



HAL
open science

Influence de l'espèce et de la provenance des deux principaux chênes français (*Quercus robur* L.) sur la structure anatomique et les propriétés physiques du bois merrain

Riad Bakour

► To cite this version:

Riad Bakour. Influence de l'espèce et de la provenance des deux principaux chênes français (*Quercus robur* L.) sur la structure anatomique et les propriétés physiques du bois merrain. Sciences of the Universe [physics]. ENGREF (AgroParisTech), 2003. English. NNT: . pastel-00000871

HAL Id: pastel-00000871

<https://pastel.hal.science/pastel-00000871>

Submitted on 26 Oct 2004

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



UMR 1093
INRA/ENGREF/UHP



École Nationale du Génie
Rural, des Eaux et des Forêts

THÈSE

présentée
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'ENGREF

Spécialité : Sciences Forestières et du Bois

par

Riad BAKOUR

* * *

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 soutenue publiquement le 17 Décembre 2003
à l'École Nationale du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Centre de Nancy,
devant le jury composé de Messieurs :

Patrick PERRÉ

Président

**André LECLERCQ
Jean-Louis PUECH**

**Rapporteur
Rapporteur**

**Frédéric MOTHE
Philippe ROZENBERG**

**Examinateur
Examinateur**

René KELLER

Directeur de thèse



À Maha

À Hassan, Mouhammad, Randa et Mouayad

À mes parents



REMERCIEMENTS



Au terme de ce travail réalisé au sein du Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois (LERMAB) du centre de l'ENGREF de Nancy, je souhaite exprimer ma gratitude à tous ceux, qui de près ou de loin, m'ont accompagné et soutenu tout au long de ce travail.

En premier lieu, ma profonde reconnaissance va à Monsieur René KELLER, directeur de cette thèse, Enseignant-Chercheur à l'ENGREF, initiateur du projet, pour m'avoir fait confiance et pour m'avoir laissé entière liberté pour mener ces travaux. En plus de son appui moral et scientifique, il 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.

Mes remerciements vont aussi à Monsieur Dominique DANGUY DES DESERTS, directeur délégué du centre de l'ENGREF de Nancy, pour m'avoir accueilli cordialement au sein de l'ENGREF.

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

- À Monsieur Patrick PERRÉ, Ingénieur en chef du GREF et responsable de l'Équipe "Anatomie et Physique du Bois – ENGREF", pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail, mais aussi pour ses conseils notamment pour le traitement des données microdensitométriques et pour avoir accepté de présider le jury de la thèse ;
- Aux rapporteurs, Monsieur André LECLERCQ, Inspecteur général scientifique, directeur du Centre de Recherche de la Nature, des Forêts et du Bois à Gembloux et Monsieur Jean Louis PUECH, Directeur de Recherches au Centre de Recherche Agronomiques de Montpellier, U.M.R. - S.P.O. Équipe Biopolymères et Arômes à l'INRA de Montpellier, pour avoir accepté d'évaluer mon travail et pour m'avoir fait l'honneur d'être membres du jury ;
- À Messieurs, Philippe ROZENBERG et Frédéric MOTHE, respectivement, Chargés de recherches à l'INRA d'Orléans et à l'INRA de Nancy, pour leur aide technique tout au long de ce travail, principalement pour la réalisation des mesures microdensitométriques, ainsi que pour leur participation comme membres de jury ;

Je suis également très reconnaissant à Madame Françoise HUBER, Ingénieur d'études, INRA-ENGREF de Nancy pour m'avoir fait partager son expérience scientifique dans le domaine du bois de chêne, pour m'avoir corrigé la totalité de la thèse et pour m'avoir accompagné sérieusement tout au long de la rédaction de ce travail.

Je dois beaucoup à Monsieur François FEUILLAT, chargé d'étude et de recherche à l'ONF, pour avoir entretenu tout au long de ce travail un dialogue intense et fructueux dans le domaine du bois de chêne et surtout celui du chêne de tonnellerie, pour avoir relu une grande partie de mon manuscrit, pour sa disponibilité et son aide amicale.

Je remercie Monsieur Christophe BARBE et Madame Elvire HATSCH et une nouvelle fois ! Monsieur François FEUILLAT qui ont réalisé les travaux de terrain y compris le choix des

arbres, leur détermination botanique précise et les mesures morphologiques ainsi que certaines mesures anatomiques de base.

Je remercie également Monsieur Jean Christophe HERVÉ, responsable de l'Équipe Dynamique des Systèmes Forestières du LERFOB du centre de l'ENGREF de Nancy, pour son aide en traitement statistique des données.

Mes remerciements sont aussi à Monsieur Jean-Charles BERTRAND, responsable du service informatique à l'ENGREF, pour sa disponibilité, pour m'avoir transmis une partie de ses nombreuses connaissances en informatique et pour avoir répondu à toutes mes questions de manière toujours claire et pratique. Je remercie aussi son assistant Monsieur Jean-Noël ARNAIZ pour sa collaboration.

Il me reste à adresser de chaleureux remerciements aux très nombreuses personnes qui m'ont aidé avec toujours une extrême gentillesse :

- Les personnels de l'Équipe "Qualité des Bois", INRA Nancy : Mesdames Danièle AUBERT et Simone GARROS, Messieurs Christian HERBÉ, Gérard JANIN, Claude HOUSSEMENT et Dries VANSTEENKISTE, sans oublier Monsieur Gérard NEPVEU, directeur du laboratoire ;
- Monsieur René CANTA, Équipe "Croissance et Production", INRA Nancy ;
- Monsieur Daniel RITTIÉ, Équipe Dynamique des Systèmes Forestières du LERFOB INRA-ENGREF centre de l'ENGREF de Nancy ;
- Monsieur Jean-Marc ROUSSELLE, Équipe Économie Forestière, INRA-ENGREF de Nancy ;
- Madame Laurette WESTRICH, Atelier de reprographie, ENGREF de Nancy ;
- Monsieur Antoine CLÉRY, Faculté des Sciences de Nancy ;
- Mesdemoiselles Aude RAULET, Véronique GIMENEZ, Angélique MOUTENET et Céline SCHMAUCH, Stagiaires de l'IUT de Metz ;
- Toutes les personnes qui ont participé à "Chêne de Tonnellerie 2000".

Mes remerciements vont enfin à l'ensemble du personnel de l'Équipe du LERMAB-IRA-ENGREF et j'adresse en particulier mes remerciements à :

- Monsieur Jean-Claude MOSNIER pour son aide amicale et technique au long de ce travail ;
- Madame Joëlle PASSARD pour son soutien moral et humain ;
- Madame Anélie PÉTRISSANS, Messieurs Eric BADEL, François THIERCELIN et Michel CANTAL pour leur soutien moral et leurs conseils scientifiques et techniques ;
- Madame Isabelle SCHMITT pour son aide administrative ;
- L'ensemble des actuels ou anciens étudiants en thèse : Sylvain ZOUHOUN, Osmar AGUIAR, Eusèbe AGOUA, Jamal DAKAK, Patrick ROUSSET, Clément KOUCHADE, Michael BUCKI, Catherine MARION, RÉMON Romain, Ricardo BAETTIG, Vincent PLACET et Mohammad ELAIEB pour leur amitié, leur collaboration et leur encouragement.

Je garde un excellent souvenir de ma collaboration avec l'ensemble du personnel du LERMAB.

Enfin, je tiens à rendre hommage à Maha, ma femme, à Hassan, Mouhammad, Randa et Mouayd, mes enfants, qui ont su me comprendre et qui m'ont supporté tout au long de ce travail. Je tiens aussi à remercier mes amis pour leur participation à préparer la rencontre amicale qui a suivi la soutenance de la thèse.

Liste des symboles et abréviations

| | | |
|---------|-------|-----------------------------------------------------------|
| R | | Chêne rouvre |
| P | | Chêne pédonculé |
| B | | Bertrange |
| Bi | | Bitche |
| C | | Cîteaux |
| D | | Darney |
| J | | Jupilles |
| Li | | Limousin |
| M | | Monlezun-Laurède |
| S | | Saint Palais |
| T | | Tronçais |
| NC | | Nombre de cernes dans la zone de merrain mesuré par |
| Âge | année | Âge total de l'arbre |
| Lpet | mm | Longueur du pétiole |
| ni | | Nombre de nervures intercalaires |
| Pil | | Pilosité |
| LC | mm | Largeur de cerne dans l'arbre |
| Ee | cm | Épaisseur de l'écorce |
| LCA | mm | Largeur de cerne dans l'aubier |
| NCA | | Nombre de cernes dans l'aubier |
| LA | cm | Largeur de l'aubier |
| h* | degré | Angle de teinte |
| L* | | Clarté L varie entre 0 pour le noir et 100 pour le blanc |
| C* | | Saturation de la teinte |
| a* | | Coordonnées sur un axe vert - rouge |
| b* | | Coordonnées sur un axe bleu - jaune |
| Lgc | mm | Largeur moyenne du cerne dans la zone d'étude |
| Text | % | Texture du cerne = $LBF / LgC * 100$ |
| LBI/LgC | % | Proportion du bois initial dans le cerne |
| LBI | mm | Largeur du bois initial |
| LBF | mm | Largeur du bois final |
| LRL | mm | Largeur du rayon ligneux |
| NRL | | Nombre de rayons ligneux par 1 cm dans la zone de merrain |
| RL | % | Proportion des rayons ligneux |

| | | |
|---------------------|-------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| fibre | % | Proportion des fibres |
| PPvx | % | Proportion de parenchyme et des petits vaisseaux |
| GVX_crd | % | Proportion des gros vaisseaux du bois initial mesurée par "Cerd" |
| GVX | % | Proportion des gros vaisseaux du bois initial mesurée par "Visilog" |
| NVX | | Nombre de gros vaisseaux par mm ² mesuré par "Visilog" |
| S _{ind} VX | mm | Surface individuelle des gros vaisseaux mesuré par "Visilog" |
| Ext | | Rapport entre le diamètre radial et tangentiel de gros vaisseaux du bois initial |
| Rang. VX | | Nombre de rangées de gros vaisseaux dans le bois initial |
| infra | kg/m ³ | Infradensité |
| DBI | kg/m ³ | Densité du bois initial |
| DBF | kg/m ³ | Densité du bois final |
| DMoy | kg/m ³ | Densité moyenne du cerne |
| DMin | kg/m ³ | Densité minimale du cerne |
| DMax | kg/m ³ | Densité maximale du cerne |
| Tanin | µg/g | Tanin |
| TotWL | µg/g | Total en Whisky lactones |
| Q | | Quantile |
| a | | Grand rayon dans l'arbre |
| b | | Petit rayon dans l'arbre |
| Coef. Var. | % | Coefficient de variation |
| NS | | Non significatif |
| * | | Significatif au seuil de 5% |
| ** | | Significatif au seuil de 1% |
| *** | | Significatif au seuil de 1‰ |
| ddl | | Degré de liberté |
| crd | | Programme "Cerd" |
| visi | | Logiciel d'analyse d'image "Visilog" |

Ann. Sci. For. : Annales des Sciences Forestières

Ann. For. Sci.: Annals of Forest Science

Can. J. FOR. Res.: Canadian Journal of Forest Research

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TABLE DES MATIÈRES | 9 |
| INTRODUCTION..... | 17 |
| CHAPITRE I. MATERIEL ET MÉTHODES..... | 21 |
| 1 ÉCHANTILLONNAGE | 23 |
| 1.1 CHOIX DES MILIEUX | 25 |
| 1.2 CHOIX DES ARBRES | 27 |
| 1.3 ABATTAGE ET DÉBIT DES ARBRES..... | 27 |
| 2 MORPHOLOGIE FOLIAIRE DES ARBRES..... | 29 |
| 2.1 DONNÉES BIBLIOGRAPHIQUES SUR LA RECONNAISSANCE DES CHÊNES | 29 |
| 2.2 MÉTHODOLOGIE..... | 35 |
| 2.3 RÉSULTAT ET DISCUSSION | 36 |
| 2.3.1 <i>Analyse des données recueillies sur le terrain</i> | 36 |
| 2.3.2 <i>Analyse sur les données après reclassement des neuf arbres</i> | 38 |
| 2.3.2.1 <i>Analyse factorielle discriminante sur les trois variables regroupées</i> | 38 |
| 2.4 CONCLUSION | 41 |
| 3 ÉTUDE DES PROPRIÉTÉS DU BOIS | 43 |
| 3.1 MATÉRIEL ET MÉTHODES | 43 |
| 3.1.1 <i>Préparation des échantillons</i> | 43 |
| 3.1.2 <i>Études anatomique et physique</i> | 43 |
| 3.2 TRAITEMENT STATISTIQUE DES DONNÉES..... | 47 |
| 4 CARACTÉRISTIQUES SYLVICOLES..... | 49 |
| 4.1 ÂGES | 49 |
| 4.2 LARGEUR DE CERNE | 51 |
| 4.2.1 <i>La largeur moyenne de cerne dans l'arbre</i> | 51 |
| 4.2.2 <i>La largeur moyenne de cerne du merrain</i> | 54 |
| 4.3 CONCLUSION | 56 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 57 |
| CHAPITRE II. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCORCE ET DE L'AUBIER | 59 |
| 1 RAPPELS..... | 61 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------|------------|
| 2 | ÉPAISSEUR DE L'ÉCORCE | 62 |
| 2.1 | LIAISON AVEC L'ÂGE ET LA LARGEUR DE CERNE | 63 |
| 2.2 | VARIABILITÉ DE L'ÉPAISSEUR DE L'ÉCORCE..... | 63 |
| 3 | L'AUBIER | 65 |
| 3.1 | INTRODUCTION..... | 65 |
| 3.2 | LARGEUR MOYENNE DE CERNE DANS L'AUBIER | 66 |
| 3.3 | NOMBRE DE CERNES DANS L'AUBIER..... | 68 |
| 3.4 | LARGEUR DE L'AUBIER..... | 70 |
| 4 | CONCLUSION | 74 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 76 |
| | CHAPITRE III. COULEUR DU BOIS | 77 |
| 1 | INTRODUCTION | 79 |
| 1.1 | SOURCES DE LA VARIABILITÉ DE LA COULEUR DU BOIS | 80 |
| 2 | MATÉRIELS ET MÉTHODES | 82 |
| 2.1 | LE SYSTÈME CIELAB 1976 :..... | 82 |
| 2.2 | MESURES EXPÉRIMENTALES..... | 84 |
| 3 | RÉSULTATS ET DISCUSSION | 85 |
| 3.1 | CLARTÉ L*..... | 85 |
| 3.2 | ANGLE DE TEINTE H*..... | 87 |
| 3.3 | SATURATION DE LA TEINTE C*..... | 90 |
| 4 | CONCLUSION | 96 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 97 |
| | CHAPITRE IV. DENSITÉ DU BOIS DE CHÊNE | 99 |
| 1 | INTRODUCTION | 101 |
| 1.1 | SOURCES DE LA VARIABILITÉ DE LA DENSITÉ DU BOIS DE CHÊNE..... | 102 |
| 1.1.1 | <i>L'espèce</i> | 102 |
| 1.1.2 | <i>L'origine géographique</i> | 103 |
| 1.1.3 | <i>La largeur de cerne et sa liaison avec la densité</i> | 104 |
| 1.1.4 | <i>L'âge</i> | 106 |

| | | |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1.1.5 | <i>L'arbre</i> | 106 |
| 2 | MESURE DE L'INFRADENSITÉ | 107 |
| 2.1 | MATÉRIEL ET MÉTHODE | 107 |
| 2.2 | RÉSULTATS ET DISCUSSION | 108 |
| 2.2.1 | <i>Relation entre l'âge, la largeur de cerne et l'infradensité</i> | 110 |
| 2.2.2 | <i>Variabilité de l'infradensité</i> | 111 |
| 2.3 | CONCLUSION | 114 |
| 3 | LA MICRODENSITOMÉTRIE | 115 |
| 3.1 | MATÉRIEL ET MÉTHODE | 115 |
| 3.2 | RÉSULTATS ET DISCUSSION DES MESURES MICRODENSITOMÉTRIQUES | 117 |
| 3.2.1 | <i>Densité du bois initial (DBI)</i> | 117 |
| 3.2.1.1 | Liaison avec l'âge et la largeur de cerne | 118 |
| 3.2.1.2 | Variabilité de la densité du bois initial..... | 120 |
| 3.2.2 | <i>Densité du bois final (DBF)</i> | 121 |
| 3.2.2.1 | Évolution de la densité du bois final avec l'âge et la largeur de cerne | 123 |
| 3.2.2.2 | Variabilité de la densité du bois final..... | 124 |
| 3.2.2.3 | Liaison entre largeur et densité du bois initial et final | 126 |
| 3.2.2.4 | Variabilité intra-cerne de la densité du bois initial et final | 127 |
| 3.2.3 | <i>Densité moyenne (DMoy)</i> | 128 |
| 3.2.3.1 | Variabilité inter et intra-cerne de la densité moyenne (DMoy)..... | 131 |
| 3.3 | RELATIONS ENTRE LES CARACTÉRISTIQUES DE LA MICRODENSITOMÉTRIE | 132 |
| 3.4 | CONCLUSION | 133 |
| 4 | PROFIL SYNTHÉTIQUE DE LA MICRODENSITÉ | 134 |
| 4.1 | PROFILS SYNTHÉTIQUES DE LA DENSITÉ DES DEUX ESPÈCES À DIFFÉRENTES CLASSES DE LARGEUR DE CERNE..... | 136 |
| 4.2 | PROFILS SYNTHÉTIQUES DE LA DENSITÉ À DIFFÉRENTES CLASSES DE LARGEUR DE CERNE ET D'ÂGES | 137 |
| 4.2.1 | <i>Variabilité intra-spécifique du profil densitométrique</i> | 142 |
| 4.3 | CONCLUSION | 144 |
| | RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 145 |
| | CHAPITRE V. ANATOMIE DU BOIS DE CHÊNE | 149 |

| | | |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 1 | ANATOMIE DU BOIS DE CHÊNE | 151 |
| 1.1 | LE PLAN LIGNEUX DU BOIS DU CHÊNE..... | 151 |
| 1.1.1 | <i>Éléments verticaux</i> | 154 |
| 1.1.1.1 | Vaisseaux et trachéides vasicentriques | 154 |
| 1.1.1.2 | Les tissus fibreux..... | 155 |
| 1.1.1.3 | Parenchyme longitudinal..... | 156 |
| 1.1.2 | <i>Éléments horizontaux</i> | 157 |
| 1.1.2.1 | Rayons ligneux | 157 |
| 1.2 | CHANGEMENTS ANATOMIQUES LIÉS AU VIEILLISSEMENT DU BOIS..... | 159 |
| 1.2.1 | <i>Duraminisation</i> | 159 |
| 1.2.2 | <i>Thyllose</i> | 160 |
| 1.3 | RECONNAISSANCE DU BOIS DE CHÊNE ROUVRE ET PÉDONCULÉ..... | 161 |
| 1.4 | VARIABILITÉ DE BOIS DU CHÊNE ROUVRE ET PÉDONCULÉ | 163 |
| 1.5 | SOURCES DE VARIABILITÉ | 166 |
| 1.5.1 | <i>Largeur de cerne</i> | 166 |
| 1.5.2 | <i>Âge cambial</i> | 167 |
| 1.5.3 | <i>Espèce</i> | 168 |
| 1.5.4 | <i>Provenance</i> | 169 |
| 1.5.5 | <i>Arbre</i> | 170 |
| 2 | MATÉRIEL ET MÉTHODES..... | 171 |
| 2.1 | MESURES DES RAYONS LIGNEUX | 171 |
| 2.2 | MESURE DES AUTRES CARACTÉRISTIQUES ANATOMIQUES PAR ANALYSE D'IMAGE..... | 172 |
| 3 | RÉSULTATS ET DISCUSSIONS | 175 |
| 3.1 | TEXTURE | 175 |
| 3.1.1 | <i>Relations avec l'âge et la largeur de cerne</i> | 178 |
| 3.2 | PROPORTION DU BOIS INITIAL DANS LE CERNE..... | 180 |
| 3.3 | VARIATION DE LA LARGEUR DU BOIS INITIAL ET DU BOIS FINAL EN FONCTION DE LA LARGEUR DE CERNE..... | 184 |
| 3.4 | CARACTÉRISTIQUES DES RAYONS LIGNEUX PLURISÉRIÉS | 185 |
| 3.4.1 | <i>Largeur des rayons ligneux</i> | 185 |
| 3.4.2 | <i>Nombre de rayons ligneux</i> | 188 |
| 3.4.3 | <i>Proportion des rayons ligneux</i> | 191 |

| | | |
|-----------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 3.5 | PROPORTION DES FIBRES | 193 |
| 3.5.1 | <i>Relations avec l'âge et la largeur de cerne.....</i> | <i>196</i> |
| 3.6 | PROPORTION DES PARENCHYMES ET DES PETITS VAISSEAUX | 197 |
| 3.7 | CARACTÉRISTIQUES DES GROS VAISSEAUX DU BOIS INITIAL | 199 |
| 3.7.1 | <i>Proportion des gros vaisseaux</i> | <i>199</i> |
| 3.7.2 | <i>Nombre de gros vaisseaux.....</i> | <i>202</i> |
| 3.7.3 | <i>Surface individuelle des gros vaisseaux.....</i> | <i>204</i> |
| 3.7.4 | <i>Excentricité des gros vaisseaux.....</i> | <i>207</i> |
| 3.7.5 | <i>Nombre de rangées tangentielles des gros vaisseaux</i> | <i>210</i> |
| 3.8 | CONCLUSION | 214 |
| RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | | 215 |
| CHAPITRE VI. SYNTHÈSE..... | | 223 |
| 1 INFLUENCE DE L'ESPÈCE ET DE LA RÉGION..... | | 225 |
| 1.1 | EFFET DE L'ESPÈCE ET DE LA RÉGION SUR LE PROFIL DE DENSITÉ EN CONTRÔLANT LA LARGEUR DE CERNE ET L'ÂGE..... | 227 |
| 1.2 | APPROCHE PAR ANALYSES MULTIVARIÉES | 233 |
| 1.2.1 | <i>Analyses des composantes principales.....</i> | <i>233</i> |
| 1.2.2 | <i>Analyse factorielle discriminante.....</i> | <i>236</i> |
| 1.2.2.1 | Reconnaissance de l'espèce à partir de son bois | 236 |
| 1.2.2.2 | Reconnaissance de l'espèce à partir de son plan ligneux..... | 240 |
| 2 CONCLUSION..... | | 242 |
| CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES..... | | 243 |
| 1 CONCLUSION GÉNÉRALE | | 245 |
| 2 PERSPECTIVES..... | | 247 |

INTRODUCTION

Depuis une vingtaine d'années, du fait du renouveau de la pratique de l'élevage du vin en fûts neufs, tant en France qu'à l'étranger, le marché du merrain connaît une expansion remarquable par les forestiers. La demande annuelle de grumes de chênes pour la fabrication du merrain qui était tombée à 80.000 m³ durant les années 70, est remontée à 100.000 m³ au début de la décennie 80, pour atteindre 320.000 m³ en 2002, soit près de 10 % de la récolte en chêne français. En fait, d'après les professionnels environ 900.000 m³ doivent être mobilisés pour obtenir les 320.000 m³ aptes à la fabrication du merrain. Ainsi près d'un tiers de la récolte totale des grumes françaises est de près ou de loin concernée par le merrain. La concurrence est vive d'autant que la demande de merrain concerne actuellement surtout les bois à *grain fin*, c'est à dire à accroissements fins et de surcroît provenant de certaines origines prestigieuses comme Tronçais, Jupilles, les Bertranges, Darney... C'est ainsi que le chêne à merrain représente une part très importante des recettes des ventes des forêts domaniales (Lacroix, 1999). L'utilisation de 320.000 m³ de grumes de chêne correspond sur la base d'un rendement de 20 % à la production de 64.000 m³ de merrain, soit un potentiel d'environ 650.000 fûts d'une capacité de 228 litres qui se commercialisent à un prix unitaire de 500 €. La tonnellerie française qui est constituée de 55 entreprises (dont 20 emploient plus de 20 salariés) exporte plus de 60 % de sa production vers les pays du nouveau monde (Californie, Oregon, Australie, Afrique du Sud, Argentine, Chili...) ainsi qu'en Europe (Espagne, Italie, Allemagne, Suisse...).

Cette situation apparemment très favorable pour la filière bois pose néanmoins quelques questions quant à l'avenir du merrain fabriqué à partir de chênes français. On assiste depuis les années 90 à des importations de merrains et de barriques en provenance des États Unis (chêne blanc) et plus récemment d'Europe centrale et orientale (chêne rouvre et chêne pédonculé). La concurrence est donc ouverte, sur le marché français, comme sur le marché étranger même si le chêne français est toujours considéré comme l'optimum de la qualité pour l'élevage des vins. Toutefois, l'intérêt croissant de certains tonneliers français pour de nouvelles zones d'approvisionnements en Europe (Hongrie, Russie,...) moins onéreuses que les forêts françaises tempère cet optimisme.

Une expérimentation de grande envergure, intitulée "Chêne de Tonnellerie 2000", a été mise en place en France à l'automne 1996 (FEULLAT et *al.*, 1999). L'objectif était d'estimer et de préciser la qualité du bois des deux espèces de chêne, le chêne pédonculé (*Quercus robur*) et le chêne rouvre ou sessile (*Quercus petraea*), constituant une ressource

en bois feuillu d'une importance économique considérable, notamment pour leur aptitude à être utilisés en bois de tonnellerie.

Les principales questions qui se posaient étaient les suivantes :

- - La vitesse de croissance est-elle un descripteur suffisant des propriétés du bois de chêne de tonnellerie ?
- Les deux espèces botaniques ont-elles des propriétés différentes quant à leur bois ?
- À l'intérieur d'une même espèce, existe-t-il une influence de la provenance géographique du chêne sur les propriétés du bois ?

Un échantillonnage a donc été sélectionné durant l'hiver 1996–1997 qui constitue la base de nombreuses études coordonnées : il devait permettre de comparer notamment le chêne de bourgogne à d'autres origines françaises dont certaines très connues des merrandiers et tonneliers comme par exemple chêne du « Limousin » et le chêne de « Tronçais ». Au total 288 arbres ont été sélectionnés, dont 123 chênes « garantis » pédonculé et 165 « garantis » rouvre dans 9 régions (ou forêts) réputées pour la production de bois de tonnellerie. De ces arbres ont été tirés les merrains nécessaires à mener une expérimentation visant à étudier, en vraie grandeur, l'influence de l'origine botanique et géographique de chêne sur les caractéristiques du bois de merrain.

Dans le cadre de cette expérimentation, notre étude a consisté à étudier l'influence de l'espèce et de la provenance du chêne sur des caractéristiques anatomiques et physiques des merrains.

Pour répondre aux questions posées, nous avons caractérisé le bois de merrain à l'aide de mesures par analyse d'image, par microdensitométrie ainsi que par des techniques classiquement utilisées en anatomie et en physique du bois.

CHAPITRE I. MATERIEL ET MÉTHODES

1 Échantillonnage

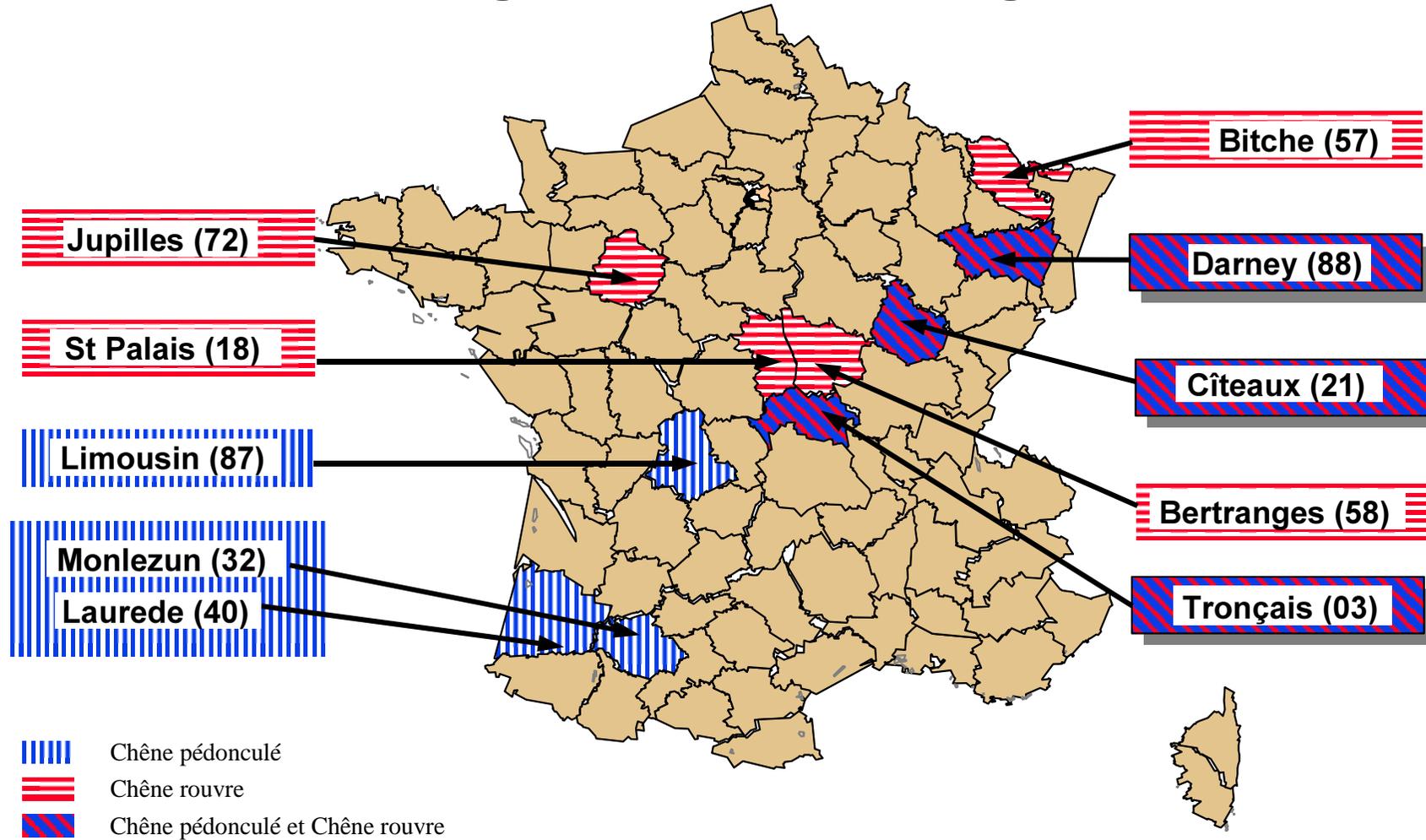
L'échantillonnage est constitué de 12 lots monospécifiques (7 lots de chênes rouvres et 5 lots de chênes pédonculés), de 24 arbres soit un total de 288 arbres (12 lots x 24 arbres). Les arbres ont été sélectionnés dans 9 origines géographiques traditionnellement productrices de bois à merrain, les arbres ont été coupés entre octobre 1996 et janvier 1997 (Carte 1) :

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Bertranges (58) | 1 lot de 24 chênes rouvres (B1-B24) |
| 2. Bitche (57) | 1 lot de 24 chênes rouvres (Bi1-Bi24) |
| 3. Cîteaux (21) | 1 lot de 24 chênes rouvres (C1-C12, C37-C48) 1 lot de 24 chênes pédonculés (C13-C36) |
| 4. Darney (88) | 1 lot de 24 chênes rouvres (D25-D48) 1 lot de 24 chênes pédonculés (D1-D24) |
| 5. Jupilles (72) | 1 lot de 24 chênes rouvres (J1-J24) |
| 6. Limousin (87) | 1 lot de 24 chênes pédonculés (Li1-Li24) |
| 7. Monlezun, Laurède (32, 40) | 1 lot de 24 chênes pédonculés (M1-M24) |
| 8. Saint Palais (18) | 1 lot de 24 chênes rouvres (S1-S24) |
| 9. Tronçais (03) | 1 lot de 24 chênes rouvres (T25-T48) 1 lot de 24 chênes pédonculés (T1-T24) |

Les forêts de Cîteaux, Darney et Tronçais étaient représentées à la fois par du chêne pédonculé et par du chêne rouvre ; celles de Bertranges, Bitche, Jupilles et Saint Palais se composaient uniquement de chêne rouvre et les forêts du Limousin et du Sud-Ouest (Monlezun et Laurède) n'étaient représentées que par du chêne pédonculé.

Sur les 12 lots, dix provenaient de forêts domaniales (Bitche, Darney, Cîteaux, Tronçais, Bertranges, Saint Palais et Jupilles), un de forêts communales du Sud-Ouest (Monlezun dans le Gers et Laurèdes dans les Landes) et un de forêts privées du Limousin (deux sites en Haute-Vienne). Cet échantillonnage couvre ainsi les principales zones d'approvisionnement en chênes à merrain français à l'exception de la Normandie.

Régions d'échantillonnage



Carte 1 : Répartition des régions d'échantillonnage sur la carte de France

1.1 Choix des milieux

Dans chaque forêt le choix a été effectué dans deux types stationnels (Tableau 1), sauf à Cîteaux (où il y a trois types stationnels), de 12 arbres par type et de deux arbres par placette ce qui donne le protocole suivant :

1 lot de 24 arbres = 2 types stationnels x 6 placettes x 2 arbres.

Huit remplaçants ont été prévus pour chaque lot, soit 4 arbres par type stationnel pour éviter d'éventuelles surprises : pourritures, roulures, ... détectées après l'abattage des arbres.

La distance entre deux arbres dans une même placette est de quelques dizaines de mètres, tandis que 2 placettes sont distantes de 500m au minimum.

| Provenance | Espèce | Types stationnels |
|-------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Bitche (Moselle) | rouvre | (1) Chênaie hêtraie acidiphile sur sol brun sur plateau, croupes ou versants Nord et Est |
| | | (2) Chênaie sessiliflore acidiphile à pin sylvestre sur sol ocre podzolique sur versants sud et ouest |
| Darney (Vosges) | rouvre et pédonculé | (1) Chênaie sessiliflore à hêtre sur grès coquilliers et limons |
| | | (2) Chênaie à charme sur argiles et/ou limons épais |
| Cîteaux (Côte d'Or) | rouvre et pédonculé | (1) Chênaie hêtraie charmaie mésoacidiphile sur limons argileux |
| | | (2) Chênaie hêtraie charmaie acidiline sur limons argileux |
| | | (3) Chênaie charmaie frênaie sur colluvions de fonds de vallons |
| Tronçais (Allier) | rouvre et pédonculé | (1) Chênaie charmaie mésoacidiphile sur sol brun faiblement lessivé à brun acide |
| | | (2) Chênaie charmaie acidiline sur sol brun mésotrophe |
| Bertranges (Nièvre) | rouvre | (1) Chênaie hêtraie à charme de plateau sur limons et argiles |
| | | (2) Chênaie charmaie hêtraie acidiline à mésoacidiphile de plateau sur limons et argiles. |
| St. Palais (Cher) | rouvre | (1) Chênaie sessiliflore à charme sur limons |
| | | (2) Chênaie sessiliflore hêtraie sur limons |
| Jupilles (Sarthe) | rouvre | (1) Chênaie sessiliflore acidiphile sur limons épais |
| | | (2) Chênaie sessiliflore acidiline sur limons moyennement épais |
| Limousin (Haute-Vienne) | pédonculé | (1) Chênaie chataîgneraie acidiphile à houx |
| | | (2) Chênaie chataîgneraie acidiphile à houx |
| Montlezun (Gers) Laurède(Landes) | pédonculé | (1) Chênaie pédonculée frênaie à noisetier sur alluvions récentes argilo-limoneuses du Midour |
| | | (2) Chênaie pédonculée frênaie à noisetier sur alluvions récentes argilo-limoneuses de l'Adour |

Tableau 1: Échantillonnage en fonction des régions et des types de station.

1.2 Choix des arbres

Le choix des arbres sur le terrain a été fait au cours de l'hiver 1996-1997 (saison de l'abattage des arbres) d'après les critères suivants :

- Morphologie caractéristique de l'espèce : écorce, cylindricité du tronc, allure du houppier, branchaison et surtout observation systématique des glands se trouvant dans la litière sous les houppiers en vue de confirmer l'espèce ;
- Caractéristiques de la bille de pied : diamètre compris entre 50 et 85 cm, les 3 premiers mètres (au minimum) correspondant à la qualité « merrain » (droit fil, faible courbure et faible nodosité, absence de gélivures, picots et pourritures visible).

1.3 Abattage et débit des arbres

Les 288 arbres sélectionnés et abattus ont été répartis entre 7 merrandiers pour être débités selon le protocole présenté sur la Figure 1.

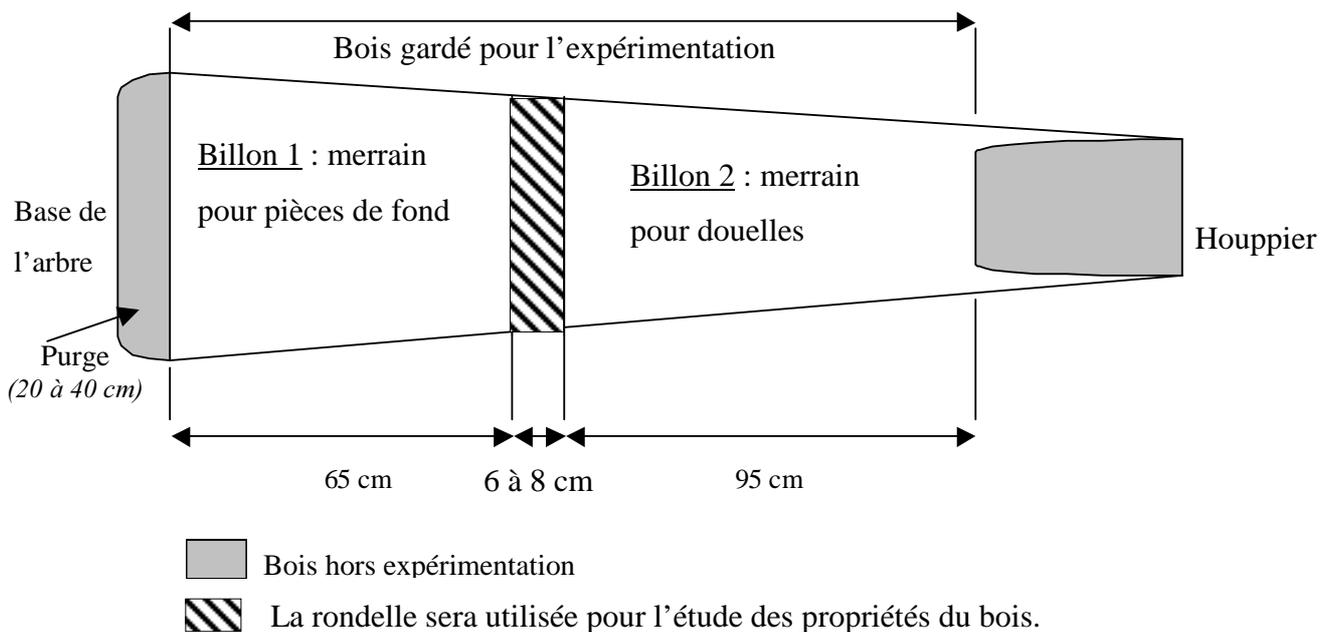


Figure 1 : Mode de débit d'une grume

Après tronçonnage à la longueur souhaitée, les billons 1 et 2 ont été débités en merrain selon la technique traditionnelle de la fente (plan longitudinal-radial) dite "douelle à douelle" ; dans chaque quartier, on tire un merrain pour douelle ou fond. Les caractéristiques dimensionnelles des merrains "verts" délimités à la scie dans les quartiers fendus sont données dans le Tableau 2.

| longueur (cm) | largeur (cm) | épaisseur (mm) | Deux types de merrains |
|---------------|--------------|----------------|------------------------|
| 65 | 11 | 30 | pour pièces de fonds. |
| 95 | 11 | 30 | pour douelles. |

Tableau 2 : Les dimensions des merrains

Dans chaque billon, 10 merrains ont été sélectionnés avec une répartition régulière sur la circonférence, dans la partie la plus externe du duramen, dont 2 merrains supplémentaires pour faire face à d'éventuelles pertes lors du séchage (fentes,...) et pour remplacer d'éventuelles douelles "poreuses",...(Figure 2)

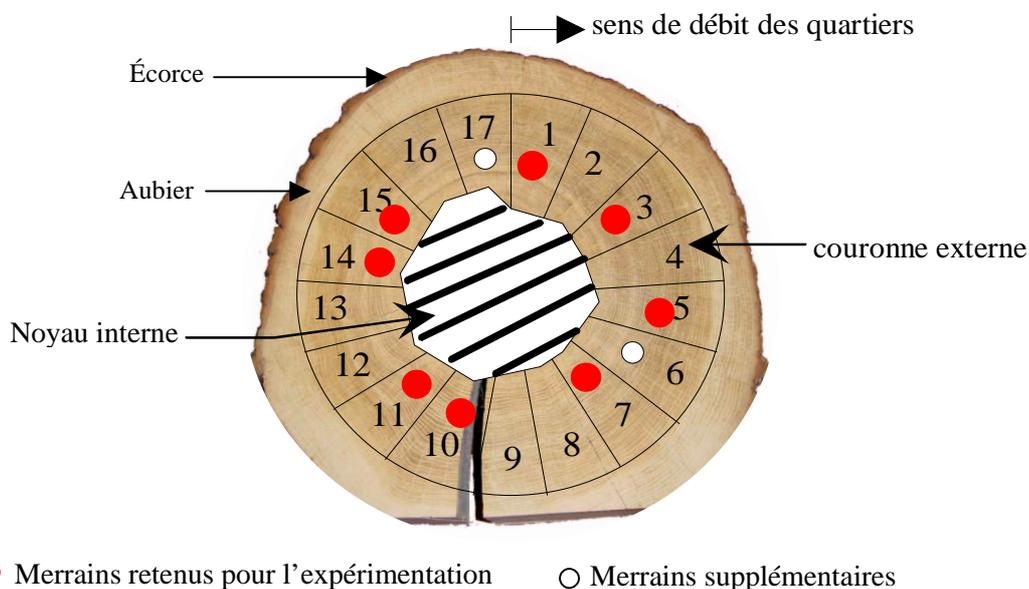


Figure 2 : Débit d'un billon (vue en coupe transversale)

Dans les quelques arbres pour lesquels il n'a pas été possible d'obtenir les 10 merrains par billon à cause de défauts (roulures, gales, fibre torse...), les manquants ont été débités dans un (ou deux) billons supplémentaires.

