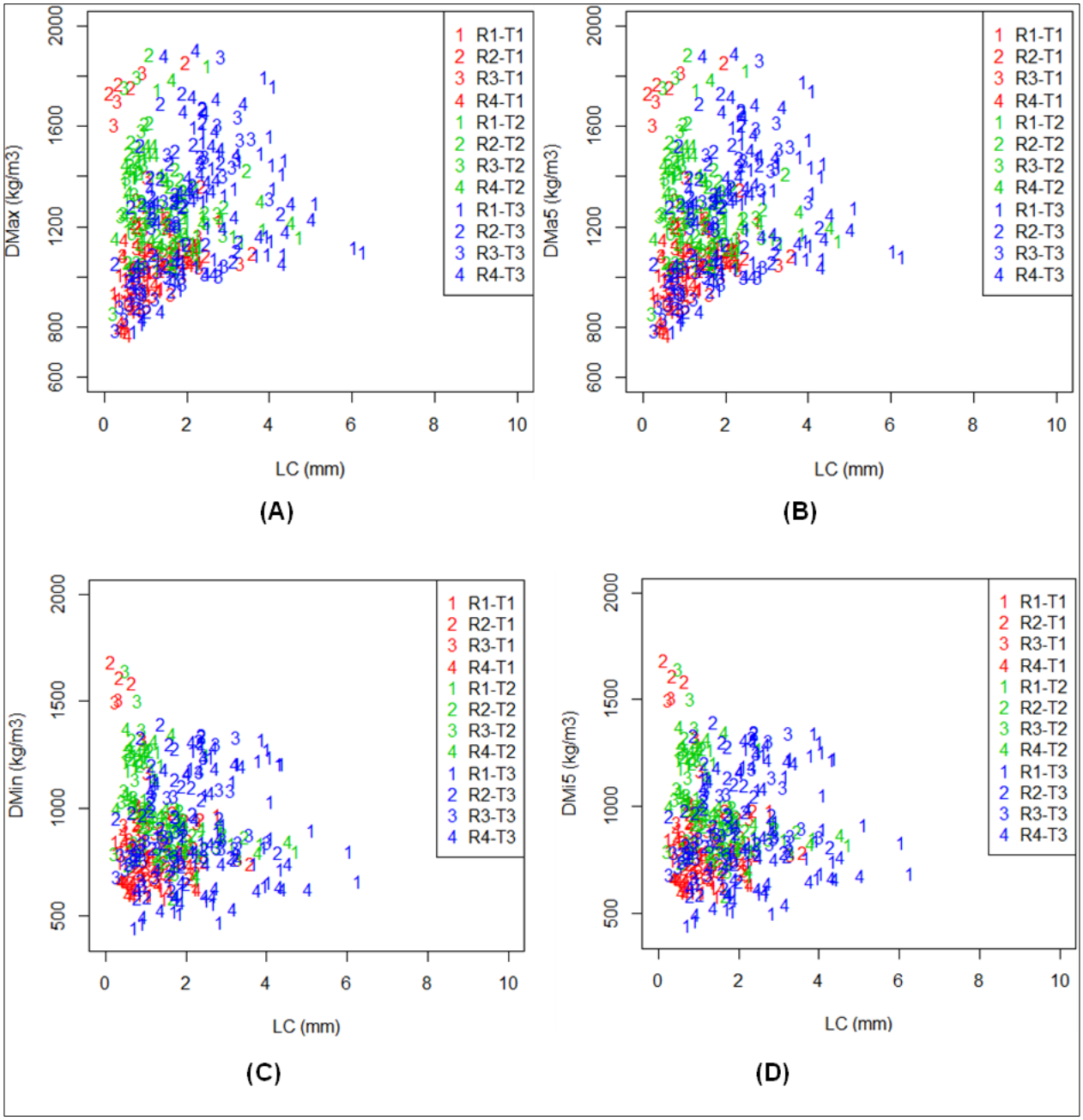


Figure 9. Variabilité des densités maximale (DMax) et minimale (DMin) du bois en fonction de la largeur des cernes (LC), selon les rayons radiaux (R1 à R4) des arbres issus de la provenance de Tiaret (T1 à T3). Chaque sous-figure (A à D) représente les résultats obtenus pour un rayon distinct (454 cernes par sous-figure)

