

N° d'ordre :



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE & POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DJILLALI LIABES
FACULTE DES SCIENCES
DE LA NATURE ET DE LA VIE
SIDI BEL ABBÈS

THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES

Présentée par : M^{me} BOUDOUAYA Manel

Spécialité : Environnement
Option : Écologie Appliquée
Intitulé

**Contribution à une étude des propriétés physiques et
mécaniques du bois du pistachier de l'Atlas (*Pistacia
atlantica* Desf.) en Algérie Nord-occidentale**

Soutenue le : 2015
Devant l'honorable jury composé de :

TOUNSI Abdelwahed	Professeur à l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès (Algérie)	Président
SEBOU Abdessadek	Professeur à l'École Nationale Forestière d'Ingénieurs de Rabat (Maroc)	Examineur
DILEM Abdelkader	Professeur au Centre Universitaire de Tissemsilet (Algérie)	Examineur
BELHADJ Safia	Professeur à l'Université Ziane Achour de Djelfa (Algérie)	Examinatrice
FOURNIER Meriem	Professeur à AgroParisTech, Centre de Nancy (France)	Co-directeur de thèse
BENHASSAINI Hachemi	Professeur à l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès (Algérie)	Directeur de thèse

Laboratoires d'accueils

Laboratoire de Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation "LBV-CV", à Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès (Algérie),
Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois "LERFoB", UMR-INRA-AgroParisTech Centre INRA de Nancy (France),
Laboratoire d'Études et de la Recherche sur le Matériau Bois "LERMAB", Université Henri Poincaré de Nancy (France),
Laboratoire de Mécanique et Génie Civil "LMGC", Université de Montpellier,

2015/2016

A mon fils Oussama et ma mère

A la mémoire de mon père

« Le bois, matériau le plus anciennement et le plus universellement utilisé par l'homme »

(Polge. Hubert, 1966)

Remerciements

Au terme de ce travail réalisé au sein du Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois "L'ERFoB" de l'INRA-ENGREF de Nancy, je souhaite exprimer mes remerciements et ma gratitude à tous ceux, qui de près ou de loin, m'ont accompagnée et soutenue tout au long de ce travail.

En premier lieu, ma profonde reconnaissance s'adresse à Monsieur Hachemi BENHASSAINI, mon directeur de thèse, Professeur à la Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, directeur du Laboratoire de Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation "LBV-CV", Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès, initiateur du projet, pour m'avoir fait confiance, pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour avoir constamment enrichi et cadré le sujet de ses précieux conseils et remarques.

Mes remerciements s'adressent également à ma 2^{ème} directrice de thèse, Madame Meriem FOURNIER, Directrice du Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois "L'ERFoB", fonctionnaire du Ministère de l'Agriculture (ICPEF), Professeur à AgroParisTech, Département SIAFEE AgroParisTech, UFR Forêt Arbres Environnement (FAM) de Nancy, pour m'avoir accueillie pendant un an et demi dans son laboratoire, suivi avec intérêt mon travail, et pour m'avoir laissée entière liberté pour mener ces travaux. En plus de son appui moral et scientifique, elle m'a fourni toutes les ressources techniques pour le bon déroulement de ce travail. Je n'oublierai pas ses qualités humaines qui ont grandement contribué au plaisir que j'ai eu à effectuer ce travail.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Frédéric MOTHE, Chargé de Recherches au Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois de l'Équipe Croissance, Production et Qualité des Bois (CPQB), UMR-INRA-AgroParisTech Centre INRA de Nancy, pour avoir accepté de codiriger cette thèse et qui a bien voulu prendre sur son temps de travail pour se consacrer à la réalisation des programmes informatiques avec autant de gentillesse que de compétence, notamment pour le traitement des données microdensitométriques. Il a fait preuve de beaucoup de patience et de savoir-faire. Je souhaiterais également lui dire merci pour toutes les connaissances qu'il m'a enseignées, pour les nombreuses pistes de recherche qu'il a su me montrer, pour les conseils qu'il m'a donnés tout le long de ce parcours, pour avoir répondu à toutes mes questions de manière toujours claire et pratique. Pour avoir corrigé la totalité de la thèse et pour m'avoir accompagnée sérieusement tout au long de la rédaction de ce travail. Je voudrais souligner non seulement mon estime scientifique à son égard, mais aussi mon amitié respectueuse.

J'exprime ma gratitude à Monsieur Joseph GRIL, Directeur de Recherche au CNRS, Directeur du GDR 3544 Sciences du Bois, Responsable de l'équipe BOIS, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil "LMGC", Université de Montpellier, pour m'avoir accueillie cordialement au sein de son Laboratoire, pour m'avoir permis de faire une partie de cette étude et fait bénéficier du dispositif disponible pour la réalisation des essais mécaniques et pour avoir dirigé, guidé et orienté mon travail de recherche.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Bruno CLAIR, chercheur au CNRS, UMR Écologie des Forêts de Guyane "EcoFoG" Laboratoire Sciences des Bois de Guyane, pour sa coopération et l'intérêt qu'il a toujours témoigné pour l'étude des propriétés mécaniques.

Par ailleurs, je voudrais remercier Monsieur Philippe GERARDIN, professeur à la Faculté des Sciences et Technologie, Université Henri Poincaré de Nancy, (France), pour m'avoir accueillie pendant quatre mois de travail dans son Laboratoire d'Études et de la Recherche sur le Matériau Bois "LERMAB". Je garde un excellent souvenir de ma collaboration avec l'ensemble du personnel de son laboratoire.

Je dois beaucoup à Monsieur M'hamed MAATOUG, Professeur à l'Université Ibn Khaldoun de Tiaret, pour avoir entretenu tout au long de ce travail un dialogue intense et fructueux dans le domaine du bois.

Je suis également très reconnaissante à tous les membres du Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois "LERFoB" de "INRA-ENGREF" de Nancy pour leur aide durant un an et demi de travail: J'ai pu travailler dans un cadre particulièrement agréable, grâce à l'ensemble du personnel scientifique et technique de "LERFoB", pour leurs conseils et leurs aides efficaces, principalement pour leur aide technique, en particulier :

- *Messieurs Pierre GELHAYE et Alain MERCANTI pour leur aide précieuse et leur contribution lors de la réalisation du travail pratique en particulier la réalisation des découpes du bois ;*
- *Mademoiselle Charline FREYBURGER, pour la conception et la réalisation des scanners ;*
- *Madame Maryline HARROUÉ et Monsieur Julien RUEILLE, pour m'avoir aidée m'orientée à la réalisation des coupes anatomiques et pour leur collaboration ;*
- *Messieurs Gérard NEPVEU, enseignant-chercheur à l'UMR-INRA-AgroParisTech Centre INRA de Nancy, Philippe JACQUIN, Chargé d'études et de recherches au Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois de l'Équipe (CPQB) et Damien BOURRÉAU, docteur en Génie mécanique de l'Université des Antilles et de la Guyane, pour avoir entretenu tout au long de ce travail un dialogue fructueux dans le domaine du bois ;*
- *Mesdemoiselles Fleur LONGUETAUD, et Jana DLOUHA, Chargées d'études et de Recherches au Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois de l'Équipe Croissance, Production et Qualité des Bois (CPQB) pour leur collaboration ;*
- *Monsieur Cyrille RATHGEBER, chercheur à (CPQB), pour m'avoir aidée à interpréter les coupes anatomiques.*

Que soit enfin ici remercié l'ensemble du personnel administratif qui a collaboré d'une manière ou d'une autre au bon déroulement du travail. J'ai eu la chance tout au long du travail d'être aidée par des assistantes administratives extrêmement efficaces et qui m'ont rendu la vie plus facile. Merci beaucoup à Mademoiselle Nathalie MOREL, secrétaire du "LERFoB", pour son aide administrative et ses multiples conseils pour mener à bien ma recherche et à Corinne MARTIN.

Je veux aussi adresser ma profonde reconnaissance aux membres du jury pour avoir accepté de consacrer leur temps à l'examen de ce travail :

- *J'exprime ma gratitude à Monsieur Abdelwahed TOUNSI, Professeur à la Faculté des Sciences de la nature et de la Vie à l'Université de Sidi Bel Abbès, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse ;*

- Je remercie Messieurs *Abdessadek SESBOU*, Professeur à l'École Nationale Forestière d'Ingénieurs de Rabat au Maroc, *Abdelkader DILEM* Professeur au Centre Universitaire de Tissemsilet et Madame *Safia BELHADJ* Professeur à l'Université Ziane ACHOUR de Djelfa, qui ont accepté de rapporter sur mon travail. Je les remercie vivement d'avoir accepté de faire partie du jury. pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être membres du jury.

Je suis également très reconnaissante à Madame *Fatima Zohra BENDIMEREED-MOURI*, Maître de conférences à l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès pour sa disponibilité et son aide amicale, pour des nombreuses et judicieuses remarques qui ont contribué à faire de ce manuscrit ce qu'il est à ce jour, pour son aide en traitement statistique des données et pour avoir relu mon manuscrit.

- Il me reste à adresser de chaleureux remerciements aux très nombreuses personnes qui m'ont aidé avec toujours une extrême gentillesse, les responsables et le personnel technique de la Conservation des Forêts de la wilaya de Tiaret et de la Subdivision de Sfisef qui nous ont accordé la cession gratuite des quelques billons que nous souhaitions :
- Je remercie Messieurs *Benali GOURARI* et *Boualem AOUEB* qui m'ont aidé à la réalisation des travaux de terrain y compris le choix et l'abattage des 3 arbres de la forêt de Tagdempt de la wilaya de Tiaret ;
- Mes remerciements sont aussi à Monsieur *Djeloul* pour le choix et l'abattage des 3 arbres de la région de M'cid de la wilaya de Sidi Bel Abbès.

Je remercie également Monsieur *Tawfik BENCHIKH*, Maître de conférences à la Faculté de Médecine, Université de Sidi Bel Abbès, pour son aide en traitement statistique des données.

Mes remerciements vont également à l'ensemble des actuels ou anciens étudiants en thèse, en particulier ceux encadrés par Madame *Meriem FOURNIER*: *Félix HARTMAN*, *Nicolas BILOT*, *Vivien BONNESOEUR*, *Julie BOSSU* et *Zineb Kèbbi Benkèder* pour leur amitié, leur collaboration et leur encouragement.

Un grand merci à toutes mes amies qui m'ont aidé et encouragé, et qui m'ont changé les idées quand j'en avais besoin. Un remerciement spécial à *Fatima Zohra BENDIMEREED-MOURI*, à *Zaza BENSIMIRA* et à *Samira CHAIBI*.

Enfin, je tiens à rendre hommage à ma famille, notamment ma mère, mon fils, mes sœurs, mes frères qui ont su me comprendre, qui m'ont supportée tout au long de ce travail, qui m'ont toujours soutenue dans les moments les plus difficiles de la vie et qui m'ont rendu la vie vraiment plus agréable.

Titre : Contribution à une étude des propriétés physiques et mécaniques du bois du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) en Algérie Nord-occidentale

Résumé

Le pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., compte parmi les espèces arborées peuplant les contrées arides et semi-arides du Nord de l'Afrique (Quézel et Santa, 1963) et fait partie des ressources méconnues dans le monde. Plusieurs recherches ont été consacrées aux problèmes liés à sa régénération et sa phytoécologie, tandis que les études sur la qualité de son bois sont inexistantes. C'est dans ce contexte que nous avons choisi six arbres de pistachier provenant de deux régions, écologiquement distinctes de l'Algérie Nord-occidentale sur lesquels les caractéristiques technologiques ont été déterminées. Les différentes analyses ont concerné deux types de bois, l'aubier et le duramen.

Les propriétés déterminées étaient physiques se rapportant à l'évolution radiale de la largeur de cerne sur les quatre rayons de l'arbre, à la caractérisation des paramètres microdensitométriques, tels que la densité moyenne, la largeur de cerne, des paramètres mécaniques par l'étude du module de Young, de module spécifique, du coefficient d'amortissement, puis colorimétriques (L^* , a^* et b^*). Une évaluation de la durabilité naturelle contre des champignons lignivores a également été faite parallèlement à une étude de l'anatomie du bois.

L'évolution radiale de la largeur de cerne a montré une tendance croissante pour la provenance de Sidi Bel Abbès et une tendance décroissante pour celle de Tiaret. Aussi de bonnes corrélations ont été enregistrées entre la largeur de cerne et sa distance vers la moelle. Les résultats de l'analyse microdensitométrique, ont montré un niveau de corrélation assez variable de ces composantes avec la largeur de cerne entre les rayons du même cerne, et pour les arbres des deux provenances. Ces résultats ont montré également des corrélations négatives et très hautement significatives de la densité moyenne avec l'âge pour tous les arbres de deux provenances. L'analyse de la variance au seuil de 5% de la densité moyenne (DMoy) a fait ressortir un effet arbre très hautement significatif seulement pour la provenance de Tiaret. Aussi, sur l'ensemble des échantillons, l'effet provenance s'est montré très hautement significatif sur la densité moyenne (DMoy).

Au niveau intra-arbre, de bonnes corrélations entre le module d'élasticité longitudinale et la densité ont été mises en évidence dans l'aubier et dans le duramen. Cependant, le duramen a présenté une densité sensiblement plus élevée que l'aubier. Cette étude a également confirmé la très grande variabilité inter-arbre ainsi que l'effet provenance sur ces propriétés. Aussi, le bois de cette espèce a présenté un module d'élasticité et une densité élevés pour la provenance de Sid Bel Abbès dont l'altitude est moins élevée que celle de Tiaret, le sol riche en calcaire et subit un bioclimat semi-aride à hiver frais. De ce fait, le bois de cette essence peut être considéré comme un très bon matériau grâce à cette hétérogénéité et à sa rigidité moyenne (module de Young moyen).

L'étude colorimétrique a révélé une différence très hautement significative, en relation avec la densité, entre les types de bois, l'aubier avec son bois plus clair que le duramen. Une variabilité de clarté marquée entre les deux provenances et entre arbres pour l'aubier et le duramen a été notée. Ces résultats montrent que seules la clarté L^* et la couleur rouge a^* peuvent intervenir dans la différenciation de la couleur entre les deux types de bois de pistachier.

Les résultats obtenus sur la durabilité naturelle ont indiqué que le bois du pistachier se qualifie comme un bois très durable (classe I) aucune différence n'a été observée entre la durabilité du duramen et celle de l'aubier. Cette propriété ne semblait pas être influencée directement par le milieu de croissance. L'étude anatomique a montré que le bois de *Pistacia atlantica* présente une structure typique de feuillus sans particularités. C'est un matériau hétérogène qui se classe parmi les bois "à zone initiale semi-poreuse". L'étude des essences naturellement durables comme le pistachier de l'Atlas constitue un enjeu prometteur à l'heure actuelle.

Mots-clés

Pistacia atlantica Desf., Algérie Nord-occidentale, bois, aubier, duramen, propriétés physiques et mécaniques, microdensitométrie, colorimétrie, durabilité, anatomie.

Title: Contribution to a study of the physical and mechanical properties of Atlas pistachio (*Pistacia atlantica*) wood in North-West of Algeria

Summary

Atlas pistachio, *Pistacia atlantica* Desf., is among the tree species that inhabit the arid and semi-arid regions of Northern Africa (Quézel & Santa, 1963) and is part of the resources unknown in the world. Several researches have been devoted to problems related to regeneration and plant ecology, while studies of the quality of its wood are lacking. It is in this context that we chose six of pistachio trees from both regions, ecologically distinct from the North-western Algeria on which the technological characteristics were determined. The various analyses have involved two types of wood, sapwood and heartwood.

The physical properties were determined in relation to the radial changes of the ring width on the four radii of the shaft and to the characterization of microdensitometric parameters such as the average density, the ring width, the color parameters (L *, a * and b *) and the mechanical parameters by study Young's modulus, specific modulus and the damping coefficient. An evaluation of the natural durability of wood-destroying fungi against was also performed in parallel with a study of wood anatomy.

The evolution of the radial ring width has shown an increasing trend for Sidi Bel Abbes origin and a decreasing trend for that of Tiaret. Also good correlations were recorded between the ring width and its distance to the core. The results of the microdensitometric analysis showed a rather variable correlation level of these components with the ring width between the rays of the same ring, and to the shafts of the two sources. These results have also shown negative correlations that are very highly significant between average density and age for all trees in both origins. Variance analysis at the level of 5 % of the average density (DMoy) has revealed a very highly significant effect in the Tiaret source. Also, in all the samples, origin effect appeared to be very highly significant on the average density (DMoy).

At Intra-tree level, good correlations between the longitudinal modulus of elasticity and density were highlighted in both sapwood and heartwood. However, the heartwood presented a substantially higher density than the sapwood. This study also confirmed the high variability inter-shaft and the origin effect on these properties. Besides, the wood of the species of Sid Bel Abbes origin presented a higher values of elastic modulus and density whose altitude is lower than that of Tiaret, with soil rich in limestone and undergoes a semi-arid bioclimate in cold winter. Therefore, the wood of this species can be considered a very good material thanks to this heterogeneity and its average rigidity (average Young's modulus).

The color study revealed a very highly significant difference in relation to the density between types of wood, sapwood with his lighter wood than the heartwood. A marked variability of clarity between the two sources and between trees for sapwood and heartwood was found. These results show that only the clarity and L * a * red color may interfere with the color differentiation between the two types of wood pistachio.

The results obtained on the natural durability indicated that the wood of the pistachio tree is qualified as a very durable wood (class 1). No differences were observed between the durability of heartwood and that of sapwood. This property did not seem to be influenced by the growth medium. The anatomical study showed that the wood of *Pistacia atlantica* has a typical hardwood structure and unremarkable. It is a heterogeneous material that ranks among the woods "semi-porous initial zone". The study of naturally durable species such as pistachio Atlas is a promising issue at present.

Keywords

Pistacia atlantica Desf., North-Western Algeria, wood, sapwood, heartwood, physical and mechanical properties, microdensitometry, colorimetry, durability, anatomy.

ملخص

يعتبر الفستق الأطلسي - الفستق الأطلسي Desf - من بين أنواع الأشجار التي تعيش في المناطق الجافة وشبه الجافة في شمال أفريقيا (كزال وسانتا، 1963) وهو جزء من الموارد غير المعروفة في العالم وقد خُصّصت العديد من البحوث للمشاكل المتعلقة بتجديده وبيئته النباتية في حين أنه لا توجد دراسات حول نوعية خشبه. في هذا السياق اخترنا ستة أشجار من الفستق من منطقتين متميزتين بيئياً من الشمال الغربي للجزائر حيث تم تحديد الخصائص التكنولوجية وقد شملت التحليلات المختلفة نوعين من الخشب هما الخشب الأبيض وخشب القلب الصلب.

تم تحديد الخصائص الفيزيائية فيما يتعلق بالتطور الشعاعي للكثافة ولعرض الحلقة على التشكيلات الأربعة للشجرة، الكثافة الصغرى مثل متوسط الكثافة و عرض الحلقة، الخصائص الميكانيكية من خلال دراسة مقياس يونغ، مقياس النوعية، ومعامل التخمد، الخصائص اللونية ($L^* a^* b^*$) و تقييم المتانة الطبيعية ضد فطريات التعفن بالتوازي مع دراسة علم تشريح الخشب.

أظهر التطور الشعاعي لعرض الحلقة اتجاهاً متزايداً في منطقة سيدي بلعباس و اتجاهاً متناقصاً في منطقة تيارت. كما سجلت ارتباطات جيدة بين عرض الحلقة وبعدها عن النخاع. أظهرت نتائج تحليل الكثافة الصغرى مستوى متغير لعلاقة مكوناتها مع عرض الحلقة بين أشعة نفس الحلقة لأشجار المنطقتين. أظهرت النتائج أيضاً ارتباطات سلبية جد هامة لمتوسط الكثافة مع التقدم في العمر لجميع أشجار المنطقتين. سلط الضوء على تحليل التباين 5% لمتوسط الكثافة (DMoy) تأثيراً كبيراً جداً للشجرة في منطقة تيارت فقط. على مستوى جميع العينات تأثير المنطقة كان هام للغاية على متوسط الكثافة (DMoy).

على الصعيد الداخلي للشجرة علاقات جيدة بين معامل الطولي للمرونة والكثافة سجلت على مستوى الخشب الأبيض و الخشب القلب الصلب. في حين أظهر خشب القلب الصلب كثافة أعلى بكثير من الخشب الأبيض كما أكدت أيضاً هذه الدراسة تبايناً شاسعاً بين الأشجار وكذلك تأثير المنطقة على هذه الخصائص. أيضاً قدم خشب الفستق معامل مرونة وكثافة عاليتين في منطقة سيد بلعباس حيث الارتفاع أقل من منطقة تيارت و التربة الغنية بالكلس كما تخضع المنطقة لمناخ شبه جاف و شتاء بارد. ولذلك يمكن اعتبار هذا النوع من الخشب مادة جيدة جداً بفضل عدم تجانسه و صلابته المتوسطة (معامل يونغ المتوسط).

أظهرت دراسة اللون فرقا كبيراً جداً للغاية فيما يتعلق بكثافة أنواع الخشب، الخشب الأبيض أكثر وضوحاً من خشب القلب الصلب. كما أثبتت الدراسة تبايناً ملحوظاً بين المصدرين وبين الأشجار على مستوى الخشب الأبيض و خشب القلب الصلب. بينت هذه النتائج أنه فقط الوضوح L^* و اللون الأحمر قد يتدخلان في التفريق بين نوعي خشب الفستق.

أشارت النتائج المحصل عليها فيما يخص المتانة الطبيعية بأن خشب شجرة الفستق يصنف ضمن الخشب المتين للغاية (فئة 1) كما لوحظ عدم وجود فرق بين متانة خشب القلب الصلب و الخشب الأبيض و لا يبدو تأثير هذه الخاصية بوسط النمو.

أظهرت الدراسة التشريحية أن خشب البطم الأطلسي لديه بنية نموذجية عادية كباقي الأشجار المورقة بدون أي ميزة و أنه مادة غير متجانسة يصنف ضمن الخشب ذو "المنطقة الأولية شبه مسامية".

إن دراسة الأنواع المعمرة بشكل طبيعي مثل الفستق الأطلسي هي مسألة واعدة في الوقت الحاضر.

الكلمات المفتاحية

الفستق الأطلسي Desf، الشمال الغربي للجزائر، خشب، الخشب الأبيض، خشب القلب الصلب، الخصائص الفيزيائية و الميكانيكية، الكثافة الصغرى، دراسة اللون، المتانة الطبيعية، التشريح.

Table des matières

Remerciements	
Résumé	
Abstract	
ملخص	
Signification des abréviations et des symboles	i
Liste des acronymes	ii
Table des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
Introduction générale	1

Première partie : Synthèse bibliographique

Chapitre I

Données bibliographiques sur l'espèce et aperçu sur la forêt algérienne

I.1. Historique de l'espèce.....	5
I.1.1 Aire de répartition de pistachier	7
I.1.1.1 Aire de répartition du genre <i>Pistacia</i> dans le monde	7
I.1.1.2. Aire de répartition de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. dans le monde	7
I.1.1.3. Aire de répartition de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. en Algérie.....	8
I.1.1.4. Aire de répartition de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. dans la partie occidentale d'Algérie	8
I.1.2. Statut taxonomique de l'espèce	9
I.1.3. Caractères botaniques de l'espèce	9
I.1.3.1. Système racinaire	9
I.1.3.2. Feuilles.....	9
I.1.3.3. fleur et floraison.....	10
I.1.3.4. Fruit.....	10
I.1.3.5. Graines	10
I.1.3.6. Port.....	11
I.1.3.7. Écorce	11
I.1.3.8. Bois	11
I.1.4. Biologie de l'espèce	11
I.1.4.1. Vitalité	11
I.1.4.2. Germination	11
I.1.4.3. Régénération	11
I.1.5. Ecologie de l'espèce	12
I.1.5.1. Pluviométrie.....	12
I.1.5.2. Température	12
I.1.5.3. Altitude	12
I.1.5.4. Sol.....	12
I.1.6. Cortège floristique du pistachier de l'Atlas	13
I.1.6.1. Associations végétales du bétoum dans le domaine maghrébin steppique	13
I.1.6.2. Associations végétales du bétoum dans le Nord algérien (faciès montagnards)	13
I.1.7. Utilisation du pistachier de l'Atlas	14
I.2. Forêt algérienne et son écologie	14
I.2.1. Secteur économique forestier algérien.....	15
I.2.2. Le bois.....	15
I.2.3. Secteur d'utilisation du bois du pistachier de l'Atlas.....	16
I.2.4. Etat du pistachier de l'Atlas en Algérie.....	16
I.3. Conclusion	16

Chapitre II

Revue bibliographique sur le bois et ses propriétés

II.1. Définition et description du matériau "bois"	17
II.1.1. Plan ligneux du bois	17
II.1.2. Matériau d'origine biologique	18
II.1.3. Structure anatomique du bois	18
II.1.3.1. Anatomie du bois à l'échelle macroscopique	18
II.1.3.1.1. Aubier	18
II.1.3.1.2. Duramen	19
II.1.3.1.3. Ecorce	19
II.1.3.1.4. Cerne.....	19
II.1.3.2. Anatomie du bois à l'échelle microscopique.....	20
II.1.4. Sources de variabilité.....	21
II.1.4.1. Bois juvénile et bois adulte.....	22
II.1.4.2. Bois de réaction	22
II.1.4.3. Bois de printemps et bois d'été.....	23
II.1.5. Niveaux de variabilité.....	23
II.2. Propriétés de base du bois	23
II.2.1. Densité du bois " ρ "	23
II.2.1.1. Variabilité intracerne de la densité	24
II.2.1.2. Relations entre la densité et les propriétés mécaniques.....	24
II.2.2. Largeur de cerne	24
II.2.2.1. Densité et largeur moyenne de cernes	25
II.2.3. Module d'élasticité longitudinal (Module de Young) " E_L "	25
II.2.3.1. Influence de la densité sur le module de Young.....	25
II.2.4. Module d'élasticité spécifique " E_L/ρ " et Coefficient d'amortissement " $\tan\delta$ "	26
II.2.5. Durabilité du bois et résistance naturelle aux champignons.....	26
II.2.5.1. Mesure de la durabilité naturelle	27
II.2.5.2. Classes de durabilité naturelle	28
II.2.5.3. Agents de détérioration.....	28
II.2.5.3.1. Micro-organismes.....	28
II.2.5.3.1.1. Champignons dégradants le bois	29
Champignons de pourriture cubique (brune)	30
Champignons de pourriture fibreuse (blanche)	30
Champignons de pourriture molle.....	30
II.2.6. Couleur du bois.....	30
II.2.6.1. La colorimétrie	31
II.2.6.2. Le système CIELab 1976	31
II.3. Conclusion	32

Deuxième partie : Étude expérimentale

Chapitre III

Matériel et méthodes

III.1. Origine du matériel expérimental.....	34
III.2. Présentation des deux zones de provenance du matériel végétal	34
III.2.1. La zone de M'cid.....	35
III.2.1.1. Présentation du milieu forestier de la wilaya de Sidi Bel Abbès	35
III.2.1.2. Situation géographique.....	35
III.2.1.3. Altitude.....	35
III.2.1.4. Caractéristiques climatiques.....	35
III.2.1.5. Types de sol.....	35
III.2.1.6. Hydrographie.....	36

III.2.1.7. Composition floristique.....	36
III.2.2. La zone de Tagdempt	36
III.2.2.1. Présentation de la wilaya de Tiaret.....	36
III.2.2.2. Situation de la forêt de Tagdempt	37
III.2.2.2.1. Situation géographique.....	37
III.2.2.2.2. Situations administrative et forestière	37
III.2.2.3. Caractéristiques climatiques.....	38
• <i>Pluviométrie</i>	38
III.2.2.4.Types de sol.....	38
III.2.2.5. Relief et hydrographie.....	38
III.2.2.6. Composition floristique.....	39
III.3. Protocoles expérimentaux et techniques d'études.....	39
III.3.1. Travail de terrain	39
III.3.1.1. Echantillonnage.....	39
• <i>Sélection des régions-échantillons et choix des arbres-échantillons</i>	39
III.3.1.2. Mesures dendrométriques	39
III.3.1.3. Débit des billons.....	42
III.3.2. Travail de laboratoire	43
III.3.2.1. Scanner des billons et des rondelles de souche	43
III.3.2.2. Découpe des billons en rondelles	43
III.3.2.3. Évolution radiale de la largeur de cerne.....	44
III.3.2.3.1. Comptage du nombre de cernes et mesure de leur largeur.....	44
a. Comptage effectué sur la rondelle de souche	44
b. Comptage effectué sur la rondelle n°2	45
III.3.2.4. Analyse microdensitométrique.....	47
III.3.2.4.1. Barreaux prélevés en prévision des mesures microdensitomériques.....	47
III.3.2.4.2. Conditionnement hygrothermique des barreaux après sciage	48
III.3.2.4.3. Découpe des barrettes destinées à la microdensitométrie	48
III.3.2.4.4. Exposition des échantillons aux rayons X.....	51
III.3.2.4.5. Traitement des images radiographiques	52
a. Logiciel "CRAD" (Calibrage-RAdiographie-Densité)	53
b. Logiciel "CERD" (CERne-Densité)	53
c. Logiciel "CESD" (CERne Synthétique en Densité)	54
III.3.2.5. Essais mécaniques	54
III.3.2.5.1. Découpe de la rondelle n°4	55
III.3.2.5.2. Préparation et conditionnement des éprouvettes	56
a. Débit des éprouvettes	56
b. Conditionnement hygrothermique des éprouvettes après sciage.....	57
III.3.2.5.3. Appareillage	57
III.3.2.5.4. Mesures vibratoires effectuées sur les éprouvettes	57
Les mesures physiques effectuées.....	58
III.3.2.6. Évaluation de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores	59
III.3.2.6.1. Découpe des éprouvettes du bois destinées aux tests fongiques	60
III.3.2.6.2. Préparation des milieux de culture	61
III.3.2.6.3. Séchage des éprouvettes avant leur exposition aux champignons	61
III.3.2.6.4. Répartition des éprouvettes et exposition aux champignons cultivés sur un milieu gélosé	62
III.3.2.6.5. Examen des éprouvettes exposées aux champignons.....	62
III.3.2.7. Évaluation de la variabilité de la couleur du bois de pistachier	64
III.3.2.7.1. Mode de prélèvement des barrettes.....	64
III.3.2.7.2. Appareil de mesure.....	64
III.3.2.7.3. Mesures et analyses statistiques	65
III.3.2.8. Étude anatomique	65
III.3.2.8.1. Préparation des échantillons.....	66
III.3.2.8.2. Saturation des échantillons de bois à l'eau déminéralisée.....	67
III.3.2.8.3. Imprégnation des échantillons en vue de faire des coupes microscopiques.....	67
III.3.2.8.4. Réalisation des coupes microscopiques	67
III.3.2.8.5. Coloration des coupes microscopiques	68

Coloration simple à la safranine.....	68
III.3.2.8.6. Observation microscopique et réalisation des photos	70

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV.1. Scanner.....	71
IV.1.1. Résultats.....	71
IV.1.2. Discussion.....	74
IV.2. Évolution radiale de la largeur de cerne.....	75
IV.2.1. Résultats.....	76
IV.2.1.1. Variation de la largeur de cerne avec les années.....	76
• <i>Provenance de Sidi bel Abbès</i>	76
• <i>Provenance de Tiaret</i>	76
IV.2.1.2. Corrélation de la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne et la largeur de cerne avec le côté moelle par rapport au cerne	77
• <i>Provenance de Sidi bel Abbès</i>	77
• <i>Provenance de Tiaret</i>	78
IV.2.2. Discussion.....	79
IV.3. Analyse microdensitométrique du bois.....	79
IV.3.1. Résultats.....	79
IV.3.1.1. Variabilité de la densité avec la largeur de cerne	79
IV.3.1.1.1. Corrélation des composantes microdensitométriques avec la largeur de cerne	82
IV.3.1.1.1.1. Corrélation de la densité moyenne avec la largeur de cerne pour les deux provenances	83
• Provenance de Sidi Bel Abbès.....	83
• Provenance de Tiaret.....	83
• Effet arbre et effet provenance sur la densité moyenne	84
IV.3.1.1.1.2. Corrélation des densités maximales et minimales avec la largeur de cerne pour la provenance de Sidi Bel Abbès	84
IV.3.1.1.1.3. Corrélation des densités maximales et minimales avec la largeur de cerne pour la provenance de Tiaret.....	86
IV.3.1.2. Variation de la densité moyenne de cerne en fonction des années	86
IV.3.1.2.1. Corrélation de la densité moyenne (DMoy) avec l'année pour les six arbres de pistachier.....	89
IV.3.1.3. Variabilité de la largeur de cerne en fonction des années	89
IV.3.2. Discussion.....	90
IV.4. Essais mécaniques.....	95
IV.4.1. Résultats.....	95
IV.4.1.1. Couple « densité- module de Young ».....	95
IV.4.1.1.1. Corrélation de la densité avec le module de Young pour les types du bois.....	95
IV.4.1.1.2. Corrélation de la densité avec le module de Young pour chaque arbre de chaque provenance	96
IV.4.1.1.3. Variabilité du module d'élasticité longitudinale.....	102
IV.4.1.2. Couple « densité- module spécifique ».....	102
IV.4.1.2.1. Corrélation de la densité avec le module spécifique pour les types du bois	102
IV.4.1.2.2. Corrélation de la densité avec le module spécifique pour chaque arbre de chaque provenance	103
IV.4.1.2.3. Variabilité du module spécifique.....	103
IV.4.1.3. Couple « densité- coefficient d'amortissement ».....	104
IV.4.1.3.1. Corrélation de la densité avec le coefficient d'amortissement pour les types du bois	104
IV.4.1.3.2. Corrélation de la densité avec le coefficient d'amortissement pour chaque arbre de chaque provenance	104
IV.4.2. Discussion.....	105
IV.5. Évaluation de la durabilité naturelle	108
IV.5.1. Résultats.....	108
IV.5.2. Discussion.....	110
VI.6. Évaluation de la variabilité de la couleur.....	113

VI.6.1. Résultats	113
VI.6.1.1. Variations de la clarté L^* , des composantes chromatiques a^* et b^* et de l'écart-type de la clarté avec la densité pour l'aubier, le duramen et la zone mixte	113
VI.6.1.2. Variations de la clarté L^* , des composantes a^* et b^* et de l'écart-type de la clarté avec la densité pour chaque arbre de chaque provenance	115
VI.6.1.3. Effet de la provenance sur la clarté L^* et sur les composantes chromatiques a^* et b^* pour l'aubier, le duramen et la zone mixte	116
VI.6.2. Discussion	117
IV.7. Anatomie du bois de pistachier de l'Atlas	120
IV.7.1. Résultats	120
IV.7.2. Discussion	123
IV.7.2.1. La microphotographie plan transversal	123
IV.7.2.2. La microphotographie plan tangentiel	125
IV.7.2.3. La microphotographie plan radial	125
Conclusion générale et perspectives	126
Références bibliographiques	130

Signification des abréviations et des symboles

A: Aubier.

a* : Coordonnées sur un axe vert – rouge.

An: Année.

Arb: Arbre.

APG: Angiosperm Phylogeny Group.

AG : boîte avec grille.

b* : Coordonnées sur un axe bleu – jaune.

Cerd : Cernes sur Eprouvettes Radiographiées en Densité.

Crad : Calibrage-RAdiographie-Densité.

C.P : Coniophora puteana.

C.V : Coriolus versicolor.

D : Duramen.

DBI : Densité du bois initial.

DBF : Densité du bois final.

D (Eco- Cer) : Distance entre le cerne et l'écorce.

D (Moe- Cer) : Distance entre le cerne et la moelle.

DMoy : Densité moyenne du cerne.

DMin : Densité minimale du cerne.

DMin-5 : densité moyenne des 5% de la largeur les plus faibles.

DMax : Densité maximale du cerne.

DMax-5 : densité moyenne des 5% de la largeur les plus forts.

Dst (Eco-Cer): Distance écorce- cerne.

Dst (Moe-Cer): Distance moelle- cerne.

GPa : Giga Pascal, unité de mesure de contrainte et de pression ($1 \text{ GPa} = 10^9 \text{ Pa} = 10^9 \text{ N}\cdot\text{m}^{-2}$).

G.T : Gloeophyllum trabeum.

H : hêtre.

HR : Humidité relative.

L* : Clarté L varie entre 0 pour le noir et 100 pour le blanc.

LC : Largeur de cerne.

LR : Longitudinal-radial.

LT : Longitudinal-tangentiel.

L_T R <: Longueur totale du rayon du côté inférieur de la rondelle.

Kg : Kilogramme.

mc : teneur en eau.

m₀ (NS) : masse initiale pour le bois non séché.

m₁ (S) : masse initiale pour le bois non séché ou le bois séché (à 103 °C) avant l'exposition fongique.

m₂ (NS) : masse de l'éprouvette humide après l'attaque fongique.

m₃ (S 48h) : masse de l'éprouvette anhydre (séchée à 103 °C pendant 48 heures) après l'attaque fongique.

Mix : Mixte.

Moe : Moelle.

µm : Micro mètre.

NS : Non significatif.

***** : Significatif au seuil de 5%.

****** : **Significatif** au seuil de 1%.

******* : Significatif au seuil de 1‰.

P : pin.

ρ : Symbole de densité.

PEG : polyéthylène glycol.

PM : Perte de masse.

Pro : Provenance.

Pos C (%) : Position relative du cerne.

PP : Poria placenta.

R : Rayon.

rhô : Unité de mesure de la densité en Grec ($1\text{Kg}/\text{m}^3 = 0,1 \text{ g}/\text{cm}^3 = 1000 \text{ rhô}$).

RT : Radial-tangentiel.

PEG : Polyéthylène glycol.

S : éprouvettes séchées.

SG : boîte sans grille.

NS : éprouvettes non séchées.

Liste des acronymes

a* : Coordonnée chromatique, correspondant à l'axe vert-rouge.

ANRH : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques.

ARLBOLOR : Association pour la Recherche en BOis de LORaine.

b* : coordonnée chromatique, correspondant à l'axe bleu-jaune.

CIELab : Commission Internationale de l'Eclairage (système L*a*b*).

CIRAD : Centre de coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement.

CTBA : Centre Technique du Bois et de l'Ameublement.

DGF : Direction Générale des Forêts.

DSA : Direction des Services Agricoles.

ENGREF : École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts.

FAO: Food and Agriculture Organization.

INRA : Institut National des Recherches Agronomiques.

L* : clarté, variant de 0 (désignant un noir parfait) à 100 (désignant un blanc immaculé).

LERFoB : Laboratoire d'Étude des Ressources Forêt-Bois.

LERMAB : Laboratoire d'Études et de la Recherche sur le Matériau Bois.

LMGC : Laboratoire de Mécanique et Génie Civil.

MATE : Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement.

MCTRA : Ministère de la Coopération Technique Rurale en Afrique.

RNE : Réseau National de l'Environnement et de l'écologie en Algérie.

Table des figures

Figure I.1. Aspect général d'un peuplement de pistachier de l'Atlas (Cliché Boudouaya M., 28/05/2013. région de M'cid, wilaya de Sidi Bel Abbès).	6
Figure I.2. Aspect général d'un arbre du pistachier de l'Atlas, (la photo à droite en bas) représente l'un des trois plus gros bétoums cité par Monjauze en 1980 à Sfisef (wilaya de Sidi Bel Abbès) (Cliché Boudouaya M., 28/05/2013).	6
Figure I.3. Aires de répartition du genre <i>Pistacia</i> dans le monde. Échelle : 1/20 000 000 (in Benhassaini, 1998).	7
Figure I.4. Aire de répartition des sous espèces de <i>Pistacia atlantica</i> dans le monde. Échelle : 1/20 000 000 (in Benhassaini, 1998).	8
Figure I.5. Répartition du pistachier de l'Atlas en Algérie et en Tunisie. (Selon Monjauze, 1968).	8
Figure I.6. Feuilles composées du pistachier de l'Atlas. (Cliché Boudouaya M., 28/05/2013).	10
Figure I.7. Les fruits de <i>Pistacia atlantica</i> Desf (Cliché Boudouaya M., 28/05/2013).	10
Figure II.1. Les trois sens de lecture du plans ligneux : plan transversal ; plan tangentiel ; plan radial (in Bourreau, 2011).	18
Figure II.2. Structure générale du tronc d'un arbre (Rémond, 2004).	20
Figure II.3. Vue d'une tige avec ses tissus principaux (Adapté d'après Higuchi, 1997).	20
Figure II.4. Vue schématique d'un plan ligneux d'une essence résineuse (a) et d'une essence feuillue (b) (Bouet et Humbert, 2003)	21
Figure II.5. Vue de la section transversale d'un feuillu poreux (a), semi-poreux (b) et à pores diffus (c) (LERFoB, 2012).	21
Figure II.6. Observation de bois de tension chez l' <i>Eperua falcata</i> (Ruelle in Bourreau, 2011).	23
Figure II.7. Structure anatomique du cerne annuel de croissance Gro x 400 x 297 (Source : www.ens.uqac.ca).	24
Figure II.8. Variation du module de Young en fonction de la densité, pour les essences résineuses (d'après Guitard et El Amri, 1987).	26
Figure II.9. <i>Dicorynia guianensis</i> attaqué par une pourriture brune.	30
Figure II.10. <i>Dicorynia guianensis</i> attaqué par une pourriture blanche.	30
Figure II.11. <i>Dicorynia guianensis</i> attaqué par une pourriture molle.	30
Figure II.12. Espace CIEL*a*b* (1976) (Chrisment, 1997), toutes les mesures des paramètres a* et b* réalisées jusqu'à présent sur le bois n'ont donné que des valeurs positives, c'est-à-dire situées dans la partie rouge-jaune du plan de chromaticité (Nishino et al., 1998).	32
Figure III.1. Localisation des deux régions de prélèvement des échantillons (carte extraite de la thèse de Maatoug (2003) et modifiée).	34
Figure III.2. Situation géographique de la zone de Tagdempt (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2012) Échelle : 1/50000.	37
Figure III.3. Diagramme des séquences opératoires réalisées sur terrain.	41
Figure III.4. Débit d'un billon et d'une rondelle de souche à partir d'un arbre.	42
Figure III.5. Débit d'un billon à partir d'un arbre du pistachier de l'Atlas de la région de Tiaret (Tagdempt)	43
Figure III.6. Numérisation des billons à l'aide d'un scanner médical 3D adapté au matériau bois. ...	43
Figure III.7. Découpe d'un billon en cinq rondelles.	44
Figure III.8. Surfaçage d'une face d'une rondelle de souche à l'aide d'un scalpel	45
Figure III.9. Comptage manuel des cernes d'une rondelle de souche du pistachier de l'Atlas à la loupe binoculaire.....	45
Figure III.10. Rondelle n°2 surfacée selon les 4 rayons tracés.	46
Figure III.11. Comptage du nombre de cernes et leur largeur à l'aide de l'appareil Lintab.	46

Figure III.12 Vue d'un ensemble de cernes de pistachier de l'Atlas à l'aide de l'appareil Lintab.	46
Figure III.13. Découpe de la rondelle n°1 en 4 barreaux puis en barrettes destinées aux analyses microdensitométriques.	48
Figure III.14. Découpe d'un barreau à partir d'une rondelle selon sa direction (L*R).	48
Figure III.15. Découpe d'une barrette du pistachier de l'Atlas dans un barreau.	49
Figure III.16. Schéma d'une vue latérale du dispositif de sciage.	49
Figure III.17 Dispositif de sciage (vue générale).	50
Figure III.18. Dispositif de sciage (vue proche).	50
Figure III.19. Découpe d'une barrette dans un barreau selon le plan orthotropique du bois.	50
Figure III.20. Découpe d'une barrette dans un barreau selon le plan orthotropique du bois.	51
Figure III.21. Barrettes du pistachier de l'Atlas destinées à la microdensitométrie.	51
Figure III.22. Disposition des éprouvettes du pistachier de l'Atlas et de la cale sur le support.	52
Figure III.23. Disposition des échantillons dans l'appareil de radiographie.	52
Figure III.24. Cliché de prétraitement de l'image radiographique.	53
Figure III.25. Cliché d'individualisation des éprouvettes du pistachier de l'Atlas avec le logiciel "CRAD".	53
Figure III.26. Délimitation des cernes du pistachier de l'Atlas avec le logiciel "CRED"(Cas de la barrette T _{1.1.4} prélevée de T ₁).	54
Figure III.27. Découpe de la rondelle n°4 en éprouvettes destinées aux essais mécaniques suivant les quatre rayons tracés.	56
Figure III.28. Les 12 éprouvettes prélevées dans l'aubier et le duramen sur les deux rayons de la rondelle n°4.	56
Figure III.29. Le principe du dispositif expérimental de vibration forcé sans contact développé au LMGC de Montpellier par El Kaïm : Le balayage en fréquence est piloté depuis le PC, la fréquence de résonance, la largeur de bande, le facteur de qualité et le coefficient d'amortissement sont automatiquement mesurés/calculés et sauvegardés.	58
Figure III.30. Positionnement d'une éprouvette entre les faces de mesure d'un pied à coulisse.	59
Figure III.31. Eprouvettes de duramen (1) et d'aubier (2) du pistachier destinées aux tests de durabilité naturelle.	60
Figure III.32. Les éprouvettes du pistachier de l'Atlas après 16 semaines d'incubation dans une enceinte hygro et thermorégulée à 22°C et à 70% d'humidité relative.	61
Figure III.33. Eprouvettes d'aubier non séchées déposées sur grille avec la souche <i>Poria placenta</i> après 16 semaines d'incubation.	63
Figure III.34. Barrettes destinées aux mesures de la variabilité de la couleur chez le pistachier de l'Atlas.	64
Figure III.35. Vue d'ensemble d'un spectrocromètre relié à un microordinateur (PC).	64
Figure III.36. Mesure de la couleur sur les barrettes.	65
Figure III.37. Directions orthotropiques sur une rondelle du pistachier de l'Atlas.	66
Figure III.38. Barrette du pistachier de l'Atlas en vue de la réalisation des coupes microscopiques.	66
Figure III.39. Imprégnation des échantillons en vue de la réalisation des coupes microscopiques.	67
Figure III.40. Réalisation d'une coupe microscopique avec un microtome de marque "REICHERT AUSTRIA"	68
Figure III.41. Étapes de la préparation des coupes anatomiques du bois du pistachier de l'Atlas.	69
Figure III.42. Observation microscopique et réalisation des photos.	70
Figure IV.1. Images scannées des rondelles de souche des six arbres du pistachier de l'Atlas.	71
Figure IV.2. Images scannées des trois arbres du pistachier de l'Atlas de la région de Sidi Bel Abbès : (S ₁ , S ₂ , S ₃).	72
Figure IV.3. Images scannées des trois arbres du pistachier de l'Atlas de la région de Tiaret : (T ₁ , T ₂ , T ₃).	73

Figure IV.4. Variation de la largeur de cerne (LC) avec les années sur les quatre rayons des six arbres de pistachier de l'Atlas (870 observations).....	77
Figure IV.5. Variation de la densité moyenne (DMoy) de cerne en fonction de sa largeur (LC) sur les quatre rayons (numérotés R ₁ à R ₃) des trois arbres de pistachier de l'Atlas (numérotés 1 à 3) de chaque provenance (S : Sidi Bel Abbès et T : Tiaret).....	80
Figure IV.6. Variation des composantes microdensitométriques : densité maximale (DMax), densité maximale à 5% (DMax-5), densité minimale (DMin) et densité maximale à 5% (DMin-5) en fonction de la largeur de cerne (LC) des quatre rayons (numérotés R ₁ à R ₄) des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la provenance de Sidi Bel Abbès (numérotés S ₁ à S ₂)	81
Figure IV.7. Variation des composantes microdensitométriques : densité maximale (DMax), densité maximale à 5% (DMax-5), densité minimale (DMin) et densité maximale à 5% (DMin-5) en fonction de la largeur de cerne (LC) des quatre rayons (numérotés R ₁ à R ₄) des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la provenance de Tiaret (numérotés T ₁ à T ₃)	82
Figure IV.8. Variation de la densité moyenne de cerne (DMoy) en fonction des années sur les quatre rayons des six arbres étudiés de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 cernes).....	88
Figure IV.9. Variation de la largeur de cerne (LC) en fonction des années sur les quatre rayons des six arbres étudiés de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 cernes)	90
Figure IV.10. Relations entre la densité et les propriétés mécaniques pour l'aubier et le duramen de chaque arbre (numérotés 1 à 3) des deux provenances (S et T)	98
Figure IV.11 Variations de la clarté L* (A), des composantes a* (B) et b* (C) et de l'écart-type de la clarté (D) avec la densité pour l'aubier, le duramen et le type mixte	115
Figure IV.12. Variations de la clarté L* (A), des composantes a* (B) et b* (C) et de l'écart-type de la clarté (D) avec la densité pour chaque arbre (numéro 1 à 3) de chaque provenance (S : Sidi Bel Abbès et T : Tiaret)	116
Figure IV.13. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. de l'arbre S ₁ et T ₁ dans le plan transversal "RT" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75	121
Figure IV.14. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. de l'arbre S ₁ et T ₁ dans le plan tangentiel "LT" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75	122
Figure IV.15. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. de l'arbre S ₁ et T ₁ dans le plan radial "LR" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75	123

Liste des tableaux

Tableau I.1. Association du <i>Pistacia atlantica</i> Desf. dans le domaine maghrébin steppique selon la littérature.	13
Tableau I.2. Association de <i>Pistacia atlantica</i> Desf. dans le Nord algérien.	14
Tableau I.3. Répartition et évolution des principales essences forestières en Algérie (superficie occupée en ha).	14
Tableau II.1. Classes de module d'élasticité longitudinal d'après les normes NF B 51 008 (septembre 1985).	25
Tableau II.2. Classes de durabilité naturelle du bois en fonction des pertes de masse (définies selon la norme NF-EN 113. Décembre, 1986).	28
Tableau II.3. Types de micro-organismes pouvant attaquer le bois et leurs conditions de croissance.	29
Tableau III.1. Situation géographique de la forêt domaniale de Tagdempt.	37
Tableau III.2. Données dendrométriques des arbres mesurés sur terrain.	40
Tableau III.3. Nombre de boîtes de Petri de chaque essai vis-à-vis des quatre champignons et pour les quatre modalités considérées : la provenance, le type du bois, la présence ou l'absence de grille et l'état hydrique.	62
Tableau IV.1. Valeurs des densités et des diamètres moyens des billons et des rondelles de souche de pistachier de l'Atlas.	74
Tableau IV.2. Valeurs maximales et minimales de l'évolution de la largeur e cerne (LC) avec les années sur les quatre rayons des six arbres de pistachier de l'Atlas.	76
Tableau IV. 3. Corrélations de la largeur de cerne (LC) avec le côté moelle par rapport au cerne (Distance (Moe-Cer)) et la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne (Distance (Eco-Cer)) pour la provenance de Sidi Bel Abbès (au seuil de 5%).	78
Tableau IV.4. Corrélations de la largeur de cerne (LC) avec le côté moelle par rapport au cerne (Distance (Moe-Cer)) et la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne (Distance (Eco-Cer)) pour la provenance de Tiaret (au seuil de 5%).	78
Tableau IV.5. Corrélations de la densité moyenne (DMoy) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des six arbres de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 observations).	83
Tableau IV.6. Effet arbre et effet provenance (à 5%) sur la densité moyenne (DMoy).	84
Tableau IV.7. Corrélations des variables microdensitométriques (DMax, DMax-5, DMin, DMin-5) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des trois arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès (473 observations).	85
Tableau IV.8. Corrélations des variables microdensitométriques (DMax, DMax-5, DMin, DMin-5) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des trois arbres de la provenance de la provenance de Tiaret (test réalisé sur 454 observations).	87
Tableau IV.9. Corrélations de la densité moyenne (DMoy) avec les années pour les quatre rayons de tous les cernes des six arbres de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 observations).	89
Tableau IV. 10. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation de la densité avec le module de Young, le module spécifique et le coefficient d'amortissement pour l'ensemble des échantillons et pour les trois types du bois de pistachier de l'Atlas de chaque provenance.....	99
Tableau IV.11. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation de la densité avec le module de Young, le module spécifique et le coefficient d'amortissement pour les trois types du bois de pistachier de l'Atlas et pour chaque arbre de chaque provenance.	100
Tableau IV.12. Valeurs moyennes et écart-types des propriétés physico-mécaniques étudiées sur les 72 éprouvettes prélevées des deux rayons de la rondelle 4 des trois arbres de pistachier de l'Atlas de chacune des deux provenances et résultats de l'ANOVA au seuil de 5 %.	101

Tableau IV.13. Valeurs moyennes (\pm écart type) des pertes de masse (PM en %) causées par les quatre champignons sur des éprouvettes des deux types de bois du pistachier obtenues pour chaque modalité et celles d'espèces de référence accompagnées des valeurs de l'humidité (mc en %).	108
Tableau IV.14. Résultats de la comparaison multiple des moyennes de la perte de masse des différents essais effectuée par le test de Tukey à $p = 0,05$	109
Tableau IV.15. Classes de durabilité naturelle du bois en fonction des pertes de masse (définies selon la norme NE113 (1996)).	110
Tableau IV.16. Valeurs moyennes des mesures de L^* , a^* et b^* effectuées sur les 72 éprouvettes issues des trois arbres de pistachier de l'Atlas des deux provenances et résultats de l'analyse des variances au seuil de 5 %.	114

Introduction générale

Introduction générale

L'Algérie est caractérisée par une grande diversité bioclimatique, qui donne lieu à une diversification des écosystèmes et des milieux naturels. En plus de leur rôle écologique et du patrimoine en biodiversité qu'ils représentent, ces écosystèmes sont à l'origine de ressources naturelles ayant un intérêt socio-économique d'une grande importance, aussi bien pour l'économie nationale que pour l'économie des populations locales. En dehors des éléments floristiques communs au bassin méditerranéen, on rencontre dans la partie Nord, des espèces de diverses origines : européennes, asiatiques, circumboréales, paléo-tropicales, etc. (Ozenda, 1983).

Dans la partie Sud, les massifs du Sahara central se composent de 3 éléments floristiques d'origines biogéographiques différentes : saharo-arabique, méditerranéenne confinée aux altitudes supérieures à 1500 m et tropicale localisée dans les oueds et les vallées environnantes. Sur les 70 taxons arborés que comporte la flore spontanée algérienne, 52 espèces résineuses et feuillues se rencontrent dans les zones montagneuses (Ozenda, 1954). En plus de ces espèces, la flore d'Algérie se caractérise par un taux d'endémisme assez remarquable (12,6 % soit 653 espèces sur les 3139 répertoriées) (Ozenda, 1954). On dénombre 07 espèces arborées à caractère endémique, dont 02 endémiques exclusives à l'Algérie : *Abies numidica* au Babors et *Cupressus dupreziana* au Tassili N'Ajers. Par ailleurs, l'endémisme spécifique au Sahara est particulièrement élevé avec 162 espèces endémiques, ce qui représente 25 % de la flore saharienne (Ozenda, 1954).

Bien que les forêts algériennes soient des forêts de protection (contre l'érosion, protection des versants, contre la désertification, etc.), il n'en demeure pas moins qu'elles ont un intérêt économique majeur avec des potentialités non négligeables. Elles contribuent à l'économie nationale et locale, où la possibilité annuelle globale, toutes catégories de bois confondues, s'élève à environ 1.200.000 m³ (FAO, 2006). En fait, elles sont une source d'emploi et de revenus pour la population.

L'utilisation des forêts pose à l'homme de multiples problèmes que la sylviculture tente de résoudre pour le mieux. Les buts recherchés sont essentiellement de trois sortes :

- ✓ Il s'agit de maintenir les peuplements forestiers pour assurer la sécurité des habitats humains et des cultures, car le rôle des forêts est un rôle de protection contre l'érosion, la sécheresse, les variations brusques de température et d'humidité, les avalanches, le déplacement des dunes, les irrégularités du régime hydrologique ;
- ✓ Il s'agit souvent d'offrir aux populations urbaines un milieu naturel de repos, de loisir, de détente et de satisfaction esthétique et psychologique ;
- ✓ Il s'agit enfin de produire des matières premières.

Nous ne nous occuperons que de ce but essentiellement industriel, mais il est bien certain que les autres buts sont au moins aussi importants et sont malheureusement toujours sous-estimés. A l'heure où les soucis d'accroissement de la productivité du bois (développement d'essences à croissance rapide, utilisation des billons de faible diamètre) se conjuguent à un effort d'amélioration

de la qualité (estimation de plus en plus fine des qualités technologiques du matériau,...) l'importance du bois du pistachier de l'Atlas n'est pas démontré.

Notons également, que l'intérêt que nous avons porté à cette étude vient de ce que nous ne connaissons pas les caractéristiques du bois de cette essence qui s'est pratiquement imposée d'elle-même puisqu'elle est marginalisée. Pour mieux appréhender ces caractéristiques et pour évaluer cet arbre, ce vide nous a amené à repenser la problématique dans laquelle les propriétés physiques et mécaniques ont été étudiées.

L'objectif principal de cette étude s'inscrit dans un cadre général de connaissance des pistachiers, de la gestion intégrée et de la mise en valeur de cette essence par une contribution appropriée. Aussi cette étude s'inscrit-elle dans le cadre d'un projet de recherches mené au "Laboratoire de Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation" de l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès, où il nous a semblé particulièrement intéressant d'évaluer la qualité du bois de pistachier de l'Atlas pour juger de son aptitude à un futur emploi technologique industriel.

Objectif du thème

Dans les zones arides et semi-arides du Nord de l'Afrique, la dégradation du patrimoine végétal devient très inquiétante. Dans ce genre d'écosystèmes, un grand nombre de phanérophytes se trouve actuellement à l'état épars ou de reliques et sont devenues des espèces menacées (Benhassaini H., et Belkhdja M. 2004). C'est le résultat de la conjugaison de nombreux facteurs anthropiques et écophysologiques. Ces arbres hors forêt font partie des ressources méconnues dans le monde, et ce n'est que récemment que les services environnementaux et autres ont commencé à y accorder de plus en plus d'attention (Benhassaini et *al.*, 2007 ; Bellefontaine et *al.*, 2001). Parmi les espèces arborées peuplant ces contrées, on cite le pistachier de l'Atlas.

La présente recherche a pour but de contribuer à la valorisation qualitative du bois d'une espèce ligneuse répandue en Algérie mais très peu étudiée. Il s'agit du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf. C'est un taxon vivace, rustique et endémique qui peut vivre plusieurs siècles en s'adaptant parfaitement aux conditions édaphiques et climatiques contraignantes de son habitat. C'est un arbre xérophile, dioïque et à tronc bien individualisé et cime hémisphérique. Cette essence fait partie des ressources méconnues dans le monde. En Algérie, cette espèce est dévalorisée et délaissée et rares sont les études consacrées à ce taxon. Son existence dans certains endroits sous forme de reliques isolées ou groupées, reflète sa position d'arbre de climax naturel et non pas de paraclimax monospécifique (Monjauze, 1980). Cet écodème, d'après la terminologie de Gillet (2000), nous informe sur la préexistence d'anciennes forêts claires ou de steppes arborées (Quézel et *al.*, 1999 ; Quézel, 2000). Les trois plus gros arbres de cette espèce ont été repérés depuis environ trois décennies par Monjauze (1980) dans la région de Sidi Bel Abbès, au nord ouest de l'Algérie, qui est précisément la zone où a été effectué notre échantillonnage. Nombre de coproduits et avantages sont tirés du pistachier de l'Atlas. Son bois est depuis longtemps utilisé comme bois d'œuvre artisanal et est considéré comme un excellent bois de chauffage et de carbonisation (Monjauze, 1980).

Dans le cadre de la valorisation de ces espèces et compte tenu de la marginalisation de *Pistacia atlantica*, une étude de faisabilité a mis en évidence les principales propriétés physiques et mécaniques de son bois. Cette étude a donc été conduite pour répondre à une question précise ; il s'agit d'apprécier le bois du pistachier de l'Atlas à travers ses propriétés. Pour atteindre notre objectif, nous avons choisi deux régions pilotes où le *Pistacia atlantica* est fréquent. Parallèlement, une analyse microdensitométrique et des essais mécaniques ont été étudiées. Dans le même cadre, nous nous sommes penchés également sur l'appréciation d'autres caractéristiques très importantes pour le bois, il s'agit de l'évaluation de la variabilité de sa couleur et de sa durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores. Dans ce contexte, il est important de souligner l'inexistence d'études sur ces volets de cette espèce. La présente contribution est la première du genre à aborder ces aspects. Ainsi nous avons complété cette partie par une étude anatomique du bois étudié. Les objectifs de notre travail sont les suivants :

- ✓ apporter aux sylviculteurs et aux futurs utilisateurs du bois du pistachier de l'Atlas une meilleure connaissance sur sa qualité en présentant les valeurs moyennes de tous les paramètres étudiés ;
- ✓ comparer la qualité du bois du pistachier de l'Atlas en relation avec les deux provenances phytoécologiques ;
- ✓ mettre en évidence quelques relations entre les différents paramètres étudiés.

Contexte de l'étude

D'un point de vue bibliographique, cette recherche constitue une première contribution à l'étude des propriétés physico-mécaniques du bois de pistachier de l'Atlas car, à notre connaissance, aucun travail n'existe sur ce sujet jusqu'à ce jour. Le pistachier de l'Atlas de la famille des Anacardiaceae, est l'une des rares espèces encore présente dans les régions arides et semi-arides, voir même sahariennes (Quézel et Santa, 1963). C'est l'espèce végétale la plus caractéristique de l'Atlas de l'Algérie, comme son nom l'indique (Quézel et Santa, 1963).