Une rondelle de 6 à 8 cm d'épaisseur a été prélevée entre le billon 1 et le billon 2. Elle était destinée à l'études des propriétés du bois dans la zone "merrain" :

- Structure anatomique ;
- Composition en extractibles ;
- Propriétés physiques ;
- Propriétés mécaniques ;
- Propriétés sensorielles.

2 Morphologie foliaire des arbres

2.1 Données bibliographiques sur la reconnaissance des chênes

Les deux espèces botaniques, *Quercus petraea* Liebel. (chêne rouvre ou sessile) et *Quercus robur* L. (chêne pédonculé) sont bien décrites et distinguées scientifiquement depuis longtemps. Parfois cependant elles sont confondues, et sur le terrain et dans les statistiques, en une seule espèce « le chêne ».

Les principaux caractères qui les distinguent sont :

- les feuilles à longs pétioles et les fruits à pédoncules courts chez le chêne rouvre ;
- les feuilles à courts pétioles et les fruits à longs pédoncules chez le chêne pédonculé (P. SIGAUD, 1986).

Une analyse factorielle des correspondances sur 34 variables morphologiques de la feuille (les variables les plus discriminantes : pilosité, nombre de nervures intercalaires, longueur du pétiole, longueur et diamètre du pédoncule...) des chênes rouvre, pédonculé et pubescent du Nord-Est de la France, a montré une très nette séparation des chênes rouvre et pédonculé avec seulement 3,5% individus morphologiquement intermédiaires et une séparation totale du chêne pubescent et du chêne pédonculé (J.L. DUPOUEY et V. BADEAU, 1993)

Une étude sur 694 chênes rouvres et pédonculés a montré que la séparation des chênes rouvres des chênes pédonculés peut ne reposer que sur deux caractères foliaires : la longueur du pétiole et le nombre des nervures intercalaires. L'analyse multivariée a montré qu'il y a moins de 5% d'individus morphologiquement intermédiaires entre les deux espèces (BADEAU et al., 2000).

KREMER et al. 2002, travaillant sur 9 peuplements mixtes de chênes (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) en Europe soit 170 arbres / espèce / peuplement, ont proposé une méthode d'identification rapide fondée sur les deux caractères les plus discriminants (nombre de nervures intercalaires et longueur de pétiole). Cette méthode a été validée sur d'autres échantillonnages ; 98% des individus étaient correctement identifiés.

La différenciation des deux chênes rouvre et pédonculé est aussi possible grâce à d'autres critères morphologiques, tels que : les fleurs, les bourgeons, les rameaux, le houppier, le

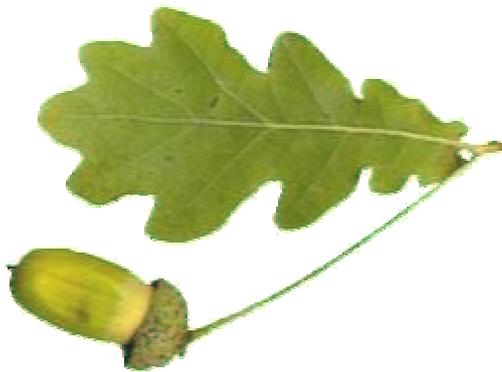
tronc, l'écorce et les feuilles. D'après l'ONF, les études confirment l'existence de deux espèces de chênes séparées, avec une proportion d'individus morphologiquement intermédiaires inclassable toujours inférieure à 5%.

Pour les distinguer l'ONF utilise certains caractères de reconnaissance (guide de reconnaissance, 1997) :

➤ **Les caractéristiques botaniques fondamentales**

Rappelons tout d'abord que les critères de détermination les plus fiables sont pour la plupart inaccessibles matériellement au forestier de terrain. Il s'agit, par exemple, de la pilosité des nervures foliaires, observable uniquement à la loupe binoculaire. La reconnaissance pratique doit de ce fait s'appuyer sur un ensemble de caractères distinctifs plus ou moins bien marqués. Elle est bien sûr plus aisée en été, à partir de la forme des feuilles et des fruits.

Chêne pédonculé

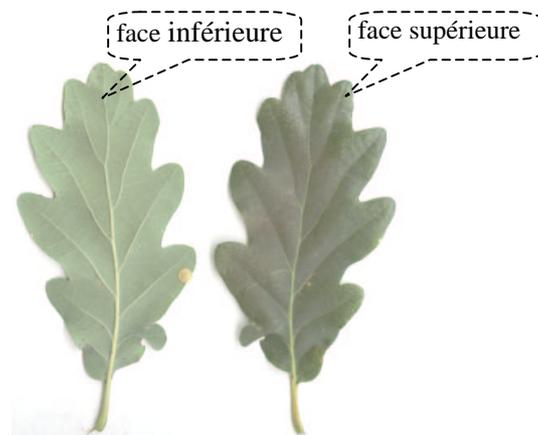
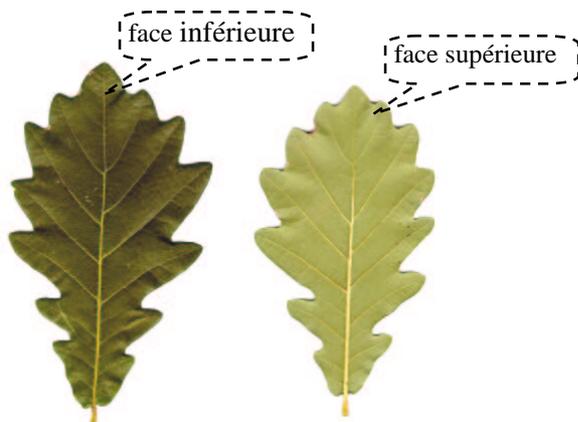


Chêne rouvre (ou sessile)



Les glands

- Insérés sur un long pédoncule (18 à 90 mm en moyenne) ;
- Allongés et lourds (200 à 400 glands / kg).
- Lignes longitudinales foncées visibles.
- Sessiles, pédoncule très court (moins de 6 mm) ;
- Ovoïdes, plus trapus et moins lourds : (300 à 600 glands / kg) ;
- Absence de lignes longitudinales foncées.



Les feuilles

- Gauffrées, faces supérieure et inférieure mates.
- Plates, face supérieure luisante, face inférieure mate, pileuse.

Forme du limbe

- Peu régulière, peu symétrique, deux petites oreillettes à la base, lobes irréguliers.
- Symétrique et régulière, atténuation variable en coin à la base, lobes réguliers et nombreux.

Pétiole

- Très court (moins de 7 mm en moyenne), en partie masqué par les oreillettes ;
- Plus long (plus de 12 mm en moyenne) bien visible ;
- Feuilles disposées en bouquets.
- Les feuilles sont détachées les unes des autres.

Nervures

- Secondaires bien visibles, plus ou moins régulièrement disposées ;
- Secondaires moins marquées mais de disposition plus régulière ;
- Présence de nervures intercalaires irriguant les sinus.
- Absence de nervures intercalaires.

➤ **Reconnaissance par l'image-type (arbre adulte)**

L'aspect de l'arbre varie en fonction de son patrimoine génétique, de son passé sylvicole et de son âge. Les images-types présentées ici devront être adaptées aux conditions locales. Un tour d'horizon visuel est souhaitable. Les caractères s'appliquent exclusivement aux arbres adultes (diamètre > 30 cm). Les symptômes de dépérissement (feuillaison réduite, rameaux en fouet) modifient évidemment les caractères distinctifs de reconnaissance par le feuillage et la ramification.

Chêne pédonculé

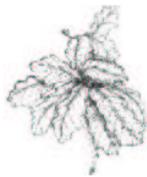


Chêne rouvre (ou sessile)



À l'état feuillé

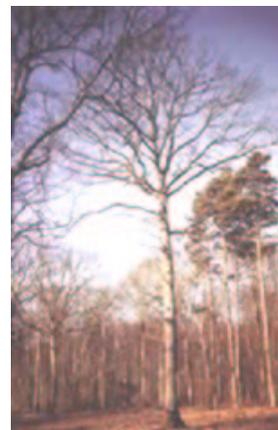
- Feuilles indiscernables sous le houppier,
- groupées en rosettes ;
- Vert clair et mat (de loin).



- Feuilles à long pétiole, discernables sous le houppier et en périphérie ;
- Réparties de façon homogène ;
- Vert foncé et brillant (de loin).



À l'état défeuillé



Houppier

- Rameaux courts agglomérés en "griffes de chat" ;
- Houppier irrégulier ;
- Grosses branches coudées fréquentes.
- Branchaison et rameaux régulièrement décroissants ;
- Forme du houppier typique en éventail ;
- Insertion aiguë des branches.



Tronc

- Droit et cylindrique.



- Parfois flexueux et conique.

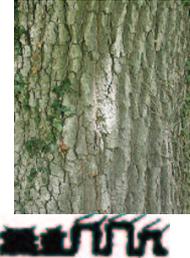


Écorce

- Crevasses profondes, recoupées par des fissures transversales ;
- Plaquettes trapézoïdales massives à pente lisse ;
- Couleur homogène claire.



- Écorce typique en fines lanières longitudinales ;
- Plaquette à section carrée ;
- Tendance à la desquamation ;
- Couleur brune, assez sombre et bigarrée.



Litière

- Gauffrée et rousse.



- Plate et brune, longs pétioles bien visibles.



➤ Exigences stationnelles en forêt

Le chêne pédonculé à l'état d'arbre isolé ou peu concentré se comporte comme une espèce plastique et rustique, qui s'accommode de pratiquement tous les types de milieux. Par contre, il devient plus exigeant en peuplement forestier fermé, pour être en mesure de faire face à la concurrence plus forte. Inversement, même en chênaie dense, le chêne rouvre est plus social, et seul le hêtre, s'il est présent, lui dispute durablement le terrain.

Les deux chênes sont capables de prospector les argiles compactes.

Chêne pédonculé

Chêne rouvre (ou sessile)

Besoin en eau

- Exigence stationnelles élevées : alimentation en eau constante en été. Il supporte les sols à engorgement permanent en eau : gleys (système racinaire adapté) mais résiste mal aux situations de sécheresse
- Résiste aux périodes estivales sèches : il réagit très bien aux travaux d'assainissement ou de drainage. Il se maintient sur sols filtrants ou à nappe temporaire (si réserve utilisable suffisante). Il tolère les sols lessivés hydromorphes.

Lumière

- Héliophile dès le semis, le chêne pédonculé a un comportement d'essence pionnière ;
- Il ne tolère pas la concurrence au niveau du houppier.
- Héliophile à l'état adulte, ses semis supportent mieux que ceux du pédonculé les milieux ombragés.

Richesse minérale

- L'optimum minéral de l'espèce se trouve dans les milieux alluviaux très fertiles ;
- Le pédonculé est plus exigeant que le rouvre.
- On rencontre le rouvre dans des milieux très variés acides à calcaires (en ce cas, en association avec le chêne pubescent) ;
- L'optimum minéral de l'espèce se situe dans les milieux légèrement acides.

Optimum écologique

- Milieux alluviaux avec présence de nappe phréatique en surface ; chênaie-frênaie ;
- Autres stations à sols profonds, riches et frais.
- Milieux faiblement acides à acides.

Milieus déconseillés

- Sols à régime hydrique contrasté (pseudogleys et pélosols notamment) ;
- Sols sec en été en général.
- Gleys, milieux alluviaux en particulier ;
- Sols à engorgement superficiel fréquent.

2.2 Méthodologie

La sélection des arbres a été effectuée à l'état défeuillé en s'appuyant sur des critères morphologique caractéristique de l'espèce (écorce, houppier, branchaison...) la détermination de l'espèce sur arbres défeuillés n'est pas totalement fiable en particulier lorsque les glands au sol sont rares voire absents (cas rencontré à Darney). Afin de vérifier à posteriori l'espèce à partir des caractères foliaires qui avaient disparu, ceci du à la saison hivernale, et qui, eux, sont discriminants, une opération de greffage des rameaux terminaux des arbres sélectionnés et abattus, a été mise en place entre le 20 janvier et le 15 avril 1997. les arbres ont été repérés à la peinture en utilisant un code (lettre de provenance et numéro d'arbre)

1440 greffes (5 répétitions x 288 arbres) ont été réalisées en avril 1997 sur des porte-greffes de chênes pédonculés de deux ans, selon la technique mise au point par l'I.N.R.A. de Champenoux (LEMAIRE, 1998). Après deux saisons de végétation (septembre 1999), 540 greffes ont repris représentant ainsi 224 arbres (64 arbres n'étaient donc plus présentés sous forme de greffes).

Sur les conseils de J.L. DUPOUEY, dix feuilles par greffe ont été récoltées dans la partie médiane de la pousse de l'année sur lesquelles trois bons caractères discriminants ont été mesurés (Figure 3):

- ✓ longueur du pétiole (partie de la feuille qui relie le limbe à la tige) ;
- ✓ nombre de nervures intercalaires (nervure secondaire insérée sur la nervure principale et irriguant un sinus principal, et au moins aussi long que la demie distance base de la nervure/base de sinus) ;
- ✓ pilosité de la surface inférieure du limbe (notation en classes), les densités sont estimées par rapport à des échelles graphiques de référence (d'après BADEAU, 1990). Les 10 classes vont de 0 (glabre) à 9 (entièrement couvert de poils). On retient la classe moyenne observée sur l'ensemble de l'échantillon.

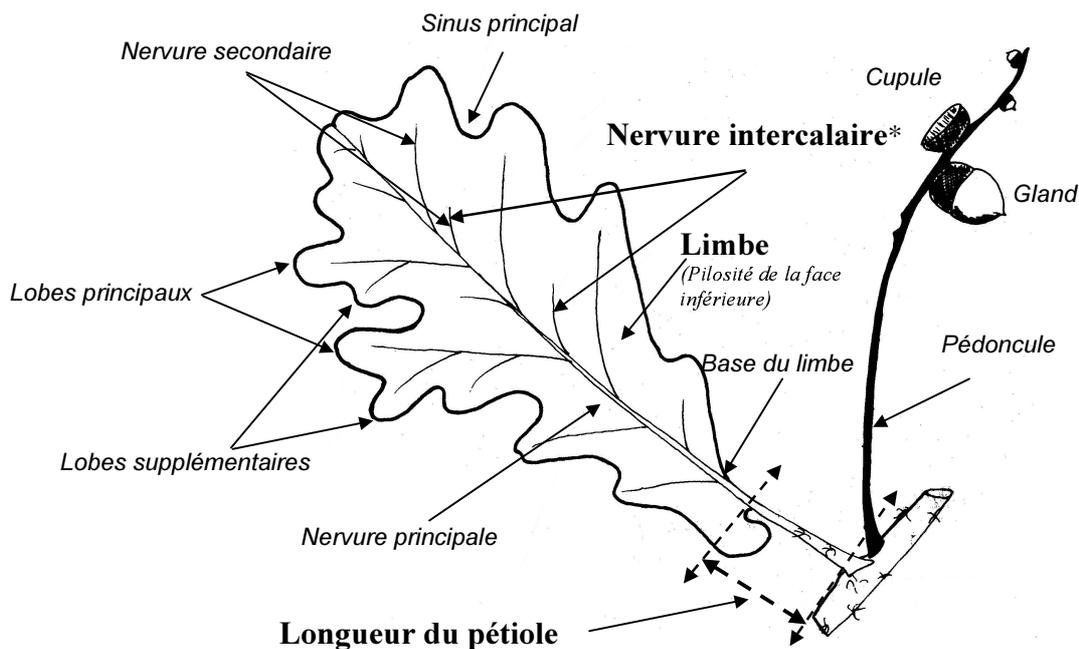


Figure 3 : Principaux caractères morphologiques foliaires discriminants entre les deux chêne (dessin d'après G. GRANDJEAN, P. SIGAUD, 1987)

* Les nervures intercalaires sont les nervures secondaires qui irriguent les sinus.

2.3 Résultat et discussion

Pour vérifier l'identification de nos arbres sélectionnés à partir de leurs critères foliaires nous avons réalisé des analyses statistiques en deux étapes :

- ✓ Sur l'identification pratiquée sur le terrain ;
- ✓ Sur les arbres reclassés.

2.3.1 Analyse des données recueillies sur le terrain

Une fonction discriminante $I = 407 \cdot ni - 130 \cdot lpet + 357$, basée sur deux critères foliaires tels que la longueur du pétiole ($lpet$) et le nombre moyen de nervures intercalaires (ni), proposée par BADEAU et *al.* (2000), permet de situer les chênes pédonculés typiques ($I > 500$), les chênes rouvres typiques ($I < - 500$) et les chênes intermédiaires ($500 > I > - 500$). Les chênes morphologiquement intermédiaires ne représentent alors que 4,5%.

La Figure 4 montre que neuf arbres ont été mal identifiés sur le terrain :

- huit arbres provenaient de la forêt de Darney dont cinq chênes rouvres (D30, D32, D34, D37 et D38) et trois chênes pédonculés (D04, D15 et D17) ;
- un arbre rouvre provenait de la forêt de Cîteaux (C09) (Figure 4).

La concentration des erreurs d'identification sur le massif de Darney peut être expliquée par la morphologie typique des arbres (branchaison, écorce...) et par la rareté des glands présents au sol lors de la campagne de sélection.

Les lots de ces deux forêts ne diffèrent que d'un ou deux arbres par rapport au nombre "théorique" initial qui est 24 arbres par lot.

Ces neuf arbres ont été reclassés pour les analyses suivantes.

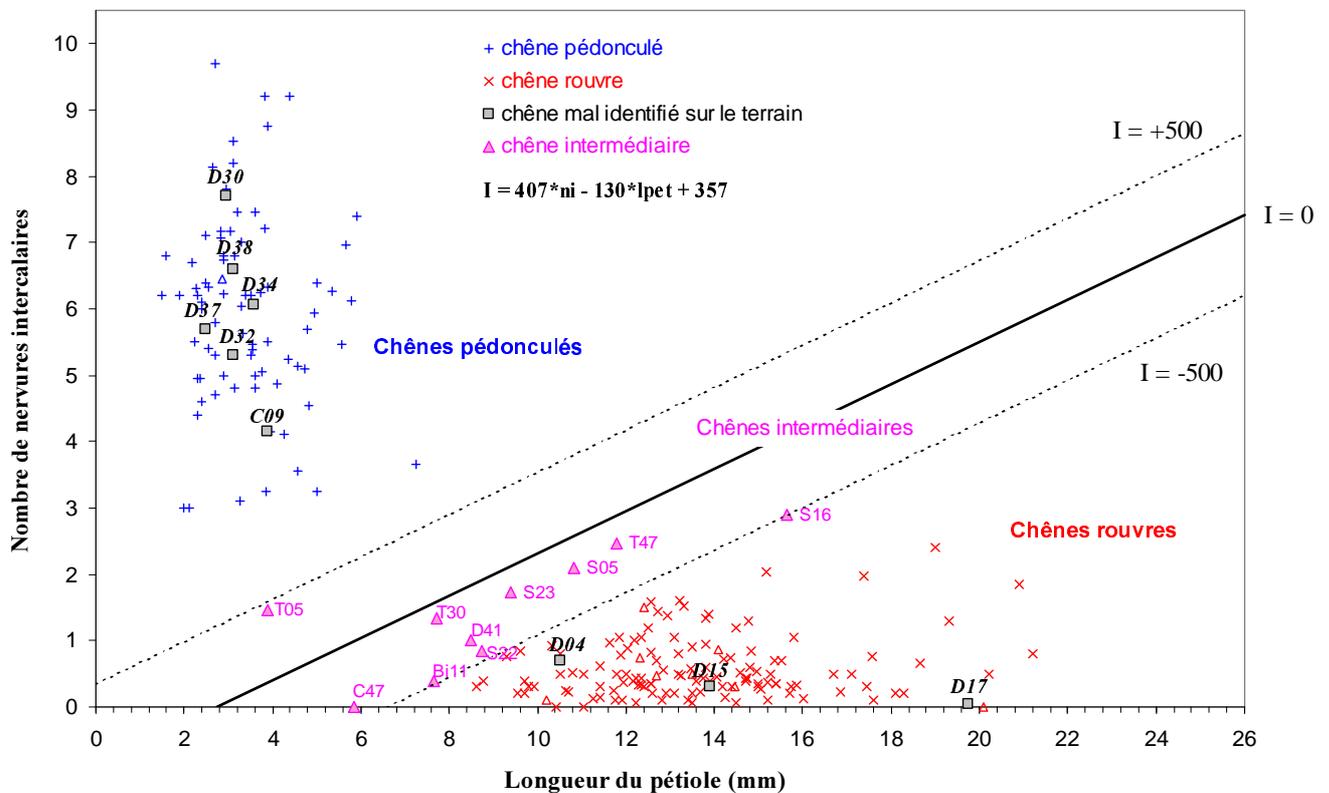


Figure 4 : Répartition de 224 arbres représentés par au moins une greffe en fonction de deux caractères : longueur moyenne du pétiole et nombre moyen de nervures intercalaires

2.3.2 Analyse sur les données après reclassement des neuf arbres

Le Tableau 3 montre la statistique de base pour chaque variable morphologique, selon chaque espèce et pour l'ensemble des arbres.

| critère | Espèce chêne | moyenne | écart-type | minimum | maximum | coefficient de variation % |
|-------------------------------------|-----------------|---------|------------|---------|---------|-------------------------------|
| Longueur du pétiole (mm) | Rouvre | 13,38 | 2,78 | 5,83 | 21,2 | 21 |
| | Pédonculé | 3,43 | 1,08 | 1,5 | 7,25 | 31 |
| Nombre de nervures intercalaires | Rouvre | 0,63 | 0,54 | 0,00 | 2,9 | 86 |
| | Pédonculé | 5,89 | 1,51 | 1,47 | 9,70 | 26 |
| Pilosité | Rouvre | 6,66 | 1,62 | 1,00 | 9,00 | 24 |
| | Pédonculé | 1,10 | 1,52 | 0,00 | 8,20 | 138 |

Tableau 3 : Statistique descriptive des caractéristiques foliaires des 140 chênes rouvres et de 84 chênes pédonculés

Nous remarquons que :

- la longueur moyenne du pétiole et la pilosité sont plus élevées chez les chênes rouvres que chez les chênes pédonculés,
- le nombre moyen de nervures intercalaires est plus faible chez les chênes rouvres que chez les pédonculés,
- la variation de la longueur de pétiole est plus importante chez les pédonculés, mais en revanche le nombre de nervures intercalaires varie plus chez les chênes rouvres que chez les chênes pédonculés.

Après avoir reclassé les neuf arbres mal identifiés sur le terrain, une analyse factorielle discriminante, à l'aide du logiciel "Statgraphique", sur les trois variables mesurées a été réalisée pour savoir s'il existe des différences entre les deux espèces et si tous les arbres sont statistiquement bien classés.

2.3.2.1 Analyse factorielle discriminante sur les trois variables regroupées

D'après le Tableau 4, le lambda de Wilks = 0,07 (très proche de 0), la discrimination des deux espèces est donc possible :

| valeur propre | inertie | lambda de Wilks * | degrés de liberté | probabilité |
|---------------|---------|-------------------|-------------------|-------------|
| 14,18 | 100 % | 0,07 | 3 | 0,001 % |

*le Lambda de Wilks Λ prend des valeurs dans l'intervalle 0 (discrimination parfaite) à 1 (pas de discrimination).

Tableau 4 : Analyse factorielle discriminante sur trois variables

Nous constatons, qu'en prenant en compte les trois variables morphologiques, tous les arbres sont bien répartis selon leur espèce (Tableau 5)

| espèce actuelle | taille du groupe | espèce prédite | |
|-----------------|------------------|----------------|--------------|
| | | P | R |
| pédonculé | 84 | 84 100 % | 0 |
| rouvre | 140 | 0 | 140 100 % |

Tableau 5 : Répartition des observations selon l'espèce

Le graphique en 3 D (Figure 5) montre qu'il y a bien deux groupes distincts, on peut donc affirmer qu'il existe des différences entre les deux espèces étudiées.

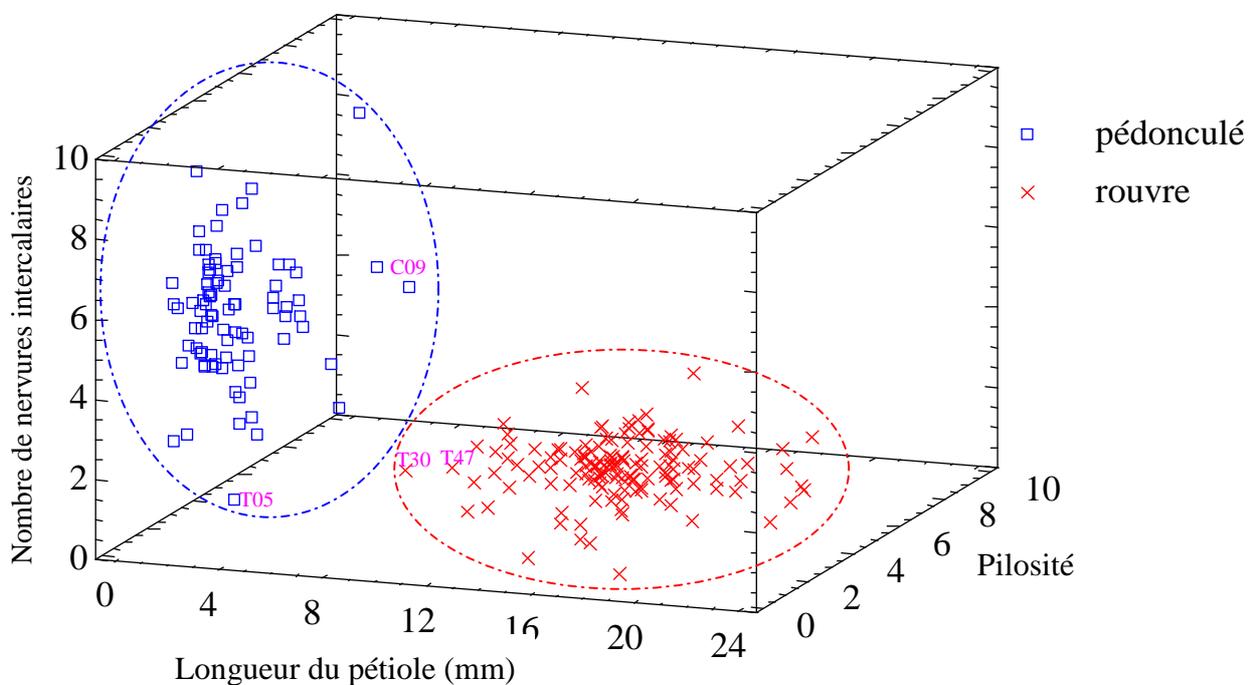


Figure 5 : Répartition des 224 arbres en fonction de 3 caractères foliaires : longueur du pétiole, pilosité et le nombre de nervures intercalaires

Étant donné que l'analyse factorielle discriminante sur les trois variables foliaires a permis de discriminer à 100% les deux espèces rouvre et pédonculé, nous allons dans la suite garder la provenance d'origine pour les arbres classés intermédiaires d'après la fonction discriminante proposée par BADEAU et *al.* (2000) (Figure 4).

D'autres analyses factorielles discriminantes faites sur des groupes de deux variables (Tableau 6) montre que la discrimination est excellente avec deux caractères foliaires seulement. Nous constatons que le taux de discrimination des deux espèces est plus variable, cependant il est meilleur quand il s'agit de la longueur de pétiole avec le nombre de nervures intercalaires.

| variables | L0 | taux de discrimination | | arbres mal classés | | % arbres mal classés |
|------------|------|------------------------|-----------|--------------------|----------------------|----------------------|
| | | rouvre | pédonculé | rouvre | pédonculé | |
| Lpet * ni | 0,08 | 100 | 98,8 | | T05 | 1 |
| Pil * Lpet | 0,10 | 98,6 | 89,8 | T30, T47 | C09 | 1,3 |
| Pil * ni | 0,11 | 99,3 | 96,4 | T47 | C09, C22, T05 | 1,8 |

Tableau 6 : Résultats des analyses discriminantes effectuées sur les critères foliaires

2.4 Conclusion

- Suite à la reconnaissance sur le terrain des arbres à l'état défeuillé, l'étude réalisée sur les greffes par mesure de trois caractères foliaires a permis de mettre en évidence 9 erreurs d'identification de l'espèce. Les 9 arbres ont été dans la suite de notre étude réaffectés dans leurs espèces ;
- La fonction discriminante basée sur trois caractères nous a permis de discriminer parfaitement l'espèce des 224 arbres étudiés ;
- La discrimination des deux espèces à partir de deux critères foliaires seulement est excellente (Figure 6) ;

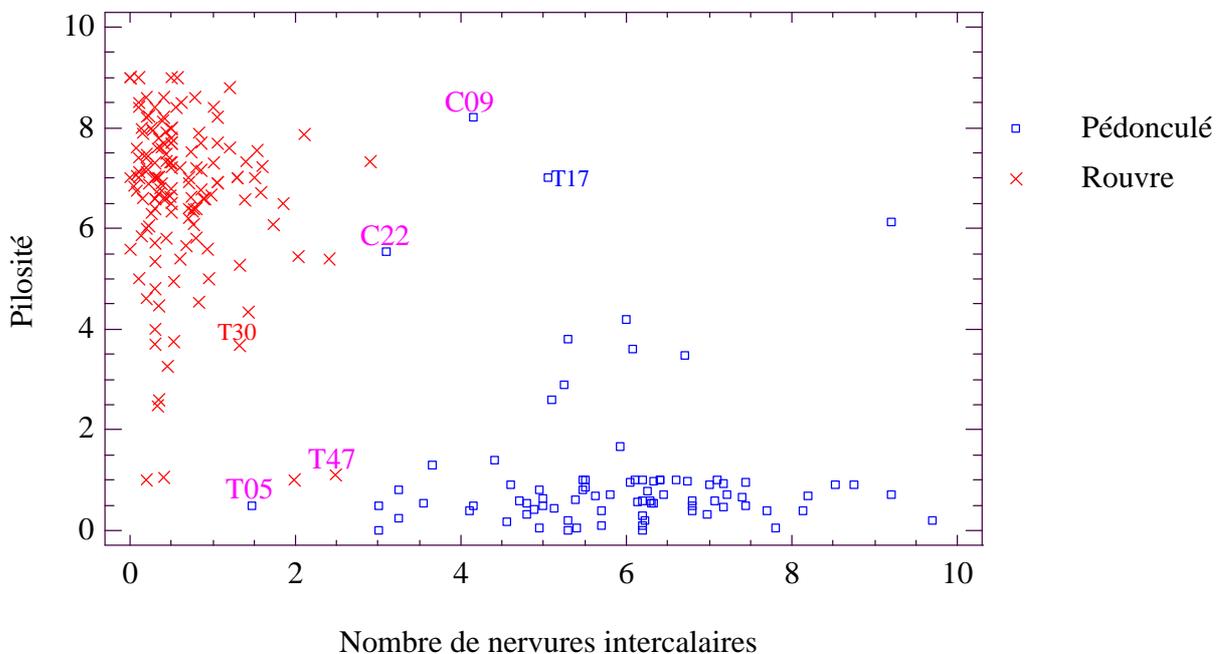


Figure 6 : Répartition des chênes rouvres et pédonculés en fonction de la pilosité et du nombre de nervures intercalaires

- Ceci nous a permis de montrer que le chêne rouvre a une longueur moyenne du pétiole et une pilosité moins variable que le chêne pédonculé. En revanche, la variation du nombre moyen des nervures intercalaires est moins marquée chez le chêne pédonculé.

- Le reclassement fréquent des arbres : C09, C22, T05, T30 et T47 dans le lot des arbres mal classés ou intermédiaires est expliqué par les valeurs extrêmes de certains de leurs critères foliaires, par exemple :
- C09 présente la valeur maximale de la pilosité chez les pédonculés ;
 - T05 représente la valeur minimale du nombre des nervures intercalaires ;
 - T30 a un pétiole un peu court (7,7 mm) par rapport à la longueur moyenne du pétiole chez les chênes rouvres (11,8 mm).
- Les critères foliaires des chênes rouvres et pédonculés sont très différents, donc la séparation des deux espèces à partir de ces critères est réalisable avec un bon indice de confiance.

3 Étude des propriétés du bois

3.1 Matériel et méthodes

3.1.1 Préparation des échantillons

Sur chaque arbre, une rondelle de 6 à 8 cm d'épaisseur, située en moyenne à 0,90 m de hauteur, a été prélevée pour étudier les propriétés du bois. À partir de ces rondelles qui ont été entreposées à l'ENGREF, un barreau de 8 cm de largeur contenant la moelle et correspondant au plus grand diamètre de la rondelle (voir le Protocole d'échantillonnage) a été découpé puis divisé en trois morceaux « jumeaux » pour l'étude de différentes caractéristiques du bois :

1. La composition chimique étudiée à l'UMR – Science pour l'Œnologie Biopolymères et Arômes de l'INRA de Montpellier ;
2. Les tests sensoriels par flairage effectués à l'ENSBANA, par l'équipe de Biochimie et Propriétés Sensorielles des Aliments à l'ENSBANA (École Nationale Supérieure de Biologie Appliquée à la Nutrition et à l'Alimentation) de Dijon ;
3. Les propriétés anatomiques et physiques réalisées au LERMAB (Laboratoire d'Études et de Recherche sur le Matériau Bois) de l'ENGREF de Nancy.

La zone d'étude correspondante au bois utilisé pour la fabrication des merrains, se situe dans la partie externe du duramen et s'étend sur 10 cm à partir de la limite aubier-duramen.

3.1.2 Études anatomique et physique

Deux barrettes ont été découpées dans le plan radial - tangentiel de deux épaisseurs différentes, 2 mm et 5 mm, à l'aide de trois scies circulaires montées en parallèle qui permettent d'avoir une épaisseur uniforme sur toute la longueur des barrettes (l'erreur étant de $\pm 0,05$ mm) (KLUMPERS 1994). Le sens de sciage est de l'aubier vers le cœur :

- ✓ Les barrettes sciées d'épaisseur 5 mm ont été utilisées pour les mesures de l'infradensité ;
- ✓ Les barrettes de 2 mm d'épaisseur qui ont servi pour la radiographie, ont été placées entre deux presses en bois pour garder leur rectitude, et ont été stockées dans une chambre conditionnée à 12% d'humidité.

Ces dernières ont été soumises à l'exposition de rayons X en utilisant un film radiographique à grain fin (film KODAK industrex M) selon les conditions suivantes :

- distance source - film : 2,50 m ;

- intensité du flux : 10 mA ;
- tension accélératrice : 10 kV ;
- temps d'exposition : 8 heures.

Les procédures du développement des radiographies sont les suivantes :

- le film est mis dans un révélateur pendant 20 minutes à 20°C ;
- rincé à l'eau ;
- puis il est mis dans un bain d'arrêt pendant 5 minutes ;
- et rincé à l'eau pendant 15 minutes au moins ;
- rincé dans de l'eau déminéralisée ;
- mis dans un bain de mouillant pour enlever d'éventuelles traces de calcaire ;
- puis séchage pendant 24 heures.

Pour étalonner le densitomètre, une cale en kémetal à trois paliers plus une cale progressive de composition atomique connues ont été placées au milieu de chaque radiographie et irradiées en même temps que les barrettes de bois (Figure 7).

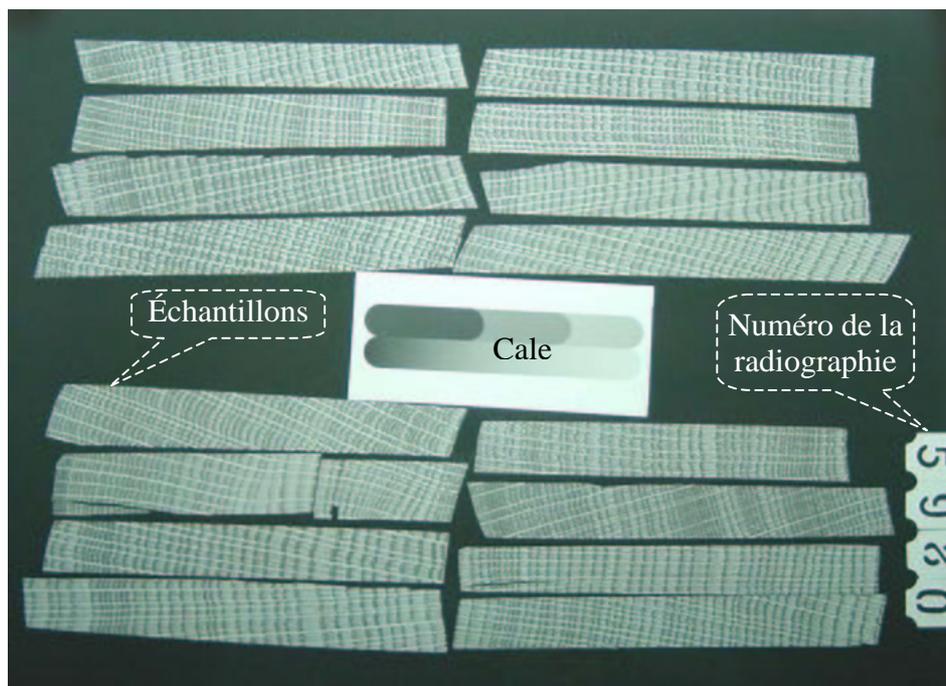
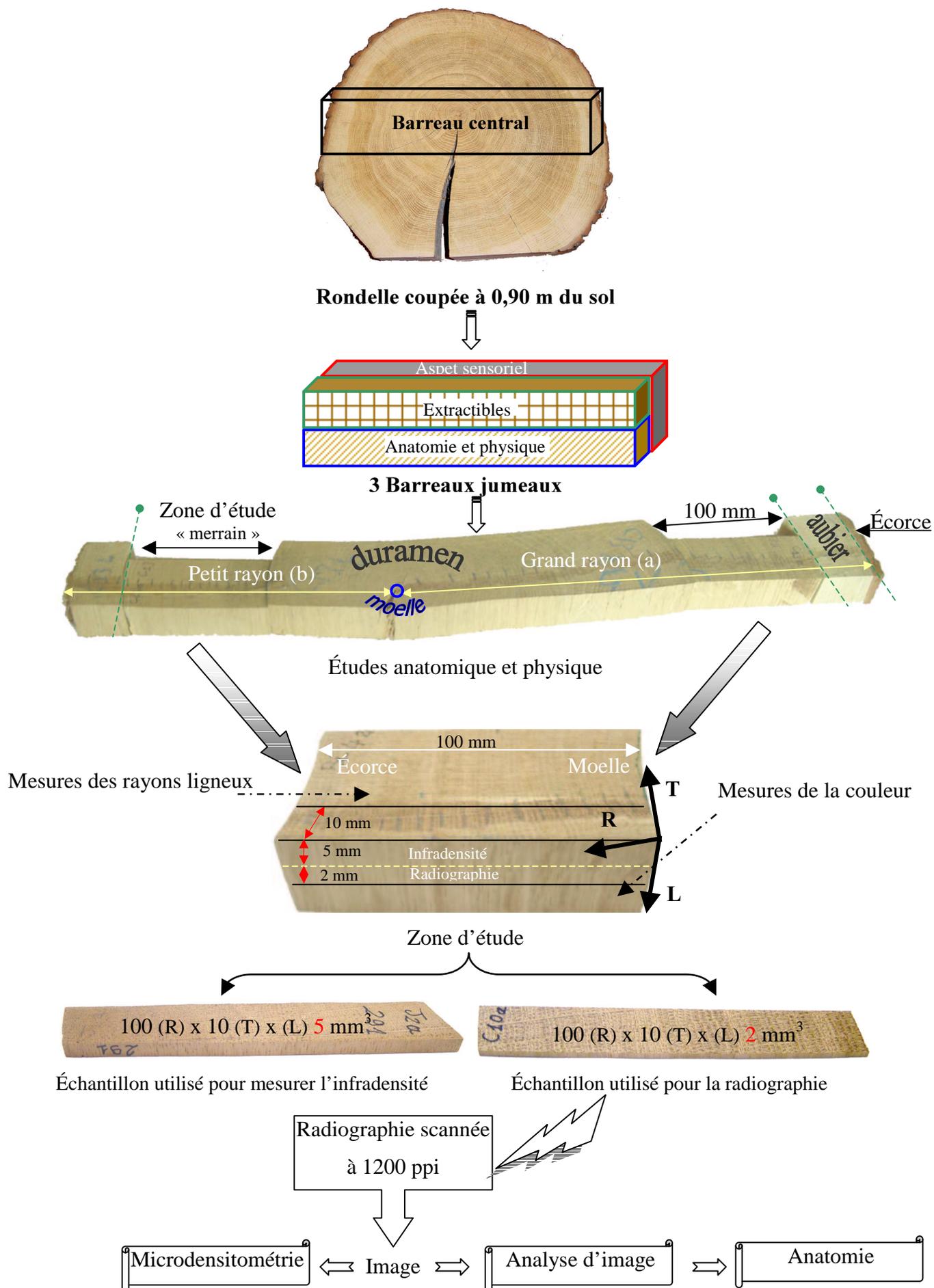


Figure 7 : Radiographie scannée.