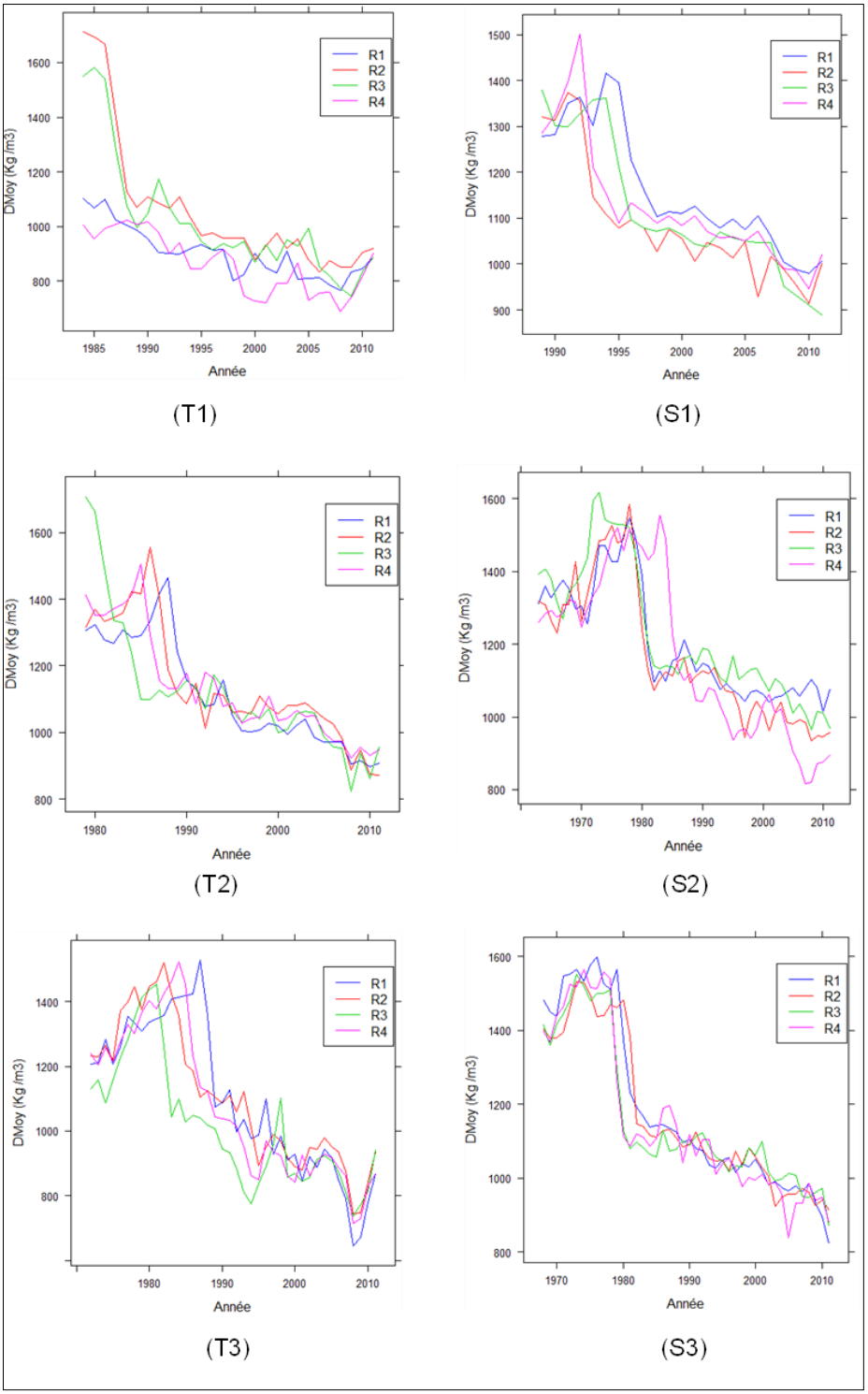


Figure 10. Variabilité de la densité moyenne du bois (DMoy) en fonction de l'âge pour les deux provenances étudiées (Sidi Bel-Abbès : S1, S2, S3 et Tiaret : T1, T2, T3), sur un total de 927 cernes