Les différentes analyses ont porté sur des échantillons prélevés à partir de billons, au nombre de six et provenant de deux régions différentes du point de vue bioclimatique en Algérie nord-occidentale : il s'agit de la région de Sidi Bel Abbès (trois arbres) et la région de Tiaret (trois arbres). Ces analyses ont concerné essentiellement, deux types de bois, l'aubier et le duramen. Les caractéristiques mesurées sont de cinq ordres :

1. Caractéristiques physiques :

- ✓ évolution radiale de la densité et de la largeur de cerne.
- ✓ analyse microdensitométrique ;

2. Caractéristiques mécaniques :

- ✓ relation de la densité avec le module d'élasticité longitudinale (module de Young) ;
- ✓ relation de la densité avec le module d'élasticité spécifique ;
- ✓ relation de la densité avec le coefficient d'amortissement.

3. Évaluation de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores.
4. Évaluation de la variabilité de la couleur du bois.
5. Caractéristiques anatomiques :
 - ✓ l'étude anatomique du bois.

Conduite de la recherche

Les différents aspects de la démarche et du travail expérimental pour atteindre cet objectif ont été organisés en deux parties, suivant un schéma classique :

Dans un premier temps, nous avons procédé à la présentation d'une synthèse bibliographique qui constitue le premier et le deuxième chapitre. Cette synthèse résume la monographie de l'espèce, la description et la situation des forêts en Algérie et présente quelques définitions du bois et ses propriétés physiques et mécaniques, objet du présent travail ainsi que quelques sources d'information de la littérature sur les propriétés du bois des deux principales catégories d'essences : les résineuses et les feuillues. Nous avons ensuite présenté une deuxième partie qui constitue le troisième et le quatrième chapitre dans lesquels les deux zones d'étude sont décrites et caractérisées d'une manière explicite. Elle a également été réservée à la présentation du matériel employé et les méthodes adoptées pour la réalisation du travail expérimental. Le quatrième chapitre a été consacré à la présentation et la discussion des résultats obtenus sur la base d'une analyse des relations entre propriétés mécaniques et propriétés physiques ; les résultats obtenus ont servi de base pour identifier et valoriser le bois de cette essence.

À la fin du présent travail, une conclusion générale est développée synthétisant les principaux résultats et leurs conséquences sur les efforts à fournir sur le plan de la valorisation de cette espèce.

Une partie des résultats obtenus dans le cadre de cette thèse a fait l'objet d'une première publication parue dans une revue scientifique internationale à comité de lecture dont les références sont : "Évaluation de la durabilité naturelle du bois de *Pistacia atlantica* Desf. du Nord de l'Algérie, 2015, revue Bois et Forêts des Tropiques, n°325 (3) : 1-10 p. " et d'une deuxième publication en cours de correction, soumise à la même revue.

Première partie

Synthèse bibliographique

Chapitre I

*Données bibliographiques sur l'espèce
et aperçu sur la forêt algérienne*

Chapitre I

Données bibliographiques sur l'espèce et aperçu sur la forêt algérienne

La thématique de notre travail implique une approche interdisciplinaire. Cette partie introductive concernera d'abord l'étude biologique et écobotanique de l'espèce, puis quelques points élémentaires sur le matériau bois et ses propriétés physiques et mécaniques (bois matériau, types de bois dans l'arbre, plan ligneux et agencement cellulaire, les propriétés de base du bois) sont exposés.

I.1. Historique de l'espèce

Pistacia atlantica appartient au genre *Pistacia*, faisant lui-même partie de la famille des Anacardiacees (dénommée aussi Térébinthacées) qui, en Afrique du Nord, comprend les deux genres : *Pistacia* et *Rhus* (Berner et al. 1977 in Reveal, 1999). L'appellation "Térébinthacée", est due au fait que tous les genres *Pistacia* exsudent une résine à forte odeur d'essence de térébinthe (Mitchell, 1992). Le genre *Pistacia* qui, étymologiquement est un nom générique donné par les romains dérive du persan "posta", par le grec "pistake" à rapprocher du nom syrien "foustok" (Mitchell, 1992). Ce genre originaire d'Asie centrale, a fait son apparition au tertiaire (Deysson, 1979). Il est à noter que le concept du genre "*Pistacia*" est dû à Linné (1737), qui lui subordonne en tant qu'espèces deux genres décrits par Tournefort (1707), le lentisque ("derow" ou "tadist") et le térébinthe ("bereicya" ou "tichit"). En 1753, Linné reconnaît dans l'espace planétarium, cinq autres espèces. Cependant, il est signalé que bien avant, la culture du pistachier était connue et maîtrisée par les andalous. En effet, d'après le livre de l'agriculture d'Ibn El Awam (1415) cité par Makhlouf (2005), il existe deux espèces, une "délicate" et une autre "forte". L'auteur fait certainement allusion au pistachier vrai et au pistachier térébinthe (Berrahou et al., 2005). Une étude monographique du genre *Pistacia* faite par Zohary (1952) montre que ce genre comprend 4 sections et 11 espèces, néanmoins, en 1984 Pesson et al. montrent que le genre *Pistacia* comprend une vingtaine d'espèces bien qu'il soit originaire du Moyen-orient ou de l'Asie centrale. *Pistacia vera* est la seule espèce produisant des fruits comestibles.

Le pistachier de l'Atlas, connu sous le nom du "bétoum" en arabe, "iggh" et "tisemlal" en berbère, est l'espèce sauvage la plus caractéristique de l'Atlas de l'Algérie comme son nom l'indique, la plus voisine du térébinthe, (Burte, 1992). Le mot de "bétoum" est un substantif arabe collectif dont le singulier est botma, betouma ou btouma ou encore boutmaïa en Afrique du Nord et boutmela au Proche-orient (Monjauze, 1980). C'est une plante à odeur simplement résineuse (Quezel et Santa, 1963), C'est un bel arbre à frondaison hémisphérique (cime ample et touffue) (Figure I.1 et I.2). Il semble que *Pistacia atlantica* ait fait, dans le passé, l'objet d'une confusion assez fréquente, bien que la formulation la plus reconnue de l'espèce datât de la publication de "Flora atlantica" par le grand explorateur du Maghreb, le botaniste français René Louiche Desfontaines en 1798 qui l'a décrit pour la première fois. Même Lapie, botaniste et phytogéographe, semble en avoir mal distingué l'originalité dans sa thèse de 1909 sur la Kabylie. Tout en sachant le distinguer, il l'appelait "térébinthe". Même si Battandier et Trabut (1888) ont bien séparé, *Pistacia terebinthus* et *Pistacia atlantica*, ils sont revenus

dans leur conspectus de 1902 à faire du second une sous-espèce du premier (Monjauze, 1980). On pourrait ajouter que plus tard, en 1924, en collaboration cette fois avec Maige, Lapie écrivait encore que le bétoum était une variété puissante de Térébinthe, à feuille plus petites, on devrait dire d'ailleurs redécouverte et non pas découverte, puisqu'en 1867, Reboud, avait signalé le bétoum dans l'oued Mzab, près de Ghardaïa (Monjauze, 1980).



Figure I.1. Aspect général d'un peuplement de pistachier de l'Atlas
(Cliché Boudouaya M., 28/05/2015. région de M'cid, wilaya de Sidi Bel Abbès)



(1)



(2)



(3)



(4)

Figure I.2. Aspect général d'un arbre du pistachier de l'Atlas, la photo (4) représente l'un des trois plus gros bétoums cité par Monjauze en 1980 à Sfifef (wilaya de Sidi Bel Abbès) (Cliché Boudouaya M., 28/05/2015)

I.1.1. Aire de répartition de pistachier

I.1.1.1. Aire de répartition du genre *Pistacia* dans le monde

Le genre *Pistacia* a une remarquable répartition holarctique, comprenant les archipels atlantiques (Canarie, Madère), la Méditerranée, la Chine, la Mexique (Boudy, 1952). L'aire de répartition du genre *Pistacia* est discontinue (Boudy, 1955). On compte quatre régions biogéographiques : méditerranéenne, irano-touranienne, sino-japonaise et mexicaine (Seigue, 1985). Il comprend 11 espèces dont 5 sont typiquement méditerranéennes : *Pistacia lentiscus* L. (derow), *Pistacia terebinthus* L. (boutiche), *Pistacia palaestina*, *Pistacia vera* L. (foustok) et *Pistacia atlantica* Desf. (bétoum) (Gatin, 1975 in Kaddour Hocine, 2008) (Figure I.3).

En Algérie, ce genre est représenté par 4 espèces autochtones, en l'occurrence, *Pistacia atlantica* Desf., *Pistacia lentiscus* L., *Pistacia terebinthus* L., *Pistacia vera* L., (Quezel et Santa, 1963). Le genre *Pistacia* présente en Berbérie les espèces suivantes : *Pistacia atlantica* Desf., *Pistacia lentiscus* L., *Pistacia terebinthus* L. (Boudy, 1952).

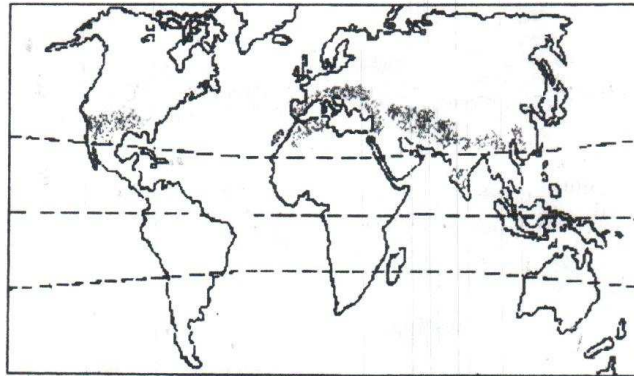


Figure I.3. Aires de répartition du genre *Pistacia* dans le monde.
Échelle : 1/20 000 000 (in Benhassaini, 1998)

I.1.1.2. Aire de répartition de *Pistacia atlantica* Desf. dans le monde

Selon Boudy (1950) le bétoum est un élément méditerranéen commun en Berbérie, que l'on trouve aussi en Moyen-orient : Chypre, désert et steppe de Syrie, Iran. Le bétoum colonise de façon diffuse un territoire considérable centré sur les pays méditerranéens à saison sèche et chaude bien marquée. Il est le plus ubiquiste des arbres du Nord de l'Afrique et du Proche-orient (Monjauze, 1980). L'aire de *Pistacia atlantica* s'étend depuis les îles Canaries à l'Ouest jusqu'au Proche-orient vers l'Est. On le retrouve aussi en Grèce, en Turquie, désert et steppe de Syrie en Iran et au Pakistan (Burte, 1992). Il est probablement originaire d'Asie centrale (Whitehouse, 1957). Par contre, Somon (1987), note que le pistachier de l'Atlas est originaire du Nord africain. C'est une essence disséminée, de caractère méditerranéen, ayant une aire botanique très étendue commune en Afrique du nord (Boudy, 1952). On le rencontre dans toutes les forêts chaudes d'Afrique du Nord endémiques (Monjauze, 1968). Quezel et Santa (1963) et Ozenda (1983) sont unanimes pour dire que le bétoum est un élément endémique du Nord africain où il se rencontre dans le Sahara septentrional. Dans les

Dayas, le pistachier peut couvrir de vastes étendues de part et d'autre de la chaîne montagneuse de l'Atlas, partant du Sud-ouest du Maroc et allant jusqu'aux frontières Nord du Maroc avec l'Algérie (Abou Salim et Kalli, 1998) (Figure I.4).

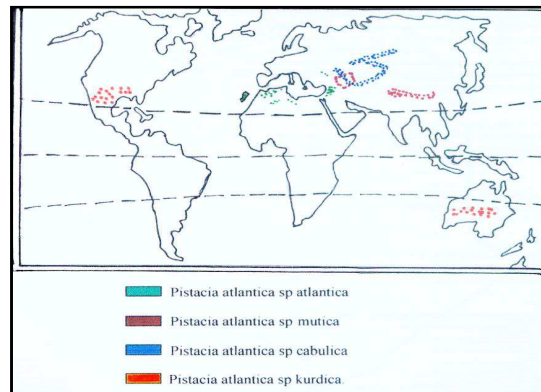


Figure I.4. Aire de répartition des sous espèces de *Pistacia atlantica* dans le monde
Échelle : 1/20 000 000 (in Benhassaini, 1998)

I.1.1.3. Aire de répartition de *Pistacia atlantica* Desf. en Algérie

Le pistachier de l'Atlas est assez commun dans toute l'Algérie. Il est rencontré à l'état dispersé sur les Hauts plateaux, le Sahara septentrional, dans les régions des Dayas au pied de l'Atlas saharien marocain et algérien et même dans le Hoggar (Ozenda, 1954). On trouve le pistachier de l'Atlas dans l'Atlas mitidjien (Brichet, 1931). Il existe en petits peuplements dans les Hauts plateaux au niveau des Dayas, dans les parties les mieux arrosées de l'Atlas saharien où il peut atteindre 2000 mètres d'altitude (Quezel, 1965). Il se trouve à l'état disséminé dans le Sahara (avec une prédilection pour les lieux arides) région du Hoggar, Djelfa (Ain Oussera, Messaâd), Laghouat (partie Sud) (Monjauze, 1980; Seigue, 1985). (Figure I.5).

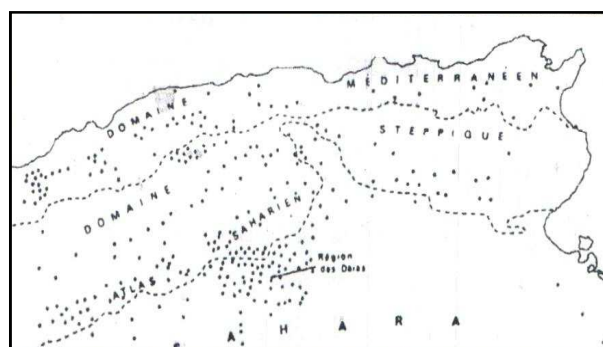


Figure I.5. Répartition du pistachier de l'Atlas en Algérie et en Tunisie
(Selon Monjauze, 1968)

I.1.1.4. Aire de répartition de *Pistacia atlantica* Desf. dans la partie occidentale d'Algérie

Dans le Nord algérien, le bétoum se rencontre à l'état de pieds isolés et épais dans la région de Maghnia, Sabra et jusqu'à la ville de Tlemcen où la région est classée favorable pour la culture du pistachier de l'Atlas (Khelil et Kellal, 1980; Benhassaini, 1998), il devient plus dense (100 pieds/ha)

dans certains Talwegs à l'entrée de la localité d'Ain Fezza, Ain Tellout et Chetouane puis redevient épais à l'entrée de Ben Badis (Khelil et Kellal ,1980). En transitant par la plaine de la Makerra et jusqu'à la commune de Mustapha Ben Brahim (wilaya de Sidi Bel Abbès), le pistachier disparaît complètement, ensuite sa présence reprend de cette dernière localité jusqu'à la région de Bouhanifia (wilaya de Mascara) en passant par la région de Sfisef (wilaya de Sidi Bel Abbès). Dans le M'cid, il forme des peuplements plus au mois denses, de même qu'à Sidi Salem et Ain Fekkan dans la wilaya de Mascara (Khelil et Kellal ,1980).

I.1.2. Statut taxonomique de l'espèce

La reconnaissance des principales espèces végétales implique une connaissance précise de leur classification (Crète, 1965). Elle se classe comme suite :

Embranchement :	Phanérogames
Sous-embranchement :	Angiospermes
Classe :	Dicotylédones
Sous-classe :	Dialypétales ou <i>Rosidae</i>
Série :	Disciflores
Sous- série :	Diplostémones
Ordre :	<i>Terebinthales</i> ou <i>Sapindales</i> (APG II, 2003)
Famille :	Anacardiées, Térébinthacées ou Pistaciacées
Sous-famille :	Anacardiées ou <i>Pistacioideae</i> (Gadek et al., 1996)
Genre :	<i>Pistacia</i>
Section :	<i>Terebinthus</i> (APG, 1998)
Espèce :	<i>Pistacia atlantica ssp. atlantica</i> Desf.
Sous-espèce :	<i>atlantica</i>
Nom commun :	Pistachier de l'Atlas
Nom vernaculaire :	Bétoum, Botma ou Iggh en berbère

I.1.3. Caractères botaniques de l'espèce

C'est un arbre de 3 à 5 mètres, à écorce lisse et sombre, atteignant 1 mètre de diamètre avec une cime volumineuse et arrondie (Boudy, 1950). Le tronc de pistachier de l'Atlas est généralement court, pouvant atteindre 20 mètres de hauteur pour les vieux sujets (Quezel et Santa, 1963).

I.1.3.1. Système racinaire

Le pistachier de l'Atlas est connu par son système racinaire dur, pivotant avec de nombreuses racines latérales à régénération végétative (Ait Radi, 1979). Selon Gadiri et Righi (1993), le système racinaire du pistachier puise l'eau à 6 mètres de profondeur et bien au-delà.

I.1.3.2. Feuilles

Les feuilles sont marcescentes, composées, alternées et pennées de folioles impaires au nombre de 3 à 11, lancéolées de 2 à 5 cm de longueur sur 1 cm de largeur à l'âge adulte, de couleur vert pâle (Somon, 1987) (Figure I.6).



Figure I.6. Feuilles composées du pistachier de l'Atlas

(Cliché Boudouaya M., 28/05/2015)

I.1.3.3. fleur et floraison

C'est un arbre dioïque. Il est difficile d'en distinguer le sexe avant la première floraison (Crane et Forde, 1974). Les fleurs sont apétales et rougeâtres en grappes terminales pour les mâles et axillaires pour les femelles, de 5 à 10 cm de haut (Lapie et Maige, 1924; Crète, 1965), elles sont réunies en grappes sur des pieds différents, unisexuées, dioïques (Ozenda, 1983). Les fleurs mâles sont disposées en grappes terminales composées de 450 à 500 fleurs apétales. Chaque fleur possède un calice de 3 à 5 sépales, un androcée composé de 5 à 8 étamines opposées (Pesson et Louveaux, 1984). Les fleurs femelles sont réunies en grappes composées de 190 à 260 fleurs. Chaque fleur présente un très petit calice composé de 3 à 5 sépales entourant le gynécée formé de 3 carpelles soudés, et qui est surmonté de 3 styles libres et pourpres. L'ovule est unique (Benhassaini, 1998). La floraison a lieu généralement en mars-avril (Lapie et Maige, 1924; Crète, 1965).

I.1.3.4. Fruit

Le fruit est une drupe sèche, un peu charnue, ovoïde, petite comme un pois et rougeâtre puis virant au bleu (Monjauze, 1980) (Figure I.7).



Figure I.7. Les fruits de *Pistacia atlantica* Desf (Cliché Boudouaya M., 28/05/2015)

I.1.3.5. Graines

Selon Chaba et *al.* (1991), le nombre est en moyenne de 10.000 grains /Kg. La graine de *Pistacia atlantica* est riche en nutriments et en sels minéraux (Larouci-Rouibat, 1987).

I.1.3.6. Port

Le houppier est généralement en forme de boule surbaissé pour les vieux sujets.

I.1.3.7. Écorce

Quand à l'écorce, elle est d'abord rouge, puis grisâtre assez clair avant de devenir rhytidome dur et crevassé, tessellé en profondeur (Monjauze, 1980). Elle est lisse à l'âge jeune, squameuse à un âge très avancé (Djellali, 2006).

I.1.3.8. Bois

On peut achever la description du bétoum en rappelant que selon Monjauze (1980), le bois du bétoum est lourd, peu résilient, de bonne conservation. C'est un bois d'artisanat et bien entendu, un bois excellent pour le chauffage et la carbonisation. D'après Abdelaziz et *al.* (2005), il constitue un apport en fourrage considérable pour alimentation de bétail.

I.1.4. Biologie de l'espèce

I.1.4.1. Vitalité

Le pistachier de l'Atlas a, du fait des conditions climatiques de sa station naturelle, une croissance très lente et une très grande vitalité (Boudy, 1950). Le rythme de croissance est faible en janvier (2 cm/ semaine), en février le rythme s'accélère et en mai l'allongement atteint en moyenne 50 cm de long (Chaba et *al.* 1991). Selon Monjauze (1980) les trois plus gros bétoums se trouvaient à Sfisef, dans une région qui en comptait avant des milliers, entre Mascara, Sid Bel Abbès et Saïda, ces arbres avaient de 18 à 20 mètres de haut et leur tige atteignait 2 mètres de diamètre sous branche, à hauteur de poitrine pour un âge qui ne devait pas dépasser 300 ans, peut être bien moins.

I.1.4.2. Germination

La germination du pistachier de l'Atlas est influencée par certains facteurs comme : l'endocarpe, la température, le substrat et la levée de dormance de la semence (Boudy, 1950). Les valeurs rapportées par la littérature varient selon les cultivars et les régions, elles sont comprises entre 200 et 1000 heures de froid inférieur à 7°C (Crane et Iwakiri, 1981 ; Nahlaoui, 1982). Les semences du bétoum germent, en général, bien après une stratification au froid humide (2 - 4°C) (Frutos et Barone, 1988 ; Vargas et *al.*, 1997). Cependant, un trempage des graines avant l'ensemencement dans l'acide sulfurique augmente d'une manière significative le taux de germination (Ayfer et *al.*, 1961 ; Crane et Forde, 1974 ; Kaka et *al.*, 1992).

I.1.4.3. Régénération

La régénération naturelle du bétoum est très mal connue et a lieu dans des conditions qui n'ont pas encore été bien définies (Boudy, 1950). Il est très probable qu'elle s'opérait sous la protection des touffes de jujubiers au milieu desquelles le jeune plant poussait jusqu'à ce qu'il put émerger lui-même (Boudy, 1955). Selon Baskin et *al.*, (2000) la dormance des graines est due principalement à la dureté

des valves et l'imperméabilité de l'endocarpe à l'eau et par conséquent elle empêche la poussée racinaire (Shuraky et Sedley, 1996 ; Polito et Pinney, 1999) , Chraa (1988) a indiqué qu' il est possible de régénérer naturellement le pistachier de l'Atlas en utilisant le semis direct par l'utilisation des graines pré-germées.

I.1.5. Ecologie de l'espèce

Le bétoum est un arbre vigoureux, l'une de ses principales caractéristiques est sa très grande résistance à la sécheresse grâce à son système racinaire très développé (Spina et Pennisi, 1957 ; Woodroof, 1979). Il se développe dans des stations au plus faible indice d'évapotranspiration, c'est-à-dire où la contrainte de l'eau est la plus forte. Cette plasticité exceptionnelle vis-à-vis de la sécheresse atmosphérique pourrait être son caractère principal, mais il n'est pas moins indifférent à la nature du sol et il peut occuper dans son aire botanique les situations les plus extrêmes (Monjauze, 1980).

I.1.5.1. Pluviométrie

Il se contente d'une tranche pluviométrique très faible allant jusqu'à 150 mm, cependant, la production reste étroitement liée à la quantité d'eau disponible (Boudy, 1952). En réalité c'est l'isohyète 200 à 250 mm qui lui convient le mieux (Boudy, 1952). Alyafi (1979) note que le pistachier de l'Atlas semble également pousser sous une tranche pluviométrique allant de 250 à 600 mm par an. Notant aussi que, Bricet (1931) a signalé que le bétoum ne supporte pas l'humidité atmosphérique présente dans les régions montagneuses, l'air salin et les irrigations abondantes.

I.1.5.2. Température

Le bétoum est un arbre très résistant aux hautes températures, il a une grande amplitude thermique allant d'une température très basse de l'ordre de 5°C parfois même à -12°C dans la région de Djelfa, jusqu'à une température très élevée de + 49°C avec un maximum de 52°C (Pesson et Louveaux, 1984). La moyenne des maxima de température recommandée par Maggs (1973) est de l'ordre de 32°C.

I.1.5.3. Altitude

Le développement optimal du pistachier de l'Atlas serait à une altitude comprise entre 600 et 1200 mètres (Belhadj, 1999). Selon Monjauze (1980) sur l'ensemble de l'Afrique du Nord, il peut atteindre des altitudes extrêmes allant jusqu'à 1500 à 2000 mètres. Par ailleurs, Alcaraz (1970), note que le pistachier de l'Atlas se rencontre à une altitude de 45 mètres dans la région de Mohammédia (Ouest algérien) et jusqu'à une altitude de 590 mètres à Mascara.

I.1.5.4. Sol

Le bétoum est très peu exigeant au point de vue édaphique. Il s'accommode de tous les sols sauf des sols sableux, il préfère les terrains argileux et les alluvions des plaines, il se trouve assez rarement sur roche calcaire en montagne sèche et se cantonne dans les dépressions des vallées où la

nature du sol est de type gypso-calcaire (Boudy, 1950). Bien que le bétoum se trouve planté sur une large gamme de sols, il est réputée être gypso-calcicole préférant des sols profonds et bien drainés (Woodroof, 1979). Sa croissance est très favorable sur les rendzines et les rankers des régions montagneuses (Alyafi, 1979). Il faut également noter que le pistachier de l'Atlas tolère des conditions de salinité et peut ainsi valoriser de larges zones des régions arides et semi-arides où le problème de salinité se pose avec acuité (Whitehouse, 1957).

I.1.6. Cortège floristique du pistachier de l'Atlas

I.1.6.1. Associations végétales du bétoum dans le domaine maghrébin steppique

Dans sa description de la végétation Nord-africaine, Boudy (1955) a signalé la présence du bétoum sous forme de brousse associé à *Zizyphus lotus* et *Olea europea* dans l'étage semi-aride. Dans ce même étage bioclimatique, Ozenda (1983), Djebaili (1978 ; 1984) et Bouzenoune (1984) complètent la liste du cortège floristique en incluant des espèces appartenant surtout à la strate herbacée (Tableau I.1).

Tableau I.1. Association du *Pistacia. atlantica* Desf. dans le domaine maghrébin steppique selon la littérature

Auteurs	Boudy (1955)	Ozenda (1983)	Djebaili (1984)	Bouzenoune (1984)
Domaine Maghrébin Steppique et Saharien	<i>Zizyphus lotus</i> , <i>Quercus ilex</i> , <i>Acacia gummifera</i> , <i>Acacia radiana</i> , <i>Argania spinosa</i>	<i>Zizyphus lotus</i> , <i>Stippa tenacissima</i> <i>Tamarix gallica</i> <i>Myrtus communis</i> <i>Nerium oleander</i>	<i>Zizyphus lotus</i> , <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Stippa tenacissima</i>	<i>Zizyphus lotus</i> , <i>Stippa tenacissima</i> , <i>Lygeum spartum</i> , <i>Artemisia herba alba</i>

La région des Hauts plateaux du domaine maghrébin steppique est représentée aussi par la composante alfa, sparte et armoise (Boudy, 1955 ; Harche, 1985). La même association est confirmée entre le 33°-34° de l'Ouest algérien surtout vers El Aricha et Fortassa Gharbia (Bouzenoune, 1984). Dans l'étage aride et saharien, Ozenda (1982) reconnaît que le jujubier forme des brousses dégradés sous le pistachier de l'Atlas, cette même compagnie se retrouve dans les régions des Dayas (Greco, 1966). Le pistachier de l'Atlas régénère et pousse toujours à l'intérieur du *Zizyphus lotus*. Dans les hauts plateaux et l'Atlas saharien, les cultures de l'olivier et le pin d'Alep paraissent être favorables à la culture du pistachier de l'Atlas (Woodroof, 1979).

I.1.6.2. Associations végétales du bétoum dans le Nord algérien (faciès montagnards)

Dans le Tell la présence du bétoum en association avec le thuya est signalée dans les maquis et forêts claires dans le faciès semi-aride. Par contre est exclu dans son faciès subhumide (Monjauze, 1968) (Tableau I.2). Le bétoum apparaît sur les marges en climat sub-humide uniquement dans les groupements du chêne liège (Benhassaini, 2000).

Tableau I.2. Association de *Pistacia atlantica* Desf. dans le Nord algérien

Auteurs	Boudy (1955)	Djebaili (1984)
Tell Faciès Montagnard	<i>Quercus ilex</i> , <i>Juniperus phoenicea</i> , <i>Tetraclinis articulata</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> , <i>Zizyphus lotus</i>	<i>Pinus halepensis</i> , <i>Olea europea</i> , <i>Tetraclinis articulata</i> , <i>Ceratonia siliqua</i> , <i>Juniperus phoenicea</i>

I.1.7. Utilisation du pistachier de l'Atlas

En raison de sa rusticité, de sa résistance à la sécheresse, de ses faibles exigences pluviométriques, le bétoum pourrait être employé comme essence de reboisement dans les stations les plus sévères, à basses et à moyennes altitudes. Il peut être considéré comme une essence précieuse pour les régions déshéritées (Boudy, 1950). Par son système racinaire très puissant, il peut participer à la fixation des sols en terrains avec des pentes fortes et peut donner une production tous les deux à trois ans (Oukabli, 2005). De plus c'est un excellent porte-greffe du pistachier vrai (Monastra et al., 1997). Le pistachier se distingue aussi par l'exsudation de résine. Jadis, cette résine était utilisée par les pharaons pour l'embaumement de leurs momies et par les anciens habitants de Zagros (Iran) pour la conservation de leurs denrées alimentaires notamment le vin pour qu'il ne tourne pas au vinaigre (McGovern et al., 1996). Elle est également utilisée comme colle (Chief, 1982). L'huile du fruit est utilisée pour la saponification, pour l'éclairage et pour préparer des cosmétiques adoucissants (Chief, 1982). Une étude récente montre que les semences broyées de pistachier de l'Atlas utilisées comme aliment de volailles a donné des résultats intéressants sur leur croissance (Saffarzdeh et al., 2000).

I.2. Forêt algérienne et son écologie

D'après diverses études menées par : Boudy (1955) ; Seigue (1985) ; Ghazi et Lahouati (1997) ; RNE (2000) et DGF. (2005) les principales essences forestières que l'on trouve dans les forêts algériennes sont, récapitulées comme suit dans le tableau I.3.

Tableau I.3. Répartition et évolution des principales essences forestières en Algérie (superficie occupée en ha) (DGF, 2005)

Essences forestières	Boudy (1955)	Seigue (1985)	Ghazi et Lahouati (1997)	RNE (2000)	DGF (2005)
pin d'Alep	852 000	855 000	800 000	881 000	881 000
chêne liège	426 000	440 000	463 000	229 000	230 000
chêne vert	679 000	680 000	354 000	219 000	108 000
chênes zeen et afarès	-	67 000	65 000	48 000	48 000
genévriers	279 000	-	217 000	-	-
thuya de Berbérie	157 000	160 000	143 000	-	-
cèdre de l'Atlas	45 000	30 000	12 000	16 000	16 000
pin maritime	-	12 000	38 000	32 000	31 000
sapin de Numidie	-	300	-	-	-
maquis	780 000	-	-	-	902 000

Actuellement Le patrimoine forestier couvre près de 4,15 millions d'hectares mais seuls 1,3 millions représentent la vraie forêt naturelle, correspondant à 11,5 % du territoire national, soit un taux de boisement de 16,4% pour le Nord de l'Algérie et de 1,7 % seulement si les régions sahariennes sont également prises en considération. Il est constitué de plusieurs écosystèmes à base d'essences

principales réparties entre 70 % de résineux et 30 % de feuillus (FAO, 2006 (a)). La forêt algérienne se trouve confrontée à diverses problématiques qui sont le plus souvent l'œuvre ou résultat de l'intervention humaine, en effet les principales contraintes sont :

- Les incendies ; les statistiques des services des forêts démontrent que durant la période s'étalant de 1996 jusqu'à 2005, une superficie de l'ordre de 246 97794 ha de forêts, broussailles, alfa et autres a été incendiée (Direction générale des forêts, 2005). Zerrouk, (2006) a signalé que la situation sécuritaire du pays a mené aussi à la destruction massive d'une superficie forestière importante.
- Le surpâturage est généralement considéré comme une cause essentielle de la dégradation des écosystèmes naturels (Le Houérou, 1968). En Algérie, les éleveurs préconisent le pâturage libre du bétail, sans limitation de la densité de charge et sans clôtures (Montero et Canellas, 1998). En effet, et comme le signale Benabdeli en 1996, nos forêts sont souvent sollicitées par les pasteurs comme source d'appoint pour l'alimentation du bétail.
- Le défrichement, en effet cette opération de déforestation des forêts, est sensé répondre à un besoin en terres d'agriculture cultivable, néanmoins, ceci provoquant ainsi un déséquilibre écologique pour l'écosystème forestier, ce qui est en soit une menace pour l'existence d'espèces animales et végétales (MATE, 2000).

I.2.1. Secteur économique forestier algérien

Bien que les forêts algériennes soient des forêts de protection, (contre l'érosion, protection des versants, désertification, etc.), il n'en demeure pas moins qu'elles ont un intérêt économique majeur avec des potentialités importantes non négligeable (FAO, 2006 (a)). Les forêts productives ne couvrent qu'un tiers du patrimoine forestier national, soit 1.400 000 ha. Elles sont constituées de peuplements de pin d'Alep, de chêne liège, de chêne zéen et afarès, de cèdre, de pin maritime et d'eucalyptus (FAO, 2006 (b)). De part sa nature, et des espèces qui la composent, la forêt algérienne, qu'il faut le souligner, est à caractère méditerranéen, ne fournit pas une grosse quantité de bois (200.000 m³), ce qui est évidemment une valeur très faible. Ceci implique que le pays a recours aux importations pour couvrir ses besoins (1.300.000 m³). Toutefois, des efforts importants ont été consentis et continueront de l'être pour mettre en place des plantations à potentiel productif important. Ceci permettra dans un avenir pas trop lointain d'augmenter le taux de couverture des besoins du pays en bois (Mezali, 2003 in Kouadria, 2012).

I.2.2. Le bois

La possibilité annuelle globale, toutes catégories de bois confondues, s'élève à environ 1.200.000 m³ (FAO, 2006 (c)). Selon la même source (FAO, 2006 (c)) l'accroissement moyen annuel s'élèverait à peine à 1 m³/ha/an si l'on considère la superficie occupée par les forêts productives. Les peuplements de pin d'Alep renferment plus de 80% de la possibilité totale annuelle. Le reste est fourni par les eucalyptus, le chêne zéen et le chêne afarès (FAO, 2006 (c)).

I.2.3. Secteur d'utilisation du bois du pistachier de l'Atlas

Les emplois du bois du pistachier de l'Atlas restent limités, il a été et est utilisé de façon traditionnelle dans divers domaines, on en fait surtout de la vaisselle, confection des terrines, des cuillères, etc. Son bois est utilisé comme bois d'œuvre et aussi de chauffage, il est utilisé comme combustible, il flambe bien, son charbon est ordinaire (Benhassaini, 2000).

I.2.4. Etat du pistachier de l'Atlas en Algérie

Le pistachier de l'Atlas en Algérie, plus particulièrement dans les zones steppiques, est un arbre spontané, où l'Homme de la région n'intervient que par des récoltes anarchiques chaque année, surtout les services des forestiers ne mettent plus en évidence des projets concernant la lutte contre la dégradation intense des superficies occupées par ces essences, à l'exception de ces dernières années (Ghellab, 2000 *in* Sbaâ, 2000). Cette espèce est délaissée et des efforts doivent être déployés pour la réhabiliter (Benhassaini et Belkhodja, 2004).

La région méditerranéenne actuelle peut être définie par des critères floristiques évidents, puisque environ 50 % des quelques 25000 espèces (Quezel, 1974) voir 28000 espèces et sous-espèces (Greuter, 1995), présentes dans la zone climatiquement méditerranéenne (Emberger, 1930 (a) ; 1930 (b)) et, à plus forte raison, dans la zone isoclimatique méditerranéenne (Daget, 1977) sont endémiques. Cette région écologique et biogéographique représente une des portions les plus riches du point de vue floristique des zones émergées (Medail et Quezel, 1996) et certaines portions de celle-ci répondent parfaitement à la définition des *Hotspots*¹ définie par Myers (1988) et représentent donc des centres majeurs d'endémisme où les menaces de déstabilisation sont actuellement très élevées.

I.3. Conclusion

Face à la problématique actuelle, qui est le développement durable du patrimoine forestier en Algérie, il est important de trouver des alternatives de protection et de conduite durable, en aménageant les forêts algériennes et en faisant face aux diverses problématiques identifiées de sorte qu'il puisse y avoir une politique réelle de développement à long terme des forêts algériennes. En effet, le développement du pistachier de l'Atlas permettra la protection des terres dénudées, la stabilisation des sols et l'augmentation des ressources des zones semi-arides.

Cet aperçu bibliographique confirme que le pistachier de l'Atlas comme essence le plus ubiquiste des arbres du nord de l'Afrique et du Proche-orient, et le seul arbre de Berbérie qui s'accommode de l'étage climatique aride et qui peut vivre dans les conditions écologiques les plus sévères, malgré sa marginalisation et sa soumission à une forte pression humaine, offre une potentialité forestière très importante, par sa rusticité, sa résistance aux agents de destruction.

¹ Hotspot : Zone biogéographique possédant une grande richesse de biodiversité particulièrement menacée par l'activité humaine. On dénombre actuellement 35 hotspots dans le monde (<http://www.futura-sciences.com/magazines/sciences/infos/dico/d/geographie-hotspot-4292/>).

Chapitre II

Revue bibliographique sur le bois

et ses propriétés

Chapitre II

Revue bibliographique sur le bois et ses propriétés

II.1. Définition et description du matériau "bois"

Nous ne présentons ci-dessous que les quelques bases et définitions¹ qui seront utiles à la compréhension de la suite du manuscrit, et les précisions nécessaires à chaque échelle seront introduites, au cours du texte, à chaque fois qu'elles auront une implication pour les propriétés physiques et mécaniques considérées. Nous commencerons par quelques brèves définitions du bois puis de ses propriétés physiques et mécaniques, celles qui seront étudiées dans le présent travail. Nous présenterons ainsi les travaux effectués dans ce domaine. Les informations de la littérature concernant des points précis des thématiques abordées dans ce travail seront plus détaillées dans les paragraphes concernés, en les confrontant à nos résultats expérimentaux.

Depuis la préhistoire, l'Homme a utilisé le bois pour sa beauté et son faible coût autant dans le commerce et l'art que dans la construction et l'ameublement. Ce noble matériau, prisé pour son côté esthétique, présente plusieurs avantages uniques tels sa grande disponibilité, son renouvellement permanent et son utilisation écologique positive (Bruce Hoadley, 2000). Ainsi, les connaissances sur le bois découlent de l'expérience de nos ancêtres. Aujourd'hui, cette connaissance pratique est de plus en plus soutenue par des recherches scientifiques qui permettent de développer la "science du bois". La science du bois se veut pluridisciplinaire et nécessite une collaboration étroite entre des disciplines scientifiques telles que l'anatomie du bois, la physique, la mécanique et la chimie pour permettre l'évolution de l'ensemble des technologies liées aux différentes phases de traitement du bois (Navi et Heger, 2005).

II.1.1. Plan ligneux du bois

C'est l'arrangement des cellules du bois et la croissance de l'arbre en hauteur et radialement qui confère au bois ses propriétés orthotropiques, Les éléments constitutifs du bois sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à un axe de symétrie matérialisé par la moelle. (Figure II.1). Ainsi, Le bois dans l'arbre est caractérisé par deux plans de symétrie matérielles RL et RT et trois directions privilégiées L, R et T :

- la direction longitudinale ou axiale (L), parallèle à l'axe du tronc, c'est-à-dire dans la direction des fibres ;
- la direction radiale (R), perpendiculaire à l'axe du tronc et passant par le centre ;

¹ Pour une information plus détaillée, on pourra se reporter notamment aux cours de (Keller, 1994) pour ce qui concerne l'origine biologique et l'anatomie ; aux atlas d'identification de bois tropicaux basés sur leurs caractéristiques anatomiques (Détienne et Jacquet, 1983 ; Normand et Paquis, 1976 ; et autres). Plus généralement une introduction au matériau bois peut être trouvée, par exemple, dans l'ensemble du volume « le bois, matériau d'ingénierie » (Jodin, 1994). De même pour ce qui concerne les notions d'aubier/duramen et d'extractibles, une synthèse peut être consultée dans (Hillis, 1987).

- la direction tangentielle (T), perpendiculaire à l'axe du tronc et tangente aux cernes d'accroissement.

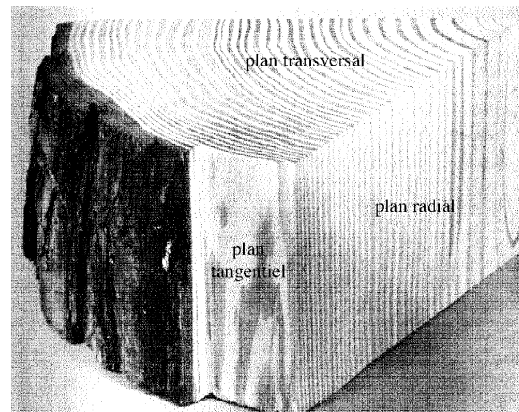


Figure II.1. Les trois sens de lecture du plans ligneux : plan transversal, plan tangentiel, plan radial (*in* Bourreau, 2011)

Ce plan ligneux est constant pour une espèce donnée, est généralisable pour une famille ou un groupe d'espèces et présente des analogies avec les espèces voisines (Keller, 1994). Il permet de reconnaître un bois, c'est un caractère systématique. Son étude conduit à la description des bois, à leur connaissance, à l'appréciation de leurs propriétés et permet de préciser les relations entre l'anatomie et les caractéristiques de ce matériau (Jodin, 1994).

II.1.2. Matériau d'origine biologique

Le bois, est un tissu complexe formé de cellules disposées longitudinalement (cellules conductrices, fibres) et transversalement (rayons). Il constitue la plus grande partie du tronc des plantes ligneuses. Est le matériau obtenu à partir du tronc et des branches des arbres. A l'échelle de la microstructure et de la macrostructure, l'étude des parois cellulaires et de leur organisation permet d'expliquer le comportement mécanique du bois. Le terme général de bois regroupe deux grandes catégories d'appellations commerciales : feuillus (angiospermes) et résineux (gymnospermes) (Bourreau, 2011).

II.1.3. Structure anatomique du bois

II.1.3.1. Anatomie du bois à l'échelle macroscopique

Au niveau macroscopique une coupe transversale d'un tronc d'arbre est caractérisée par la présence de : l'aubier, le duramen, l'écorce et le cerne.

II.1.3.1.1. Aubier

C'est la partie vivante du bois (bois de formation récente), situé entre le cambium et le duramen (Bruce Hoadley, 2000), riche en amidon, souvent différencié par la couleur, Il est généralement repéré par une couleur plus claire que la partie interne du bois (duramen), mais ce n'est pas toujours le cas. Une épaisseur importante d'aubier atteste de la vigueur de croissance de l'arbre considéré (Bowyer et *al.*, 2003). Ses couches successives servent au transport de la sève brute et à

l'accumulation de la matière nutritive (Guitard, 1987). De part sa richesse en matière nutritive, l'aubier est très vulnérable aux attaques des microorganismes et insectes xylophages. Sa durabilité naturelle est donc compromise (Bruce Hoadley, 2000). Nepveu (1987) a indiqué l'importance de l'aubier qui pourrait être qualifié par sa largeur et le nombre de cernes qu'il comporte. Pour les utilisations les plus nobles des bois, en particulier les bois feuillus, l'aubier est purgé. Ceci peut avoir des conséquences notables pour les bois à croissance assez rapide qui présentent souvent des aubiers très larges (cas de chêne rouge de plus de 100 cm de circonférence vendus exclusivement en bois de feu car la duraminisation y était trop peu développée).

II.1.3.1.2. Duramen

À l'inverse de l'aubier, c'est un ensemble de cellules mortes, bois âgé et stable dans lequel les échanges sont ralentis, et comportant peu d'amidon, il est considéré comme du bois non fonctionnel. Appelé souvent *bois de cœur*, ou *bois parfait*. Il est composé de membranes épaisses et dures, marqué par l'absence de la circulation des éléments nutritifs. On appelle l'opération de transformation de l'aubier en duramen la *duraminisation*, qui est le résultat de changement biochimique et physiologique au niveau des cellules de parenchymes (Datta et al., 1987 ; Magel et al., 1994). Contrairement à l'aubier il est plus résistant aux attaques d'insectes et maladies cryptogamiques plus particulièrement si ce type de bois est traité par des produits de préservation ce qui va lui conférer une durabilité plus longue (Jacquot et al., 1973). Pour la plupart des espèces, le duramen présente une meilleure résistance à la pourriture et à l'attaque d'insectes xylophages. Cette caractéristique est due à la présence de molécules biologiquement actives synthétisées lors de la duraminisation, ainsi qu'à la disparition de substances de réserve consommées par les agents de dégradation biologique (Amusant et al., 2004 ; Wong et al., 2005).

La formation du duramen est un aspect majeur de la qualité du bois. Elle améliore les propriétés mécaniques du bois, accroît sa durabilité et modifie sa couleur. Les processus conduisant à la formation et à l'extension du duramen n'ont jamais été réellement explicités jusqu'à présent Pour de nombreuses essences, cette distinction de couleur entre l'aubier et le duramen n'existe pas (Jacques et al., 1990). Il existe aussi du bois intermédiaire représentant les couches les plus internes de l'aubier qui forment la transition entre ce dernier et le duramen (Klumpers, 1994). La zone de transition a une épaisseur faible et est variable au cours d'un cycle de duraminisation (Bergström, 2000).

II.1.3.1.3. Ecorce

C'est un tissu protecteur constitué anatomiquement par une assise de cellules mortes formant l'assise subéro-phellodermique. Ce tissu appelé aussi le suber manchon.

II.1.3.1.4. Cerne

C'est la matière ligneuse fabriquée par l'arbre au bout d'une année. En climat tempéré, les cernes se distinguent facilement grâce à un arrêt ou un ralentissement significatif de la croissance de l'arbre pendant l'hiver (bois final). En climat tropical, la différenciation peut être plus compliquée du

fait que ce changement s'opère lors des saisons des pluies (Cote, 1984 ; Wem, 1987). Ainsi, pour les bois tropicaux, le terme de cernes annuels n'est souvent pas réellement applicable, ils sont de ce fait un indice très précieux pour dénombrer l'âge de l'arbre en comptant le nombre de cernes à la base du tronc (Jacquiot, 1955). La largeur des cernes est aussi un bon indicateur de la vitesse de croissance (Figure II.2).

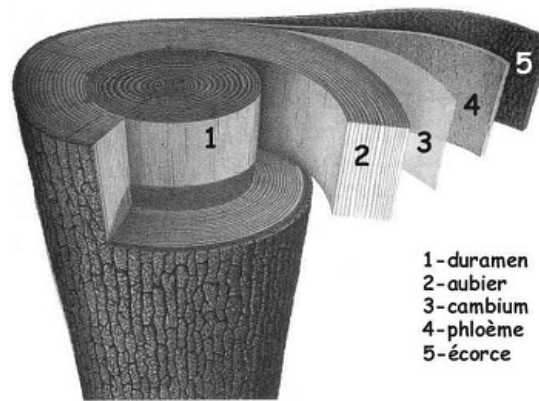


Figure II.2. Structure générale du tronc d'un arbre (Rémond, 2004)

II.1.3.2. Anatomie du bois à l'échelle microscopique

Pour l'anatomiste, il existe deux types de bois : les bois homoxylés caractéristiques des gymnospermes (pins, sapins, épicéas, thuyas, cyprès, etc.), et les bois hétéroxylés caractéristiques des angiospermes dicotylédones (chêne, hêtre, tilleul, bouleau, merisier, etc.). Ces bois diffèrent par les cellules qui les composent, les premiers ne contiennent que des trachéides qui assurent à la fois le soutien et la conduction de la sève, alors que les seconds, renferment deux types d'éléments verticaux : des fibres de type trachéide qui assurent le soutien et des vaisseaux qui assurent la conduction (Figure II.3 et II.4).

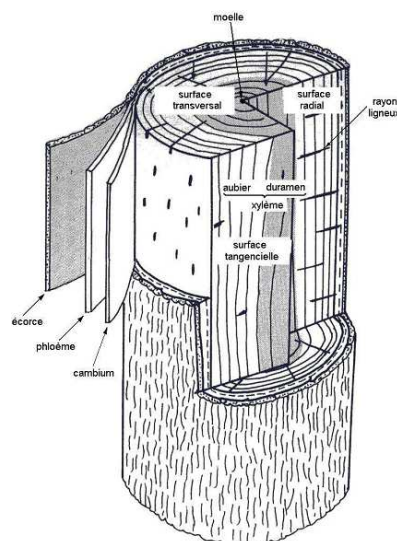


Figure II.3. Vue d'une tige avec ses tissus principaux (Adapté d'après Higuchi, 1997)

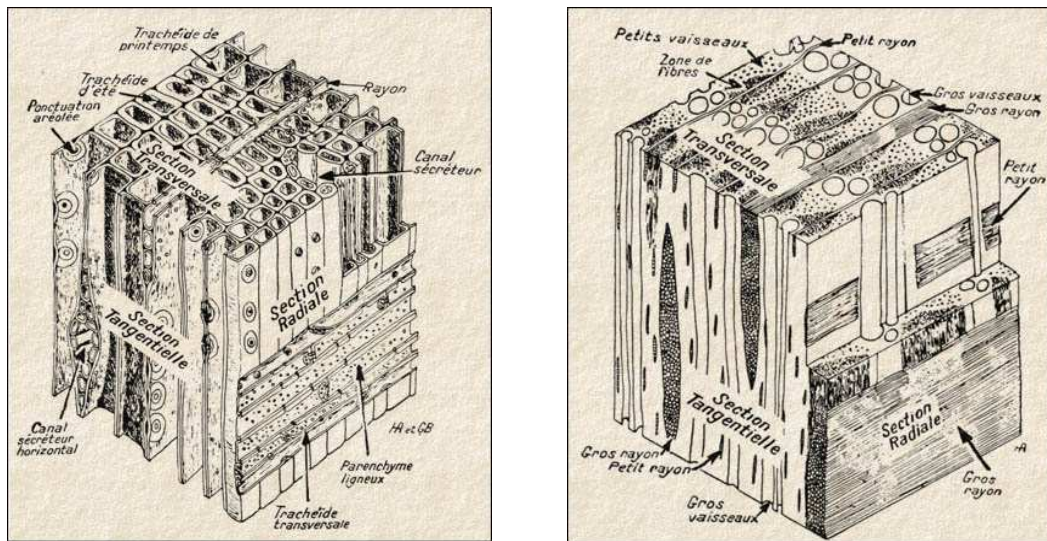


Figure II.4. Vue schématique d'un plan ligneux d'une essence résineuse (à gauche) et d'une essence feuillue (à droite) (Bouet et Humbert, 2003)

Lors de la formation du bois dans l'arbre, et en réponse aux contraintes dues à son environnement, l'organisation cellulaire est unique pour chaque essence de bois. Bien que différente, celle des résineux reste sensiblement la même, contrairement aux feuillus, dont l'organisation est bien différenciée en fonction des essences. Pour les feuillus, trois grandes familles peuvent être identifiées : les bois à *zone poreuse initiale*, ceux à *pores diffus* ou encore les *semi poreux* (Figure II.5) (Keller, 1994).

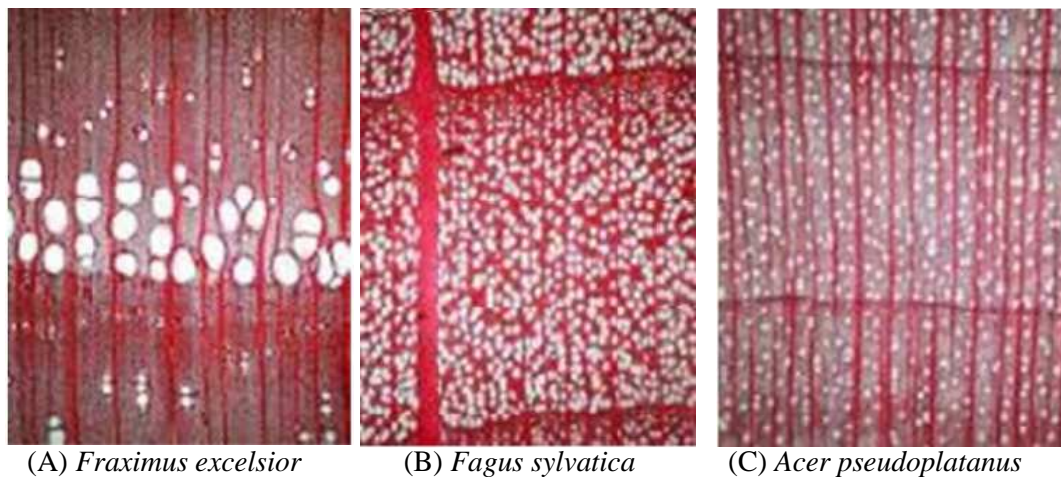


Figure II.5. Vue de la section transversale d'un feuillu poreux (A), semi-poreux (B) et à pores diffus (C) (LERFoB, 2012)

I.4. Sources de variabilité

En plus de l'aubier et duramen, nous pouvons retrouver différents "types de bois" dans l'arbre, qui présenteront après abattage et en tant que matériau technologique des propriétés différentes. L'aspect que nous étudierons le plus concerne les caractéristiques d'aubier et de duramen.

II.1.4.1. Bois juvénile et bois adulte

Les cernes proches de la moelle de bas en haut de l'arbre présentent chez toutes les espèces des caractéristiques singulières par rapport aux cernes plus âgés. On désigne par "*bois juvénile*" l'ensemble de ces cernes (Polge, 1964 ; Zobel et al., 1989). Nepveu (1994) à noter que les 5 à 20 premiers cernes d'accroissement possèdent des caractéristiques différentes de celles du bois extérieur arrivé à maturité. Ce bois appelé bois juvénile possède, une masse volumique, une résistance et une élasticité plus faible, particulièrement chez les résineux (Harris, 1988 ; Nepveu, 1994). Pour les feuillus tropicaux, certaines espèces forestières favorisent la croissance en hauteur par rapport à la croissance en diamètre en réponse à une forte compétition interspécifique, elles développent alors un bois juvénile plus rigide et souvent plus dense (McLean et al., 2011). Le bois juvénile provoque une hétérogénéité radiale continue des propriétés du bois (densité, retraits, module d'élasticité...) qui évoluent rapidement lors des premières années d'activité du cambium, de sorte que l'on observe dans la zone entourant la moelle, un bois aux qualités technologiques très variables, souvent qualifiées de médiocres (Zobel et al., 1989 ; Nepveu, 1994).

II.1.4.2. Bois de réaction

Une autre source de variabilité des propriétés à l'intérieur de l'arbre est la présence de "*bois de réaction*". Afin d'assurer l'orientation des branches ou la réorientation des troncs penchés accidentellement ou soumis à des vents dominants de ses axes, l'arbre peut créer des types de bois particuliers assurant un contrôle actif de ces orientations. Les feuillus créent généralement du bois dit de "*tension*" et les résineux du bois dit de "*compression*". Ces deux types de bois ont des caractéristiques microstructurales, chimiques et physico-mécaniques très différentes des bois "normaux" (Bourreau, 2011).

- Bois de tension

Le bois de tension des dicotylédones arborescentes se distingue du bois normal par ses caractéristiques anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques particulières qui lui confèrent un comportement spécifique. Il représente pour le végétal un mécanisme performant qui lui permet de s'adapter et de se développer harmonieusement dans son environnement. Au-delà d'une certaine proportion, la présence de ce tissu devient dommageable pour la qualité du matériau et peut être considérée par l'utilisateur comme un défaut majeur chez certaines espèces (Benoit, 1997) (Figure II.6). Keller (1994) a indiqué que les différences principales par rapport au bois normal sont observées chez les fibres ; les vaisseaux dans le bois de tension sont seulement moins nombreux et de plus faible diamètre. Selon le même auteur, le bois de tension contient plus de cellulose, moins de lignine et de plus faibles quantités de xylose que le bois normal. Selon le même auteur le bois de tension peut avoir une densité supérieure d'environ 30 % par rapport au bois normal.

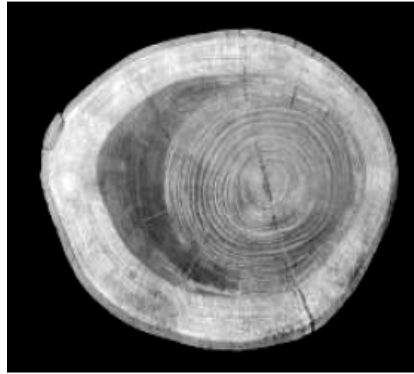


Figure II.6. Observation de bois de tension chez l'*Eperua falcata* (Ruelle in Bourreau, 2011)

II.1.4.3. Bois de printemps et bois d'été

Le bois de printemps est, comme son nom l'indique, la partie du cerne annuel de croissance qui s'est formée pendant la première partie de la période de croissance, il apparaît généralement comme une large bande de bois plus clair dans chaque cerne annuel de croissance. Le bois d'été est la partie annuelle qui se développe dans la deuxième partie de la période de croissance, il produit des cellules à membranes plus épaisses, formant un bois plus dense et plus foncé, moins apte à faire circuler la sève, mais utile au port de l'arbre. A chaque période de croissance annuelle de l'arbre, correspond un cerne bien distinct, révélant ainsi l'âge de l'arbre abattu, ainsi que le type de climat dans lequel il a poussé.

II.1.5. Niveaux de variabilité

Le paragraphe précédent concerne un premier niveau de variabilité "*intra-arbre*". Le bois peut également être variable entre différents individus, et ce au sein d'une même provenance, ou entre provenances différentes. Enfin, le bois est variable entre différentes espèces. Ces trois niveaux sont susceptibles de se recouper plus ou moins selon les propriétés considérées et la distance entre espèces (Nepveu, 1994).

II.2. Propriétés de base du bois

Une des principales caractéristiques du bois est certainement son hétérogénéité. Avec la variété d'essences qui existe, dans des régions tempérées ou tropicales, les propriétés sont extrêmement variables. Le choix des bois pour leurs utilisations passe par l'examen de ces caractères et propriétés (Patrick, 2001).

II.2.1. Densité du bois " ρ "

Le terme "*densité*" est souvent utilisé dans le domaine du bois au lieu de "*masse volumique*", nous appellerons ici "*densité*" la masse volumique de nos échantillons, rapportée à la masse volumique de l'eau dans les mêmes conditions, exprimée² en g/cm³ (Dakak, 2002). Lorsque l'humidité est voisin

² La plupart des résultats cités dans la littérature, donnent la masse volumique en g/cm³, mais la règle actuelle veut qu'elle soit donnée en kg/m³ (Bakour, 2003).

de 12 %, comme dans la présente étude, cette grandeur est généralement appelée "*masse volumique du bois à l'état sec à l'air*" (Nepveu, 1991).

II.2.1.1. Variabilité intracerne de la densité

La plus grande variabilité de la densité se présente au niveau intracerne pour les arbres tempérés (Jozsa et al., 1989). L'évaluation de la variabilité de la densité peut se faire à trois niveaux ; d'abord, il y a *la variation intracerne*, c'est à ce niveau que l'on rencontre la plus grande variabilité, ensuite *l'évolution de la densité dans l'arbre*, pour ceci, trois axes sont considérés dans la tige : un axe radial (de la moelle jusqu'à l'écorce), un axe vertical (du bas vers le haut) et une séquence oblique (suivant le même cerne du sommet jusqu'au pied de l'arbre) et enfin *la variabilité de la densité entre divers arbres de la même essence* (Dedeckel, 1994).

II.2.1.2. Relations entre la densité et les propriétés mécaniques

La densité est une des premières propriétés de base des bois. Elle représente peu ou prou la quantité de matière, et elle peut éventuellement servir d'indicateur pour d'autres propriétés (retraits, dureté, modules) Brémaud (2006). Keller (1968) a indiqué que l'utilisation de courbes de variation de la densité favorise la mise en évidence de liaison entre la structure du bois et sa résistance mécanique. En (1982) Bodig et Jayne observent l'influence de la densité sur les propriétés mécaniques du bois et les relient par l'équation suivante : $Y = a D^b$

Avec :

Y : sont les propriétés élastiques ;

D : est la densité du bois ;

a et b sont : des constantes données pour chaque essence de bois avec $b > 1$.

II.2.2. Largeur de cerne

Le cerne est souvent considéré comme une bicouche, constitué de deux zones qui sont supposées bien définies et séparables sans ambiguïté : le bois initial et le bois final (Figure II.7). Ces deux types de bois (bois initial et bois final) sont supposés avoir chacun des propriétés "intrinsèques", c'est-à-dire celles que posséderait un bois composé d'un seul des deux types.

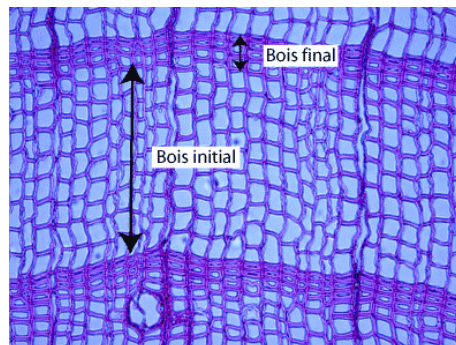


Figure II.7. Structure anatomique du cerne annuel de croissance Gro x 400 x 297 (Source : www.ens.uqac.ca)

En effet, la largeur moyenne de cerne, qui est appelé habituellement la vitesse de croissance est obtenue par la méthode d'analyse microdensitométrique qui permet de donner plus de détail sur les cernes. Elle peut être définie comme la distance moyenne séparant deux limites de cerne. Nepveu (1994) a considéré ce caractère "largeur de cerne" tant comme une source de variation qu'une caractéristique de qualité en elle-même.