Les radiographies ont été ensuite scannées à l'INRA d'Orléans à l'aide d'un scanner « Agfa duo scan » à une résolution de l'ordre de 1200 ppi (1 pixel = 25 µm), ce qui nous a permis d'obtenir des images numérisées qui ont servi pour deux types de mesures :

- La microdensitométrie à l'aide du logiciel Cerd v. 2.04 (MOTHE et *al.*, 1998) ;
- L'analyse de l'image en utilisant le logiciel Visilog v. 5.0 pour quantifier l'anatomie dans le plan transversal

Protocole d'échantillonnage



3.2 Traitement statistique des données

Plusieurs types d'analyses statistiques ont été utilisés pour traiter les données :

- ✓ Les statistiques de base (moyenne, minimum, maximum, écart-type, et coefficient de variation);
- ✓ Les graphiques en boîtes (box plots) ;
- ✓ Les matrices de corrélations ;
- ✓ Les histogrammes, réalisés avec le logiciel StatView.

- ✓ Les régressions linéaires, faites avec StatView ou Excel.

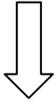
- ✓ En revanche, les analyses factorielles discriminantes ont été réalisées à l'aide du logiciel Statgraphics.

- ✓ Les régressions linéaires multivariées ;
- ✓ Les analyses de variance, effectuées à l'aide du logiciel SAS. Ces dernières sont faites selon le protocole suivant :

9 Régions de chênes rouvres et pédonculés

6 régions monospécifiques :

4 régions des chênes rouvres + 2
régions des chênes pédonculés



6 lots (4 lots rouvres et 2 lots
pédonculés)

Ⓐ 3 régions bispécifiques :

2 lots monospécifiques (1 lot rouvre +
1 lot pédonculé) par région



6 lots (3 lots rouvres et 3 lots
pédonculés)

Ⓑ 12 lots monospécifiques

Ⓒ 5 lots chênes pédonculés

Ⓓ 7 lots chênes rouvres

Analyse de variance :

- Ⓐ Sur les trois régions mixtes pour étudier :
- l'effet région
 - l'effet espèce
 - l'effet arbre
 - l'interaction région * espèce
 - effet(s)...

- Ⓑ Sur l'ensemble (les 12 lots monospécifiques) sans distinction d'espèce on analyse :
- l'effet provenance
 - l'effet arbre
 - effet(s)...
- ☐ *Comparaison de moyennes*

- Ⓒ Sur l'ensemble des chênes pédonculés issus de 5 provenances (5 lots)
- l'effet provenance
 - l'effet arbre
 - effet(s)...

- Ⓓ Sur l'ensemble des chênes rouvres issus de 7 provenances (7 lots)
- l'effet provenance
 - l'effet arbre
 - effet(s)...

NB : 1 lot = 24 arbres rouvres ou pédonculés

4 Caractéristiques sylvicoles

4.1 Âges

En nous référant à la littérature, il nous a semblé intéressant de situer nos échantillons par rapport aux âges cambiaux de différentes zones parce que nous pensions trouver éventuellement des influences sur les paramètres mesurés.

Alors, des mesures d'âge cambial, c'est à dire le nombre de cernes comptés depuis la moelle, ont été effectuées sur les barrettes (Figure 8), ce sont :

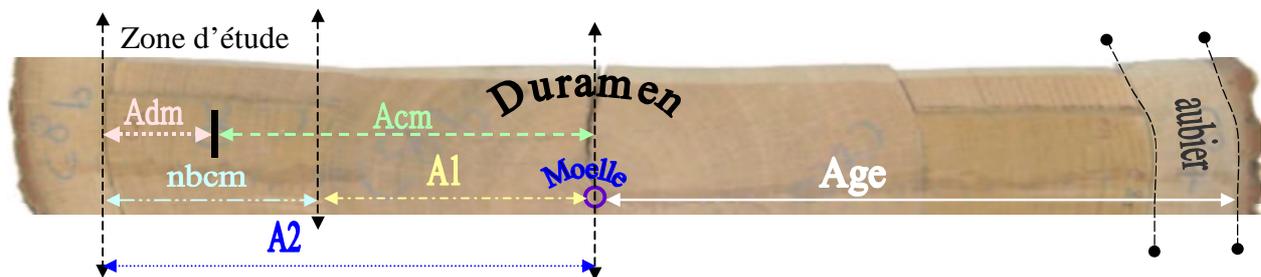


Figure 8 : Ages mesurés sur les barrettes

- L'âge cambial total de l'arbre (âge) ;
- L'âge cambial à la limite interne de la zone de merrain (A1) ;
- L'âge cambial à la limite aubier-duramen (zone externe de merrain) (A2).

D'autres âges estimés à partir de ceux mesurés :

- âge cambial moyen de la zone de merrain (A_{cm}) = $(A1+A2)/2$;
- âge moyen de duraminisation de la zone de merrain (A_{dm}) = $(A2-A1)/2$ ou le nombre de cernes dans la zone de merrain (nbcn) divisé par deux.

L'âge cambial des arbres échantillonnés est assez varié à l'intérieur de certaines régions (Figure 9). Les valeurs extrêmes sont de 80 ans pour Limousin pédonculé et 338 ans pour Darney pédonculé. L'âge moyen le plus élevé est à Bitche (195 ans), pour le chêne rouvre, et dans le lot de pédonculés de Darney (180 ans), le plus faible est à Monlezun-Laurède pédonculé (121 ans).

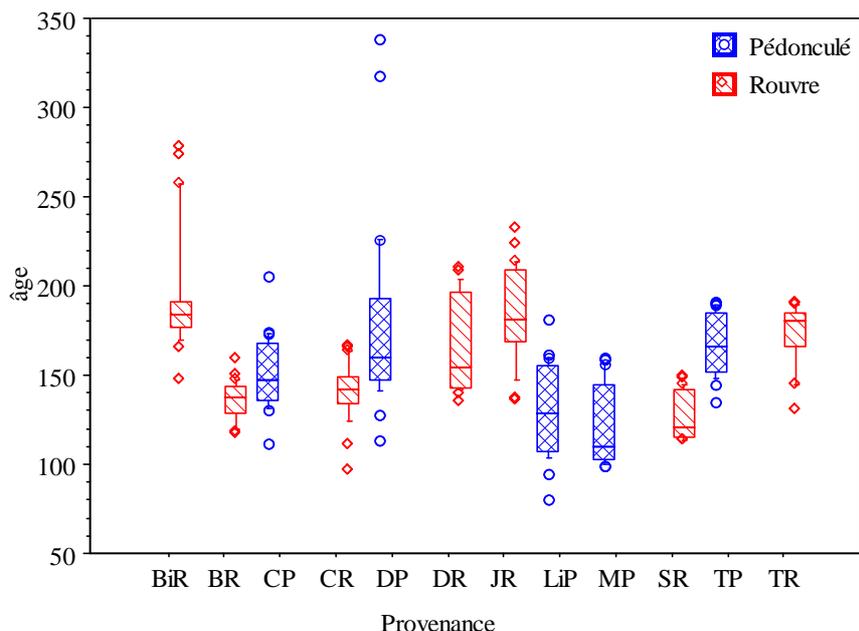


Figure 9 : Variabilité de l'âge cambial des arbres échantillonnés

L'ensemble des arbres jeunes et très âgés ne représente pas plus de 5%. En revanche La majorité des arbres (95%) ont entre 100 et 220 ans (Figure 10). Les rouvres sont généralement plus âgés que les pédonculés

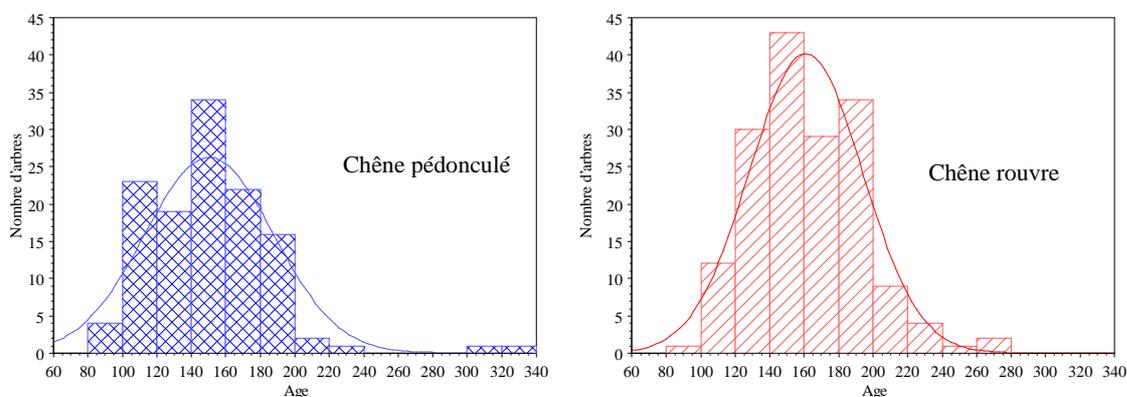


Figure 10 : Distribution en fréquence pour l'âge

Les analyses de variance effectuées sur l'âge montrent une différence significative au seuil de 1% entre les provenances, cette différence est plus remarquée chez les rouvres que chez les chênes pédonculés.

Dans la suite de nos analyses nous nous limiterons à expliquer nos variables en fonction de l'âge cambial total de l'arbre appelé « âge » pour simplifier.

4.2 Largeur de cerne

4.2.1 La largeur moyenne de cerne dans l'arbre

Selon les arbres, la largeur de cerne varie de 0,84 mm à Bitche rouvre jusqu'à 3,21 mm à Monlezun-Laurède pédonculé (Tableau 7).

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur moyenne de cerne dans l'arbre | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|---------------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 288 | 156 | 1,80 | 0,84 | 3,21 | 0,46 | 26 |
| P | | 123 | 150 | 2,01 | 1,06 | 3,21 | 0,52 | 26 |
| R | | 165 | 161 | 1,65 | 0,84 | 2,54 | 0,34 | 21 |
| R | BiR | 24 | 195 | 1,35 | 0,84 | 1,72 | 0,25 | 18 |
| R | BR | 24 | 136 | 1,93 | 1,62 | 2,23 | 0,20 | 11 |
| P | C | 25 | 152 | 1,96 | 1,44 | 2,89 | 0,36 | 19 |
| R | | 23 | 141 | 1,92 | 1,53 | 2,54 | 0,27 | 14 |
| P | D | 26 | 180 | 1,61 | 1,06 | 2,12 | 0,26 | 16 |
| R | | 22 | 169 | 1,63 | 1,20 | 2,09 | 0,25 | 16 |
| R | JR | 24 | 184 | 1,30 | 1,01 | 1,67 | 0,20 | 15 |
| P | LiP | 24 | 130 | 2,47 | 1,73 | 3,18 | 0,42 | 17 |
| P | MP | 24 | 121 | 2,46 | 1,76 | 3,21 | 0,43 | 17 |
| R | SR | 24 | 128 | 1,90 | 1,47 | 2,22 | 0,23 | 12 |
| P | T | 24 | 167 | 1,58 | 1,15 | 1,89 | 0,18 | 12 |
| R | | 24 | 174 | 1,51 | 1,20 | 1,84 | 0,20 | 13 |

Tableau 7 : Statistique générale de la largeur de cerne moyenne dans l'arbre (LC)

Dans les régions bispécifiques (CDT), à âge comparable la largeur moyenne de cerne varie très peu entre espèces.

Les valeurs moyennes de la largeur de cerne les plus faibles se trouvent à Jupille (1,30 mm) et à Bitche (1,35 mm), chênes rouvres, les plus fortes pour le Limousin (2,47 mm) et à Monlezun-Laurède (2,46 mm). Bitche et Jupille constituent les lots les plus âgés, par contre Limousin et Monlezun-Laurède forment les lots les plus jeunes.

Nous rappelons que la largeur de cerne chez le chêne diminue avec l'âge ; dans notre étude cette relation est hautement significative chez les deux espèces et la largeur de cerne a tendance à diminuer plus en fonction de l'âge chez les pédonculés que chez les rouvres (Figure 11).

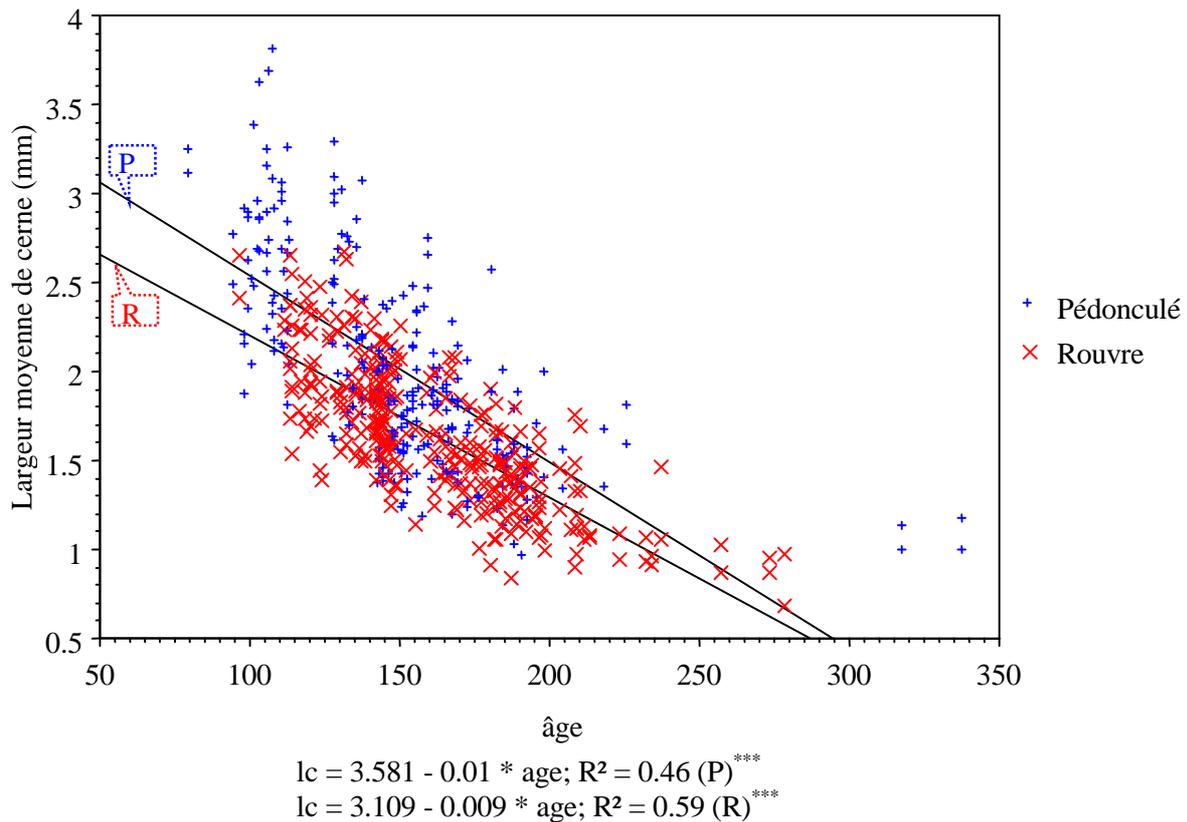


Figure 11 : Évolution de la largeur moyenne de cerne en fonction de l'âge

L'analyse de variance effectuée sur les régions mixtes, pour déterminer l'effet de la région, de l'espèce et leur interaction sur la largeur moyenne de cerne (Tableau 8), montre la présence d'un effet région très significatif au seuil de 1‰, l'espèce et l'interaction entre cette dernière et la région n'influencent pas la largeur moyenne de cerne.

L'analyse de variance globale sur l'ensemble de l'échantillonnage montre une différence significative au seuil de 1‰ entre les provenances. 52% de la variabilité de la largeur de cerne est dû à l'effet provenance.

D'autres analyses sur les lots monospécifiques rouvres ou pédonculés montrent que la largeur moyenne de cerne varie fortement avec la provenance pour une espèce donnée. Plus de 43% de la variabilité de la largeur de cerne est dû à l'effet provenance, l'effet arbre est plus faible et n'explique que 34% de la variabilité (Tableau 8).

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 0,82 ^{NS} | | 0,69 |
| | | Région | 2 | 48,94 ^{***} | 22% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 0,53 ^{NS} | | |
| | | Arbre | 138 | 1,58 ^{***} | 47% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 70,95 ^{***} | 52% | 0,81 |
| | | Arbre | 276 | 1,62 ^{***} | 29% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 50,15 ^{***} | 43% | 0,77 |
| | | Arbre | 158 | 1,49 ^{***} | 34% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 68,16 ^{***} | 46% | 0,80 |
| | | Arbre | 118 | 1,71 ^{***} | 34% | |

Tableau 8 : Analyses de variance sur la largeur moyenne de cerne dans l'arbre

Le test de la comparaison de moyennes (Tableau 9) montre quatre classes homogènes :

- la première classe rassemble les pédonculés les plus jeunes : Limousin et Monlezun-Laurède ;
- la deuxième regroupe les trois provenances rouvres les plus jeunes et une provenance pédonculée (CP) ;
 - Cette dernière est plus âgée que les rouvres et a une largeur de cerne légèrement plus élevée que celle des rouvres,
 - On remarque aussi que les chênes rouvre et pédonculé de Cîteaux sont dans le même groupe (B) ;

| Groupement (Duncan) | Largeur de cerne | Échantillons | Âge | Espèce | Provenance |
|---------------------|------------------|--------------|------------|----------|------------|
| A | 2,47 | 48 | 130 | P | LiP |
| A | 2,46 | 48 | 121 | P | MP |
| B | 1,96 | 50 | 152 | P | CP |
| B | 1,93 | 48 | 136 | R | BR |
| B | 1,92 | 46 | 141 | R | CR |
| B | 1,90 | 48 | 128 | R | SR |
| C | 1,62 | 44 | 169 | R | DR |
| C | 1,61 | 52 | 180 | P | DP |
| C | 1,58 | 48 | 167 | P | TP |
| C | 1,51 | 48 | 174 | R | TR |
| D | 1,35 | 48 | 195 | R | BiR |
| D | 1,30 | 48 | 184 | R | JR |

Tableau 9 : Test de comparaison de moyennes sur l'ensemble des provenances pour la largeur moyenne de cerne

- dans la troisième classe, on trouve les rouvres et les pédonculés de Darney et Tronçais. Ces provenances ont des âges voisins ;
- la quatrième contient les rouvre les plus âgés : Bitche et Jupille.

Le test de comparaison de moyennes classe les rouvres et les pédonculés de chaque région mixte dans le même groupe. Nous constatons aussi que les chênes rouvres et pédonculés de Cîteaux, qui sont les plus jeunes des régions mixtes et qui possèdent des cernes plus larges que ceux de Darney et Tronçais, se trouvent dans un groupe différent de celui de Darney et de Tronçais. Ceci laisse à penser qu'à âge comparable, la variabilité de la largeur de cerne n'est pas due à l'espèce.

4.2.2 La largeur moyenne de cerne du merrain

Les mesures de la largeur de cerne ont été faites dans la zone de merrain, c'est dans cette zone que les caractéristiques anatomiques, physiques et chimiques sont étudiées, cette zone commence à la limite aubier-duramen et fait 10 cm de large dans le jeune duramen.

La largeur de cerne du merrain varie entre 0,61 mm à Bitche rouvre et 4,21 mm à Cîteaux pédonculé (Figure 12). On trouve toujours les valeurs moyennes les plus faibles à Bitche (1,21 mm) et à Jupille (1,25 mm) rouvres, les plus fortes se trouvent dans le Limousin (2,41 mm) et à Monlezun-Laurède (2,22 mm) pédonculés.

Dans les régions mixtes (CDT) la largeur de cerne du merrain ne varie pas beaucoup entre espèces, cependant la valeur moyenne est légèrement plus forte chez les rouvres que chez les pédonculés.

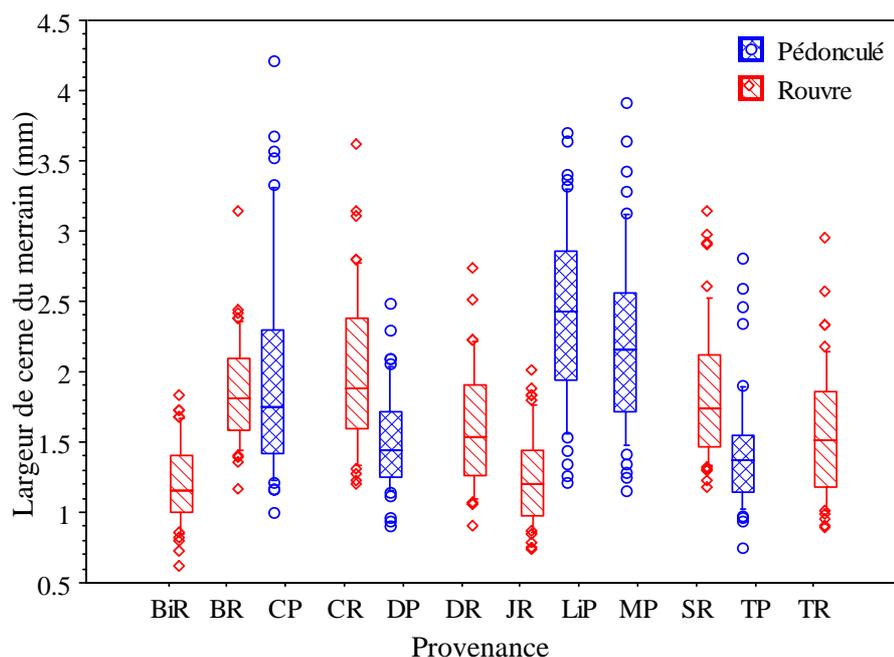


Figure 12 : Variabilité inter et intra-provenance de la largeur moyenne de cerne du merrain

La majorité des arbres (95%) ont des largeurs de cerne comprises entre 0,5 mm et 3 mm (Figure 13), les rouvres ont généralement plus de cernes étroits que les pédonculés, ces derniers ont plus de cernes larges.

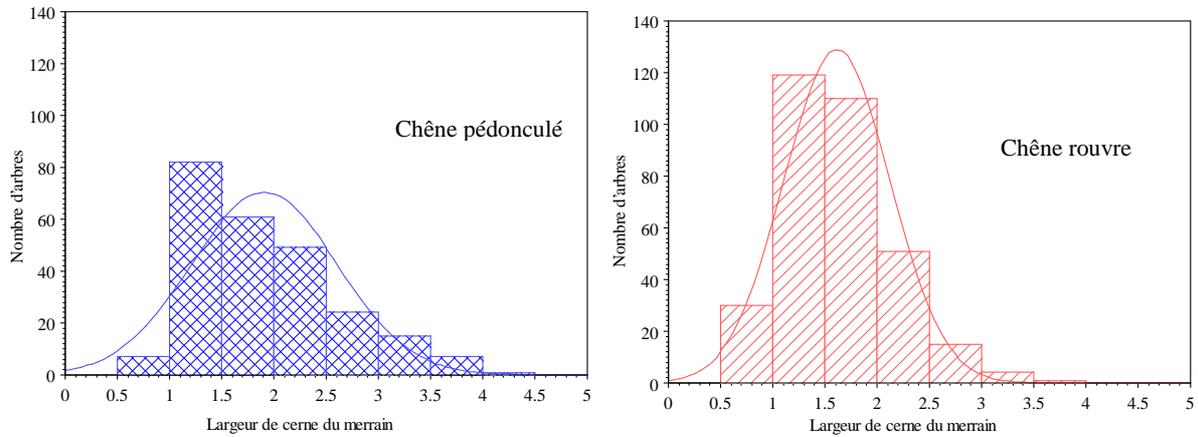


Figure 13 : Distribution en fréquence pour la largeur de cerne dans la zone de merrain

Les analyses de variance sur la largeur moyenne de cerne du merrain ont donné des résultats comparables à ceux obtenus sur la largeur moyenne de cerne dans l'arbre. Ceci peut être expliqué par la forte corrélation entre les deux largeurs de cerne, dans l'arbre et celle du merrain, (Figure 14). Une forte relation est toujours observée aussi avec l'âge.

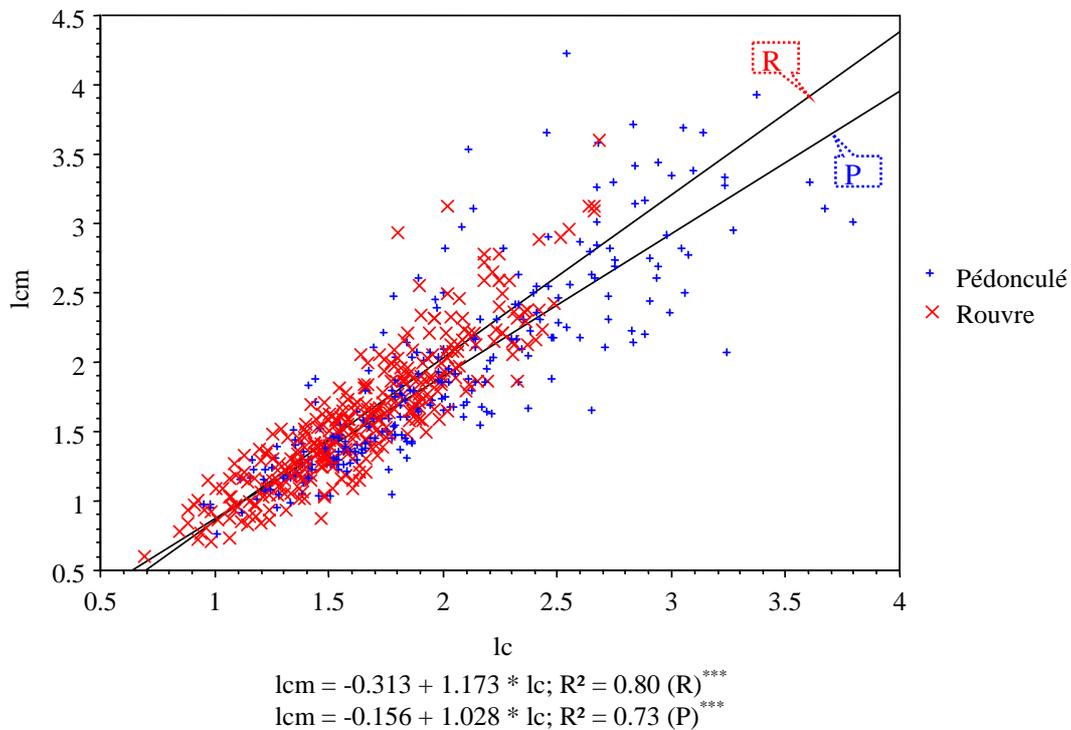


Figure 14 : Relation entre la largeur moyenne de cerne dans l'arbre (lc) et la largeur moyenne de cerne du merrain (lcm) en mm

4.3 Conclusion

- Une grande partie de la variabilité de la largeur moyenne de cerne est due à l'effet provenance ;
- Dans une région donnée, la largeur moyenne de cerne varie peu entre espèces ;
- A âge comparable, les cernes sont généralement plus étroits chez les rouvres que chez les pédonculés ;

Références bibliographiques

BADEAU V., DUPOUEY J.L., SEJOURNE F., 2000,
Protocole simplifié d'identification des chênes sessile et pédonculé à partir de deux critères morphologiques foliaires. ONF - Bulletin technique n° 39, janvier 2000.

BADEAU V., 1990,
Étude de la variabilité morphologique des chênes en Lorraine. Rapport de DEA de l'Université de Nancy, 35 pages

DUPOUEY J.L., BADEAU V., 1993,
Morphological variability of oaks (*Quercus robur* L, *Quercus petraea* (Matt) Liebl, *Quercus pubescens* Willd) in northeastern France: preliminary results. Ann. Sci. For., 1993, 50, suppl 1, pp. 35s-40s.

GRANDJEAN G., SIGAUD P., 1987,
Contribution à la taxonomie et à l'écologie des chênes du Berry. Ann. Sci. For., 1987, 44 (1), pp. 35-66.

JACAMON M., 2001,
Guide de dendrologie - arbres; arbustes; arbrisseaux des forêts françaises. 4^{ème} édition – ENGREF, 349 p.

KREMER A., DUPOUEY J. L., DEANS D., COTTRELL J., CSAIKL U., FINKELDEY R. ESPINEL S., JENSEN J., KLEINSCHMIT J., VAN DAM B., DUCOUSSO A., FORREST I., HEREDIA U. L., J. LOWE A., TUTKOVA M., C. MUNRO R., STEINHOFF S. AND BADEAU V. 2002,
Leaf morphological differentiation between *Quercus robur* and *Quercus petraea* is stable across western European mixed oak stands. Ann. For. Sci. 2002, 59 (X), pp 777 - 787.

LEMAIRE J.Ph., 1989,
Technique de greffage du Chêne pédonculé (*Quercus robur*) par placage en lanière. Cahier des Techniques de l'INRA, 22, 39-57.

ONF,
Connaître et reconnaître les arbres de nos forêts : Le Chêne - *Quercus* sp. 2003.
<http://www.onf.fr/foret/flore/arbres/chene.htm>

SIGAUD P., 1986,
Ne parlons plus du chêne mais des chênes. Revue Forestière Française; 4, pp 376-384

CHAPITRE II. CARACTÉRISTIQUES DE L'ÉCORCE ET DE L'AUBIER

1 Rappels

La coupe transversale du chêne (Figure 15) permet de distinguer les zones suivantes:

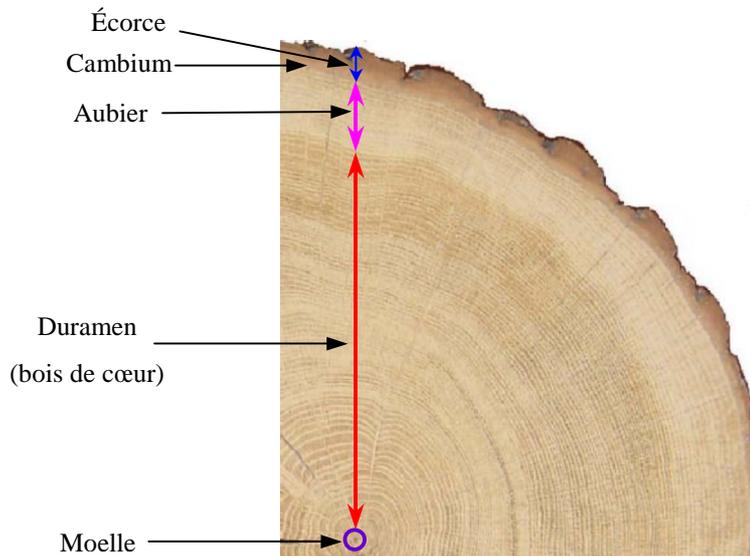


Figure 15 : Coupe transversale d'une tige de chêne montrant les différentes zones caractéristiques du bois

- **La moelle:** au centre de l'arbre, est un ensemble de tissus primaires d'aspect spongieux.
- **Le duramen ou bois parfait :** forme la masse principale du tronc. Composé de cellules mortes, lignifiées et imprégnées de tanins ou de colorants selon les essences ; chez certains essences telles que les chênes rouvre et pédonculé, il se distingue de l'aubier par une couleur plus foncée.
- **L'aubier :** est formé des couches externes de cellules dont certaines non encore lignifiées sont encore vivantes : les parenchymes, formant un bois imparfait. Ces couches, dans lesquelles circulent les matières nutritives, se transforment en bois parfait après une période de 4 à 20 ans par le mécanisme de la duraminisation.
- **Le cambium :** ou assise génératrice libéro-ligneuse, donne naissance au bois et au liber secondaire. Le liber (phloème) comporte entre autres cellules un ensemble de tubes dans lesquels circulent la sève élaborée. Le liber forme la partie interne "vivante" de l'écorce.
- **L'écorce externe inerte :** issue de l'assise subérophelloidermique, revêt l'arbre et constitue une couche protectrice. Celle-ci est imprégnée d'une substance imperméable, la "subérine" (liège), qui protège les couches internes.

2 Épaisseur de l'écorce

L'épaisseur de l'écorce qui est, dans notre étude, la somme de l'épaisseur de l'écorce interne et externe est extrêmement variable à l'intérieur d'une provenance et entre provenances (Figure 16).

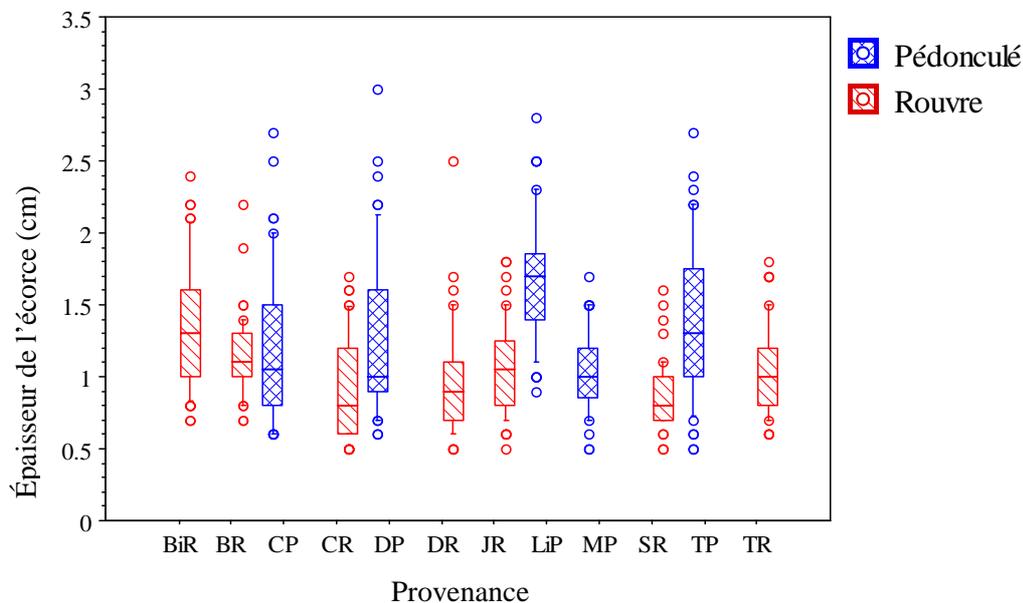


Figure 16 : Variabilité inter- et intra-provenance de l'épaisseur de l'écorce

Nous observons des valeurs extrêmes allant de 0,5 cm, dans la plupart des régions, à 3 cm dans le cas d'un chêne pédonculé à Darney (Tableau 10). Cette épaisseur varie plus chez les chênes pédonculés que chez les rouvres.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Épaisseur de l'écorce (cm) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|----------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,8 | 1,17 | 0,50 | 3,00 | 0,45 | 39 |
| P | | 246 | 150 | 2,01 | 1,31 | 0,50 | 3,00 | 0,52 | 39 |
| R | | 330 | 161 | 1,64 | 1,06 | 0,50 | 2,50 | 0,37 | 35 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,35 | 1,37 | 0,70 | 2,40 | 0,43 | 32 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,93 | 1,14 | 0,70 | 2,20 | 0,29 | 25 |
| P | C | 50 | 152 | 1,96 | 1,21 | 0,60 | 2,70 | 0,51 | 42 |
| R | | 46 | 141 | 1,92 | 0,93 | 0,50 | 1,70 | 0,34 | 37 |
| P | D | 52 | 180 | 1,61 | 1,27 | 0,60 | 3,00 | 0,56 | 44 |
| R | | 44 | 169 | 1,62 | 0,95 | 0,50 | 2,50 | 0,38 | 41 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,3 | 1,07 | 0,50 | 1,80 | 0,32 | 30 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,47 | 1,68 | 0,90 | 2,80 | 0,45 | 27 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,46 | 1,05 | 0,50 | 1,70 | 0,30 | 29 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,9 | 0,88 | 0,50 | 1,60 | 0,23 | 26 |
| P | T | 48 | 167 | 1,58 | 1,37 | 0,50 | 2,70 | 0,52 | 38 |
| R | | 48 | 174 | 1,51 | 1,04 | 0,60 | 1,80 | 0,31 | 29 |

Tableau 10 : Statistique descriptive pour l'épaisseur de l'écorce (Ee)

Nous constatons dans les régions mixtes (représentées à la fois par des chênes pédonculés et par des chênes rouvres), à âge comparable, que l'épaisseur moyenne de l'écorce est plus élevée chez les chênes pédonculés. La corrélation entre l'épaisseur de l'écorce et le diamètre de l'arbre est faible, chez les deux espèces, mais significative au seuil de 1%. Elle est encore plus faible chez les rouvres que chez les pédonculés.

2.1 Liaison avec l'âge et la largeur de cerne

La Figure 17 montre la présence d'une relation faible mais significative au seuil de 1% entre l'épaisseur de l'écorce et l'âge dans le cas des rouvres et que cette relation n'est significative qu'au seuil de 5% chez les pédonculés (fig. 1). La liaison avec la largeur de cerne dans l'arbre est pratiquement absente chez les pédonculés. Pourtant, elle est très faible dans le cas des rouvres, mais significative au seuil de 5%.

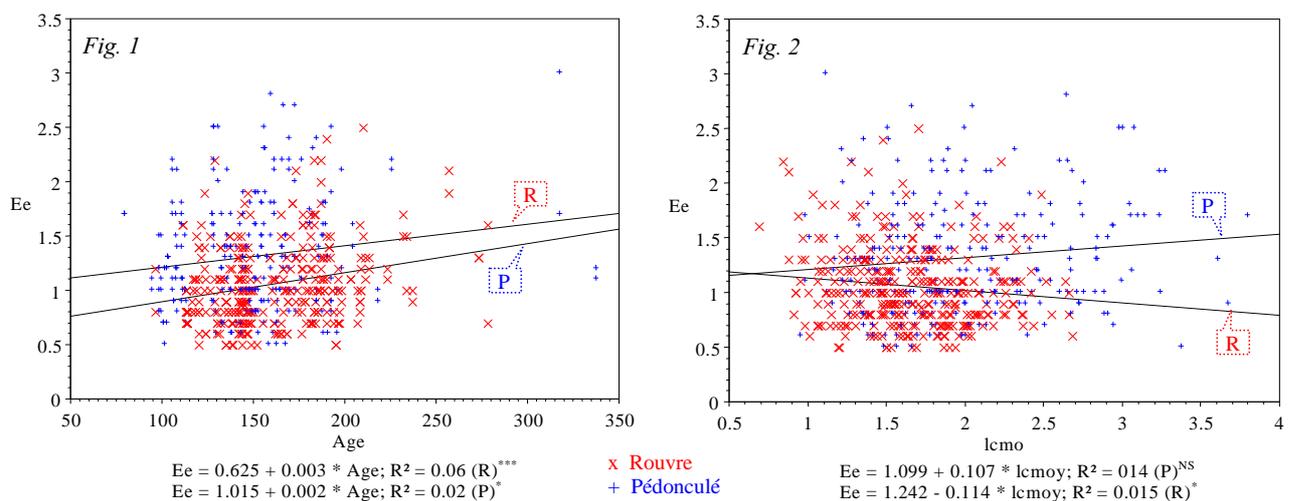


Figure 17 : Évolution de l'épaisseur de l'écorce (Ee) en fonction de l'âge (fig. 1) et en fonction de la largeur moyenne de cerne dans l'arbre (lcmoy) (fig. 2) chez les deux espèces

2.2 Variabilité de l'épaisseur de l'écorce

L'analyse de variance sur les trois régions mixtes (Tableau 11) montre l'existence d'un effet espèce, particulièrement fort, et d'un effet "arbre" (dans région dans espèce), significatifs au seuil de 1% sur l'épaisseur de l'écorce.

Ce résultat est contradictoire au résultat obtenu par DERET - VARCIN (1983) qui n'a pas trouvé de différence significative de l'épaisseur de l'écorce entre les rouvres et les pédonculés de la forêt de Morimond (Haute Marne), cependant, l'épaisseur moyenne de

l'écorce pour les chênes intermédiaires est plus proche de celle des pédonculés que celle des rouvres.

L'effet région est significatif au seuil de 5%, et il n'y a pas d'interaction entre l'effet espèce et l'effet région.

D'après cette analyse, nous constatons que 64% de la variabilité de l'épaisseur de l'écorce est expliqué par l'effet arbre et que l'espèce n'en explique que 11%. L'effet région est très faible et n'explique que 1% de la variabilité de l'épaisseur de l'écorce.

Une autre analyse de variance sur les douze lots monospécifiques montre que l'effet arbre et l'effet provenance sont significatifs au seuil de 1%. Ces deux effets expliquent chez les deux espèces plus de 77% de la variabilité de l'épaisseur de l'écorce.