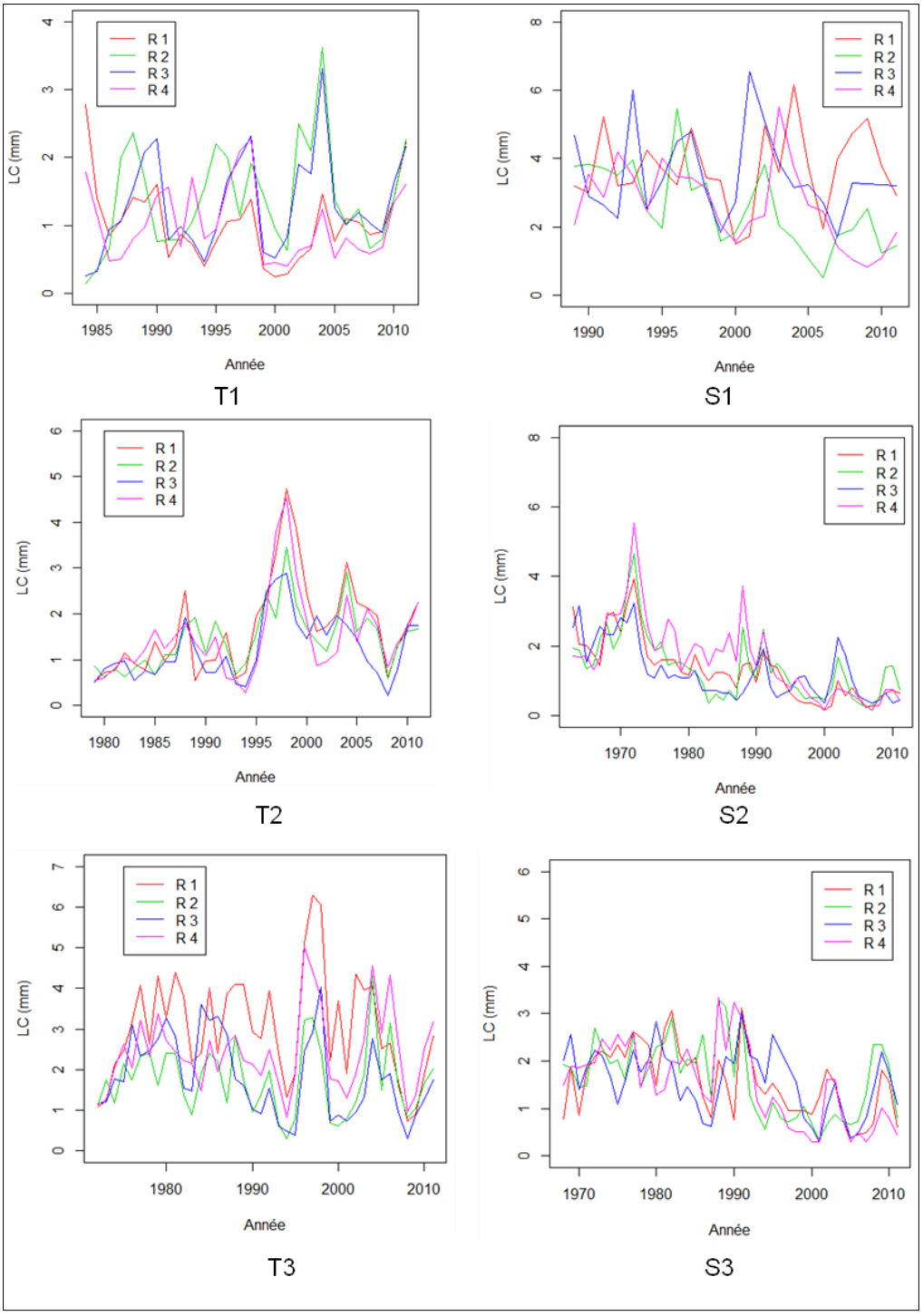


Figure 11. Variabilité de la largeur des cernes (LC) en fonction de l'âge pour les deux provenances étudiées (Sidi Bel-Abbès : S1, S2, S3 et Tiaret : T1, T2, T3), sur un total de 927 cernes



Photo 1. Barrette de pistachier découpée dans un barreau



Photo 2. Dispositif de sciage

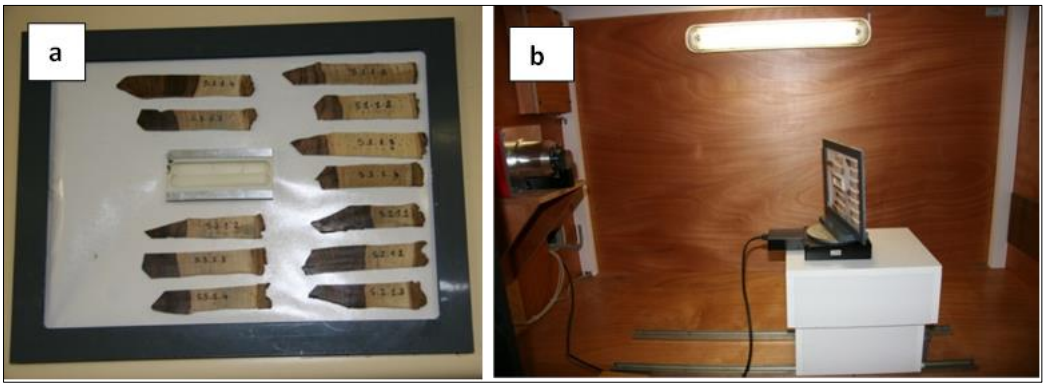


Photo 3. Barrettes de pistachier et cale à 3 paliers sur le support de radiographie (a) exposées aux rayons X (b)