II.2.2.1. Densité et largeur moyenne de cernes

Ces deux caractéristiques seront examinées simultanément car les forestiers gestionnaires souhaitent particulièrement savoir quelle essence, pour une rapidité de croissance donnée, fournira le bois de meilleures caractéristiques technologiques. Si l'on admet que pour les résineux, l'idéal est de produire à la fois des cernes larges et un bois dense, une étude faite par Polge en (1978) sur le pin pignon montre que, ce dernier apparaît comme supérieur au pin laricio et au pin sylvestre, mais inférieur au cèdre et au pin maritime.

II.2.3. Module d'élasticité longitudinale (Module de Young) " E_L "

Le module d'élasticité est une propriété de première importance dès lors que l'on s'intéresse aux emplois en structure. C'est le paramètre de lien entre l'effort fourni et la déformation qui s'en suit (Kokutse, 2002). Le module d'élasticité longitudinale est l'une des principales caractéristiques de solidité d'un bois, il correspond au rapport entre une contrainte que subit un élément de bois et la déformation relative correspondante. Plus le module est élevé, plus le bois est rigide (Kittel, 1998).

Le module d'élasticité longitudinale ou encore *module de traction* " E_L " est une propriété de première nécessité technologique pour les emplois en structure où les pièces de bois sont fréquemment sollicitées en flexion statique suivant leur plus grande direction, parallèlement aux fibres. C'est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope (Kittel, 1998). Le module d'élasticité longitudinale du bois stabilisé à une humidité théorique de 12% est une caractéristique mécanique de référence. Cette propriété caractérise la proportionnalité entre la charge et la déformation. Elle constitue un indicateur de la rigidité du bois (Kittel, 1998). Le tableau II.1 représente les classes de module d'élasticité longitudinale selon les normes des directives françaises :

Tableau II.1. Classes de module d'élasticité longitudinale d'après les normes NF B 51 008 (septembre 1985)

Valeurs de module de Young	Qualification
$E_L < 10\ 000$ MPa	module faible
$10\ 000$ MPa $< E_L < 15\ 000$ MPa	module moyen
$E_L > 15\ 000$ MPa	module élevé

II.2.3.1. Influence de la densité sur le module de Young

Parmi les facteurs la plus souvent rencontrée, influençant sur le module de Young, comme variable explicative, est la densité. En effet selon Guitard et El Amri (1987), cette variation est une fonction exponentielle. Cependant la gamme de densités réduites est une forme linéaire (Figure II.8).

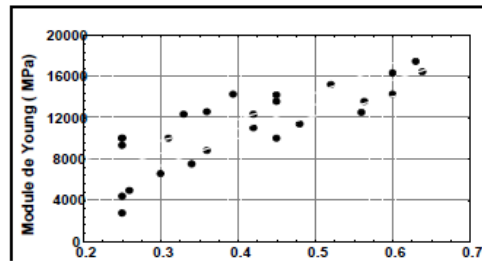


Figure II.8. Variation du module de Young en fonction de la densité pour les essences résineuses (d'après Guitard et El Amri, 1987)

II.2.4. Module d'élasticité spécifique et Coefficient d'amortissement " $\tan\delta$ "

Le module d'élasticité spécifique se calcule par le rapport entre le module de Young (E_L) et la densité (ρ). On appelle "*coefficient d'amortissement*", la grandeur " $\tan\delta$ ", elle peut aussi être appelée "*facteur ou coefficient de perte*" ou "*tangente de l'angle de perte*". Ce coefficient caractérise le retard de la réponse par rapport à la sollicitation. Il est relié à l'énergie dissipée au cours d'un cycle de vibrations forcées, ainsi qu'à l'amortissement de vibrations libres (Brémaud, 2006). L'amortissement, ou décroissance temporelle des vibrations libres d'une structure, peut être dû à différents mécanismes de dissipation de l'énergie, par couplage au milieu ambiant, ou bien intrinsèques au matériau (Bordonné 1989 ; Lambourg 1997 ; David 1999 ; Brancheriau 2002). Dans le cas du bois, il semble généralement admis que la contribution propre du matériau aux phénomènes d'amortissement relève essentiellement du facteur de perte viscoélastique.

II.2.5. Durabilité du bois et résistance naturelle aux champignons

Parmi les caractéristiques technologiques et esthétiques importantes des bois utilisés dans la construction, dans l'ameublement et dans la décoration, la couleur et la durabilité naturelle occupent une place de premier plan. Le bois présente de nombreux atouts : ses pouvoirs isolants, son esthétique, sa résistance,...Il est à la fois un matériau économique, renouvelable, biodégradable et peu coûteux pendant sa mise en œuvre. Cependant, ce matériau est handicapé par son origine naturelle : ses dimensions changent sous l'effet de l'humidité et il est soumis à des risques d'attaque par un certain nombre d'agents biologiques (champignons, insectes à larves, termites). Ces inconvénients sont principalement surmontés par des traitements chimiques (imprégnation à la créosote ou au CCA, Chrome-Cuivre-Arsenic...), des traitements thermiques, ou par l'importation d'essences réputées pour leur stabilité (western red cedar, teck ou d'autres bois tropicaux). Par rapport à ces risques, le bois peut présenter une durabilité naturelle suffisante pour être utilisé dans certains emplois sans traitement. Il est donc primordial de connaître la durabilité naturelle de notre bois étudié.

La durabilité naturelle des bois est leur aptitude à résister aux attaques des agents de détérioration : c'est le comportement des bois sans traitement (Fouquet, 2009). La durabilité naturelle d'une essence est une propriété spécifique et constitue un élément important de sa fiche d'identité, au même titre que les propriétés physiques et mécaniques. Elle correspond à son aptitude à se conserver

dans un emploi défini pendant une durée donnée, en l'absence de tout traitement protecteur (Monteiro et al., 2000) grâce à sa propriété de résistance naturelle aux attaques des agents biologiques dont les plus importants sont les champignons (pourriture, échauffure, bleuissement, etc.) et les insectes (piqûres noires des bois frais, vermoulure des bois secs, dégâts causés par les termites etc.) et certains organismes marins (tarets).

La durabilité est la propriété essentielle du bois à résister aux agents de destruction et à la pourriture. C'est une conséquence de la composition chimique : la présence de certaines substances comme les résines et les tanins augmente la durabilité : ce sont des matières antiseptiques. Par contre les matières de réserve, comme l'amidon, exercent une influence défavorable. La durabilité du mélèze et du chêne est grande, celle du hêtre, du peuplier faible. La durabilité varie suivant les conditions d'emploi ; elle est d'autant plus grande que l'atmosphère est sèche (Dumon, 1980).

La durabilité naturelle d'une essence est son aptitude à résister à l'attaque des agents biologiques d'altération : champignons de pourriture, termites, insectes, foreurs marins. La résistance des bois aux champignons est déterminée sur des échantillons de dimensions normalisées mis en présence de 4 souches de champignons dans des conditions ambiantes contrôlées. Ces essais durent plusieurs mois. L'intensité de l'attaque des champignons, et par conséquent la résistance naturelle des bois, est quantifiée par la perte de masse des échantillons à laquelle est appliqué un coefficient correcteur dépendant de l'humidité des bois.

La durabilité naturelle d'un bois est son aptitude à demeurer inaltéré dans un emploi défini, pendant une période donnée, en l'absence de tout traitement protecteur (Loubinoux et al., 1994). Dans cette définition, la notion "d'emploi défini" est très importante. En effet, on ne peut dire d'un bois qu'il est durable sans préciser dans quelles conditions définies d'emploi. Ce sont donc les emplois qui déterminent les risques, surtout dans le cas des bactéries, moisissures et champignons.

La préservation chimique des bois, bien qu'efficace pose encore des problèmes sur le plan technique (résistance à l'imprégnation de certaines essences, répartition inégale des produits de protection dans les cellules du bois, etc.), et sur le plan écologique. La toxicité des produits de préservation chimique, facteur de pollution préoccupe de plus en plus l'opinion dans les pays industrialisés.

La norme NFX 40-002 (1983) propose la définition suivante de la durabilité naturelle : "La durabilité que présente un bois dans des conditions données, en absence de tout traitement de préservation. Cette propriété rend compte de la résistance naturelle du bois aux attaques biologiques".

La norme NF EN 350-1 (1994) propose dans le même ordre d'idée une autre définition : "La résistance intrinsèque du bois aux attaques d'organismes destructeurs. La durabilité d'un bois est son aptitude à résister à l'attaque d'agents biologiques responsables de sa dégradation lorsqu'il est utilisé dans une situation donnée".

II.2.5.1. Mesure de la durabilité naturelle

Les connaissances actuelles sur la durabilité naturelle sont basées sur trois sources :

- les connaissances traditionnelles sur l'usage de certaines essences réputées pour leur duramen exceptionnellement durable. L'utilisation de *cedrus libani* dans la construction de certains temples datant de plusieurs siècles en est l'exemple (Willeitner et Peek, 1997) ;
- les essais de champ au contact du sol. Ce type d'essai présente l'avantage d'être réalisé en plein air, prenant en compte les facteurs environnementaux. Cependant, il faut choisir des sites adéquats et la durée des essais est très longue ;
- les essais en laboratoire sont basés sur les mesures de perte de masse d'échantillons de bois exposés à une espèce de champignon ou de termite. Les durées d'exposition sont beaucoup plus courtes (quelques mois) que dans le cas des essais de champ.

II.2.5.2. Classes de durabilité naturelle

Les différentes essences de bois ne sont pas équivalentes en termes de durabilité naturelle. La classe de durabilité naturelle repose sur la résistance aux espèces de champignons causant la plus grande perte de masse moyenne des échantillons de bois, les cinq classes de durabilité naturelle basée sur la norme NF-EN 113 sont présentées dans le tableau II.2.

Tableau II.2. Classes de durabilité naturelle du bois en fonction des pertes de masse (définies selon la norme NF-EN 113. Décembre, 1986)

Classe de durabilité	Descriptif	Perte de masse WL ³ (%)
1	Très durable	WL ≤ 5
2	Durable	5 < WL ≤ 10
3	Moyennement durable	10 < WL ≤ 15
4	Faiblement durable	15 < WL ≤ 30
5	Non durable	WL > 30

II.2.5.3. Agents de détérioration

Les êtres vivants susceptibles de dégrader le bois sont de trois types (Fougerousse, 1960) :

- les micro-organismes ;
- les insectes, responsables de la piqûre ou vermoulure ;
- certains animaux (térébrants marins), appartenant aux mollusques et aux crustacés.

II.2.5.3.1. Micro-organismes

Les micro-organismes qui peuvent attaquer le bois sont subdivisés en deux groupes (Tableau II.3). Dans cette partie nous nous sommes intéressés aux champignons.

- ✓ les moisissures et les bactéries ;
- ✓ les champignons.

³ WL : Weight Loss (perte de masse)

Tableau II.3. Types de micro-organismes pouvant attaquer le bois et leurs conditions de croissance

Agents de détérioration	Types	Constituant dégradé préférentiellement dans le bois	Inconvénients majeurs sur le bois	Conditions de croissance (H ₂ O, O ₂ , T°)
Champignons lignivores	Pourriture brune ou cubique	Cellulose	Perte de la résistance mécanique	H = 35-40% O ₂ = 20% T° = 20-36°C
	Pourriture blanche ou fibreuse	Lignine		Endroit très humide et pas assez oxygéné
	Pourriture molle ou pâte	Cellulose + Hémicellulose + Lignine		
Champignons de discoloration	Echauffures Ex (Stereum) Bleuissement Ex (Ceratomyces)	Contenu des cellules de parenchyme de (aubier)	Modification de la couleur du bois	Endroit très humide
Moisissures				
Bactéries			Augmentation de la perméabilité	

II.2.5.3.1.1. Champignons dégradants le bois

Sur plus d'un million d'espèces de champignons, seules quelques unes bien spécifiques appartenant à la famille des basidiomycètes ont la capacité de dégrader le bois (Schultz et *al.*, 2002). Il existe des champignons de discoloration (champignons de bleuissement et d'échauffures) et des champignons lignivores. Les premiers sont incapables d'altérer les parois des cellules ligneuses mais peuvent provoquer des modifications d'aspect et de volume (Vernay et *al.*, 1997). Les seconds sont soit des champignons de pourriture cubique ou brune, soit des champignons de pourriture fibreuse ou blanche, soit des champignons de pourriture molle. La pourriture du bois consiste en une modification irréversible de toutes les propriétés du bois. Les champignons de pourriture sont ceux qui causent les dégâts les plus graves. Ils mènent une vie saprophytique et transforment par action diastasique la matière ligneuse en substance assimilable. Ces champignons, se distinguent suivant les enzymes qu'ils sont capables d'élaborer pour attaquer la paroi cellulaire. Leur mode d'attaque est très particulier, ils ne se propagent pas à l'intérieur des cellules mais dans les parois secondaires. Ils sont répertoriés en fonction du type de pourriture créé dans le bois. La forme de cette pourriture résulte du mode de consommation des constituants de la paroi ligneuse (lignine, cellulose) par le champignon. Trois grands types de pourritures sont à considérer en fonction de l'élément du bois mis à profit (CTBA, 1996).



Figure II.9. *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture brune

b. Champignons de pourriture fibreuse (blanche)

(par exemple *Coriolus versicolor*) dégraderaient tous les constituants du bois y compris la lignine. Le bois ainsi attaqué, présente un aspect fibreux et une décoloration très importante (couleur très claire) (Figure II.10). Ces deux types de champignons (pourriture brune et blanche) appartiennent à l'ordre des Basidiomycètes.



Figure II.10. *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture blanche



Figure II.11. *Dicorynia guianensis* attaqué par une pourriture molle

c. Champignons de pourriture molle

(par exemple *Humicola sp.*) se rencontrent plutôt dans les conditions d'extrême humidité et de taux d'oxygène très faible. C'est le cas des bois immergés ou du bois au contact du sol (attaque de la cellulose). Ces champignons appartiennent à l'ordre des Ascomycètes ou des Deutéromycètes. Ils causent à long terme de graves dégâts puisqu'ils réduisent le bois en une patte molle (Figure II.11).

II.2.6. Couleur du bois

De même que la couleur est la parure du monde, de même la couleur est la plus value du bois (Janin, 1986 (b)). L'apparence des objets qui nous entourent et qui retient notre attention vient de leur aspect, leur forme et leur couleur. La couleur est un caractère important pour l'emploi du bois en

menuiserie et surtout en ébénisterie. Janin (1989) a étudié l'importance de la couleur du bois utilisé dans la construction. Cet aspect couleur très récemment étudié est cependant très important pour évaluer la qualité du bois utilisé pour le tranchage, l'ameublement, la tonnellerie. L'aspect esthétique du bois est aussi de plus en plus pris en compte dans l'industrie tout au long de la filière-bois : placage tranché ou déroulé, panneaux décoratifs. Le bois de chaque essence a une couleur qui lui est propre, accentuée dans le bois de cœur. Elle se modifie lentement à l'air et à la lumière. Elle peut également varier suivant les arbres et les provenances : le bois de chêne par exemple est d'une teinte variant du brun clair au gris brun ou au brun rougeâtre (Dumon, 1980). La mesure de la couleur du bois est aussi indispensable à son emploi sous forme de placages décoratifs pour leur appariement et leur classement que les essais de résistances mécaniques du bois sont nécessaires à son utilisation en structure (Janin, 1986 (b)).

II.2.6.1. La colorimétrie

La colorimétrie est la mesure objective et quantitative de la couleur d'un objet en vue de son repérage dans un système de représentation conventionnel des couleurs (Zanetti, 2000). Elle qualifie scientifiquement et rigoureusement la perception de la couleur et permet de traduire la couleur en valeurs numériques (Chrisment, 1997). La colorimétrie concerne également l'ensemble de moyens de mesure de la couleur. L'étude de la variabilité de la couleur est récente. Cet aspect esthétique est très important pour évaluer la qualité d'un produit surtout dans l'ameublement, la parqueterie ou le tranchage. La couleur est un indicatif déterminant de l'acceptabilité d'un produit. Kokutse (2002) a signalé que cette mesure physique, qu'est la couleur est mal connue au niveau des espèces tropicales et est souvent utilisée chez les espèces tempérées comme outil de tri de la qualité ou comme indicateurs d'autres propriétés comme la durabilité naturelle.

II.2.6.2. Le système CIELab 1976

Dans l'espace CIELab 1976 défini par la Commission Internationale de l'Eclairage, le plan chromatique est défini par ses axes vert-rouge et bleu-jaune (Figure II.12). L'axe perpendiculaire à ce plan et passant par l'intersection des deux axes définit la clarté. Selon Chrisment (1997) le système CIELab est dédié à l'étude des couleurs de surface et d'objet à l'aide des coordonnées chromatiques qui permettent de quantifier la couleur en chaque point par trois composantes L^* a^* b^* où :

- coordonnée chromatique a^* , correspondant à l'axe vert-rouge ;
- coordonnée chromatique b^* , correspondant à l'axe bleu-jaune ;
- clarté L^* , variant de 0 (désignant un noir parfait) à 100 (désignant un blanc immaculé).

L'astérisque (*) qui suit chaque lettre des paramètres de couleur indique que les calculs sont ultérieurs à 1931, date de fondation de la Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). Les résultats de la couleur d'un objet peuvent être également exprimés à l'aide de deux autres paramètres calculables à partir de ces composantes de base a^* et b^* :

- la composante chromatique C^* , ou "saturation de la teinte" de l'objet coloré, correspond à l'intensité de la teinte par rapport à la teinte pure de référence située sur le cercle des couleurs (cercle chromatique). Elle représente la distance à l'axe blanc-noir :

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2}$$

- la composante chromatique h^* correspond à "l'angle de teinte" qui est une estimation de la distance angulaire par rapport à l'axe rouge : $h^* = \arctangente \left[\frac{a^*}{b^*} \right]$

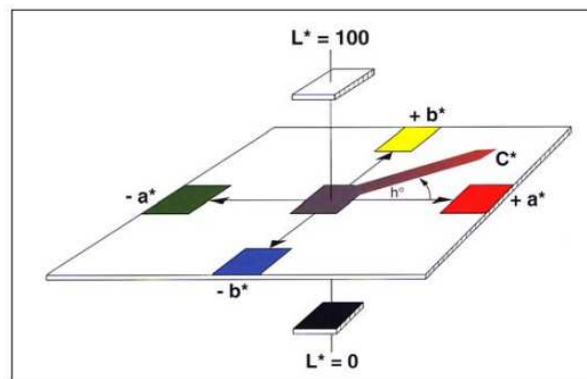


Figure II.12. Espace CIE $L^*a^*b^*$ (1976) (Chrisment, 1997), toutes les mesures des paramètres a^* et b^* réalisées jusqu'à présent sur le bois n'ont donné que des valeurs positives, c'est-à-dire situées dans la partie rouge-jaune du plan de chromaticité (Nishino et al., 1998)

Dans les résultats, seuls les paramètres a^* , b^* et L^* sont utilisés puisque la saturation C^* et la teinte h^* peuvent facilement être déduites de ces trois paramètres (Janin, 1994).

Deux principaux types d'appareils sont utilisés pour mesurer la couleur ; les colorimètres et les spectrocolorimètres. Ces appareils sont équipés d'un référentiel de couleur normalisé au niveau international. Le colorimètre est principalement utilisé en contrôle-qualité afin d'obtenir des valeurs numériques et vérifier la comparabilité avec des tolérances définies. Le spectrocolorimètre analyse, longueur d'onde par longueur d'onde, l'énergie lumineuse réfléchie ou transmise afin de déterminer les courbes spectrales d'un objet (Chrisment, 1986). La majorité des études sur la couleur du bois concerne le noyer noir (*Juglans nigra* L.) car cette espèce est largement utilisée aux USA du fait des qualités esthétiques de ses placages (Dakak, 2002). Beckwith (1979) a constitué à partir de nombreux échantillons provenant de 22 espèces différentes un atlas des couleurs des bois les plus connus et utilisés. Cet auteur a observé que la variabilité de la longueur d'onde dominante est très faible alors que la luminosité L^* varie fortement.

II.3. Conclusion

Dans ce chapitre, les propriétés de base du bois, ont été présentées, le bois est un matériau anisotrope du fait de la distribution des différents types de cellules qui le constituent ; les trois directions principales d'anisotropie sont la direction axiale, radiale et tangentielle, nous avons

distingué deux types du bois formant le fût de l'arbre qui sont l'aubier (zone périphérique externe active) et le duramen (zone centrale constituée de cellules mortes).

Le bois offre un certain nombre de propriétés qui sont influencées notamment par des facteurs intrinsèques qui expriment l'originalité du bois, en tant que matériau, dès le stade de sa fabrication, et les facteurs externes représentant toutes les variations du milieu.

Deuxième partie

Étude expérimentale

Chapitre III
Matériel et méthodes

Chapitre III

Matériel et méthodes

Partant du constat que cette espèce est en voie d'extinction sous l'effet d'une pression anthropozoïque menaçant sa pérennité. Très peu d'études sont menées jusqu'à présent sur cet arbre. Ainsi, dans le but de mieux connaître ses diverses utilisations, surtout, les propriétés de son bois, nous avons effectué cette étude. Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche sur la valorisation de la biodiversité végétale de l'Algérie Nord-occidentale initié par le laboratoire de "Biodiversité Végétale : Conservation et Valorisation" de l'Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès.

III.1. Origine du matériel expérimental

Les échantillons du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* que nous avons utilisé dans le cadre du présent travail, proviennent de la région de M'cid géographiquement localisée à 50 km au Nord-est du chef lieu de la wilaya de Sidi Bel Abbès et de la forêt de Tagdempt géographiquement localisée à 14 km au Sud-est du chef lieu de la wilaya de Tiaret (Algérie occidentale). Nous avons volontairement choisi d'effectuer l'échantillonnage dans ces deux régions où les arbres sont tricentenaires et répondaient à nos objectifs fixés au départ.

III.2. Présentation des deux zones de provenance du matériel végétal

Le choix de ces zones d'étude s'est fait sur la base des données fournies par les services de la conservation des forêts en fonction du matériel effectivement disponible dans ces deux régions appartenant à l'Ouest algérien (Figure III.1). Rappelons bien, que nous avons jugé nécessaire, sans pour autant s'étaler sur le sujet, de renseigner le lecteur non averti sur les caractéristiques climatiques (principalement les précipitations qui ont une relation directe avec la largeur des cernes) synthétisées à partir les travaux qui ont été faites sur ce sujet.

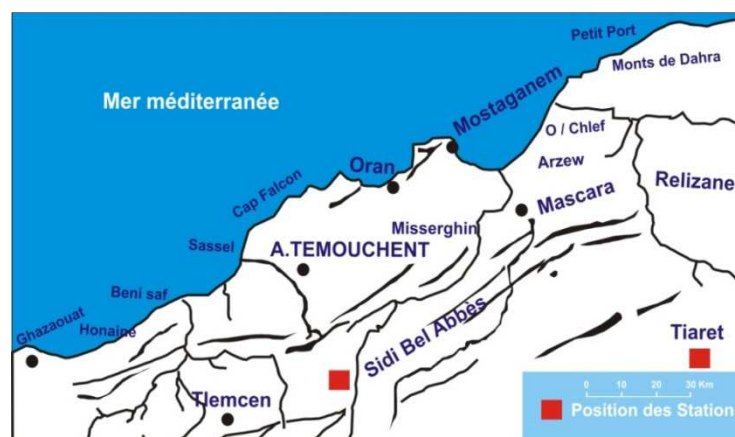


Figure III.1. Localisation des deux régions de prélèvement des échantillons (Carte extraite de la thèse de Maatoug (2003) et modifiée)

III.2.1. La zone de M'cid

Compte tenu du manque de données sur le lieu de prélèvement de nos échantillons, il nous est paru nécessaire de présenter notre site à travers une présentation de la wilaya.

III.2.1.1. Présentation du milieu forestier de la wilaya de Sidi Bel Abbès

La wilaya de Sidi Bel Abbès est une zone de type agro-sylvo-pastorale pour ses richesses naturelles. Elle est connue par son patrimoine forestier qui fait d'elle une wilaya fortement boisée. Son massif forestier occupe une place importante avec un taux de boisement de 22 %, et une superficie forestière de 209 489 ha englobant 20 forêts domaniales. Néanmoins il faut souligner que plus de 10 % de la superficie totale est sous forme de formations dégradées utilisées le plus souvent comme parcours (Ferka Zazou, 2006). Selon les données fournies par la conservation des forêts de la wilaya de Sidi Bel Abbès (2011), près de 120.000 ha de forêts ont été incendiées durant la période allant de 1992 à 1999. Par ailleurs, la composition forestière de la wilaya est de 7 sur 10 de pins d'Alep, 2 sur 10 de thuyas et de 1 sur 10 d'essences diverses.

III.2.1.2. Situation géographique

Le lieu de prélèvement de nos échantillons se situe à 50 km au Nord-est du chef lieu de la wilaya de Sidi Bel Abbès.

III.2.1.3. Altitude

Le point culminant de la zone considérée est de 420 m d'altitude.

III.2.1.4. Caractéristiques climatiques

La région de Sidi Bel Abbès, par sa position géographique, est soumise aux conditions climatiques du continental (le massif de Dhaya diminuant l'influence de la steppe procure à la région son caractère continental) et aux faibles influences maritimes (la chaîne du Tessala avec 1080 m d'altitude au Nord diminuant l'influence maritime) c'est pour cela l'utilisation du quotient pluviométrique d'Emberger, dont l'application est proposée aux régions méditerranéennes, permet de classer la région dans l'étage bioclimatique méditerranéen, semi-aride frais. De ce fait, la wilaya de Sidi Bel Abbès se distingue par un climat humide et froid en hiver, sec et chaud en été avec le printemps et l'automne de courte durée (DSA de Sidi Bel Abbès, 2008).

III.2.1.5. Types de sol

Toujours en se limitant des données disponibles sur la wilaya de Sidi Bel Abbès, comme il a été indiqué au paragraphe précédent, les sols des pinèdes de Sidi Bel Abbès sont en totalité des sols calcimagnésiques, ceux-ci sont caractérisés par la présence du calcaire qu'on retrouve dans tous les sondages à des taux parfois élevés. On distingue deux principaux types de sol :

- sols bruns calcaires ;

- rendzines (vrais ou humifères).

Les premiers sont des sols évolués (profils A, B, C), généralement profonds et riches en matières organiques, on les rencontre surtout sous la futaie de pin d'Alep. Ils ne représentent que 28 % par rapport du total des sondages effectués. Les rendzines sont les plus dominants (environ 70 %), sont caractérisés par le profil A, C. Ce sont des sols peu évolués, peu profonds et superficiels et se trouvent sur des terrains abrupts et sous des peuplements végétaux dégradés. Ces deux types de sol ont une teneur plus ou moins forte en calcaire et se rencontrent dans toutes les pinèdes du semi-aride et aride (Cherifi et *al*, 2002).

III.2.1.6. Hydrographie

L'hydrographie de la région de Sidi Bel Abbès se caractérise par une forte densité des organismes fluviaux. Les chabats de Feid se multiplie à l'infinie sur les versants de montagnes, moins nombreux sur les plaines ce sont des cours d'eaux temporaires drainants les eaux des pluies en hiver et sec pendant la période de sécheresse (Ferka Zazou, 2006). Les principaux oueds de la région qui capturent tous ces ruisseaux temporaires sont : Oued Mekarra, Oued Tenira, Oued Molrier, Oued Sefioune (Ferka Zazou, 2006).

III.2.1.7. Composition floristique

Les peuplements forestiers de Sidi Bel Abbès sont composés des diverses essences :

- essences principales : le pin d'Alep ;
- essences constituant le sous étage : le chêne vert et le thuya ;
- essences secondaires constituant le sous bois : le chêne kermès, le lentisque, la phylaire, l'arbousier, et l'oléastre ;
- essences constituant la couverture végétale : le diss, l'alfa, la lavande, le romarin, le palmier nain, le calycotome, l'armoise blanche, l'armoise champêtre, l'asphodèle, le ciste, le cytise, le genêt, le scil maritime, la globulaire, l'hélianthine, la sauge, et les mauvaises herbes (Cherifi et *al*, 2002).

III.2.2. La zone de Tagdempt

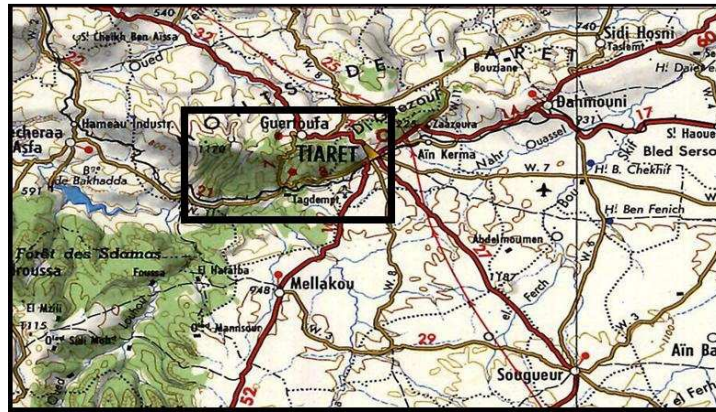
III.2.2.1. Présentation de la wilaya de Tiaret

Située à l'Ouest du pays, la région de Tiaret se présente comme une zone de contact entre le Nord et le Sud, faisant partie des hautes plaines. Le territoire de la wilaya est constitué des zones montagneuses au Nord, de hautes plaines au centre et les espaces semi-arides au Sud. Ce caractère hétérogène de l'espace montre la variabilité des paysages agricoles et des reliefs. Elle couvre une partie de l'Atlas tellien au Nord, et les hauts plateaux au centre et Sud, elle englobe deux parties bien distinctes ; la région agricole du Nord, où la céréaliculture se trouve associée à l'élevage, et la zone steppique au Sud, où l'élevage extensif est pratiqué (Abderrabi, 2010).

III.2.2.2. Situation de la forêt de Tagdempt

III.2.2.2.1. Situation géographique

La forêt domaniale de Tagdempt fait partie de la forêt domaniale de la wilaya de Tiaret. Elle est située dans la zone Nord-ouest de la wilaya de Tiaret (Figure III.2). Elle se localise selon les coordonnées géographiques mentionnées dans le tableau III.1.



Échelle : 1/50000

Figure III.2. Situation géographique de la zone de Tagdempt
(Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2012)

Tableau III.1. Situation géographique de la forêt domaniale de Tagdempt
(Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2012)

Localisation	Coordonnées géographiques	
	Longitude	Latitude
Nord-ouest	1°18007	35°40083
Nord-est	1°28675	35°38812
Est	1°31037	35°36914
Sud-est	1°26719	35°35061
Sud-ouest	1°19678	35°33622
Ouest	1°16224	35°37174

Elle est limitée :

- au Nord par la forêt sectionnelle de Guertoufa et la commune de Guertoufa ;
- au Nord-ouest par la forêt domaniale de l'Azouania ;
- à l'Ouest par Djebel Mimounia ;
- à l'Est par la commune de Tiaret ;
- au Sud par la commune de Tagdempt.

La forêt de Tagdempt s'étend sur une superficie de 4893 ha, elle chevauche le territoire de trois communes : Tiaret, Guertoufa et Tagdempt.

III.2.2.2.2. Situations administrative et forestière

La forêt de Tagdempt, dépend de la conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, elle s'étend sur les trois communes : Tiaret, Guertoufa et Tagdempt.

III.2.2.3. Caractéristiques climatiques

Par sa position géographique et la diversité de son relief, la région de Tiaret subit des influences climatiques conjuguées des grandes masses d'air, de l'exposition du relief et de l'altitude. En effet, pendant la saison hivernale, les masses d'air froides provenant de l'Atlantique rencontrent les masses d'air chaudes et humides ce qui provoque une instabilité et des perturbations climatiques à l'origine des pluies hivernales parfois intenses (Halitim, 1988). Durant la saison estivale naissent les masses d'air tropicales liées à l'anticyclone des Açores prédominant et provoquent une zone de haute pression à l'origine d'un type de temps sec et ensoleillé qui perdure jusqu'à la fin du mois de septembre au début d'octobre (Halitim, 1988). Entre les deux saisons (printemps et automne), des influences d'air saharien se manifestent fréquemment par des vents secs et chauds (sirocco), entraînant une augmentation importante du pouvoir évaporant de l'atmosphère et provoquent ainsi des coups de chaleur néfaste pour la végétation (Halitim, 1988). Le climat de Tiaret est de type semi-aride transitionnel entre le climat aride du Sahara et le climat méditerranéen de la côte avec des pluies concentrées pour l'essentiel sur la période hivernale (Abdelli, 2002).

- **Pluviométrie**

D'après Le Houérou (1969), l'étude de la variabilité de la pluviométrie interannuelle exprime le caractère irrégulier de la pluviosité d'une année à l'autre, les années sèches et mêmes très sèches se succèdent aux années pluvieuses selon un rythme de plus en plus irrégulier accentuant le caractère de tendance à l'aridité du climat. Selon Duvignaud (1992) cité par Miara (2011) les conditions climatiques dans la région de Tiaret sont marquées par une pluviométrie moyenne entre 300 et 600 mm durant la période (1982-2009).

III.2.2.4. Types de sol

Le sol est silicio-calcaire moyennement profonds et sableux dans les hauteurs sur environ 130 ha, argileux sur 80 ha et siliceux sur tout le reste de la forêt de Tagdempt. Il est qualifié de frais et de bonne qualité dans les profondeurs (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006).

III.2.2.5. Relief et hydrographie

Le relief de la zone de Tagdempt est montagneux et accidenté, du Nord vers le Sud, avec des pentes de 10 à 25 %. Le relief de la forêt de Tagdempt est accidenté, avec une altitude qui varie entre 750 et 1224 m. La rocaille représentée par des falaises, constitue environ 30 % de recouvrement (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006). Rappelons que l'altitude de site de prélèvement de nos échantillons varie entre 750 et 770 m. Les principaux oueds sont : Oued Mesguida, Oued Sefalou, les principaux points d'eau : Ain El Kedah et Ain Mesguida (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006).

III.2.2.6. Composition floristique

Les principales essences forestières recensées au niveau de la forêt de Tagdempt sont: *Pinus halepensis*, *Juniperus oxycedrus*, *Quercus suber*, *Quercus coccifera*, *Quercus ilex*, *Cupressus sempervirens* (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006). De plus d'autres espèces relevant de la couverture forestière y sont enregistrées: *Calycotome spinosa*, *Phylaria media*, *Artemisia herba-alba*, *Ampelodesma mauritanica*, *Chamaerops humilis* (Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006).

III.3. Protocoles expérimentaux et techniques d'études

III.3.1. Travail de terrain

Dans chacune des deux régions, nous avons choisi dans un premier temps trois placettes d'une superficie avoisinant l'hectare environ et géographiquement éloignées les unes des autres. Dans chacune de ces trois parcelles un sujet jeune et sain a été échantillonné.

III.3.1.1. Echantillonnage

L'échantillonnage est défini comme étant l'ensemble des opérations qui ont pour objectif de relever, dans une population, les individus devant constituer l'échantillon (Gounot, 1969).

- *Sélection des régions-échantillons et choix des arbres-échantillons*

Celle-ci a été effectuée à partir des documents de l'inventaire forestier des deux régions. Le choix s'est porté sur des arbres jeunes, non fourchus, à cime bien équilibrée, aux tiges saines et ne présentant aucun défaut ou malformation importante. Cet échantillonnage ne peut néanmoins être considéré comme représentatif des pistachiers de l'Atlas existants en Algérie (plusieurs régions sont absentes de l'échantillonnage). Notons qu'il aurait été préférable d'effectuer des prélèvements des carottes, cependant cette opération était impossible du fait de la faible pénétration des tarières de Pressler utilisées (trois tarières dont une a été cassée à l'intérieur du tronc) pour les prélèvements à cause de la dureté du bois¹. Dans ce contexte, une première approche de la technique a tout d'abord consisté à prélever des billons, pour leur étude, cette méthode permet certes de connaître précisément la qualité du bois, mais présente l'inconvénient d'être destructive et longue à l'emploi. De ce fait, l'échantillonnage était forcément limité. Les arbres utilisés ont un âge allant de 24 à 51 ans à circonférence comprise entre 44 et 70 cm à une hauteur de 1,30 m² du sol (Tableau III.2).

III.3.1.2. Mesures dendrométriques

Sur chaque arbre des deux peuplements, des mesures dendrométriques ont été effectuées au mètre ruban (Figure III.3) dont les principales caractéristiques sont exposées dans le tableau III.2.

- la hauteur totale de l'arbre (en m) ;
- la hauteur à la 1^{ère} fourche (à la découpe commerciale) (en m) ;

¹ Cette espèce est qualifiée d'arbre de fer (Monjauze, 1980).

² Cette hauteur constitue une hauteur de référence pour la plupart des mesures effectuées en forêt sur les arbres sur pied.

- la circonférence à la base (en cm) ;
- la circonférence à 1,30 mètre (en cm) ;
- la circonférence à la 1^{ère} fourche (en cm) ;
- la largeur du houppier (en m).

Tableau III.2. Données dendrométriques des arbres mesurés sur terrain

Localisation de la forêt	Situation géographique	Exposition	Type de sol	Numéro d'arbre	Âge (ans)	Altitude(m)	Circonférence (cm)			Hauteur (m)		Largeur de l'houppier (m)
							à la base	1,30	1 ^{ère} fourche	1 ^{ère} fourche	Totale	
Tiaret (Forêt de Tagdempt)	Versant sud	Sud-est	Sol brun	1	50	750	66 à 0,2	51	55	1,84	4,34	3,70
				2	37	760	53 à 0,1	44	40	1,70	5,65	3,50
				3	47	770	90 à 0,3	70	80	1,80	6,14	5,80
Sidi Bel Abbès (Région de M'cid)	Plaine de M'cid	plat	Sol brun	1	24	420	68 à 0,1	57	67	1,81	3,23	4,70
				2	51	420	82 à 0,1	58	68	1,90	4,02	4,20
				3	(47ou 48)	420	77 à 0,2	59	54	1,85	4,85	4,70

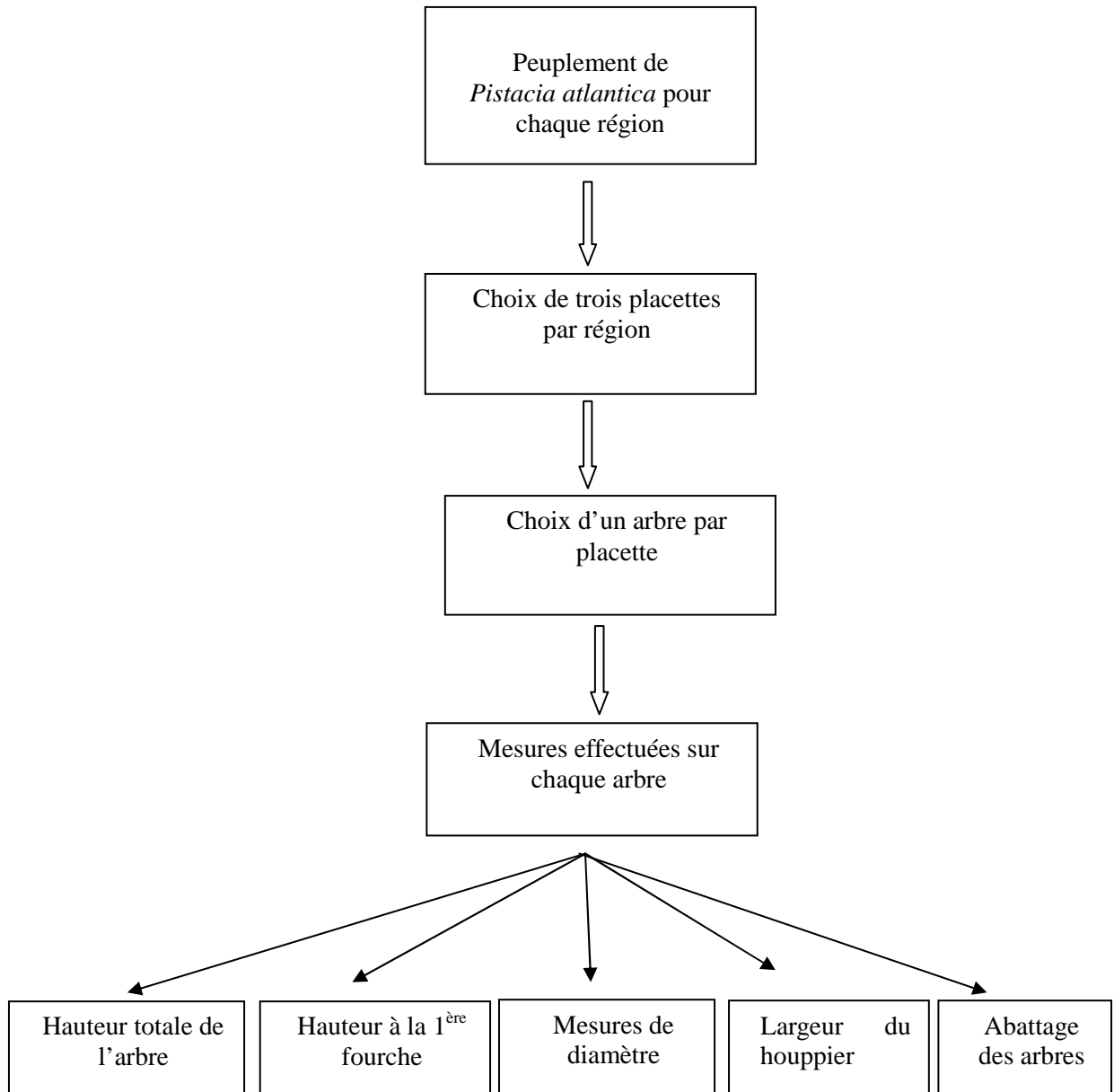


Figure III.3. Diagramme des séquences opératoires réalisées sur terrain

III.3.1.3. Débit des billons

Dans chacun des six arbres échantillonnés un billon de 50 cm de longueur à 1,30 m de hauteur (hauteur d'homme) a été débité à l'endroit du sondage des carottes de sélection, car nous étions certain des caractéristiques du bois, et l'inclinaison du fil y est atténuée et moins prononcée et une rondelle de 15 cm d'épaisseur prélevée à la base de chaque grume, comme l'illustre les figures III.4 et III.5.

Chacun des billons a été marqué d'une lettre indiquant sa provenance, T (Tiaret) et S (pour la région de Sidi Bel Abbès), suivie par un numéro de 1 à 3 indiquant le numéro de l'arbre. Le premier arbre choisi a été désigné par le numéro 1. Par exemple : S₂ désigne le 2^{ème} arbre prélevé de la région de Sidi Bel Abbès. De la sélection au rapatriement des billons au LERFoB de l'INRA de Nancy, une semaine s'est écoulée.

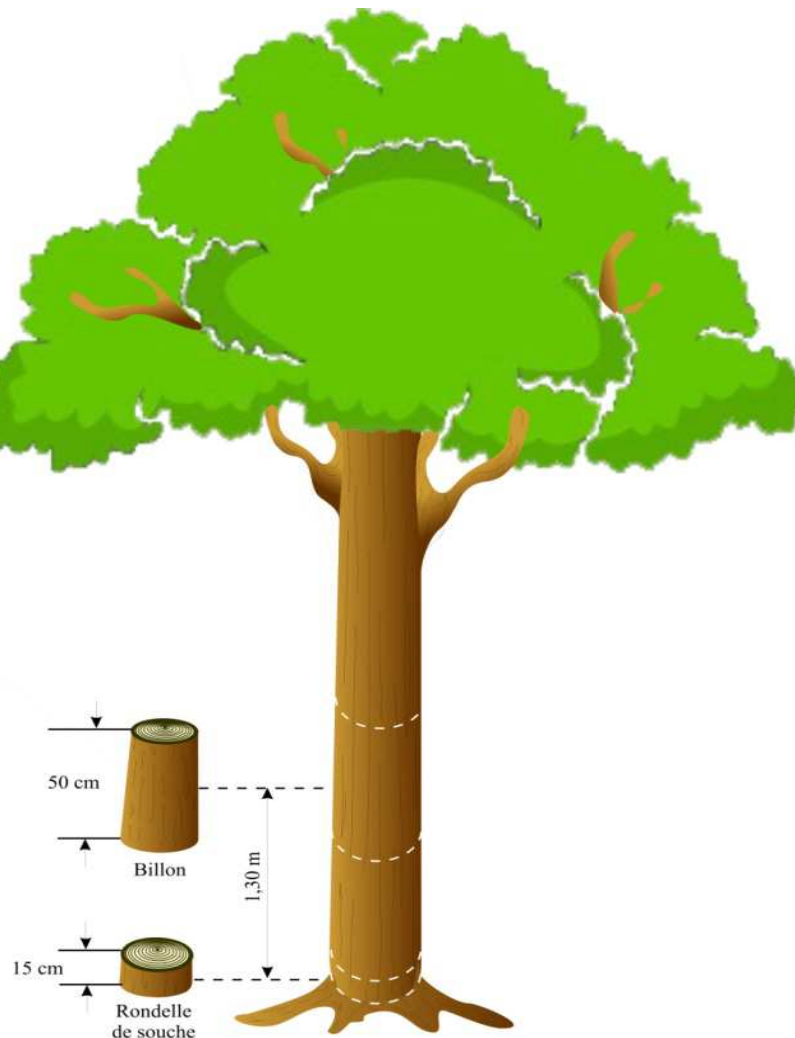


Figure III.4. Débit d'un billon et d'une rondelle de souche à partir d'un arbre



Figure III.5. Débit d'un billon à partir d'un arbre du pistachier de l'Atlas de la région de Tiaret (Tagdempt)

III.3.2. Travail de laboratoire

III.3.2.1. Scanner des billons et des rondelles de souche

Le matériel expérimental est constitué de six billons qui ont été par la suite découpés en cinq rondelles. Avant de procéder au sciage pour l'obtention des rondelles, tous les billons et les rondelles de souche ont été scannés à l'état frais (deux semaines après l'abattage) à l'aide d'un scanner médical 3D de type "Bright Speed", dont le but de savoir leur état ainsi que leur densité (Figure III.6).



Figure III.6. Numérisation des billons à l'aide d'un scanner médical 3D adapté au matériau bois

III.3.2.2. Découpe des billons en rondelles

Après l'établissement du plan de découpe et de repérage, un rayon passant par la moelle (le plus grand rayon sur sa face supérieure), puis une génératrice ont été tracés tout au long de chaque billon. Chaque billon a été découpé en cinq rondelles en commençant du bas vers le haut. Au total nous avons collecté, après cette opération, 30 rondelles (y compris les six rondelles de souche) (Gelhay et Mothe, 2006) (Figure III.7).

- une rondelle n°1 de 3,5 cm a été découpée en barrettes de 2 mm d'épaisseur destinées aux mesures microdensitomériques (cette dimension est imposée par des contraintes techniques : pour que le sciage s'opère sans difficulté et que le temps de sciage ne soit pas long) (Gelhay et Mothe, 2006) ;

- une rondelle n°2 de 5 cm est destinée au comptage du nombre de cernes et la mesure de leur largeur. Sur chaque rondelle, une fente radiale a été sciée suivant la génératrice en passant par la moelle ;
- une rondelle n°3 de 5 cm à titre conservatoire, également sciée de façon similaire à la précédente ;
- une rondelle n°4 de 20 cm destinée aux essais mécaniques ;
- et enfin une rondelle n°5 de 10 cm à titre conservatoire. Chaque rondelle a, ensuite été immatriculée sur sa face supérieure par la lettre S ou T indiquant la provenance, suivie du numéro d'arbre (1 à 3), du numéro de rondelle (1 à 5 du bas vers le haut) et, enfin, du numéro de rayon (1 à 4). Exemple : S_{3.4.1}, nous indique qu'il s'agit de l'arbre provenant de Sidi Bel Abbès, numéro 3, rondelle 4, rayon 1.
- la rondelle de souche de 15 cm a été destinée au comptage du nombre de cernes pour estimer l'âge de l'arbre, sur la face inférieure de laquelle deux rayons non opposés ont été tracés (Gelhaye et Mothe, 2006).

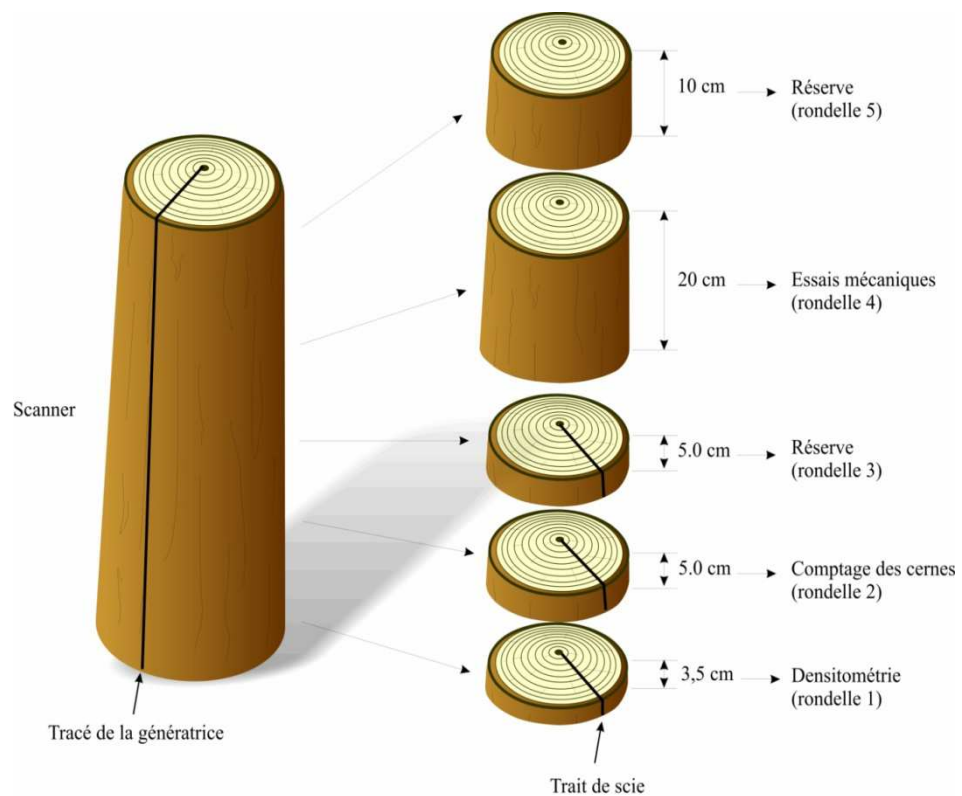


Figure III.7. Découpe d'un billon en cinq rondelles

III.3.2.3. Évolution radiale de la largeur de cerne

III.3.2.3.1. Comptage du nombre de cernes et mesure de leur largeur

a. Comptage effectué sur la rondelle de souche

Après avoir tracé deux rayons non opposés, puis surfacé la face inférieure de toutes les rondelles de souche, afin de faciliter leur observation, nous avons effectué un premier comptage

"manuel" à la loupe binoculaire pour estimer l'âge de l'arbre. Nous avons effectué un deuxième comptage à l'aide de l'appareil Lintab afin de valider la première estimation (Figures III.8 et III.9).



Figure III.8. Surfaçage d'une face d'une rondelle de souche à l'aide d'un scalpel



Figure III.9. Comptage manuel des cernes d'une rondelle de souche du pistachier de l'Atlas à la loupe binoculaire

b. Comptage effectué sur la rondelle n°2

Quatre rayons opposés sont tracés sur la face supérieure de la rondelle n°2, puis la face inférieure surfacée, afin de faciliter l'observation. Nous avons pointé chaque limite de cernes de l'écorce vers la moelle, à l'aide d'un appareil "Lintab" spécialement développé pour ce type de mesure au LERFoB. Cet appareil se compose d'une partie optique et mécanique, permettant la lecture et le pointage des limites de cernes, et d'une partie acquisition des données pilotée par le logiciel "Profil-Lintab". Ce logiciel nous donne accès à 3 variables :

- l'année ;
- le nombre de cernes;
- la largeur de cernes (Figures III.10 à III.12).



Figure III.10. Rondelle n°2 surfacée selon les quatre rayons tracés



Figure III.11. Comptage du nombre de cerne et leur largeur à l'aide de l'appareil Lintab

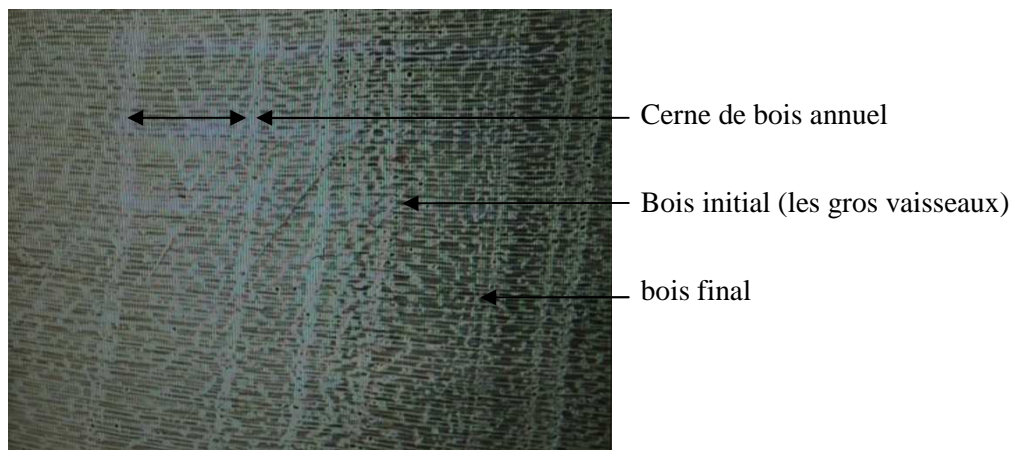


Figure III.12. Vue d'un ensemble de cerne de pistachier de l'Atlas à l'aide de l'appareil Lintab

Ces variables ont été exploitées à l'aide d'un tableur de type "Excel" afin de calculer la position relative de chaque cerne sur le rayon selon la formule suivante :

$$Pos\ Cer\ (\%) = [L_T R - Dst\ (Eco-Cer)] / L_T R \times 100.$$

Avec :

$L_T R$: Longueur totale du rayon ;

$Dst\ (Eco-Cer)$: Distance mesurée au Lintab entre l'écorce et le début du cerne.

III.3.2.4. Analyse microdensitométrique

Précisons que nous nous intéressons à la *masse volumique du bois* à l'état dit "*sec à l'air*" - nous l'appellerons "*densité du bois*"³ -, nous rappelons aussi que la microdensitométrie est une technique d'étude du bois qui permet d'atteindre *les variations de cette densité à l'intérieur du cerne*, dont le principe est basé sur l'absorption du rayonnement X par le matériau. Cette méthode a été mise au point par Polge (1966). La chaîne de mesure microdensitométrique développée au LERFoB et décrite par Mothe (1998) a été utilisée pour analyser les variations de densité à l'intérieur du cerne du bois de pistachier de l'Atlas. Les mesures de densité ont été effectuées sur des barrettes de 2 mm d'épaisseur qui ont été prélevées dans la rondelle n°1. Sur chaque arbre nous avons prélevé 4 barrettes, ce qui représente un total de 24 barrettes (4 barrettes x 6 arbres).

On considère que l'image obtenue sur le film est fonction de deux paramètres, d'une part de l'épaisseur traversée, et d'autre part de la densité du matériau (Mothe et al., 1998).

Pour s'affranchir du paramètre "épaisseur", on découpe les échantillons avec un train de scies fraise jumelées de manière à obtenir deux faces rigoureusement parallèles. L'image ainsi obtenue sur le plan film est en relation directe avec la densité.

Une cale d'étalonnage en acétate de cellulose, un matériau de constitution atomique proche du bois et comportant 3 paliers d'épaisseur connues, radiographiée avec les échantillons, permet le calibrage et la conversion du niveau de gris vers la densité du bois.

Le traitement de l'image obtenue est effectué à l'aide d'un logiciel spécifique développé au LERFoB par Mothe et al. (1998). Une fois ce traitement appliqué à l'image, nous disposons de la densité pixel par pixel de l'échantillon. Il serait bien sûr déraisonnable d'exploiter cette information brute, c'est pourquoi nous avons décidé d'effectuer des moyennes par zone.

III.3.2.4.1. Barreaux prélevés en prévision des mesures microdensitométriques

Nous rappelons que les rondelles n°1 ont été destinées à la microdensitométrie. Sur chacune des rondelles n°1, ont été découpés 4 barreaux suivant les 4 rayons tracés de la même manière que sur les rondelles n°4, de telle sorte que chaque barreau passe par la moelle avec une terminaison pointue. Le barreau correspondant à la plus grande longueur entre la moelle et l'écorce a été nommé "rayon 1", le rayon diamétralement opposé "rayon 2", le rayon perpendiculaire en tournant à partir du rayon 2 dans le sens horaire nommé "rayon 3", le rayon opposé au rayon 3 "rayon 4" (Figure III.13).

³ La densité à l'état sec à l'air, que l'on nomme simplement « densité » dans le manuscrit, correspond à la densité du bois à une humidité d'environ 12% (humidité du bois mis en œuvre en menuiserie intérieure).

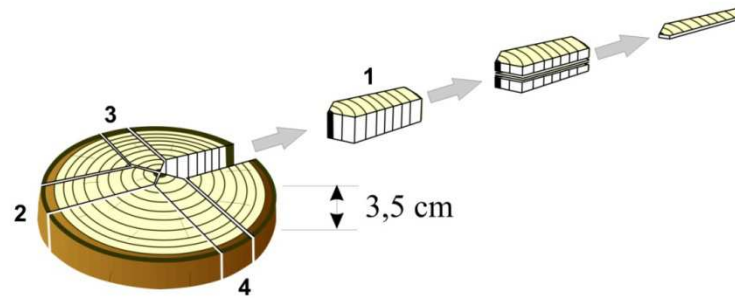


Figure III.13. Découpe de la rondelle n°1 en quatre barreaux puis en barrettes destinées aux analyses microdensitométriques

III.3.2.4.2. Conditionnement hygrothermique des barreaux après sciage

Les barreaux ainsi sciés ont été conditionnés à 12 % d'humidité, stockés pendant plusieurs mois à l'abri. Leur humidité a été contrôlée par la pesée quotidienne avec une balance de précision de marque "AG 204 METTLER TOLEDO Max 210g. d = 0.1mg" jusqu'à stabilité de leur poids.

III.3.2.4.3. Découpe des barrettes destinées à la microdensitométrie

Le but étant d'obtenir des plaquettes de 2 mm d'épaisseur rigoureusement constante (± 1 centième de mm) et d'orientation correcte dans son plan orthotropique en vue de leur exposition aux rayons X, ce type de découpe s'effectue en 2 phases (Gelhay et Mothe, 2006) :

- **phase 1** : Découpe d'un barreau à partir d'une rondelle en prenant soin d'orienter autant que faire ce peut le barreau dans sa direction longitudinale/tangentielle (Figure III.14) ;
- **phase 2** : Découpe de la barrette de 2 mm à l'aide de deux scies fraise jumelées (Figure III.15).

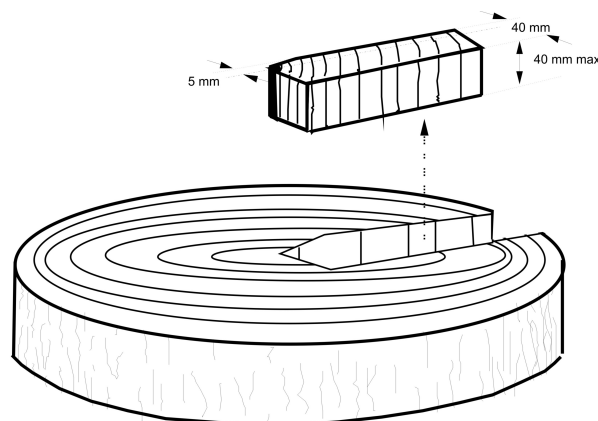


Figure III.14. Découpe d'un barreau à partir d'une rondelle selon sa direction (L*R)



Figure III.15. Découpe d'une barrette du pistachier de l'Atlas dans un barreau

La découpe des barrettes s'effectue à l'aide d'une machine développée par la société "Industrialisation et Développement", elle se compose d'une tête comprenant deux scies fraises jumelées pour avoir une surface lisse, d'un étau de serrage monté sur une table de déplacement en x et en y commandé à l'aide d'une manivelle (Figure III.16 et III.17). La pièce à découper était placée dans l'étau, fixée par serrage léger afin d'éviter l'endommagement de la structure et positionnée de telle façon qu'elle soit bien orientée dans le plan (L* R). Nous avons scié ensuite de la droite vers la gauche afin d'obtenir des barrettes d'épaisseur homogène de 2 mm (Figure III.18). A la fin de cette opération nous avons obtenu 24 barrettes.

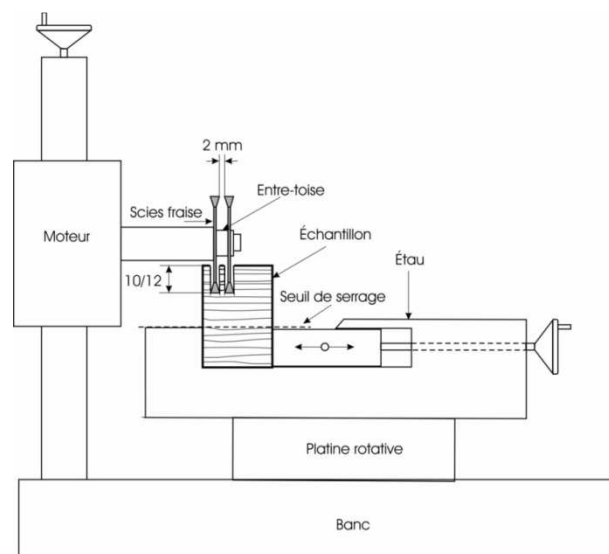


Figure III.16. Schéma d'une vue latérale du dispositif de sciage



Figure III.17. Dispositif de sciage (vue générale)



Figure III.18. Dispositif de sciage (vue proche)

Afin d'obtenir une bonne image radiographique, il est nécessaire d'orienter la découpe de la barrette de 2 mm selon le plan orthotropique du bois (Figures III.19 à III.21).