Les analyses réalisées sur les provenances à l'intérieur de chaque espèce montrent que 16 à 17 % de la variabilité de l'épaisseur de l'écorce est due à l'effet provenance ce qui signifie que la variabilité intra-espèce de cette dernière est comparable. L'effet arbre, lui, aussi est très proche chez les deux espèces ce qui laisse penser que l'arbre a un effet similaire sur l'épaisseur de l'écorce quelle que soit l'espèce.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|--------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 63,17*** | 11% | 0,76 |
| | | Région | 2 | 4,43* | 1% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 0,11 ^{NS} | - | |
| | | Arbre | 138 | 2,78*** | 64% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 26,63*** | 23% | 0,77 |
| | | Arbre | 276 | 2,45*** | 54% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 20,55*** | 17% | 0,76 |
| | | Arbre | 158 | 2,59*** | 59% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 19,22*** | 16% | 0,74 |
| | | Arbre | 118 | 2,37*** | 58% | |

Tableau 11 : Analyse de variance sur l'épaisseur de l'écorce (Ee)

La comparaison de moyennes montre deux groupes; dans le premier, ceux où l'écorce est la plus épaisse. Ce sont les pédonculés qui sont majoritaires avec une seule région de rouvres, Bitche; dans le second, ce sont essentiellement des chênes rouvres que l'on trouve, avec une seule région de pédonculés, Monlezun et Laurède (Tableau 12).

Chez les rouvres, la moyenne par provenance de l'épaisseur de l'écorce augmente avec l'âge, les provenances sont bien classées en fonction de l'âge après avoir été triées selon l'épaisseur de l'écorce sauf Bertrange qui présente une valeur moyenne un peu élevée par rapport à d'autres provenances à âge comparable.

| Groupement (Duncan) | | | Épaisseur de l'écorce | Âge | Largeur de cerne | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|----------|---|-----------------------|------------|------------------|--------------|------------|--------|
| | | A | 1,68 | 130 | 2,47 | 48 | LiP | P |
| | B | | 1,37 | 167 | 1,58 | 48 | TP | P |
| | B | | 1,37 | 195 | 1,35 | 48 | BiR | R |
| C | B | | 1,27 | 180 | 1,61 | 52 | DP | P |
| C | | | 1,21 | 152 | 1,96 | 50 | CP | P |
| C | D | | 1,14 | 136 | 1,93 | 48 | BR | R |
| E | D | | 1,07 | 184 | 1,3 | 48 | JR | R |
| E | D | F | 1,05 | 121 | 2,46 | 48 | MP | P |
| E | D | F | 1,04 | 174 | 1,51 | 48 | TR | R |
| E | G | F | 0,95 | 169 | 1,62 | 44 | DR | R |
| | G | F | 0,93 | 141 | 1,92 | 46 | CR | R |
| | G | | 0,88 | 128 | 1,9 | 48 | SR | R |

Tableau 12 : Test de comparaison de moyenne (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour l'épaisseur de l'écorce (cm)

Nous constatons aussi que les chênes pédonculés et les chênes rouvres des trois régions bispécifiques (Cîteaux, Darney et Tronçais) sont classés dans deux groupes différents ce qui signifie que l'épaisseur de l'écorce est liée à l'espèce et à condition de croissance identique (même forêt) les chênes pédonculés possèdent une écorce plus épaisse que les chênes rouvres.

3 L'aubier

3.1 Introduction

Les résultats obtenus sur le chêne par SAVILL et *al.* en 1993 montrent que les arbres à croissance rapide ont moins de cernes dans l'aubier que ceux à croissance lente.

Chez le mélèze et le pin, lorsque la vitesse de croissance radiale augmente, le nombre de cernes dans l'aubier diminue (YANG et *al.* 1985, YANG et MURCHISSON 1992).

POLGE (1982), BRIX et MITCHELL (1983) et ESPINOSA BANCALARI et *al.*(1987) trouvent que les douglas qui ont un aubier large sont des arbres à croissance rapide. En revanche ceux qui poussent lentement possèdent un aubier moins large, mais la relation s'inverse pour le nombre de cernes dans l'aubier. La même tendance se trouve chez le chêne (SAVILL et *al.* 1993).

Selon HATSCH (1997), la largeur de l'aubier est fortement liée à la vigueur récente de l'arbre observé par des caractères de houppier, elle ne dépend ni de l'âge, ni du diamètre de celui-ci.

3.2 Largeur moyenne de cerne dans l'aubier

La largeur du cerne dans l'aubier est très variable selon les arbres, on trouve à Bitche, chez le chêne rouvre, la valeur minimale et à Tronçais, pour le chêne pédonculé, on a à la fois la valeur minimale et maximale (Figure 18).

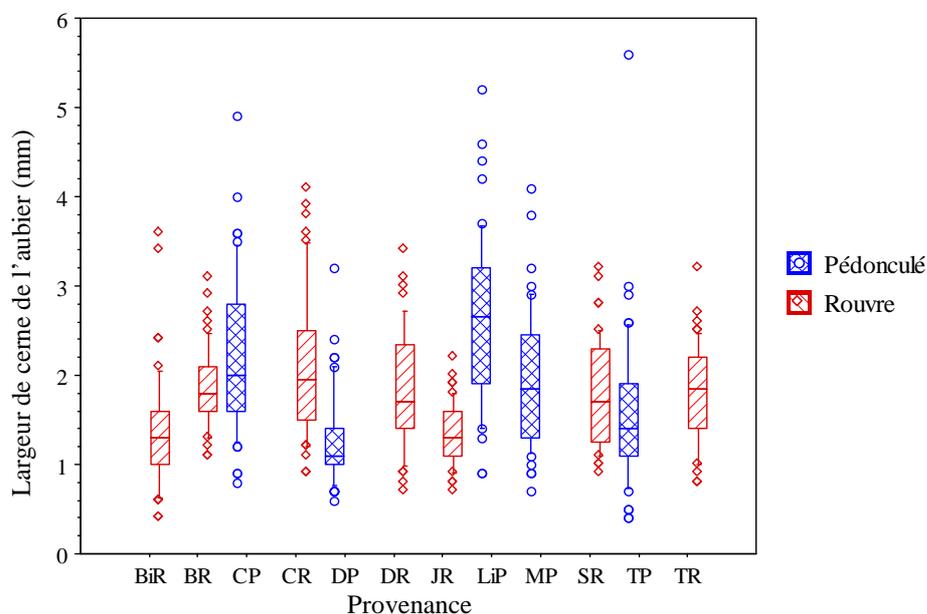


Figure 18 : Variabilité de la largeur moyenne de cerne dans l'aubier

Les valeurs moyennes les plus fortes apparaissent dans le Limousin et à Cîteaux, les plus faibles à Darney pour le chêne pédonculé ; à Jupilles et à Bitche, pour le chêne rouvre (Tableau 13)

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Largeur du cerne dans l'aubier (mm) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-------------------------------------|------------|------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,8 | 1,79 | 0,4 | 5,6 | 0,8 | 43 |
| P | | 246 | 150 | 2,01 | 1,90 | 0,4 | 5,6 | 0,92 | 48 |
| R | | 330 | 161 | 1,64 | 1,72 | 0,4 | 4,1 | 0,65 | 38 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,35 | 1,35 | 0,4 | 3,6 | 0,7 | 48 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,93 | 1,88 | 1,1 | 3,1 | 0,5 | 24 |
| P | C | 50 | 152 | 1,96 | 2,16 | 0,8 | 4,9 | 0,9 | 39 |
| R | | 46 | 141 | 1,92 | 2,12 | 0,9 | 4,1 | 0,8 | 39 |
| P | D | 52 | 180 | 1,61 | 1,26 | 0,6 | 3,2 | 0,5 | 40 |
| R | | 44 | 169 | 1,62 | 1,82 | 0,7 | 3,4 | 0,7 | 37 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,3 | 1,34 | 0,7 | 2,2 | 0,3 | 26 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,47 | 2,59 | 0,9 | 5,2 | 1,0 | 37 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,46 | 1,93 | 0,7 | 4,1 | 0,7 | 39 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,9 | 1,80 | 0,9 | 3,2 | 0,6 | 33 |
| P | T | 48 | 167 | 1,58 | 1,59 | 0,4 | 5,6 | 0,9 | 55 |
| R | | 48 | 174 | 1,51 | 1,75 | 0,8 | 3,2 | 0,6 | 32 |

Tableau 13 : Statistique générale de largeur moyenne de cerne dans l'aubier (LA)

Nous remarquons que les chênes pédonculés de Darney présentent la valeur moyenne la plus faible, mais, il faut noter que les chênes pédonculés de Darney sont les arbres les plus vieux de l'échantillonnage, ils ont entre 113 et 338 ans et que la largeur de cerne dans l'aubier diminue avec l'âge, cette corrélation est significative au seuil de 1‰ (Figure 19).

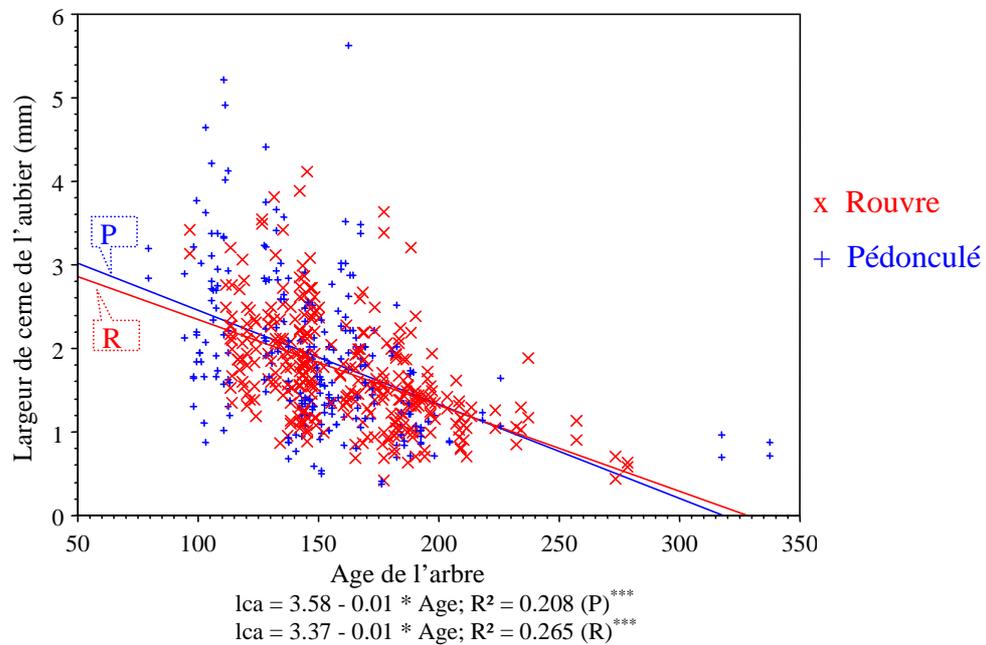


Figure 19 : Largeur moyenne de cerne dans l'aubier (lca) en fonction de l'âge pour les deux espèces rouvre et pédonculé

L'analyse de variance faite sur les régions mixtes montre que l'espèce, la région, l'interaction entre l'effet espèce et l'effet région et l'effet arbre expliquent 84% de la variabilité de la largeur de cerne dans l'aubier dont 67% expliquée par l'effet arbre.

Pour les analyses réalisées sur les lots monospécifiques nous remarquons aussi que l'effet arbre est dominant et que l'effet région reste significatif, mais plus faible, avec une différence notable entre rouvre et pédonculé où l'effet région est plus fort dans le cas du pédonculé (Tableau 14).

D'après ces deux analyses on peut noter :

- ✓ que l'effet "arbre" est très important, cet effet peut être expliqué par la génétique de l'arbre et ses interactions avec les conditions stationnelles et sylvicoles ;
- ✓ le chêne pédonculé est plus sensible à l'effet région (26%) que le chêne rouvre (17%) ce qui laisse penser que le chêne pédonculé réagit peut être plus que le chêne rouvre aux conditions de croissance.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 18,42*** | 2% | 84% |
| | | Région | 2 | 49,82*** | 12% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 10,74*** | 3% | |
| | | Arbre | 138 | 4,16*** | 67% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 34,58*** | 23% | 83% |
| | | Arbre | 276 | 3,59*** | 60% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 23,65*** | 17% | 81% |
| | | Arbre | 158 | 3,48*** | 64% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 47,71*** | 26% | 84% |
| | | Arbre | 118 | 3,67*** | 58% | |

Tableau 14 : Analyse de variance sur la largeur de cerne de l'aubier (Ica)

Ces résultats sont comparables à ceux obtenus par BECKER et LEVY, 1982 et 1990 qui ont montré que le chêne rouvre résiste à la sécheresse, s'adapte aux sols pauvres, est peu exigeant en lumière et supporte la concurrence mieux que le chêne pédonculé.

3.3 Nombre de cernes dans l'aubier

Le nombre de cernes dans l'aubier montre des écarts importants d'un arbre à l'autre : 5 à Tronçais (chêne pédonculé), 40 à Saint Palais (chêne rouvre) (Figure 20).

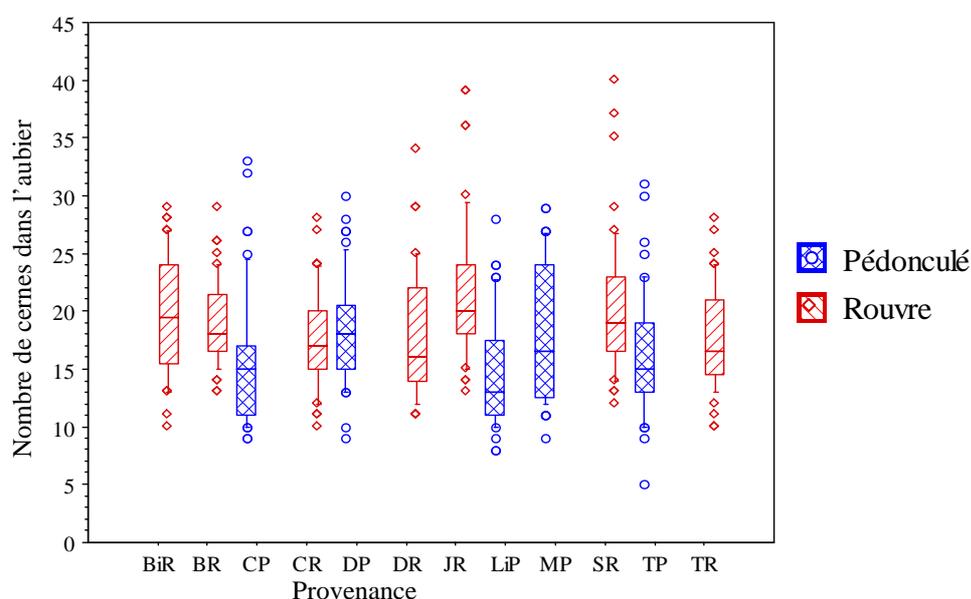


Figure 20 : Variabilité inter- et intra-provenance du nombre de cernes dans l'aubier

Nous observons sur la Figure 21 que le nombre de cernes dans l'aubier diminue lorsque la largeur de cerne dans ce dernier augmente. Le même résultat était observé sur le chêne par SAVILL *et al.*, 1993.

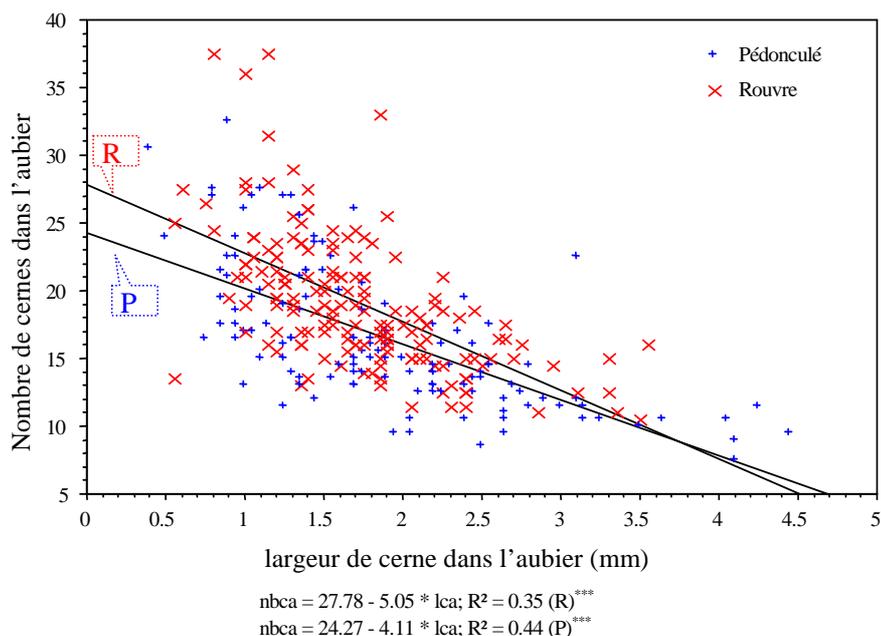


Figure 21 : Évolution du nombre de cernes dans l'aubier en fonction de leur largeur chez les chênes rouvre et pédonculé.

D'après le Tableau 15 nous constatons qu'à âge comparable le nombre moyen de cernes est un peu plus élevé chez les rouvres que chez les pédonculés.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Nombre de cernes dans l'aubier | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,8 | 18 | 5 | 40 | 5 | 30 |
| P | | 246 | 150 | 2,01 | 16 | 5 | 33 | 5 | 33 |
| R | | 330 | 161 | 1,64 | 19 | 10 | 40 | 5 | 27 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,35 | 20 | 10 | 29 | 5 | 26 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,93 | 19 | 13 | 29 | 4 | 19 |
| P | C | 50 | 152 | 1,96 | 16 | 9 | 33 | 6 | 36 |
| R | | 46 | 141 | 1,92 | 18 | 10 | 28 | 4 | 24 |
| P | D | 52 | 180 | 1,61 | 18 | 9 | 30 | 5 | 25 |
| R | | 44 | 169 | 1,62 | 18 | 11 | 34 | 5 | 30 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,3 | 22 | 13 | 39 | 6 | 28 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,47 | 15 | 8 | 28 | 5 | 34 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,46 | 18 | 9 | 29 | 6 | 33 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,9 | 20 | 12 | 40 | 6 | 30 |
| P | T | 48 | 167 | 1,58 | 16 | 5 | 31 | 5 | 33 |
| R | | 48 | 174 | 1,51 | 18 | 10 | 28 | 4 | 25 |

Tableau 15 : Statistique descriptive du nombre de cernes dans l'aubier par provenance (NCA)

L'analyse de variance sur les régions bispécifiques (CDT) montre que l'effet espèce, région, l'interaction entre l'espèce et la région et l'effet arbre sont significatifs au seuil de 1‰ et expliquent 91% de la variabilité du nombre de cernes dans l'aubier. Mais il faut noter que 87% de cette variabilité est expliqué par l'effet arbre (Tableau 16).

D'autres analyses faites sur les lots monospécifiques rouvres et pédonculés ont montré aussi la présence d'un fort effet arbre (83% pour les rouvres, 85% pour les pédonculés) et d'un très faible effet région. Ceci permet de dire que le nombre de cernes dans l'aubier n'est influencé que par l'effet arbre. La génétique de l'arbre et ses interactions avec les conditions stationnelles et sylvicoles peuvent être l'expliquer.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 15,02 ^{***} | 1% | 91% |
| | | Région | 2 | 14,22 ^{***} | 2% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 9,35 ^{***} | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 10,10 ^{***} | 87% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 40,69 ^{***} | 13% | 92% |
| | | Arbre | 276 | 9,93 ^{***} | 79% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 24,36 ^{***} | 8% | 91% |
| | | Arbre | 158 | 9,31 ^{***} | 83% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 24,98 ^{***} | 7% | 92% |
| | | Arbre | 118 | 10,80 ^{***} | 85% | |

Tableau 16 : Analyse de variance sur le nombre de cernes dans l'aubier (nbca)

Le test de comparaison de moyenne (Duncan) sur les provenances monospécifiques classe toutes les provenances de chaque espèce dans le même groupe, le nombre de cernes dans l'aubier ne varie donc pas beaucoup au sein de l'espèce (15 à 18 chez les pédonculés, 18 à 22 pour les rouvres).

3.4 Largeur de l'aubier

La largeur de l'aubier varie beaucoup selon les arbres avec des valeurs extrêmes : de 0,6 cm en forêt de Bitche (chêne rouvre) à 7,4 cm en forêt du Limousin (chêne pédonculé) (Tableau 17).

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Largeur de l'aubier (cm) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,8 | 2,95 | 0,60 | 7,40 | 0,90 | 30 |
| P | | 246 | 150 | 2,01 | 2,78 | 1 | 7,4 | 0,91 | 33 |
| R | | 330 | 161 | 1,64 | 3,07 | 0,6 | 6,4 | 0,86 | 28 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,35 | 2,45 | 0,60 | 4,00 | 0,76 | 31 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,93 | 3,46 | 2,00 | 5,00 | 0,67 | 19 |
| P | C | 50 | 152 | 1,96 | 3,02 | 1,90 | 4,50 | 0,67 | 22 |
| R | | 46 | 141 | 1,92 | 3,48 | 1,90 | 6,20 | 0,94 | 27 |
| P | D | 52 | 180 | 1,61 | 2,15 | 1,00 | 3,50 | 0,61 | 28 |
| R | | 44 | 169 | 1,62 | 3,01 | 1,70 | 4,80 | 0,75 | 25 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,3 | 2,79 | 1,30 | 4,80 | 0,74 | 27 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,47 | 3,46 | 1,80 | 7,40 | 1,06 | 31 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,46 | 3,08 | 1,30 | 4,80 | 0,73 | 24 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,9 | 3,42 | 1,90 | 6,40 | 0,90 | 26 |
| P | T | 48 | 167 | 1,58 | 2,23 | 1,10 | 3,90 | 0,68 | 30 |
| R | | 48 | 174 | 1,51 | 2,90 | 1,80 | 4,50 | 0,71 | 25 |

Tableau 17 : Statistique générale de la largeur de l'aubier (LA) par provenance monospécifique

L'essentiel des arbres présente des largeurs d'aubier comprises entre 1,4 et 4,5 cm pour les chênes rouvres et entre 1,4 et 3,8 cm pour les chênes pédonculés.

Les faibles et fortes valeurs ne concernent que 4,8% des chênes rouvres et 9,8% des chênes pédonculés (Figure 22).

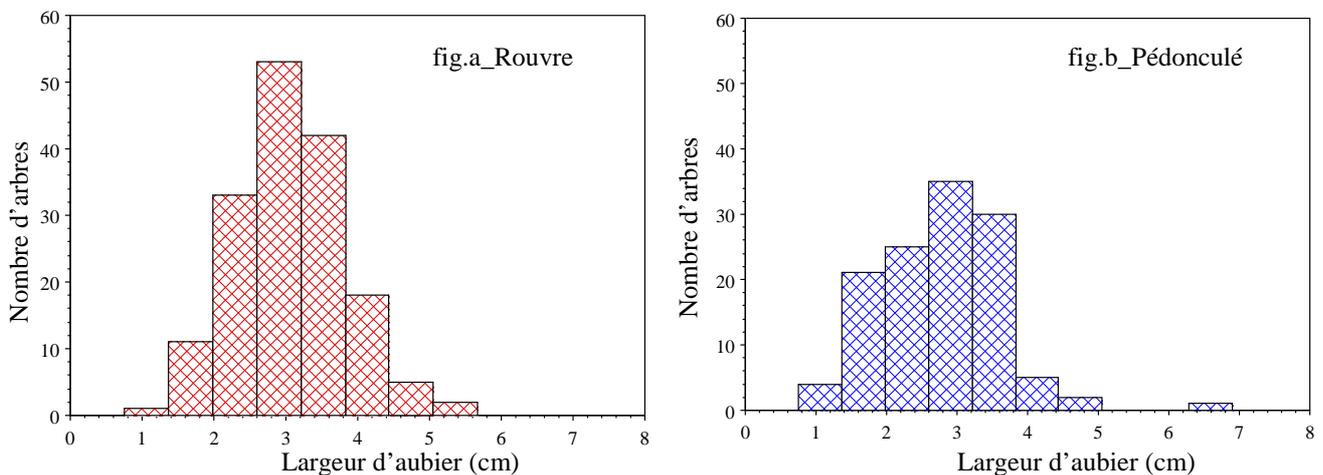


Figure 22 : Histogramme de la largeur de l'aubier pour les 165 chênes rouvres (fig.a) et pour les 123 chênes pédonculés (fig.b)

La largeur de l'aubier est liée positivement à la largeur moyenne du cerne dans l'arbre, cette relation est significative au seuil de 1% chez les chênes rouvres ($r = 0,60$; $ddl = 164$) et chez les chênes pédonculés ($r = 0,62$; $ddl = 122$), ce résultat confirme ce qu'a montré SAVILL *et al.*, 1993.

Une autre corrélation négative et assez faible apparaît, avec une signification de 1%, entre la largeur de l'aubier et l'âge (Figure 23) ce résultat est contradictoire avec celui obtenu par HATSCH, 1997 qui n'a pas trouvé de relation entre l'âge et la largeur de l'aubier.

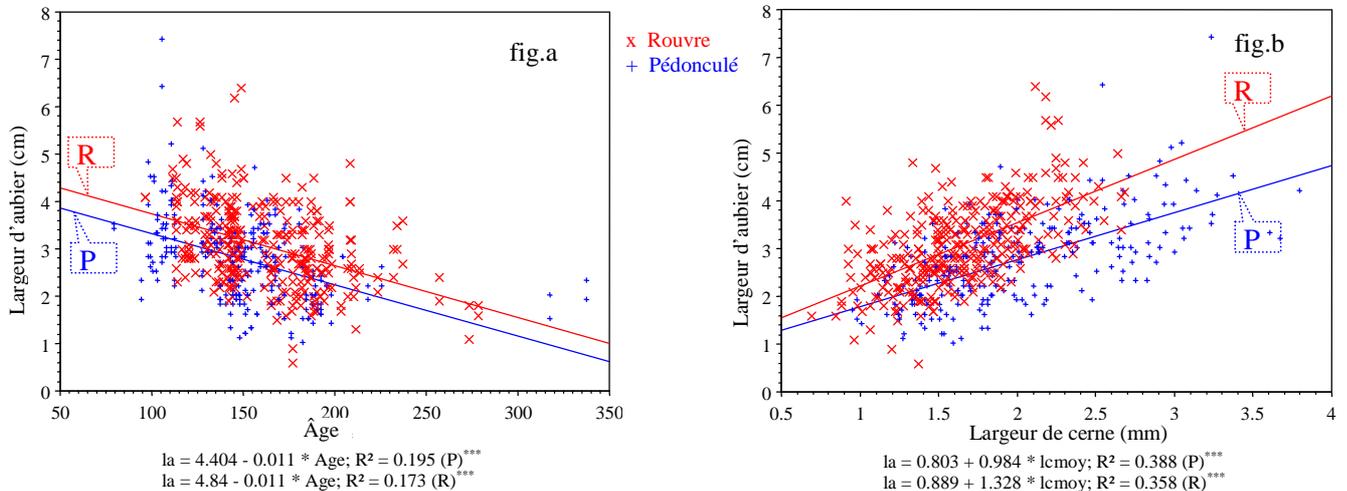


Figure 23 : Évolution de la largeur de l'aubier en fonction de l'âge (fig.a) et de la largeur moyenne du cerne d'aubier (fig.b)

La Figure 24 montre qu'il n'y a pas de corrélation entre la largeur de l'aubier et le nombre de cernes dans ce dernier.

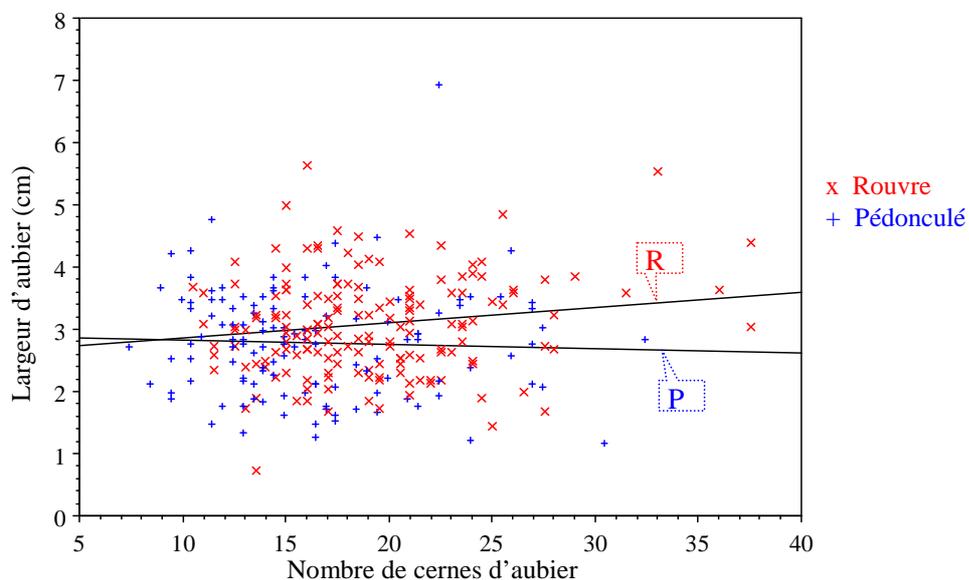


Figure 24 : Relation entre la largeur de l'aubier et le nombre de cernes dans l'aubier

Les analyses de variances effectuées sur les trois régions bispécifiques montrent que la proportion expliquée de la variance est la même dans le cas de l'espèce et de la provenance et que la majorité de cette variance est expliquée par l'effet arbre (Tableau 18)

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 176,2*** | 15% | 88% |
| | | Région | 2 | 82,3*** | 14% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 5** | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 5*** | 58% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 40,69*** | 13% | 92% |
| | | Arbre | 276 | 9,93*** | 79% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 32,6*** | 18% | 85% |
| | | Arbre | 158 | 4,5*** | 67% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 91,7*** | 31% | 89% |
| | | Arbre | 118 | 5,8*** | 58% | |

Tableau 18 : Analyse de variance sur la largeur de l'aubier

Les analyses sur les lots monospécifiques des rouvres et des pédonculés montrent aussi un effet arbre très significatif chez les deux espèces, en revanche, l'effet provenance est plus important chez les pédonculés que chez les rouvres (Tableau 18), les pédonculés sembleraient répondre peut être plus que les rouvres aux conditions de croissance.

Le test de comparaison des moyennes sur les lots monospécifiques montre que pour chaque espèce, le classement se fait en deux groupes (Tableau 19). Dans les deux cas nous remarquons que le premier groupe rassemble les lots des arbres les plus jeunes avec un aubier plus large, en revanche le deuxième groupe comprend les lots des arbres les plus âgés avec un aubier plus étroit.

| Espèce | Provenance | Échantillons | Largeur de cerne | Âge | Largeur de L'aubier | Groupement Duncan | |
|--------------------|------------|--------------|------------------|-----|---------------------|-------------------|---|
| rouvre Chêne | CR | 23 | 1,9 | 141 | 3,48 | A | |
| | BR | 24 | 1,9 | 136 | 3,46 | A | |
| | SR | 24 | 1,9 | 128 | 3,42 | A | |
| | DR | 22 | 1,6 | 169 | 3,01 | A | B |
| | TR | 24 | 1,5 | 174 | 2,90 | C | B |
| | JR | 24 | 1,3 | 184 | 2,79 | C | B |
| | BiR | 24 | 1,4 | 195 | 2,45 | C | |
| pédonculé Chêne | LiP | 24 | 2,5 | 130 | 3,46 | A | |
| | MP | 24 | 2,5 | 121 | 3,08 | A | |
| | CP | 25 | 2 | 152 | 3,02 | A | |
| | TP | 24 | 1,6 | 167 | 2,23 | B | |
| | DP | 26 | 1,6 | 180 | 2,15 | B | |

Tableau 19 : Test de comparaison de moyenne (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour la largeur de l'aubier

4 Conclusion

- L'écorce est généralement plus épaisse chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre ;
- Dans les régions mixtes (Cîteaux, Darney et Tronçais), à âge comparable l'épaisseur de l'écorce est plus élevée chez les chênes pédonculés que chez les chênes rouvres ;
- L'épaisseur de l'écorce varie de façon significative avec l'espèce et la provenance et semble t-il indépendamment de la largeur de cerne ;
- Une relation faible et positive entre l'âge et l'épaisseur de l'écorce, mais significative au seuil de 1% dans le cas des rouvres et au seuil de 5% chez les pédonculés ;
- La largeur d'aubier (LA) diminue avec l'âge et augmente avec la largeur de cerne dans l'arbre (LC) chez les deux espèces, à âge comparable, les rouvres possèdent un aubier plus large que les pédonculés (Tableau 20) ;

| Espèce | Région | Âge | LC (mm) | LA (cm) | LCA (mm) | NCA |
|------------------------|------------|-------|---------|---------|----------|-----|
| P+R | | 156 | 1,81 | 2,95 | 1,79 | 18 |
| P | | 150 | 2,01 | 2,78 | 1,90 | 16 |
| R | | 161 | 1,65 | 3,07 | 1,72 | 19 |
| Chêne pédonculé | DP | ↑ 180 | ↓ 1,61 | ↓ 2,15 | ↓ 1,26 | 18 |
| | TP | ↑ 167 | ↓ 1,59 | ↓ 2,23 | ↓ 1,59 | 16 |
| | CP | ↑ 152 | ↓ 1,97 | ↓ 3,02 | ↓ 2,16 | 16 |
| | MP | ↑ 121 | ↓ 2,46 | ↓ 3,08 | ↓ 1,93 | 18 |
| | LiP | ↑ 130 | ↓ 2,48 | ↓ 3,46 | ↓ 2,59 | 15 |
| Chêne rouvre | BiR | ↑ 195 | ↓ 1,36 | ↓ 2,45 | ↓ 1,35 | 20 |
| | JR | ↑ 184 | ↓ 1,30 | ↓ 2,79 | ↓ 1,34 | 22 |
| | TR | ↑ 174 | ↓ 1,52 | ↓ 2,90 | ↓ 1,75 | 18 |
| | DR | ↑ 169 | ↓ 1,63 | ↓ 3,01 | ↓ 1,82 | 18 |
| | SR | ↑ 128 | ↓ 1,90 | ↓ 3,42 | ↓ 1,80 | 20 |
| | BR | ↑ 136 | ↓ 1,94 | ↓ 3,46 | ↓ 1,88 | 19 |
| | CR | ↑ 141 | ↓ 1,92 | ↓ 3,48 | ↓ 2,12 | 18 |

Tableau 20 : Évaluation de la moyenne des paramètres de l'aubier, la largeur du cerne moyenne dans l'arbre et de l'âge

- Le nombre de cernes dans l'aubier (NCA) varie beaucoup entre espèces, il est en moyenne un peu plus élevé chez les rouvres que chez les pédonculés ; cette variabilité est faible entre provenances à l'intérieur de l'espèce ;
- Le nombre de cernes dans l'aubier et sa largeur (LCA) sont plus importants chez le chêne rouvre, donc la duraminisation est plus tardive ;
- La largeur d'aubier varie en fonction de la provenance chez les deux espèces, elle est plus large dans les provenances dont les arbres sont jeunes (Tableau 20) ;
- L'effet provenance est plus important dans le cas du pédonculé qui semble répondre peut être plus que les rouvres aux conditions de croissance ;
- La largeur cumulée de l'aubier et de l'écorce est corrélée positivement au seuil de 1‰ (rouvre : $r = 0,36$, $ddl = 121$; pédonculé : $r = 0,47$, $ddl = 163$) avec le diamètre de l'arbre ; cette largeur est plus grande chez les rouvres que chez les pédonculés (Figure 25). Ce résultat peut intéresser les merrandiers.

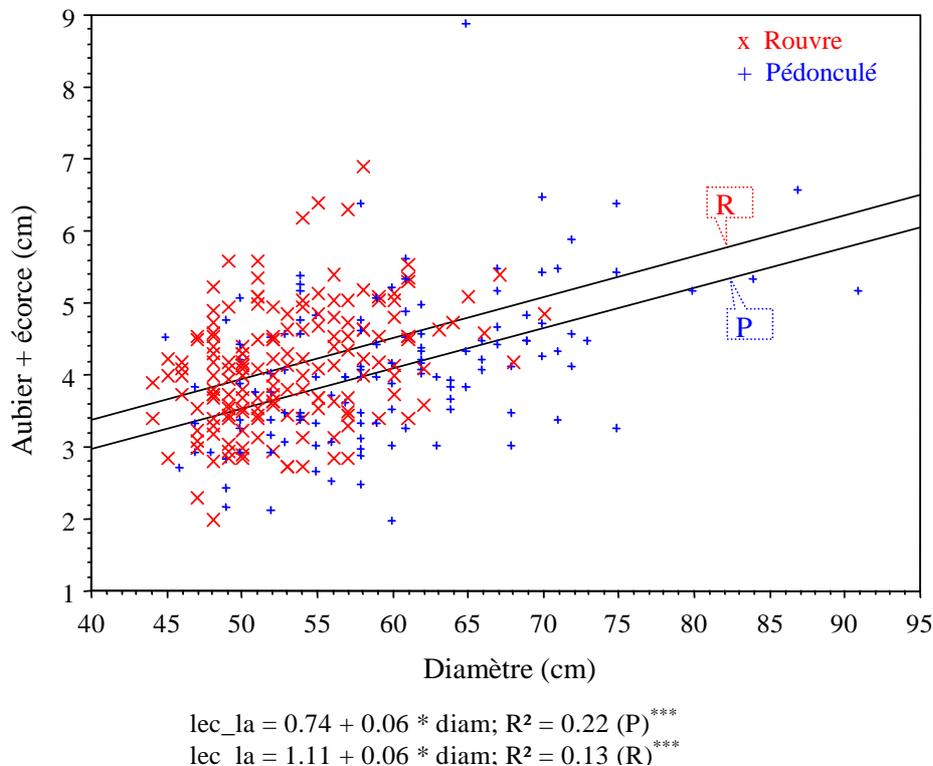


Figure 25 : Relation entre la largeur cumulée de l'aubier et de l'écorce avec le diamètre de l'arbre

Références bibliographiques

BECKER M., LEVY G., 1990,

Le point sur l'écologie comparée du chêne sessile et du chêne pédonculé. Revue Forestière Française, XLII, 2, 148-154.

BECKER M., LEVY G., 1982,

Le dépérissement du chêne en forêt de Tronçais les causes écologiques. Ann. Sci. For., 1982, 39 (4), pp. 439-444.

BRIX H., MITCHELL A.K., 1983,

Thinning and nitrogen fertilization effects on sapwood development and relationships of foliage quantity to sapwood area and basal area in Douglas-fir. Can. J. For. Res., 13, pp 384-389.

ESPINOSA BANCALARI M.A , PERRY D.A & MARSHALL J.D., 1987,

Leaf area-sapwood area relationships in adjacent young Douglas-fir stands with different early growth rate. Can. J. For. Res., 17, pp 174-180.

HATSCH E., 1997,

Répartition de l'aubier et acquisition de la forme de la tige chez le chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt) Liebl) : Analyse, modélisation et relation avec le développement du houppier. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 170p.

POLGE H., 1982,

Influence de la compétition et de la disponibilité en eau sur l'importance de l'aubier du Douglas. Ann. Sci. For., 1982, 39 (4), pp. 379-398.

SAVILL P.S., KANOWSKI P.J. , GOURLAY I.D. & JARVIS A.R., 1993,

Short note : genetic and intra-tree variation in the number of sapwood rings in *Quercus robur* and *Quercus petraea*. Silvae genetica, 42(6), pp 371-375.

YANG K.C., MURCHISSON H.G, 1992,

Sapwood thickness in *Pinus contorta* var. *latifolia*. Can. J. For. Res., 22, pp 2004-2006.

YANG K.C. HAZENBERG G. , BRADFIELD G.E. & MAZE J.R., 1985,

Vertical variation of sapwood thickness in *Pinus banksiana* Lamb. and *Larix laricina* (Du Roi) K. Koch. Can. J. For. Res. 15, pp 822-828.

CHAPITRE III. COULEUR DU BOIS

1 Introduction

La colorimétrie est une mesure quantitative et objective de la couleur. La qualité du bois est souvent caractérisée par sa durabilité naturelle et par ses propriétés anatomiques, physiques et mécaniques. 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.

Pour JANIN (1986a, et b), du point de vue technologique, la couleur est un bon critère pour les classements 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.

NEMETH (1982) a constaté sur 17 espèces d'arbres étudiées, que les teintes ont une grande variabilité allant des jaunes aux rosés alors que les saturations varient peu. Une corrélation positive, très forte est obtenue entre la clarté L^* et la teinte h^* pour toutes les espèces confondues : plus la teinte de l'échantillon se rapproche du jaune, plus celui-ci est clair. Selon JANIN (1987), la clarté L^* est un critère très important voire discriminant pour le tranchage du bois de chêne européen ; plus le chêne est clair, plus il est apprécié.

ZANETTI et al. (2003), ont étudié les conséquences du vieillissement artificiel sur la couleur du bois de chêne. Ils ont soumis pendant 500 heures aux UV 34 planchettes de chênes rouvres (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl), prélevés dans 15 forêts françaises, pour évaluer la perception esthétique de la différence de couleur par les utilisateurs. Deux enquêtes ont été effectuées avant et après un cycle de vieillissement ; elles ont montré que :

- a. la couleur est un critère important pour les choix des utilisateurs ;
- b. avant le vieillissement, les utilisateurs préfèrent les éprouvettes les plus claires, les plus rosées, les plus saturées et les plus homogènes. De même ils ont aussi une tendance à choisir les éprouvettes à cernes les plus larges ;
- c. après le vieillissement, le choix des utilisateurs se base toujours sur des différences de clarté, de tonalité et d'homogénéité de la couleur. En revanche,

la saturation et la largeur de cerne interviennent beaucoup moins dans leur choix.