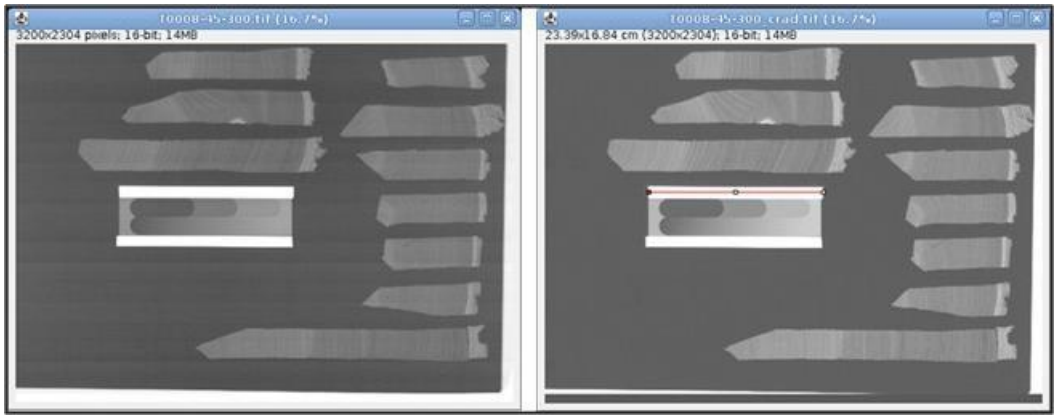


Photo 4. Cliché du prétraitement de l'image radiographique

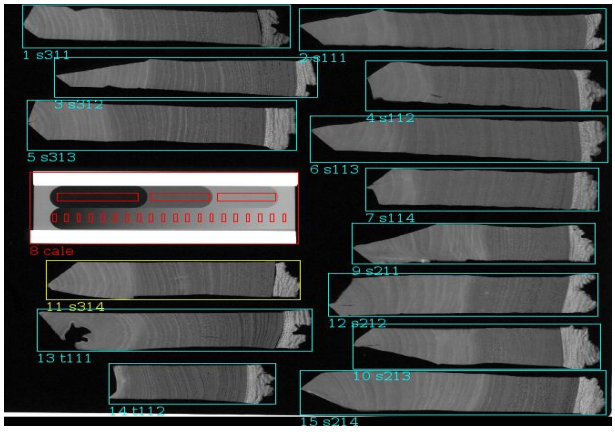


Photo 5. Barrettes de bois du pistachier individualisées avec le logiciel "CRAD"

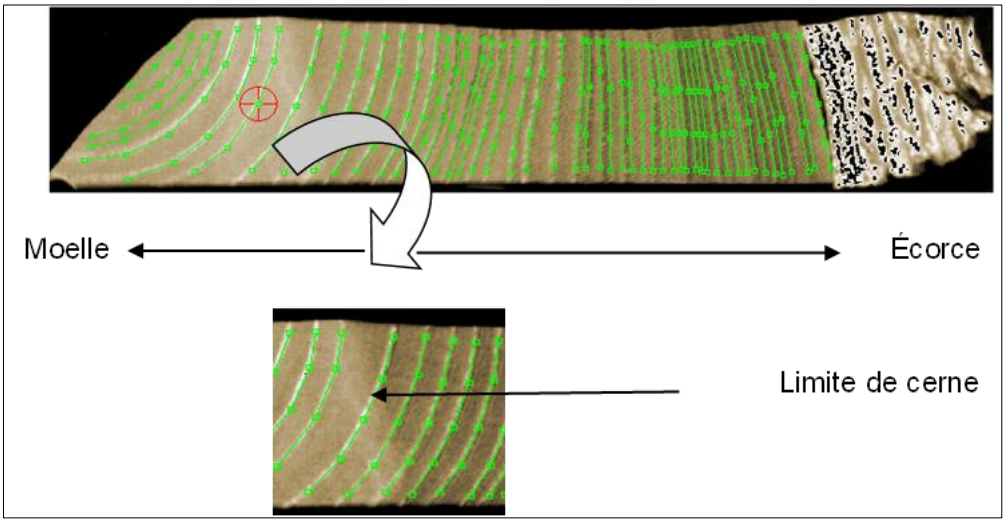


Photo 6. Délimitation des cernes du bois du pistachier avec le logiciel "CERD"