A noter qu'une barrette mal orientée occasionne un flou, particulièrement sensible sur les limites de cerne, ce flou de l'image radiographique induit également une sous estimation des densités maximale et minimale.

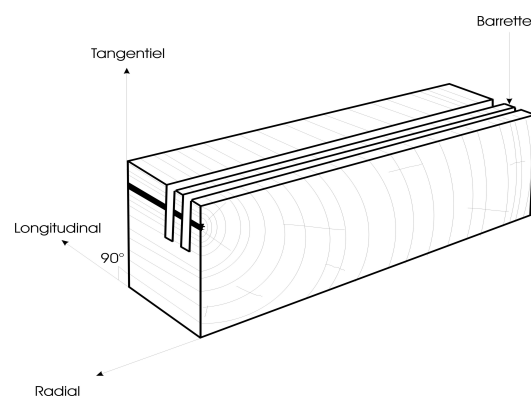


Figure III.19. Découpe d'une barrette dans un barreau selon le plan orthotropique du bois

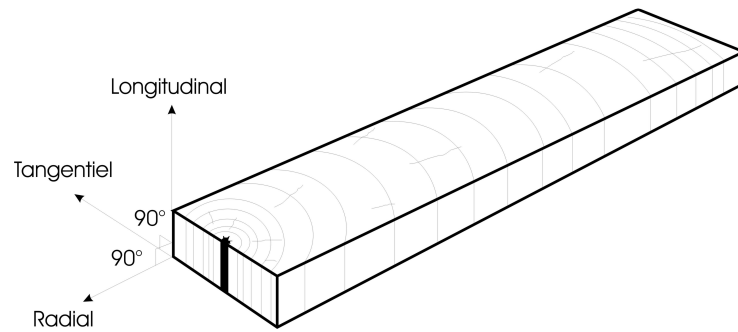


Figure III.20. Découpe d'une barrette dans un barreau selon le plan orthotropique du bois



Figure III.21. Barrettes du pistachier de l'Atlas destinées à la microdensitométrie

III.3.2.4.4. Exposition des échantillons aux rayons X

Le dispositif de radiographie habituellement utilisé au LERFoB n'étant pas opérationnel au moment de nos mesures, nous avons utilisé une méthode alternative pour radiographier les éprouvettes (Gelhaye et Mothe, 2006). Cette méthode, qui est encore en cours de développement, présente l'inconvénient de fournir des images de plus faible résolution que la méthode traditionnelle. Le mode opératoire a été le suivant :

- nous avons placé les échantillons sur un support (papier collant pour assurer leur maintien) de même dimension utile qu'un film radio (21,5 x 15,5 cm) ;
- nous avons placé ensuite la cale à 3 paliers (épaisseur la plus fine toujours du côté gauche). Nous avons relevé le numéro des échantillons sur un papier libre, dans leurs positions exactes ;
- nous avons placé les échantillons (côté cœur toujours à gauche) et la cale à 3 paliers, dans le même ordre sur le support papier (Figure III.22).



Figure III.22. Disposition des éprouvettes du pistachier de l'Atlas et de la cale sur le support

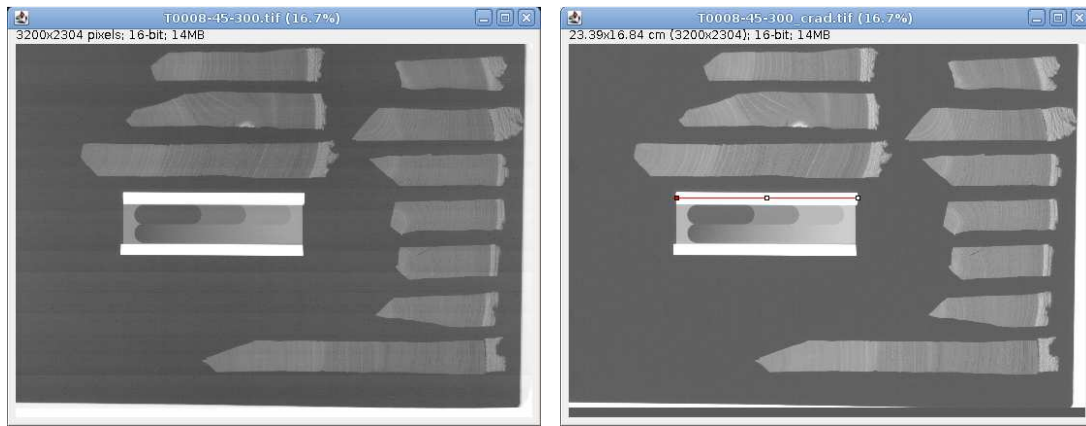
- L'ensemble a ensuite été placé dans l'appareil de radiographie. Celui-ci se compose d'un tube à rayons X "Hamamatsu microfocus L9181-02" de 130 kV, d'un détecteur numérique matriciel "Varian PaxScan 4030R" et d'un logiciel d'acquisition fourni par l'assembleur "Digisens". L'irradiation a été effectuée à 45 kV et 300 μ A pendant quelques secondes (Figure III.23).
- Toutes les barrettes ont ensuite été pesées à l'aide d'une balance de marque "AG 204 Mettler Toledo, Max 210g, d = 0,1mg" et leur dimension mesurées à l'aide d'un pied à coulisse de marque "Migiroche- 0,01mm à 200 mm".



Figure III.23. Disposition des échantillons dans l'appareil de radiographie

III.3.2.4.5. Traitement des images radiographiques

Un programme écrit sous forme de plug-in dans le logiciel d'analyse d'images "ImageJ" a tout d'abord été utilisé pour homogénéiser les images. Cette opération utilise deux acquisitions complémentaires effectuées à vide avec et sans rayonnement pour éliminer les hétérogénéités dues au capteur. Dans le même temps, l'image a été calibrée spatialement grâce à la cale dont les dimensions exactes sont connues (Figure III.24).



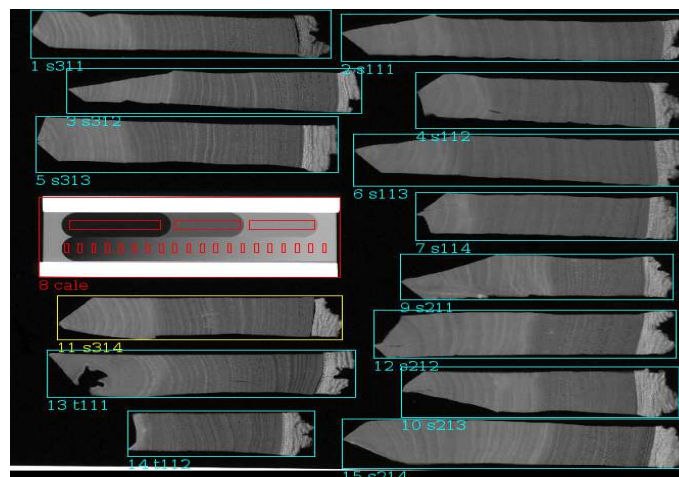
(A) Image initiale

(B) Image homogénéisée

Figure III.24. Cliché de prétraitement de l'image radiographique

a. Logiciel "CRAD" (Calibrage-Radiographie-Densité)

Le logiciel "CRAD" a ensuite été utilisé. Ce logiciel permet d'individualiser et nommer les éprouvettes, de convertir les niveaux de gris en valeurs de densité et d'enregistrer l'image de chaque éprouvette (Figure III. 25).

**Figure III.25.** Cliché d'individualisation des éprouvettes du pistachier de l'Atlas avec le logiciel "CRAD"

b. Logiciel "CERD" (CERne-Densité)

Le logiciel "CERD 2.04" développé par Mothe et *al* (1998) permet d'établir les limites des cernes et les limites entre le bois final et le bois initial avec la possibilité pour l'opérateur d'apporter des corrections sur les limites des cernes surtout quand il s'agit de faux cernes. C'est un logiciel d'indexage des limites de cerne et de statistique à partir des fichiers délivrés par le programme précédent (Figure III.26).

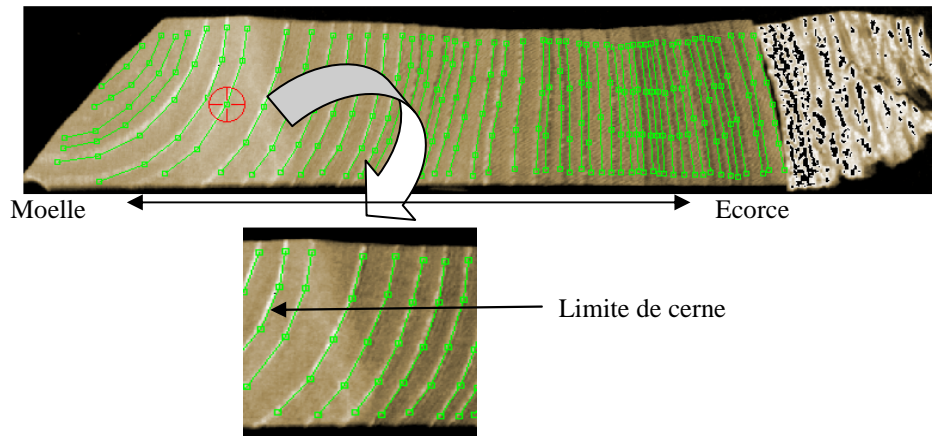


Figure III.26. Délimitation des cerne du pistachier de l'Atlas avec le logiciel "CRED"
(Cas de la barrette T_{1.1.4} prélevée de T₁)

c. Logiciel "CESD" (CErne Synthétique en Densité)

Logiciel de statistiques utilisable sous MS-DOS. Il calcule les moyennes par cerne des données issues de CERD "crd" sur les 10 zones de mesures ; il crée un fichier "csd" dont chaque ligne représente un cerne. Il donne également la densité corrigée par la densité gravimétrique. Cet outil nous permet d'avoir les valeurs suivantes pour chaque cerne :

- ✓ les valeurs extrêmes de densité du cerne (DMin, DMax) ;
- ✓ la densité moyenne des 5% de la largeur les plus faibles et les plus forts (c'est à peu près comme min/max mais un peu plus stable) (DMin-5, DMax-5) ;
- ✓ la densité moyenne (DMoy),
- ✓ la densité du bois initial (DBI), la densité du bois final (DBF) ;
- ✓ la largeur de cerne (LC), la largeur du bois initial (LBI) et la largeur du bois final (LBF) ;
- ✓ l'année de cerne (An) ;
- ✓ le profil microdensitométrique obtenu à partir de 20 valeurs de densité par cerne.

Les paramètres que nous avons étudiés dans cette partie sont :

- ✓ les valeurs extrêmes de densité du cerne (DMin, DMax) ;
- ✓ la densité moyenne des 5% de la largeur les plus faibles et les plus forts (c'est à peu près comme min/max mais un peu plus stable) (DMin-5, DMax-5) ;
- ✓ la densité moyenne (DMoy),
- ✓ l'année de cerne (An) ;

III.3.2.5. Essais mécaniques

Parmi les caractéristiques mécaniques du bois les plus importantes et les plus significatives nécessitant un faible effort expérimental, la rigidité du bois qui est une grande raideur correspond à une relativement faible déformation en flexion, sous une contrainte donnée (Bordonné, 1989).

La présente partie vise à compléter la caractérisation qualitative du bois du pistachier de l'Atlas poussant dans la région Nord-ouest de l'Algérie, il s'agit de déterminer les propriétés

mécaniques du bois par la méthode de "*vibrations forcées sans contact sur poutres flottantes très élançées*" Cette méthode mettant en œuvre un dispositif, qui a été développé au Laboratoire (LMGC) à Montpellier par Elkaïm, permet de mesurer les modules d'élasticité (longitudinal " E_L ", spécifique " E_L/ρ ") et l'amortissement " $\tan \delta$ " d'éprouvettes sans défaut et donner des résultats très similaires à ceux de la méthode mécanique. Cet objectif a demandé de suivre une méthode de mesure vibratoire qui soit précise, répétable et rapide pour les déterminations de coefficients d'amortissement, et qui se caractérise par une mesure fiable, une sauvegarde automatique des résultats sous forme aisément exploitable, un temps d'essai et de récupération des données aussi réduit que possible, reproductible et applicable à un grand nombre d'échantillons.

Les propriétés vibratoires élémentaires considérées sont le module d'élasticité longitudinal " E_L ", le module d'élasticité spécifique " E_L/ρ ", et le coefficient d'amortissement " $\tan \delta$ " en direction longitudinale de bois de types différents (bois d'aubier, bois de duramen, bois mixte). Dans le but de mieux comprendre ces propriétés vibratoires, la densité a également été évaluée sur les mêmes échantillons. Ces mesures ont été corrélées avec la densité du bois afin de montrer les relations des propriétés en fonction de la provenance des arbres, des arbres eux-mêmes, et de type de bois.

III.3.2.5.1. Découpe de la rondelle n°4

Sur la face inférieure, d'une rondelle n°4 de 20 cm, destinée aux essais mécaniques, nous avons tracé quatre rayons opposés au crayon fuchsine : le 1^{er} rayon, correspondant au rayon le plus grand⁴, le 2^{ème} rayon opposé au 1^{er} rayon, le 3^{ème} rayon perpendiculaire aux 1^{er} et 2^{ème} rayons en tournant à partir du 2^{ème} rayon dans le sens des aiguilles d'une montre, le 4^{ème} rayon opposé au 3^{ème} rayon. Cette façon de faire a pour objectif de contrôler autant que possible la localisation du bois de tension, s'il en existe (Bordonné, 1989) En théorie, le rayon 1 correspondra au bois de tensions s'il existe, le rayon 2 au bois opposé, les rayons 3 et 4 au bois normal.

La position de découpe de 12 éprouvettes de 2 mm d'épaisseur dans le sens radial et 12 mm de largeur dans le sens tangentiel est déterminée par la suite, sur chaque rondelle. Ces éprouvettes ont été prélevées sur deux des plus grands rayons tracés sur chaque rondelle, en évitant les défauts apparents : rayons 1 et 4 pour la rondelle S_1 , rayons 2 et 4 pour les rondelles S_2 , S_3 , T_3 , et rayons 1 et 3 pour T_1 et T_2 (Figure III.27).

Avant de procéder à la découpe de la rondelle n°4, les mesures suivantes ont été effectuées :

- la longueur totale des 4 rayons (en mm), sur les deux faces du billon 4 de chaque arbre.
- l'épaisseur de l'écorce et celui de l'aubier, sur les 4 rayons opposés des deux faces du billon 4 de chaque arbre.
- la distance entre l'écorce et chaque éprouvette tracée sur les deux rayons sur la face inférieure des billons 4, a été mesurée afin de calculer sa position relative par rapport au rayon, selon la formule suivante :

⁴ Le bois de tension est fréquemment localisé dans le plus grand rayon.

$$Pos\ Epr\ (\%) = [L_T R - Dst\ (Eco-Epr)] / L_T R \times 100.$$

Avec :

$L_T R$: Longueur totale du rayon ;

$Dst\ (Eco-Epr)$: Distance entre l'écorce et l'éprouvette.

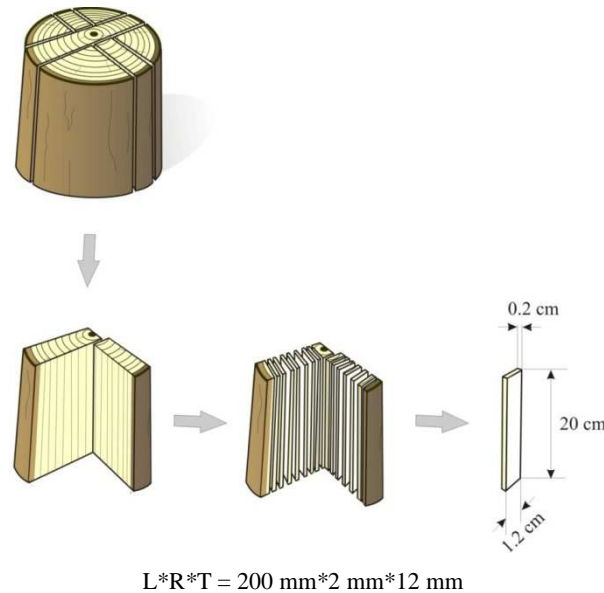


Figure III.27. Découpe de la rondelle n°4 en éprouvettes destinées aux essais mécaniques suivant les quatre rayons tracés

III.3.2.5.2. Préparation et conditionnement des éprouvettes

a. Débit des éprouvettes

Le prélèvement des 72 éprouvettes de 200*12*2 mm ($L * R * T$) a été fait au LERFoB en respectant au mieux l'orientation principale du fil, leur faible épaisseur notamment demande une précision d'usinage accrue. Le type d'usinage choisi a été la scie circulaire. (Figure III.28).

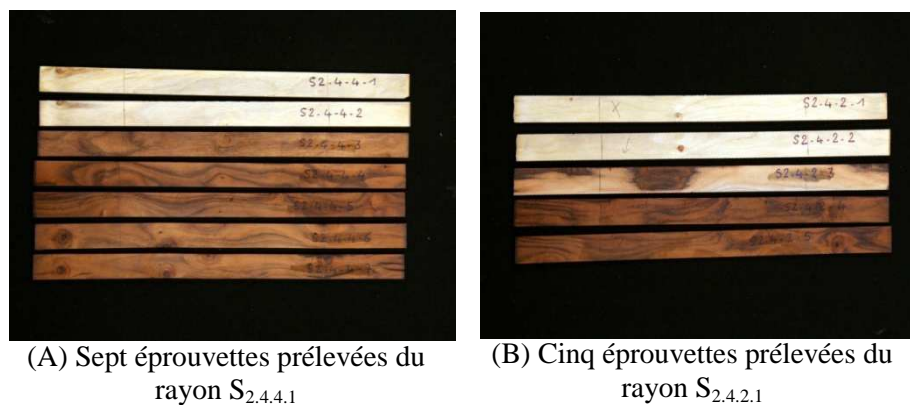


Figure III.28. Les 12 éprouvettes prélevées dans l'aubier et le duramen sur les deux rayons de la rondelle n°4

b. Conditionnement hygrothermique des éprouvettes après sciage

Après sciage, les éprouvettes devaient être stabilisées du point de vue hygrométrique. Ainsi, elles ont été séchées à l'air libre pendant environ 4 semaines dans des conditions non régulées au LERFoB. La valeur finale d'humidité obtenue sur les 72 éprouvettes était de 12 %⁵. En pratique, les essais de vibrations ont été réalisés au LMGC dans une salle régulée à une température de 20°C et une humidité relative de 65 % où les éprouvettes ont été déposées.

III.3.2.5.3. Appareillage

L'appareillage utilisé dans cette méthode est le suivant :

- générateur de fonctions marque "Centrad", modèle "763AF" ;
- amplificateur audio ;
- électroaimant ;
- capteur de déplacement sans contact à triangulation laser marque "Idec", modèle "MX1A-B", résolution 0,01 mm (10 mV), fréquence 11,3 kHz ;
- oscilloscope marque "Tektronix", modèle "TDS 2002". Fréquence d'échantillonnage 1GS/s, sensibilité verticale min 2mV/division ;
- PC équipé d'une carte d'émission/acquisition "National Instruments. Conversion A/D" : 12 bits dans un premier temps, puis 16 bits (Figure III.29).

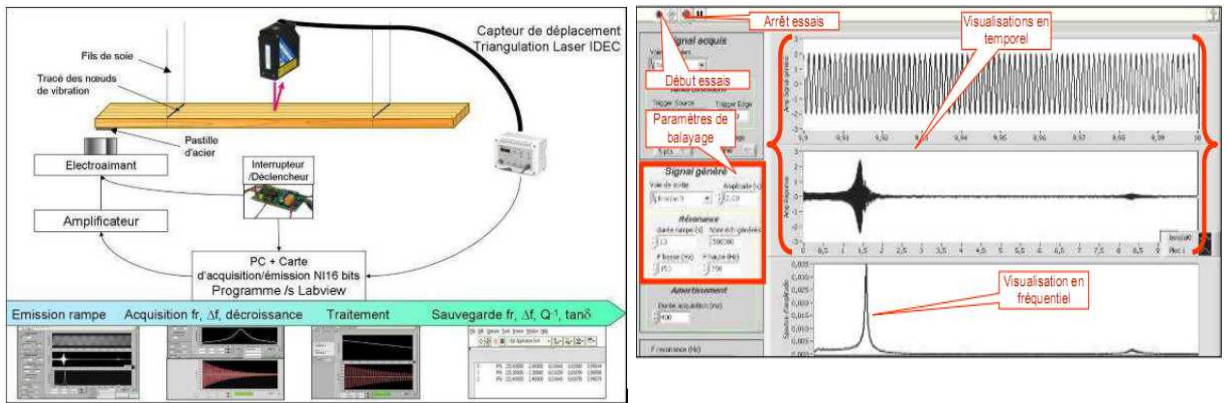
III.3.2.5.4. Mesures vibratoires effectuées sur les éprouvettes

Les séries d'essais menées avaient un double objectif : d'une part, caractériser et comparer les propriétés vibratoires élémentaires (module d'élasticité longitudinal E_L , module d'élasticité spécifique E_L/ρ , et coefficient d'amortissement $\tan\delta$) en direction longitudinale de bois de provenances et de types différents (bois d'aubier, bois de duramen, bois mixte) ; d'autre part, mettre en relation les propriétés vibratoires mesurées avec la densité.

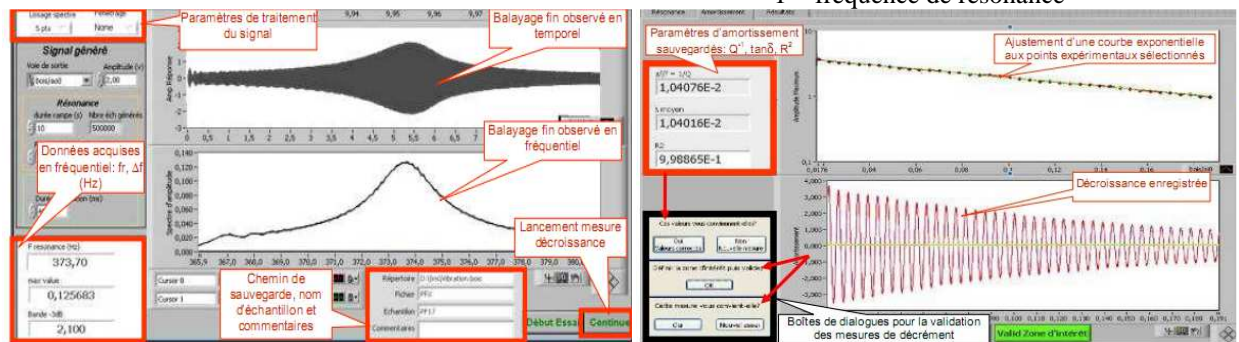
Les nœuds de vibrations des modes de résonance en flexion à étudier sont tracés sur chaque éprouvette. Puis une fine pastille d'acier de 0,05 mm, couvrant la largeur de l'éprouvette et de longueur de 2 à 3 mm, est collée à une extrémité de l'éprouvette avec une goutte de colle. L'éprouvette est suspendue par de très fins fils au niveau des nœuds de vibration du mode étudié. Un balayage en fréquence lui est imposé via un électroaimant placé en regard de la pastille d'acier. L'amplitude de vibration de l'éprouvette est mesurée par un capteur de déplacement sans contact placé en regard d'un ventre de vibration du mode étudié (Planche III.4). A partir de ces données sauvegardées par ce dispositif, les paramètres suivants ont été déterminés : le module d'élasticité

⁵ La teneur en eau « sec à l'air » (stabilisée à 20°C et 65% HR), est généralement admise comme étant à 12% (Brémaud, 2006).

longitudinal " E_L ", le module d'élasticité spécifique " E_L/ρ ", et le coefficient d'amortissement " $\tan \delta$ " en direction longitudinale de bois⁶.



Commandes et visualisations pour la détection de la 1^{ère} fréquence de résonance



Visualisations, indicateurs et commandes pour l'acquisition et la sauvegarde de la fréquence de résonance et du facteur de qualité

Acquisition et traitement des décroissances, calcul du décrement logarithmique, et comparaison avec le facteur de qualité

Figure III.29. Le principe du dispositif expérimental de vibration forcé sans contact développé au LMGC de Montpellier par El Kaïm : Le balayage en fréquence est piloté depuis le PC, la fréquence de résonance, la largeur de bande, le facteur de qualité et le coefficient d'amortissement sont automatiquement mesurés/calculés et sauvegardés

- *Les mesures physiques effectuées*

Le module de Young (obtenu par la méthode dynamique) et la densité ont été mesurés conjointement sur les mêmes éprouvettes. En effet la détermination du module de Young nécessite la prise en compte de la masse et des trois dimensions de l'éprouvette ; l'opérateur doit saisir ces paramètres qui sont nécessaires au calcul des modules apparent ; la masse volumique est obtenue directement à l'issue de la mesure.

- ✓ mesures de masse : ces mesures ont été effectuées pour la détermination des densités, et pour le suivi du conditionnement des éprouvettes destinées aux méthodes vibratoires. Les vérifications de

⁶ Pour plus d'information, étude approfondie sur les méthodes elles-mêmes pourra être trouvée notamment dans les thèses de Bordonné (1989) ; David (1999) ; Brancheriau (2002) ; et les travaux de Brancheriau et Baillères (2001) ; Bernouilli (1748).

masse au LMGC ont été faites sur une balance de précision de marque Sartorius de résolution 0.0001g ;

- ✓ mesures dimensions (longueur, largeur et épaisseur) : la précision sur les mesures de dimensions des éprouvettes est très importante. Ces dimensions vont servir dans les calculs de densités, et surtout de modules d'élasticité, il est important de les quantifier du mieux possible. Elles ont été effectuées à l'aide de pieds à coulisse de marque "Mitutoyo" modèle "DIGIMATIC ABSolu" avec sortie de données. Les mesures de largeur et d'épaisseur ont été faites en 3 positions par éprouvette, les mesures de longueur en une seule position à raison de 3 répétitions pour chacune. (Figure III.30).

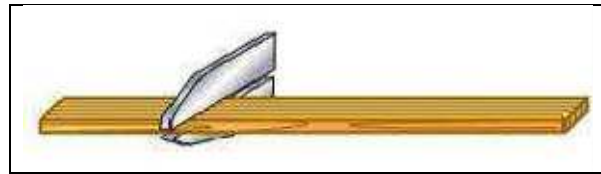


Figure III.30. Positionnement d'une éprouvette entre les faces de mesure d'un pied à coulisse

III.3.2.6. Évaluation de la durabilité naturelle vis-à-vis des champignons lignivores

Pour satisfaire à l'objectif principal de ce travail qui est une contribution à l'étude des propriétés physiques et mécaniques du bois du pistachier de l'Atlas, il est indispensable de dégager certaines données de bases. Cette durabilité a été évaluée au moyen d'éprouvettes normalisées de bois d'aubier et de duramen d'arbres provenant de deux régions différentes du point de vue bioclimatique en Algérie nord-occidentale. Les tests ont été effectués conformément aux normes des directives européennes NE-113 (1996) et NE 350-1(1994) qui permet l'évaluation de la durabilité du bois contre l'attaque fongique.

Malgré toutes les précautions prises lors de l'abattage, un certain nombre d'incidents n'ont pu être évités (cœur abimé pour certaines rondelles) de telle sorte qu'il a été difficile de prendre toutes les rondelles. Nous nous sommes limités à un seul arbre par région, sur lequel une rondelle de réserve de 10 cm était disponible son humidité initiale était proche de 12 %. Les tests de durabilité ont porté donc sur des échantillons de bois de deux arbres⁷ de même âge (en moyenne 49 ans) de deux provenances différentes du point de vue bioclimatique, afin d'apprécier l'impact éventuel des conditions locales sur la qualité de durabilité du bois de cette espèce, il s'agit des rondelles de réserve de 10 cm issues des arbres T₃ âgé de 47 ans et S₂ âgé de 51 ans.

Le principe de détermination et l'évaluation de la durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores cultivés sur milieu gélosé sont basés sur les normes des directives européennes NE 113 (1996) et NE 350-1 (1994) qui quantifient la perte de masse

⁷ Selon les directives de la norme NF EN 113 (1986) : les éprouvettes nécessaires à un essai doivent être prélevées au hasard dans un lot d'éprouvettes provenant d'au moins 2 arbres.

d'échantillons de bois soumis à l'attaque fongique. Les espèces de champignons définies par la norme et utilisées dans le présent travail sont : *Coriolus versicolor* (C.V.), *Gloeophyllum trabeum* (G.T.), *Coniophora puteana* (C.P.) et *Poria placenta* (P.P.).

Ces essais ont été réalisés au Laboratoire LERMaB à la Faculté des Sciences et Technologie de l'Université de Lorraine (Nancy). Le protocole expérimental est réalisé suivant cinq étapes principales : 1. Découpe des éprouvettes du bois destinées aux tests fongiques ; 2. Préparation des milieux de culture ; 3. Séchage des éprouvettes avant leur exposition aux champignons ; 4. Répartition des éprouvettes et exposition aux champignons cultivés sur un milieu gélosé ; 5. Examen des éprouvettes exposées aux champignons.

III.3.2.6.1. Découpe des éprouvettes du bois destinées aux tests fongiques

Sur chaque arbre, 120 éprouvettes de duramen et 120 éprouvettes d'aubier⁸ ont été découpées sur des rondelles à l'aide d'une scie circulaire à 12 % d'humidité. Les dimensions des éprouvettes sont les suivantes : 20 mm X 15 mm X 5 mm, selon les directions longitudinale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Parallèlement, 64 autres éprouvettes de mêmes dimensions que les précédentes ont été découpées sur deux espèces de référence⁹ : 32 éprouvettes de pin (*Pinus sylvestris* Linnaeus) et 32 éprouvettes de hêtre (*Fagus sylvatica* Linnaeus). Le bois de hêtre a été utilisé comme contrôle pour les champignons de la pourriture blanche et le bois de pin pour les champignons de la pourriture brune. Conformément à la norme NE 113 (1996), les éprouvettes de pistachier nécessaires à l'essai ont été prélevées au hasard dans un lot d'éprouvettes les plus saines et sans défauts (Figure III.28). Avant de procéder à l'incubation, toutes les éprouvettes ont vu leurs surfaces soumises à un ponçage superficiel au papier micro-abrasif de grammage 800. Ce procédé avait pour objectif de minimiser de probables arrachements des bords des éprouvettes qui auraient pu être provoqués par le procédé de coupe à la machine. En effet, les champignons pourraient pénétrer à travers ces arrachements ce qui engendrerait des erreurs de mesure de masse.



Figure III.31. Eprouvettes de duramen (1) et d'aubier (2) du pistachier destinées aux tests de durabilité naturelle

III.3.2.6.2. Préparation des milieux de culture

⁸ L'aubier considéré comme non durable quelque soit l'essence, a été échantillonné sur les deux arbres à titre de comparaison avec le duramen.

⁹ Pin sylvestre et le hêtre sont considérés comme des espèces de référence de faible durabilité.

Des boîtes de Petri de 9 cm de diamètre ont été remplies de 20 ml de milieu gélosé stérile préparé à partir de $40 \pm 0,5$ g d'extrait de malt et de $30 \pm 0,5$ g d'agar en poudre dans 1 litre d'eau distillée. Le mélange eau-malt-agar est chauffé à environ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ jusqu'à homogénéisation, le pH du milieu est ajusté à la valeur de 4,8 à l'aide d'une solution d'acide chlorhydrique à 0,1 N puis ce mélange gélosé est stérilisé en autoclave pendant 25 minutes¹⁰ à une température de $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ et sous une pression de 1 bar avant d'être coulé dans des boîtes de Petri stériles et refermées hermétiquement avec du parafilm. Toutes les opérations ont été effectuées dans un environnement stérile, grâce à un travail près d'un bec bunsen sous une hotte à flux laminaire.

Après refroidissement, sous la hotte préalablement nettoyée à l'éthanol, 20 ml du milieu gélosé stérilisé est versée dans chaque boîte de pétri stérile à proximité d'une flamme. Les milieux de culture gélifiés sont alors inoculés avec un disque gélosé de mycélium fongique de 1 cm de diamètre, provenant d'une culture de champignon fraîchement poussée (âgée de 2 semaines). Les boîtes ont ensuite été refermées hermétiquement avec du parafilm.

Les boîtes de Petri ont ensuite été incubées pendant quatre mois dans une enceinte hygothermique réglée à l'atmosphère de 22°C et 70 % d'humidité relative conditionnée pour une croissance optimale des champignons jusqu'à colonisation complète du milieu de la surface par le mycélium, puis jusqu'à ce que ce dernier ait recouvert toute la surface de la boîte pendant une à deux semaines en moyenne (Figure III.32).



Figure III.32. Les éprouvettes du pistachier de l'Atlas après 16 semaines d'incubation dans une enceinte hygro et thermorégulée à 22°C et à 70% d'humidité relative

III.3.2.6.3. Séchage des éprouvettes avant leur exposition aux champignons

Afin de rendre les éprouvettes anhydres, une moitié des éprouvettes de duramen et d'aubier des deux arbres (au nombre de 60 pour chaque type de bois, soit au total 240 éprouvettes) ainsi que toutes les éprouvettes témoins (les 64 éprouvettes de pin et de hêtre) ont été séchées avant l'exposition aux champignons. Le procédé de séchage consiste à placer les éprouvettes de bois dans une étuve à dessiccation où la température est portée à $103 \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ pendant 24 heures, dans une atmosphère

¹⁰ 25 minutes c'est le temps nécessaire à une stérilisation complète.

ambiante modifiée et adaptée pour éviter la combustion du bois. Les éprouvettes ont été numérotées et pesées avant leur séchage pour en connaître la masse initiale m_0 et la masse à l'état anhydre m_1 .

III.3.2.6.4. Répartition des éprouvettes et exposition aux champignons cultivés sur un milieu gélosé

L'exposition des éprouvettes aux champignons a été réalisée en boîtes de Petri dans lesquelles deux échantillons de même arbre et de même type de bois ont été placés. Les boîtes ont enfin été refermées hermétiquement avec du parafilm. Toutes les étapes de cette partie expérimentale ont été réalisées dans des conditions parfaitement stériles pour éviter toute contamination. Afin de comparer la virulence des champignons sur le bois, nous avons placé quelques échantillons de bois en contact indirect avec le milieu de culture en utilisant une grille en matière plastique découpée à la même taille que l'éprouvette.

Le tableau III.3 présente les différents essais réalisés. Dans ce tableau, le nombre de boîtes correspondant à chaque modalité expérimentale représente le nombre de répétitions. Par ailleurs, d'autres éprouvettes séchées et non séchées de chaque type de bois ont été déposées sans grille sur un milieu gélosé non inoculé (agar). Ces éprouvettes sont utilisées pour estimer la perte de masse due uniquement à la diffusion du produit durant le temps d'incubation. L'incubation est réalisée à une température constante de 22 °C et à un taux d'humidité relative (H.R.) de 70 % pendant une durée de 16 semaines conformément à la norme NE 113 (1996).

Tableau III.3. Nombre de boîtes de Petri de chaque essai vis-à-vis des quatre champignons et pour les quatre modalités considérées : la provenance, le type du bois, la présence ou l'absence de grille et l'état hydrique

Provenance		Sidi Bel Abbès								Tiaret								P	H
Type de bois		A				D				A				D					
Position des éprouvettes		AG		SG		AG		SG		AG		SG		AG		SG		SG	SG
Etat hydrique		S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	S
Champignons	CP	0	4	7	3	0	4	7	3	0	4	7	3	0	4	7	3	5	5
	PP	0	4	7	3	0	4	7	3	0	4	7	3	0	4	7	3	5	0
	CV	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	0	5
	GT	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	4	4	3	3	5	5
Sans champignons	Agar	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	2	2	0	0	2	2	1	1

Nota : A : aubier, D : duramen ; P : pin, H : hêtre ; S : éprouvettes séchées ; NS : éprouvettes non séchées ; AG : boîte avec grille ; SG : boîte sans grille.

III.3.2.6.5. Examen des éprouvettes exposées aux champignons

Avant de retirer les éprouvettes des boîtes de Petri et de les peser, nous avons effectué une observation visuelle de toutes les boîtes de Petri contenant nos éprouvettes (Figure III.33).



Figure III.33. Épreuves d'aubier non séchées déposées sur grille avec la souche *Poria placenta* après 16 semaines d'incubation

À la fin de la période d'essai, les épreuves ont été retirées des boîtes de Petri. Le mycélium adhérent a été enlevé délicatement et les épreuves de bois pesées immédiatement après leur sortie de l'enceinte de culture pour obtenir la masse humide m_2 en fin d'essai. Pour calculer l'humidité (mc^{11} , formule 1) après incubation, les épreuves ont été séchées pendant 48 heures à l'étuve à 103 ± 1 °C jusqu'à stabilité de leur masse, avant d'être de nouveau pesées pour obtenir la masse finale anhydre m_3 . Ces différentes mesures nous permettent de déterminer l'humidité finale (mc finale, formule 2) et la perte de masse (PM , formule 3) causée par la pourriture fongique. Les formules sont les suivantes :

- Formule 1 : mc initiale (%) = $[(m_0 - m_1) / m_1] \times 100$;
- Formule 2 : mc finale (%) = $[(m_2 - m_3) / m_3] \times 100$;
- Formule 3 : PM (%) = $[(m_{0\text{ ou }1} - m_3) / m_{0\text{ ou }1}] \times 100$.

Avec :

m_0 ou m_1 : masses initiales pour le bois non séché ou le bois séché (à 103 °C) avant l'exposition fongique (en mg) ;

m_2 : masse de l'épreuve humide après l'attaque fongique (en mg) ;

m_3 : masse de l'épreuve anhydre (séché à 103 °C) après l'attaque fongique (en mg).

La perte de masse, après exposition aux champignons, a été corrigée en tenant compte des variations de masse non liées à l'activité des champignons lignivores, à l'aide d'un coefficient de correction selon la formule 4 :

- Formule 4 : PM (%) corrigée = PM_1 (%) - moyenne PM_2 (%)

Avec :

PM_1 (%) : Perte de masse des épreuves exposées aux champignons ;

PM_2 (%) : Moyenne des pertes de masse des épreuves déposées sur un milieu gélosé non inoculé avec une souche fongique.

Les pertes de masse des épreuves non séchées sont comparées à celles des épreuves témoins séchées servant de témoins de virulence. On évalue également visuellement la colonisation fongique se développant à la surface des épreuves témoins avec celle des épreuves séchées. Cet examen permettra de s'assurer que la souche est bien active dans la boîte de Petri.

¹¹ Moisture content

III.3.2.7. Évaluation de la variabilité de la couleur du bois de pistachier

Nous nous intéressons, dans cette partie, à l'analyse de la variabilité des paramètres couleur qui a été évaluée sur des barrettes de bois coupées dans l'aubier et le duramen. Ce travail a été effectué au niveau du Laboratoire d'étude des ressources forêt-bois (LERFoB) à Nancy, en utilisant un spectrocolorimètre et un logiciel pour la mesure et l'affichage graphique des données.

III.3.2.7.1. Mode de prélèvement des barrettes

Les paramètres colorimétriques dans l'espace CIELab (L^* , a^* et b^*) ont été mesurés sur des éprouvettes de 200*12*2 mm, L*R*T, ayant préalablement servi pour les mesures vibratoires des essais mécaniques (Figure III.34).



Figure III.34. Barrettes destinées aux mesures de la variabilité de la couleur chez le pistachier de l'Atlas

III.3.2.7.2. Appareil de mesure

Deux principaux types d'appareils sont utilisés pour mesurer la couleur ; les colorimètres et les spectrocolorimètres. Ces appareils sont équipés d'un référentiel de couleur normalisé au niveau international. Le colorimètre est principalement utilisé en contrôle-qualité afin d'obtenir des valeurs numériques et vérifier la comparabilité avec des tolérances définies. Dans le présent travail, la mesure de la couleur du bois et ses variations s'est faite à l'aide d'un spectrocolorimètre de type "CM-2600d/ KONICA MINOLTA SENSING" relié à une unité de calcul avec un logiciel "SpectraMagic NX" afin de permettre le mesurage et l'affichage graphique des données (Figure III.35).

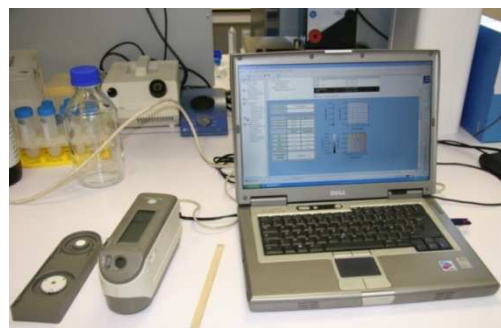


Figure III.35. Vue d'ensemble d'un spectrocolorimètre relié à un microordinateur (PC)

Pour garantir un mesurage exact, nous devons d'abord effectuer le "calibrage du blanc" avant chaque mesurage. En outre, lorsque le spectrocolorimètre est utilisé pour la première fois ou est remis

à son état initial, le "calibrage du zéro" est requis (le spectrocolorimètre est étalonné une fois avant de commencer les mesures). Une fois calibré, l'appareil est déposé sur la surface de l'éprouvette. La fenêtre utilisée pour cette mesure a une ouverture de 8 mm de diamètre (Figure III.36).

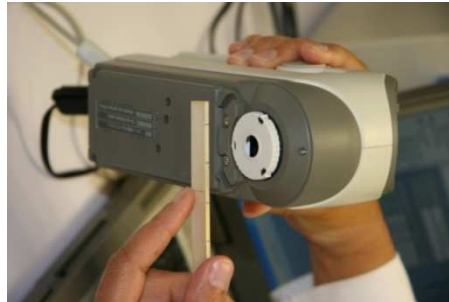


Figure III.36. Mesure de la couleur sur les barrettes

Le spectrocolorimètre analyse, longueur d'onde par longueur d'onde, l'énergie lumineuse réfléchie ou transmise afin de déterminer les courbes spectrales d'un objet. Une fois calibré, l'appareil est déposé sur la surface des barrettes le long desquelles 10 positions équidistantes ont été repérées. Trois mesures répétées par position ont été effectuées, soit 2160 mesures (72 éprouvettes x 10 positions x 3 mesures). Les composantes colorimétriques L^* , a^* et b^* , qui correspondent respectivement à la clarté, à l'axe vert-rouge, et à l'axe bleu-jaune, ont été mesurées dans le système CIELab sur ces barrettes.

L'écart-type entre les mesures (moyennes des trois répétitions) effectuées sur les 10 positions de chaque éprouvette nous a servi à caractériser l'hétérogénéité locale de la couleur. Ces mesures ont été corrélées avec la densité du bois afin de montrer les variations de la couleur en fonction de la provenance des arbres, des arbres eux-mêmes, et de l'aubier-duramen. Le bois mixte, représenté par la région intermédiaire entre l'aubier et le duramen, a également été pris en considération dans les mesures.

III.3.2.7.3. Mesures et analyses statistiques

Les résultats numériques obtenus sur les caractéristiques colorimétriques ont été traités statistiquement (analyse de la variance) afin de ressortir les variabilités inter-arbre et inter-provenance d'une part et d'autre part ils ont été représentés graphiquement avec la densité en utilisant le logiciel d'analyse statistique "Statistica version 06".

III.3.2.8. Étude anatomique¹²

La présente étude a pour objectif d'apporter un complément aux études à l'échelle macroscopique, pour une description plus fine du bois à l'échelle de quelques dizaines de micromètres. Le bois est un matériau anisotrope, ses propriétés mécaniques physiques et technologiques changent suivant la direction choisie. La description de la structure anatomique du bois

¹² Méthode d'analyse d'incertitude proposée par l'unité LERFoB de l'INRA (Nancy).

nécessite une observation sur trois plans, il est d'usage d'effectuer les observations selon ces plans de coupe privilégiés au niveau du bois.

III.3.2.8.1. Préparation des échantillons

Nous avons effectué les coupes anatomiques sur un arbre de chaque région ; il s'agit de l'arbre S_1 et de l'arbre T_1 . Leur réalisation a nécessité la préparation des échantillons de bois. Ces derniers ont été débités en petites barrettes, le tout bien orienté selon les trois plans de référence du bois (Figure III.37) :

- plan radial-tangentiel (dit souvent "plan transversal"), plan perpendiculaire à l'axe de la tige ;
- plan longitudinal-radial (dit souvent "plan radial"), plan parallèle à l'axe de la tige et passant par la moelle ;
- plan longitudinal-tangentiel (dit souvent "plan tangentiel"), plan parallèle à l'axe de la tige et tangent aux limites de cernes.

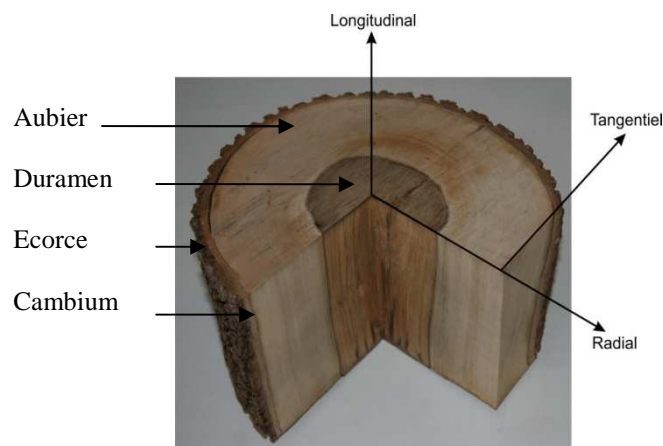


Figure III.37. Directions orthotropiques sur une rondelle du pistachier de l'Atlas

Les barreaux $S_{1.1.1}$, $T_{1.1.4}$ utilisés dans les analyses microdensitométriques ont été découpés en barrettes de 10*20*5 mm (L*R*T) pour effectuer les coupes anatomiques (Figure III.38).

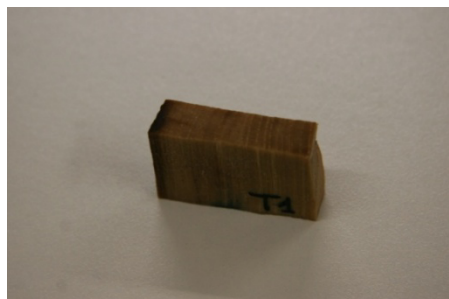


Figure III.38. Barrette du pistachier de l'Atlas en vue de la réalisation des coupes microscopiques

III.3.2.8.2. Saturation des échantillons de bois à l'eau déminéralisée

Les barrettes prélevées ont été ensuite déposées dans des cristallisoirs contenant de l'eau déminéralisée pendant une semaine jusqu'à leur saturation totale en eau¹³. Nous avons totalement immergé les échantillons à l'eau déminéralisée, sous vide, dans une enceinte de type dessiccateur, nous avons cassé le vide plusieurs fois afin d'accélérer la saturation de nos échantillons (Figure III.39).

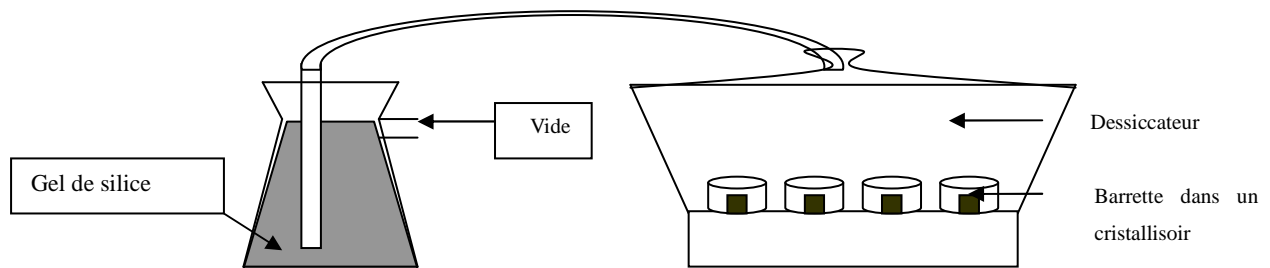


Figure III.39. Imprégnation des échantillons en vue de la réalisation des coupes microscopiques

III.3.2.8.3. Imprégnation des échantillons en vue de faire des coupes microscopiques

Les échantillons ont ensuite été imprégnés au polyéthylène glycol (PEG), de poids moléculaire 1500. L'imprégnation au PEG consiste à faire trois bains successifs de concentration croissante :

- PEG à 30% pendant 24h sous vide dans le dessiccateur ;
- PEG à 50% pendant 24h sous vide dans le dessiccateur ;
- PEG pur pendant 24h dans une étuve à vide de marque "BIOBLOCK Scientific" à 70°C.

Une fois l'imprégnation terminée, les échantillons chauffés ont été sortis de l'étuve, essuyés légèrement avec du papier absorbant, puis laissés refroidir totalement avant d'effectuer les coupes.

III.3.2.8.4. Réalisation des coupes microscopiques

Nous avons ensuite réalisé, des coupes anatomiques de 15 μm d'épaisseur à l'aide d'un microtome manuel de marque " REICHERT AUSTRIA" (Figure III.40).

¹³ Cette opération a un double but, chasser l'air des cavités du bois et ramollir les parois (Normand, 1998)

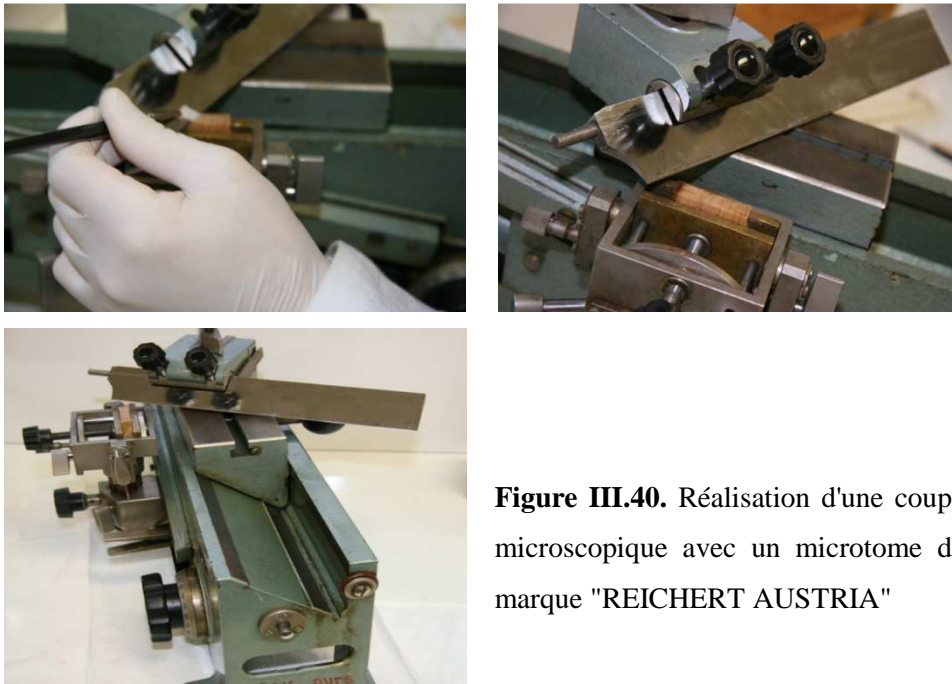


Figure III.40. Réalisation d'une coupe microscopique avec un microtome de marque "REICHERT AUSTRIA"

III.3.2.8.5. Coloration des coupes microscopiques

- *Coloration simple à la safranine*

La coloration se fait sur une lame provisoire. Après rinçage de la coupe à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace de polyéthylène glycol, pour éviter la formation de précipités blancs au cours des manipulations. Les opérations suivantes ont été effectuées :

- ✓ dépôt de quelques gouttes de colorant de safranine sur la coupe pendant 1 minute, afin de visualiser toutes les parties lignifiées du bois ;
- ✓ rinçage à l'eau déminéralisée ;
- ✓ déshydratation avec plusieurs bains d'éthanol pur, en prenant soin à ne pas trop décolorer la coupe ;
- ✓ transfert de la coupe sur une lame définitive avec l'éthanol ;
- ✓ séchage de la coupe avec du papier absorbant ;
- ✓ fixation avec 2 à 3 gouttes de colle (HISTOLAQUE LMR) avant de placer la lamelle ;
- ✓ séchage à l'air ambiant pendant une semaine et grattage de l'excès de l'HISTOLAQUE LMR qui a durci à l'aide d'un scalpel (Figure III.41).

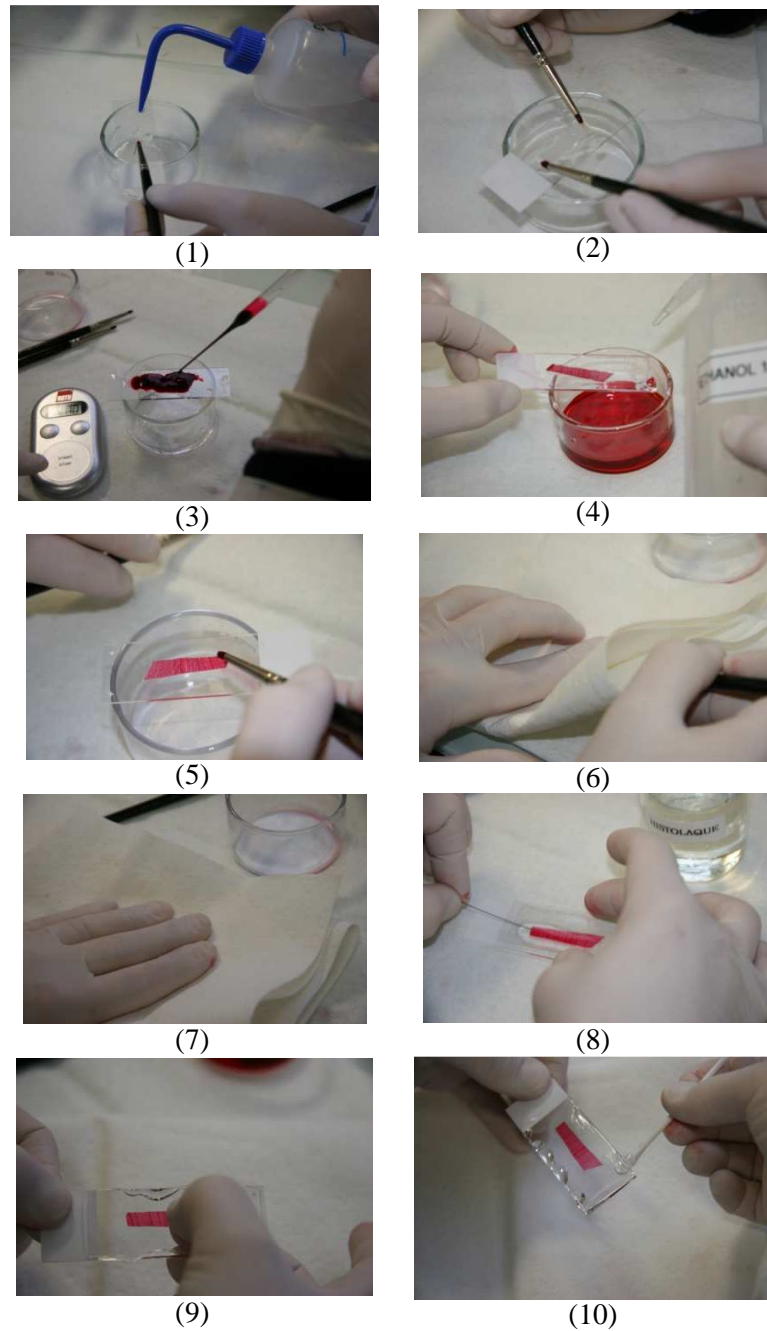


Figure III.41. Étapes de la préparation des coupes anatomiques du bois du pistachier de l'Atlas

- (1) et (2) rinçage de la coupe à l'eau déminéralisée pour enlever toute trace de polyéthylène glycol (PEG),
 (3) et (4) dépôt de quelques gouttes de colorant de safranine sur la coupe et rinçage à l'eau déminéralisée,
 (5), (6) et (7) transfert de la coupe sur une lame définitive et séchage de la coupe avec du papier absorbant,
 (8), (9) et (10) fixation avec 2 à 3 gouttes de colle (HISTOLAQUE LMR) avant de placer la lamelle.

III.3.2.8.6. Observation microscopique et réalisation des photos

Les coupes microscopiques ont été observées au microscope photonique de type "Imager. M2 ". Des images ont été obtenues grâce à une caméra numérique reliée à un ordinateur qui permet de révéler les caractères anatomiques du bois étudié (Figure III.42).

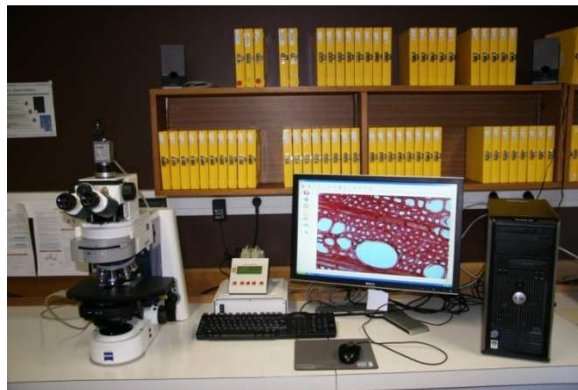


Figure III.42. Observation microscopique et réalisation des photos

Chapitre IV

Résultats et discussions

Chapitre IV

Résultats et discussions

Nous discuterons dans ce chapitre les principaux résultats auxquels nous avons abouti en les confrontant à ceux trouvés par les autres travaux synthétisés principalement en bibliographie. Nous rappelons que les caractéristiques technologiques que nous avons analysées se rapportent essentiellement à deux types de bois de l'espèce étudiée l'aubier et le duramen. Afin d'alléger le texte nous utiliserons tout le long de cette partie les symboles "T" et "S" qui désignent respectivement la provenance "Tialet" et la provenance "Sidi Bel Abbès", les chiffres de 1 à 3 pour désigner les arbres, les symboles "A", "D" et "Mix" qui désignent respectivement l'aubier, le duramen et le type mixte du bois, et les symboles ; "DMoy", "DMax", "DMin", "LC" et "R" qui désignent respectivement la densité moyenne de cerne, la densité maximale et minimale de cerne, la largeur de cerne et le rayon.

IV.1. Scanner

IV.1.1. Résultats

La première phase de ce travail a consisté à scanner les billons, les résultats du scanner des billons et des rondelles de souche sont présentés dans les figures IV.1 à IV.3.