Le vieillissement appliqué aux éprouvettes a induit des changements considérables de couleur : bois plus sombre, couleur plus saturée et plus homogène du point de vue de la clarté.

1.1 Sources de la variabilité de la couleur du bois

- La largeur de cerne : les variations de la largeur de cerne chez le chêne influencent sa structure anatomique qui s'accompagne de changements de couleur. 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 des changements de couleur qui influence l'homogénéité de celle-ci (PECHMAN et AUFSEß, 1973). 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^* .
- La structure anatomique du bois (vaisseaux, fibres, rayon ligneux...) : l'anatomie est un facteur important pour la variation de la couleur du bois. HOFMANN (1987, op.cit) 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. SCALBERT et *al.* (1987) et JANIN (1988, op.cit) ont aussi montré que la variabilité de la couleur chez le chêne est influencée par la composition chimique de son bois.
- Le plan de débit (radial, tangentiel, et transversal) : la variation de la couleur en fonction du plan de débit a été étudiée par plusieurs auteurs (SULIVAN, 1967 ; HOFMANN, 1987 ; JANIN, 1988, 1990, 1991 ; GONCALEZ, 1993 ; BEKWITH, 1979) qui ont constaté que la face transversale du bois du chêne est généralement plus foncée que les autres faces (tangentielle et radiale).

- L'âge de l'arbre : une étude sur les chênes d'Amance (Lorraine), a montré une forte corrélation entre l'âge et l'angle de teinte, une tendance à la diminution de la clarté L* quand l'âge augmente (FLOT, 1988), et une forte corrélation entre l'angle de teinte h*, la coordonnée a* et la saturation C* avec l'âge (JANIN et EYONO OWOUDI, 1991). KLUMPERS et JANIN (1992) ont observé un effet de l'âge cambial et un effet de l'âge des arbres sur la couleur du bois du chêne rouvre et pédonculé ; plus les arbres sont vieux, plus le bois est sombre.
- La provenance : 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 (KLUMPERS, 1994). L'importance de la clarté L* et de l'angle de teinte h* a été étudiée par FLOT (1988) qui a trouvé, pour ces deux paramètres, des différences significatives entre les régions du Centre et celle de l'Est de la France. Il semble qu'un classement en tenant compte de la clarté L* et de l'angle de teinte h* est possible et peut être un bon indicateur pour différencier les régions entre elles. Cependant des écarts significatifs, entre les arbres, sont obtenus pour la clarté L* à l'intérieur du Plateau Lorrain.
- L'espèce : SULLIVAN (1967) et MOSLEMI (1967) ont montré que si la clarté L* sous l'illuminant de type C 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).
- Les extractibles : 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.
- Autres sources de variabilité : le fil de bois, le sol, le séchage naturel, le sciage, les attaques de micro-organismes.

L'effet de la génétique est important pour les caractères liés à la couleur et aux teneurs en extractibles.

2 Matériels et méthodes

Le jugement visuel d'un observateur est subjectif, il doit être traduit par des valeurs numériques objectives ; c'est le but de la colorimétrie.

Les coordonnées chromatiques de la couleur du bois peuvent être mesurées par un type d'appareillage : le spectrocolorimètre.

Le système colorimétrique appelé CIE 1931 (Commission Internationale de l'Éclairage) nous permet de définir la couleur d'un objet par trois variables, X, Y et Z, appelées des valeurs de tristimulus, pour un illuminant standard et des observateurs standards 2° et 10° de la CIE.

2.1 Le système CIELAB 1976 :

- il est actuellement le système le plus largement utilisé en colorimétrie ;
- ce système est considéré comme approximativement uniforme ;
- dans ce système, chaque couleur est définie par trois paramètres qui sont proches de nos concepts visuels (Figure 26) :
 1. la clarté L^* , indice de luminosité relatif allant de 0 pour le noir à 100 pour le blanc absolu,
 2. a^* , l'axe a^* correspond au couple opposé vert ($-a^*$) – rouge ($+a^*$),
 3. b^* , l'axe b^* correspond au couple antagoniste bleu ($-b^*$) – jaune ($+b^*$).

Pour pouvoir comparer deux couleurs, il est recommandé de calculer les coordonnées C^* et h^* qui se calculent à partir de a^* et b^* :

- la saturation $C^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2}$; elle décrit la pureté de la couleur (nulle pour le gris, maximale pour les couleurs pures) ;
- l'angle de teinte, $h^* = \arctan b^*/a^*$, décrit la tonalité (ou teinte) de la couleur (rouge près de 0°, plutôt jaune près de 90°).

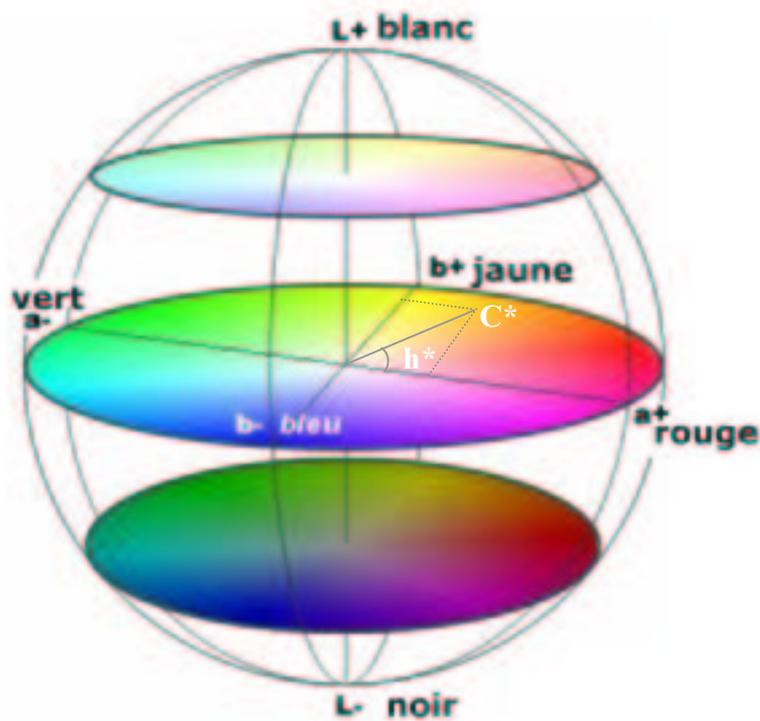


Figure 26 : système CIELAB (1976)

Les mesures de couleur ont été effectuées à l'aide d'un spectrocolorimètre industriel « Colorquest » de HUNTERLAB à sphère d'intégration, lié à un ordinateur (Figure 27)



Figure 27 Spectrocolorimètre « Colorquest » de HUNTERLAB commandé par un ordinateur (posters INRA-ERQB)

La sphère d'intégration crée un éclairage diffus et homogène de l'échantillon réfléchi et repris à 8° par rapport à la normale et dirigé à travers un réseau de diffraction concave vers 32 photodétecteurs au silicium, chacun de ces détecteurs capte l'énergie lumineuse d'une longueur d'onde bien définie. L'illuminant utilisé est de type D65 (lumière du jour à ciel couvert). Le principe de fonctionnement de cet appareil est fondé sur la sensibilité de l'œil des observateurs CIE standards en fonction de la longueur d'onde λ qui s'étend de 400 à 710 nm.

Le spectrocolorimètre est étalonné une fois avant de commencer les mesures et pendant les mesures toutes les 2 heures ; il existe pour cela des plaques métalliques émaillées de couleur de référence blanche et grise. L'étalonnage noir est une boîte noire, fonctionnant comme un piège à lumière. Ces étalons sont posés directement sur la fenêtre de mesure.

2.2 Mesures expérimentales

Les mesures de couleur ont été faites sur 576 échantillons de chênes (165 chênes rouvres et 123 chênes pédonculés) extraits de 288 arbres issus de neuf régions. Chaque arbre est représenté par deux échantillons diamétralement opposés correspondant aux deux zones dans lesquelles on peut obtenir des "merrains".

La couleur a été mesurée sur une face radiale longitudinale de chacun des échantillons. Il a été pratiqué trois mesures par échantillon, deux aux extrémités de l'échantillon et une troisième à mi-distance des deux précédentes (Figure 28). Chaque mesure ponctuelle s'applique à une surface de $78,54 \text{ mm}^2$. La surface a été rafraîchie juste avant la mesure : une lamelle fine de bois a été enlevée avec une scie à ruban à avance contrôlée.

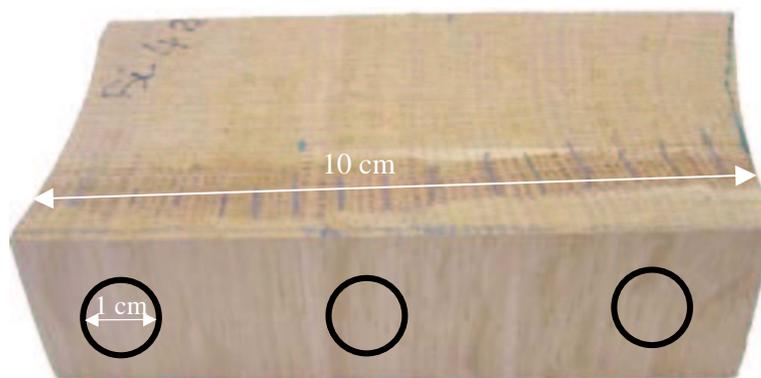


Figure 28 : Échantillon utilisé pour les mesures de couleur. Les cercles correspondent aux fenêtres de mesure ($\varnothing = 1 \text{ cm}$)

3 Résultats et discussion

Les valeurs retenues pour chaque échantillon sont obtenues en faisant la moyenne de trois points de mesure, de même les valeurs pour un arbre donné résultant de la moyenne des deux échantillons.

3.1 Clarté L*

D'après le Tableau 21, nous constatons que la région du Monlezun-Laurède (MP), chêne pédonculé, contient à la fois la valeur minimale (64,66) et maximale (75,99) de la clarté. La région de Jupille, chêne rouvre, représente le bois le plus clair à largeur de cerne la plus faible (1,30 mm). Pour les régions mixtes, la clarté ne varie pas beaucoup ni entre les chênes rouvre et pédonculé ni entre les régions, néanmoins, les différences vont toujours dans le même sens où les rouvres sont un peu plus clairs que les pédonculés.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Clarté L* | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 70,68 | 64,99 | 75,99 | 1,78 | 2.5 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 70,40 | 64,99 | 75,99 | 1,84 | 2.6 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 70,88 | 65,27 | 75,77 | 1,71 | 2.4 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 71,21 | 68,60 | 74,29 | 1,46 | 2.1 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 70,14 | 65,71 | 72,94 | 1,48 | 2.1 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 69,83 | 66,64 | 72,45 | 1,53 | 2.2 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 70,20 | 65,90 | 73,11 | 1,56 | 2.2 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 70,16 | 66,89 | 74,04 | 1,82 | 2.6 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 70,45 | 66,16 | 73,19 | 1,43 | 2.0 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 72,02 | 67,54 | 75,77 | 1,75 | 2.4 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 70,60 | 67,31 | 74,06 | 1,69 | 2.4 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 71,50 | 64,99 | 75,99 | 1,79 | 2.5 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 71,28 | 67,85 | 73,71 | 1,42 | 2.0 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 69,96 | 65,95 | 73,94 | 1,93 | 2.8 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 70,83 | 65,27 | 74,68 | 2,01 | 2.8 |

Tableau 21 : Statistique générale de la clarté L*

La variabilité de la clarté entre les valeurs minimales et maximales peut être importante mais elle demeure considérable à l'intérieur d'une provenance et entre les provenances (Figure 29), le coefficient de variation ne dépasse pas 3%.

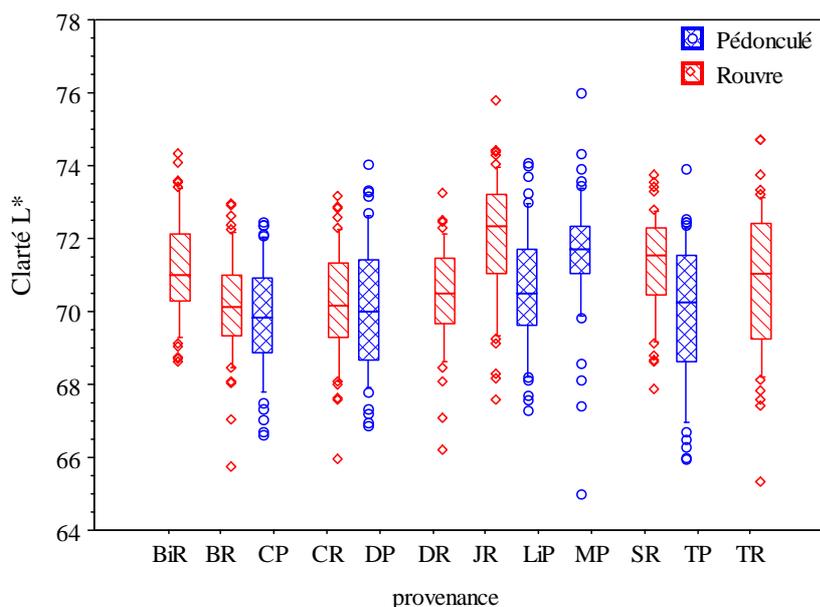


Figure 29 : Variabilité inter- et intra-provenance de la clarté L*

L'analyse de variance (Tableau 22) sur les trois régions mixtes (CDT) met en évidence un effet espèce significatif au seuil de 1%, l'effet région est significatif au seuil de 5%. Il n'y a pas d'effet interaction entre l'espèce et la région.

L'analyse réalisée sur les lots monospécifiques, rouvres ou pédonculés, montre la présence d'un effet provenance significatif au seuil de 1% et que 11 à 14% de la variabilité est due à l'effet provenance.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 17,56 ^{***} | 2% | 0,82 |
| | | Région | 2 | 3,51 [*] | 1% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 2,27 ^{NS} | - | |
| | | Arbre | 138 | 4,69 ^{***} | 79% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 19,70 ^{***} | 14% | 0,82 |
| | | Arbre | 276 | 3,84 ^{***} | 68% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 19,53 ^{***} | 14% | 0,81 |
| | | Arbre | 158 | 3,65 ^{***} | 67% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 18,12 ^{***} | 11% | 0,82 |
| | | Arbre | 118 | 4,06 ^{***} | 71% | |

Tableau 22 : Résultats de l'analyse de variance sur la clarté L*

La comparaison des moyennes ne montre pas une séparation nette entre les deux espèces, ceci peut être expliqué par l'âge qui est très variable à l'intérieur même des deux espèces, mais on peut quand même distinguer quatre groupes qui renferment chacun les provenances qui ne présentent pas de différence significative entre elles (Tableau 23). Nous constatons aussi que :

- Jupille chêne rouvre, qui possède la largeur de cerne moyenne la plus étroite de l'échantillonnage, présente le bois le plus clair;
- La clarté diminue généralement avec la largeur de cerne chez les rouvres. En revanche, celle-ci augmente avec la largeur de cerne chez les pédonculés.

| Groupement (Duncan) | Clarté L* | Âge | LgC (mm) | Échantillons | Espèce | Provenances | |
|---------------------|-----------|-------|------------|--------------|--------|-------------|-----|
| | A | 72,02 | 184 | 1,18 | 48 | R | JR |
| | B | 71,50 | 121 | 2,1 | 48 | P | MP |
| C | B | 71,28 | 128 | 1,73 | 48 | R | SR |
| C | B | 71,21 | 195 | 1,18 | 48 | R | BiR |
| C | D | 70,83 | 174 | 1,48 | 48 | R | TR |
| E | D | 70,60 | 130 | 2,29 | 48 | P | LiP |
| E | D | 70,45 | 169 | 1,51 | 44 | R | DR |
| E | F | 70,20 | 141 | 1,91 | 46 | R | CR |
| E | F | 70,16 | 180 | 1,47 | 52 | P | DP |
| E | F | 70,14 | 136 | 1,74 | 48 | R | BR |
| | F | 69,96 | 167 | 1,37 | 48 | P | TP |
| | F | 69,83 | 152 | 1,93 | 50 | P | CP |

Tableau 23 : Test de Comparaison des moyennes (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour la clarté L*

3.2 Angle de teinte h*

Le Tableau 24 montre que Jupille, chêne rouvre représente la valeur moyenne la plus faible de l'angle de teinte contrairement à ce qu'on a observé pour la clarté. La valeur moyenne la plus élevée se trouve à Darney, pédonculé. Les valeurs minimales et maximales entre les arbres se trouvent dans les provenances de pédonculés ; le minimum (62,81) à Cîteaux pédonculé et le maximum (67,67) à Monlezun-Laurède, chêne pédonculé.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Angle de teinte h* en degré | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------|--------------|--------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 65,29 | 62,81 | 67,67 | 0,79 | 1,2 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 65,78 | 62,81 | 67,67 | 0,62 | 0,9 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 64,92 | 62,9 | 66,82 | 0,7 | 1,1 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 64,81 | 63,03 | 66,1 | 0,68 | 1,1 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 65,21 | 63,72 | 66,2 | 0,52 | 0,8 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 65,62 | 62,81 | 66,49 | 0,62 | 0,9 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 65 | 63,31 | 66,1 | 0,65 | 1 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 66,05 | 64,72 | 67,11 | 0,48 | 0,7 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 65,29 | 63,72 | 66,82 | 0,65 | 1 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 64,42 | 63,03 | 65,97 | 0,78 | 1,2 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 65,91 | 64,98 | 66,61 | 0,4 | 0,6 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 65,66 | 64,3 | 67,67 | 0,73 | 1,1 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 64,61 | 62,9 | 65,9 | 0,69 | 1,1 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 65,66 | 63,33 | 66,86 | 0,71 | 1,1 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 65,12 | 64,03 | 66,06 | 0,49 | 0,7 |

Tableau 24 : Statistique descriptive de l'angle de teinte h* en degré

L'angle de teinte est légèrement plus élevé chez les pédonculés que chez les rouvres des régions mixtes (Figure 30) en moyenne 65.78 chez les pédonculés et 65.14 chez les rouvres.

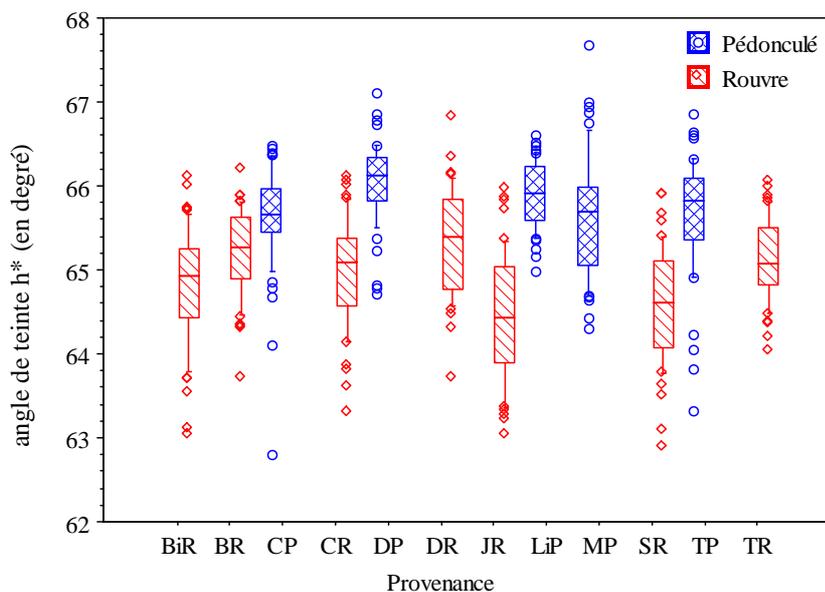


Figure 30 : Variabilité de l'angle de teinte h* (en degré)

L'analyse de variance réalisée sur les régions bispécifiques montre un effet hautement significatif de l'espèce : 21% de la variabilité de l'angle de teinte est dû à l'effet espèce. L'effet région est aussi significatif au seuil de 1%, mais il n'explique que 5% de la variabilité de l'angle de teinte h* (Tableau 25).

Un effet région significatif au seuil de 1% a été noté d'après l'analyse effectuée sur les lots monospécifiques de l'espèce rouvre ; cet effet explique 18% de la variabilité de l'angle de teinte.

Pour les lots monospécifiques de l'espèce pédonculé, l'effet région est aussi significatif au seuil de 1%, mais n'explique que 8% de la variabilité de l'angle de teinte. La variation de l'importance de l'effet région entre rouvre et pédonculé peut être due à l'absence de la relation entre la largeur de cerne (qui est elle-même influencée par l'effet région) et l'angle de teinte chez les pédonculés, cette même relation étant significative chez les rouvres.

L'analyse effectuée sur l'ensemble de l'échantillonnage montre un effet provenance significatif et explique 39% de la variabilité de l'angle de teinte, ce résultat se croise avec celui de FLOT (1988).

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 286,1 ^{***} | 21% | 0,89 |
| | | Région | 2 | 32,95 ^{***} | 5% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 2,72 ^{NS} | - | |
| | | Arbre | 138 | 6,17 ^{***} | 63% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 106,14 ^{***} | 39% | 0,90 |
| | | Arbre | 276 | 5,54 ^{***} | 51% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 33,35 ^{***} | 18% | 0,85 |
| | | Arbre | 158 | 4,74 ^{***} | 67% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 20,3 ^{***} | 8% | 0,89 |
| | | Arbre | 118 | 7,32 ^{***} | 81% | |

Tableau 25 : Résultats de l'analyse de variance sur l'angle de teinte h* en degré

Un test de comparaison des moyennes (Duncan) a été effectué pour séparer les lots et les espèces à partir de l'angle de teinte de leur bois (Tableau 26)

- ✓ Au niveau de l'espèce : les deux espèces sont nettement séparées ;
- ✓ Dans le lot de pédonculés, on distingue 3 groupes :
 1. les deux premiers ne contiennent chacun qu'une provenance, Darney pédonculé pour le premier et Limousin pour le deuxième ;
 2. le troisième regroupe trois provenances, Tronçais, Cîteaux et Monlezun-Laurède pédonculés.
- ✓ Cinq groupes dans le lot des rouvres :
 1. les quatre premières provenances sont classées dans deux groupes (deux provenances par groupe) ;

2. les trois provenances restantes sont classées dans trois groupes différents, ce qui signifie que les provenances varient beaucoup entre elles.

| Groupement (Duncan) | | Angle de teinte h* | Échantillons | Provenances | Espèce |
|---------------------|---|--------------------|--------------|-------------|----------|
| | A | 66,05 | 52 | DP | P |
| | B | 65,91 | 48 | LiP | P |
| | C | 65,66 | 48 | TP | P |
| | C | 65,66 | 48 | MP | P |
| | C | 65,62 | 50 | CP | P |
| | D | 65,29 | 44 | DR | R |
| E | D | 65,21 | 48 | BR | R |
| E | F | 65,12 | 48 | TR | R |
| | F | 65,00 | 46 | CR | R |
| | G | 64,81 | 48 | BiR | R |
| | H | 64,61 | 48 | SR | R |
| | I | 64,42 | 48 | JR | R |

Tableau 26 : Test de Comparaison des moyennes (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour l'angle de teinte h* en degré.

Nous remarquons que chez les deux espèces, les régions de Darney, Tronçais et Cîteaux se succèdent dans le même ordre. Toujours chez les deux espèces, les régions de Tronçais et Cîteaux sont classées dans le même groupe, ce qui signifie que les valeurs moyennes de l'angle de teinte ne se différencient pas de façon significative entre ces régions à l'intérieur de l'espèce.

Nous constatons aussi que Jupille, chêne rouvre, présente le chêne le plus rosé et le plus clair de l'échantillonnage. Chez les chênes rouvres, plus on se dirige de l'Ouest vers l'Est plus la couleur du bois devient plus jaune sauf Bitche et Cîteaux.

3.3 Saturation de la teinte C*

Le Tableau 27 montre que la saturation varie entre 23,45 pour le Limousin et 28,14 à Cîteaux pour les pédonculés. A Jupilles où les cerne sont les plus étroits des rouvres la valeur est 24,31, Bertranges qui possède la largeur de cerne moyenne la plus élevée des rouvres la valeur de la saturation est 28,96.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Saturation C* de la teinte | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|----------------------------|--------------|--------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 26,03 | 23,45 | 28,96 | 0,88 | 3,4 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 25,95 | 23,45 | 28,14 | 0,91 | 3,5 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 26,08 | 24,31 | 28,96 | 0,85 | 3,3 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 26,06 | 24,73 | 28,02 | 0,80 | 3,1 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 26,19 | 24,51 | 28,96 | 0,94 | 3,6 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 26,10 | 24,20 | 28,14 | 0,78 | 3,0 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 26,03 | 24,64 | 28,04 | 0,79 | 3,1 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 26,39 | 24,83 | 27,91 | 0,80 | 3,0 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 26,25 | 25,07 | 28,68 | 0,77 | 2,9 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 25,90 | 24,31 | 28,77 | 0,94 | 3,6 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 25,69 | 23,45 | 27,68 | 0,83 | 3,2 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 25,67 | 24,22 | 27,51 | 0,87 | 3,4 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 25,78 | 24,53 | 27,80 | 0,72 | 2,8 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 25,88 | 23,82 | 27,96 | 1,08 | 4,2 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 26,37 | 24,33 | 27,92 | 0,88 | 3,4 |

Tableau 27 : Statistique générale de la saturation de la teinte C*

La saturation ne varie pas beaucoup entre les rouvres et les pédonculés dans les régions mixtes.

D'après les analyses de variances présentées dans le Tableau 28, nous constatons l'absence d'effet "espèce" dans le cas des régions mixtes. L'effet de l'interaction entre la région et l'espèce est significatif au seuil de 1% sur la saturation, cependant, l'effet région n'est significatif qu'au seuil de 1%.

Une partie de la variabilité de la clarté et de l'angle de teinte est dû à l'effet "espèce", ce dernier n'a pas d'effet sur la saturation.

Pour les lots monospécifiques des rouvres et des pédonculés, l'effet région est significatif au seuil de 1%.

Dans toutes les analyses de variance citées précédemment, la plus grande partie de la variabilité est due à l'effet "arbre", qui n'est jamais inférieure à 60%.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 1,85 ^{NS} | - | 0,78 |
| | | Région | 2 | 4,94 ^{**} | 2% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 8,44 ^{***} | 3% | |
| | | Arbre | 138 | 3,5 ^{***} | 73% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 9,39 ^{***} | 7% | 0,80 |
| | | Arbre | 276 | 3,76 ^{***} | 73% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 6,9 ^{**} | 5% | 0,81 |
| | | Arbre | 158 | 4,12 ^{***} | 76% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 12,89 ^{***} | 9% | 0,79 |
| | | Arbre | 118 | 3,38 ^{***} | 70% | |

Tableau 28 : Résultats de l'analyse de variance sur la saturation de la teinte C*

Le test de la comparaison des moyennes (Duncan) sur l'ensemble des provenances (Tableau 29) montre trois groupes de provenances homogènes qui se distinguent par la saturation :

1. le premier regroupe : trois provenances rouvres et une pédonculé (Darney);
2. dans le deuxième, les rouvres sont majoritaires ;
3. le troisième groupe, lui renferme les deux espèces dont Saint Palais qui présente, pour les rouvres, la valeur moyenne la plus faible de la saturation (25,78).

| Groupement (Duncan) | Saturation C* | Échantillons. | Provenance | Espèce | |
|---------------------|---------------|---------------|------------|--------|----------|
| | A | 26.39 | 52 | DP | P |
| | A | 26.37 | 48 | TR | R |
| B | A | 26.25 | 44 | DR | R |
| B | A | 26.19 | 48 | BR | R |
| B | C | 26.10 | 50 | CP | P |
| B | C | 26.06 | 48 | BiR | R |
| B | C | 26.03 | 46 | CR | R |
| D | C | 25.90 | 48 | JR | R |
| D | C | 25.88 | 48 | TP | P |
| | D | 25.78 | 48 | SR | R |
| | D | 25.69 | 48 | LiP | P |
| | D | 25.67 | 48 | MP | P |

Tableau 29 : Test de Comparaison des moyennes (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour la saturation de la teinte C*

Nous constatons que le premier groupe renferme tous les chênes de Darney rouvres et pédonculés, et que le deuxième rassemble tous ceux de Cîteaux, rouvres et pédonculés, ceci explique l'absence de l'effet espèce dans l'analyse de variance.

Peut-on séparer les deux espèces rouvres et pédonculés à partir de leurs critères de la couleur ?

➤ Matrice de corrélations :

| Espèce | Variable | Âge | Lcm | L* | h* | C* | a* | b* | Espèce |
|------------------------|----------|----------------------------|-----------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|---------------------|
| Chêne pédonculé | Âge | 1 | -0,67 <0,0001 | 0,12 0,0357 | -0,18 *** 0,0011 | 0,05 NS 0,4128 | 0,14 0,0088 | 0,01 NS 0,8063 | Chêne rouvre |
| | Lcm | -0,57 <0,0001 | 1 | -0,18 0,0009 | 0,34 *** <0,0001 | -0,08 NS 0,128 | -0,27 <0,0001 | -0,02 NS 0,6663 | |
| | L* | -0,23 0,0003 | 0,18 0,0039 | 1 | -0,14 0,0126 | -0,4 <0,0001 | -0,23 <0,0001 | -0,42 <0,0001 | |
| | h* | -0,05 NS 0,443 | 0,06 NS 0,3559 | 0,18 0,0057 | 1 | -0,07 NS 0,2264 | -0,66 <0,0001 | 0,11 * 0,047 | |
| | C* | 0,29 *** <0,0001 | -0,29 *** <0,0001 | -0,33 <0,0001 | -0,20 ** 0,002 | 1 | 0,8 <0,0001 | 0,98 <0,0001 | |
| | a* | 0,25 <0,0001 | -0,26 <0,0001 | -0,34 <0,0001 | -0,67 <0,0001 | 0,86 <0,0001 | 1 | 0,68 <0,0001 | |
| | b* | 0,29 *** <0,0001 | -0,29 *** <0,0001 | -0,31 <0,0001 | -0,06 NS 0,3778 | 0,99 <0,0001 | 0,78 <0,0001 | 1 | |

Tableau 30 : Matrice de corrélations sur 330 chênes rouvres et 246 chênes pédonculés

Le Tableau 30 représente les coefficients de corrélations des deux matrices symétriques entre l'âge, la largeur de cerne dans la zone d'étude et les variables de la couleur chez les chênes rouvres au dessus et pédonculés au dessous. Nous pouvons constater des corrélations séparatives des deux espèces rouvre et pédonculé :

- ✓ Une corrélation négative entre l'âge et la clarté chez les pédonculés, celle-ci est positive chez les rouvres, ce qui signifie que le bois âgé du pédonculé est sombre et celui de rouvre est clair (Figure 31) ;

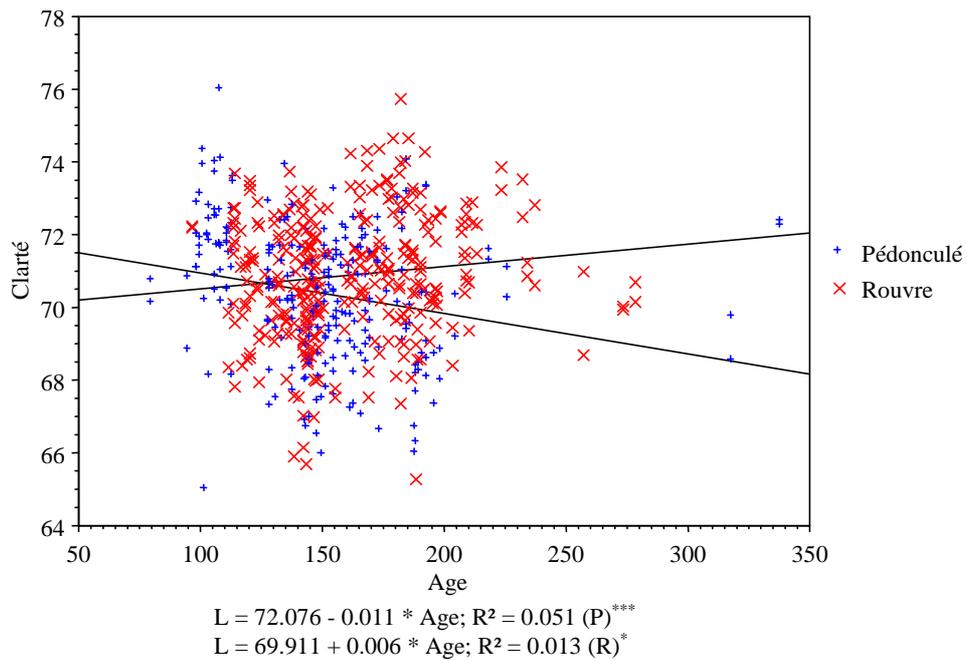


Figure 31 : Évolution de la clarté en fonction de l'âge de l'arbre chez les deux espèces

- ✓ La relation suivante s'inverse avec la largeur de cerne ; le bois devient plus clair en augmentant la largeur de cerne chez les pédonculés et plus sombre chez les rouvres ;

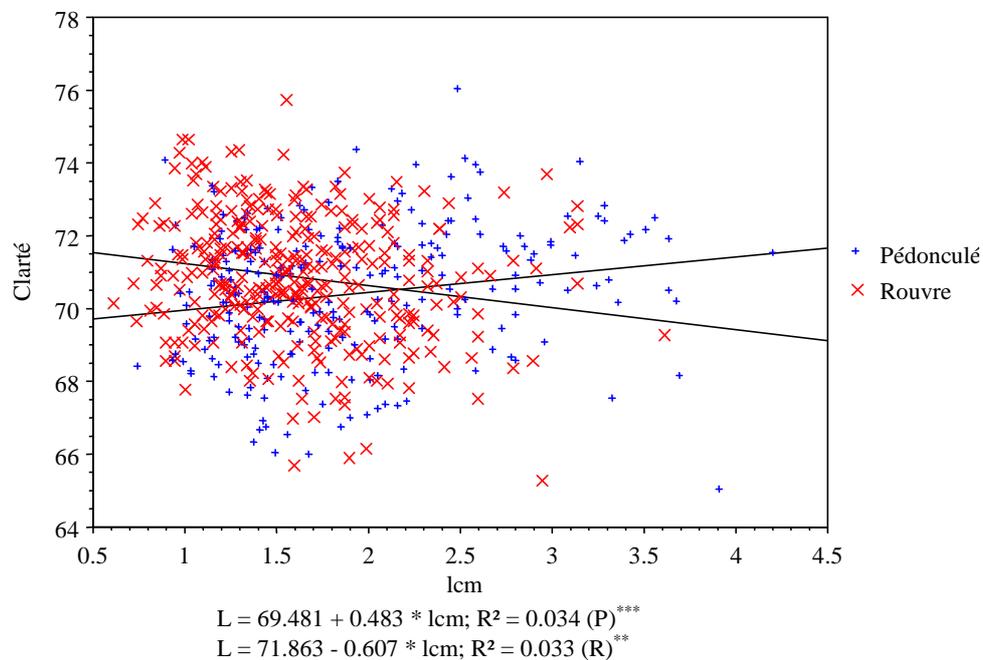


Figure 32 : Évolution de la clarté en fonction de la largeur de cerne de merrain chez les deux espèces

- ✓ Une corrélation négative et significative entre la clarté et l'angle de teinte dans le cas du chêne rouvre, et positive significative chez les pédonculés ;
- ✓ Une corrélation hautement significative (1‰) entre la largeur de cerne, l'âge et l'angle de teinte chez les rouvres, une absence totale de cette corrélation dans le cas des pédonculés. La relation entre la largeur de cerne et l'angle de teinte confirme ce qui a été obtenu par FLOT (1988) ;
- ✓ Une corrélation significative au seuil de 1‰ entre la largeur de cerne, l'âge et la saturation chez les pédonculés, alors que ces mêmes relations ne sont pas significatives chez les rouvres ;
- ✓ Une relation significative au seuil de 1‰ entre la largeur de cerne, l'âge et le paramètre b^* chez les pédonculés, alors que ces mêmes corrélations ne sont pas significatives dans le cas des rouvres.

On peut noter que toutes les variables qui sont corrélées avec l'âge sont également corrélées avec la largeur de cerne chez les deux espèces, mais le sens des corrélations s'inverse.

4 Conclusion

- L'analyse de variance montre que l'espèce a un effet hautement significatif sur les caractéristiques de la couleur sauf la saturation ;
- Certaines variables de la couleur semblent être des critères séparatifs des deux espèces rouvre et pédonculé en particulier l'angle de teinte (les pédonculés sont plus jaunes que les rouvres);
- La discrimination des deux espèces rouvre et pédonculé nous paraît réalisable à partir des corrélations entre la largeur de cerne, l'âge et les variables de la couleur (la clarté, les coordonnées C* et h*) ;
- L'augmentation de la largeur de cerne chez les pédonculés conduit à un bois plus clair, alors que cette augmentation donne, chez les rouvres, un bois plus sombre. Cette relation entre la largeur de cerne et la clarté est inversée dans le cas de l'âge ;
- L'effet région sur la clarté et l'angle de teinte est plus remarqué chez le chêne rouvre que chez le chêne pédonculé. Dans le cas de chêne rouvre, les provenances de l'Ouest sont plus rosées que celles de l'Est ;
- L'étude des variations quantitatives et objectives de la couleur chez le chêne rouvre et pédonculé (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) montre ainsi que la couleur est un facteur déterminant dans la différence de qualité et que l'on peut appliquer cette technique à d'autres espèces avec profit.

Références bibliographiques

BECKWITH J.R., 1979,

Theory and practice of hardwood color measurement. Wood Science, 11(3), 169-175.

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, 173 pp.

FLOT J.C., 1988,

La couleur du chêne de tranchage français.- Mémoire de 3^{ème} année à l'ENITEF. 89 p.

GONCALEZ 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, Sciences forestières. 402p.

HOFFMANN P., 1987,

Mesure de la variabilité de la couleur du bois : méthodologie et influence de l'anatomie du plan ligneux et de la variation angulaire du débit. DEA Sciences du bois ; 74 p.

JANIN G., 1991,

Couleur et qualité du bois. Séminaire « couleur et colorimétrie ». Royaumont, 6 p.

JANIN G., 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 ». 9p.

JANIN G., 1990,

Colorimétrie : principe de mesure de la couleur. Application au bois. Cours de DEA Sciences du bois, 20p.

JANIN G., 1988,

La mesure de la couleur du bois. Intérêts agronomique, technologique et économique. In : mesure instrumentation – contrôle – automatisme (MICA). Séminaire couleurs et lumière. Éditeur : MICA, Montreuil, France.

JANIN G., 1987,

Mesure de la couleur du bois ; intérêt forestier et industriel. Ann. Sci. For., 1987, 44 (4), pp. 455-472.

JANIN G., 1986c,
Mesure de la couleur du bois; intérêt agronomique, technologique et économique. -In: Colloque Scientifique International, ARBORA, p.: 171-183.

JANIN G., 1986b,
Étude de la variabilité de la couleur du chêne de tranchage.- le bois national, 11 Janvier 1986, p. : 19-21.

JANIN G., 1986a,
La couleur du bois, un facteur clé de qualité. -Mesures, 17 mars 1986, p.: 61-65.

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 l'ENGREF, Sciences forestières du bois, 1995p.

KLUMPERS J., JANIN G., 1992,
Influence of age and annual ring width on the wood colour of oaks. Holz als Roh- und Werkstoff 50, pp. 167-171.

MAZET J.F., TRIBOULOT-TROUY M.C., MERLIN A., JANIN G. & DEGLISE X., 1993,
Modification de couleur du bois de chênes européens exposés à la lumière solaire. Ann.. Sci For., 1993, 50 (2), pp. 119 - 146

MOSLEMI A. A., 1967,
Quantitative color measurement for black walnut wood. US forest service, Research paper NC. 17 : 59pp.

NEMETH K., 1982,
Examinations of tree colour in the CIELAB-systeme. Erdeszeti es paipari,èv 2 :125-135.

PECHMANN H.von., AUFSEß H.von., 1973,
Struktur und Farbe als Qualitätsmerkmale von Eichenfurnierholz. Holzforschung. 27(2), pp. 51-59.

SCALBERT A., MONTIES B., JANIN G., 1987,
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, tome 2, pp. 261-268.

SULLIVAN J.D., 1967,
Color characterization of wood : color parameters of individual species. Forest products Journal, 17(8), pp. 25-29.

ZANETTI M., MOTHE F., MERLIN A., JANIN G., LE MOGUEDEC G. & GONCALEZ J., 2003,
Conséquences du vieillissement du bois de chêne sessile (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl.) sur sa perception esthétique par les utilisateurs. Ann. For. Sci., 2003, 60 (1), pp. 61 - 68.

**CHAPITRE IV. DENSITÉ DU BOIS DE
CHÊNE**

1 Introduction

La notion de densité permet de définir le rapport entre la masse volumique d'un échantillon de bois et celle d'un volume d'eau égal au volume de cet échantillon, à un degré d'humidité qui doit être précisé, par exemple : à l'état vert ou sec à l'air ou anhydre.

La masse volumique (ρ), est un critère de qualité essentiel et important parce qu'il renseigne sur des propriétés fondamentales, notamment sur les propriétés mécaniques du bois. Elle est définie comme étant le rapport entre la masse (M) et le volume (V) à l'humidité h :

$$\rho_h (\text{kg/m}^3) = \frac{M_h}{V_h} ;$$

Dans la pratique, les termes «masse volumique anhydre», «masse volumique spécifique», «masse volumique basale», «masse volumique maximale», ont la même valeur que les termes «densité anhydre», «densité spécifique», «infradensité ou densité basale ou densité théorique minimale», «densité maximale», dans notre étude nous parlerons de densité, même si nous l'exprimons en kg/m^3 .

Note : la plupart des résultats cités dans la littérature, donnent la masse volumique en g/cm^3 , mais la règle actuelle veut qu'elle soit donnée en kg/m^3 .

Il faut distinguer entre la densité réelle du bois qui est la densité de la matière ligneuse anhydre et la densité apparente d'un volume de bois :

- la densité de la matière ligneuse est sensiblement la même quelle que soit l'espèce considérée. On considère généralement qu'elle vaut 1530 kg/m^3 ;
- la densité apparente est un paramètre physique. Elle exprime la quantité massique de la matière ligneuse contenue dans un volume de bois à un état d'humidité donné (POLGE, 1967).

La densité apparente quant à elle varie :

- d'une espèce à une autre suivant la structure anatomique (100 kg/m^3 pour le balsa ; $400\text{-}500 \text{ kg/m}^3$ pour les peupliers, le sapin... ; $700\text{-}800 \text{ kg/m}^3$ pour les Chênes à feuilles caduques) ;
- à l'intérieur de la même espèce suivant les provenances, les individus et les conditions de croissance (climat, sol, sylviculture...)

- entre les diverses parties d'un même arbre : le duramen, l'aubier, la hauteur dans le tronc... ;
- à l'intérieur du cerne suivant les éléments anatomiques : bois initial, bois final, vaisseaux, fibres, rayons ligneux, parenchymes... ;
- elle est étroitement liée à la porosité du bois : le hêtre dont la porosité est d'environ 58 %, a une densité anhydre de l'ordre de 650 kg/cm^3 ; le balsa, lui, présente une densité anhydre de 100 kg/m^3 et sa porosité approche les 94 % (POLGE, 1967) ;
- et de plus elle varie beaucoup en fonction de la teneur en eau.

KELLER (1995) indique 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 (POLGE et KELLER, 1973 ; COURTOISIER, 1976).

1.1 Sources de la variabilité de la densité du bois de chêne

1.1.1 L'espèce

DERET – VARCIN (1983) a comparé les chênes rouvres (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl), les chênes pédonculés (*Quercus robur* L.) et les chênes intermédiaires provenant d'une même station de la forêt de Morimond (Haute Marne), à partir de mesures effectuées sur des carottes de sondage. Elle a constaté que la dureté du chêne rouvre est plus grande que celle du chêne pédonculé.

L'infradensité (masse anhydre / volume saturé) et les critères de la densité obtenus par la microdensitométrie sont plus élevés chez le chêne rouvre que chez les chênes pédonculé et intermédiaire.

Les propriétés mécaniques sont très liées à la densité globale ou locale du bois ainsi qu'à sa constitution anatomique et sont souvent en corrélation positive avec la densité. En comparant les deux chênes, rouvre et pédonculé, on constate généralement qu'à largeur de cerne comparable, le chêne rouvre a une densité et une rétractibilité plus forte que celles du chêne pédonculé (KELLER, 1995).

1.1.2 L'origine géographique

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...).

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.

Selon POLGE (1975), l'augmentation de l'infradensité et de la proportion de fibres chez le chêne rouvre de la forêt de Bercé est due à un effet de fertilisation.

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

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.

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.

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.

Selon ACKERMANN (1994), les caractéristiques microdensitométriques du bois du chêne pédonculé augmentent en allant des stations pauvres aux stations riches, cela pourrait s'expliquer par une différence de la structure anatomique du bois final de l'accroissement annuel. La même hypothèse avait été proposée par POLGE (1973, op. cit.).

BERGES (1998) constate 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.

Selon LE MOGUEDEC (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.

BERGES *et al.* (2000) 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 (*Quercus petraea*)

GUILLEY (2000) a établi un modèle pour estimer l'infradensité du bois du chêne rouvre, en tous points et à différentes hauteurs de la grume, à partir de l'âge depuis la moelle, la largeur de cerne et de l'unité de croissance. Ce modèle a permis de structurer et quantifier trois sources de variation de l'infradensité :

- les variations intra-arbre expliquées par la croissance ;
- les variations dues à l'effet arbre
- et les variations intra-arbre résiduelles. Ces trois variables contribuent respectivement à 52 %, 31 %, et 17 % de la variation totale ;

Un autre modèle a été construit sur la base de mesures microdensitométriques, effectuées à 1,30 m de hauteur sur 82 chênes, il a permis d'estimer la densité de chaque cerne à partir de son âge depuis la moelle et de sa largeur. Trois facteurs de variabilité de la densité ont été séparés par ce modèle :

- les variations intra-arbre dues à la croissance radiale des arbres ;
- les variations inter-arbre.
- et les variations intra-arbre résiduelles, ces trois facteurs représentant respectivement 48 %, 31 %, et 21 % des variations totales ;

D'après le même auteur, les facteurs régionaux, stationnels et sylvicoles n'expliquent qu'une part très faible de la variabilité totale de la densité du bois du chêne sessile lorsque l'âge et la largeur de cerne sont prises en compte (ces travaux confirment les résultats de LE MOGUEDEC, 2000 ; BERGES *et al.*, 2000).

1.1.3 La largeur de cerne et sa liaison avec la densité

Cette relation est très importante parce que la largeur de cerne influence la qualité du bois qui est caractérisée par la densité.

La densité moyenne du bois, chez les espèces feuillues à zone initiale poreuse, est liée positivement à la largeur de cerne. Cette liaison est due à la forte corrélation de la densité avec la largeur du bois final (ZOBEL et BUIJTENEN, 1989). Selon les 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 BERGES (2000).

Selon POLGE et KELLER (1973) d'une manière générale, la densité du bois du chêne augmente avec la largeur de cerne.

FEUILLAT (1996) a observé une corrélation positive entre la largeur de cerne et l'infradensité ($d_{II} = 513$, $R^2 = 0,11$).

Les 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...).

SHULZ (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 accroissements larges (plus de 3 mm) (Figure 33).

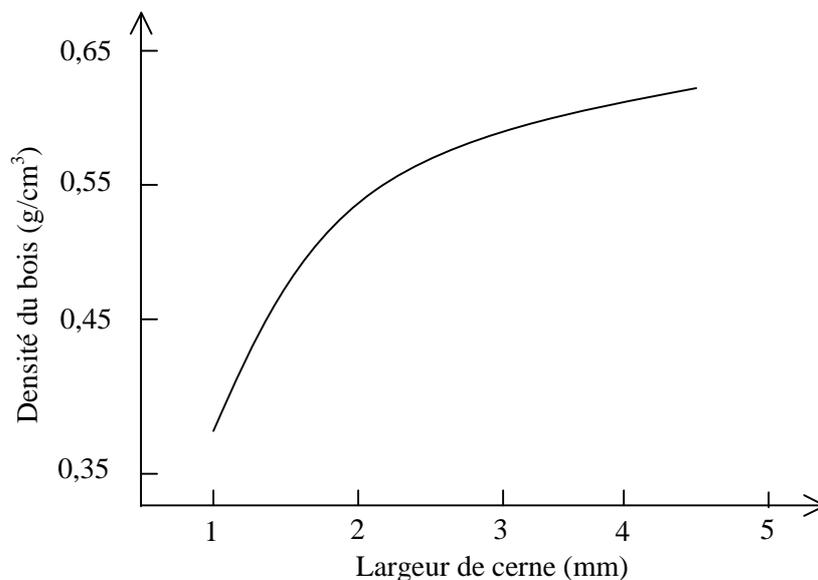


Figure 33 : Effet d'une accélération de la croissance sur la densité du bois de chêne

(adapté d'après POLGE H. - KELLER R. , 1973)

DERET – VARCIN (1983) a trouvé des corrélations positives, au moins au seuil de 1 %, entre l'infradensité, les critères de la microdensitométrie (densité moyenne, densité du bois final...) et la largeur de cerne.

BERGES (1998) montre que la largeur de cerne, chez le chêne rouvre, n'a pas le même effet sur toutes les caractéristiques intra-cerne de la densité. La densité maximale (DMax), la

densité du bois final (DBF) et initial (DBI) augmentent avec la largeur de cerne. En revanche, la densité minimale (DMin) diminue avec la largeur de cerne.

La densité du bois varie beaucoup d'un arbre à l'autre à l'intérieur d'une même classe de largeur de cerne, ceci est dû à la grande diversité de la construction anatomique (POLGE et KELLER, 1973 ; COURTOISIER, 1976).

1.1.4 L'âge

BERGES (1998) chez le chêne sessile écrit que l'âge a un effet négatif très significatif sur toutes les caractéristiques de la densité (DMin, DMax, DBI, DBF, DMoy).

La densité moyenne du cerne diminue avec l'âge cambial, ceci 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 (GUILLEY et NEPVEU, 2003).

A 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 technique et physiologique particuliers GUILLEY (2000).

1.1.5 L'arbre

Toutes les études faites sur le chêne ont toujours montré la présence d'un effet arbre très significatif.

BERGES et *al.* (2000) ont montré que l'effet arbre est toujours très significatif à l'intérieur d'une même placette et que la plus grande partie de cet effet est due à un effet génétique. Ces résultats avaient déjà été trouvés par ACKERMANN (1995) et HERVE (1999).

ROZENBERG et *al.* (2001) ont montré que la plus grande partie de l'effet arbre observé, chez le Douglas, pour la relation entre la densité et la croissance, est d'origine génétique.

2 Mesure de l'infradensité

L'infradensité du bois ou densité théorique minimale (correspondant à la masse volumique basale) est définie comme étant le rapport entre la masse anhydre (M_0) de l'échantillon et son volume saturé (V_S) :

$$\rho_i \text{ (kg/m}^3\text{)} = \frac{M_0}{V_S};$$

2.1 Matériel et méthode

Les mesures de l'infradensité ont été réalisées sur 576 échantillons extraits de 288 arbres issus de neuf régions françaises. Chaque arbre est représenté par deux échantillons diamétralement opposés (Figure 34).



Figure 34 : Échantillon utilisé pour mesurer l'infradensité

Ces mesures ont été faites à l'aide d'un système monté pour la circonstance par PERRÉ, BAKOUR et AGOUA qui se compose des éléments suivants (Figure 35) :

- une pompe à vide qui permet d'avoir une saturation des échantillons ;
- une balance électronique avec une précision de $1/1000^{\text{ème}}$ de gramme sur laquelle est posé un récipient contenant de l'eau pour mesurer le volume saturé ; sur cette même balance, sera mesuré le poids anhydre ;
- un ordinateur doté d'un logiciel écrit par PERRÉ permettant l'acquisition directe des données ;
- une étuve afin de sécher le bois jusqu'à l'état anhydre.

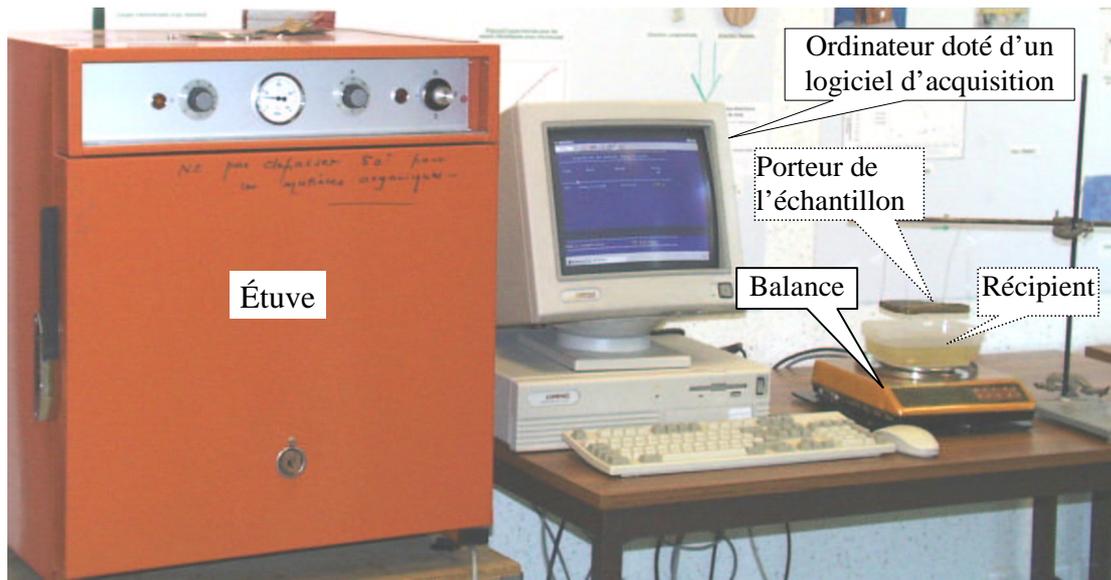


Figure 35 : Dispositif de la mesure de l'infradensité

Nous avons mesuré le volume saturé par application du principe d'Archimède, "Tout corps plongé dans un liquide reçoit de la part de ce liquide une poussée verticale, dirigée du bas vers le haut, égale au poids du volume du liquide déplacé (un litre d'eau pèse un kilogramme)", sur des échantillons amenés à saturation (échantillons mis au moins 48 heures dans l'eau et sous vide). Ensuite, les échantillons sont séchés pendant 24 heures dans une étuve à une température de 102 C°. Afin d'éviter toute reprise d'humidité, les échantillons ont été retirés de l'étuve et pesés un par un très rapidement. L'infradensité a été calculée sur un tableau (Excel) à partir des données enregistrées par le logiciel d'acquisition.

2.2 Résultats et discussion

Les mesures de l'infradensité sur 576 échantillons provenant de 288 arbres conduisent à une moyenne de 530 kg/m³ avec un coefficient de variation de 8% et des valeurs extrêmes de 416 à 687 kg/m³ (Tableau 31).

Toutes régions confondues, les chênes rouvres présentent en moyenne une infradensité plus forte que les chênes pédonculés : 541 kg/m³ contre 516 kg/m³, soit une différence de 25 kg/m³ (5%). En revanche, les coefficients de variation à l'intérieur de chacune des espèces sont très proches.

Ce résultat est confirmé pour les régions bispécifiques, où à âge et à largeur de cernes proches, les chênes rouvres présentent une densité plus forte que les chênes pédonculés :

- + 59 kg/m³ à Cîteaux ;
- + 38 kg/m³ à Darney ;

- + 24 kg/m³ à Tronçais.

Si on considère les résultats au niveau des 12 provenances, nous observons qu'à l'exception du Monlezun-Laurède, les provenances de chênes pédonculés ont une infradensité en moyenne plus faible que les provenances de chênes rouvres.

Il est à noter que les coefficients des variations intra-provenances sont peu différents et presque compris entre 6 et 9%.

Parmi les chênes rouvres, les régions extrêmes pour la densité sont celles de Cîteaux (563 kg/m³) et Bitche (522 kg/m³), soit un écart de 41 kg/m³. Nous constatons que ces deux provenances représentent aussi les valeurs extrêmes de la largeur moyenne de cerne chez les chênes rouvres.

Parmi les chênes pédonculés, les provenances extrêmes pour l'infradensité sont celles du Monlezun-Laurède (555 kg/m³) et Darney (489 kg/m³), soit un écart de 66 kg/m³, ce qui est considérable. Ces deux provenances représentent les valeurs extrêmes de l'âge moyen chez les chênes pédonculés

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Infradensité (kg/m ³) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 530 | 416 | 687 | 43 | 8 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 516 | 416 | 664 | 41 | 8 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 541 | 443 | 687 | 42 | 8 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 522 | 443 | 611 | 45 | 9 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 553 | 490 | 687 | 35 | 6 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 504 | 416 | 602 | 33 | 7 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 563 | 483 | 639 | 39 | 7 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 489 | 423 | 572 | 33 | 7 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 527 | 458 | 592 | 38 | 7 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 526 | 448 | 593 | 40 | 8 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 520 | 428 | 582 | 36 | 7 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 555 | 480 | 664 | 36 | 6 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 558 | 478 | 613 | 32 | 6 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 514 | 443 | 587 | 37 | 7 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 538 | 464 | 647 | 42 | 8 |

Tableau 31 : Statistiques générales de l'infradensité mesurée en kg/m³

La variabilité de l'infradensité chez les deux espèces évolue de la même façon à l'intérieur de la provenance (Figure 36). Dans les régions mixtes, on constate que les rouvres sont classés au-dessus des pédonculés sauf dans la région de Tronçais où les deux espèces sont assez proches, mais les rouvres sont au-dessus.

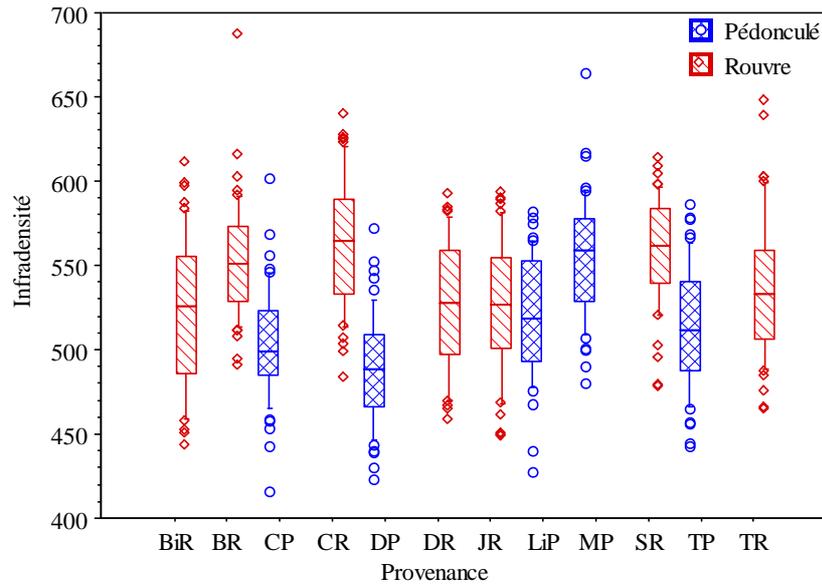


Figure 36 : Variabilité inter- et intr-spécifique de l'infradensité mesurée sur 165 chênes rouvres et 123 chênes pédonculés provenant de 9 origines géographiques

2.2.1 Relation entre l'âge, la largeur de cerne et l'infradensité

Toutes les études faites sur la liaison entre la densité et la largeur de cerne chez le chêne confirment la relation positive entre ces deux variables. Dans notre étude, nous avons trouvé une corrélation positivement significative, chez les deux espèces, au seuil de 1 ‰ entre la largeur de cerne et l'infradensité (Figure 37). Cette relation est plus marquée chez les chênes rouvres, que chez les chênes pédonculés.

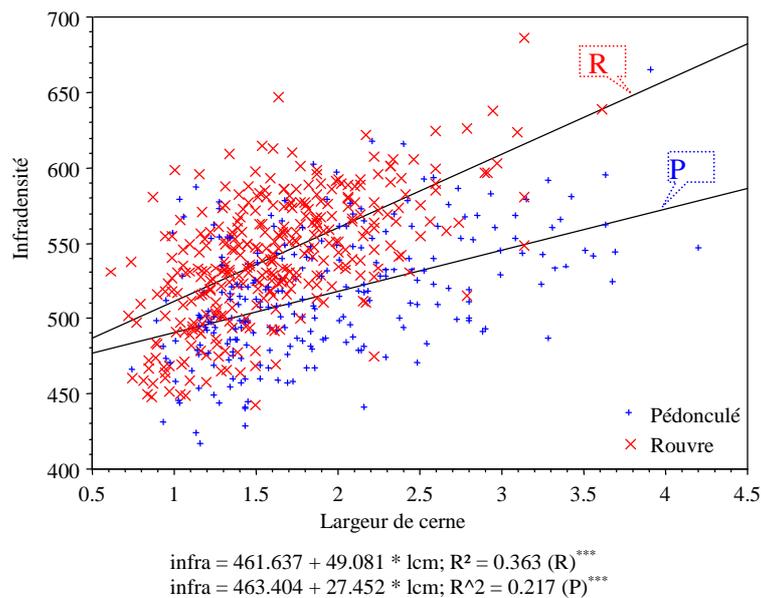


Figure 37 : Relation entre l'infradensité et la largeur de cerne chez les chênes rouvre (165 arbres) et pédonculé (123 arbres)

Une autre corrélation négative et significative au seuil de 1 % a été constatée, chez les deux espèces rouvre et pédonculé, entre l'âge et l'infradensité (Figure 38). L'évolution de cette corrélation est très voisine chez les deux espèces, bien que l'infradensité diminue un peu plus avec l'âge chez les pédonculés que chez les rouvres.

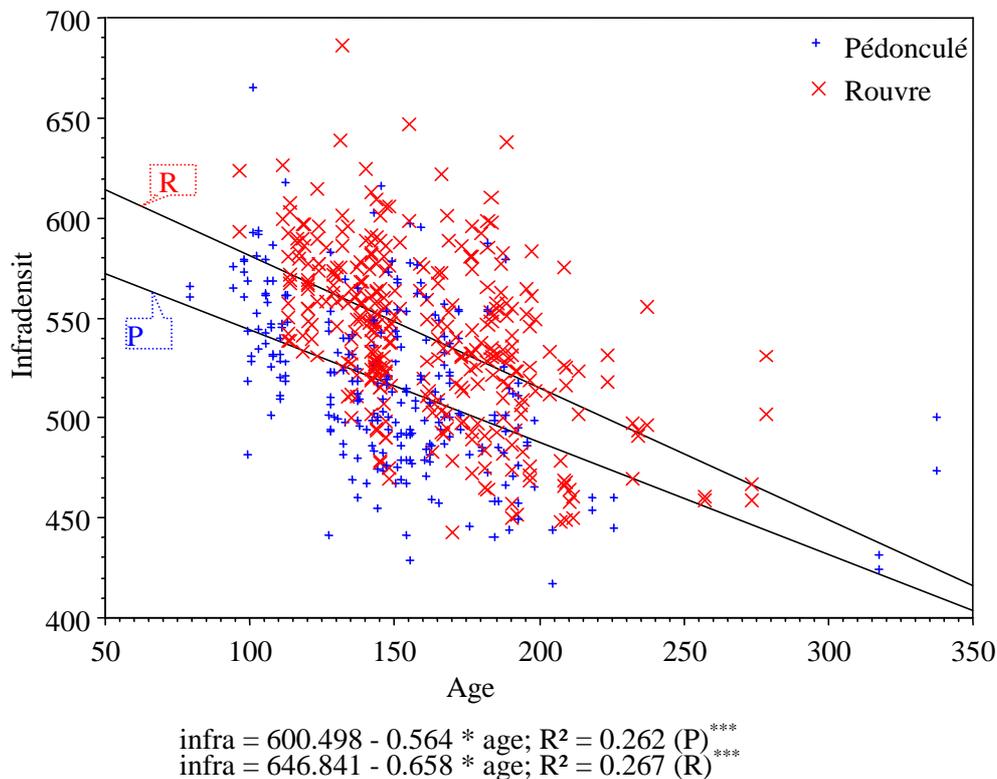


Figure 38 : Relation entre l'âge et l'infradensité chez les chênes rouvre (165 arbres) et pédonculé (123 arbres)

2.2.2 Variabilité de l'infradensité

Différents facteurs interviennent dans l'explication de la variabilité de l'infradensité chez le chêne : l'espèce, la région, l'arbre et l'interaction entre l'espèce et la région (Tableau 32)

En tenant compte de l'ensemble de ces facteurs de variabilité, nous avons pu expliquer 84% de la variabilité de l'infradensité dans le cas des trois régions mixtes (CDT). Cette analyse montre un effet espèce important et significatif au seuil de 1%, l'effet région et l'interaction entre l'espèce et la région sont aussi significatifs au seuil de 1%. Nous remarquons que 21% de la variabilité de l'infradensité est due à l'effet espèce et que 6% de cette variabilité est due à l'effet région ce qui signifie que l'infradensité varie beaucoup entre les deux espèces et moins entre les régions à l'intérieur de l'espèce.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 195,40*** | 21% | 0,84 |
| | | Région | 2 | 26,49*** | 6% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 12,88*** | 3% | |
| | | Arbre | 138 | 3,56*** | 54% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 51,45*** | 27% | 0,83 |
| | | Arbre | 276 | 3,28*** | 59% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 26,03*** | 14% | 0,85 |
| | | Arbre | 158 | 4,95*** | 71% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 51,45*** | 29% | 0,83 |
| | | Arbre | 118 | 3,28*** | 54% | |

Tableau 32 : Analyses de variance sur l'infradensité

Le résultat de l'analyse de variance sur l'ensemble des provenances toutes confondues montre un fort effet provenance qui explique 27% de la variabilité.

Les analyses faites sur les provenances monospécifiques rouvres ou pédonculés montrent la présence d'un effet région significatif au seuil de 1% chez les deux espèces. Ce dernier explique 29% de la variabilité dans le cas des pédonculés et n'explique que 14% pour les rouvres. Ceci est peut-être dû à une sensibilité, aux conditions de croissance (sylvicole et milieux), plus élevée chez les pédonculés que chez les rouvres.

L'effet arbre est toujours hautement significatif sur la densité du bois puisqu'il explique ici entre 54% et 71% de la variabilité totale. Nous pouvons attribuer cet effet à une variabilité d'origine génétique individuelle mais pas seulement car l'effet "arbre" contient aussi des effets "sylviculture" (notamment via leurs conséquences sur la largeur de cerne et l'âge cambial) et probablement des effets "milieux" ainsi que des effets résultant de l'interaction de ces différents facteurs...

D'après l'analyse de variance, une grande partie de la variabilité de l'infradensité est expliquée par un effet espèce important, ce résultat nous a conduit à chercher si on peut séparer les deux espèces à partir de leurs infradensités. Pour vérifier notre hypothèse, nous avons fait un test de comparaison de moyennes (Tableau 33) qui a montré une séparation assez nette entre les deux espèces, avec une infradensité plus élevée chez les rouvres que chez les pédonculés, à l'exception cependant de la région de Monlezun-Laurède, chêne pédonculé, qui est classé dans les régions des chênes rouvres. Nous distinguons cinq groupes :

- le premier regroupe les provenances les plus jeunes avec une largeur moyenne de cerne la plus élevée. Nous constatons que ce groupe se compose des provenances de chênes rouvres et ne contient qu'une provenance de chêne pédonculé (MP).
- le deuxième ne renferme que les chênes rouvres de Tronçais, même provenance, même espèce ;
- le troisième rassemble les cinq provenances qui ont un âge plus élevé et une largeur de cerne moyenne plus faible, à l'intérieur de l'espèce, que ceux du premier groupe ce qui explique la relation négative de l'infradensité avec l'âge et positive avec la largeur de cerne obtenue précédemment chez les deux espèces. Dans ce groupe qui contient des rouvres et des pédonculés, les rouvres sont plus âgés et possèdent généralement des cernes plus étroits que les pédonculés et ils sont plus denses que les pédonculés ;
- le quatrième et le cinquième contiennent chacun une provenance de chêne pédonculé.

Nous remarquons que les chênes rouvres et pédonculés des trois régions mixtes, Cîteaux, Darney et Tronçais, sont tous classés dans des groupes différents ce qui signifie la prépondérance de l'effet "espèce" sur l'effet "région"

Le chêne pédonculé présente une hétérogénéité inter-région plus importante que celle des rouvres ; les pédonculés sont répartis sur cinq groupes alors que les rouvres ne sont répartis que sur trois groupes. Ce résultat est expliqué par la présence d'un effet région plus important chez les pédonculés (29%) que chez les rouvres (14%) dans les analyses de variance effectuées sur les provenances monospécifiques.

| Groupement (Duncan) | Infradensité | Échantillon | Espèce | Provenance | Âge | LgC (mm) |
|---------------------|--------------|-------------|--------|------------|-----|----------|
| A | 563 | 46 | R | CR | 141 | 1,91 |
| A | 558 | 48 | R | SR | 128 | 1,73 |
| A | 555 | 48 | P | MP | 121 | 2,1 |
| A | 553 | 48 | R | BR | 136 | 1,74 |
| B | 538 | 48 | R | TR | 174 | 1,48 |
| C | 527 | 44 | R | DR | 169 | 1,51 |
| C | 526 | 48 | R | JR | 184 | 1,18 |
| C | 522 | 48 | R | BiR | 195 | 1,18 |
| C | 520 | 48 | P | LiP | 130 | 2,29 |
| C | 514 | 48 | P | TP | 167 | 1,37 |
| D | 504 | 50 | P | CP | 152 | 1,93 |
| E | 489 | 52 | P | DP | 180 | 1,47 |

Tableau 33 : Test de comparaison de moyennes (Duncan) sur l'ensemble des origines pour l'infradensité

2.3 Conclusion

- L'infradensité du bois de chêne est en moyenne plus élevée chez les rouvres que chez les pédonculés : + 25 kg/m³.
- A largeurs de cerne et âges proches, l'infradensité est plus importante chez les rouvres que chez les pédonculés : + 40 kg/m³ en moyenne pour les trois régions bispécifiques ;
- L'effet espèce sur la variabilité de l'infradensité est plus important (21%) que l'effet régions (6%) dans le cas des régions mixtes ;
- La part expliquée par l'effet région sur la variabilité de l'infradensité est plus significative chez les chênes pédonculés (29%) que chez les rouvres (14%) dans les régions monospécifiques ;
- L'effet arbre explique chez les deux espèces la majorité de la variabilité totale de l'infradensité (54 à 71%) ;
- L'infradensité dépend de l'âge et de la largeur de cerne : elle augmente avec la largeur de cerne et diminue avec l'âge chez les deux espèces.

3 La microdensitométrie

La microdensitométrie est une méthode fondée sur l'analyse de clichés radiographiques mise au point par POLGE (1966). Elle permet d'évaluer les variations de la densité du bois à l'intérieur du cerne en mesurant l'absorption de rayons X.

La quantité de rayons X absorbée dépend de la densité du bois. L'absorption est d'autant plus forte que le bois est plus dense. Sur un cliché radiographique, les éléments anatomiques denses apparaissent en blanc (les fibres...) et ceux à faible densité en noir (vaisseaux...).

3.1 Matériel et méthode

Les mesures de microdensitométrie ont été réalisées sur la face transversale de 576 échantillons représentant 288 arbres issus de neuf régions. Après obtention des radiographies, les mesures microdensitométriques ont été réalisées en deux étapes à l'aide du logiciel « CERD version 2.04 », développé par MOTHE (MOTHE et *al.*, 1998) qui permet de :

- convertir les niveaux de gris résultants de la numérisation des radiographies en niveaux de densité du bois, en utilisant comme référence les niveaux de gris obtenus pour des cales en kémetal d'épaisseurs différentes (Figure 39) (logiciel « CRAD ») ;



Figure 39 : Radiographie traitée par le logiciel CERD : ici, les images radiographiques de seize échantillons entourent les images des deux cales de référence

- détecter les limites de cernes, les limites entre le bois initial et le bois final (Figure 40) et calculer les densités caractéristiques (DMoy, DMin, DMax) pour chaque cerne (logiciel « CERD »).

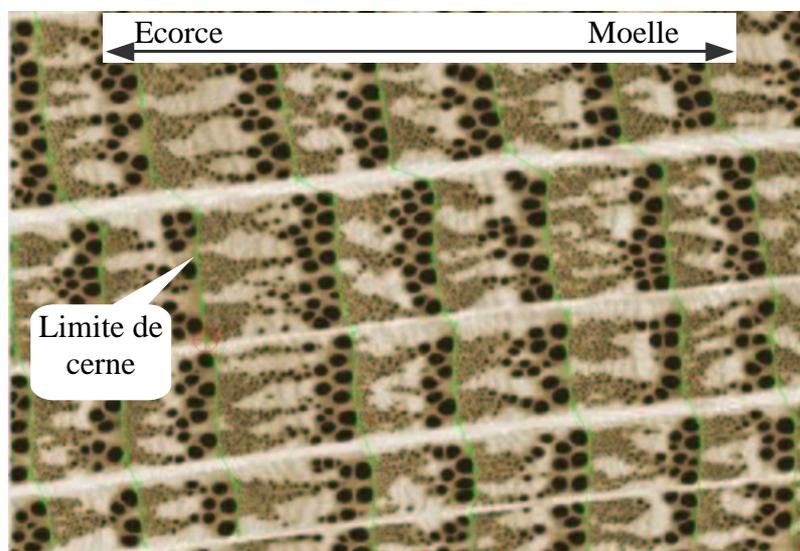


Figure 40 : Délimitation manuelle des cernes avec le logiciel « CERD ».

La détection de la limite de cerne chez le chêne nécessite toujours une intervention manuelle qui consiste à indiquer la position de chaque cerne sur chaque profil.

Chaque cerne est décrit par des variables synthétiques calculées à partir des données brutes de densité :

- les largeurs : de cerne (LgC), du bois initial (LBI) et du bois final (LBF) ;
- la texture (Text) = largeur du bois final / largeur de cerne ;
- les densités : moyenne (DMoy), minimale (DMin) et maximale (DMax) ;
- les densités des bois initial (DBI) et final (DBF) ;
- 20 valeurs de densités moyennes par cerne ou quantiles sont calculées, quelle que soit la largeur de celui-ci.

La limite entre le bois initial et le bois final est calculée à partir du profil densitométrique synthétique décrit par les quantiles selon l'équation suivante (MOTHE et al., 1998) :

$$D_{tran} = \beta x D_{qMax} + (1 - \beta x) D_{qMin}$$

Où : D_{qMax} et D_{qMin} sont les maximum et minimum de densité dans le cerne ;

βx est une constante variant entre 0 et 1. pour le chêne, elle est égale à 0,8, valeur fixée en comparant avec des mesures anatomiques..

3.2 Résultats et discussion des mesures microdensitométriques

3.2.1 Densité du bois initial (DBI)

Le Tableau 34 montre qu'à l'intérieur de chaque provenance le coefficient de variation est faible (6 – 9%). Cela indique que la densité du bois initial est homogène à l'intérieur des provenances.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Densité du bois initial (kg/m ³) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|----------------------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 540 | 415 | 744 | 49 | 9 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 525 | 415 | 677 | 47 | 9 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 551 | 444 | 744 | 48 | 9 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 521 | 444 | 602 | 47 | 9 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 569 | 482 | 744 | 43 | 8 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 503 | 444 | 579 | 33 | 6 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 564 | 468 | 642 | 42 | 8 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 509 | 415 | 592 | 38 | 7 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 543 | 454 | 637 | 46 | 8 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 536 | 451 | 626 | 42 | 8 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 524 | 427 | 599 | 34 | 7 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 579 | 480 | 677 | 45 | 8 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 571 | 456 | 651 | 45 | 8 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 513 | 423 | 612 | 42 | 8 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 553 | 465 | 682 | 48 | 9 |

Tableau 34 : Statistique descriptive de la densité du bois initial

Nous constatons que la valeur la plus faible (415 kg/m³) se trouve chez les pédonculés de Darney qui regroupent les arbres les plus âgés des pédonculés. La valeur maximale (744 kg/m³) se trouve à Bertranges (rouvre), B22a : largeur moyenne de cerne = 3,13 mm, où la largeur de cerne moyenne est la plus élevée des rouvres, mais il faut noter que cette valeur maximale s'écarte beaucoup de la moyenne (Figure 41).

La valeur moyenne la plus élevée de la densité du bois initial (579 kg/m³) se trouve à Monlezun-Laurède. Les arbres de cette région sont les plus jeunes des pédonculés et possèdent des cernes très larges (2,1 mm en moyenne).

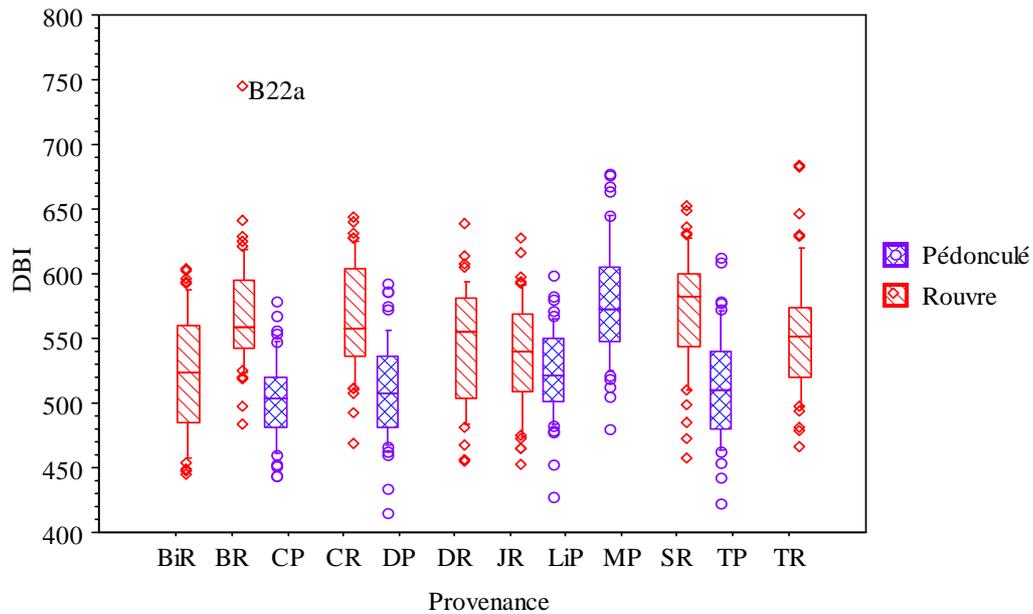


Figure 41 : Variabilité inter- et intra-provenance de la densité du bois initial (kg/m^3)

La densité du bois initial est plus élevée chez le chêne rouvre que chez le chêne pédonculé dans les trois régions mixtes à âge et la largeur de cerne équivalents.

3.2.1.1 Liaison avec l'âge et la largeur de cerne

Dans notre étude, chez les deux espèces, nous avons trouvé une corrélation positive et significative au seuil de 1% entre la densité du bois initial et la largeur de cerne (Figure 42). Cette relation est plus significative chez les rouvres ($r = 0,50$; $\text{ddl} = 329$) que chez les pédonculés ($r = 0,31$; $\text{ddl} = 245$), l'explication doit-elle être trouvée dans la structure anatomique (proportion et nombre de vaisseaux, de rayons ligneux...), très variable entre les espèces et même à l'intérieur de l'espèce ?

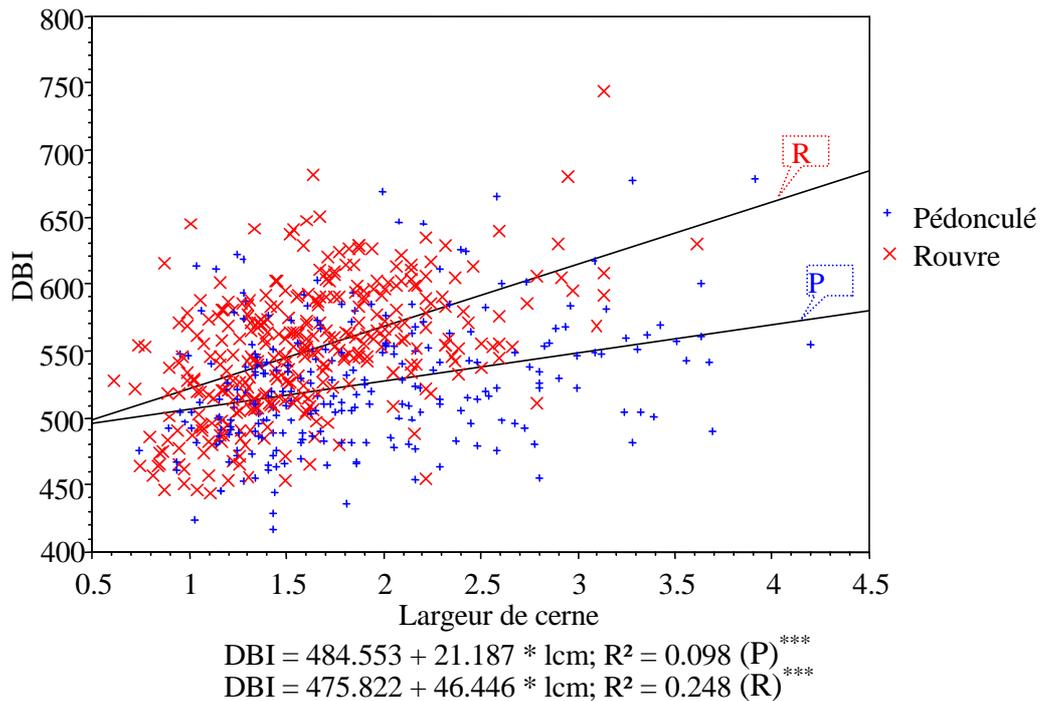


Figure 42 : Évaluation de la densité du bois initial (DBI) en fonction de sa largeur de cerne chez les rouvres et les pédonculés

Une autre corrélation négativement significative au seuil de 1% a été trouvée entre la densité du bois initial et l'âge (Figure 43), cette relation montre que la diminution de la densité du bois initial avec l'âge est plus significative chez les rouvres que chez les pédonculés.