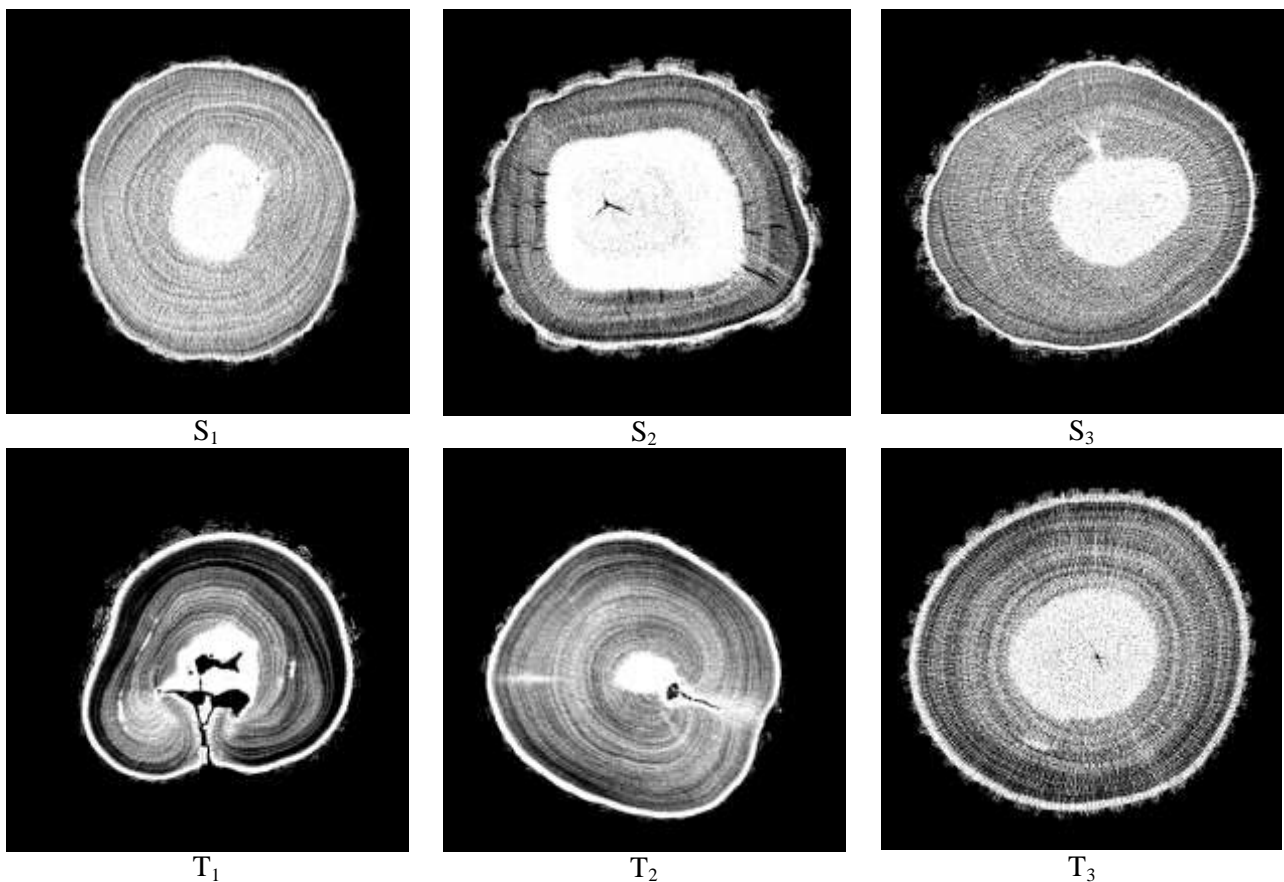


Figure IV.1. Images scannées des rondelles de souche des six arbres du pistachier de l'Atlas

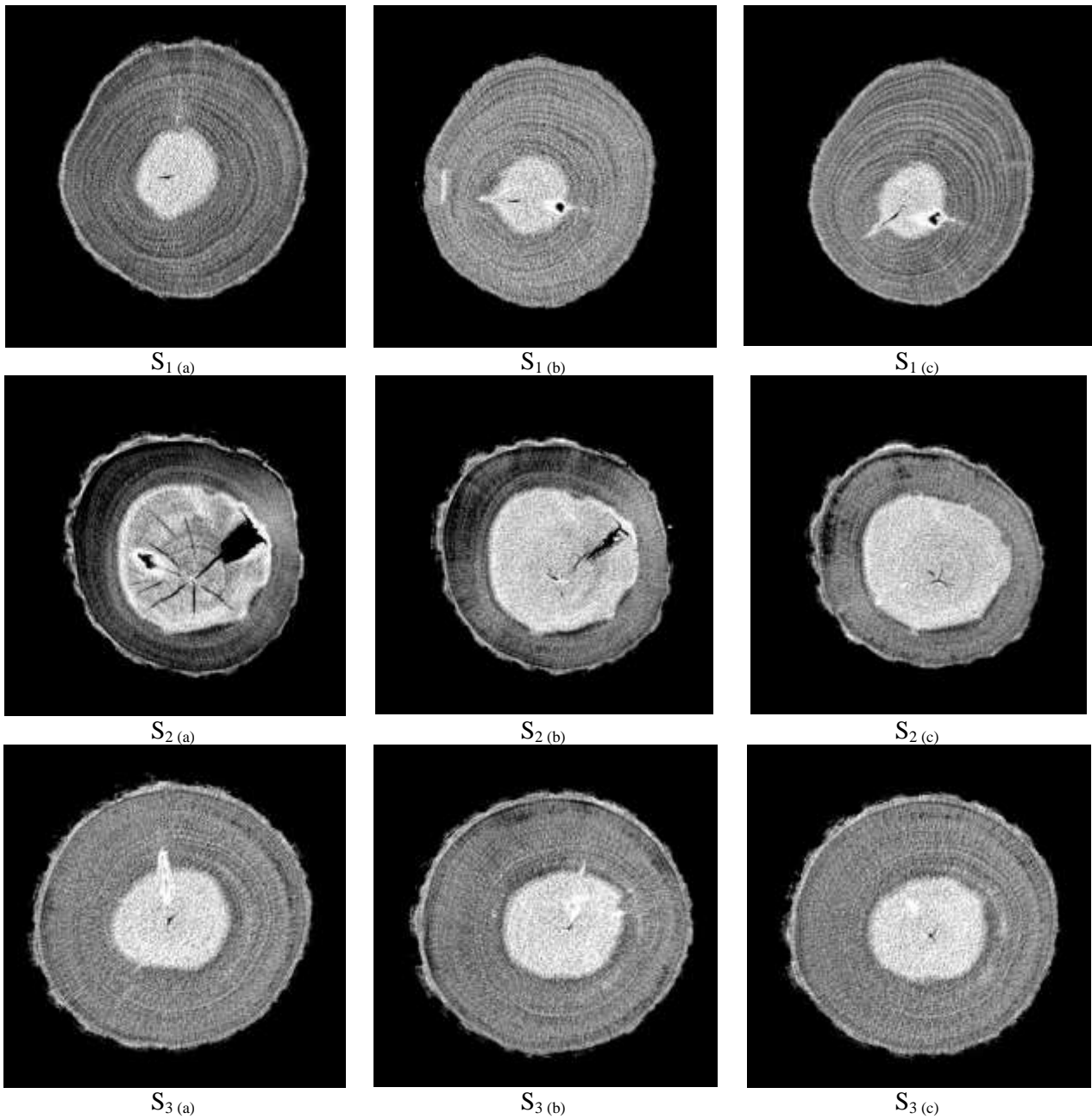


Figure IV.2. Images scannées des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la région de Sidi Bel Abbès (S_1 , S_2 , S_3)

Les coupes (a), (b) et (c) sont prises respectivement en haut, au milieu et en bas de chaque billon. Les coupes $S_{2(a)}$ et $S_{2(b)}$ sont prises tout au bout du billon, là où le bois a commencé à sécher, c'est pourquoi elles sont plus sombres.

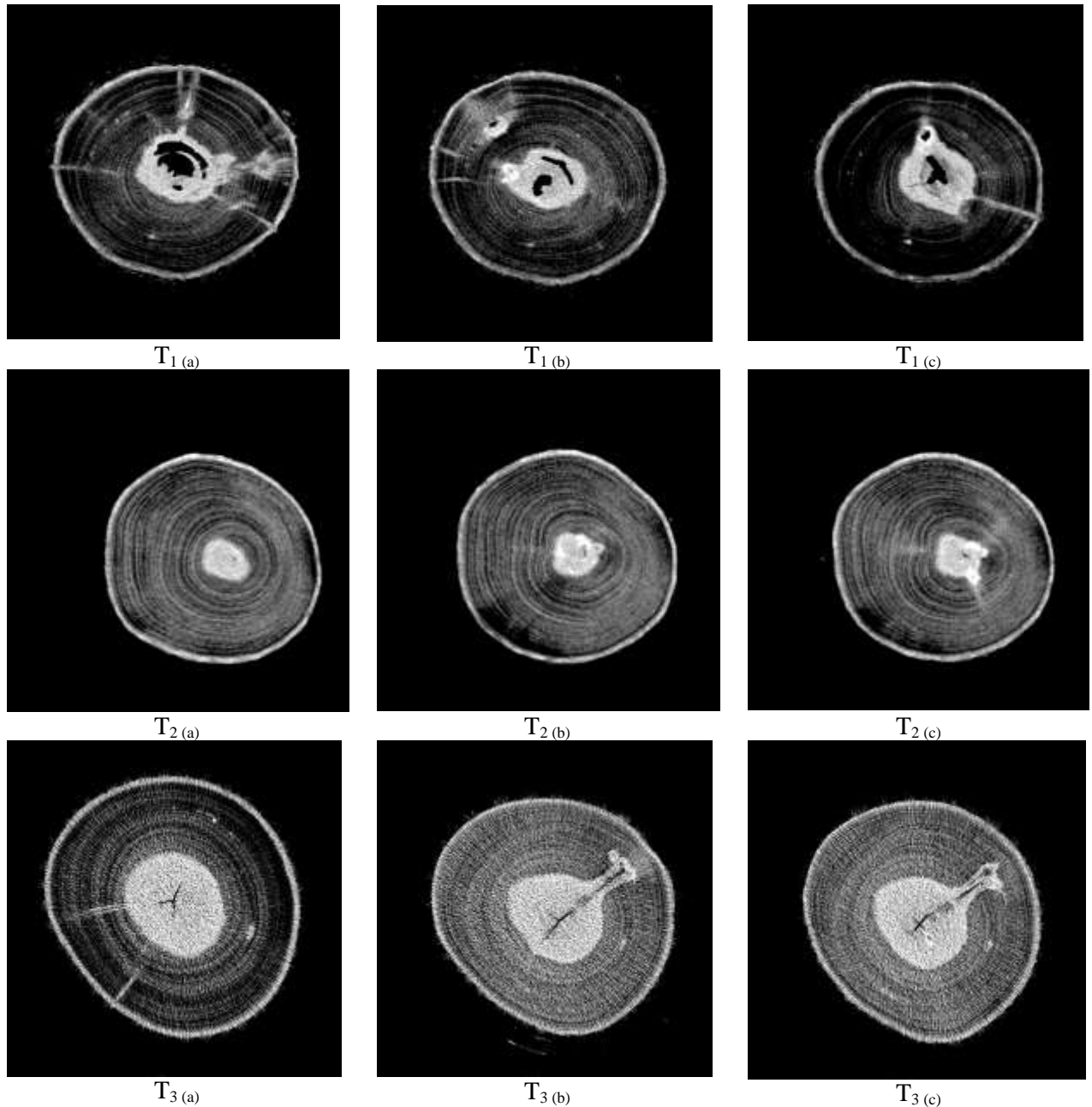


Figure IV.3. Images scannées des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la région de Tiaret (T_1 , T_2 , T_3)

Les coupes (a), (b) et (c) sont prises respectivement en haut, au milieu et en bas de chaque billon. L'image $T_3(c)$ vient du bas du billon (trop près du bord).

Pour les observations, le grossissement a été adapté à chaque billon. Le contraste a été réglé de façon identique sur toutes les images. Les zones sombres correspondent aux plus faibles densités, les zones claires aux plus fortes densités. Le scanner nous a permis de constater l'existence d'espaces sombres au niveau du cœur (duramen) qui correspondent à des zones abimées pour les arbres S_1 , S_2 et T_1 (Figures IV.1 à IV.3).

Tableau IV.1. Valeurs des densités et des diamètres moyens des billons et des rondelles de souche de pistachier de l'Atlas

Arbre	Billon		Rondelle de souche	
	Densité (g/cm ³)	Diamètre (cm)	Densité (g/cm ³)	Diamètre (cm)
S ₁	1,231	16,9	1,174	16,5
S ₂	1,236	17,1	1,149	17,1
S ₃	1,224	16,9	1,147	18,6
T ₁	1,087	14,9	1,076	16,0
T ₂	1,163	11,6	1,129	14,3
T ₃	1,183	23,6	1,131	25,2

Les densités moyennes et les diamètres moyens mesurés sur toutes les images obtenues, estimés à partir de la surface de bois apparente en supposant une section circulaire, nous ont permis de constater que le bois de pistachier présente une forte densité d'une manière générale, les valeurs s'étalent entre 1,087 et 1,236 g/cm³ pour les billons et 1,076 à 1,174 g/cm³ pour les rondelles de souche. Au niveau intra-arbre, le duramen est plus dense que l'aubier et au niveau inter-provenance, les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès sont plus denses que ceux de la provenance de Tiaret (Tableau IV.1).

IV.1.2. Discussion

La densité est un paramètre physique qui vise à préciser la quantité massique de matière ligneuse contenue dans un volume donné de bois (Guitard, 1987). Nepveu (1982) a trouvé que la densité, quelle que soit la forme sous laquelle elle s'exprime (à une humidité donnée, infradensité) et quelle que soit l'utilisation du bois (structure, menuiserie, ébénisterie, papier ou source d'énergie), est la première grandeur à mesurer car, selon lui, elle apparaît comme étant extrêmement variable d'une espèce à l'autre, d'un individu à l'autre au sein d'une même espèce et même à l'intérieur d'un individu. Ce même auteur a affirmé que, au sein de la même espèce, la densité varie suivant les provenances et même suivant la localisation du prélèvement de l'échantillon dans l'arbre. Aussi, la densité pour un même échantillon varie selon son humidité et l'on est amené en conséquence à définir la densité d'un bois par rapport à son état d'humidité, c'est ainsi qu'on parle souvent de densité à l'état vert et de densité à l'état sec à l'air (MCTRA, 1978). La densité à 12% est une caractéristique technologique de base, la première à déterminer pour qualifier un bois. Cette propriété est corrélée, plus ou moins étroitement, avec les principales propriétés physiques et mécaniques du bois ainsi qu'avec certaines caractéristiques de mise en œuvre (durabilité naturelle,...) (Brémaud, 2006).

La présence des zones abimées est une caractéristique qui distingue les arbres âgés chez le pistachier de l'Atlas¹. Cela peut être expliqué par une adaptation aux conditions de sécheresse par le phénomène de cavitation. Selon Dedeckel (1994), les divers bois couvrent une plage de masse volumique anhydre « ρ » qui s'étend de 0,10 g/cm³ pour les essences les moins denses (balsa) à 1,25 g/cm³ pour les essences les plus denses (azobé), sur cette base nous pouvons considérer que le bois de

¹ Benhassaini H., Communication personnelle.

l'essence étudiée est dense. Par ailleurs, Guitard (1987) a affirmé que, les bois d'importance industrielle s'étagent de 0,35 à 0,80 g/cm³ et de façon très grossière, des résineux (épicéa, sapin) vers les feuillus (hêtre ou chêne). Aussi, la densité des bois varie selon les espèces de façon importante, elle est bien corrélée aux propriétés mécaniques en général et a l'avantage d'être facilement mesurable de façon non destructive, ce qui en fait un facteur de première importance (Dedeckel, 1994) et représente l'une des premières caractéristiques de base pour qualifier tout matériau (Kokutse, 2002). Keller (1995) a indiqué que la densité constitue un bon indicateur des propriétés du bois pour sa rétractibilité, ses propriétés mécaniques et son comportement à l'usinage. La densité peut être considérée à la fois comme une propriété physique et technologique importante des bois et comme un descripteur de structure (Brémaud, 2006). La densité du bois est un critère qualitatif essentiel selon Polge (1967). L'ensemble de ces auteurs s'accordent pour dire que la détermination de la masse volumique de chaque essence est indispensable car elle exprime la quantité de matière présente dans un volume ou dans une section déterminée.

Sur le plan anatomique, la densité est une mesure synthétique de l'importance relative et des propriétés de différents types cellulaires constitutifs du bois. Elle varie considérablement d'une espèce à l'autre et surtout à l'intérieur d'un même individu. Cette variabilité s'explique en grande partie par une variation de la structure anatomique. Pour un même volume apparent de bois, la densité sera plus élevée si la proportion des cavités cellulaires est faible. Par exemple, le balsa ayant une porosité qui s'approche de 94 % présente une densité anhydre de l'ordre de 0,1 g/cm³. Le hêtre présente une porosité de 58 % et une densité anhydre de l'ordre de 0,65 g/cm³ (Dakak, 2002). La masse volumique est directement dépendante de la porosité du bois définie comme la proportion volumique de vide cellulaire (Skaar, 1988). Un bois très poreux aura une masse volumique plus faible qu'un bois peu poreux du fait que le premier est constitué de moins de matière ligneuse. Les différences de densité entre les feuillus et les résineux sont aussi dues aux différences de structure anatomique. Généralement, les cellules composant les feuillus ont des parois cellulaires plus épaisses, et sont donc plus denses, que celles des résineux (Carlquist, 1988). Le niveau intracerne est le niveau le plus fin de la variabilité de la densité (Dakak, 2002). L'évaluation fine de la densité (au niveau du cerne) est présentée dans la partie concernant la microdensitométrie.

IV.2. Évolution radiale de la largeur de cerne

Le calcul de la position relative de chaque cerne sur le rayon à travers le pointage de chaque limite de cernes de l'écorce vers la moelle et à l'aide de l'appareil "Lintab", nous a donné accès à trois variables : année, nombre de cernes et largeur de cerne. De cette analyse, nous avons fait ressortir des relations entre la largeur de cerne "LC" et les années. Parallèlement, des corrélations entre la largeur de cerne et la distance entre l'écorce et le cerne d'une part et la moelle et le cerne d'autre part ont été calculées.

IV.2.1. Résultats

IV.2.1.1. Variation de la largeur de cerne avec les années

La figure IV.4 illustre la variation de la largeur de cerne "LC" avec les années pour les six arbres étudiés. Sur cette représentation graphique, la présence des années caractéristiques a pu être déduite et la concordance des quatre rayons au sein du même arbre a pu être vérifiée. La largeur moyenne de cerne, qui est appelée habituellement *la vitesse de croissance* obtenue également par l'analyse microdensitométrique, permet de donner plus de détail sur les cernes. En effet, de larges cernes de croissance indiquent de bonnes conditions de croissance, tandis que des cernes étroits révèlent des conditions de croissance pauvres ou sèches. Une nette hétérogénéité de variation apparaît entre les rayons du même arbre (Figure IV.4).

Plusieurs années de sécheresse sont mises en évidence. Ainsi, la largeur de cerne la plus élevée a été enregistrée en 2007 au niveau du R₄ de l'arbre S₁ avec une largeur de cerne de 6,55 mm et la largeur de cerne la plus faible a été enregistrée en 1962 au niveau du R₄ de l'arbre T₁ avec une largeur de cerne de 0,06 mm (Tableau IV.2).

✓ *Provenance de Sidi Bel Abbès*

La variation de la largeur de cerne avec le temps a montré une tendance croissante pour le S₂ et légèrement croissante pour le S₁ et le S₃ (Figure IV.4).

✓ *Provenance de Tiaret*

La variation de la largeur de cerne avec le temps pour les arbres de Tiaret s'est montrée décroissante au niveau des quatre rayons de T₂. Pour les deux autres arbres, cette variation présente une tendance légèrement décroissante (Figure IV.4).

Tableau IV.2. Valeurs maximales et minimales de l'évolution de la largeur de cerne (LC) avec les années sur les quatre rayons des six arbres de pistachier de l'Atlas

		LC (mm) + Années			
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
S ₁	Valeur Max	5,53 (1996)	5,25 (2004)	6,08 (1997)	6,55 (2007)
	Valeur Min	1,35 (2000)	0,84 (1994)	0,31 (1991)	1,91 (1992)
S ₂	Valeur Max	4,06 (2000)	4,7 (1999)	3,4 (2001)	5,22 (2001)
	Valeur Min	0,19 (1971)	0,34 (1971)	0,35 (1961)	0,13 (1971)
S ₃	Valeur Max	3,1 (1986)	3,17 (1985)	-	3,51 (1988)
	Valeur Min	0,21 (1971)	0,57 (1976)		0,32 (1970)
T ₁	Valeur Max	3,83 (1995)	-	-	3,52 (1996)
	Valeur Min	0,36 (2005)			0,06 (1962)
T ₂	Valeur Max	4,46 (1988)	3,75 (1988)	3,39 (1989)	4,8 (1989)
	Valeur Min	0,28 (2007)	0,4 (2011)	0,29 (2007)	0,25 (2009)
T ₃	Valeur Max	5,13 (1978)	4,66 (1972)	4,84 (1989)	5,57 (1981)
	Valeur Min	0,49 (1968)	0,35 (1982)	0,42 (1984)	0,65 (1968)

Les cases vides correspondent à l'absence des rayons.

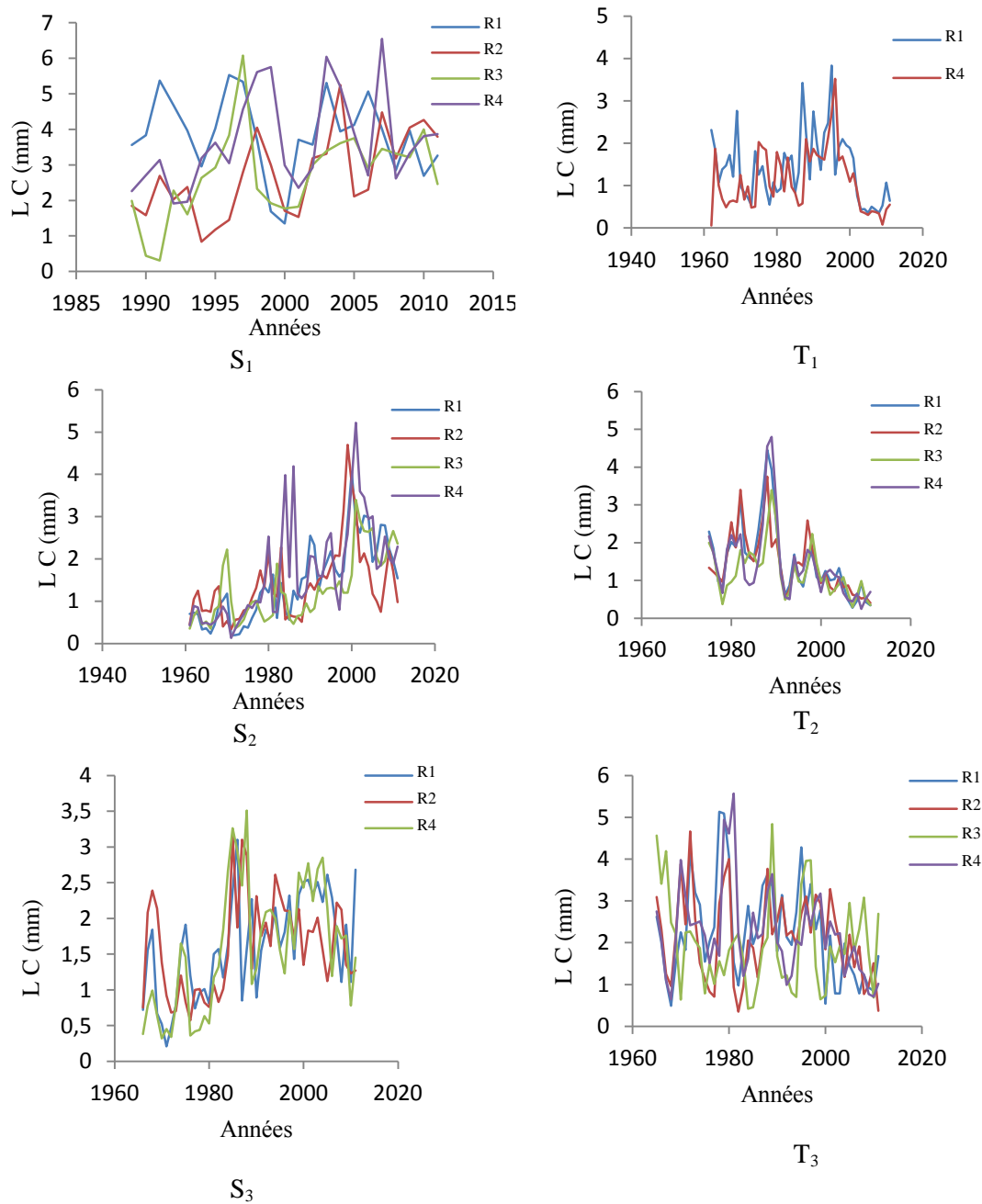


Figure IV.4. Variation de la largeur de cerne (LC) avec les années sur les quatre rayons des six arbres de pistachier de l'Atlas (870 observations)

IV.2.1.2. Corrélation de la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne et la largeur de cerne avec le côté moelle par rapport au cerne.

- **Provenance de Sidi Bel Abbès**

Le seul arbre qui a montré des corrélations positives entre la largeur de cerne et la distance du cerne par rapport à la moelle c'est le S₂ (Tableau IV.3). Au niveau des quatre rayons de cet arbre, une bonne corrélation a été enregistrée, au niveau du même arbre, la corrélation s'est montrée négative entre la largeur de cerne et la distance du cerne vers l'écorce.

Pour le S_1 et le S_3 une corrélation significative et positive entre LC et la Distance (Moe-Cer) a été enregistrée seulement pour deux rayons (R_2, R_3 pour l'arbre S_1 et R_1, R_4 pour S_3).

- **Provenance de Tiaret**

Le seul arbre qui a montré au niveau de ses quatre rayons une corrélation entre LC et Distance (Moe-Cer) est le T_2 , cette corrélation s'est montrée négative.

Tableau IV. 3. Corrélations de la largeur de cerne (LC) avec le côté moelle par rapport au cerne (Distance (Moe-Cer)) et la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne (Distance (Eco-Cer)) pour la provenance de Sidi Bel Abbès (au seuil de 5%)

		LC (mm)											
		S_1				S_2				S_3			
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
Distance (Moe-Cer)	R_1	-0,22				0,77				0,57			
	R_2		0,62				0,45				0,26		
	R_3			0,42				0,74					
	R_4				0,31				0,61				0,46
Distance (Eco-Cer)	R_1	0,22				-0,77				-0,57			
	R_2		-0,62				-0,45				-0,26		
	R_3			-0,42				-0,74					
	R_4				-0,31				-0,61				-0,46

Nota : les cases vides correspondent à l'absence des rayons.

Tableau IV. 4. Corrélations de la largeur de cerne (LC) avec le côté moelle par rapport au cerne (Distance (Moe-Cer)) et la largeur de cerne avec le côté écorce par rapport au cerne (Distance (Eco-Cer)) pour la provenance de Tiaret (au seuil de 5%)

		LC (mm)											
		T_1				T_2				T_3			
		R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4	R_1	R_2	R_3	R_4
Distance (Moe-Cer)	R_1	-0,17				-0,50				-0,27			
	R_2						-0,50				-0,18		
	R_3							-0,39				-0,14	
	R_4				-0,04				-0,41				-0,29
Distance (Eco-Cer)	R_1	0,17				0,50				0,27			
	R_2						0,50				0,18		
	R_3							0,39				0,14	
	R_4				0,04				0,41				0,29

Nota : les cases vides correspondent à l'absence des rayons.

IV.2.2. Discussion

La variation de la largeur de cerne avec les années au niveau de la provenance de Sidi Bel Abbès a montré une tendance croissante, par contre celle de la provenance de Tiaret a montré une tendance décroissante. Aussi, nous avons constaté que la concordance entre les rayons s'est montrée uniquement pour deux arbres (S_2 , T_2) où de bonnes corrélations ont été enregistrées entre la largeur de cerne et la distance reliant le cerne à la moelle. Egalement, la technique de comptage effectuée sur la rondelle de souche et la rondelle n° 2 nous a permis de constater que les cernes du pistachier de l'Atlas sont peu visibles contrairement à ceux des résineux (cas du pin d'Alep par exemple, les cernes sont très visibles).

IV.3. Analyse microdensitométrique du bois

IV.3.1. Résultats

L'objectif de cette étude est de faire une analyse fine sur la densité du bois et sa relation avec les autres paramètres mesurés à l'échelle du cerne. Pour compléter nos connaissances sur ce point et afin d'exploiter l'ensemble des mesures de microdensité, nous nous sommes successivement intéressés dans cette partie, d'une part à la détermination des variations des composantes microdensitométriques (la densité moyenne, la densité maximale, la densité maximale à 5 %², la densité minimale et la densité minimale à 5%) avec la largeur de cerne, de la densité moyenne de cerne avec l'année et de la largeur de cerne avec l'année sur les quatre rayons de chaque arbre pour chaque provenance et d'autre part aux corrélations existantes au sein du même rayon entre les composantes microdensitométriques et la largeur de cerne.

La précision des mesures de largeur de cerne par le programme CERD a été évaluée sur 927 cernes, provenant des six arbres de pistachier de l'Atlas. Ce procédé a permis l'estimation de la densité du bois à l'état sec à l'air (12%) à l'échelle du cerne.

Tous les résultats illustrés par les figures IV.5 à IV.9 dans cette partie sont classés en fonction des arbres (numérotés 1 à 3), des rayons (numérotés R_1 à R_4) et de leur provenance (S, T). Les résultats des corrélations des composantes microdensitométriques avec la largeur de cerne et de la densité moyenne avec l'année au niveau des quatre rayons des six arbres du pistachier sont consignés dans les tableaux IV.5 à IV.9.

IV.3.1.1. Variabilité de la densité avec la largeur de cerne

L'étude de cette relation est certainement la plus importante au point de vue sylvicole, puisqu'elle permet dans une certaine mesure de prévoir les répercussions possibles des éclaircies sur la

² La densité maximale à 5 % et la densité minimale à 5 % représentent respectivement la densité moyenne des 5% de la largeur les plus forts et les plus faibles.

densité du bois et par voie de conséquences sur sa qualité et sur l'objet d'utilisation du matériau. Les figures IV.5 à IV.7 présentent la variabilité des composantes microdensitométriques du bois de *Pistacia atlantica* (DMoy, DMax, DMax-5%, DMin et DMin-5%) avec la largeur de cerne pour les deux provenances. Ces figures font ressortir deux groupes de densités, le premier groupe est relatif à l'aubier et le second au duramen. Elles nous indiquent aussi l'augmentation des variables microdensitométriques étudiées (DMoy, DMax, DMax-5, DMin et DMin-5) avec l'accroissement de la largeur de cerne (LC). Cet accroissement est plus fort pour les largeurs de cernes inférieures à 2 mm, au-delà de ce seuil, ces densités continuent à augmenter très lentement chez les arbres de la provenance de Tiaret mais ont tendance à se stabiliser chez les arbres de la de provenance de Sidi Bel Abbès.

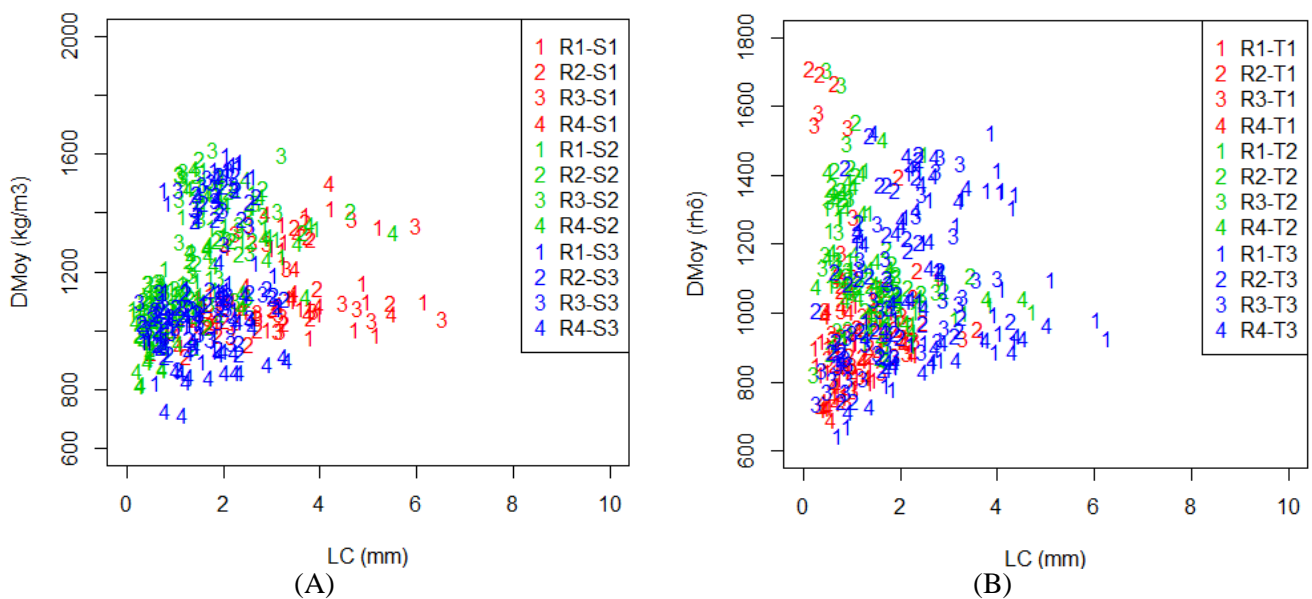


Figure IV.5. Variation de la densité moyenne (DMoy) de cerne en fonction de sa largeur (LC) sur les quatre rayons (numérotés R₁ à R₃) des trois arbres de pistachier de l'Atlas (numérotés 1 à 3) de chaque provenance (S : Sidi Bel Abbès et T : Tiaret) (927 cernes : 473 cernes issus des arbres de Sidi Bel Abbès (A) et 454 cernes issus des arbres de Tiaret (B))

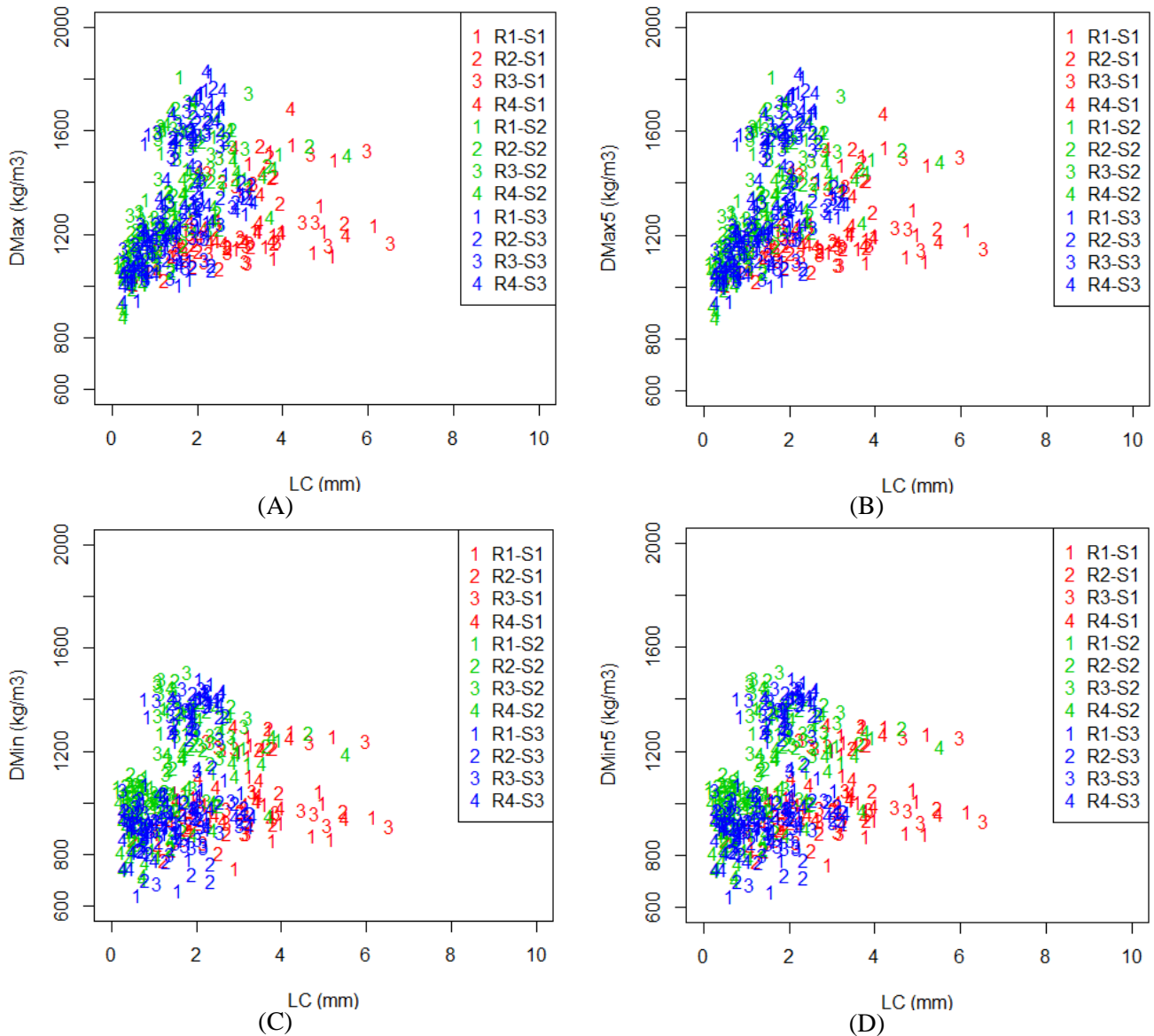


Figure IV.6. Variation des composantes microdensitométriques : densité maximale (DMax), densité maximale à 5% (DMax-5), densité minimale (DMin) et densité maximale à 5% (DMin-5) en fonction de la largeur de cerne (LC) des quatre rayons (numérotés R₁ à R₄) des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la provenance de Sidi Bel Abbès (numérotés S₁ à S₂) (473 cernes par figure)

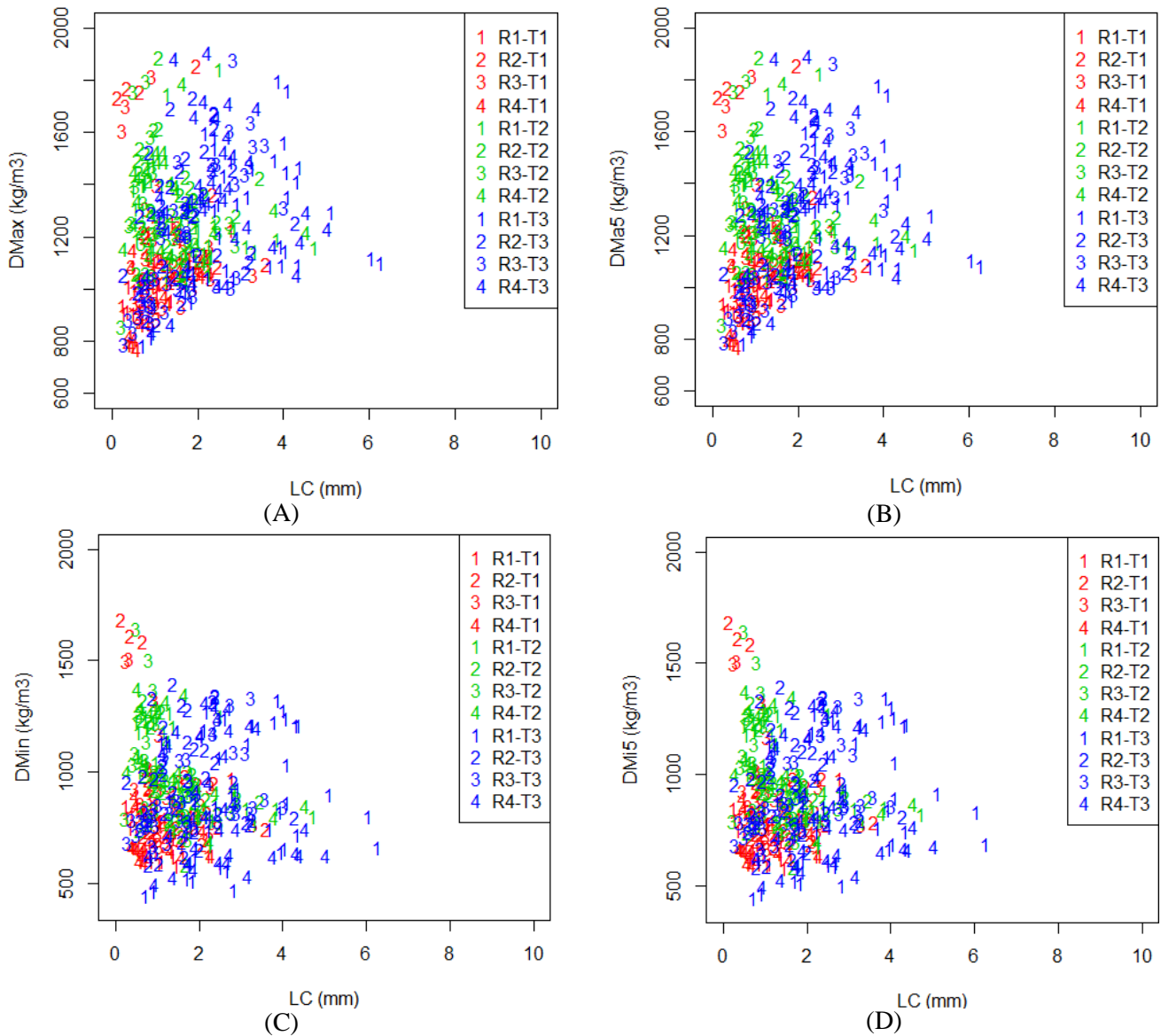


Figure IV.7. Variation des composantes microdensitométriques : densité maximale (DMax), densité maximale à 5% (DMax-5), densité minimale (DMin) et densité maximale à 5% (DMin-5) en fonction de la largeur de cerne (LC) des quatre rayons (numérotés R₁ à R₄) des trois arbres de pistachier de l'Atlas de la provenance de Tiaret (numérotés T₁ à T₃) (454 cernes par figure)

IV.3.1.1.1. Corrélation des composantes microdensitométriques avec la largeur de cerne

Le test statistique a permis la mise en évidence des relations entre les différentes composantes et d'évaluer l'intensité de ces liaisons. Dans cette partie nous nous intéresserons notamment au couple « densité moyenne-largeur de cerne » dont la liaison présente un intérêt pratique à la fois pour le chercheur, le sylviculteur ou l'industriel.

IV.3.1.1.1.1. Corrélations de la densité moyenne avec la largeur de cerne pour les deux provenances

Les résultats de corrélation consignés dans le tableau IV.5, montrent un contraste important dans les valeurs du coefficient de corrélation.

- **Provenance de Sidi Bel Abbès**

Au niveau de S_1 la corrélation existe dans les rayons R_2 ($r= 0,61$) et R_4 ($r= 0,44$), elle est hautement significative pour R_2 seulement. Elle demeure faible à inexistante pour R_3 et R_1 . Par contre, l'arbre S_2 a présenté une corrélation très hautement significative au niveau de ses quatre rayons ($r= 0,63$ pour les rayons R_1, R_2 et $r= 0,61$ pour les rayons R_3, R_4). L'arbre S_3 a également montré une corrélation très hautement significative pour R_1 ($r= 0,49$) et R_4 ($r= 0,58$) et hautement significative pour R_2 ($r= 0,41$) et une corrélation non significative au niveau de R_3 ($r= 0,29$) (Tableau IV.5).

- **Provenance de Tiaret**

Au niveau des arbres de la provenance de Tiaret, les résultats sont différents de ceux trouvés chez les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès et varient au sein du même arbre. Ainsi, nous avons obtenu une corrélation entre DMoy et LC très hautement significative seulement dans le R_3 de l'arbre T_3 ($r= 0,62$). Au niveau des autres rayons la signification de la corrélation est variable. Elle est non significative au seuil de 5% pour la plupart des rayons des arbres. Il est aussi à noter, deux corrélations significatives mais négatives ont été enregistrées au sein de R_1 ($r= -0,43$) et R_2 ($r= -0,42$) de l'arbre T_2 (Tableau IV.5).

Tableau IV.5. Corrélations de la densité moyenne (DMoy) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des six arbres de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 observations)

Composantes microdensitométriques			DMoy (kg/m ³)				
			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
LC (mm)	Sidi Bel Abbès	S ₁	R ₁	-0,05 NS			
			R ₂		0,61 **		
			R ₃			0,11 NS	
			R ₄				0,44 *
		S ₂	R ₁	0,63 ***			
			R ₂		0,63 ***		
			R ₃			0,61 ***	
			R ₄				0,61 ***
		S ₃	R ₁	0,49 ***			
			R ₂		0,41 **		
			R ₃			0,29 NS	
			R ₄				0,58 ***
Tiaret	T ₁	R ₁	0,37 NS				
		R ₂		-0,35 NS			
		R ₃			-0,37 NS		
		R ₄				0,47 *	
	T ₂	R ₁	-0,43 *				
		R ₂		-0,42 *			
		R ₃			-0,32 NS		
		R ₄				-0,34 NS	
	T ₃	R ₁	0,23 NS				
		R ₂		0,15 NS			
		R ₃			0,62 ***		
		R ₄				-0,02 NS	

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

NS : test non significatif au seuil de 5% ;
 * : test significatif au seuil de 5% ;
 ** : test significatif au seuil de 1% ;
 *** : test significatif au seuil de 1%.

- **Effet arbre et effet provenance sur la densité moyenne**

Compte tenu de l'effet arbre et l'effet provenance sur la densité moyenne de cerne, l'analyse de la variance au seuil de 5% a fait ressortir un effet arbre très hautement significatif seulement pour la provenance de Tiaret. Aussi, sur l'ensemble des échantillons, l'effet provenance s'est montré très hautement significatif (Tableau IV.6).

Tableau IV.6. Effet arbre et effet provenance (à 5%) sur la densité moyenne (DMoy)

		DMoy (Kg/m ³)			
		R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Effet arbre	S (p=)	0,6666 NS	0,1491 NS	0,064 NS	0,6881 NS
	T (p=)	0,1154.10 ⁻³ ***	0,329 NS	0,0546 NS	0,1588.10 ⁻⁵ ***
Effet provenance		0,1163.10 ⁻⁷ ***	0,1059 NS	0,1381.10 ⁻⁴ ***	0,5689.10 ⁻⁷ ***

IV.3.1.1.1.2. Corrélation des densités maximales et minimales avec la largeur de cerne pour la provenance de Sidi Bel Abbès

Les corrélations entre les densités maximales et minimales à 5% avec la largeur de cerne sont positives et hautement à très hautement significatives pour l'ensemble des rayons des arbres S₂ et S₃ (Tableau IV.7). Au niveau du premier arbre les résultats des corrélations sont différents d'un rayon à un autre. Ainsi, au sein de R₁ et R₃ la corrélation entre DMax et Dmax-5 avec la largeur de cerne est non significative au seuil de 5%, significative dans le rayon R₄ et très hautement significative dans le R₂ (Tableau IV.7). Parallèlement, les résultats des corrélations entre les densités minimales et minimales à 5% avec la largeur de cerne obtenus sont semblables aux précédents sauf pour l'arbre S₃ au niveau duquel, les résultats ont variés d'un rayon à un autre. Ainsi, pour le rayon R₁, R₂ et R₄ la corrélation est respectivement hautement significative (r= 0,43), significative (r= 0,34 et r= 0,36) et très hautement significative (r= 0,50 et r= 0,51). Elle demeure non significative pour R₃ au seuil de 5% (r= 0,16 et r= 0,17).

Tableau IV.7. Corrélation des variables microdensitométriques (DMax, DMax-5, DMin, DMin-5) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des trois arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès (473 observations)

Composantes microdensitométriques			LC (mm)				
			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
S ₁	D _{Max} (kg/m ³)	D _{Max}	R ₁	0,07 NS			
			R ₂		0,67***		
			R ₃			0,20 NS	
			R ₄				0,46*
	D _{Max-5}	D _{Max-5}	R ₁	0,04 NS			
			R ₂		0,65***		
			R ₃			0,17 NS	
			R ₄				0,43*
	D _{Min} (kg/m ³)	D _{Min}	R ₁	-0,11 NS			
			R ₂		0,58**		
			R ₃			0,06 NS	
			R ₄				0,92***
D _{Min-5}		D _{Min-5}	R ₁	-0,08 NS			
			R ₂		0,61**		
			R ₃			0,09 NS	
			R ₄				1,00***
S ₂	D _{Max} (kg/m ³)	D _{Max}	R ₁	0,68***			
			R ₂		0,70***		
			R ₃			0,68***	
			R ₄				0,65***
	D _{Max-5}	D _{Max-5}	R ₁	0,67***			
			R ₂		0,69***		
			R ₃			0,67***	
			R ₄				0,64***
	D _{Min} (kg/m ³)	D _{Min}	R ₁	0,55***			
			R ₂		0,56***		
			R ₃			0,53***	
			R ₄				0,55***
D _{Min-5}		D _{Min-5}	R ₁	0,56***			
			R ₂		0,57***		
			R ₃			0,55***	
			R ₄				0,58***
S ₃	D _{Max} (kg/m ³)	D _{Max}	R ₁	0,57***			
			R ₂		0,54***		
			R ₃			0,46**	
			R ₄				0,67***
	D _{Max-5}	D _{Max-5}	R ₁	0,56***			
			R ₂		0,53***		
			R ₃			0,45**	
			R ₄				0,66***
	D _{Min} (kg/m ³)	D _{Min}	R ₁	0,43**			
			R ₂		0,34 *		
			R ₃			0,16 NS	
			R ₄				0,50***
D _{Min-5}		D _{Min-5}	R ₁	0,43**			
			R ₂		0,36*		
			R ₃			0,17 NS	
			R ₄				0,51***

IV.3.1.1.3. Corrélation des densités maximales et minimales avec la largeur de cerne pour la provenance de Tiaret

Les corrélations ressorties entre les densités maximales et minimales à 5% avec la largeur de cerne des arbres de la provenance de Tiaret ont montré, des résultats plus ou moins variables d'un rayon à un autre en fonction de l'arbre. Ainsi, le seul arbre ayant donné un résultat uniforme est l'arbre T₂ où la corrélation entre les propriétés concernées est non significative et négative au seuil de 5% (« r » varie entre -0,14 et -0,27). Au niveau de l'arbre T₁, les résultats des corrélations montrent une faible relation entre les propriétés pris en considération au niveau des rayons R₂ et R₃, cette relation est positivement plus forte dans R₁ et R₄ ($r = 0,66$ et $r = 0,57$ respectivement). Pour l'arbre T₃, elle est non significative au seuil de 5% pour les rayons R₁, R₂ et R₄ et très hautement significative et positive pour le R₃ ($r = 0,74$ et $r = 0,73$) (Tableau IV.8).

IV.3.1.2. Variation de la densité moyenne de cerne en fonction des années

Pour montrer la variation de la densité moyenne de cerne en fonction des années, nous avons réalisé des graphiques par le logiciel (Facto Miner sous "R") sur l'ensemble des cernes des six arbres de pistachier issus des deux provenances.

Pour les six arbres des deux provenances et au niveau des quatre rayons, nous avons remarquer que la densité moyenne de cerne décroît fortement dans le duramen et dans l'aubier, mais tend aussi à décroître avec le temps au sein même du duramen et de l'aubier, sauf pour l'arbre T₃ où une augmentation notable de la densité moyenne de cerne est observée. De manière générale, les arbres de deux provenances se comportent de la même façon (Figure IV.8).

Tableau IV.8. Corrélation des variables microdensitométriques (DMax, DMax-5, DMin, DMin-5) avec la largeur de cerne (LC) au niveau des quatre rayons de tous les cernes des trois arbres de la provenance de la provenance de Tiaret (test réalisé sur 454 observations)

Composantes microdensitométriques			LC (mm)				
			R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	
T ₁	DMax (kg/m ³)	DMax	R ₁	0,66***			
			R ₂		-0,22 NS		
			R ₃			-0,29 NS	
			R ₄				0,57**
	DMax-5	DMax-5	R ₁	0,65***			
			R ₂		-0,23 NS		
			R ₃			-0,30 NS	
			R ₄				0,57**
	DMin (kg/m ³)	DMin	R ₁	0,02 NS			
			R ₂		-0,48 **		
			R ₃			-0,46*	
			R ₄				0,09 NS
DMin-5		DMin-5	R ₁	0,04 NS			
			R ₂		-0,46 *		
			R ₃			-0,45*	
			R ₄				0,09 NS
T ₂	DMax (kg/m ³)	DMax	R ₁	-0,25NS			
			R ₂		-0,20NS		
			R ₃			-0,14NS	
			R ₄				-0,17NS
	DMax-5	DMax-5	R ₁	-0,27NS			
			R ₂		-0,22NS		
			R ₃			-0,16NS	
			R ₄				-0,20NS
	DMin (kg/m ³)	DMin	R ₁	-0,58***			
			R ₂		-0,50**		
			R ₃			-0,48**	
			R ₄				-0,48**
DMin-5		DMin-5	R ₁	-0,55***			
			R ₂		-0,49**		
			R ₃			-0,46**	
			R ₄				-0,45**
T ₃	DMax (kg/m ³)	DMax	R ₁	0,28 NS			
			R ₂		0,28 NS		
			R ₃			0,74***	
			R ₄				0,08 NS
	DMax-5	DMax-5	R ₁	0,26 NS			
			R ₂		0,25 NS		
			R ₃			0,73***	
			R ₄				0,04 NS
	DMin (kg/m ³)	DMin	R ₁	0,14 NS			
			R ₂		0,04 NS		
			R ₃			0,44**	
			R ₄				-0,08 NS
DMin-5		DMin-5	R ₁	0,17 NS			
			R ₂		0,06 NS		
			R ₃			0,48**	
			R ₄				-0,04 NS

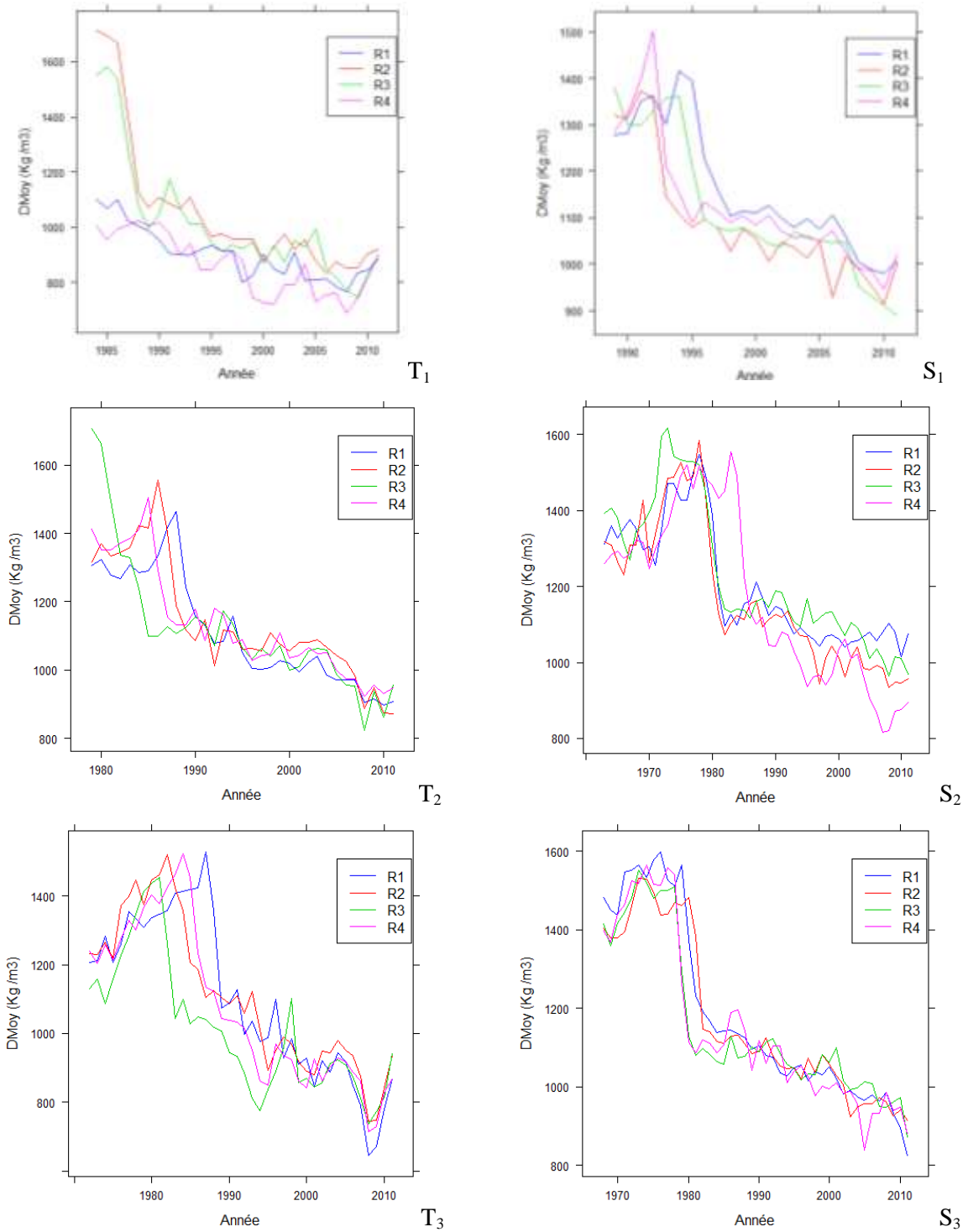


Figure IV.8. Variation de la densité moyenne de cerne (DMoy) en fonction des années sur les quatre rayons des six arbres étudiés de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 cernes)

IV.3.1.2.1. Corrélation de la densité moyenne (DMoy) avec l'année pour les six arbres de pistachier

Des corrélations négatives et très hautement significatives ont été trouvées entre l'âge et la densité moyenne pour tous les arbres de deux provenances (Tableau IV.9).

Tableau IV.9. Corrélation de la densité moyenne (DMoy) avec les années pour les quatre rayons de tous les cerne des six arbres de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 observations)

Composante microdensitométrique				DMoy (kg/m ³)			
				R ₁	R ₂	R ₃	R ₄
Année (âge)	Sidi Bel Abbès	S ₁	R ₁	-0.89***			
			R ₂		-0.86***		
			R ₃			-0.88***	
			R ₄				-0.84***
		S ₂	R ₁	-0.80***			
			R ₂		-0.83***		
			R ₃			-0.83***	
			R ₄				-0.81***
		S ₃	R ₁	-0.92***			
			R ₂		-0.91***		
			R ₃			-0.86***	
			R ₄				-0.88***
	Tiaret	T ₁	R ₁	-0.77***			
			R ₂		-0.79***		
			R ₃			-0.82***	
			R ₄				-0.71***
		T ₂	R ₁	-0.78***			
			R ₂		-0.82***		
			R ₃			-0.80***	
			R ₄				-0.77***
		T ₃	R ₁	-0.84***			
			R ₂		-0.90***		
			R ₃			-0.81***	
			R ₄				-0.89***

IV.3.1.3. Variabilité de la largeur de cerne en fonction des années

La figure IV.9 présente la variation de la largeur de cerne en fonction des années sur les quatre rayons des six arbres étudiés de pistachier de l'Atlas. Selon cette figure nous avons observé que la largeur de cerne est variable avec le temps pour les arbres T₁ et le T₂, alors que cette largeur reste constante avec le temps pour les arbres S₁ et T₃. Les arbres S₂ et S₃ ont montré une tendance légèrement décroissante de la largeur de cerne avec le temps.

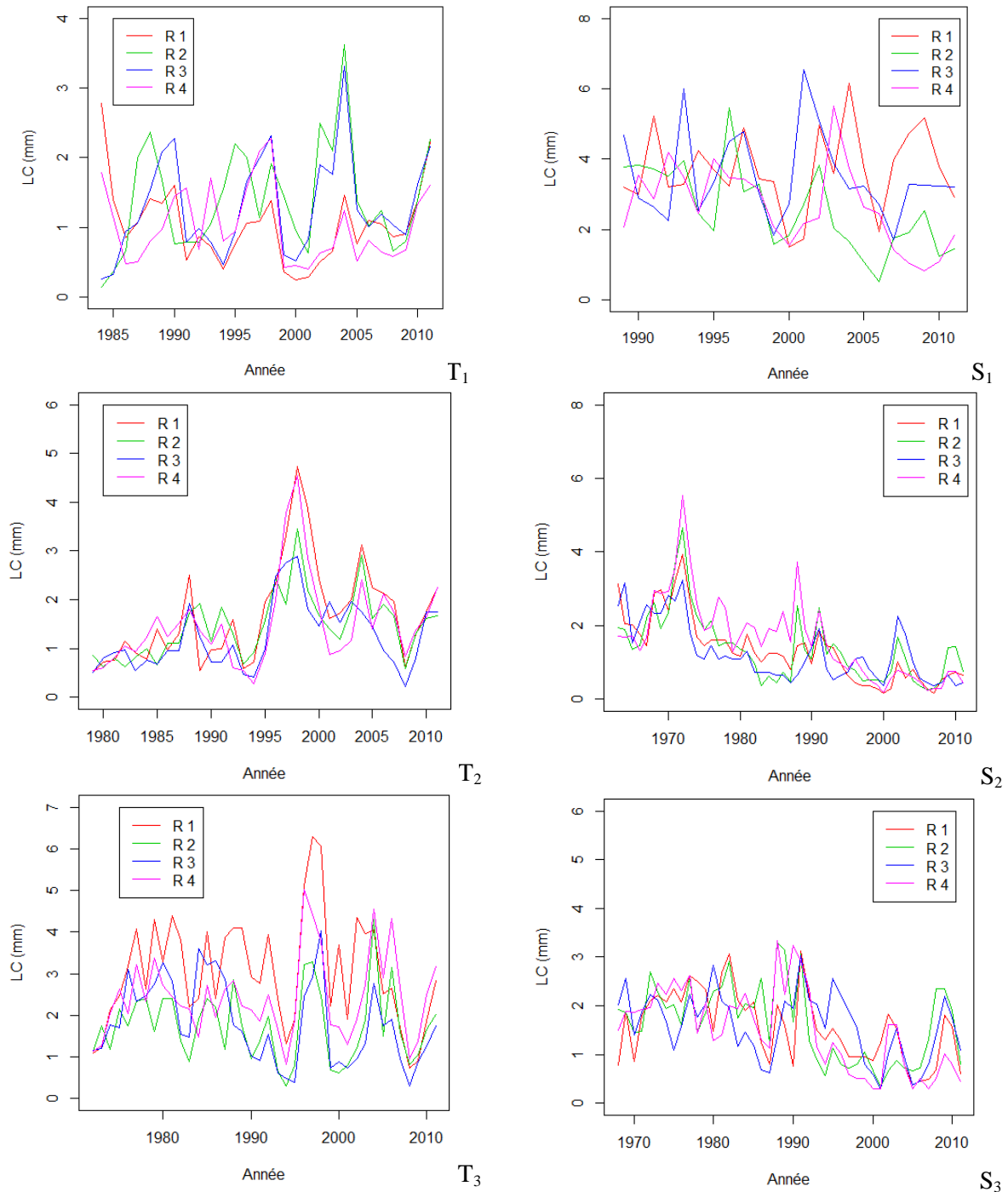


Figure IV.9. Variation de la largeur de cerne (LC) en fonction des années sur les quatre rayons des six arbres étudiés de pistachier de l'Atlas (test réalisé sur 927 cernes)

IV.3.2. Discussion

Les résultats obtenus sur la corrélation de la densité avec la largeur de cerne nous ont permis de constater que cette dernière a présenté une très grande variabilité avec des valeurs extrêmes au niveau des arbres de la même provenance et au niveau de l'ensemble des échantillons. Cette variabilité est certainement liée à l'hétérogénéité du bois de *Pistacia*. Ainsi, cette corrélation s'est montrée négative au niveau d'un seul arbre de la provenance de Tiaret (T_2), alors que la densité est liée

positivement avec la largeur de cerne, seulement au niveau des deux arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès (S_2 et S_3). Ce dernier résultat est cohérent avec ceux de la littérature. Selon Polge et Keller (1973) d'une manière générale, la densité du bois du chêne augmente avec la largeur de cerne. Nous citons les travaux de De Reboul (1988) sur *Picea abies* Karst L., il a été établi que la densité était fortement corrélée à la largeur de cerne dans le cas de cette espèce, les travaux de Zobel et Buijtenen (1989) sur les espèces feuillues à zone initiale poreuse et ceux de Bakour (2003) sur les chênes français « *Quercus robur* L. ; *Quercus petraea* Liebl.. Il est à noter que, la largeur de cerne s'est toujours traduite par une augmentation de la largeur du bois final et donc une augmentation de la densité du bois. Cette relation est essentiellement due à la forte relation de la densité avec la largeur du bois final (Zobel et Buijtenen, 1989). Selon ces auteurs, la largeur du bois initial est quasiment constante, quelle que soit la largeur de cerne, à l'intérieur d'un arbre. Ce résultat est en contradiction avec le résultat obtenu par Feuillat (1996) et Bergès et al. (2000). Ces mêmes auteurs ont constaté qu'il n'y a pas de corrélation significative entre la largeur de cerne et la densité à l'intérieur d'une même placette pour des individus d'âge très voisin, ceci peut signifier que la largeur du bois initial est très variable d'un individu à l'autre et que la structure anatomique du bois final n'est pas uniforme (proportion de fibres, de parenchyme, de vaisseaux...).

De nombreuses études citées par Zobel et Buijtenen (1989) ont montré que, chez les espèces feuillues à zone initiale poreuse, le bois final est plutôt pauvre en vaisseaux et l'accroissement de sa largeur se traduit souvent par une augmentation de la proportion des fibres et par conséquent une augmentation de la densité.

Dans le cas des résineux, cette relation est négative, sauf si le bois contient du bois juvénile, cas de *Pinus Halepensis* Mill (Khatir, 2003). Il a été de nombreuses fois établie que la densité du bois étant corrélée négativement à la largeur moyenne de cernes. Une accélération de la vitesse de la croissance s'accompagne le plus souvent d'une diminution de la densité. Plusieurs auteurs ont confirmé cette tendance négative chez : - l'épicéa commun (*Picea abies* L.) : Nylinder (1951) ; Pechmann et Wutz (1960) ; Bernhard (1964) ; Klem (1965) ; Hakkila (1966) ; Mac Donald et Franklin (1969) ; Olesen (1976), - *Pinus brutia* : Rahme (1972), - le pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) et l'épicéa commun (*Picea abies* L.) : Mazet et al. (1989), - épicéa commun (*Picea abies* L.) : Beachen (1990), - le cèdre de l'Atlas (*Cedrus atlantica*) : El Azzouzi (1996), - le pin d'Alep (*Pinus halepensis* Mill.) : Maatoug (1998), - *Tetraclinis articulata* Maatoug (2003). Bernhard (1964) a montré pour *Picea* que, cette corrélation négative était due à une diminution du pourcentage de bois final lors d'une augmentation de la largeur de cerne. Cette relation est négative, semble comparable avec le notre pour l'arbre de la provenance de Tiaret (T_2).

Mazet et Janin (1990) ont montré pour *picea abies* et *abies alba* que, l'altitude permet en partie d'expliquer cette variabilité quand l'effet de la largeur de cerne est pris en compte. Ces mêmes auteurs ont aussi montré qu'à largeur de cerne fixée, il existe un effet de la région sur la densité. En revanche, cet effet région est difficilement interprété car chaque région se distingue par le substrat et

l'altitude. Mazet et Janin (1990) ont montré également que pour l'épicéa commun et le sapin qu'à largeur de cerne fixée, la classe de fertilité n'a plus d'effet sur la densité du bois. Selon Bergès (1998) seulement 1,5 à 3 % de la variabilité de la densité du bois de chêne ont été expliqués par l'effet de l'altitude et de variables hydriques et trophiques. Aussi, selon Chantre (1989) la densité moyenne de cerne interagit avec beaucoup d'autres paramètres, comme la texture, l'épaisseur des parois, la largeur des trachéides et surtout la largeur de cerne (très forte corrélation négative avec ce dernier caractère).

Toutefois, Nepveu (1991) a montré que les différences de densité intracernes sont technologiquement importantes pour l'usinage (rabotage, mortaisage, etc.) et la finition des produits, voire les déformations au séchage des bois débités en lames minces tels que les placages (retraits différentiels liés aux différences de densité dans le placage).

Les résultats sur l'essence étudiée font ressortir aussi que les échantillons d'aubier sont moins denses que ceux du duramen. Ceci confirme les résultats de Klumpers (1994) qui avait comparé, à une hauteur donnée, la densité d'échantillons d'aubier et de duramen jointifs de même largeur de cerne moyenne, l'aubier était significativement moins dense que le duramen. Dhôte et *al.*, (1997) ont indiqué que, les cernes d'aubier sont significativement moins denses que les cernes de duramen, toutes choses égales par ailleurs c'est-à-dire à même âge depuis la moelle, même largeur de cerne.

Nous avons également remarqué que chez le pistachier l'augmentation de la densité avec la largeur de cerne est rapide pour les cernes très fins à fins (1 à 1,5 mm environ), cette relation diminue pour des cernes un peu plus larges, Ce qui est cohérent avec les résultats de littérature, ainsi Schulz (1959), Polge et Keller (1973), Huber (1991) ont montré que l'augmentation de la densité avec la largeur de cerne est rapide pour les cernes très fins à fins (1 à 1,5 mm environ), cette relation diminue pour des cernes un peu plus larges (environ 2 mm) et devient presque stable pour des larges (plus de 3 mm). Beaucoup de publications mentionnent une évolution caractéristique de la densité de la moelle vers l'écorce (Dadswell et Nicholls, 1959) sur *Pinus elliotti*, Polge en (1964) sur de nombreux résineux, Edlin (1965), Harvald et Olesen en (1987) sur *Picea sitchensis* : la densité moyenne aurait tendance, notamment dans le genre *Picea*, à être forte dans les tout premiers cernes, puis à diminuer jusqu'au 10^{ème} cerne environ, après être passée par ce minimum, la densité remonte et se stabilise aux alentours du 20^{ème} cerne. En ce sens, l'étude la plus complète sur l'évolution de la densité de la moelle vers l'écorce a été menée par Harvald et Olesen (1987). Olesen (1982) a présenté une interprétation anatomique précise des variations de densité dans le bois juvénile. A proximité immédiate de la moelle, le nombre de trachéides par unité de volume est très élevé, d'où une densité forte. Puis le diamètre tangentiel moyen des trachéides augmente, et donc le nombre de trachéides par unité de volume diminue rapidement, entraînant une chute de la densité moyenne jusqu'au 6^{ème} cerne environ (sachant que l'épaisseur des parois du bois d'été n'augmente pas). Après ces tous premiers cernes, l'épaisseur des parois du bois d'été augmente ainsi que la texture (tandis que le diamètre tangentiel des trachéides augmente moins vite). Par suite, la densité moyenne s'accroît jusqu'au bois adulte où elle ne dépend plus que de la largeur des cernes.

Chez les résineux le bois initial ou bois de printemps, mis en place au début de la saison végétative, est constitué de cellules à paroi moins épaisse et de lumens plus grands, notamment dans le sens radial. En revanche, le bois final ou bois d'été est constitué par des cellules avec des parois épaisses et des lumens étroits. Par conséquent, le bois initial est toujours moins dense que le bois final avec un rapport qui varie de un à quatre (Ifzu, 1969). Bien que les résineux soient plus homogènes sur le plan anatomique, ils montrent généralement un contraste de densité du BI et du BF plus important que les feuillus (Cown *et al.*, 1978).

Dans une revue bibliographique très détaillée sur la densité des conifères réalisée en 1970 Elliott a souligné la grande difficulté de décrire sous forme mathématique, les variations de densité dans un arbre, et cela malgré un siècle d'investigations très poussées. Pour lui, les principales raisons viennent de l'extrême complexité de l'interaction et de l'influence de certains facteurs sur la densité. Il reste que certains problèmes doivent être résolus afin de connaître avec précision les mécanismes physiologiques qui gouvernent les modifications de la densité au cours de la vie d'un arbre (Nepveu, 1976).

Dans notre étude, nous avons noté que, les composantes microdensitométriques étaient généralement plus élevées chez les arbres de Tiaret que chez les arbres de Sidi Bel Abbès. L'analyse de la variance au seuil de 5% a montré que la densité moyenne de cerne chez le pistachier de l'Atlas est significativement influencée par la provenance. Ceci est cohérent avec les résultats de littérature. Ainsi, d'après Ackermann (1995) qui a étudié l'effet station sur les composantes intra-cerne de la densité du bois de chêne pédonculé (densité moyenne du cerne, densité du bois initial et celle du bois final), ces composantes sont significativement influencées par le type de station lorsque l'âge depuis la moelle et la largeur de cerne sont fixes. Malgré cela l'essentiel de la variabilité pour ces composantes est dû à l'effet arbre.

Plusieurs études sur la densité du bois du chêne ont montré que cette densité est fortement influencée par la provenance (milieu) qui conditionne la structure anatomique du cerne (proportion de fibres, de vaisseaux, de rayons ligneux...). Par ailleurs, Zahner (1968), a trouvé un effet milieu important sur la densité du bois de chêne qui a une tendance à augmenter plus dans les stations riches que dans les stations pauvres. Dupouey (1983) a constaté que la densité du bois des chênes rouvre et pédonculé de la forêt de Haguenau (Bas-Rhin) augmente quand on passe des stations riches aux stations pauvres. Selon Ackermann (1994), les caractéristiques microdensitométriques du bois du chêne pédonculé augmentent en allant des stations pauvres aux stations riches pouvant s'expliquer, selon l'auteur, par une différence de la structure anatomique du bois final de l'accroissement annuel. La même hypothèse avait été proposée par Polge (1973). Bergès (1998) a constaté que chez le chêne rouvre la plupart des facteurs stationnels ont des effets sur la densité et sur la largeur de cerne. La proportion du bois final, la densité du bois initial et final sont influencées par certains facteurs stationnels. Becker (1979) a constaté un effet simultané de la station, de l'espèce et de la structure de peuplement sur la densité du bois de chênes rouvre et pédonculé issus des plateaux calcaires du Nord-

est de la France. Une analyse densitométrique faite par Polge en 1985, sur des barrettes de 1,6 mm d'épaisseur de pin maritime montre l'influence défavorable de la fertilisation phosphatée sur la densité du bois et par voie de conséquence sur sa résistance.

Par contre, Girault (1990) n'a pas trouvé d'effet station sur la densité globale des chênes pédonculés du massif de la Reine (Meurthe et Moselle), en revanche cet effet station était significatif pour les retraits tangentiel et volumique. Selon Le Moguédec (2000), l'effet région serait faible, il n'explique que 5 % de la variabilité de la densité du bois chez le chêne sessile, une fois l'effet âge et largeur de cerne pris en compte. Ces travaux confirment les résultats de Bergès et *al.* (2000) qui ont montré, à l'aide d'un modèle mixte de densité, où l'âge depuis la moelle et la texture sont les variables explicatives, que l'effet de l'altitude et les facteurs stationnels n'expliquent qu'une part très faible de la variabilité totale (1,5 à 3%) de la densité du bois du chêne rouvre.

Les résultats de la variabilité de la densité moyenne de cerne en fonction des années trouvés chez le pistachier de l'Atlas confirment ceux de la littérature. Ainsi, Bergès (1998), chez le chêne sessile, a indiqué que l'âge avait un effet négatif très significatif sur toutes les caractéristiques de la densité (DMoy, DMin, DMax, DBI, DBF). Par ailleurs, Guilley (2000) a montré que la diminution de la densité moyenne du cerne avec l'âge cambial s'explique par des diminutions de texture, de la proportion des tissus denses (fibres, gros rayons ligneux), de la densité du parenchyme du bois initial et du bois final. Aussi, Guilley (2000) a indiqué qu'à âge égal depuis la moelle et à largeur de cerne fixe, une même valeur de densité observée peut être le reflet d'arrangements anatomiques différents susceptibles d'induire des comportements techniques et physiologiques particuliers. Jain et *al.* (1979) a constaté que dans les cernes situés près de la moelle, l'évolution de la densité avec l'âge du cerne est quasiment linéaire. La densité maximale aurait en revanche tendance à augmenter rapidement dans la zone juvénile et serait responsable de l'augmentation de densité (Ohta et *al.*, 1968 sur sugi ; Olesen, 1982 sur épicéa de Sitka).

La largeur de cerne a un effet plus complexe : son influence serait positive dans les premiers cernes (Bisset et *al.*, 1951 ; Dadswell et Nicholls, 1959) mais par la suite, dès que l'âge n'a plus d'influence - c'est à dire dans le bois adulte - elle serait négative si la largeur dépasse 1 à 2 mm (Bannan, 1967 sur *Pinus strobus*, *Picea glauca* et *Pseudotsuga menziesii* ; Sudo, 1945 in Chantre, 1989 sur *Pinus densiflora*). A l'exception du cas d'arbres situés dans des conditions de milieu difficiles, il est extrêmement rare que la largeur de cerne soit constante à l'intérieur de l'arbre, y compris pour des arbres se développant en croissance libre (Nepveu, 1982). En revanche, des variations de largeur de cerne intra-arbres de 1 à 5 mm, voire de 1 à 10 mm sont fréquemment observées. Il sera toujours indispensable de noter la largeur de cerne des échantillons prélevés et éventuellement un critère décrivant leur régularité (Nepveu, 1987).

La largeur de cerne dépend assez fortement de l'espèce, de la fertilité de la station et traitement sylvicole. Elle est le premier critère sur lequel le forestier peut agir par le biais des actions sylvicoles. Selon Bakour (2003) une grande partie de la variabilité de la largeur moyenne de cerne est due à

l'effet provenance. Dilem (1992) a étudié l'effet arbre sur la largeur moyenne de cerne chez le pin d'Alep dans deux régions algériennes géographiquement éloignées, il a constaté des différences très hautement significatives entre les échantillons de la région de Saida qui présentent une forte largeur moyenne de cerne, contrairement à ceux de la région de Djelfa. Il a conclu que cette différence est la conséquence directe des traitements sylvicoles appliqués dans chacune des deux régions. Il importe de ce fait de pouvoir connaître l'influence de la largeur de cerne sur les propriétés du matériau produit (Maatoug, 2003). Selon Chantre (1989) ce paramètre est toujours à prendre en compte car il influence la distribution dans l'arbre de tous les autres paramètres anatomiques de façon déterminante, même lorsqu'il n'y a pas de relation causale apparente. Quoiqu'il en soit la liaison entre ces deux variables microdensitométriques, les arbres à croissance rapides produisent un bois de qualité inférieure par rapport aux arbres de croissance lente.

IV.4. Essais mécaniques

IV.4.1. Résultats

Nous rappelons que les propriétés mécaniques étudiées concernent le module d'élasticité longitudinale, le module spécifique et le coefficient d'amortissement en relation avec la densité.

Tous les résultats illustrés par la figure IV.10 dans cette partie sont triés en fonction de type de bois (aubier, duramen et type mixte) et sont identifiés en fonction des arbres (numérotés 1 à 3) et de leur provenance (S, T). Les résultats consignés dans les figures IV.10 (A), IV.10 (C) et IV.10 (E) ont concerné le type de bois (aubier, duramen et type mixte) et ceux présentés dans les figures IV.10 (B), IV.10 (D), IV.10 (F) sont relatifs aux arbres et leur provenance. Les tableaux IV.10 à IV.12 résumant les propriétés étudiées sur les 72 éprouvettes prélevées des deux rayons de la rondelle n°4 des six arbres du pistachier de l'Atlas.

IV.4.1.1. Couple « densité- module de Young »

Les figures IV.10 (A) et IV.10 (B) présentent l'influence de la densité sur le module de Young. Ces graphes font ressortir deux groupes bien distincts, le premier groupe est relatif à l'aubier et le second au duramen pour la figure IV.10 (A) et pour la figure IV.10 (B) les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès ont présenté une densité plus élevée que ceux de Tiaret. Pour l'ensemble des échantillons, plus la densité est forte, plus le module d'élasticité longitudinale augmente.

IV.4.1.1.1. Corrélation de la densité avec le module de Young pour les types du bois

Le tableau IV.10 montre que, sur l'ensemble des échantillons, le bois du pistachier de l'Atlas a présenté une densité de 0,953 pour un module d'élasticité longitudinale de 9,834 GPa avec une corrélation légèrement faible ($r= 0,454$). Ce même tableau indique aussi que, sur l'ensemble des échantillons, la provenance de Sidi Bel Abbès a présenté, au niveau du bois de l'essence étudiée, une densité plus élevée de 1,018 pour un module de 10,748 GPa que celui de la provenance de Tiaret qui a présenté une densité de 0,881 pour un module de 8,818 GPa. La corrélation de la densité avec E_L est

très faible pour les arbres de Sidi Bel Abbès ($r= 0,098$) alors qu'elle est moyennement élevée pour ceux de Tiaret ($r= 0,449$) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un effet provenance très hautement significatif au seuil de 5 % pour l'ensemble des types du bois ($p= 0,5434.10^{-5}$) (Tableau IV.12).

Sur l'ensemble des échantillons, l'aubier a présenté la plus faible densité (0,854) avec une valeur moyenne de module de Young égale à 9,661 GPa contre celle du duramen qui a présenté la plus forte valeur (1,151) pour un module moyen de 10,180 GPa. Il est également enregistré qu'au niveau de l'aubier, il existe une forte corrélation entre la densité et le module E_L ($r= 0,794$) alors que pour le duramen, elle est moyenne ($r= 0,532$) et le type mixte, la corrélation est légèrement plus faible ($r= 0,442$) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un effet type très hautement significatif au seuil de 5 % pour la provenance de Sidi Bel Abbès ($p= 0,166.10^{-10}$) alors que pour la provenance de Tiaret il est non significatif ($p= 0,881$) (Tableau IV.12).

Par ailleurs, les trois types du bois de la provenance de Sidi Bel Abbès ont présenté une densité plus élevée que ceux de la provenance de Tiaret. Les valeurs respectives pour l'aubier sont de 0,904 pour un module de 10,808 GPa contre 0,813 pour un module de 8,732 GPa. Pour le duramen la densité est de 1,166 pour un module de 10,670 GPa contre 1,117 pour un module de 9,119 GPa. Enfin pour le mixte les valeurs de la densité sont de 1,097 pour un E_L égal à 11,378 GPa contre 0,940 pour un E_L égal à 8,597 GPa (Tableau IV.10). Concernant la corrélation de la densité avec le module d'élasticité longitudinale, elle est significative au niveau de l'aubier de la provenance de Tiaret ($r= 0,804$) suivie de celle du duramen au niveau de Sidi Bel Abbès ($r= 0,482$) les autres ne sont que faiblement corrélées (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance n'est très hautement significatif, au seuil de 5 %, que pour l'aubier ($p= 0,11.10^{-7}$), pour les deux autres types, l'effet n'est pas significatif (Tableau IV.12).

IV.4.1.1.2. Corrélation de la densité avec le module de Young pour chaque arbre de chaque provenance

Dans l'aubier, les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès ont présenté un module d'élasticité longitudinale plus élevé que ceux de Tiaret (Figure IV.10 (B)). En moyenne le module le plus élevé a été enregistré dans l'aubier de S_3 (11,581 GPa) contre 6,716 GPa dans l'aubier de T_1 . La corrélation de la densité avec E_L s'est montrée variable d'un arbre à un autre dans la même provenance et pour le même type du bois (dans l'aubier ; $r= 0,158$ pour S_1 et $r= 0,904$ pour S_2 par exemple) (Tableau IV.11). L'analyse de la variance de cette propriété a fait ressortir, au seuil de 5 %, un effet arbre hautement significatif pour Sidi Bel Abbès ($p= 0,010317$) et très hautement significatif pour Tiaret ($p= 0,32. 10^{-4}$) (Tableau IV.12).

Dans le duramen, les valeurs moyennes du module d'élasticité sont comprises entre un minimum de 8,995 GPa au niveau de T_3 et un maximum de 11,222 GPa au niveau de l'arbre S_3 sans

qu'il y ait un effet arbre significatif pour les deux provenances (Tableau IV.11). La densité est positivement corrélée avec E_L au niveau de la plupart des arbres de la même provenance, sauf pour le duramen de T_3 au niveau duquel la corrélation était négative ($r=-0,781$) (Tableau IV.11).

Concernant le type mixte, le tableau IV.11 a montré des valeurs moyennes du module entre 8,394 GPa au niveau de T_1 et 12,035 GPa au niveau de S_3 . La corrélation de la densité avec E_L s'est montrée variable d'un arbre à un autre dans la même provenance ($r= -0,376$ pour T_1 et $r= 0,788$ pour T_2 par exemple) (Tableau IV.11). L'analyse de variance a montré un effet arbre non significatif pour les deux provenances (Tableau IV.12).

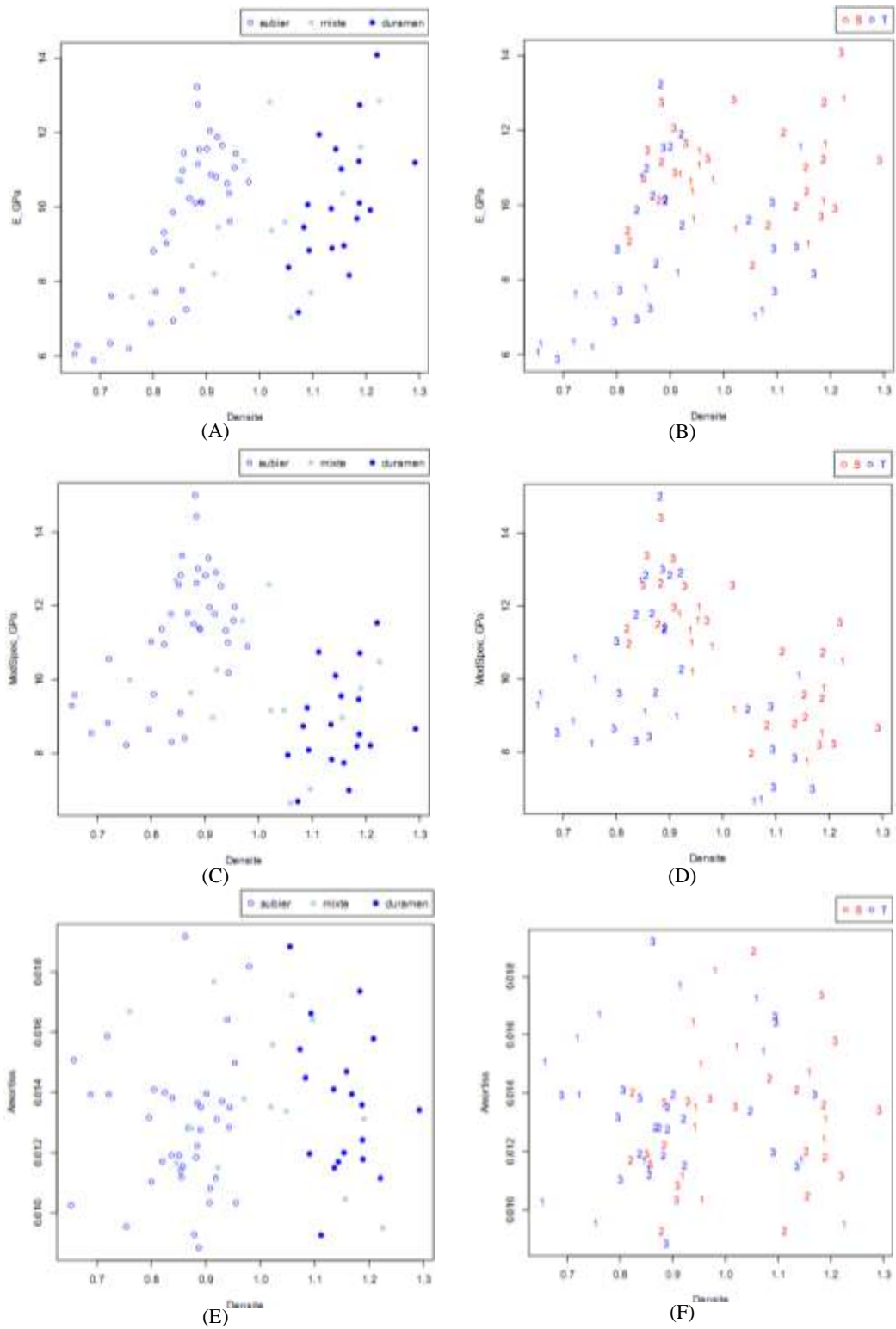


Figure IV.10. Relations entre la densité et les propriétés mécaniques pour l'aubier et le duramen de chaque arbre (numérotés 1 à 3) des deux provenances (S et T)

(A) et (B) densité avec le module de Young
 (C) et (D) densité avec le module spécifique
 (E) et (F) densité avec le coefficient d'amortissement

Tableau IV.10. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation de la densité avec le module de Young, le module spécifique et le coefficient d'amortissement pour l'ensemble des échantillons et pour les trois types du bois de pistachier de l'Atlas de chaque provenance

Échantillons		Densité (ρ en rho^3)	Module de Young (E_L en GPa)				Module spécifique (E_L/ρ en GPa)				Coefficient d'amortissement ($\tan\delta$)				
		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 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 de $\tan\delta$	Coefficient de corrélation de la densité avec $\tan\delta$	Pente (a) de la droite de régression ($y=ax+b$)	Constante (b) de la droite de régression ($y=ax+b$)	
Tout		0,953 $\pm 0,160$	9,834 $\pm 1,954$	0,454	0,037	0,588	10,424 $\pm 1,959$	-0,327	-0,027	1,231	0,013 $\pm 0,002$	0,137	9,424	0,829	
Provenance	S	1,018 $\pm 0,142$	10,748 $\pm 1,244$	0,098	0,011	0,897	10,740 $\pm 1,802$	-0,745	-0,059	1,650	0,013 $\pm 0,002$	0,217	12,584	0,852	
	T	0,881 $\pm 0,149$	8,818 $\pm 2,113$	0,449	0,032	0,602	10,074 $\pm 2,098$	-0,184	-0,013	1,012	0,013 $\pm 0,002$	0,049	3,268	0,838	
Type	A	0,854 $\pm 0,083$	9,661 $\pm 2,072$	0,794	0,032	0,548	11,222 $\pm 1,746$	0,543	0,026	0,566	0,013 $\pm 0,002$	0,044	1,598	0,834	
	D	1,151 $\pm 0,059$	10,180 $\pm 1,695$	0,532	0,019	0,962	8,829 $\pm 1,284$	0,265	0,012	1,044	0,014 $\pm 0,002$	-0,247	-6,059	1,234	
	Mix	1,007 $\pm 0,135$	9,789 $\pm 1,894$	0,442	0,032	0,698	9,783 $\pm 1,752$	-0,297	-0,023	1,232	0,014 $\pm 0,003$	-0,341	-17,88	1,254	
Provenance par type	A	S	0,904 $\pm 0,047$	10,808 $\pm 0,953$	0,281	0,014	0,754	11,964 $\pm 1,068$	-0,286	-0,013	1,056	0,013 $\pm 0,002$	0,408	8,347	0,798
		T	0,813 $\pm 0,083$	8,732 $\pm 2,278$	0,804	0,029	0,557	10,621 $\pm 1,970$	0,604	0,025	0,542	0,013 $\pm 0,002$	-0,068	-2,453	0,845
	D	S	1,166 $\pm 0,062$	10,670 $\pm 1,587$	0,482	0,019	0,966	9,139 $\pm 1,196$	0,158	0,008	1,092	0,014 $\pm 0,003$	-0,258	-6,160	1,251
		T	1,117 $\pm 0,037$	9,119 $\pm 1,524$	0,277	0,007	1,056	8,158 $\pm 1,308$	0,096	0,003	1,095	0,014 $\pm 0,002$	-0,453	-7,795	1,223
	Mix	S	1,097 $\pm 0,106$	11,378 $\pm 1,369$	0,281	0,021	0,849	10,425 $\pm 1,427$	-0,480	-0,035	1,469	0,0127 $\pm 0,0023$	-0,770	-35,83	1,551
		T	0,940 $\pm 0,118$	8,597 $\pm 1,242$	-0,226	-0,021	1,124	9,301 $\pm 1,905$	-0,740	-0,046	1,365	0,015 $\pm 0,003$	0,215	9,772	0,797

³ 1Kg /m³ = 1000 rho

Tableau IV.11. Moyennes, écart-types et coefficients de corrélation de la densité avec le module de Young, le module spécifique et le coefficient d'amortissement pour les trois types du bois de pistachier de l'Atlas et pour chaque arbre de chaque provenance

Échantillons		Densité (ρ en rho)	Module de Young (E_L en GPa)				Module spécifique (E_L/ρ en GPa)				Coefficient d'amortissement ($\tan\delta$)				
		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 et écart-type de $\tan\delta$	Coefficient de corrélation de la densité avec $\tan\delta$	Pente (a) de la droite de régression ($y=ax+b$)	Constante (b) de la droite de régression ($y=ax+b$)	
A	S	S ₁	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
		S ₂	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
		S ₃	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	T ₁	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
		T ₂	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
		T ₃	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	S ₁	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
		S ₂	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
		S ₃	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	T ₁	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
		T ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		T ₃	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	S ₁	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
		S ₂	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		S ₃	0,995 ± 0,035	12,035 ± 1,109	-	-	-	12,088 ± 0,694	-	-	-	0,0137 ± 0,0002	-	-	-
	T	T ₁	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
		T ₂	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
		T ₃	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tableau IV.12. Valeurs moyennes et écart-types des propriétés physico-mécaniques étudiées sur les 72 éprouvettes prélevées des deux rayons de la rondelle 4 des trois arbres de pistachier de l'Atlas de chacune des deux provenances et résultats de l'ANOVA au seuil de 5 %

paramètres mesurés	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)	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 ***
	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
	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)	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 ***
	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
	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)	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
	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
	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

IV.4.1.1.3. Variabilité du module d'élasticité longitudinale

La variabilité du module de Young intra-arbre, inter-arbre et inter-provenance illustrée dans la figure IV.10 et les tableaux IV.10 à IV.12 s'est montrée importante, ce qui indique une hétérogénéité à chaque niveau : entre arbres, entre types et entre provenances. Les résultats obtenus sur les valeurs du module de Young nous ont permis de classer les individus de Sidi Bel Abbès en première position (valeur moyenne de 10,748 GPa) puis ceux de Tiaret en seconde position (8,818 GPa), ceci pourrait avoir une relation avec les conditions naturelles de développement du pistachier qui paraissent être plus favorables dans la provenance de Sidi Bel Abbès par rapport à celles de Tiaret.

D'après les normes NF B 51-008 (sept. 1985), le module de Young du bois de *Pistacia atlantica* Desf. peut être qualifié de moyen ($10,000 \text{ GPa} < E_L < 15,000 \text{ GPa}$).

IV.4.1.2. Couple « densité- module spécifique »

Les figures (C) et (D) de la figure IV.10 présentent l'influence de la densité sur le module spécifique. Ces figures font également ressortir deux groupes bien distincts, le premier groupe est relatif à l'aubier et le second au duramen (Figure IV.10 (C)).

IV.4.1.2.1. Corrélation de la densité avec le module spécifique pour les types du bois

Le tableau IV.10 montre que, sur l'ensemble des échantillons, le bois de l'essence étudiée, a présenté un module spécifique de 10,424 GPa avec une corrélation négative faible ($r = -0,327$).

Les résultats de l'étude statistique montrent également que sur l'ensemble des échantillons, la provenance de Sidi Bel Abbès a présenté un module spécifique de 10,740 GPa et ceux de la provenance de Tiaret ont présenté un module spécifique de 10,074 GPa. Ce module est fortement et négativement corrélé avec la densité pour les arbres de Sidi Bel Abbès ($r = -0,745$) alors qu'il est faiblement et négativement corrélé pour ceux de Tiaret ($r = -0,184$) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un effet provenance très hautement significatif au seuil de 5 % pour l'ensemble des types du bois ($p = 0,8537 \cdot 10^{-5}$) (Tableau IV.12).

Sur l'ensemble des échantillons, le duramen a présenté la plus faible valeur moyenne de module spécifique (8,829 GPa) contre celle de l'aubier qui a présenté la plus forte valeur (11,222 GPa). Il est également enregistré que le module de l'aubier, est corrélé avec la densité ($r = 0,543$) alors que pour le duramen et le type mixte la corrélation est faible ($r = 0,265$ et $r = -0,297$ respectivement) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un résultat très hautement significatif au seuil de 5 % pour les deux provenances ($p = 0,107 \cdot 10^{-5}$ pour Sidi Bel Abbès et $p = 0,0177$ pour la provenance de Tiaret) (Tableau IV.12).

Les trois types du bois considérés séparément, ont présenté des valeurs moyennes plus élevées dans la provenance de Sidi Bel Abbès par rapport à celle de Tiaret. Ainsi pour l'aubier, ces valeurs sont respectivement de 11,964 GPa et de 10,621 GPa. Aussi pour le duramen, le module spécifique est de 9,139 GPa contre 8,158 GPa. Pour le mixte, ce paramètre est de 10,425 GPa contre 9,301 GPa

(Tableau IV.10). Concernant la corrélation entre la densité et le module spécifique, elle est significativement positive au niveau de l'aubier de la provenance de Tiaret ($r= 0,604$) et significativement négative au niveau du type mixte de la provenance de Tiaret ($r= -0,740$) alors que les autres ne sont que faiblement corrélées (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance n'est très hautement significatif, au seuil de 5 %, que pour l'aubier ($p= 0,15.10^{-5}$), pour les deux autres types, l'effet n'est pas significatif (Tableau IV.12).

IV.4.1.2.2. Corrélation de la densité avec le module spécifique pour chaque arbre de chaque provenance

Dans l'aubier les arbres de la provenance de Sidi Bel Abbès ont présenté un module spécifique plus élevé que ceux de Tiaret (Figure IV.10 (C)). Le module le plus élevé a été enregistré dans l'aubier de S_3 (13,026 GPa) contre 9,263 GPa dans l'aubier de T_1 (Tableau IV.11). La corrélation de la densité avec ce module s'est montrée variable d'un arbre à un autre dans la même provenance et pour le même type du bois (dans l'aubier ; $r= -0,210$ pour S_1 et $r= 0,757$ pour S_2 par exemple) (Tableau IV.11). L'analyse de la variance du module a fait ressortir, au seuil de 5 %, pour la provenance de Sidi Bel Abbès un effet arbre hautement significatif dans l'aubier ($p= 0,19.10^{-2}$) et pour la provenance de Tiaret un effet arbre très hautement significatif dans l'aubier ($p= 0,34.10^{-3}$) (Tableau IV.12).

Dans le duramen les valeurs moyennes du module d'élasticité sont comprises entre un minimum de 8,037 GPa au niveau de T_3 et un maximum de 9,421 GPa au niveau de l'arbre S_2 sans qu'il y ait un effet arbre significatif pour les deux provenances (Tableau IV.11 et IV.12). La densité est positivement corrélée avec le module spécifique au niveau de la plupart des arbres de la même provenance, sauf pour le duramen de T_3 et le type mixte de T_2 au niveau desquels la corrélation était négative ($r= -0,874$ et $r= -0,640$ respectivement) (Tableau IV.11). Les résultats de l'analyse de variance ont révélé un effet arbre non significatif pour les deux provenances (Tableau IV.12).

Selon le tableau IV.11, le type mixte a montré des valeurs moyennes de module spécifique allant de 9,577 GPa au niveau de T_1 à 12,088 GPa au niveau de S_3 . La corrélation de la densité avec le module s'est montrée forte ($r= 0,915$ pour S_1 et $r= -0,737$ pour T_1 par exemple) (Tableau IV.11). L'analyse de variance a montré un effet arbre significatif pour la provenance de Sidi Bel Abbès (0,048563) et non significatif pour la provenance de Tiaret (Tableau IV.12).

IV.4.1.2.3. Variabilité du module spécifique

Des constatations similaires sont faites pour le module spécifique comme pour le module de Young quant à la présentation de la dispersion des résultats. En effet, les figures IV.10 (C) et IV.10 (D) montrent deux groupes bien distincts, plus la densité augmente plus le module spécifique augmente. Mais contrairement aux résultats de la variabilité du module de Young, ceux du module spécifique ont révélé des valeurs plus élevées dans l'aubier que dans le duramen. La figure IV.10 (C) montre une relation entre la densité et le module spécifique pour les trois types de bois considérés.

IV.4.1.3. Couple « densité- coefficient d'amortissement »

Les figures IV.10 (E) et IV.10 (F) présentent l'influence de la densité sur le coefficient d'amortissement. Ces graphes font ressortir deux groupes bien distincts, le premier groupe est relatif à l'aubier et le second au duramen (Figure IV.10 (E)).

IV.4.1.3.1. Corrélation de la densité avec le coefficient d'amortissement pour les types du bois

Sur l'ensemble des échantillons, le bois de *Pistacia atlantica* a présenté une valeur moyenne du coefficient d'amortissement de 0,013, avec une faible corrélation avec la densité ($r= 0,137$). Aussi, sur l'ensemble des échantillons, les deux provenances ont présenté le même coefficient d'amortissement (0,013) (Tableau IV.10). La corrélation de la densité avec l'amortissement est faible pour les arbres de Sidi Bel Abbès ($r= 0,217$), alors qu'elle très faible pour ceux de Tiaret ($r= 0,049$) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un effet provenance non significatif au seuil de 5 % pour l'ensemble des types du bois ($p= 0,4088$) (Tableau IV.12).

Il a également été enregistré que, sur l'ensemble des échantillons, le duramen et le type mixte ont présenté les mêmes valeurs moyennes du coefficient d'amortissement de 0,014 contre celle de l'aubier qui a présenté une valeur de 0,013. Au niveau des trois types du bois, la corrélation de la densité avec l'amortissement s'est montré faible et négative pour le mixte ($-0,341$) et très faible et négative pour le duramen ($-0,247$) (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré un effet type non significatif au seuil de 5 % pour les deux provenances ($p= 0,4678$ pour Sidi Bel Abbès et $p= 0,21$ pour Tiaret) (Tableau IV.12).

Les deux types du bois (aubier et duramen) de la provenance de Sidi Bel Abbès et de la provenance de Tiaret ont présenté les mêmes valeurs moyennes de 0,013 pour l'aubier et de 0,014 pour le duramen, alors que le type mixte a présenté un amortissement moins élevé (0,015) que celui des deux autres types au niveau de la provenance de Tiaret (Tableau IV.10). Par ailleurs, la corrélation entre la densité et l'amortissement s'est montrée significativement forte et négative au niveau du type mixte de la provenance de Sidi Bel Abbès ($r= -0,770$) suivie de celle du duramen au niveau de Tiaret ($r= -0,453$) et l'aubier de Sidi Bel Abbès (0,408), les autres ne sont que faiblement corrélées (Tableau IV.10). L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance n'est pas significatif, au seuil de 5 %, pour les trois types du bois (Tableau IV.12).

IV.4.1.3.2. Corrélation de la densité avec le coefficient d'amortissement pour chaque arbre de chaque provenance

Dans l'aubier les arbres de la provenance de Tiaret ont présenté un amortissement légèrement élevé que ceux de Sidi Bel Abbès (Figure IV.10 (F)) (Tableau IV.11). Alors que l'amortissement le plus élevé (0,0139) a été enregistré au niveau de l'arbre S_1 contre 0,0118 au niveau de S_2 . La corrélation de la densité avec l'amortissement s'est montrée variable d'un arbre à un autre dans la même provenance et pour le même type du bois (dans l'aubier $r= -0,064$ pour T_3 et $r= 0,703$ pour T_2 par exemple)

(Tableau IV.11). L'analyse de la variance de l'amortissement a fait ressortir, au seuil de 5 %, un effet arbre non significatif au niveau des trois types du bois et pour les deux provenances (Tableau IV.12).

Dans le duramen les valeurs moyennes du coefficient d'amortissement sont comprises entre un minimum de 0,0134 au niveau de S_2 et un maximum de 0,0144 au niveau de l'arbre S_3 sans qu'il y ait un effet arbre significatif pour les deux provenances (Tableau IV.11 et IV.12). La densité est négativement corrélée avec l'amortissement au niveau de la plupart des arbres de la même provenance, sauf pour l'arbre T_3 au niveau duquel la corrélation était faiblement négative ($r = -0,188$) (Tableau IV.11).

Dans le type mixte, les valeurs moyennes du coefficient d'amortissement allant de 0,0126 au niveau de T_2 à 0,0158 au niveau de T_1 (Tableau IV.11). La corrélation de la densité avec l'amortissement s'est montrée variable d'un arbre à un autre dans la même provenance ($r = 0,332$ pour T_1 et $r = 0,527$ pour T_2 par exemple) (Tableau IV.11). L'analyse de la variance a montré un effet arbre non significatif pour les deux provenances et un effet provenance non significatif.

IV.4.2. Discussion

De toutes les caractéristiques mécaniques du bois, la plus importante est sa rigidité. C'est une grande raideur correspondant à une déformation en flexion relativement faible, sous une contrainte donnée. C'est une propriété largement utilisée, elle caractérise le comportement global du bois (Bordonné, 1989). Conventionnellement, la rigidité d'un bois est mesurée (à une humidité de l'ordre de 12 %) par le module d'élasticité longitudinale, exprimé en Méga-Pascal (David, 1999). C'est la raison pour laquelle notre discussion se base plus particulièrement sur la relation « densité-module de Young », qui est une relation fondamentale annoncée par la littérature. Aujourd'hui, une meilleure connaissance des propriétés mécaniques des bois, en particulier de la corrélation entre le module d'élasticité longitudinale et la densité permet d'attribuer aux principales espèces, compte tenu des règles de classement technologique, une valeur individuelle du module d'élasticité (Bordonné, 1989). La densité est souvent considérée comme un estimateur utile des propriétés physiques et mécaniques des bois, voir même comme un des premiers indicateurs en qualité des bois (Saranpää, 2003). La densité du bois est un facteur physique important, pratique et parfois indispensable pour l'étude des propriétés mécaniques du bois (Dedeckel, 1994). Plus la densité est élevée, plus les propriétés mécaniques des bois sont fortes (Polge, 1966 ; Polge et Keller 1973; Courtoisier 1976). Keller (1995) a indiqué également que, la densité constitue un bon indicateur des propriétés du bois pour sa rétractibilité, ses propriétés mécaniques et son comportement à l'usage : plus la densité est élevée, plus les propriétés mécaniques du bois de chêne sont fortes. La densité du bois constitue le paramètre physique le plus important dont dépendent la plupart de ses propriétés mécaniques (Kollmann, 1984). C'est pourquoi, il serait très utile de connaître la variabilité de la densité afin d'obtenir une idée de la variation des autres propriétés du bois. Sa facilité de mesure en fait donc un critère de qualité très utilisé.

La présente étude sur les essais mécaniques effectués au LMGC, nous a permis d'avoir une caractérisation importante de la qualité du bois de pistachier de l'Atlas, où au niveau intra-arbre, de bonnes corrélations entre le module de Young et la densité ont été mises en évidence dans l'aubier et dans le duramen. Cependant, le duramen présente une densité sensiblement plus élevée que l'aubier pour un module d'élasticité équivalent, ceci est cohérent avec les résultats de littérature (Guitard et El Amri, 1987). Aussi, en comparant les deux chênes, rouvre et pédonculé, Keller (1995) a constaté que les propriétés mécaniques sont très liées à la densité du bois ainsi qu'à sa constitution anatomique et sont souvent en corrélation positive avec la densité.

Les résultats de densité obtenus sur le bois du pistachier s'avèrent élevés, ce qui permet d'avoir une information sur la qualité du bois analysé, confirmé par la littérature dont les travaux de Keller (1994). Selon Zobel et al., (1989) la densité du bois a des conséquences énormes sur le rendement et la qualité des fibres, mais aussi sur la qualité technologique du bois produit, elle peut être largement affectée par les pratiques sylvicoles. Nepveu (1993) a mis en évidence l'effet de la fertilisation sur la croissance des arbres laquelle influe la densité du bois.

Nous avons constaté que le bois de *Pistacia atlantica* a présenté un module d'élasticité longitudinale et une densité élevés pour la provenance de Sidi Bel Abbès dont l'altitude est moins élevée que celle de Tiaret, le sol riche en calcaire et à climat semi-aride frais. Nous avons également constaté qu'il y avait une différence significative entre le bois d'aubier et le bois de duramen du point de vue de densité et module de Young, de ce fait, le bois de cette essence peut être considéré comme un très bon matériau grâce à cette hétérogénéité, son module de Young est moyen (supérieur à 10000 MPa) et par conséquent le bois de cette essence présente une rigidité moyenne (NF B 51-008, 1985).

L'analyse de la variance a montré que l'effet provenance, l'effet arbre et l'effet type de bois sont globalement significatifs pour le module de Young. La tendance générale de la variation du module de Young en fonction de la densité est de forme linéaire. Selon Goy (1992) le sylviculteur est en mesure d'intervenir sur la largeur des cernes et sur la densité, et par conséquent il est même de contrôler les caractéristiques technologiques et mécaniques du bois des essences d'intérêt. Guitard et Fournier (1994) ont indiqué que les propriétés tant mécaniques que physiques varient d'un point à un autre à l'intérieur de l'arbre et aussi entre arbre d'une même espèce.

Un module faible pour une densité forte peut correspondre à un bois présentant un fort taux d'extrait qui augmente sa densité mais ne change pas ses caractéristiques mécaniques (Gérard, 1994). C'est le cas pour le thuya de Maghreb qui est qualifié comme un bois lourd, alors que son module de Young reste toujours faible (6086 MPa) (Maatoug et al., 2004).

La densité du bois conditionne fortement le module de Young, comme le montrent les différentes études. Cependant, la dispersion $E_L = f(D)$ laisse supposer que d'autres paramètres interviennent. Parmi ceux qui sont les plus susceptibles d'intervenir, la largeur moyenne de cernes et l'angle du fil du fait de l'anisotropie du bois (Maatoug, 2003 ; Maatoug et al., 2004). Aussi, Goy (1992) a étudié l'influence de largeur de cerne sur le module de Young, pour deux valeurs de l'angle

des microfibrilles, pour un angle élevé (10°), les variations du module de Young interviennent surtout pour les faibles valeurs de largeur de cernes ; au-delà de 6 mm, le module reste sensiblement constant. En revanche, pour les angles faibles, la variation de largeur de cerne continue à se faire sentir, même pour des valeurs fortes. Cependant, les changements les plus importants se situent avant 3 mm. De même, De Reboul (1988) a ajouté que chez l'épicéa, la pente de régression étant plus forte dans le cas du bois adulte que dans le cas du bois juvénile, une augmentation de la largeur de 3 mm entre 2 mm et 5 mm conduit à une baisse de 40 % de la valeur du module dans le cas du bois adulte (12,200 GPa à 8,000 GPa) et de seulement 10 % dans le cas du bois juvénile (11,000 GPa à 9,200 GPa). Aussi, Morlier et Bendahmane (1987) et Samson et Blanchet (1992) ont montré que le module de Young est lié à la taille des nœuds et à leur position, cependant pour certaines essences, il est très peu influencé par la présence de nœuds. Ce résultat n'est pas spécifié par Zhou et Smith (1991) qui, au contraire, ont montré que sur 208 figures, les nœuds sont les paramètres les plus influents sur le module d'élasticité longitudinale et de rupture.

Goy (1992) a étudié l'influence du bois de compression sur le module de Young chez l'épicéa commun. Il a montré que le bois de compression provoque une pente négative de relation "module de Young-densité", mais avec un coefficient de corrélation faible et non significatif. Selon Polge, en 1973, les facteurs écologiques peuvent exercer une influence sur la qualité du bois, cela peut sembler une évidence pour qui sait à quel point les utilisateurs de produits forestiers peuvent avoir des préférences pour telle forêt, tel canton de forêt, ou même telle parcelle, préférences ayant une relation avec des intérêts économiques. Polge (1973) a cité quelques exemples d'action des facteurs écologiques tirés d'expériences de la station : variations de la qualité du bois de *Fagus orientalis* en fonction de l'altitude, influence du vent sur la qualité du bois de pin maritime des landes, expérience d'irrigation sur pins sylvestres. Une littérature abondante a été consacrée aux relations entre facteurs écologiques et qualité du bois dont il existe d'excellentes synthèses (Dadswell, 1960 ; Hildebrandt, 1960 ; Larson, 1962).

La littérature indique que des extractibles pourraient être responsables de (très) faibles amortissements. Dans la plupart des cas, notamment pour des bois de feuillus tropicaux, le cas du cèdre rouge (Yano et al., 1994), des palissandres de Rio et indiens (Yano et al., 1995) et du pernambouc (Matsunaga et al., 1996, 1999 ; Minato et al., 1997), les extractibles avaient un certain effet de diminution de la teneur en eau à l'équilibre sur une plage plus ou moins étendue des humidités relatives. A contrario, dans des cas plus rares ils pouvaient aussi avoir un effet inverse, comme pour la canne de Provence (graminée, employée dans les anches d'instruments à vent, instrument musical) ses extractibles (sucres) étaient responsables d'une augmentation de son coefficient d'amortissement, accompagnée d'une augmentation de sa teneur en eau à l'équilibre (Obataya et al., 1999). En effet, selon (Norimoto et al., 1986 ; Hase 1987 ; Bordonné 1989 ; Brancheriau 2002), le coefficient d'amortissement ou facteur de perte " $\tan\delta$ " en direction axiale est en principe une grandeur

indépendante de la densité et directement reliée aux propriétés des parois, ce qui explique les résultats trouvés chez le pistachier.

IV.5. Évaluation de la durabilité naturelle

IV.5.1. Résultats

Pour rappel, les essais ont été menés avec des répétitions de 3, 4 ou 7 boîtes portant deux éprouvettes chacune selon la disponibilité des grilles. Les résultats sur la perte de masse des différents échantillons de bois testés de l'espèce étudiée sont représentés dans le tableau IV.13.

Tableau IV.13. Valeurs moyennes (\pm écart type) des pertes de masse (PM en %) causées par les quatre champignons sur des éprouvettes des deux types de bois du pistachier obtenues pour chaque modalité et celles d'espèces de référence accompagnées des valeurs de l'humidité (mc en %)

Provenance	Sidi Bel Abbès								Tiaret								France	
Type de bois	A				D				A				D				Bois à aubier non différencié ⁴	
Position	AG		SG		AG		SG		AG		SG		AG		SG		Pin	hêtre
État hydrique	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	S
<i>Coniophora Puteana</i>	-	8,03 $\pm 0,18$	4,52 $\pm 0,13$	9,65 $\pm 0,20$	-	5,93 $\pm 0,18$	4,09 $\pm 0,13$	8,28 $\pm 0,20$	-	8,01 $\pm 0,18$	4,77 $\pm 0,13$	9,64 $\pm 0,20$	-	5,74 $\pm 0,18$	4,01 $\pm 0,13$	8,53 $\pm 0,20$	25,05 $\pm 0,50$	29,06 $\pm 0,44$
mc	-	42	38	42	-	37	36	38	-	40	38	42	-	37	36	39	37	38
<i>Coriolus versicolor</i>	3,21 \pm 0,18	7,73 $\pm 0,18$	4,75 $\pm 0,20$	9,37 $\pm 0,20$	3,22 $\pm 0,18$	5,69 $\pm 0,18$	4,30 $\pm 0,20$	7,46 $\pm 0,20$	3,59 $\pm 0,18$	7,57 $\pm 0,18$	4,43 $\pm 0,20$	9,22 $\pm 0,20$	3,18 \pm 0,19	5,32 $\pm 0,18$	4,41 $\pm 0,20$	7,58 $\pm 0,20$	-	26,78 $\pm 0,59$
mc	36	40	38	42	35	37	36	38	37	40	38	41	35	37	36	38	-	37
<i>Gloeophyllum trabeum</i>	3,25 \pm 0,18	7,43 $\pm 0,18$	4,84 $\pm 0,20$	9,18 $\pm 0,20$	3,33 $\pm 0,18$	5,51 $\pm 0,18$	4,74 $\pm 0,20$	7,73 $\pm 0,20$	3,48 $\pm 0,18$	7,67 $\pm 0,18$	4,70 $\pm 0,20$	9,33 $\pm 0,20$	3,45 \pm 0,18	5,60 $\pm 0,18$	4,58 $\pm 0,20$	7,81 $\pm 0,20$	29,11 $\pm 0,60$	26,95 $\pm 0,54$
mc	36	40	38	42	35	37	36	38	36	40	38	42	35	37	36	39	39	37
<i>Poria placenta</i>	-	8,06 $\pm 0,18$	3,85 $\pm 0,13$	9,75 $\pm 0,20$	-	5,55 $\pm 0,18$	3,52 $\pm 0,13$	7,84 $\pm 0,20$	-	7,91 $\pm 0,18$	3,77 $\pm 0,13$	9,33 $\pm 0,20$	-	5,42 $\pm 0,18$	3,53 $\pm 0,13$	7,57 $\pm 0,20$	25,29 $\pm 0,70$	-
mc	-	40	37	42	-	37	36	38	-	40	37	42	-	36	36	38	38	-

Les valeurs moyennes des taux d'humidité de l'ensemble des échantillons testés et celles des espèces de référence variaient entre 35 et 42 %, ce qui correspond aux conditions favorables de développement des champignons (Beauchêne, 2006). Par ailleurs, les valeurs moyennes de perte de masse obtenues ont varié entre un minimum de 3,18 % et un maximum de 9,75 % pour les échantillons étudiés. Elles sont restées, cependant, très inférieures aux valeurs de référence du pin et du hêtre qui étaient comprises entre 25,05 et 29,06 %, reflétant leur faible durabilité. Ces taux de perte de masse obtenus sont considérés comme corrects sachant que le pin et le hêtre sont des

⁴ Généralement les bois blancs (bois à aubier non différencié) sont peu durables car l'amidon est présent partout dans l'arbre (Détienne et al., 1983).

essences de classe 4, faiblement à peu durables selon la norme NE 113 (1996) (Tableau IV.15) et les résultats de la littérature (Chaouch, 2011). D'autre part, les champignons utilisés ont montré une virulence suffisante pour valider les tests biologiques car, pour que le champignon soit considéré comme suffisamment virulent, les pertes de masse doivent être supérieures à 25 % avec le bois séché de ces espèces de référence ; nos résultats sont donc cohérents avec la norme NE 113 (1996).

Deux faits importants sont à signaler : il s'agit de la faible variabilité et l'homogénéité relevées à l'intérieur de chaque série d'essais et qui sont représentées par la faible valeur des écarts-types. Ces valeurs sont toutes inférieures à 0,70 % et sont comprises, pour la plupart, entre 0,13 et 0,20 %. Les valeurs moyennes de PM sont donc représentatives de l'ensemble des valeurs réelles obtenues. Le tableau IV.14 présente les résultats de la comparaison statistique des moyennes de la perte de masse obtenus sur les différents lots d'éprouvettes séchées et non séchées avec ou sans grille, selon le test de Tukey.

Tableau IV.14. Résultats de la comparaison multiple des moyennes de la perte de masse des différents essais effectuée par le test de Tukey à p = 0,05

				Sidi Bel Abbès								Tiaret							
				A				D				A				D			
				AG		SG		AG		SG		AG		SG		AG		SG	
				S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS	S	NS
Sidi Bel Abbès	A	AG	S			. *													
			NS	. *		* .	**												
		SG	S											--					
			NS			**								--					
	D	AG	S	. -					. *						. -				
			NS		**			. *			**					--			
		SG	S			--											--		
			NS			**			**										--
Tiaret	A	AG	S	. -									. *						
			NS		--						. *			**					
		SG	S			--													
			NS				--						**						
	D	AG	S				. -					. -					. *		
			NS					--				**			* .			**	**
		SG	S						--				--						
			NS							--				**			**	**	**

Chaque case porte les résultats correspondant aux quatre champignons utilisés pour l'évaluation de la durabilité selon l'ordre suivant :

- En haut à gauche : CP, en haut à droite : CV, en bas à gauche : GT, en bas à droite : PP.
- * : différence significative entre les valeurs moyennes de la perte de masse ;
- - : différence non significative ;
- Un point : absence de résultat à cause de l'absence de l'essai (cf méthodologie) ;
- A : aubier, D : duramen, P : pin, H : hêtre, S : éprouvettes séchées, NS : éprouvettes non séchées, AG : boîte avec grille, SG : boîte sans grille.

Tableau IV.15. Classes de durabilité naturelle du bois en fonction des pertes de masse (définies selon la norme NE113 (1996))

Classe de durabilité	Descriptif	Perte de masse PM (%)
1	Très durable	$PM \leq 5$
2	Durable	$5 < PM \leq 10$
3	Moyennement durable	$10 < PM \leq 15$
4	Faiblement durable	$15 < PM \leq 30$
5	Non durable	$PM > 30$

Les tests et les analyses effectués ont mis clairement en évidence l'effet du séchage sur l'amélioration de la durabilité des essences étudiées, donc sur leur résistance aux champignons. Une différence significative est apparue entre les valeurs moyennes des éprouvettes séchées et non séchées selon le test de Tukey à 5 % pour le duramen et pour l'aubier avec ou sans grille de la même provenance. Les différences entre les valeurs moyennes des résultats obtenus avec ou sans grilles sont significatives pour toutes les éprouvettes de même type de bois dans le même état hydrique, pour la même provenance. L'absence des grilles qui traduit le contact direct des souches fongiques avec le bois provoque une perte de masse visiblement importante mais sans aucun effet sur l'appréciation de la durabilité car les valeurs obtenues pour les deux positions se retrouvent dans la même classe de durabilité.

IV.5.2. Discussion

La durabilité naturelle d'une essence est une propriété spécifique et constitue un élément important de sa fiche d'identité, au même titre que les propriétés physiques et mécaniques. Elle correspond à l'aptitude du bois à se conserver dans un emploi défini pendant une durée donnée, en l'absence de tout traitement protecteur (Fouquet, 2009). Elle est d'autant plus grande que l'atmosphère est sèche (Dumon, 1980).

Il apparaît que l'aubier et le duramen du bois du pistachier de l'Atlas montrent un comportement similaire seulement pour les échantillons séchés, présentant ainsi une particularité face aux attaques fongiques conformément aux critères de la norme de la durabilité naturelle (Tableau IV.15), ce qui se rapproche des résultats trouvés par Pollet et *al.* (2013a) chez le douglas où aucune différence n'a été observée entre la durabilité du bois juvénile et celle du bois mature vis-à-vis de *P. placenta* (P.P.). Alors que la comparaison des valeurs moyennes obtenues entre les deux types de bois, duramen et aubier, a montré une différence significative quant à l'attaque des différents

champignons sur les échantillons non séchés avec et sans grille et une différence non significative sur ceux séchés avec et sans grille (Tableau IV.14), ce qui indique que le séchage influe sur l'appréciation de la durabilité.

Chez la plupart des espèces ligneuses étudiées, le duramen se montre plus résistant que l'aubier. Dans le bois à aubier différencié, l'aubier est attaqué car il contient une forte quantité d'amidon, substance appétante pour certains insectes tels que les coléoptères alors que le duramen montre une durabilité supérieure. Ainsi, généralement, les bois blancs (bois à aubier non différencié) sont peu durables car l'amidon est présent partout dans l'arbre (Détienne et Jacquet, 1983).

La dégradation biologique du bois est un procédé très complexe qui dépend de nombreux facteurs dont la nature chimique de ses extraits. Ces substances peuvent être des polymères (tanins) ou des molécules de faibles poids moléculaire telles que les flavonoïdes, les stilbènes, les lignanes, les terpénoïdes, les tropolones (Haluk, 1994). Selon (Détienne et *al.*, 1983) la durabilité naturelle est au premier chef liée la densité élevée de l'essence, à la composition chimique du bois (teneur en hémicellulose, présence de résines, d'oléorésines, de tanins présence d'extraits, de cristaux, de silice, etc.), à la structure anatomique et la capacité d'absorber l'eau. Selon le même auteur, les espèces très durables contiennent fréquemment des substances présentant un caractère fongicide et/ou insecticide.

En 2000, les travaux de Dirol et Deglise ont montré que la durabilité naturelle du duramen décroît au fur et à mesure que l'on s'approche de l'aubier car il contient des antiseptiques naturels (tanins, résines), il est peu poreux et il offre une capacité d'absorption moins élevée que celle de l'aubier, ce qui lui confère une meilleure durabilité. D'autres travaux ont montré que la durabilité naturelle de certaines espèces est attribuée, en partie, à l'activité des extraits qu'elles renferment (Schultz et *al.*, 1995) et que la différence de durabilité observée entre aubier et duramen peut être due aux fortes variations de la teneur en extraits, absents ou moindre dans l'aubier et en augmentation vers le duramen (Schultz et Nicholas, 2000). De même, la concentration en extraits est maximale chez les arbres âgés, ce qui laisserait supposer que les arbres jeunes de même essence sont moins résistants (Clark et *al.*, 1983, Nault, 1988, Zabel et *al.*, 1992).