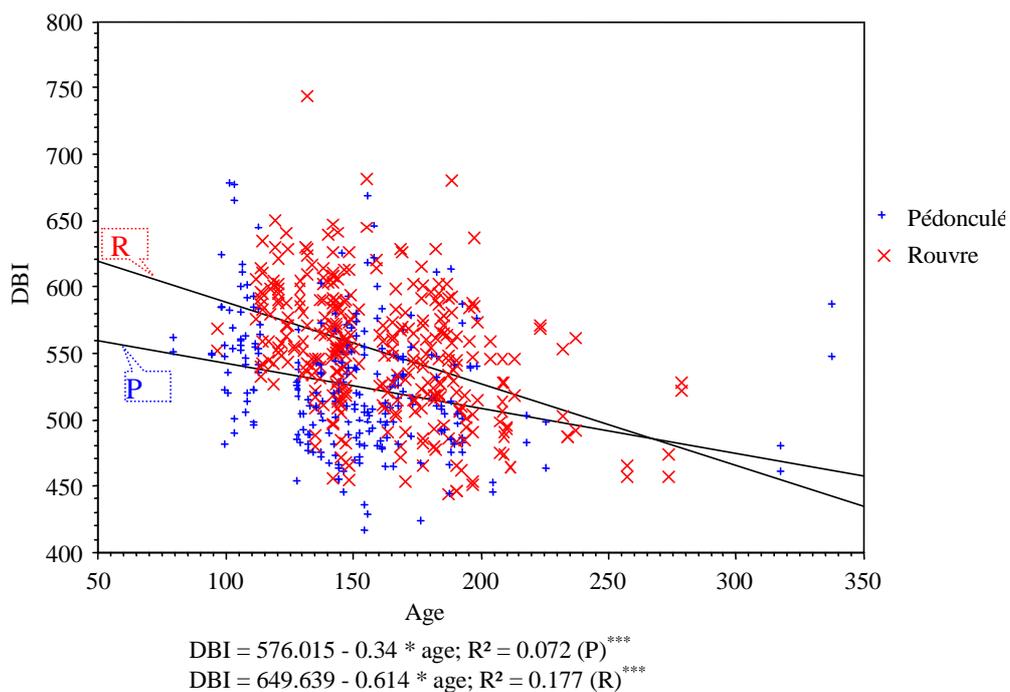


Figure 43 : Évaluation de la densité du bois initial en fonction de l'âge

3.2.1.2 Variabilité de la densité du bois initial

Les analyses de variance effectuées sur les régions bispécifiques (CDT) montrent que l'effet espèce, qui explique 23% de la variabilité de la densité du bois initial, est significatif au seuil de 1%. En revanche, il n'y a pas d'effet région. L'effet interaction entre l'espèce et la région n'est significatif qu'au seuil de 1% (Tableau 35).

L'analyse faite sur l'ensemble de l'échantillonnage montre un effet provenance très significatif (au seuil de 1%) qui explique une grande partie de la variabilité de la densité du bois initial (59%).

D'autres analyses réalisées sur les provenances monospécifiques montrent la présence d'un effet région significatif au seuil de 1% chez les deux espèces. Cet effet explique pour le pédonculé 34% de la variabilité de la densité du bois initial et n'explique que 13% de cette variabilité chez les rouvres, ce qui pourrait laisser supposer que la structure anatomique du chêne pédonculé est plus sensible aux conditions extérieures que celle du chêne rouvre.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|--------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 206,38*** | 23% | 0,84 |
| | | Région | 2 | 2,35 ^{NS} | | |
| | | Espèce*Région | 2 | 6,59** | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 4,01*** | 60% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 51,57*** | 59% | 0,88 |
| | | Arbre | 276 | 4,46*** | 27% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 22,83*** | 13% | 0,84 |
| | | Arbre | 158 | 4,60*** | 71% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 78,84*** | 34% | 0,87 |
| | | Arbre | 118 | 4,23*** | 53% | |

Tableau 35 : Analyses de variance sur la densité du bois initial du chêne (DBI)

Le test de comparaison de moyennes (Tableau 36) montre que les provenances sont assez hétérogènes, l'absence de groupes nettement séparés confirme le résultat obtenu par l'analyse de variance sur les lots monospécifiques qui montre un effet région remarquable surtout pour les pédonculés.

| Groupement (Duncan) | | DBI | Échantillons | Espèce | Provenance |
|---------------------|---|-----|--------------|--------|------------|
| | A | 579 | 48 | P | MP |
| B | A | 571 | 48 | R | SR |
| B | A | 569 | 48 | R | BR |
| B | | 564 | 46 | R | CR |
| | C | 553 | 48 | R | TR |
| D | C | 543 | 44 | R | DR |
| D | | 536 | 48 | R | JR |
| | E | 524 | 48 | P | LiP |
| | E | 521 | 48 | R | BiR |
| F | E | 513 | 48 | P | TP |
| F | | 509 | 52 | P | DP |
| F | | 503 | 50 | P | CP |

Tableau 36 : Test de comparaison de moyennes (Duncan) sur la densité du bois initial

3.2.2 Densité du bois final (DBF)

Les études faites sur le chêne ont montré l'importance de la densité du bois final et que cette densité est très sensible à l'augmentation de la largeur de cerne (DERET – VARCIN, 1983). Elle augmente avec l'accroissement de la largeur de cerne.

Les résultats présentés dans le Tableau 37 permettent de faire quelques observations :

- l'arbre 7 de la région Limousin pédonculé représente la densité minimale (583 kg/m^3) du bois final, cet arbre qui s'écarte beaucoup de la moyenne pour cette région (Figure 44), a une faible largeur de cerne (1,44 mm), une faible largeur de bois final (0,62 mm) et peu de fibres (14%) ;
- la valeur maximale (965 kg/m^3) se trouve elle dans la région de Tronçais rouvre (T29) ;
- les chênes rouvres des régions mixtes sont en général plus denses que les chênes pédonculés à âge et largeur de cerne comparables ;
- le coefficient de variation est faible (6 – 9%) à l'intérieur de chaque provenance. Cela indique que la densité du bois final est homogène à l'intérieur des provenances ;
- la valeur moyenne la plus élevée se trouve à Saint Palais rouvre, cette région est la plus jeune des rouvres (120 ans en moyen) avec une largeur moyenne de cerne assez importante (1,9 mm)

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Densité du bois final (kg/m ³) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 776 | 583 | 965 | 60 | 8 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 761 | 583 | 910 | 56 | 7 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 787 | 614 | 965 | 60 | 8 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 759 | 642 | 883 | 62 | 8 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 802 | 693 | 947 | 51 | 6 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 733 | 641 | 845 | 49 | 7 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 801 | 685 | 927 | 53 | 7 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 736 | 650 | 841 | 42 | 6 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 772 | 665 | 865 | 51 | 7 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 776 | 614 | 898 | 73 | 9 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 766 | 583 | 864 | 55 | 7 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 807 | 718 | 910 | 50 | 6 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 812 | 709 | 958 | 51 | 6 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 767 | 653 | 906 | 52 | 7 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 789 | 690 | 965 | 61 | 8 |

Tableau 37 : Statistique générale de la densité du bois final (DBF)

La Figure 44 montre que la densité du bois final varie aux niveaux inter- et intra-provenance, cette variabilité est importante aux niveaux inter et intra-espèce.

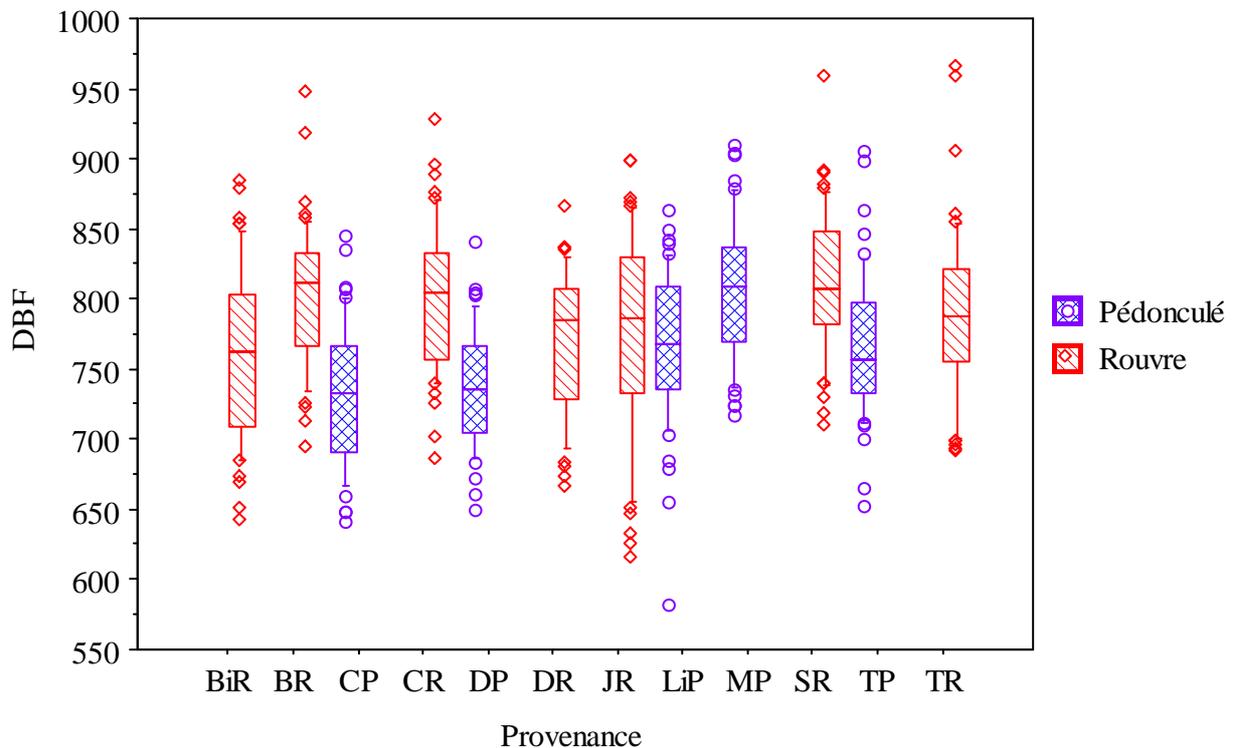


Figure 44 : Variabilité inter- et intra-provenance de la densité du bois final (kg/m³)

3.2.2.1 Évolution de la densité du bois final avec l'âge et la largeur de cerne

Dans la littérature, l'accroissement de la largeur de cerne s'est toujours traduit par une augmentation de la largeur du bois final et donc une augmentation de la densité du bois. Dans notre étude nous avons trouvé une corrélation significative au seuil de 1% chez les deux espèces entre la densité du bois final et la largeur de cerne (Figure 45). Nous avons constaté également que la densité du bois initial augmente avec la largeur de cerne et que cette relation est aussi nette que la relation avec la densité du bois final (Figure 42).

La densité du bois final chez les rouvres est plus sensible à l'accroissement de cerne, elle augmente plus avec la largeur de cerne chez les rouvres que chez les pédonculés.

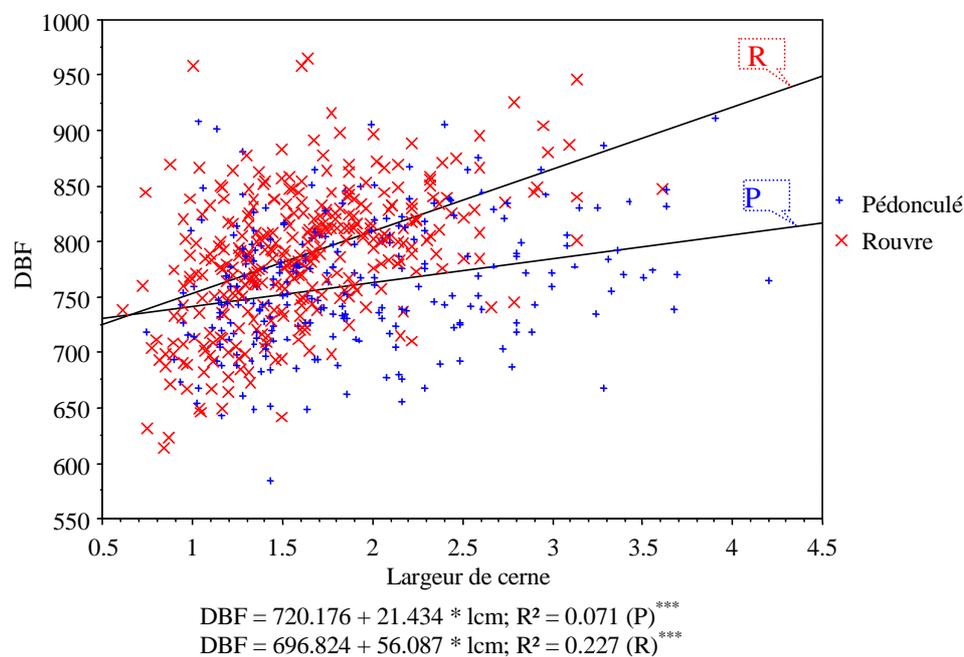


Figure 45 : Liaison entre la largeur de cerne et la densité du bois final (kg/m³)

La densité du bois final diminue avec l'âge chez les deux espèces, cette diminution est plus importante chez les rouvres que chez les pédonculé (Figure 46). Nous rappelons que la densité du bois final est liée positivement à la largeur de cerne et que cette dernière est corrélée négativement avec l'âge. Ce qui peut signifier que la relation entre l'âge et la densité du bois final est également sous la dépendance de la largeur de cerne.

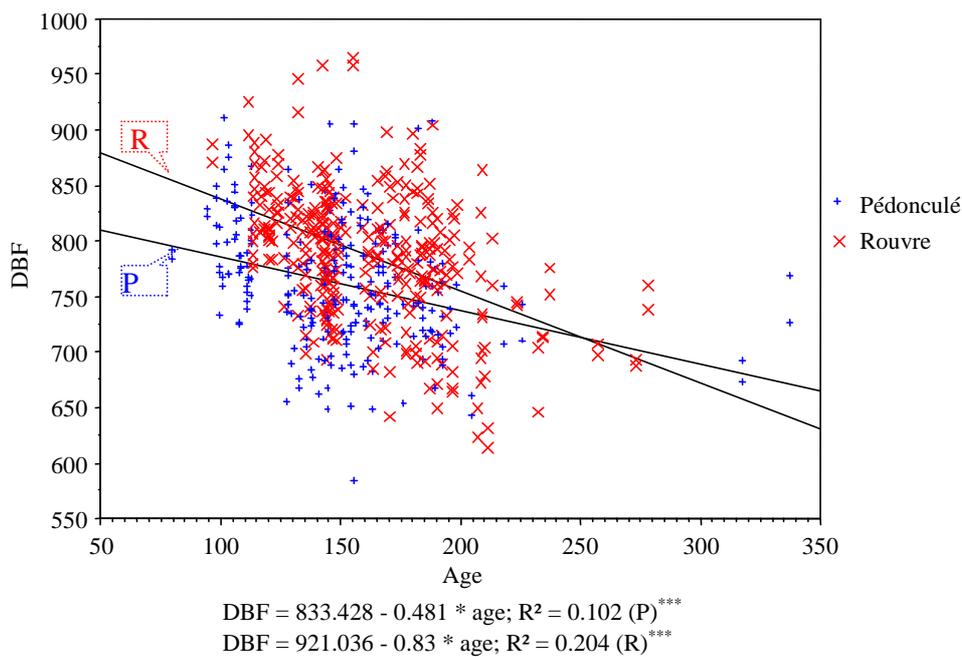


Figure 46 : Liaison entre la densité du bois final et l'âge

3.2.2.2 Variabilité de la densité du bois final

Les analyses de variance faites en quatre étapes (Tableau 38) montrent que :

- sur les régions bispécifiques : les variables, espèce, région et interaction entre l'espèce et la région, ont des effets significatifs au seuil de 1‰ sur la variabilité de la densité du bois final. L'effet espèce contribue pour 14% à cette variabilité, l'effet région n'explique que 3% de la variabilité de la densité du bois final ce qui signifie que cette dernière varie plus entre les espèces et moins entre les régions à l'intérieur de la même espèce ;
- sur l'ensemble des provenances, l'effet provenance est significatif au seuil de 1‰ et explique 19% de la variabilité de la densité du bois final ;
- sur les régions monospécifiques rouvres ou pédonculés, ces analyses ont montré un effet provenance significatif au seuil de 1‰ pour les deux espèces mais cet effet explique mieux la variabilité de la densité du bois final chez les pédonculés (23%) que chez les rouvres (9%).

L'effet arbre explique au-moins 60% dans toutes les analyses de variance effectuées sur la densité du bois final, une très grande partie de cet effet pourrait être génétique.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 127,29*** | 14% | 0,85 |
| | | Région | 2 | 13,32*** | 3% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 13,89*** | 3% | |
| | | Arbre | 138 | 4,35*** | 65% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 38,51*** | 19% | 0,88 |
| | | Arbre | 276 | 5,80*** | 69% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 22,16*** | 9% | 0,90 |
| | | Arbre | 158 | 7,93*** | 81% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 42,01*** | 23% | 0,83 |
| | | Arbre | 118 | 3,74*** | 60% | |

Tableau 38 : Analyses de variance effectuées sur la densité du bois final du chêne rouvre et pédonculé

Le test de comparaison de moyennes (Tableau 39) sur la densité du bois final montre cinq groupes de régions homogènes :

- Le premier est constitué de trois provenances rouvres et une pédonculé (MP), nous remarquons que ces provenances sont les plus jeunes et ont des cernes moyennement larges ;
- Le deuxième ne renferme qu'une provenance (TR) ;
- Le troisième regroupe quatre provenances âgées avec des cernes plus étroits que ceux du premier groupe sauf Limousin pédonculé qui est jeune et possède la largeur moyenne de cerne la plus élevée. Nous constatons qu'à l'intérieur du groupe les rouvres, qui sont plus âgés que les pédonculés, sont plus denses ;
- Le quatrième groupe contient la provenance la plus âgée de l'échantillonnage (BiR) ;
- Le cinquième regroupe deux provenances pédonculées dont Darney qui contient les arbres les plus âgés.

Les chênes des régions mixtes sont classés dans des groupes différents ce qui signifie qu'elles présentent des densités hétérogènes du bois final.

| Groupement (Duncan) | | DBF | Échantillons. | Espèce | Âge | LgC (mm) | Provenance |
|---------------------|----------|-----|---------------|----------|------------|-------------|------------|
| | A | 812 | 48 | R | 128 | 1,73 | SR |
| | A | 807 | 48 | P | 121 | 2,1 | MP |
| | A | 802 | 48 | R | 136 | 1,74 | BR |
| | A | 801 | 46 | R | 141 | 1,91 | CR |
| | B | 789 | 48 | R | 174 | 1,48 | TR |
| | C | 776 | 48 | R | 184 | 1,18 | JR |
| | C | 772 | 44 | R | 169 | 1,51 | DR |
| D | C | 767 | 48 | P | 167 | 1,37 | TP |
| D | C | 766 | 48 | P | 130 | 2,29 | LiP |
| D | | 759 | 48 | R | 195 | 1,18 | BiR |
| | E | 736 | 52 | P | 180 | 1,47 | DP |
| | E | 733 | 50 | P | 152 | 1,93 | CP |

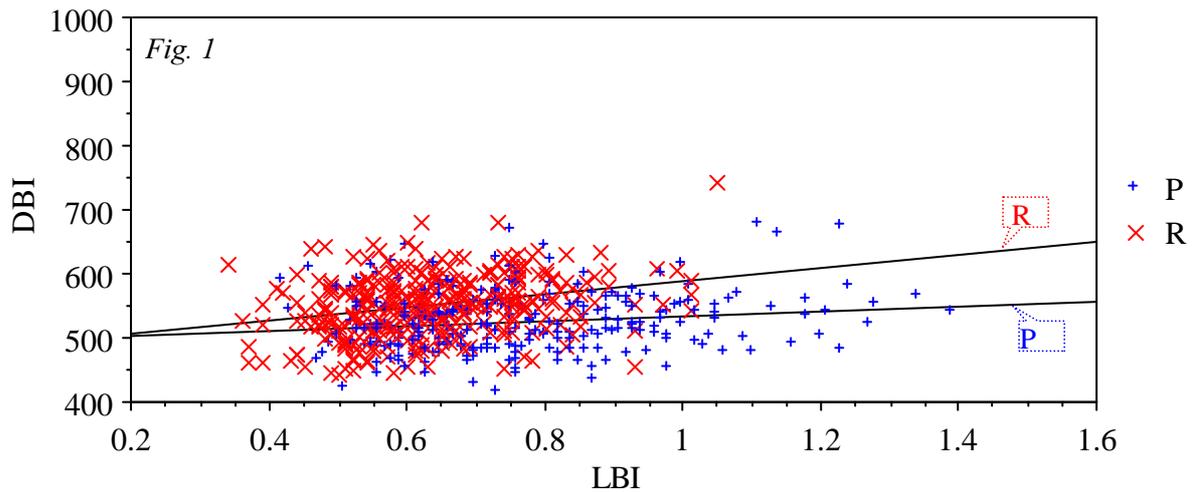
Tableau 39 : Test de comparaison de moyennes sur l'ensemble des provenance pour la densité du bois final (kg/m^3)

3.2.2.3 Liaison entre largeur et densité du bois initial et final

D'après la Figure 47 la corrélation entre la densité et la largeur du bois initial est significative au seuil de 1‰ chez les rouvres et au seuil de 5% chez les pédonculés. Le bois initial de ces derniers est plus large et plus riche en vaisseaux que les rouvres.

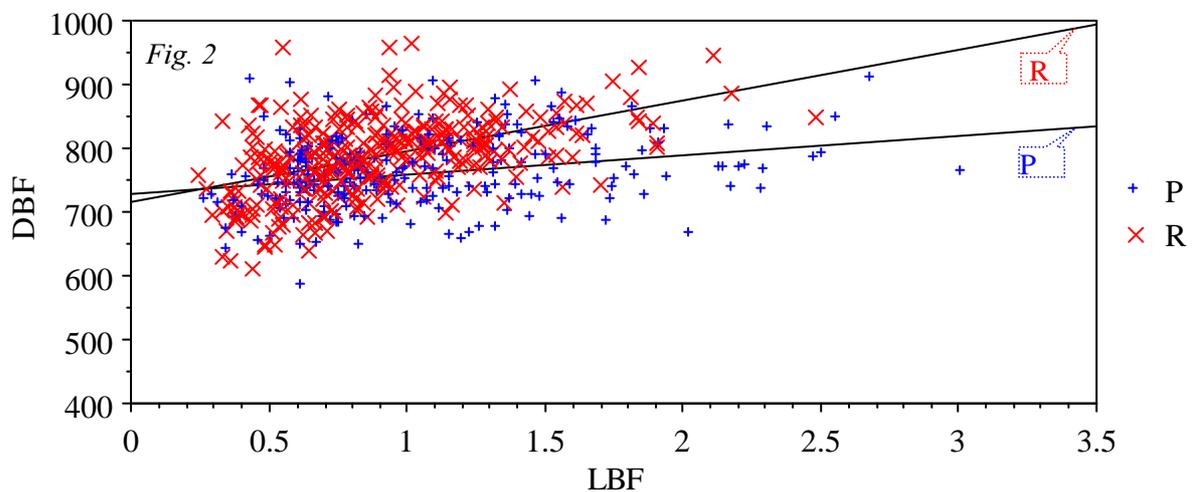
La densité du bois final augmente significativement avec sa largeur, elle augmente plus chez les rouvres que chez le pédonculés. Ceci est dû à la structure anatomique très différente des deux espèces (fibres, parenchyme...).

En comparant la relation entre la densité du bois initial et la largeur du bois initial, $R^2 = 0,023$ pour les pédonculés ; $R^2 = 0,074$ pour les rouvres, (Figure 47 Fig. 1) et celle entre la densité du bois initial et la largeur de cerne, $R^2 = 0,098$ pour les pédonculés ; $R^2 = 0,248$ pour les rouvres, (Figure 42) nous constatons que la densité du bois initial est mieux corrélée avec la largeur de cerne chez les deux espèces. En revanche la densité du bois final est légèrement mieux corrélée avec la largeur du bois final qu'avec la largeur de cerne chez les deux espèces (Figure 47 Fig. 2).



$$DBI = 495.741 + 37.791 * LBI; R^2 = 0.023 (P)^*$$

$$DBI = 486.221 + 101.654 * LBI; R^2 = 0.074 (R)^{***}$$



$$DBF = 729.012 + 30.452 * LBF; R^2 = 0.077 (P)^{***}$$

$$DBF = 716.679 + 78.981 * LBF; R^2 = 0.242 (R)^{***}$$

Figure 47 : Évolution de la densité du bois initial et final en fonction de leurs largeurs

3.2.2.4 Variabilité intra-cerne de la densité du bois initial et final

Pour montrer l'évolution de la densité du bois initial et final en fonction de la largeur de cerne, nous avons réalisé un graphique en boîtes (box plot) sur 36857 cernes (Figure 48), 22395 cernes de chênes rouvres représentent 165 arbres issus de 7 provenances et 14462 cernes extraits de 123 chênes pédonculés issus de 5 provenances. Ce graphique permet de faire quelques observations :

- les deux espèces se comportent de la même façon mais la densité reste supérieure chez les rouvres ;

- la densité du bois initial augmente avec la largeur de cerne chez les deux espèces, cette augmentation est supérieure chez les rouvres ;
- la densité du bois final, elle aussi, augmente avec la largeur de cerne chez les deux espèces. Elle a tendance à se stabiliser au-delà de 2 mm de largeur de cerne ;
- l'augmentation de la densité du bois final est presque linéaire dans la zone où la largeur de cerne est inférieure à 2 mm ;
- une grande variabilité inter et intra-cerne de la densité du bois initial et final existe chez les deux espèces ;
- l'augmentation de la densité est plus marquée dans le bois final que dans le bois initial malgré que la densité augmente progressivement dans ce dernier.

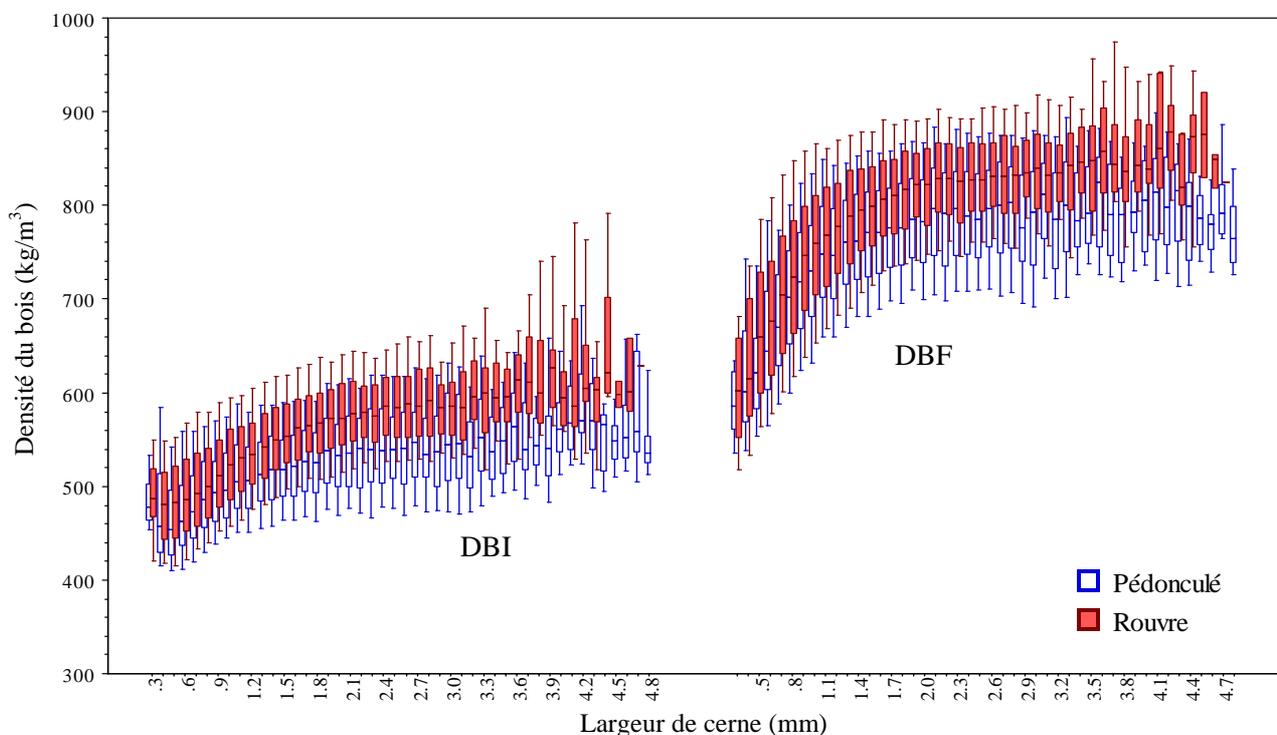


Figure 48 : Évolution de la densité du bois initial et final en fonction de la largeur de cerne

3.2.3 Densité moyenne (DMoy)

La région Monlezun-Laurède, chêne pédonculé, présente la valeur moyenne la plus élevée, cette région contient les arbres les plus jeunes de l'échantillonnage avec une largeur de cerne moyenne de 2,46 mm.

La valeur maximale de la densité moyenne (DMoy) est à Bertrange rouvre (Tableau 40). Cette région est caractérisée par des arbres jeunes et une largeur de cerne moyenne la plus

élevée des rouvres. En revanche la valeur minimale se trouve à Limousin pédonculé où la largeur de cerne moyenne est la plus élevée.

L'arbre de Bertrange qui représente le maximum de la densité (B22) a 132 ans et une largeur de cerne de 3,13 mm, celui de Limousin (densité minimale) a 156 ans et 1,44 mm de largeur de cerne.

Dans les régions bispécifiques la densité moyenne est toujours plus élevée chez les rouvres que chez les pédonculés à âge et largeur de cerne très proches.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Densité du bois final (kg/m ³) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 681 | 513 | 880 | 61 | 9 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 665 | 513 | 840 | 57 | 9 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 692 | 545 | 880 | 61 | 9 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 652 | 545 | 784 | 64 | 10 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 714 | 631 | 880 | 47 | 7 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 646 | 518 | 744 | 45 | 7 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 722 | 607 | 832 | 51 | 7 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 631 | 537 | 752 | 43 | 7 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 677 | 582 | 759 | 51 | 8 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 669 | 545 | 787 | 64 | 10 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 672 | 513 | 766 | 50 | 7 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 723 | 621 | 840 | 50 | 7 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 720 | 606 | 846 | 51 | 7 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 657 | 549 | 780 | 49 | 8 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 691 | 572 | 865 | 62 | 9 |

Tableau 40 : Statistiques descriptives de la densité moyenne (DMoy) en kg/m³

La variabilité intra-région de la densité moyenne est faible (Figure 49), et les rouvres sont classés au-dessus des pédonculés.

Dans les régions mixtes nous constatons une variabilité importante de l'espèce à l'intérieur de la même région.

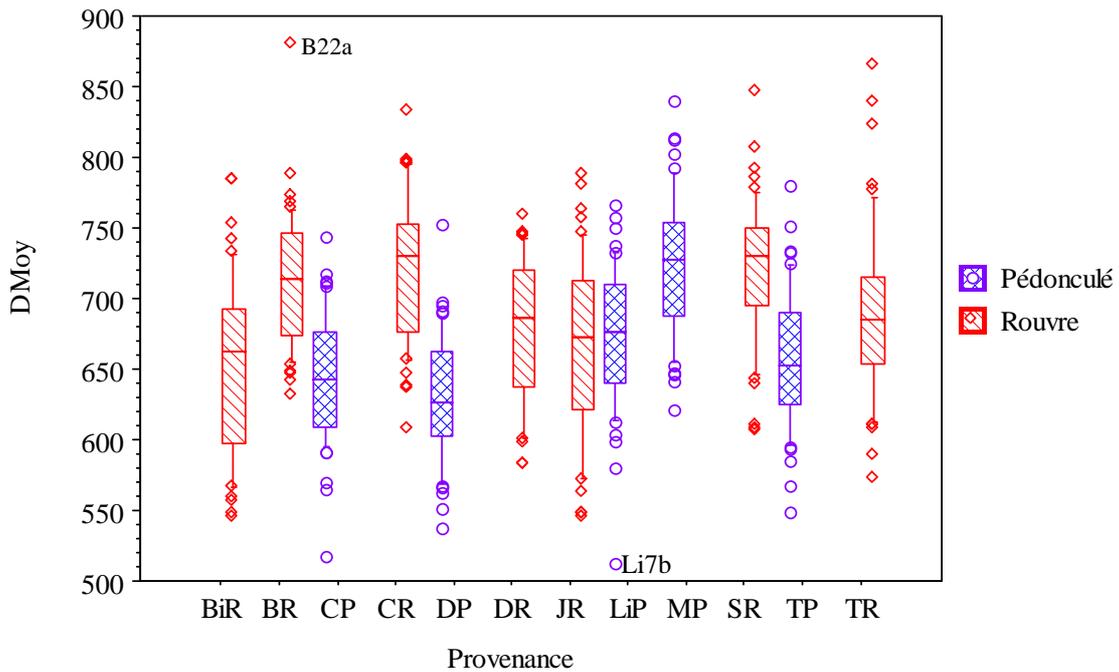
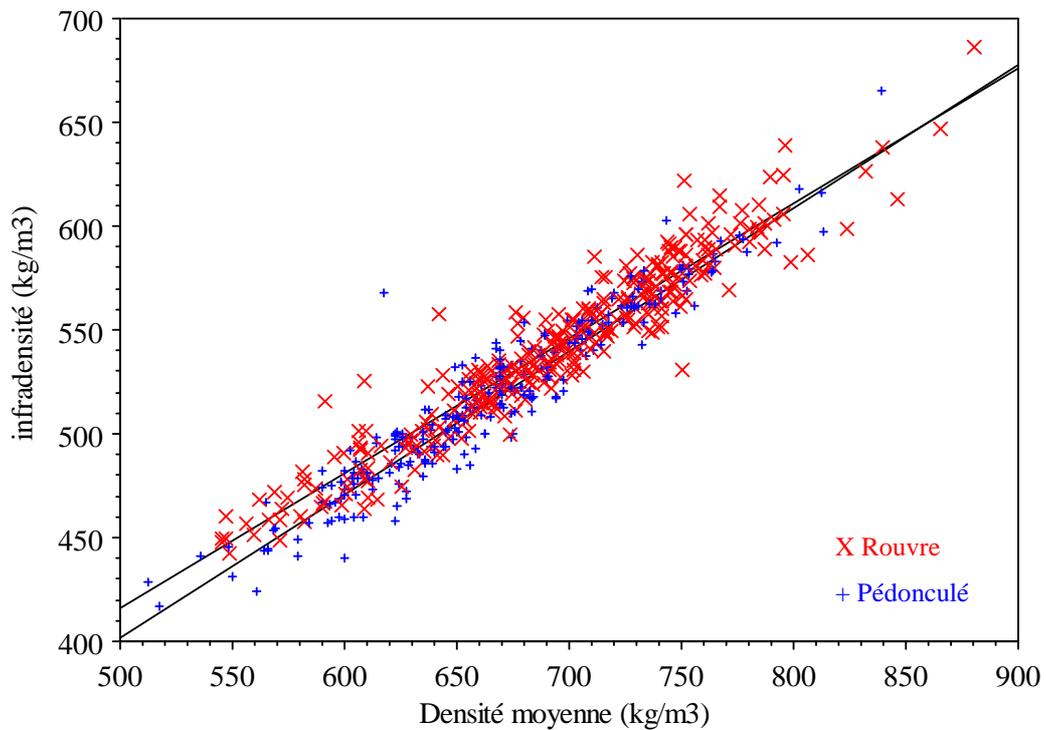


Figure 49 : Variabilité de la densité moyenne (DMoy) du bois de chênes rouvre et pédonculé

Les analyses de variance sur la densité moyenne ainsi que les corrélations avec l'âge et la largeur de cerne donnent des résultats comparables à ceux obtenus avec l'infradensité. Ceci est justifié par la très forte corrélation entre l'infradensité et la densité moyenne (Figure 50).



$$\text{infrac} = 91.76 + 0.649 * \text{DMoy}; R^2 = 0.915 (R)***$$

$$\text{infrac} = 57.593 + 0.689 * \text{DMoy}; R^2 = 0.907 (P)***$$

Figure 50 : Relation entre la densité moyenne et l'infradensité

3.2.3.1 Variabilité inter et intra-cerne de la densité moyenne (DMoy)

Pour montrer l'évolution de la densité moyenne inter et intra-cerne en fonction de la largeur de cerne, un graphique en boîtes a été fait sur 36857 cernes de chênes rouvre et pédonculé ; les rouvres sont représentés par 22395 cernes et les pédonculés 14462 cernes.

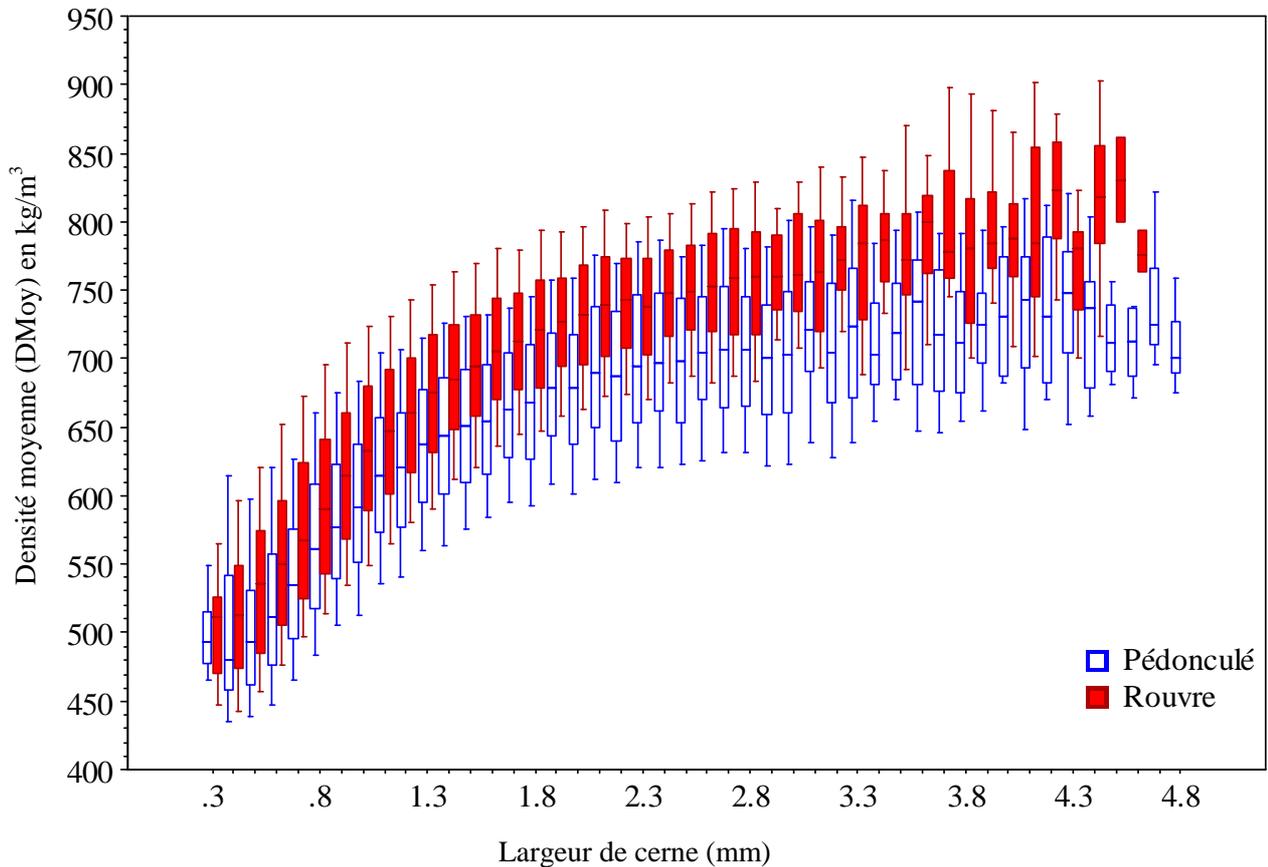


Figure 51 : Évolution de la densité moyenne (DMoy) en fonction de la largeur de cerne

D'après ce graphique (Figure 51) :

- la densité moyenne du cerne augmente avec l'accroissement du cerne, cette augmentation est plus significative chez les rouvres que chez les pédonculés ;
- plus la largeur de cerne augmente, plus l'écart entre les deux espèces est grand ;
- chez les deux espèces l'accroissement de la densité est plus fort pour les largeurs de cernes inférieures à 2 mm, au delà de ce seuil, la densité a tendance à se stabiliser surtout chez les pédonculés ;
- une très grande variabilité inter et intra-cerne de la densité moyenne est due à une grande variabilité de la structure anatomique.