Les travaux de Da Costa et *al.* (1962) et Rudman (1964) ayant porté sur la durabilité de diverses espèces d'eucalyptus ont montré que les polyphénols ont une action fongicide assez faible et que, vraisemblablement, la conjonction de plusieurs substances entre lesquelles se produisent des synergies donne en général aux bois résistants leur durabilité. Ainsi, plus récemment, Pollet et *al.* (2013b) ont noté que, chez le robinier, ce sont les polyphénols et les flavonoïdes qui conféraient au bois sa durabilité naturelle vis-à-vis des champignons basidiomycètes. Les tannins contenus dans le bois ont eux aussi un effet sur la durabilité naturelle, le duramen chargé de tannins résiste ainsi aux organismes destructeurs. Tel est le cas du chêne, *Quercus* sp., du châtaigner, *Castanea* sp. et du robinier, *Robinia* sp. (Charrier et *al.*, 1995). L'extraction et l'étude de la structure moléculaire de ces composées ont fait l'objet de plusieurs études.

De leur côté, Déon et *al.* (1980) ont étudié les activités antifongiques des extraits contenus dans le bois de six espèces tropicales. La présence de certaines substances spécifiques dans les extraits du bois très durables de certaines essences peut entraîner une plus ou moins grande toxicité vis-à-vis des champignons lignivores. C'est ainsi le cas de la thujaplicine, substance extraite du bois de *Thuja plicata* (Fougerousse, 1960 ; Haluk et Roussel, 2000 ; Haluk et *al.*, 2001), de l'oxyresveratrol et le dihydromorin, qui sont des composés de type stilbène extraits du bois de duramen de l'oranger, *Maclura pomifera* (Schultz et *al.*, 1995). Bamber (1976) et Climent et *al.* (1998) ont cherché à mettre en évidence la nature des cellules intervenant dans la formation de ces substances. Les cellules de parenchyme apparaissent être le lieu de synthèse des substances extractibles du duramen (Bamber et Fuzakawa, 1985). Ces cellules jouent un rôle important puisqu'elles constituent les seuls éléments vivants du bois avant la duraminisation. Les observations faites chez *Pinus canariensis* montrent que les cellules de parenchymes de l'aubier contiennent d'abondants grains d'amidon. Cet amidon est transformé en résine et en tannins phénoliques lors de la duraminisation. Ces substances, une fois formées, diffusent dans les cellules de fibres et s'y déposent.

Chez le pistachier, les résultats obtenus peuvent s'expliquer par la présence de réseaux de canaux résinifères, très riches en résines, de type oléorésine réputée être antifongique et conservatrice du bois, limitant ainsi la prolifération des champignons (Benhassaini, 2000 ; Benhassaini et *al.*, 2003 et Momies et Jarres *in* Benhassaini et *al.*, 2007⁵). Ces canaux traverseraient de manière uniforme et intense le bois du pistachier. Aussi, l'analyse statistique de nos résultats ne fait pas ressortir de différences significatives entre les valeurs moyennes obtenues sur les deux provenances, suggérant que le milieu de croissance des arbres n'a pas d'effet sur leur durabilité naturelle ; ces résultats sont en adéquation avec ce qui a été affirmé par Dirol et Deglise (2000) selon lesquels tous les travaux ont montré que le site de croissance d'un arbre n'a aucune incidence sur la durabilité de son bois et que ce facteur n'a pas d'influence réelle pour une même essence provenant de régions éloignées. Par contre, Kokutse (2002) a indiqué que, pour certains bois tropicaux, le site de croissance ait une influence notable sur la durabilité ; ainsi le teck qui pousse en Asie est très durable, alors que sa résistance est moindre lorsqu'il provient d'autres pays du globe.

Par ailleurs, Dirol et *al.*, (2000) ont indiqué que, la structure de certains éléments du plan ligneux rend le bois inattaquable par certains organismes. Selon les mêmes auteurs, les ponctuations aréolées des résineux comportent une partie centrale, appelée torus, entourée de microfibrilles rayonnantes jouant le rôle de filtres. Ce torus peut, lors du séchage, basculer contre l'ouverture de la ponctuation, et ainsi l'obturer ; le passage des filaments mycéliens est ainsi rendu impossible. Il en est

⁵ Pour une information plus détaillée, on pourra se reporter notamment aux travaux de Benhassaini (2003) sur la résine.

de même chez les feuillus quand les vaisseaux sont obturés par les thylles, qui sont des expansions de parenchyme issues des cellules voisines

Toutefois, Pollet *et al.* en (2008) indiquent que la durabilité naturelle peut varier en fonction du champignon utilisé, de l'origine génétique de l'arbre et de la station, des différences entre arbres et au sein de ceux-ci peuvent exister.

Les résultats des tests de durabilité naturelle obtenus dans la présente étude révèlent que le bois du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., provenant de l'Algérie occidentale, est très durable (classe1). Dans les conditions d'essai, aucune différence n'a été observée entre la durabilité du duramen et celle de l'aubier vis-à-vis des quatre champignons basidiomycètes utilisés : *Coriolus versicolor*, *Gloeophyllum trabeum*, *Coniophora puteana* et *Poria placenta*. Cette propriété ne semble pas être influencée directement par le milieu de croissance. Les tests et les analyses effectués dans cette étude mettent en évidence l'apport du séchage dans l'appréciation de la durabilité de l'essence étudiée.

IV.6. Évaluation de la variabilité de la couleur

IV.6.1. Résultats

Nous rappelons que la couleur des échantillons est exprimée par les paramètres colorimétriques L^* , a^* et b^* correspondant respectivement à la clarté, à l'axe vert-rouge, et à l'axe bleu-jaune. Les résultats de variations avec la densité de la clarté L^* , des composantes a^* et b^* et de l'écart-type de la clarté pour les trois types du bois (aubier, duramen et le type mixte) pour l'ensemble des échantillons d'arbres des deux provenances considérées sont illustrés dans les figures IV.11 et IV.12 et représentés dans le tableau IV.16. Ces résultats montrent clairement une différence significative des paramètres de couleur entre l'aubier et le duramen pour les deux provenances.

IV.6.1.1. Variations de la clarté L^* , des composantes chromatiques a^* et b^* et de l'écart-type de la clarté avec la densité pour l'aubier, le duramen et le type mixte

Le paramètre clarté L^* s'est montré significativement plus élevé dans l'aubier (entre 73,88, valeur minimale et 82,03, valeur maximale) que dans le duramen (entre 51,05 et 62,58) ; par contre, la valeur de la composante chromatique a^* était significativement plus élevée dans le duramen (entre 10,53 et 11,74) que dans de l'aubier (entre 6,11 et 7,44). Alors que pour la composante b^* , la différence entre les trois types du bois du pistachier de l'Atlas est globalement non significative ($p = 0,0192$ pour la première provenance et $p = 0,08106$ pour la seconde) (Tableau IV.16).

Tableau IV.16. Valeurs moyennes des mesures de L*, a* et b* effectuées sur les 72 éprouvettes issues des trois arbres de pistachier de l'Atlas des deux provenances et résultats de l'analyse des variances au seuil de 5 %

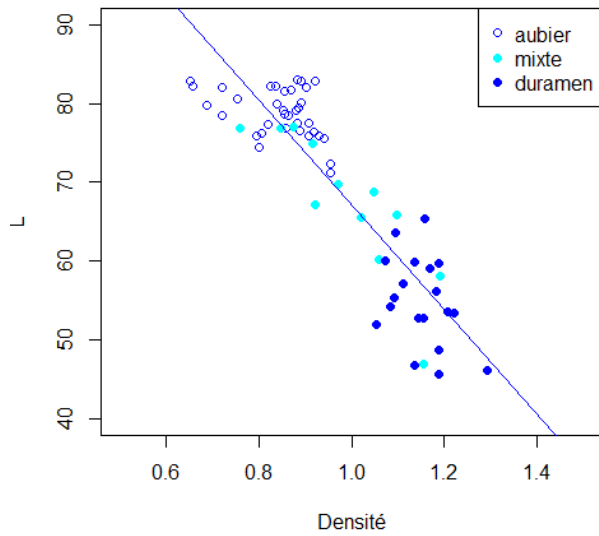
paramètres mesurés	Types du bois	Provenances								Effet provenance (P=)	
		Sidi Bel Abbès				Résultats ANOVA entre arbre (P=)	Tiaret				Effet arbre (P=)
		Arbres			T ₁		T ₂	T ₃			
		S ₁	S ₂	S ₃							
L*	Aubier	73,88 ±1,03	79,04 ±1,03	77,44 ±0,84	0,012 *	80,81 ±0,68	82,03 ±0,59	77,32 ±0,63	0,00012 ***	< 10 ⁻⁶ ***	
	Mixte	58,13 ±2,96	46,98 ±2,96	67,59 ±2,09	1,017 NS	72,23 ±3,53	71,00 ±4,08	65,86 ±7,07	0,737 NS	0,1102 NS	
	Duramen	62,58 ±2,94	51,05 ±1,57	52,32 ±2,08	0,018 *	56,43 ±2,75		59,52 ±1,95	0,411 NS	0,0098 *	
	Effet type (p=)	< 10 ⁻⁶ ***				< 10 ⁻⁶ ***				-	
a*	Aubier	6,11 ±0,39	6,35 ±0,39	7,16 ±0,32	0,126 NS	7,44 ±0,18	7,35 ±0,15	7,05 ±0,16	0,277 NS	0,0068 *	
	Mixte	7,87 ±0,82	10,23 ±0,82	7,05 ±0,58	0,301 NS	8,43 ±0,59	9,51 ±0,68	9,63 ±1,19	0,473 NS	0,2484 NS	
	Duramen	10,53 ±0,74	11,74 ±0,39	11,67 ±0,52	0,375 NS	11,53 ±0,37		11,09 ±0,26	0,398 NS	0,509 NS	
	Effet type (p=)	< 10 ⁻⁶ ***				< 10 ⁻⁶ ***				-	
b*	Aubier	20,95 ±1,34	22,05 ±1,34	23,34 ±1,09	0,408 NS	20,97 ±0,31	23,71 ±0,26	20,79 ±0,28	< 10 ⁻⁶ ***	0,0124 *	
	Mixte	18,74 ±0,17	18,99 ±0,17	18,44 ±0,12	0,357 NS	21,21 ±0,82	22,70 ±0,95	21,79 ±1,64	0,539 NS	0,1242 NS	
	Duramen	23,54 ±1,39	22,69 ±0,74	21,07 ±0,98	0,314 NS	24,49 ±0,88		23,06 ±0,62	0,255 NS	0,264 NS	
	Effet type (p=)	0,0192 *				0,08106 NS				-	

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

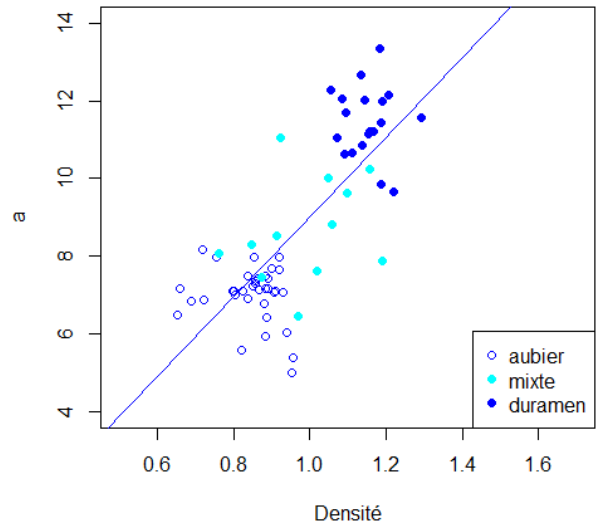
- *** : différence ou effet très hautement significatif au seuil de 5 % ;
- ** : différence ou effet hautement significatif au seuil de 5 % ;
- * : différence ou effet significatif au seuil de 5 % ;
- NS : différence ou effet non significatif au seuil de 5 %.

Par ailleurs, les figures IV.11 (A) et IV.11 (B) montrent une forte corrélation entre la clarté et la densité d'une part ($r^2 = 0,7997$) et entre la composante chromatique a* et la densité d'autre part ($r^2 = 0,5812$). Par contre, d'après la figure IV.11 (C) il n'y a pas de corrélation entre la composante chromatique b* et la densité ($r^2 = 0,000$). Ainsi, plus la densité est forte, plus la clarté est faible ($L = 133,4375 - 66,2985 \cdot x$) et inversement la composante a* plus élevée ($a = -1,2174 + 10,2274 \cdot x$), par ailleurs, le duramen est corrélé avec une densité plus forte et l'aubier avec une densité plus faible.

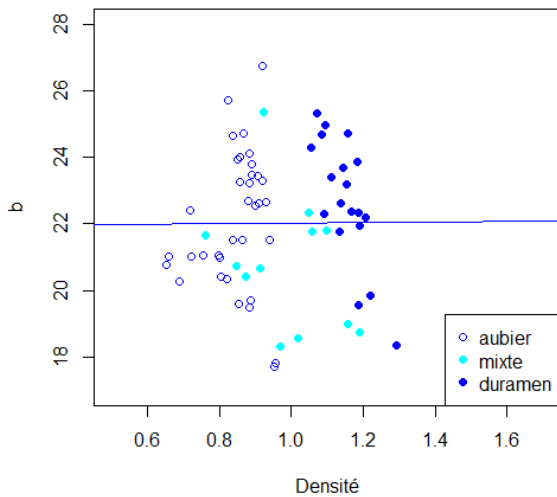
Les types mixtes des barrettes, qui comprennent un mélange d'aubier et de duramen, présentent des valeurs de clarté moyenne intermédiaires comme le montrent le tableau IV.16 et la figure IV.11 (D) et une hétérogénéité plus forte dans l'échantillon, reflété par l'écart-type de clarté avec la densité, ce qui semble logique vu la grande différence de couleur entre l'aubier et le duramen.



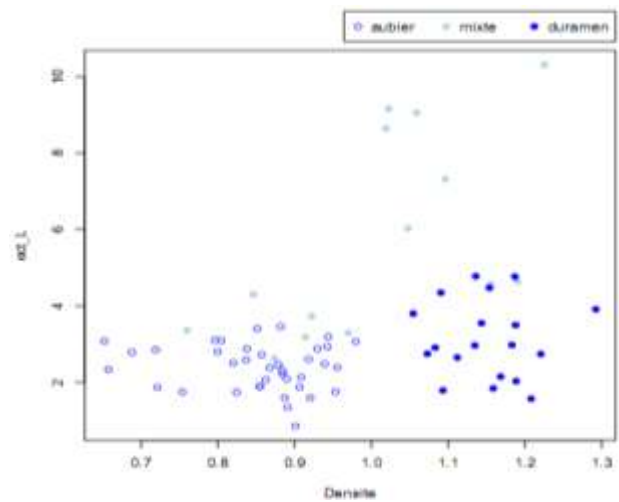
Densité : L : $r^2 = 0,7997$; $r = -0,8942$; $p = 0,0000$;
 $y = 133,437496 - 66,2985227 * x$
 (A)



Densité : a : $r^2 = 0,5812$; $r = 0,7624$; $p = 0,0000$;
 $y = -1,21744037 + 10,2274393 * x$
 (B)



Densité : b : $r^2 = 0,0000$; $r = 0,0070$; $p = 0,9554$;
 $y = 21,9408895 + 0,0923681634 * x$
 (C)



(D)

Figure IV.11 Variations de la clarté L* (A), des composantes a* (B) et b* (C) et de l'écart-type de la clarté (D) avec la densité pour l'aubier, le duramen et le type mixte

IV.6.1.2. Variations de la clarté L*, des composantes a* et b* et de l'écart-type de la clarté avec la densité pour chaque arbre de chaque provenance

La figure IV.12 illustre les résultats de variations de la clarté L* (IV.12 (A)), des composantes a* (IV.12 (B)) et b* (IV.12 (C)) et de l'écart-type de la clarté (IV.12 (D)) avec la densité pour chaque arbre (numérotés 1 à 3) de chaque provenance (S et T). Les figures IV.11 et IV.12 sont superposables et peuvent nous renseigner sur la distribution des arbres par rapport aux différents paramètres mesurés en relation avec la densité pour les trois types de bois étudié. Les résultats statistiques confirment le type de corrélations existantes entre les caractéristiques des arbres de la même provenance. Ainsi, pour la clarté, l'aubier et le duramen ont montré une différence significative au seuil de 5 % entre les arbres

de Sidi Bel Abbès ($p = 0,012$ et $p = 0,018$ respectivement) et non significative pour le type mixte. La différence était hautement significative entre les arbres de Tiaret pour l'aubier ($p = 0,00012$) et non significative pour le type mixte et le duramen. Concernant les deux composantes chromatiques a^* et b^* , les différences entre les arbres n'étaient pas significatives pour la même provenance pour tous les types sauf le paramètre b^* de l'aubier des arbres de la seconde provenance pour lequel la différence s'est montrée exceptionnellement très hautement significative ($p < 10^{-6}$).

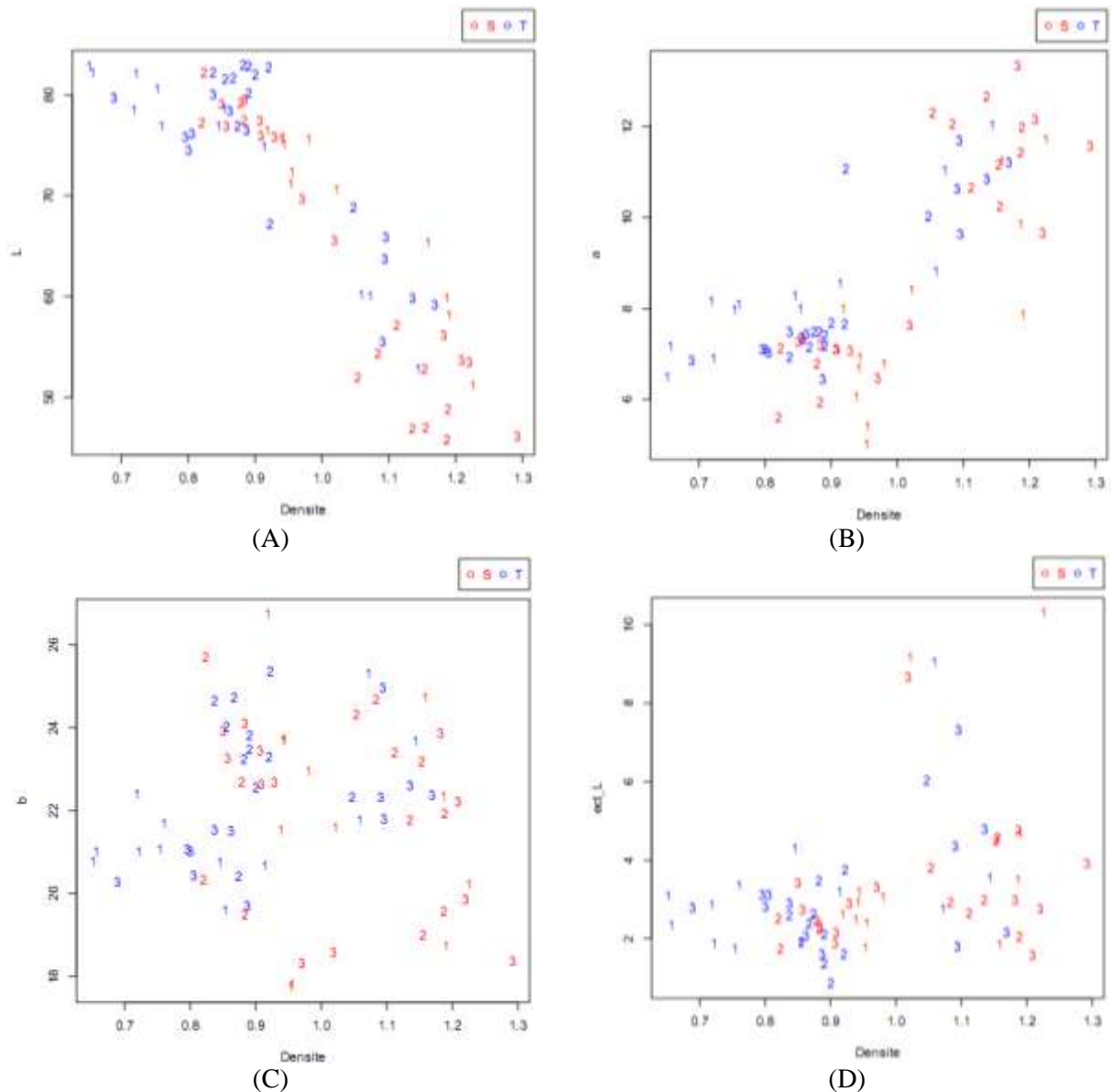


Figure IV.12. Variations de la clarté L^* (A), des composantes a^* (B) et b^* (C) et de l'écart-type de la clarté (D) avec la densité pour chaque arbre (numéro 1 à 3) de chaque provenance (S : Sidi Bel Abbès et T : Tiaret)

IV.6.1.3. Effet de la provenance sur la clarté L^* et sur les composantes chromatiques a^* et b^* pour l'aubier, le duramen et le type mixte

Le tableau IV.16 montre que pour l'aubier, l'effet provenance sur la clarté est très hautement significatif ($p < 10^{-6}$), pour le duramen, significatif ($p = 0,0098$) et non significatif pour le mixte ($p =$

0,1102). L'effet sur les composantes chromatiques a^* et b^* est significatif pour l'aubier ($p = 0,0068$ et $p = 0,0124$ respectivement), et non significatif pour les deux autres, mixte et duramen.

IV.6.2. Discussion

La couleur est un caractère important pour l'emploi du bois en menuiserie et surtout en ébénisterie. Le bois de chaque essence a une couleur qui lui est propre. Elle se modifie lentement à l'air et à la lumière. Elle peut également varier suivant les arbres et les provenances (Dumon, 1980). Le but de la colorimétrie est la traduction du jugement visuel de l'observateur qui est subjectif par des valeurs numériques objectives. Parmi les buts recherchés à travers cette étude c'est de contribuer à la valorisation qualitative et esthétique du bois de cette espèce du point de vue de la couleur qu'est mal connue au niveau du pistachier de l'Atlas. La présente contribution est donc la première du genre à aborder cet aspect.

Le bois de chaque essence a une couleur qui lui est propre, souvent plus sombre dans le bois de cœur, elle se modifie lentement à l'air et à la lumière et peut varier suivant les arbres et les provenances. Le bois de chêne, par exemple, est d'une teinte variant du brun clair au gris brun ou au brun rougeâtre (Dumon, 1980). La colorimétrie est la mesure objective et quantitative de la couleur d'un objet en vue de son repérage dans un système de représentation conventionnel des couleurs (Zanetti, 2000). Elle qualifie scientifiquement et rigoureusement la perception de la couleur et permet de traduire la couleur en valeurs numériques (Chrisment, 1997). L'étude de la variabilité de la couleur est récente. Cet aspect esthétique est très important pour évaluer la qualité d'un produit surtout dans l'ameublement, la parqueterie ou le tranchage.

L'étude colorimétrique effectuée sur le bois du pistachier de l'Atlas a montré une variabilité importante entre les deux types principaux de bois, aubier et duramen pour les trois paramètres considérés et une variabilité entre les arbres de la même provenance seulement pour le paramètre clarté. L'effet provenance était évident à la lumière des résultats sur les trois paramètres sauf pour la composante b^* au niveau du duramen. Le type mixte n'a pas présenté de différences pour tous les paramètres entre les arbres et entre les deux provenances. Un certain nombre de caractéristiques liées aux conditions de croissance et aux facteurs du milieu ainsi qu'aux propriétés intrinsèques de chaque individu peuvent être à l'origine de cette variabilité colorimétrique trouvée chez cette espèce. Les nombreuses caractéristiques influençant ces paramètres ont été relatées et expliquées chez plusieurs espèces. Ainsi, selon Hofmann (1987) la variabilité de la couleur du bois a de multiples origines liée au bois lui-même, par sa structure, sa composition chimique en relation avec les conditions de croissance de l'arbre et aux agents extérieurs : dans le premier cas, le sens du fil du bois, l'anatomie (effets particuliers des vaisseaux, fibres, rayons ligneux), l'âge (position de la mesure par rapport à la moelle), le bois de réaction (plus sombre chez les résineux et plus clair chez la plupart des feuillus), la largeur des cernes, le sens du débit par rapport au fil du bois et aux plans ligneux principaux (LR, LT, RT). Dans le second cas, les mêmes auteurs citent les finitions extérieures, les micro-organismes, le

séchage artificiel ; les traitements thermiques (torréfactions du bois à 200 et 300°C), la photodégradation (action de la lumière visible, rayonnement UV), les traitements sylvicoles ; les provenances, les espèces, les individus et le type de sol. Par ailleurs, Scalbert *et al.*, (1988) et Janin (1988) notent chez les chênes que la composition chimique (constituants de la paroi et les composés phénoliques) joue un rôle très important dans la variabilité de la couleur. Plusieurs études ont montré l'existence d'un effet des extractibles sur la couleur. Mazet *et al.* (1993) ont montré que les comportements photochimiques sont différents entre le duramen et l'aubier du bois du chêne rouvre et du chêne pédonculé (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) et que cette différence est due à l'abondance des extractibles dans le duramen. Charrier (1992) indique que la clarté du bois du chêne augmente après extraction avec un mélange acétone/eau.

Aussi, Dakak (2002) a étudié la couleur du bois de thuya (*Tetraclinis articulata*) entre la zone aubier et la zone duramen par l'appareil spectrophotomètre, il a constaté que seule la clarté L^* et la couleur rouge peuvent intervenir dans la différenciation de la couleur entre les deux zones, donc l'aubier avec son bois plus clair présente des paramètres de couleur différents à ceux du duramen. Le même auteur a confirmé que le bois de thuya devient plus clair et perd sa couleur rougeâtre quant son accroissement annuel est important et par une analyse de variance, il a trouvé également un effet stationnel hautement significatif sur les paramètres de couleur du bois de *Tetraclinis* ce qui rejoint les résultats trouvés dans notre cas. Les spécimens de pistachier de l'Atlas choisis pour la réalisation de cette étude prospèrent dans deux milieux différents du point de vue caractéristiques locales à savoir le sol, le climat, l'altitude et l'action anthropique. Ces caractéristiques semblent agir sur la clarté principalement de l'aubier qui est plus élevée pour les arbres de Tiaret et plus faible pour le duramen. L'aubier étant la partie de bois la plus jeune donc plus sensible à l'action des facteurs externes a présenté des caractéristiques chromatiques dans les axes du vert-rouge et du bleu-jaune légèrement plus élevées pour cette même station (Tiaret).

L'anatomie est un facteur important pour la variation de la couleur du bois. Hofmann (1987) en travaillant sur la surface transversale du bois de chêne a montré que dans un cerne, la clarté est liée négativement au pourcentage des fibres du cerne et positivement au pourcentage des vaisseaux dans le bois initial. En 1988 Janin *et al.* a également indiqué l'influence de l'anatomie et de la structure des bois sur l'aspect et la couleur naturelle des produits forestiers.

La variation de la couleur en fonction du plan ligneux a été étudiée par plusieurs auteurs (Sullivan, 1967 ; Beckwith, 1979 ; Hofmann, 1987 ; Janin, 1988, 1990, 1991 et Gonzalez, 1993) qui ont constaté que la face transversale du bois du chêne est généralement plus foncée que les autres faces (tangentielle et radiale). Sur une face transversale du bois de chêne, Hofmann (1987) a montré que la clarté L^* est liée négativement au pourcentage des fibres par cerne, et positivement au pourcentage des vaisseaux dans le cerne et dans le bois initial. Hofmann (1987) a montré également que le sens du débit par rapport aux trois directions principales du plan ligneux pour le chêne peut influencer les valeurs de clarté L^* et qu'elles peuvent varier de 5 % entre les plans RT et RL.

Une étude sur les chênes d'Amance (Lorraine), a montré une tendance à la diminution de la clarté L^* quand l'âge augmente (Flot, 1988), et une forte corrélation entre la coordonnée a^* avec l'âge (Janin et Eyono Owoundi, 1991). Klumpers et Janin (1992) ont constaté chez le chêne rouvre et le chêne pédonculé que plus les arbres sont vieux, plus leur couleur est sombre.

Aussi, Pechmann et Aufsess en 1973, ont montré que, les variations de la largeur de cerne chez le chêne influencent sa structure anatomique qui s'accompagne de changements de couleur. Selon ces auteurs, la largeur importante du bois initial qui contient les gros vaisseaux, réduit la qualité des feuilles de placage parce qu'elle est souvent accompagnée par de changements de couleur qui influence l'homogénéité de celle-ci. Hofmann (1987) a montré que la clarté L^* d'une coupe transversale de bois de chêne est corrélée négativement avec la largeur de cerne. Janin et Eyono Owoundi (1991) ont aussi noté chez le chêne des corrélations négatives, mais faibles, entre la largeur de cerne et la clarté L^* . Flot (1988) a observé une corrélation positive et significative entre la largeur de cerne et l'angle de teinte (tendance de l'objet à être plus jaune) pour la face radiale du bois du chêne, et une absence de corrélation entre la largeur de cerne et la clarté L^* .

Sullivan (1967) et Moslemi (1967) ont montré que la clarté L^* est un bon paramètre pour la distinction inter- et intra-espèce dans le cas du noyer noir. Les différences entre les arbres dans le genre *Quercus* sp. sont, elles aussi, bien exprimées par le paramètre L^* (Janin, 1985, 1986, a, b et c).

Aussi, Zanetti (2000) a affirmé que, la couleur d'un échantillon de bois n'est pas immuable et elle est susceptible de varier sous l'action de facteurs liés à l'environnement comme l'humidité, la température, la lumière solaire et la pollution. Hon et al. (1978) ont démontré que le rayonnement UV pénètre dans le bois jusqu'à 75 μm alors que la lumière solaire visible pénètre au moins jusqu'à 200 μm . D'autres facteurs extérieurs comme la géographie (Sullivan, 1967), le pH (Nelson et al., 1969), l'hydromorphie (Flot, 1988; Klumpers, 1990; Klumpers, 1994; Klumpers et al., 1994) et la station (Flot, 1988; Rink, 1987) ont un effet sur la variabilité de la couleur du bois. Vidron en (1927) in Courbet et al. (1983) met en évidence que de fortes teneurs en sels ferriques dans le sol (sel sur grès vosgien dans la forêt de Hanau) accentuent la coloration rouge du cœur. Bakour en 2003 a indiqué que, l'effet de la génétique est important pour les caractères liés à la couleur et aux teneurs en extractibles (Bakour, 2003).

Klumpers (1994) a confirmé que, la comparaison du bois d'arbres venant de différentes provenances, montre des différences significatives pour au moins un des paramètres de couleur; ceci a été observé par tous les auteurs qui ont comparé le bois d'arbres de différentes origines. Ainsi, sur le chêne de tranchage, Flot (1988) a montré l'importance des paramètres L^* et h^* . Il a trouvé des différences significatives entre la région Centre et Est pour ces deux paramètres en France. A l'intérieur même du Plateau lorrain, des écarts significatifs sont obtenus uniquement pour L^* . Cependant des écarts significatifs, entre les arbres, sont obtenus pour la clarté L^* à l'intérieur du Plateau Lorrain. Le paramètre L^* s'avère intéressant pour la distinction des forêts au sein d'une

région. Par une analyse de variance, Dakak (2002) a trouvé également un effet stationnel hautement significatif sur les paramètres de couleur du bois de *Tetraclinis articulata*.

Toutes les mesures des paramètres a^* et b^* réalisées jusqu'à présent sur le bois n'ont donné que des valeurs positives, c'est-à-dire situées dans la partie rouge-jaune du plan de chromaticité (Nishino et al., 1998). Le paramètre L^* permet une bonne distinction non seulement entre espèces mais aussi à l'intérieur d'une même espèce. C'est le cas pour le noyer noir (Sullivan, 1966 ; Moslemi, 1967). Janin (1985, 1986 (a), (b) et (c)) a montré que la luminosité L^* exprime bien les différences entre les arbres au sein du genre *Quercus sp.*.

Janin (1986, (a) et (b)) a considéré la couleur d'un point de vue technologique comme un bon critère pour le classement du bois d'ébénisterie et de placage. Elle influence les prix de vente au mètre cube qui peuvent varier de 1 à 5 selon les espèces et les arbres. Par exemple, le chêne clair est très apprécié pour le tranchage. Mazet et Janin (1990) ont tenté de mettre en évidence le rôle de la couleur dans l'appréciation du bois de chêne (*Quercus spp*) par des professionnels européens. Boardman et al. (1992) ont essayé d'utiliser la couleur comme outil pour discriminer les classes de qualité sur des placages de noyer noir (*Juglans nigra*). Dumonceaud (2001) a aussi tenté d'utiliser la couleur comme indicateur de la durabilité naturelle chez le châtaignier (*Castanea sativa*), et a trouvé que la prédiction de la résistance naturelle de ce bois pouvait se faire à partir de la mesure des paramètres couleur. D'un point de vue économique, Janin (1987) a indiqué que la haute valeur de tranchage du bois de chêne dépend en grande partie de sa couleur : plus elle est claire et plus elle est appréciée. La clarté (L^*) est le critère le plus discriminant pour le chêne européen. Ce paramètre a surtout été étudié pour les feuillus précieux comme le chêne, le noyer, l'alisier ou les bois tropicaux, c'est surtout le duramen ou le bois de cœur qui est largement étudié. Peu de travaux ont évalué l'importance de la couleur en grandeurs mesurables. La majorité des études sur la couleur du bois concerne le noyer noir (*Juglans nigra* L.) car cette espèce est largement utilisée aux USA du fait des qualités esthétiques de ses placages (Dakak, 2002). Beckwith (1979) a constitué à partir de nombreux échantillons provenant de 22 espèces différentes un atlas des couleurs des bois les plus connus et utilisés. Cet auteur a observé que la variabilité de la longueur d'onde dominante est très faible alors que la luminosité L^* varie fortement.

IV.7. Anatomie du bois de pistachier de l'Atlas

IV.7.1. Résultats

Les Figures en dessous représentent les images des coupes anatomiques effectuées sur les trois plans orthotropiques (L, R, T) des deux arbres de pistachier de l'Atlas, il s'agit de l'arbre S_1 et de l'arbre T_1 .

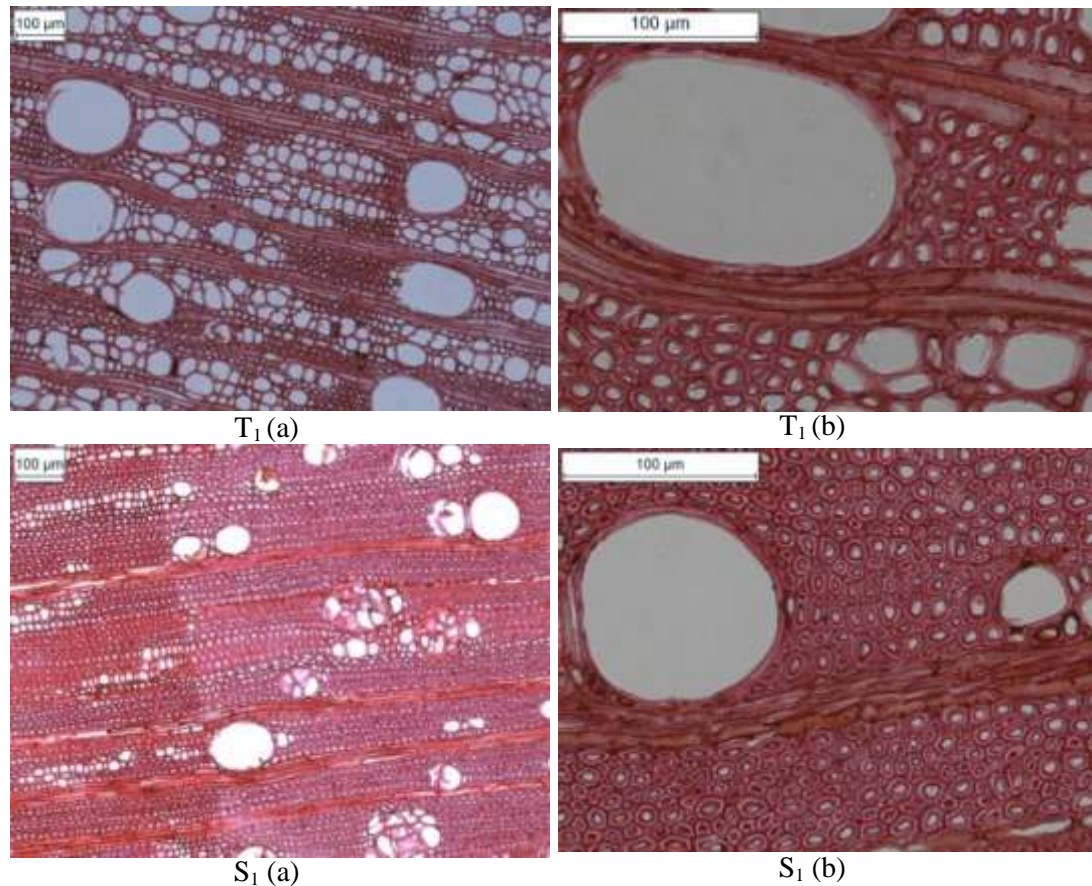


Figure IV.13. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de *Pistacia atlantica* Desf. de l'arbre S₁ et T₁ dans le plan transversal "RT" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75

La figure IV.13 représente des coupes anatomiques (colorée à la safranine) du bois de pistachier de l'Atlas dans le plan transversal "RT" à deux grossissements différents. L'observation d'un cerne annuel de croissance en coupe transversale (limite de deux cernes dans une année (n) ; à droite le bois d'été à gauche le bois de printemps) réalisée avec un grossissement faible (coupes T₁ (a) et S₁ (a)) montre qu'il est constitué de deux zones bien distinctes :

- une zone initiale semi-poreuse, le bois de printemps, (constitue l'essentiel du cerne). Formée essentiellement des vaisseaux de très fort diamètre (gros vaisseaux) assumant le rôle de conduction chez les feuillus et qui sont formés avant la mise en place des feuilles (Huber, 1935 ; Wareing, 1951 ; Breda et Granier, 1996).
- une zone finale, le bois d'été, (faible proportion) elle est généralement constituée de tissus fibreux plus denses que la zone initiale (plages de fibres trachéides), de parenchymes et de petits vaisseaux. On observe aussi des rayons ligneux disposés radialement : les uns de petite dimension (rayons ligneux unisériés) ; les autres de grande dimension (rayons ligneux plurisériés) qui sont identifiables sur la coupe.

Aussi dans la figure S₁ (a) à faible grossissement nous observons la présence de thylls obstruant les gros vaisseaux. Sur les coupes T₁ (b) et S₁ (b) réalisées avec un grossissement fort, ces éléments anatomiques sont nettement visibles.

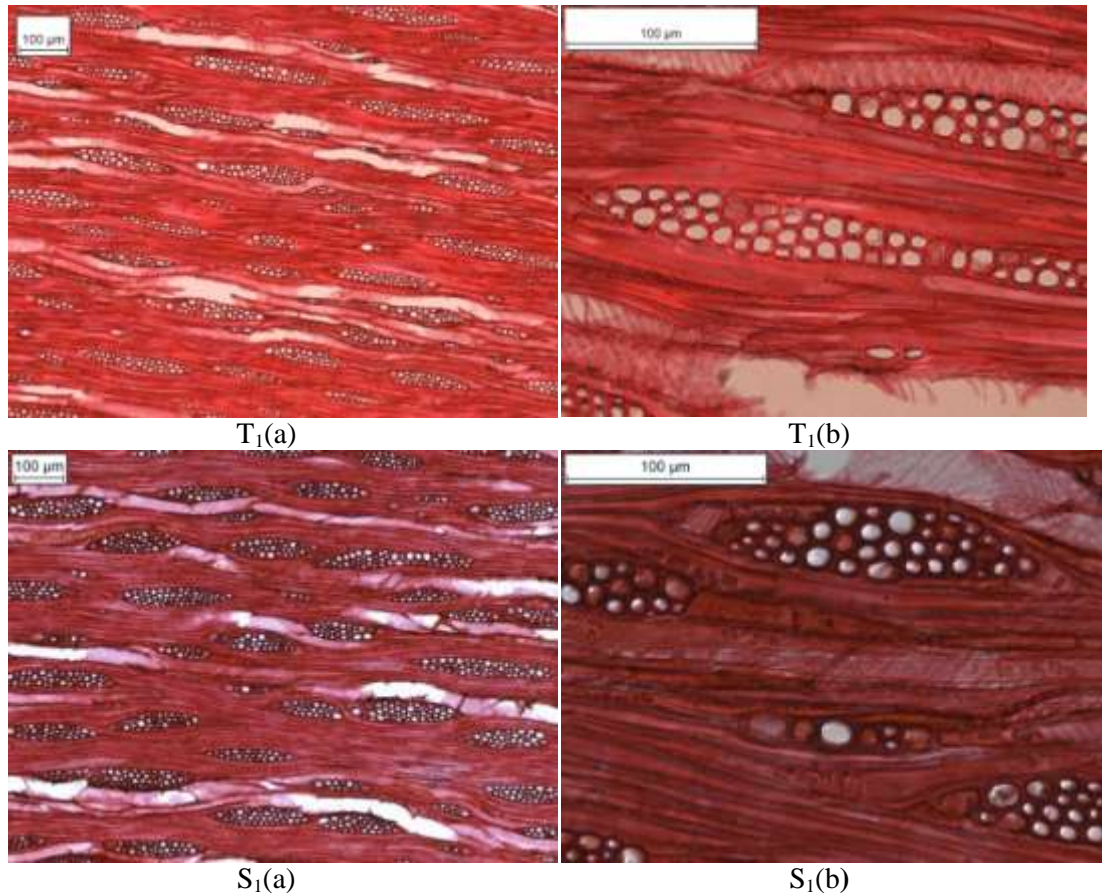


Figure IV.14. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de *Pistacia atlantica* Desf. de l'arbre S₁ et T₁ dans le plan tangentiel "LT" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75

La figure IV.14 T₁(a) et S₁(a) montre les cellules verticales ; trachéides sectionnées longitudinalement et les cellules horizontales ; rayons ligneux, sectionnés transversalement. Elles montrent nettement :

- les gros et les petits éléments de vaisseaux à épaississement spiralés ;
- les gros vaisseaux ;
- les rayons ligneux plurisériés très épais et des rayons ligneux très fins composés d'une seule rangée de quelques cellules on dit qu'ils sont monosériés ou unisériés.

Cette organisation est très nette dans les coupes T₁(b), S₁(b). Dans la figure S₁(b) nous distinguons la présence de cristal (le silicate : la silice).

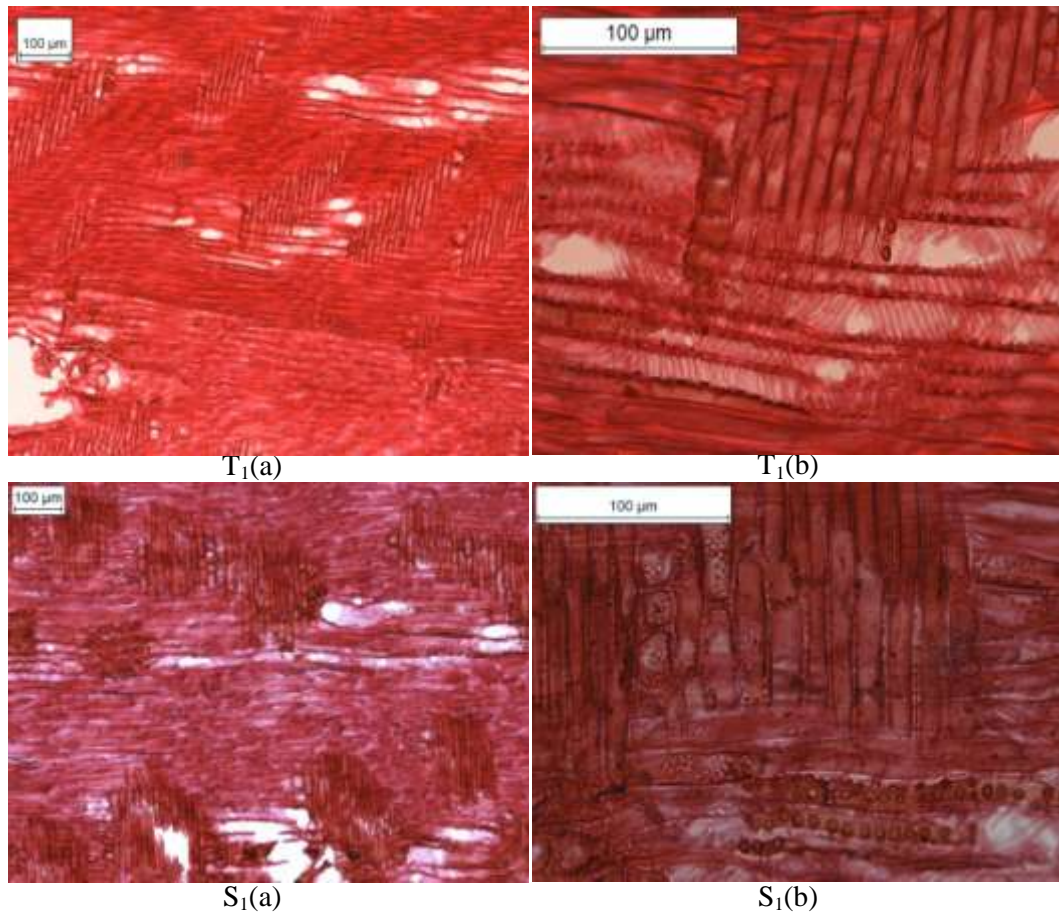


Figure IV.15. Microphotographie des coupes anatomiques du bois de *Pistacia atlantica* Desf. de l'arbre S_1 et T_1 dans le plan radial "LR" à différents grossissements : (a) caméra x 374/objectif x10 x 0.25 ; (b) caméra x 1520/ objectif x 40 x 0.75

La figure IV.15 $T_1(b)$ et IV.15 $S_1(b)$, montre la présence des ponctuations aréolées, au niveau de champs de croisement, permettant la communication latérale entre les éléments verticaux (fibres trachéides) et les éléments horizontaux (rayons), pour assurer la conduction de la sève.

Dans la coupe $S_1(b)$ nous distinguons nettement ; des grosses ponctuations aréolées (ponctuations inter-vasculaires nombreuses), des vaisseaux, le champ de croisement entre les rayons ligneux et les fibres qui sont des cellules longitudinales jouant le rôle de soutien dans le bois.

IV.7.2. Discussion

IV.7.2.1. La microphotographie plan transversal

En résumé, le plan transversal (Figure IV.13) illustre l'organisation cellulaire du bois de *Pistacia atlantica*. Elle révèle, à l'intérieur du cerne de croissance ;

- des cellules ligneuses de faible diamètre appelées "*fibres trachéides*" se localisant surtout au niveau du bois final "bois d'été", assurant la résistance mécanique (tissu de soutien) (Gasson, 1987), elles se caractérisent par la présence de ponctuations aréolées sur leurs parois (Keller, 1994). Selon Gasson (1987), Wheeler et Baas (1991) ces éléments ne peuvent généralement pas être distingués en coupe

transversale par rapport aux cellules de parenchyme vertical car ils ont souvent le même diamètre. Ces fibres sont associées à des cellules conductrices de gros diamètre dites "*vaisseaux*".

- des vaisseaux se localisant au niveau du bois initial "bois de printemps". Ils assurent la fonction de conduction de la sève brute depuis les racines jusqu'aux extrémités aériennes; ils sont d'aspect et dimension très variés de quelques décimètres à plusieurs mètres de long (Huber, 1935 ; Zimmermann, 1983 ; Gartner, 1995). Ils sont eux-mêmes composés de longues files d'éléments de vaisseaux qui communiquent entre eux par des perforations uniques ou simples. Selon Fengel et Wegener (1989) la longueur de ces éléments varie entre 100 et 400 μm . Les communications latérales avec les autres éléments anatomiques se font par des zones d'interruptions de la paroi secondaire appelées "ponctuations". Chez le pistachier de l'Atlas ces vaisseaux sont groupés, selon les coupes réalisées, en 1 à 2 rangés au début du cerne dans le bois initial. Selon Sachess (1984) ; Collardet et Besset (1992) les vaisseaux de chêne (rouvre et pédonculé) qui est un feuillus à zone initiale poreuse, sont groupés en 1 à 5 rangés au début du cerne dans le bois initial.

Le diamètre des vaisseaux diminue brusquement au passage du bois initial au bois final. Ce passage est, quelquefois, très progressif avec des vaisseaux qui diminuent graduellement en taille jusqu'à atteindre des dimensions de 20 à 30 μm à la fin du cerne (C'est le cas des chênes ; rouvre et pédonculé) (Bakour, 2003). Les gros vaisseaux sont généralement au bout de quelques années obstrués par des thylls à parois minces (Jacquot et *al.*, 1973). Ces thylls sont fréquents dans le duramen, mais existent aussi, avec une fréquence moindre, dans l'aubier (Ziegler, 1968 ; Klumpers, 1994). Les vaisseaux du bois final appelés "petits vaisseaux" ont souvent une disposition spécifique dendritique due à leur localisation et organisation en plages radiales. Les plages de vaisseaux alternent avec des plages de tissus de soutien (fibres), leurs proportions relatives varient selon les individus (arbre) (Ziegler, 1983). L'ensemble des vaisseaux est fonctionnel uniquement dans le dernier cerne formé alors que dans celui formé l'année précédente, seuls les petits vaisseaux du bois final continuent de conduire la sève brute (Ziegler, 1983). Deux ans après leur formation, ces derniers cessent également de fonctionner selon Ziegler (1968). Cependant Granier et *al.* (1994) ont montré que les petits vaisseaux du bois final peuvent fonctionner plusieurs années et certains gros vaisseaux des cernes les plus extérieurs peuvent même redevenir fonctionnels. La perte de conductivité s'accompagne généralement par l'obstruction progressive des vaisseaux par les thylls (Vansteenkiste et Breda, 2002).

- des sections longitudinales d'arrangements cellulaires orientés suivant la direction radiale, ce sont "*les rayons ligneux*". On distingue deux types de rayons ligneux :
 - ✓ les unisériés qui sont chez le pistachier de l'Atlas composés d'une file de cellules ;
 - ✓ les plurisériés, chez le pistachier de l'Atlas sont composés de plusieurs cellules. Les rayons ligneux sont les seuls éléments qui permettent un transport de substances dans la direction radiale. Ils sont dits homogènes car ils sont constitués de cellules de parenchyme allongées de manière systématique dans le sens radial (Bakour, 2003). La majorité des rayons ligneux ne partent pas de

la moelle (Bakour, 2003). En section tangentielle, les rayons ligneux unisériés chez le chêne, sont larges d'une cellule, les plurisériés de 10 -20 cellules parfois jusqu'à 30 cellules (Kucera, 1985).

Pour cette partie, nous retiendrons que, la disposition des vaisseaux permet de classer le bois de *Pistacia atlantica* parmi les bois à "zone initiale semi-poreuse".

IV.7.2.2. La microphotographie plan tangentiel

Ce plan d'observation (Figure IV.14) révèle les sections longitudinales de fibres et vaisseaux, et des sections droites des rayons ligneux (unisériés, plurisériés). Les résultats trouvés sur les échantillons de bois de pistachier de l'Atlas par les coupes anatomiques ont montré que ce bois possède une structure "classique" de feuillus.

IV.7.2.3. La microphotographie plan radial

Ce plan d'organisation (Figure IV.15) autorise essentiellement l'observation des sections des rayons ligneux suivant l'axe radial ainsi que les zones de croisement entre eux et les alignements de cellules longitudinales. Aussi nous observons des ponctuations aréolées qui fonctionnent comme des micro-valves.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale et perspectives

Ce travail de thèse se proposait d'explorer et d'apprécier la qualité du bois du pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., à travers l'étude de ses caractéristiques physiques et mécaniques, selon des dispositifs d'expérimentation spécifiques et suivant les directives des normes européennes et françaises concernant le bois, afin de permettre aux sylviculteurs et aux utilisateurs du bois de mieux appréhender cette essence.

Le choix de cette thématique était motivé en grande partie par deux aspects. D'abord sa marginalisation avec très peu d'informations scientifiques (sauf sur sa phyto-écologie), ajouté à l'inexistence, en Algérie, d'études des propriétés de son bois. Puis pour son intérêt récent comme première essence de reboisement en Algérie. Ce type d'études constitue un apport particulièrement intéressant qui a pour but de contribuer à la valorisation qualitative du bois de cette espèce ligneuse assez bien représentée en Algérie.

Le travail expérimental, s'est effectué sur six arbres provenant de deux régions écologiquement distinctes. Les deux types de bois qui ont été concernés par l'étude sont l'aubier et le duramen.

L'évolution radiale de la largeur de cerne a montré une tendance croissante pour la provenance de Sidi Bel Abbès et une tendance décroissante pour celle de Tiaret. Aussi, nous avons constaté que la concordance entre les rayons s'est montrée uniquement pour deux arbres (S_2 , T_2) où de bonnes corrélations ont été enregistrées entre la largeur de cerne et la distance reliant le cerne à la moelle.

Les résultats de l'analyse microdensitométrique, à travers l'analyse de la variance ont montré un niveau de corrélation assez variable de densité moyenne, densité maximale et densité minimale respectivement avec la largeur de cerne entre les rayons du même cerne, et pour les arbres des deux provenances. Cette tendance est-elle due à la structure anatomique du pistachier de l'Atlas qui est une espèce feuillue à zone initiale semi-poreuse ou bien à la présence en proportion non négligeable du bois juvénile ?

L'analyse de la variance au seuil de 5% de la densité moyenne (DMoy) a fait ressortir un effet arbre très hautement significatif seulement pour la provenance de Tiaret. Aussi, sur l'ensemble des échantillons, l'effet provenance s'est montré très hautement significatif sur la densité moyenne (DMoy). Des corrélations négatives et très hautement significatives ont été trouvées entre la densité moyenne et l'âge pour tous les arbres de deux provenances.

L'étude des propriétés mécaniques a permis de faire progresser les connaissances en ce qui concerne la rigidité du bois de *Pistacia atlantica* à partir des mesures du module d'élasticité longitudinale, qui est largement utilisé dans le domaine technologique du bois et qui caractérise le comportement global du bois.

Les résultats ont montré une très grande variabilité individuelle et situationnelle, qui se manifeste sur les propriétés de base du bois étudié. Elle montre que la provenance influençait les propriétés du bois. La comparaison des résultats obtenus avec les travaux de la littérature montre une

bonne concordance, l'analyse de la variance a montré que l'effet provenance, l'effet arbre et l'effet type de bois sont globalement significatifs pour le module de Young.

Comme chez la majorité des feuillus, les propriétés de base de *Pistacia atlantica* sont fortement corrélées, surtout celle concernant la "densité- module de Young" qui présente un intérêt primordial pour la sylviculture. Nous avons trouvé que le bois de *Pistacia atlantica* de la première provenance (Sidi Bel Abbès) présentait un module d'élasticité et une densité plus élevés que celle de la seconde (Tiaret). La première provenance a une altitude moins élevée que la seconde, le sol y est riche en calcaire et subit un bioclimat semi-aride à hiver frais. Nous avons également constaté qu'il y avait une différence entre le bois d'aubier et le bois de duramen du point de vue de la densité, de ce fait, le bois de cette essence peut être considéré comme un très bon matériau grâce à cette hétérogénéité, son module de Young est moyen (supérieur à 10000 MPa) et par conséquent le bois de cette essence présente une "*rigidité moyenne*", la tendance générale de la variation du module en fonction de la densité est de forme linéaire.

Les tests de durabilité naturelle face aux attaques fongiques ont permis de compléter la caractérisation de ce bois en mesurant sa sensibilité vis-à-vis de ces agressions. La connaissance de ce paramètre, pour les essences des zones arides et semi-arides est décisive pour leur exploitation future ce qui permettrait de réduire ou d'augmenter l'utilisation des produits de préservation. L'évaluation de cette durabilité naturelle réalisée par la méthode gravimétrique a permis de montrer que, pour l'ensemble des échantillons testés, et contrairement à ce qui est généralement trouvé pour la grande majorité des bois étudiés, aucune différence n'a été observée entre la durabilité du duramen et celle de l'aubier vis-à-vis des quatre champignons basidiomycètes utilisés et que cette propriété ne semblait pas être directement influencée par le milieu de croissance. Les tests et les analyses effectués dans cette étude ont également mis en évidence l'apport du séchage dans l'appréciation de la durabilité de l'essence étudiée.

Les résultats des tests de durabilité naturelle obtenus dans la présente étude ont permis de qualifier ce bois comme "*très durable*" (classe1), En tenant compte des autres caractéristiques physiques et mécaniques, ces résultats militeraient en faveur de l'utilisation de ce bois dans différents domaines tels que la menuiserie.

Par ailleurs, les résultats sur les essais mécaniques effectués sur des échantillons de ce bois nous ont permis d'avoir une caractérisation importante sur la qualité de celui-ci, où les valeurs s'avéraient très élevées, le duramen présentait une densité sensiblement plus élevée que l'aubier, ce qui peut contribuer à expliquer le caractère élevé de durabilité naturelle de ce bois.

Parmi les propriétés caractérisant le bois des essences naturelles et particulièrement celles des zones arides et semi-arides, la couleur et sa variabilité sont nécessaires à connaître pour décider de leur utilisation en tant que matériau apparent de haute valeur ajoutée comme en menuiserie-ébénisterie par exemple. La connaissance de cette propriété et des facteurs qui la contrôlent, donne aux forestiers, aux

chercheurs et aux industriels un nouveau moyen de mettre en valeur ce matériau car c'est un indicatif déterminant de l'acceptabilité d'un produit.

Cette mesure physique est souvent utilisée chez les espèces tempérées comme outil de tri de la qualité ou comme indicateurs d'autres propriétés comme la durabilité naturelle, par contre elle est mal connue chez les espèces tropicales (Kokutse, 2002). L'évaluation de la couleur du bois du pistachier de l'Atlas dans le présent travail a montré une différence très hautement significative, en relation avec la densité, entre l'aubier, le duramen et le type mixte, intermédiaire entre les deux premiers. L'aubier a un bois plus clair que les autres. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Nishino et *al.*, (2000). Une variabilité de clarté marquée entre les deux provenances et entre arbres pour l'aubier et le duramen a été notée. Ces résultats montrent que seules la clarté L^* et la couleur rouge a^* peuvent intervenir dans la différenciation de la couleur entre les deux types de bois de pistachier.

Afin d'améliorer notre compréhension sur les caractéristiques du bois, nous avons complété notre étude par une mise en évidence de la structure interne du bois de pistachier de l'Atlas à l'échelle microscopique en utilisant un protocole adopté par LERFoB. À partir de ces résultats et grâce aux observations, nous avons pu identifier la structure interne du bois, nous pouvons conclure que le bois de *Pistacia atlantica* présente une "*structure typique*" de feuillus sans particularités. C'est un matériau hétérogène qui se classe parmi les bois "*à zone initiale semi-poreuse*".

Perspectives

En perspective, dans une optique de valorisation d'essences aux bois mal connus, les résultats obtenus fournissent à l'état actuel de bons indicateurs pour aider à une compréhension des propriétés de base du bois de l'espèce étudiée. Plusieurs pistes de recherche sur les propriétés mécaniques et physiques sont à approfondir. Nos résultats ouvrent également des perspectives d'études axées sur d'autres caractéristiques qui méritent d'être encouragés. Il serait aussi intéressant d'étudier le bois de cette espèce d'autres provenances. Aussi, une recherche prenant en compte le facteur âge des arbres devra être entreprise car, selon certaines études, l'âge de l'arbre est un des facteurs les plus importants de la durabilité du bois (Nault, 1988). Larson, en 1969, a indiqué que l'âge de l'arbre est un paramètre qu'il faut prendre en compte et qui joue vraisemblablement un rôle non négligeable sur sa physiologie. D'autres études sur la nature chimique des extraits et la structure anatomique sont impératives afin de comprendre la similarité relevée entre l'aubier et le duramen lors de la présente étude. Les questions soulevées au cours de la présente étude ouvrent la voie à d'autres horizons de recherches.

L'étude des essences naturellement durables comme le pistachier de l'Atlas constitue un enjeu prometteur à l'heure actuelle. Utiliser un bois naturellement très durable permettrait de réduire l'utilisation des produits de préservation et encouragerait l'emploi des essences des zones arides et semi-arides généralement proposées et utilisées dans l'artisanat et la marqueterie. Aussi l'utilisation d'essences durables dans la construction est-elle devenue une option aux incidences importantes puisqu'elle concerne la santé humaine et l'environnement, en plus des coûts très réduits par rapport à ceux des essences à bois périssable qui demandent des traitements chimiques.

Pour finir, dans une vue plus globale, il semble que les aspects scientifiques et techniques impliqués dans la vaste thématique des propriétés physiques et mécaniques du bois, regroupent à l'échelle mondiale une certaine communauté, certes relativement peu nombreuse mais bien existante et il pourrait être intéressant d'établir ou de renforcer les liens, particulièrement à l'échelle internationale. Les échanges entre milieu artisanal et scientifique sont nécessaires pour avancer dans ce domaine, de même que des collaborations avec des spécialistes des différentes disciplines concernées. Sachant que le pistachier de l'Atlas, *Pistacia atlantica* Desf., est une espèce endémique de l'Afrique du Nord, il paraît nécessaire de poursuivre les efforts de sa régénération, de sa valorisation et de son amélioration.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- Abdelaziz H., et Rahmani A., 2005. Contribution à l'étude des exigences édaphiques dans la région d'El-Bayadh. Mémoire des études supérieures en physiologie végétale. Université Djilali Liabès de Sidi bel abbès, 120 p.
- Abdelli N., 2002. Contribution à l'étude de création d'un verger dans la zone steppique de Rechaïga. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Biologie, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 56 p.
- Abderrabi K., 2010. Étude du polymorphisme morpho-anatomique et génétique chez l'armoise blanche (*Artemisia herba-alba* Asso) dans une région à Tiaret. Mémoire de Magister, Ecole doctorale : Biodiversité Méditerranéenne de l'Algérie Occidentale. Option : Inventaire, Valorisation et Ecologie de la Restauration, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 88 p + annexe.
- Abou Salim A., et Kalli E. M., 1998. Delimitation of potential area for pistachio cultivation in Morocco, *in* Revue du réseau pour l'amélioration de la productivité agricole en milieu aride, Editeur : Agence de coopération culturelle et technique, Paris, 4 : 35 -42 .
- Ackermann F., 1994. Étude de l'influence du type de station forestière sur la qualité du bois du chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) dans le Sud-ouest de la France. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 156 p.
- Ackermann F., 1995. Influence du type de station forestière sur les composantes intracernes de la densité du bois du chêne pédonculé (*Quercus robur* L.) dans les chênaies de l'Adour et des coteaux basco-béarnais, Annales des sciences forestières. 52 : 635-652 p.
- AFNOR, 1985. "Bois, détermination de retrait et de densité", BN 50 -002, NF B 51-006, NF B 51-008.
- Ait Radi A., 1979. Multiplication par voie végétative et par semis de *Pistacia atlantica* Desf. et d'*Ailanthus altissima*. Mémoire d'ingénieur. I.N.A. Alger, 40 p.
- Alcaraz C., 1970. Étude géobotanique du pin d'Alep dans le Tell oranais. Thèse de Spécialité. Faculté des Sciences, Université de Montpellier, 183 p.
- Alyafi J., 1979. Approche systématique et écologique du genre *Pistacia* dans la région méditerranéenne. Thèse de doctorat 3^{ème} cycle. Faculté des Sciences et Techniques de Saint Jérôme, Marseille, 130 p.
- Amusant N., Beauchêne J., Fournier M., Janin G., et Thevenon M-F., 2004. Decay resistance in *Dicorynia guianensis* Amsh. : Analysis of inter-tree and intra-tree variability and relations with wood colour. *Annals of forest science*, **61** (4): 373-380.

- Ayfer M., et Serr E. F., 1961. Effects of gibberellins and other factors and seed germination and early growth in pistacia species. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.*, 77:308-315.
- Baillères H., et Durand P.Y., 2000. Non destructive techniques for wood quality assessment of plantation-grown teak. *Bois et Forêt des Tropiques*. **263** (1): 17 -27.
- 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.
- Bamber R.K., 1976. Heartwood, its function and formation. *Wood Science and Technology*. 10: 1-8.
- Bamber R.K., et FuKazawa K., 1985. Sapwood and heartwood: a review *Forest Products Abstract*, **8** (9): 265-278.
- Bannan M.W., 1967. Anticlinal divisions and cell length in conifer cambium. *Forest Products Journal*, **17** (6): 63- 68.
- Baskin C. C., Baskin J. M., et Chester E.W., 2000. Effect of flooding on the annual dormancy cycle and on germination of seeds of the summer annual *Schoenoptectus Purshianus* (cyperaceae). *Aquat. Bot.* 67: 109- 116.
- Battandier J.-A., Trabut L., 1888 Flore de l'Algérie. Ancienne flore d'Alger transformée, Dicotylédones, Alger typographie Adolphe Jourdan. Éditeur Paris librairie F. Savy, 825 p + annexes.
- Battandier J.A., Trabut L., 1902. Flore analytique et synoptique de l'Algérie et de la Tunisie, Alger Vue Giralt, imprimeur-éditeur, 460 p.
- Beachen J., 1990. Étude fine des retraits dans l'arbre chez l'épicéa (*Picea abies* Karst.), Thèse du D.U.A en Sciences du Bois, INRA, Station de Recherche sur la Qualité du Bois. Nancy, 57 p.
- Beauchêne J., 2006. Les agents de dégradation du matériau bois : *Euplassa pinnata* (Lam.) Johnston, Document technique et de recherche, Montpellier CIRAD-FORET-UMR ECOFOG (GUF).
- Becker M., 1979. Une étude phyto-écologique sur les plateaux du Nord-est (Massif de Haye, 54). Utilisation de l'analyse factorielle des correspondances dans la typologie des stations. Relations entre la productivité et la qualité du hêtre et du chêne. *Annales des Sciences Forestières*, **36** (2) : 93 -124 p.

- Beckwith J.R., 1979. Theory and practice of hardwood color measurement. *Wood Science*, **11** (3): 169-175.
- Bellefontaine R., Petit S., Pain-Orcet M., Deleporte P., Bertault J.G., 2001. Les arbres hors forêt : vers une meilleure prise en compte. Rome, Italie, FAO, Cahiers FAO Conservation (Rome). CIRAD / FAO, 35, 231 p.
- Belhadj S., 1999. Pistachio situation in Algeria. FAO - IHEAM Nucis. Newsletter. 8: 30.
- Benabdeli K., 1996. Aspects physionomico-structuraux et dynamique des écosystèmes forestiers faces à la pression anthropozoogène dans les monts de Tlemcen et les monts de Dhaya. Algérie occidentale. Thèse de doctorat és-sciences. Université Djilali Liabès de Sidi bel abbès, 356 p.
- Benhassaini H., 1998. Importance agro-écologique et composition biochimique de quelques espèces de *Pistacia*. Thèse de magister en écologie appliquée. Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès, 89 p.
- Benhassaini H., 2000. Contribution à l'étude de l'autoécologie de *Pistacia atlantica* ssp *atlantica* et valorisation. Thèse de doctorat d'état en écologie appliquée. Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès, 83 p.
- Benhassaini H., Benabderrahmane M., et Chikhi K., 2003. Contribution à l'évaluation de l'activité antiseptique de l'oléorésine et des huiles essentielles du pistachier de l'Atlas sur certaines souches microbiennes : *Candida albicans* (ATCC 20027), *Candida albicans* (ATCC 20032) et *Saccharomces cerevisia*. *Ethnopharmacologia*, 30: 38-46.
- Benhassaini H., et Belkhodja M. 2004. Le pistachier de l'Atlas en Algérie entre survie et disparition. *La feuille et l'aiguille* 54: 1-2.
- Benhassaini H., Bendahmane M., et Benchalgo N., 2007. The chemical composition of fruits of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* from Algeria. *Chemistry of Natural Compounds*, Vol. 43, N° 2.
- Benhassaini H., Mehdadi Z., Hamel L., et Belkhodja M., 2007. Phytoécologie de *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* dans le Nord-ouest algérien. *Cahiers Sécheresse*, **18** (3): 199-205.
- Benhassaini H., Fetati A., Kaddour Hocine A., et Belkhodja M., 2012. Effect of salt stress on growth and accumulation of proline and soluble sugars on plantlets of *Pistacia atlantica* Desf. subsp. *atlantica* used as rootstocks, a revue *Base* **16** (2): 159-165.
- Benoit J. 1997. Le bois de tension. Définition et distribution dans l'arbre, *Biotechnol. Agron. Soc.*

- Environ. 1997 **1**(2), 100-112.
- 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.
- Bergès L., Dupouey J.L., Franc A., 2000. Long-term change in wood density and radial growth of *Quercus petraea* (Matt.) Liebl. in northern France since the middle of the XIXth century, *Trees: Structure and function* **14**, pp 398 - 408.
- Bergström B., 2000. Aspects on heartwood formation in Scots pine. Doctoral thesis, Swedish University of Agricultural Sciences, Bowyer of Forest Genetics and Plant Physiology. Umeå.
- Bernhard A., 1964. Übert die Rohdichte von Fichtenholz. *Holz als Roh - und Werkstoff*, **22**: 215-228.
- Bernouilli D., 1748. Réflexion et éclaircissement sur les nouvelles vibrations des cordes exposés dans les moires de l'académie, Royal Academy of Berlin, 1750 p.
- Berrahou A., Djalane M., et Farch M., 2005. Notion du polymorphisme chez les végétaux, cas de *Pistacia atlantica* Desf. Mémoire d'études supérieures en Physiologie Végétale. Université Djilali Liabès de Sidi bel abbès, pp 18-20.
- 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.
- Boardman B.E., Senft J.E., McCabe G.P., et Ladisch C.M., 1992. Colorimetric analysis in grading black walnut veneer. *Wood and Fiber Science*. **24** (1): 99-107.
- Bodig J., et Jayne B.A., 1982. *Mechanics of wood and wood composites*. Van Nostrand Reinhold, Editor: New York, 736 p.
- Bordonné P.A., 1989. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois : mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Thèse de doctorat en sciences du bois, Institut national polytechnique de Lorraine (INPL), Nancy, France. 154 p.
- Boudy P., 1950. Economie forestière nord africaine. Monographie et traitement des essences forestières). Essences résineuses. Tome II, Fascicule 2, Édition Larose. Paris, 280 p.
- Boudy P., 1952. Guide du forestier en Afrique du Nord. Édition la maison Rustique, Paris, 505 p.
- Boudy P., 1955. Économie forestière nord-africaine. Description forestière de l'Algérie et de la Tunisie. Volume 1. Éditeur Larose. Paris, 370 p.

- Bouet J.P., et Humbert J.L., 2003. Le bois ; une énergie renouvelable. [Online] Available:<http://crdp.acreims.fr/cddp10/ressources/mediatheque/dossiers/themadoc/default.htm>. ThemaDocs. SCEREN Services Culture Éditions Ressources pour l'Éducation Nationale.
- Bourreau D., 2011. Étude de faisabilité de lamellé-collé endémique en Guyane Française. Thèse pour le doctorat en Génie mécanique, École doctorale pluridisciplinaire : Santé, Environnement et Sociétés dans les Amériques, Faculté de Génie Civil, Université des Antilles et de la Guyane. 164 p.
- Bouzenoune A., 1984. Étude phytogéographique et phytosociologique des groupements végétaux du Sud oranais (wilaya de Saida). Thèse de doctorat 3^{ème} cycle en écologie végétale. Université sciences technologiques Houari Boumediene, Alger. 225 p.
- Bowyer J.L., Shmulsky R. et Haygreen J.G., 2003. Forest Products and Wood Science: An Introduction. 5th Edition. Iowa State Press, Ames. 554 p.
- Brancheriau L., et Baillères H., 2001. Natural vibration analysis of clear wooden beams: a theoretical review. Wood Science and Technology, Berlin, **36** (4): 347-365.
- Brancheriau L., 2002. Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique. Thèse de doctorat en mécanique, option : Acoustique, Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II. Ecole supérieure de mécanique de Marseille, Marseille, 267 p.
- Breda N. et Granier A., 1996. Intra- and interannual variations of transpiration, leaf area index and radial growth of a sessile oak stand (*Quercus petraea*). Ann. For. Sci., 1996, 53, pp. 521-536.
- 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., 294 p.
- Brichet M., 1931. Compte rendu du livre des journées de l'arbre fruitier. Alger, 735p.
- Bruce Hoadley R., 2000. Understanding wood: A craftsman's guide to wood technology. Éditeur : Taunton Press Inc; Edition : 2nd Revised edition, 272 p.
- Burte J-N., 1992. Le bon jardinier. Édition Rustique, Paris. Vol. 3 : 2882 p.
- Carlquist S.J., 1988. Comparative wood anatomy. Springer Series in Wood Science, ed. T.E. Timell, Berlin. 411p.

- Chaba B., Chraa O., et Khichane M., 1991. Physiologie des arbres et des arbustes en zones arides et semi-arides : Germination, morphogénèse racinaire, et rythme de croissance de *Pistacia atlantica* Desf. Mémoire d'ingénieur INA. El-Harrach, Alger. 89 p.
- Chantre G., 1989. Liaison entre rigidité et densité du bois à l'intérieur du cerne. Application au cas de l'épicéa commun (*Picea abies* Karst.). Rapport DEA en Sciences du bois, Station de recherche sur la qualité du bois - INRA - CRF, Nancy - Champenoux. 46 p + annexe.
- Chaouch M., 2011. Effet de l'intensité du traitement sur la composition élémentaire et la durabilité du bois traité thermiquement : Développement d'un marqueur de prédiction de la résistance aux champignons basidiomycètes. Thèse de doctorat, Sciences du bois et des fibres, Université Henri Poincaré, Nancy, 218 p.
- Charrier B., 1992. Les discolorations brunes du chêne apparaissant pendant le séchage artificiel : Étude fondamentale et mise en place de techniques de prévention. Thèse de doctorat en Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine, 167 p.
- Charrier B., Janin G., Haluk J.P., et Mosedale J.R., 1995. Colour and chemical characteristics of moon rings in oakwood. *Holzforschung*, **49** (4): 287-292.
- Cherifi K., et M'hamdia-Rabeh CH., 2002. Causes de dégradation des plantes médicinales spontanées : Cas de la forêt de Guetarnya (Sfisef wilaya de Sidi bel abbès). Mémoire de fin d'étude pour l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'état en Biologie, Option : écologie végétale et environnement, Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès. 81 p + annexe.
- Chief R., 1982. Les plantes médicinales. Édition Solor, 235 p.
- Chraa O., 1988. Étude des facteurs limitant la germination de *Simmondsia chinensis* Link, *Pistacia atlantica* Desf., et *Juniperus phoenicea* L. : Essai de production de plants en pépinière. Mémoire d'ingénieur I.N.A. Alger. 55 p.
- Chrisment A., 1986. Méthodes et appareils de mesure de la couleur. Séminaire de colorimétrie, Royaumont, Montreuil.
- Chrisment A., 1997. Couleur et colorimétrie, Éditeur : 3C Conseil, 30 p.
- Clark J.M., et Scheffer T.C., 1983. Natural decay resistance of the heartwood of coast redwood, *Sequoia sempervirens* D., *Forest products Journal*, 33 (5): 15-20.
- Climent J., Gil L. et Pardos A., 1998. Xylem anatomical traits related to resinous heartwood formation in *Pinus canariensis* ssp. *canariensis*. *Trees*, 12, 139-145.

- Collardet J. et Besset J., 1992. Bois commerciaux. Feuillus des zones tempérées. Tome II, Vial H. et centre Technique du bois de l'Ameublement, Dourdan, 400 p.
- Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2006. Rapport sur l'état des forêts de la wilaya.
- Conservation des forêts de la wilaya de Sidi bel abbès, 2011. Rapport sur l'état des forêts de la wilaya.
- Conservation des forêts de la wilaya de Tiaret, 2012. Rapport sur l'état des forêts de la wilaya.
- Cote W.A., 1984. The Structure of wood and the wood cell wall, in principles of Wood Science and Technology, Springer-Verlag Editor. Berlin. 52 p.
- Courbet F., et Zegers J.P., 1983. Contribution à l'amélioration génétique du pin sylvestre (vigueur, forme, qualité, du bois). Thème personnel, Station de Recherches sur la Qualité des Bois INRA-CNRF. 27 p.
- Courtoisier F., 1976. Étude des relations entre stations et qualité du bois de Chêne en forêt de Bride et de St Jean, Rapport de stage ENITEF, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy - Champenoux, Juillet, 54 p + annexes 52 p.
- Cown D.J., et Parker M.L., 1978. Comparison of annual ring density profiles in hardwoods and softwoods by X-ray densitometry. Canadian Journal of Forest Research, 8 (4): 442-449.
- Crane J.C., et Forde H.I., 1974. Improved pistacia seed germination. California Agriculture, **28** (9): 8-9.
- Crane J.C., et Iwakiri B.T., 1981. Morphology and reproduction of pistachio, Horticultural Reviews, **3**: 376-393.
- Crète P., 1965. Précis de botanique; systématique des angiospermes. Tome II, Edition Masson, Paris. 429 p.
- CTBA., 1996. Insectes et champignons du bois, Département BIOTEC, Centre Technique du Bois et de l'Ameublement, Paris, 116 p.
- Da Costa E.W.B., Rudman P., et Deverall F.J., 1962. Inter-tree variation in decay resistance of Karri (*Eucalyptus diversicolor* F. Muell) as related to colour, density and extractives content. Journal of the Institute Wood Science, 10: 48-55.
- Dadswell H.E., et Nicholls J.W.P., 1959. Assessment of wood qualities for tree breeding. (1). in *Pinus elliotii var elliotii* from Queensland. C.S.I.R.O. Australia, Division of Forest Products, Technical Paper, n°4: 16 p.

- Dadswell H.E., 1960. Tree growth wood property inter-relationships. X. What are the essential wood characteristics for various purposes and why. Proceedings special field Institute in Forest Biology. The School of Forestry. N. C. State, Univ. N. Carolina. Raleigh. North Carolina 248p.
- Daget P., 1977. Le bioclimat méditerranéen : caractères généraux, modes de caractérisation. *Vegetatio*, **34** (1) : 1-20 p.
- Dakak J.E., 2002. La qualité du bois de Thuya de Maghreb (*Tetraclinis articulata*) et ses conditions de développement sur ses principaux sites phytoécologiques de son bloc méridional au Maroc. Thèse de docteur en Sciences Forestières et du Bois, ENGREF Centre de Nancy. 149 p.
- Datta S.K., et Kumar A., 1987. Histochemical studies of the transition from sapwood to heartwood in *Tectona grandis*. *IAWA Journal Bulletin* **8** (4): 363-368.
- David B., 1999. Caractérisations acoustiques de structures vibrantes par mise en atmosphère raréfiée. Méthodes d'estimation relatives aux fréquences et amortissements des modes propres. Applications en acoustique musicale. Thèse de doctorat, option : Acoustique, Université Pierre et Marie Curie - Paris 6, 233 p.
- 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.
- Déon G.M., et Chadenson M., Hauteville M., 1980. Influence des extraits naturels du bois sur sa résistance à la pourriture. *Bois et forêt des tropiques*, 191: 75-90.
- De Reboul, L. 1988. Influence des paramètres de structure et de position sur le module de rigidité en flexion statique (E_L) dans le cas de l'épicéa commun (*Picea abies* Karts.) DEA en Sciences du bois, Station de recherches sur la qualité des bois, CRF-INRA- INPL, Nancy, Octobre, 113 p.
- Détienne P., et Jacquet P., 1983. Atlas d'identification des bois de l'Amazonie et des régions voisines. Nogent-sur-Marne, France, Centre technique forestier tropical, 640 p.
- Deysson G., 1979. Organisation et classification des plantes vasculaires. in "Cours de botanique générale, quatrième série, tome II. Édition : Société d'enseignement supérieur, Paris. 340 p.
- 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 docteur en Sciences du bois, INPL, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy-Champenoux,

12 octobre, 144 p.

Direction des Services Agricoles de Sidi Bel Abbès, 2008. Données climatiques sur la wilaya de Sidi Bel Abbès.

Dirol D., Deglise X., 2000. Durabilité des bois et problèmes associés. Paris, France, Hermes, Science publications, 415p.

Djebaili S., 1978. Recherches phytosociologiques et écologiques sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien algérien. Thèse de docteur en sciences, Université des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier II, 229 p.

Djebaili S., 1984. Steppe algérienne, phytosociologie et écologie. Recherche phytosociologique et écologique sur la végétation des hautes plaines steppiques et de l'Atlas saharien. OPU, Alger, 177 p.

Djellali K., 2006. La prospection et l'évaluation de la variabilité chez le pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) dans une zone steppique (Rechaïgua, wilaya de Tiaret).

Direction générale des forêts, 2005. Bilan d'incendies des forêts algériennes, superficies, potentialités.

Dhôte J.-F., Hatsch E., Rittié D. 1997. Profil de la tige et géométrie de l'aubier chez le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.). ONF, Bulletin technique, n° 33 : 59-81 p.

Dumoncaud O., 2001. Petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter l'emploi des traitements par les pesticides : Problèmes posés par l'utilisation du châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) et intérêts d'un traitement de type friture à basse température. Thèse de doctorat. Université Montpellier II, 214 p.

Dumon R., 1980. La forêt, source d'énergie et d'activités nouvelles. Collection : Les objectifs scientifiques de demain, Édition Masson, Paris. 141 p.

Dupouey J.L., 1983. Étude phytosociologique et écologique du massif de Haguenau (Bas- Rhin). Apports méthodologiques. Potentialités sylvicoles. Thèse de docteur-Ingénieur : INA Paris-Grignon, 140 p.

Edlin H.L., 1965. The summerwood springwood ratio in conifers: how it arises, varies, and affects end use for timber, board and paper. *Forestry*. **38** (1): 91-111.

El Azzouzi K., 1996. Propriétés technologiques du bois de cèdre de l'Atlas : Influence de la

- sylviculture pratiquée sur plusieurs types de substrat. Thèse de docteur de l'ENGREF. Nancy, 190 p.
- Elliott G.K., 1970. Wood density in conifers. (Series: Technical Commentary) Éditeur: Imprint unknown, 44 p.
- Emberger L., 1930 (a). Sur une formule climatique applicable en géographie botanique. Comptes rendus à l'Académie des Sciences, tome : 191, pp 389-390.
- Emberger L., 1930 (b). La végétation de la région méditerranéenne. Essai d'une classification des groupements végétaux. Revue générale de botanique, tome 42, pp. 662-705 et 705-721.
- Eyono Owoundi R., 1992. Modélisation de la rétractibilité du bois en relation avec des paramètres de la structure de l'accroissement annuel et de la position dans l'arbre chez *Quercus robur L et Quercus petraea Liebl*. Application à l'intégration de la rétractibilité du bois dans les modèles de croissances de peuplements et d'arbres. Thèse de docteur en sciences du bois, ENGREF. Nancy, 233 p.
- FAO., 2006 (a). Le rôle de forestière dans la lutte contre la désertification, 124-126 p.
- FAO., 2006 (b). L'étude prospective du secteur forestier en Afrique (connue sous le sigle FOSA), 21p.
- FAO., 2006 (c). Global planted forest thematic study: results and analysis, in: Del Lungo J.B. and Carle J. (Eds.), Planted Forests and trees: Working paper 38, Rome.
- Fengel N. et Wegener G., 1989. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin-New York, 613 p.
- Ferka Zazou N., 2006. Impact de l'occupation spacio-temporelle des espaces sur la conservation de l'écosystème forestier. Cas de la commune de Tessala, wilaya de Sidi Bel Abbes, mémoire de magister en foresterie, Université Abouberk Belkaïd de Tlemcen, Algérie, 114 p + annexes.
- Feuillat F., 1996. Contribution à l'étude des phénomènes d'échanges bois/vin/atmosphère à l'aide d'un "fût" modèle. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 396 p.
- Flot J.L., 1988. La couleur du chêne de tranchage français. Méthodologie de la mesure, variabilité géographique, classement industriel et incidences économiques. Mémoire de 3^{ème} année à l'école nationale des ingénieurs des travaux des eaux et forêts, Nancy, 90 p.
- Fougerousse M., 1960. Durabilité naturelle du bois. Revue bois et forêt des tropiques. 73 : 43-56 p.
- Fouquet D., 2009. Durabilité naturelle et préservation des bois tropicaux. Guide pratique, Edition :

- Quæ, Versailles, France, 127 p.
- Frutos D., et Barone E., 1988. Germinación de *Pistacia vera* L y primer crecimiento de las plantas de semilla tratadas con ácido geberélico (GA₃). Rapport EUR 11557 FR-EN-IT-ES, pp 289 - 298.
- Gadek P.A., Fernando E.S., Quinn C.J., Hoot S.B., Terrazas T., Sheahen MC., et Chasse M.W., 1996. Sapindales: molecular delimitation and infraordinal groups. Amer. Jour of Bot. **83**: 802 -811 p.
- Gadiri F., et Righi R., 1993. Étude phytoécologique des dayats à *Pistacia atlantica* Desf. dans la wilaya de Naâma (Hautes plaines oranaises) Mémoire d'ingénieur d'état, spécialité : écologie végétale, option : Écosystème forestier. USTHB. 80 p.
- Gartner B., 1995. Patterns of xylem variation within a tree and their hydraulic and mechanical consequences. Dans: plant stems physiology and functional morphology (B. L. Gartner, Ed.), Academic press, San Diego, p. 125 - 149.
- Gasson P., 1987. Some implications of anatomical variations in the wood of pedunculate oak (*Quercus robur* L.), including comparison with common beech (*Fagus sylvatica* L.). IAWA Bull. n. s. 8 (2), 149 - 166 p.
- Girault D., 1990. Orientations locales d'aménagement. Coteaux du Nord-est et Vic-Bilh. O.N.F région Aquitaine, 48 p. + annexes.
- Granier A., Anfodillo T., Sabatti M., Cochard H., Dreyer E., Tomasi M., Valentini R., et Breda N., 1994. Axial and radial water flow in the trunks of oak trees: a quantitative and qualitative analysis. Tree Physiology, 14, 1383 - 1396 p.
- 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 Opérateur n° : MO-QB124, Version : 0, 21 p.
- Gérard J., 1994. Contraintes de croissance, variations internes de densité et de module d'élasticité longitudinal et déformation de sciage chez les Eucalyptus de plantation. Thèse de doctorat en sciences du bois. Université de Bordeaux I, 160 p.
- Ghazi A., et Lahouati R., 1997. Algérie 2010. Sols et ressources biologiques. institut national des études de stratégie globale (INESG), Alger. 38 p.
- Gillet F., 2000. La phytosociologie synusiale intégrée - Guide méthodologique. 1 : 68 p. Université de Neuchâtel, Institut de botanique, Suisse, Documents du laboratoire d'écologie végétale et de phytosociologie, 68 p.

- Gonçalez J.C., 1993. Caractérisation technologique de quatre espèces peu connues de la forêt amazonienne : anatomie, chimie, couleur, propriétés physiques et mécaniques. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Nancy, 447 p.
- Gounot M., 1969. Méthodes d'études quantitatives de la végétation. Édition Masson, Paris, 314 p.
- 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, 128 p.
- Greco J., 1966. L'érosion, la défense et la restauration des sols. Le reboisement en Algérie, Édition MARA (Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire), Alger 393 p.
- Greuter W., 1995. Origin and peculiarity of Mediterranean Island Flora. Ecol. Medit., 21, 10: 1-10.
- Guilley E., 2000. La densité du bois de chêne sessile (*Quercus petraea*). Elaboration 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 de l'ENGREF, Sciences forestières, 206 p.
- Guitard D., 1987. Mécanique du matériau bois et composites. Collection Nabla. CEPADUES Éditions, Toulouse, 220 p.
- 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 2^{ème} Colloque Sciences et industrie du bois, ENGREF, Nancy. Édition ARBOLOR association pour la recherche en bois de Lorraine, 405- 412 p.
- Guitard D., et Fournier M., 1994. Comportement mécanique du bois. Le bois matériau d'ingénierie. Édition ARBOLOR. 433 p.
- Hakkila P., 1966. Investigations on the basic density of finnish pine, spruce and birch wood. Communicationes Instituti forestalis fenniae, **61** (5): 98 p.
- Halitim, A. 1988. Sols des régions arides d'Algérie. Office des Publications Universitaires OPU, Alger, 384 p.

- Haluk J.-P., 1994. Composition chimique du bois. Le Bois, matériau d'ingénierie. Édition ARBOLOR. 433 : 53-88 p.
- Haluk J.-P., et Bousta-Roussel C., 2000. Caractérisation et origine des tropolones responsables de la durabilité naturelle des Cupressacées. Application potentielle en préservation du bois. *Annals of forest sciences*. **57** : 819-829 p.
- Haluk J.-P., Bousta-Roussel C., et Thévenon M.-F., 2001. Importance des quinones dans les propriétés antifongiques du Teck (*Tectona grandis*). Édition, Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, les Cahiers scientifiques du bois, 2 : 77-83 p.
- Harche M., 1985. Différenciation et structure pariétale des fibres foliaires de l'Alfa (*Stipa tenacissima* L). Thèse de doctorat d'état à l'Université Pierre et Marie Curie. UPMC. Paris. 88 p + annexes.
- Harris J.M., 1988. Spiral Grain and wave phenomena in wood formation. Edition: Springer Series in wood science, Series Editor: T.E. Timell, State University of New York, 199 p.
- Harvald C., et Olesen P.O., 1987. The variation of the basic density within the juvenile wood of Sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Scandinavian Journal of forest research* **2** (1- 4): 525 -537 p.
- Hase N., 1987. A comparison between acoustic physical factors of Honduras rosewood for marimbas and xylophones and a sensory evaluation of these instruments. *Mokuzai Gakkaishi*, **33** (10): 762-768.
- Higuchi T., 1997. Biochemistry and molecular biology of wood, Edition: Springer series in wood science, series Editor: T.E. Timell, state University of New York, 353 p.
- 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, vol. 3, p.1348-1358.
- Hofmann P., 1987. Mesure de la variabilité de la couleur du bois : méthodologie et influence de l'anatomie du plan ligneux et des variations angulaires du débit. Espèces étudiées : chêne (*Quercus petraea*, *Quercus robur*) autres feuillus tempérés et bois tropicaux. DEA Sciences du bois, station de recherches sur la qualité des bois, INRA-CRF, Nancy-Champenoux, octobre, 74 p.
- Hon D.N.S., et Ifju G., 1978. Measuring penetration of light into wood by detection of photo-induced free radicals. *Wood sciences* **11**(2): 118-127.

- 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.
- Ifzu G., 1969. Within-growth-ring variation in some physical properties of southern pine wood. *Wood science*, **2** (1): 11-19.
- Jain K.K., et Seth M.K., 1979. Intra-increment variation in specific gravity of wood in blue pine. *Wood science and technology*, **13**: 239-248 p.
- Janin G., 1985. Étude de la variabilité de la couleur du bois de chêne de tranchage (*Quercus sp.*). Actes du 5^{ème} congrès de l'Association internationale de la couleur. Monte-Carlo, 16- 22 juin 1985, n°75 : 7 p.
- Janin G., 1986 (a). Étude de la variabilité de la couleur du chêne de tranchage. - Le bois national-11 janvier, 19-21 p.
- Janin G., 1986 (b). La couleur du bois, un facteur clé de qualité. *Mesures*, 17 Mars, 61-65 p.
- Janin G., 1986 (c). Mesure de la couleur du bois; intérêt agronomique, technologique et économique. *in* : Le bois dans la construction, Colloque scientifique international, Communication présentée à Bâtibois, Bordeaux, 2-3 octobre, 171-183 p.
- Janin G., 1987. Mesure de la couleur du bois. Intérêt forestier et industriel. *Annales des sciences forestières*. **44** (4) : 455- 472.
- Janin G., 1988. La mesure de la couleur du bois. Intérêt agronomique, technologique et économique. *in* : mesure instrumentation - contrôle - automatisme (MICA). Séminaire couleurs et lumière. Éditeur : MICA, Montreuil, France.
- Janin G., Mazet J.F., Decarreau J.F., Hofmann P., 1988. Influence de l'anatomie et de la structure des bois sur l'aspect et la couleur naturelle des produits forestiers. Particularité des bois colorés artificiellement, actes du 2^{ème} colloque « Sciences et industries du bois », Nancy, 22 - 24 Avril, Tome II, ARBOLOR., 253 - 260 p.
- Janin G. 1989. Bois dans la construction - Couleur du bois. Compte-rendu de contrat MRT 85 G 1418, février, Document à distribution limitée, station de recherche sur la qualité du bois, INRA-CRF, Nancy-Champenoux, N° 1, 55 p.
- Janin G. 1990. Colorimétrie : Principe de mesure de la couleur. Application au bois. Cours de DEA-

- filière : Sciences du bois-, 20 p.
- Janin G., 1991. Couleur et qualité du bois. Séminaire «couleur et colorimétrie ». Royaumont, 6 p.
- Janin G., et Eyono Owoundi R., 1991. Relationship between the Cielab 1976 chromatic coordinates: L*, a*, b*, and basic characteristics: ring width, basic density, shrinkage, percentage of latewood (texture) and age from the pith, of oak wood. - Annexe an compte-rendu final du contrat CEE « genetics and breeding of oak ». 9 p.
- Janin G., 1994. Colorimétrie : principe de la mesure de la couleur. Application au bois. Chapitre 10 du livre « Le bois, matériau d'ingénierie », édité par ARBOLOR, Nancy, 401- 426 p.
- Janin G., Goncalez J., Ananias R. A., Fernandez Da Silva G., Dilem A., 2001. Aesthetics appreciation of wood colour and patterns by colorimetry. part 1. colorimetry theory for the CIELab system. Maderas, Ciencia e Tecnologia, 3 (1-2): 3-13.
- Jacques C., et François P., 1990. Les outils de travail du bois, (collection dirigée par Jaques Claude et François Payen), Nathan Communication, Paris, 164 p.
- Jacquot C., 1955. Atlas d'anatomie des bois de conifères, Centre technique du bois, Paris, 133 p.
- Jacquot C., Trenard Y., et Dirol D., 1973. Atlas d'anatomie des bois des angiospermes (essences feuillues), Tome I, Centre technique du bois, Paris, 175 p.
- Jodin P., 1994. Le bois matériau d'ingénierie, (Textes rassemblés par Philippe Jodin) ARBOLOR, (Association pour la recherche sur le bois en Lorraine), Nancy. 14 - 433 p.
- Johansson K., 1993. Influence of initial spacing and tree class on the basic density of *Picea abies*, Scandinavian Journal of Forest Research, 8 (1 - 4): 18-27 p.
- Jozsa L.-A., Richards J., et Johnson S.-G., 1989. Relative density. Second growth douglas-fir: Its management and conversion for value. Forintek Canada corporation, 5 (22): 173 p.
- Kaddour Hocine A., 2008. Contribution à l'étude du comportement morpho-physiologique et biochimique de *Pistacia atlantica* Desf. sp *atlantica*, stressée à la salinité. Thèse de magister en physiologie végétale, Université d'Oran Es-senia, 59 p + annexe.
- Kaka N., et Nikpeyma Y., 1992. Antepfstiklarinda tuplu fidan uretimi uzerinde bir on ara_tirma. Turkiye I.Ulusal Bahce Bitkileri Kongresi, 13 - 16 Ekim, zmir, I:79 - 83 p.

- Keller R., 1994. La constitution du bois, Chapitre I, 14- 52 p *in* : Jodin P. (Editor), Le bois matériau d'ingénierie. ARBOLOR, Nancy, 433 p.
- 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.
- Keller R., 1968. Des caractéristiques nouvelles pour l'étude des propriétés mécaniques des bois : les composantes de la densité. *Annales des sciences forestières*, **25** (4) : 237- 249.
- Khatir K., 2003 .Contribution à l'étude de quelques propriétés physiques du bois juvénile de pin d'Alep (*Pinus Halpensis* Mill), mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en biologie option : Forêt ,63p + annexes.
- Khelil A., et Kellal A., 1980. Possibilités de culture et délimitation des zones à vocation pistachier en Algérie. *Fruits*, **35** (3) : 177-185.
- Kittel Ch., 1998. Physique de l'état solide (Publication). Éditeur : Dunod, Paris, 610 p.
- Klem G.S., 1965. Variations in dry density of picea abies in Norway. *Norsk skogind.* **19** : 348-351 p.
- Klumpers J., 1990. La couleur du bois de chêne. relation avec des facteurs sylvicoles, environnementaux et individuels. Son incidence économique. DEA en Sciences du bois, ENGREF-INRA Nancy, octobre 70 p.
- Klumpers J., et Janin G., 1992. Influence of age and annual ring width on the wood colour of oaks. *Holz als Roh- und Werkstoff*, **50**: 167-171.
- Klumpers J., 1994. Détermination de la couleur du bois de chêne. Étude sur les relations entre la couleur et des propriétés physiques, chimiques et anatomiques ainsi que des caractéristiques de croissance. Thèse de doctorat de en sciences forestières du bois, l'ENGREF, Nancy, 195 p.
- Klumpers J., Scalbert A. et Janin G., 1994. Ellagitannins in European oak wood: polymerization during wood ageing. *Phytochemistry*. **36** (5): 1249-1252.
- Kokutse A.D., 2002. Analyse de la qualité du bois de Teck (*Tectona grandis* L.f) en plantation au Togo : Formation du bois de cœur, propriétés mécaniques et durabilité. Thèse de doctorat de l'Université Bordeaux I, 163 p.

- Kollmann F.F.P., 1984. Physics of wood, in principles of Wood science and technology, Springer-verlag, Editor. Berlin. pp 160 - 285.
- Kouadria S., 2012. Essai d'élaboration d'un plan d'aménagement forestier pour la forêt domaniale de Tagdempt (wilaya de Tiaret), Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Science agronomique, Spécialité : foresterie, Université Ibn Khaldoun de Tiaret, 62 p.
- Kucera L. J., 1985. Morphology of the intercellular spaces in the medullary rays, part 2 : Scanning electron microscope. The nature research society in Zürich, 130 (2), 157 -198 p.
- Lambourg C., 1997. Modèle temporel pour la simulation numérique de plaques vibrantes. Application à la synthèse sonore. Thèse de doctorat en Acoustique, Université du Maine, 299 p.
- Lapie G., 1909. Étude phytogéographique de la Kabylie du Djurdjura. Thèse de docteur Es. sciences naturelles, Faculté des sciences, Université de Paris, 154 p.
- Lapie G., et Maige A., 1924. Flore forestière illustrée de l'Algérie. Édition : Orglah. Paris.
- Larouci-Rouibat A., 1987. Étude biochimique et physiologique des semences du pistachier de l'Atlas (*Pistacia atlantica* Desf.) Mémoire des études supérieures en en Physiologie Végétale, Option : Biochimie. USTHB Alger. 113 p.
- Larson P.R., 1962. A biological approach to wood quality. Tappi, vol. **45**, n°6, June.
- Larson P.R., 1969. Wood formation and the concept of wood quality. Yale University: School of Forestry. Bulletin n°74: 54 p.
- Lebourgeois F., et Merian P., 2012. Principes et méthodes de la dendrochronologie, Laboratoire d'Étude des Ressources FOret-Bois (LERFOB), Unité Mixte de Recherches INRA-ENGREF 1092, Équipe Écologie Forestière, AgroParisTech-ENGREF, Nancy, 85 p.
- Le Houérou H.N., 1968. La désertisation du Sahara Septentrional et des steppes limitrophes (Libye, Tunisie, Algérie), in Annales Algériennes de Géographie, décembre, n°6 : 40 p.
- Le Houérou H.N., 1969. La végétation de la Tunisie steppique (avec références aux végétations analogues d'Algérie, de Lybie et du Maroc). Ann. Inst. Nat. Rech. Agro. Tunis ; **42** (5) : 561 p.
- Le Moguédec G., 2000. Choosing simplified mixed models for simulations when data have a complex hierarchical organisation. An example with some basic properties in sessile oak wood (*Quercus petraea* Liebl.), Annales des Sciences Forestières, **59** (8): 847 - 855 p.

- Linné C.V., 1753. Species plantarum. Tome I, Ed. Holmi Impesis laurentii salvii.
- Loubinoux B., et Kilbertus G., 1994. La préservation du bois. Techniques et produits de préservation. in Le Bois, matériau d'ingénierie. Edition ARBOLOR. Nancy, 365-376 p.
- Maatoug M., 1998. Évolution de quelques propriétés de base du bois de pin d'Alep en fonction de l'âge du peuplement. Conséquence sur la valorisation industrielle du bois de cette essence. Thèse de magister, INA, Institut National Agronomique, Alger, 126 p.
- Maatoug M., 2003. Effet des facteurs stationnels sur les propriétés physiques, mécaniques et papetières du bois de Thuya de Maghreb, *Tetraclinis articulata Vahl. Masters.* (Algérie Occidentale). Thèse de doctorat en écologie et environnement, Spécialité : gestion des écosystèmes. Université Djilali Liabès de Sidi Bel Abbès, 184 p.
- 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.
- Mac Donald R.G., et Franklin J.N., 1969. Pulp and paper manufacture. 2^{ème} Edition, volume I: The pulping of wood, Mc Grow-Hill, New York, 769 p.
- McGovern, Patrick E; Donald L., Glusker; Lawrence J., Exner et Mary M. Voigt. 1996 Neolithic Resinated Wine. Nature 381: 480 - 481.
- Magel E., Jay-Allemand C., et Ziegler H., 1994. Formation of heartwood substances in the stem wood of *Robinia pseudo acacia* L. II. Distribution of nonstructural carbohydrates and wood extractives across the trunk. Tree. 8: 165 - 171 p.
- Maggs D.H., 1973. The pistachio as an australian Crop. J.Aust.Inst.Argi.Sci.10-17 p.
- Makhlouf N., 2005. Contribution à l'étude de certaines propriétés physico-chimiques de drupes de *Pistacia atlantica* Desf. provenance Sfisef wilaya de Sidi bel abbès. Mémoire des études supérieures en bio et physiologie végétale, 58 p.
- MATE, 2000. Rapport national sur l'état et l'avenir de l'environnement. Alger. 253 p.
- Matsunaga M., Sugiyama M., Minato K., et Norimoto M., 1996. Physical and mechanical properties required for violin bow materials. Holzforschung, 50: 511 - 517.
- Matsunaga M., Minato K., et Nakatsubo F., 1999. Vibrational properties changes of spruce wood by impregnation with water soluble extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.). Journal of Wood Science, 45: 470 - 474.

- Mazet J.F., Nepveu G., et Velling P. 1989. Étude des effets de quelques paramètres sylvicoles et environnementaux sur la densité du bois de l'épicéa commun (*Picea excelsa*), du sapin pectiné (*Abies alba*) et du pin sylvestre (*Pinus sylvestris*) dans le Nord-est de la France. Document à distribution limitée, station de recherches sur la qualité des bois, INRA -CRF, Nancy - Champenoux, N°3 : 96 p.
- Mazet J.F., et Janin G., 1990. La qualité de l'aspect des placages de chênes (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) : mesures de couleur et critères d'appréciation des professionnels français et italiens. *Annales des sciences forestières*. **47** (3) : 255 - 268.
- Mazet J.F., Nepveu G., Velling P. et Deret-Varcin E., 1990. Étude des effets de quelques paramètres sylvicoles et environnementaux sur la qualité du bois de l'épicéa commun, du sapin pectiné et du pin sylvestre dans le Nord-est de la France. *in* : Actes du 3^{ème} Colloque « Sciences et industries du bois », (ARBORA), 14-15 Mai, Bordeaux, tome II, 537-546 p.
- Mazet J.F., Triboulot-Trouy M.C., Merlin, A., Janin, G. et Deglise, X. 1993. Modification de couleur du bois de chênes européens exposés à la lumière solaire. *Ann. Sci. For.*, **50** (2) : 119-146 p.
- McLean J.P., Zhang T., Bardet S., Beauchêne J., Thibaut A., Clair B., et Thibaut B., 2011. The decreasing radial wood stiffness pattern of some tropical trees growing in the primary forest is reversed and increases when they are grown in a plantation. *Annals of forest science*, (68): 681-688 p.
- Medail F., et Quezel P., 1996. Signification climatique et phytoécologique de la redécouverte en France méridionale de *Chamaerops humilis* L. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 319 : 139-145 p.
- MCTRA 1978. Mémento de forestier, 2^{ème} Édition, 559 p.
- Miara M., 2011. Contribution à l'étude de la végétation du massif de Guezoul, wilaya de Tiaret). Thèse de magister, Spécialité: Biologie, Option : Ecologie végétale. Université Es-senia. Oran, Département de biologie.
- Minato K., Sakai K., Matsunaga M., et Nakatsubo F., 1997. The vibrational properties of wood impregnated with extractives of some species of Leguminosae (Preliminary report). *Mokuzai Gakkaishi*. **43** (12) : 1035-1037 p.
- Mitchell A., 1992. Tous les arbres de nos forêts. Paris - Bruxelles : Elsevier séquoia (Multiguide nature), 414 p.
- Monastra F., Rovira M., Vargas F.J., Romero M.A., Batlle I., Rouskas D. et Mendes Gaspar A., 1997.

- Caractérisation iso-enzymatique de diverses espèces du genre pistacia et leurs hybrides. Étude de leur comportement comme porte-greffe du pistachier *Pistacia vera* L. CIHEAM Options méditerranéennes : Série B. études et recherches; n. 16 : 133-142.
- Monjauze A., 1968. Répartition et écologie de *Pistacia Atlantica* Desf. en Algérie. Bull. Société d'Histoire Naturelle de l'Afrique du Nord, 56 : 1-128.
- Monjauze A., 1980. Connaissance du bétoum. (*Pistacia atlantica* Desf.). Revue forestière française, 32 (4): 357-63.
- Monteiro P.J.M., Chong K.P., Larsen-Basse J., et Komvopoulos K., 2000. Long term durability of structural materials, Editor: Elsevier Science, 312 p.
- Montero G., Canellas I., 1998. Salviculturay gestion soslenible de sistemas forestales, Actas de Los Primeros Encuentros Cientificos del parque natural de Penalara, 29-31 Mai. Conserjeria de Medio Ambienté de Madrid.
- Morlier M., et Bendahmane A., 1987. Influence des nœuds sur les caractéristiques mécaniques du pin maritime. Journée d'étude du G.S. rhéologie du bois : « les nœuds du bois et leurs comportements mécaniques », Décembre, Paris.
- Moslemi A.A., 1967. Quantitative color measurement for Black Walnut wood. U.S. Forest service, research paper NC. 17: 59 p.
- 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.
- Myers N., 1988. Threatened biotas, « Hot spots » in tropical forests. The environmentalist, 8:187-208.
- Nahlaoui N., 1982. The fruit cultivation of pistachio nut and commercial crop. XIX Int. Hort. congress. Hamburg.
- Nault J., 1988. Radial distribution of thujaplicins in old growth and second growth of Western red cedar (*Thuja plicata* Donn), Canada. Wood science and technology, **22** (1):73-80.
- Navi P., Heger F., 2005. Comportement thermo-hydrromécanique du bois : applications technologiques et dans les structures, Editeur : Presses polytechniques et universitaires Romandes (PPUR), 298 p.
- Nelson N.D., Maeglin R.R. et Wahlgren H.E., 1969. Relationship of black walnut wood color to soil

- properties and site. Wood fiber Sci. **1**: 29-37.
- Nepveu G., 1976. Les corrélations juvénile-adulte en matière d'étude de la qualité du bois. station de recherches sur la qualité des bois, INRA-CNRF de Nancy, document à distribution limitée, n°1976/3.
- 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, 17 p.
- Nepveu G., 1991. La variabilité du bois. Extrait de la seconde Edition du livre « Le matériau bois. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine (ARBOLOR), 8 p.
- 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.
- Nepveu G., 1994. Chapitre IV: Variabilité. Le bois matériau d'ingénierie. Nancy, A.R.BO.LOR : 127-177 p.
- Nepveu G., et Blachon J.L., 1988. La largeur de cerne et aptitude à l'usage en structure de quelques conifères : douglas, pin sylvestre, pin maritime, épicéa de stika, épicéa commun, sapin pectiné. Revue forestière française, XLI, 6 : 497 - 506.
- Norme française NFX 40-002., 1983. Préservation du bois - Vocabulaire. (décembre 1983).
- Norme française NF B 51 005. Septembre. Détermination de la masse volumique.
- Norme française - Normes européenne NF EN 113. Décembre, 1986. Produits de préservation du bois : Détermination du seuil d'efficacité contre les champignons basidiomycètes lignivores cultivés sur milieu gélosé.
- Norme française-Normes européenne NF EN 113. Décembre, 1986. Classes de durabilité naturelle du bois vis-à-vis des champignons lignivores selon les essais du laboratoire.
- Norme française - Normes européenne NF EN 350-1. Mai, 1994. Durabilité du bois et des matériaux dérivés du bois - Durabilité naturelle du bois massif - Partie 1 : guide des principes d'essai et de classification de la durabilité naturelle du bois, 16 p.

- Normes européenne EN-113. Décembre, 1996. Produits de préservation du bois - Méthode d'essai pour déterminer l'efficacité protectrice vis-à-vis des champignons basidiomycètes lignivores - Détermination du seuil d'efficacité. Communauté économique européenne, 28 p.
- Normand D., 1998. Manuel d'identification des bois commerciaux, Tome1 : Généralités, Éditeur : Cirad, 171 p.
- Nishino Y., Janin G., Chanson B., Détienne P., Gril J., et Thibaut B., 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. *Journal of wood science*, 44 (1): 3 - 8.
- Nishino Y., Janin G., Yamada Y., Kitano D., 2000. Relations between the colorimetric values and densities of sapwood, *Journal of wood science*, 46: 267 - 272.
- Norimoto M., Tanaka F., Ohogama T., et Ikimune R., 1986. Specific dynamic Young's modulus and internal friction of wood in the longitudinal direction (en Japonais;Traduction Joseph Gril). *Wood research and technical notes*, (22): 53-65.
- Nylinder P., 1951. The calculation of the summer wood content and the average breadth of annual rings. *Medd. Skogsforskn Inst. Stockholm*, **40** (10): 40.
- Obataya E., et Norimoto M., 1999. Acoustic properties of a reed (*Arundo donax* L.) used for the vibrating plate of a clarinet. *Journal of the acoustical society of america*, **106** (2): 1106-1110.
- Ohta S., Watanabe H., Matsumoto T., et Tsutsumi J., 1968. Studies on mechanical properties of juvenile wood. I fibril angle and dynamic modulus of elasticity of juvenile wood in stem of Sugi trees (*Cryptomeria japonica* D. Don). *The reports of the kyushu university forest*, **22**: 105- 116.
- Olesen P.O., 1976. The interrelation between basic density and ring width of Norway spruce. *Forst forsogsv, Danmark*. **34** (281): 341-359.
- Olesen P.O., 1982. The effect of cyclophysis on tracheid width and basic density in Norway spruce. *Forest tree improvement*, Vol. 15: 1-80 p.
- Oukabli A., 2005. Le pistachier: Un arbre fruitier et forestier. INRA, UR. Amélioration des plantes et conservation des ressources phyto-génétiques, CRRA. Meknès. Maroc.
- Ozenda P., 1954. Flore du Sahara septentrional et central. Édition. CNRS, Paris, 486 p.
- Ozenda P., 1983. Observation sur la végétation d'une région semi aride : les hauts plateaux du Sud Algérois. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. Nord*, **45** (3- 4) : 189-224.

- Pape R., 1999. Influence of thinning and tree diameter class on the development of basic density and annual ring width in *Picea abies*, Scand. Journal of Forest Research. 14: 27-37.
- Patrick G., 2001. L'atlas du bois. Éditions de Monza, Paris, 67, 68 p.
- Pechmann H. V, et Wutz A., 1960. Haben Minereraldüngung und Lupinenanbau einen Einfluss auf die Eigenschaften von Fichten - und Kiefernholz Forstwiss. Cbl 79: 91-105 p.
- Pechmann H. V., et Aufsess H. V., 1973, Critère de qualité du bois de placage en chêne : structure et coloration, Holzforschung, **27**(2) : 52-54.
- Pesson P., et Louveaux J., 1984. Pollinisation et production végétale. INRA. Paris. 179 p.
- Pollet C., Jourez B., et Hébert J., 2008. Natural durability of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.) wood grown in Wallonia, Belgium. Canadian Journal of Forest Research, 38(6): 1366-1372.
- Pollet C., Henin J.M., Hébert J., et Jourez B., 2013 (a). Effect of growth rate on the natural durability of Douglas-fir in western Europe. Canadian Journal of Forest Research, 43(10): 891-896.
- Pollet C., Verheyen C., Hébert J., et Jourez B., 2013 (b). Le bois de robinier faux-acacia : propriétés physiques, mécaniques et de durabilité naturelle. Forêt Wallonne, 126:3-16.
- Polge H., 1964. Le bois juvénile des Conifères. Revue forestière française de l'INRA, Nancy, juin, n°6 : 473-505 p.
- Polge H., 1966. Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. Applications dans les domaines technologique et physiologique. Thèse de docteur ès-sciences appliquées, Faculté des sciences, Université Nancy I, 27 juin, 215 p.
- Polge H., 1967. Propositions pour une meilleure utilisation des courbes de variations de la densité du bois. Communication présentée au Congrès de l'IUFRO, section 41, Munich, Septembre, 286-299 p.
- 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.
- 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., 1985. Étude complémentaire sur l'influence de la fertilisation sur la qualité du bois du pin maritime (Expérience de Mimizan). Station de recherches sur la qualité des bois, CNRF de Nancy, Champenoux. *Annales des sciences forestières*, **42** (4) : 411- 434.
- Polge H. et Keller R., 1973. Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. *Annales des Sciences Forestières*, 30 (2), p. 91-125.
- Polito V.S., et Pinney K., 1999. Endocarp dehiscence in pistachio (*Pistacia Vera* L.). *International Journal of Plant Sciences*, Dpt of Pomology. University of California, Davis. USA, **160** (5): 827-835.
- Quézel P., 2000. Réflexions sur l'évolution de la flore et de la végétation au Maghreb méditerranéen. Paris, France, Ibis Press, 117 p.
- Quézel P., Medail F., Loisel R., Barbero M., 1999. Biodiversité et conservation des essences forestières du bassin méditerranéen. *Unasyuva*, 197: 21-28.
- Quézel P., 1965. La végétation du Sahara. Du Tchad à la Mauritanie. Vol. II de la collection. *Geobotanica selecta*, éditée par prof. Dr. R. Tuxen. Gustaf Fisher Verlag, Stuttgart. XII+333 p.
- Quézel P., et Santa S., 1963. Nouvelle flore de l'Algérie et des régions désertiques méridionales. Édition : Centre national de la recherche scientifique. Paris, Tome 2, 626 p.
- Quezel P., 1974. Les forêts du pourtour méditerranéen. Notes techniques. MAB 2, UNESCO. Paris : 9-34.
- Rahme A., 1972. Contribution à l'étude des propriétés physiques, mécaniques, microdensitométriques et papetières du bois de *Pinus brutia* de quatre stations du Nord-ouest de Syrie. Liaison entre caractéristiques et influence de divers facteurs du milieu. Thèse de docteur de Nancy. 190 p.
- Rémond R., 2004. Approche déterministe du séchage des avivés de résineux des fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées. ENGREF de Nancy: 219.
- Reveal J.L., 1999. Selected families of Angiosperms: Rosidae. North on brown herbarium. University of Maryland. USA.
- RNE. 2000. Aperçu du patrimoine forestier d'Algérie.
- Rink G., 1987. Heartwood color and quantity variation in a young black walnut progeny test. *Wood and fiber science*. **19** (1): 93-100.

- Rudman P., 1964. The causes of natural durability in timber. Pt. XVI, The causes of variation in decay resistance in Jarrah (*Eucalyptus marginata* Sm.), *Holzforschung*. **18** (6): 172-177.
- Sachess H., 1984. Einheimische Nutzhölzer und ihre Bestimmung nach makroskopischen Merkmalen. Pareys Studentexte, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin, 44, 160 p.
- Saffarzdeh A., Vineze L., et Csapo J., 2000. Determination of some anti-nutritional factors and matabolisable energy in acorn, pistacia khinijuk seed as new poultry diets. *Acta Agaria kasposvariensis*, **4** (1): 41-47.
- Samson M., et Blanchet L., 1992. Effect of knots on the flat wise lending stiffness of lumber members. *Holz als Roh-Und Werkstoff*, **50** (4): 148 -152.
- Saranpää P., 2003. Wood density and growth. *in: Wood quality and its biological basis* (editors: Barnett, J.R. and Jeronimidis),. Blackwell Publishing, Oxford, pp 87-117.
- Sbaâ, N. 2000. Contribution à l'étude de la diversité génétique chez deux provenances de *Pistacia atlantica* Desf. : Utilisation des marqueurs morphologiques au niveau des graines et des fruits. Mémoire d'ingénieur d'état en Agropastoralisme, Centre Universitaire de Djelfa, 135 p.
- Scalbert A., Monties B., et Janin G., 1988. Comparaison de méthodes de dosage des tanins : application à des bois de différentes espèces. Actes du 2^{ème} Colloque « Sciences et Industries du Bois », Nancy, 22-24 Avril, tome II, 261-268 p.
- Schulz H., 1959. Der Phänotyp von Furniereichen und die Beziehungen zur Holzfarbe *Allgemeine Forstzeitschrift*, 50: 1- 4 p.
- Schultz P.T., Harms W.B., Fischer H.T., Mc Murtrey K.D., Minn J., et Nicholas D.D., 1995. Durability of Angiosperm heartwood: the importance of extractives. *Holzforschung*. **49** (1): 29-34 p.
- Schultz P.T., et Nicholas D.D., 2000. Naturally durable heartwood: evidence for a proposed dual defensive function of the extractives. *Phytochemistry*. **54** (1): 47-52 p.
- Schultz P.T., et Nicholas D. 2002. Development of environmentally-benign wood preservatives based on the combination of organic biocides with antioxidants and metal chelators. *Phytochem* 61:555-560.
- Seigue A., 1985. La forêt circum-méditerranéenne et ses problèmes. Techniques agricoles et productions méditerranéennes. Edition : G.P. Maisonneuve et Larose. Paris. 502 p.

- Shuraky Y.D., et Sedley M., 1996. Shell structure and embryo development of *pistacia vera* L and *Pistacia atlantica* Desf. Following intra and interspecific pollination. Internat. Journal of plants Sciences. **157** (5): 586- 594 p.
- Skaar C., 1988. Wood-water relations. Springer Series in Wood Science, editor: T.E. Timell., Syracuse, Newyork. 279 p.
- Somon E., 1987. Arbre, arbustes et arbrisseaux en Algérie. O.P.U. Alger. 586 p.
- Spina P, et Pennisi F., 1957. La culture du pistachier en Sicile. Riv. Ortoflorofrutticult. Ital. **19**: 533-557.
- Sullivan J.D., 1966. Color characterization of wood: spectrophotometry and wood color. Forest Products Journal, **17** (7): 43- 48.
- Sullivan J.D., 1967. Color characterization of wood: color parameters of individual species. Forest Products Journal, **17** (8): 25-29.
- Vargas F.J., Romero M.A., Monastra F., Mendes Gaspar A., et Rouskas D., 1997. Sélection de variétés adaptées à l'aire nord méditerranéenne. CIHEAM (Option méditerranéenne : Série B. Etudes et Recherches; 16 : 93 - 119.
- Vernay M., et Fouquet D., 1997. Guide d'utilisation des bois de Guyane dans la construction. ISBN : 2-87614-268-6. CIRAD-Forêt. 205 p.
- Vansteenkiste D. et Breda N., 2002. Caractéristiques anatomiques du cerne de chêne et perspectives d'interprétation écophysiological et climatique. Séminaire "Biologie hivernale", Groupe d'étude de l'arbre, Saint-Flour, 21 - 22 mars 2002. 12 p.
- Wareing P.F., 1951. Growth studies in woody species. 4. The initiation of cambial activity in ring-porous species. *Physiol. plant.* 4, 446 - 562 p.
- Wem WH., 1987. Wood han book: wood as an engineering material. Agriculture handbook, ed. F.P. Laboratory. Washington DC. 5.
- Willeitner H., et Peek R.D. 1997. The natural durability story. International Research Group on Wood Protection (IRG-WP) Section 1 Biology, 97 - 20119, 14 p.
- Wheeler E.A. et Baas P., 1991. A survey of the fossil record for dicotyledonous wood and and its significance for evolutionary and ecological wood anatomy. *IAWA Bull.* n.s. 12 (3), 275 - 332 p.

- Whitehouse W.E., 1957. The pistachio nut, a new crop for the western United states. *Econ. Bot.*, **11** (4): 281-321.
- Wong A.H.H., Kim Y.S., Singh A.P., et Ling W.C., 2005. Natural durability of tropical species with emphasis on Malaysian hardwoods - Variations and prospects, in International research group on wood protection, Section 1 biology. Bangalore, India, (IRG - WP), 05-10568, 33 p.
- Woodroof J. G., 1979. The nuts, production processing products, vol. III, 2nd Edition, The AVI Publishing comp., Inc., Westport Connecticut.
- Yano H., Kajita H., et Minato K., 1994. Chemical treatment of wood for musical instruments. *Journal of the acoustical society of america*, **96** (6): 3380-3391 p.
- Yano H., Kyou K., Furuta Y., et Kajita H., 1995. Acoustic properties of brazilian rosewood used for guitar back plate. *Mokuzai Gakkaishi*, **41**(1): 17-24 p.
- Zahner R., 1968. Site quality and wood quality in upland hard-woods: theoretical considerations of wood density. In: *Tree growth and forest soils*. Oregon State University Press, 477-497 p.
- Zabel A.R., et Morrell J.J., 1992. Wood microbiology, decay and its prevention, Chapter 18, Academic Press, Inc. San Diego, USA, 476 p.
- Zanetti M., 2000. Étude des variations de la couleur du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) dues à la photodégradation. Ses conséquences sur la perception des utilisateurs. DEA en Sciences du bois, INRA-ENGREF, Université de Nancy I. 29 p.
- Zerrouk D., 2006. La forêt algérienne face aux caprices du temps. *El Watan*, le quotidien indépendant.
- Ziegler H., 1968. Biologische Aspekte der Kernholzbildung. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 46, 61 - 68 p.
- Ziegler H., 1983. Physiologie. in "Lehrbuch der Botanik für Hochschulen", Gustav fischer verlag, Stuttgart, New-York, 310 - 372 p.
- Zhou H., et Smith I., 1991. Factors influencing bending proprietors of with spruce Lubber wood and fiber. *Sci.* **23** (4): 483-500.
- Zimmermann M. H., 1983. Xylem structure and the ascent of sap. Springer series in wood science, Springer verlag, 139 p.
- Zobel J.B., et Buijtenen J.P., 1989. Wood variation. Its causes and control. Springer series in wood science. Springer verlag, Berlin, Germany. 355 -363 p.

Zohary M., 1952. A monographical study of the genus pistacia. Palestine Journal of botany. Jerusalem Series (5): 187 - 228 p.