3.3 Relations entre les caractéristiques de la microdensitométrie

La matrice de corrélations réalisée sur 330 chênes rouvres et 246 chênes pédonculés montre que les caractéristiques de la microdensitométrie sont toutes liées positivement entre elles au seuil de 1‰ chez les deux espèces. Elles sont corrélées positivement au seuil de 1‰ avec la texture, la largeur de cerne, la largeur du bois final et initial chez les rouvres, ces corrélations sont aussi significatives au seuil de 1‰ chez les pédonculés, sauf les corrélations entre la largeur du bois initial et ces caractéristiques microdensitométriques où le seuil de signification n'est que 5% (Tableau 41).

| Espèce | Variable | Âge | Text | LgC | LBI | LBF | DMoy | DBI | DBF | Espèce |
|-----------------|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------|
| Chêne pédonculé | Âge | 1 | -0.633 <0.0001 | -0.674 <0.0001 | -0.541 <0.0001 | -0.662 <0.0001 | -0.544 <0.0001 | -0.421 <0.0001 | -0.452 <0.0001 | Chêne rouvre |
| | Text | -0.662 <0.0001 | 1 | 0.77 <0.0001 | 0.371 <0.0001 | 0.863 <0.0001 | 0.703 <0.0001 | 0.573 <0.0001 | 0.488 <0.0001 | |
| | LgC | -0.568 <0.0001 | 0.77 <0.0001 | 1 | 0.824 <0.0001 | 0.969 <0.0001 | 0.606 <0.0001 | 0.498 <0.0001 | 0.477 <0.0001 | |
| | LBI | -0.355 <0.0001 | 0.386 <0.0001 | 0.84 <0.0001 | 1 | 0.719 <0.0001 | 0.335 <0.0001 | 0.272 <0.0001 | 0.328 <0.0001 | |
| | LBF | -0.597 <0.0001 | 0.855 <0.0001 | 0.97 <0.0001 | 0.738 <0.0001 | 1 | 0.654 <0.0001 | 0.524 <0.0001 | 0.492 <0.0001 | |
| | DMoy | -0.464 <0.0001 | 0.597 <0.0001 | 0.449 <0.0001 | 0.179 0.0047 | 0.491 <0.0001 | 1 | 0.919 <0.0001 | 0.935 <0.0001 | |
| | DBI | -0.269 <0.0001 | 0.374 <0.0001 | 0.314 <0.0001 | 0.152 0.0171 | 0.321 <0.0001 | 0.898 <0.0001 | 1 | 0.823 <0.0001 | |
| | DBF | -0.319 <0.0001 | 0.35 <0.0001 | 0.266 <0.0001 | 0.124 0.0521 | 0.278 <0.0001 | 0.913 <0.0001 | 0.803 <0.0001 | 1 | |

Tableau 41 : Matrice de corrélations des caractéristiques de la microdensitométrie

Des corrélations négatives et très significatives au seuil de 1‰ ont été trouvées entre l'âge et les variables microdensitométriques pour les deux espèces.

Nous constatons que les relations concernant les densités de cerne (DMoy, DBI, DBF) sont mieux corrélées chez les rouvres que chez les pédonculés.

3.4 Conclusion

- Les densités du cerne (DMoy, DBI, DBF) sont généralement plus élevées chez les rouvres que chez les pédonculés à largeur de cerne identique ;
- Elles augmentent avec la largeur de cerne et diminuent avec l'âge, le taux de cette réaction est différent entre rouvre et pédonculé. Souvent, les rouvres répondent plus à ces variations que les pédonculés ;
- Une grande partie de la variabilité de ces densités est due à l'effet espèce ;
- A largeur de cerne inférieure à 2 mm, l'augmentation de la densité moyenne et de la densité du bois final est presque linéaire, au-delà de 2 mm, ces densités continuent à augmenter très lentement chez les rouvres et ont tendance à se stabiliser chez les pédonculés.

4 Profil synthétique de la microdensité

Ce sont 22399 cernes de chêne rouvre et 14521 cernes de chêne pédonculé qui ont été étudiés. Chaque cerne est caractérisé par un profil densitométrique discrétisé avec un pas de 25 μm . Pour simplifier et homogénéiser ces données, le programme de traitement délivre un profil synthétique constitué de 20 valeurs moyennes (quantiles ou vingtiles) qui montrent l'évolution de la densité radiale du bois à l'intérieur du cerne, ce qui reflète sa structure anatomique.

Avant de traiter les données microdensitométriques, il semble nécessaire de faire quelques remarques liées à l'anatomie même du bois de chêne et à la mathématique :

- liée à l'anatomie : si les profils synthétiques (20 quantiles) sont calculés pour des cernes de largeurs différentes, chaque quantile peut ne pas représenter la même zone anatomique pour chaque profil. Par exemple le 6^{ème} quantile pour un cerne de 3 mm correspond à une zone anatomique vraisemblablement riche en fibres (début du bois final), alors que ce même quantile correspond à une zone anatomique encore riche en vaisseaux et parenchyme pour un cerne de 1 mm de largeur (fin du bois final) (Figure 52) ;

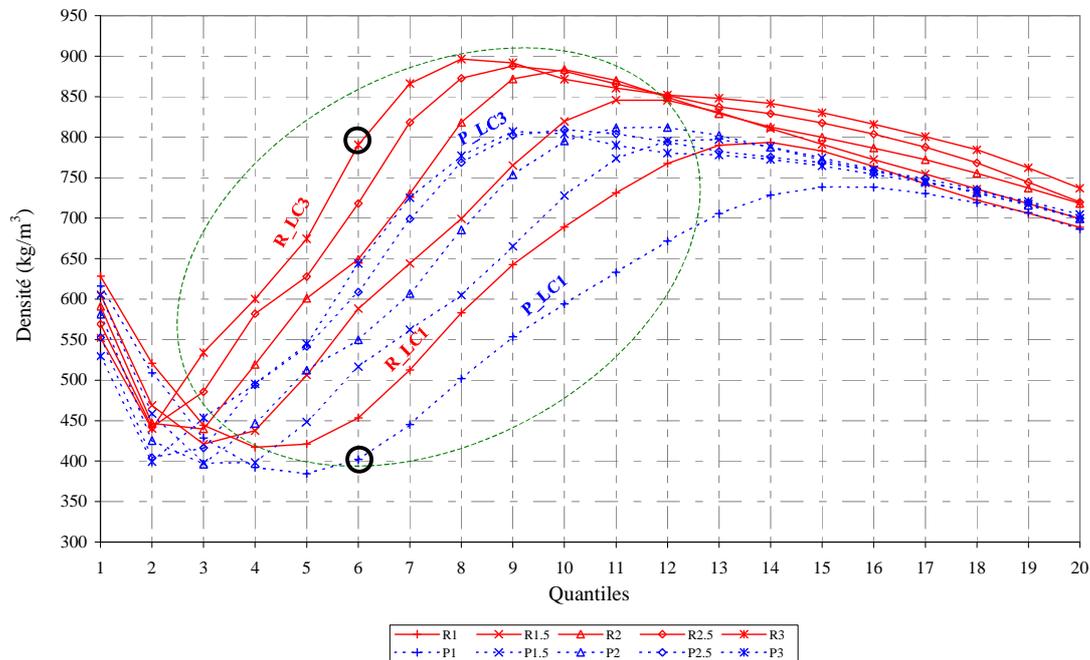


Figure 52 : profils densitométriques des chênes rouvre et pédonculé à largeurs de cernes différentes

NB. P-LC1 = exemple de profil obtenu sur un cerne de chêne pédonculé de 1 mm de largeur

R_LC3 = exemple de profil obtenu sur un cerne de chêne rouvre de 3 mm de largeur

- liée à la mathématique : chaque valeur du profil synthétique représente une densité moyenne mesurée sur un vingtième de la largeur de cerne (quantile) quelle que soit la largeur de ce dernier, ceci signifie que chaque point du profil (quantile) représente une largeur variable en fonction de la largeur de cerne ; plus le cerne est large plus le quantile prend en compte une grande surface de bois, ce qui se répercute sur la forme du profil. Il y a un lissage des valeurs dans les cernes larges. Dans les cernes étroits, les mesures sont plus ponctuelles (Figure 53).

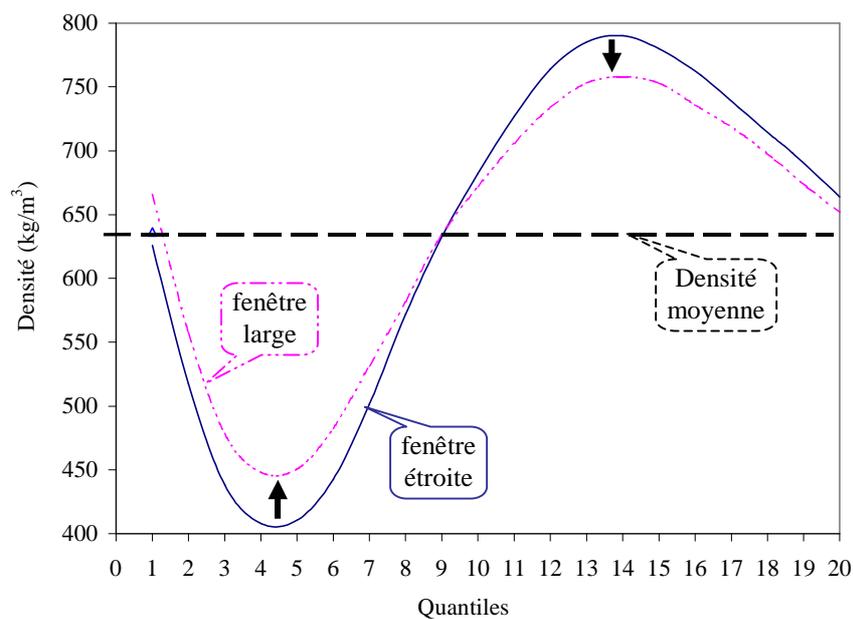


Figure 53 : Changement de forme du profil en fonction de la taille de fenêtre de mesure

Nous avons donc été amené par la suite à étudier la variabilité de la densité entre les deux espèces et entre les provenances en classant les cernes en cinq classes de 0,5 mm d'intervalle selon le protocole suivant :

- Première classe regroupe les cernes inférieurs à 1 mm ;
- la deuxième regroupe les cernes de largeur ≥ 1 mm et $<$ à 1,5 mm ;
- La troisième renferme les cernes de largeur $\geq 1,5$ mm et $<$ à 2 mm ;
- La quatrième rassemble les cernes de largeur ≥ 2 mm et $<$ à 2,5 mm ;
- La dernière réunit les cernes à largeur supérieure à 2,5 mm.

Nous n'allons présenter que les profils densitométriques moyens de l'ensemble de l'échantillonnage pour les deux espèces à différentes largeurs de cernes.

4.1 Profils synthétiques de la densité des deux espèces à différentes classes de largeur de cerne

Nous présentons dans la Figure 54 les profils synthétiques des chênes rouvres et pédonculés pour les différentes classes de largeur de cerne, tous âges confondus (nous considérons que ces profils sont représentatifs des deux espèces).

Les classes de largeurs de cernes sont représentées chacune par deux profils synthétiques de la densité. Chaque profil densitométrique présente la moyennes des valeurs de la densité intra-cerne des cernes rouvres ou pédonculés regroupés dans une classe.

Nous constatons à partir des profils moyens (Figure 54) qu'à largeur de cerne considérée identique que :

- les valeurs de la densité intra-cerne sont plus élevées chez les rouvres que chez les pédonculés ;
- les rouvres atteignent des valeurs de densité maximale plus élevées que les pédonculés ;
- les rouvres qui arrivent à une densité maximale plus élevée que les pédonculés se retrouvent avec ces derniers à une densité très voisine à la fin du cerne ;

Ceci peut signifier qu'à largeur de cerne identique, la structure anatomique est très différente d'une espèce à l'autre dans le bois final comme dans le bois initial. Dans ce dernier, il y a plus de rangées de gros vaisseaux chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre.

D'autres observations s'imposent :

- les valeurs de densité intra-cerne augmentent avec la largeur de cerne chez les deux espèces ;
- la densité maximale varie beaucoup chez les deux espèces mais à largeur de cerne inférieure à 2 mm, au delà de ce seuil cette densité est quasiment stable voire légèrement plus faible chez les pédonculés dans la classe des cernes supérieure à 2,5 mm.

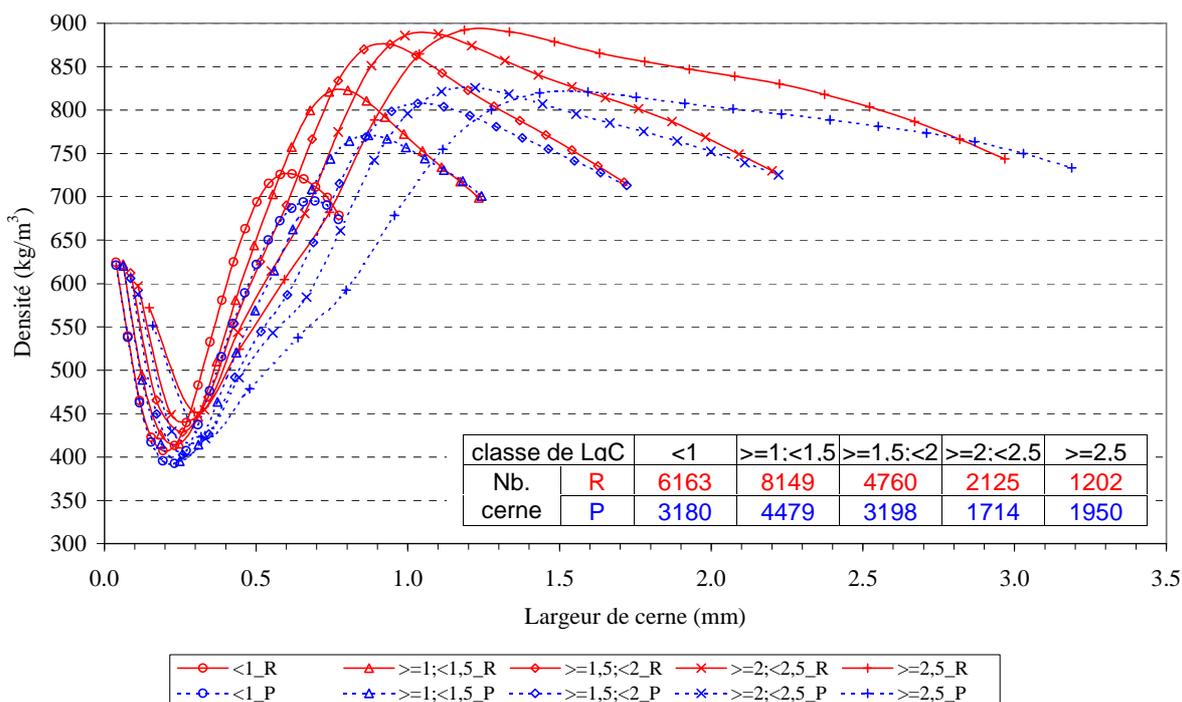


Figure 54 : Profils densitométriques de l'ensemble des chênes à différentes largeurs de cerne

Pour s'assurer de l'effet de la largeur de cerne sur la densité du bois, nous avons fait un regroupement d'âges en classe, à l'intérieur de chaque classe de largeur de cerne, avec un intervalle de 20 ans. Ceci nous a permis à la suite d'étudier l'évolution du profil densitométrique en fonction de la largeur de cerne et à âge que l'on peut considérer comme "fixe".

4.2 Profils synthétiques de la densité à différentes classes de largeur de cerne et d'âges

Nous avons étudié l'évolution des profils densitométriques à classes d'âge et de largeur de cerne "fixée". À même largeur de cerne, l'âge a peu d'influence sur l'allure du profil sauf pour les cerne les plus jeunes (âge inférieur à 60 ans) dont la largeur de cerne est inférieure à 1 mm et/ou supérieure à 2,5 mm.

Nous présentons sur la Figure 55 les profils densitométriques des deux espèces en fonction de la largeur de cerne et à classe d'âges compris entre 100 et 120 ans que nous considérons comme représentatifs des autres classes d'âges.

En comparant les profils densitométriques de différentes classes de largeur de cerne et à âges confondus (Figure 54) avec les profils densitométriques de différentes classes de largeur de

cerne mais à âges peu variables voire constants (Figure 55), nous remarquons que les profils densitométriques sont quasiment identiques.

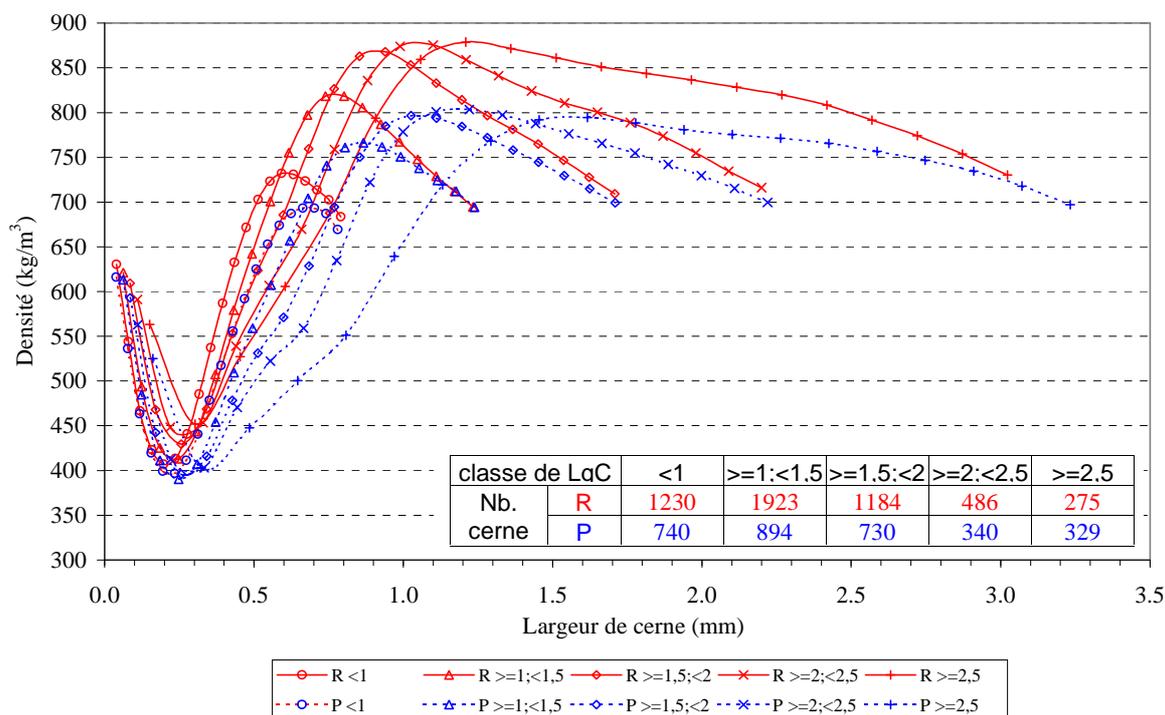


Figure 55 Profils synthétiques de la densité en fonction de la largeur de cerne et à âge entre 100 et 120 ans

Ceci nous a conduit à étudier plus finement l’influence de la variabilité de l’âge sur l’évolution de la densité intra-cerne pour des cernes à largeurs bien définies (1 ; 1,5 ; 2 et 2,5 mm). Nous montrons à titre d’exemple l’évolution de la densité intra-cerne en fonction des deux âges différents (90 et 130 ans) et à des largeurs de cernes “précises” pour chacune des espèces :

➤ Chez les chênes rouvres :

La Figure 56 présente l’influence de la variation de l’âge sur la densité intra-cerne pour des largeurs de cernes différentes. Nous constatons qu’à largeur de cerne égale :

- les cernes jeunes (90 ans) présentent toujours des valeurs de densité intra-cerne plus fortes que celles des cernes âgés (130 ans) ;
- la différence de densité entre les deux âges est assez faible. Cette différence est très similaire pour toutes les largeurs de cernes étudiées ;
- la variabilité de la densité intra-cerne est très faible dans le bois initial.

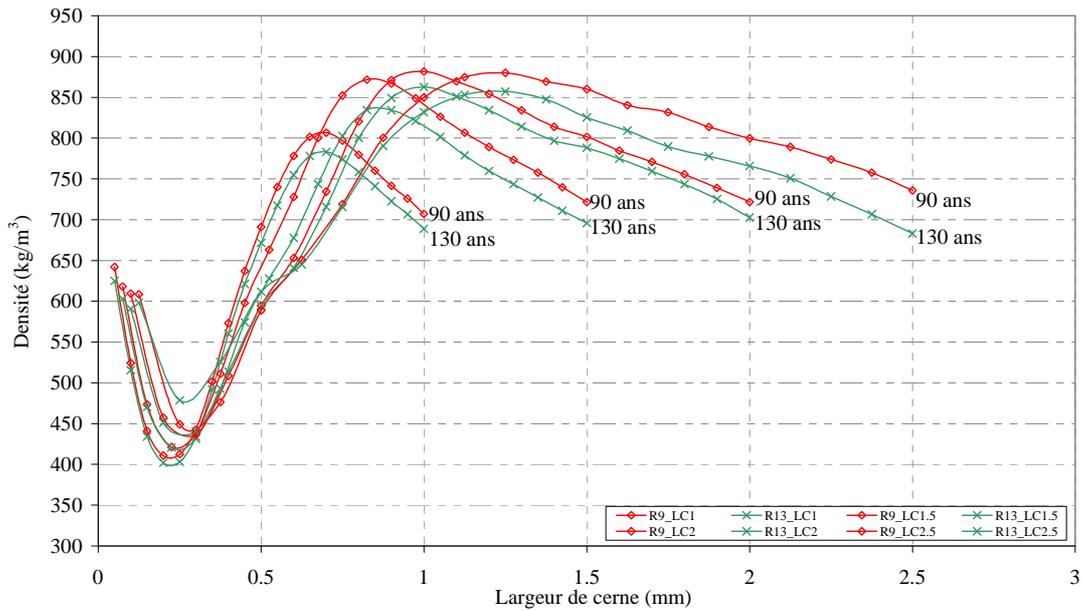


Figure 56 : Chêne rouvre : évolution de la densité moyenne dans le cerne (quantiles) en fonction de sa largeur à deux âges différents (90 et 130 ans)

➤ Chez les chênes pédonculés :

La Figure 57 montre qu'à largeur de cerne fixe :

- les cerne jeunes sont plus denses que les cerne âgés ;
- l'écart de densité entre les deux âges est moins net que celui constaté chez les rouvres ;
- il existe une très faible variabilité dans le bois initial.

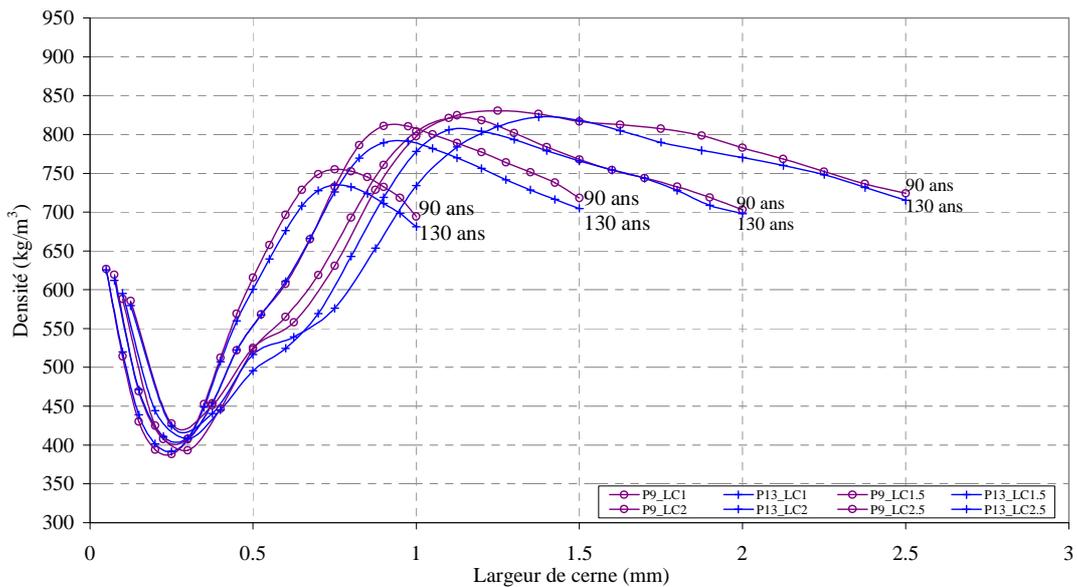


Figure 57 : Chêne pédonculé : évolution de la densité moyenne dans le cerne (quantiles) en fonction de la largeur de cerne à deux âges différents (90 et 130 ans)

La Figure 58 montre l'évolution des profils densitométrique dans chaque classe de largeur de cerne pour différentes classes d'âge chez les rouvres. À largeur de cerne inférieure à 1 mm, nous remarquons que les profils sont très variables entre les classes d'âge et que cette variabilité diminue fortement quand la largeur de cerne augmente. Dans les classes à largeur de cerne de 2 et 2,5 mm, les profils sont presque identiques (Fig.4).

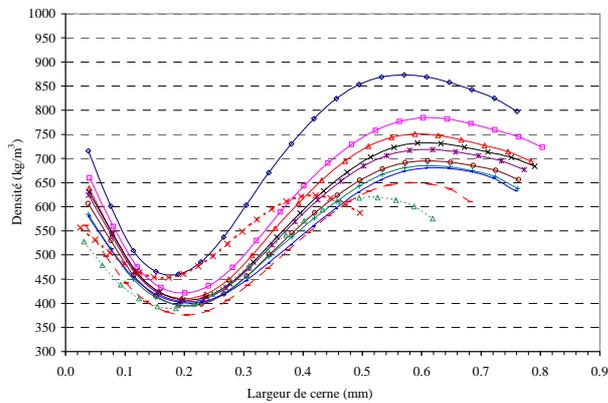


Fig. 1

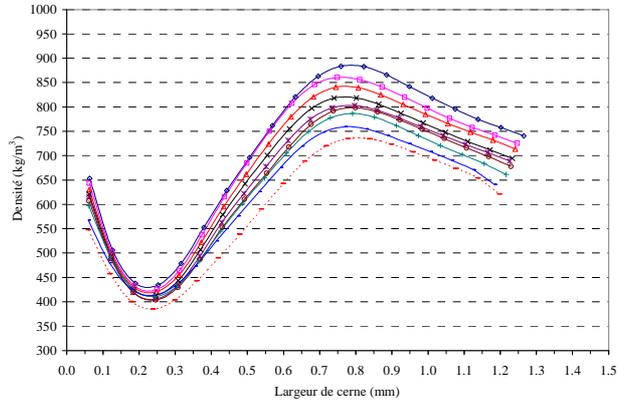


Fig. 2

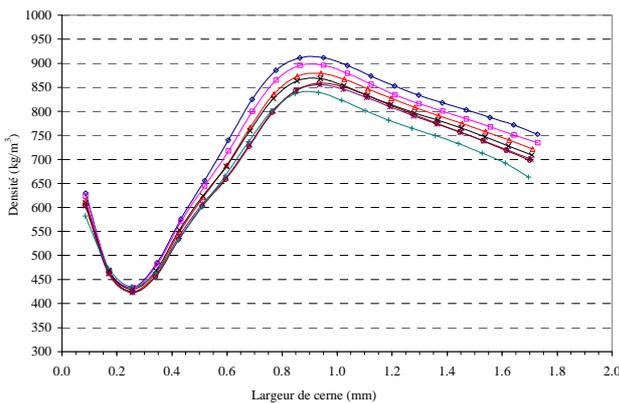


Fig. 3

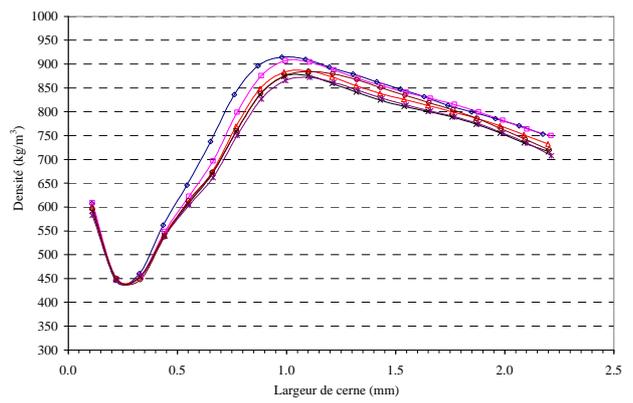


Fig. 4

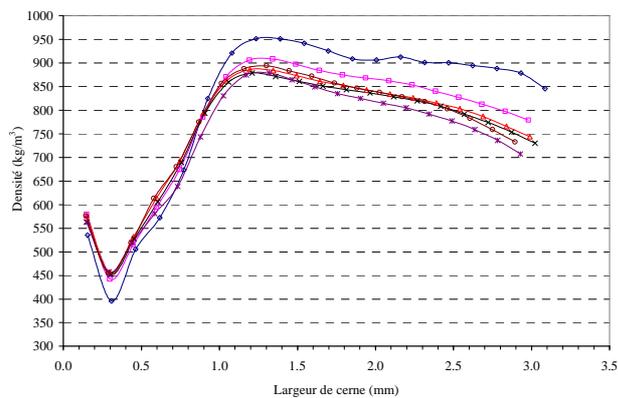
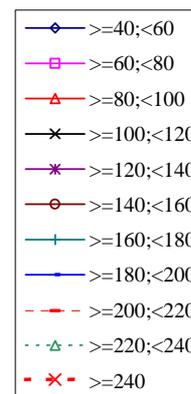


Fig. 5



Légende des âges

Figure 58 : Évolution des profils densitométriques en fonction de la largeur de cerne et à différentes classes d'âge chez les rouvres

* Attention : échelle de l'abscisse variable en fonction du graphique

Quant aux pédonculés, la Figure 59 montre qu'il y a peu de variation entre les profils densitométriques quelle que soit la largeur de cerne ou l'âge, malgré la présence de quelques cas particuliers :

Les pédonculés âgés entre 180 et 200 ans pour les classes de cernes entre 1 à 2 mm (Fig.2 et 3) et ceux à âge inférieur à 60 ans dans la classe à largeur de cerne supérieur à 2,5 mm (Fig.5).

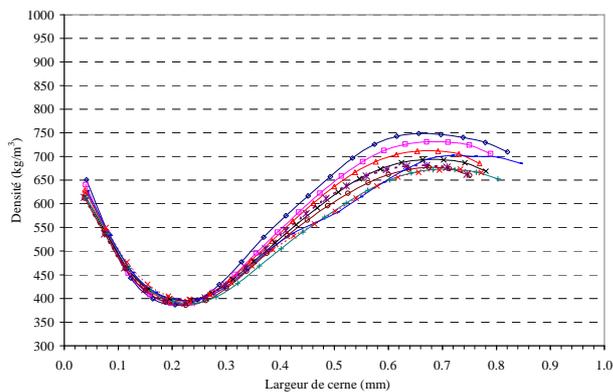


Fig. 1

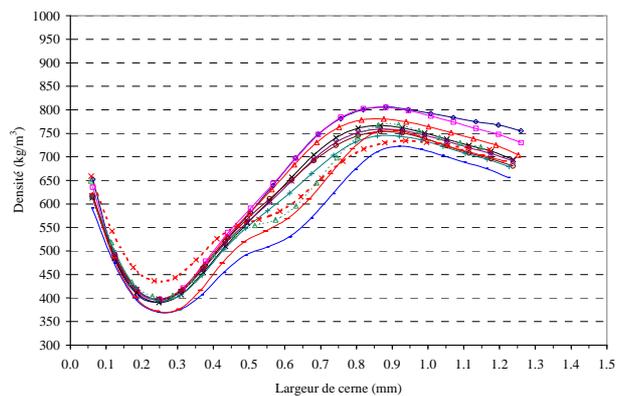


Fig. 2

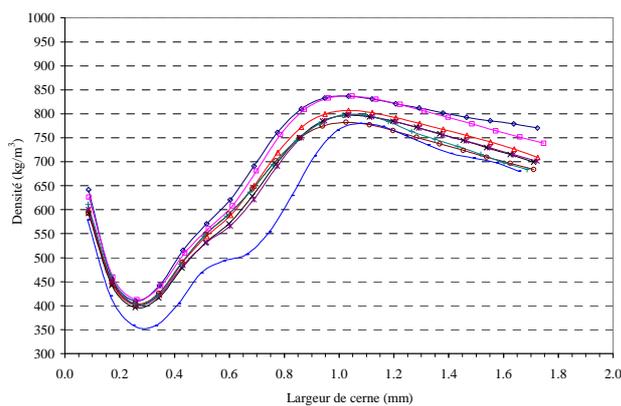


Fig. 3

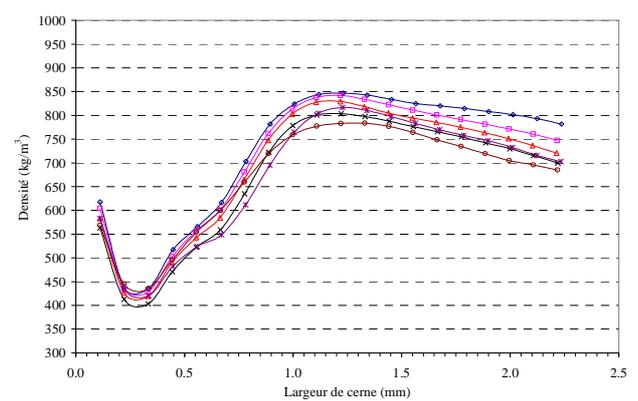


Fig. 4

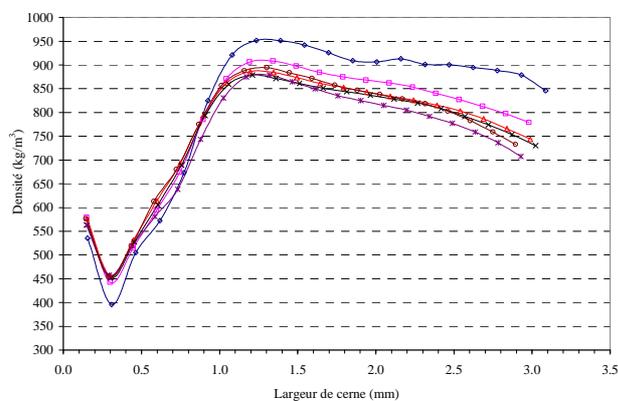
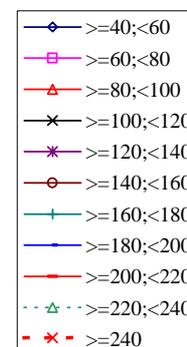


Fig. 5



Légende des âges

Figure 59 : Évolution des profils densitométriques en fonction de la largeur de cerne et à différentes classes d'âge chez les pédonculés

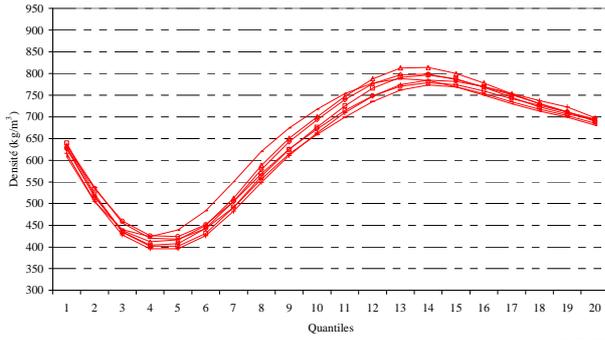
* Attention : échelle de l'abscisse variable en fonction du graphique

4.2.1 Variabilité intra-spécifique du profil densitométrique

Les profils densitométriques réalisés sur les provenances monospécifiques à largeur de cerne fixée (Figure 60) montrent que :

- quelle que soit la largeur de cerne, la variabilité intra-spécifique de la densité est plus importante chez les chênes pédonculés que chez les chênes rouvres. Ceci confirme l'effet provenance, obtenu dans l'analyse de variance. Il explique mieux la variabilité de la densité chez les chênes pédonculés (29%) que chez les chênes rouvre (14%) ;
- à largeur de cerne égale, les provenances de chêne rouvre représentent des valeurs de densité intra-cerne plus fortes que celles des chêne pédonculés.

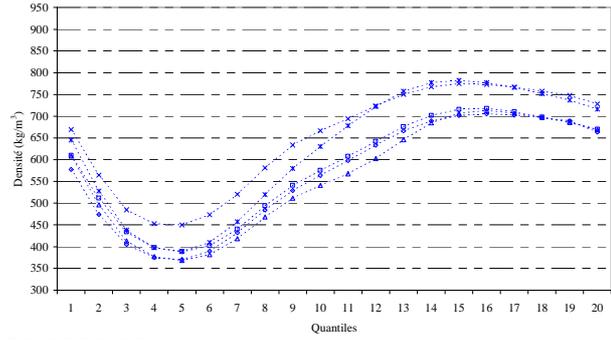
Chênes rouvres



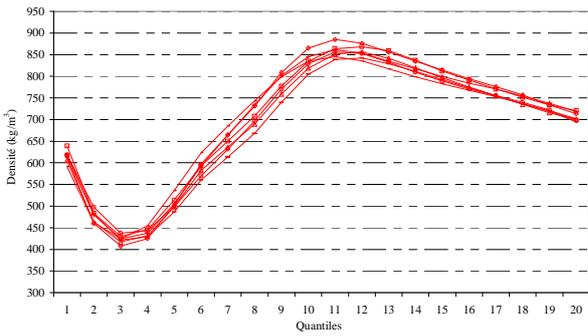
| Région | BR | BiR | CR | DR | JR | SR | TR |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nb. cerne | 110 | 408 | 128 | 233 | 454 | 153 | 298 |

Lgc = 1 mm

Chênes pédonculés

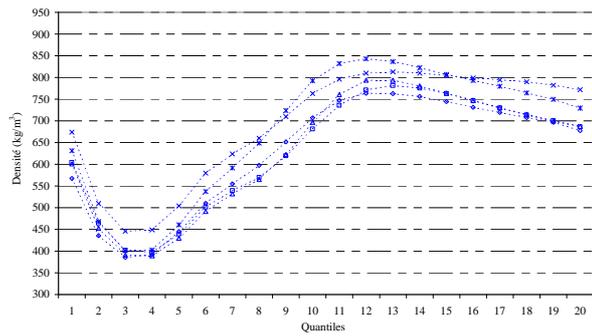


| Région | CP | DP | LiP | MP | TP |
|-----------|-----|-----|-----|----|-----|
| Nb. cerne | 173 | 275 | 57 | 80 | 289 |

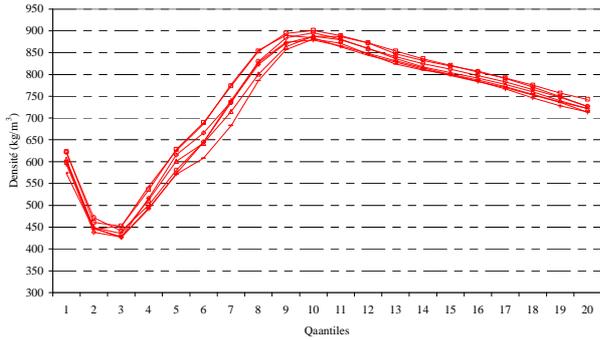


| Région | BR | BiR | CR | DR | JR | SR | TR |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nb. cerne | 225 | 200 | 171 | 173 | 175 | 193 | 215 |

Lgc = 1,5 mm

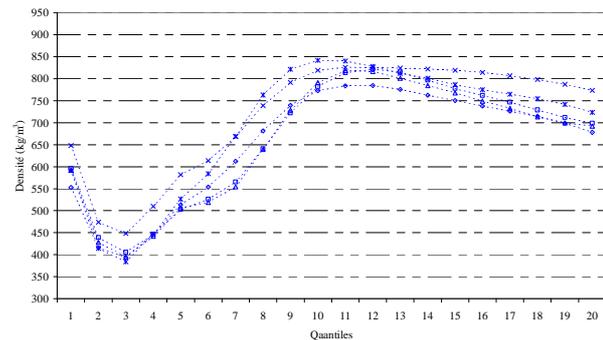


| Région | CP | DP | LiP | MP | TP |
|-----------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Nb. cerne | 149 | 240 | 103 | 110 | 222 |

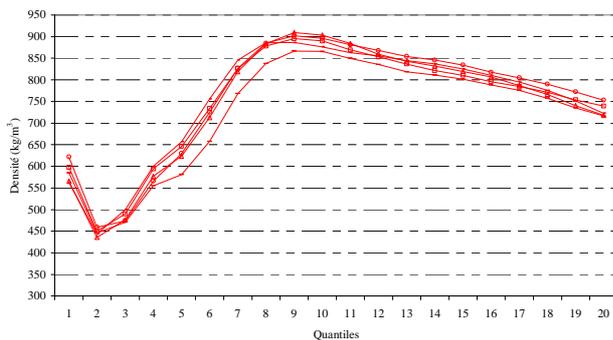


| Région | BR | BiR | CR | DR | JR | SR | TR |
|-----------|-----|-----|-----|----|----|-----|----|
| Nb. cerne | 158 | 50 | 110 | 87 | 35 | 140 | 71 |

Lgc = 2 mm

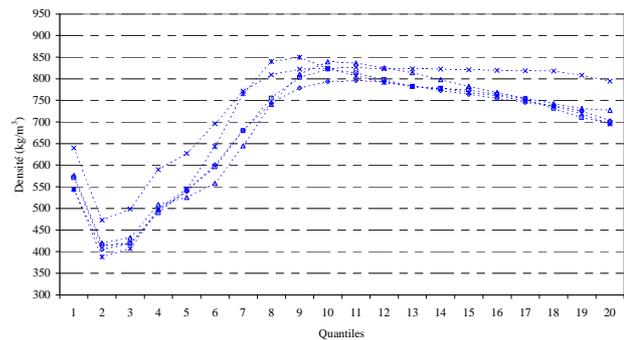


| Région | CP | DP | LiP | MP | TP |
|-----------|----|-----|-----|-----|----|
| Nb. cerne | 88 | 124 | 99 | 112 | 76 |



| Région | BR | BiR | CR | DR | JR | SR | TR |
|-----------|----|-----|----|----|----|----|----|
| Nb. cerne | 44 | | 57 | 32 | | 47 | 36 |

Lgc = 2,5 mm



| Région | CP | DP | LiP | MP | TP |
|-----------|----|----|-----|----|----|
| Nb. cerne | 57 | 41 | 80 | 55 | 28 |

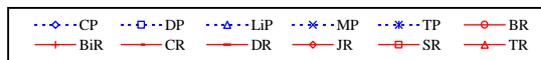


Figure 60 : Évolution de la densité intra-cerne en fonction de la provenance à largeur de cerne fixée

4.3 Conclusion

- A même âge et largeur de cerne égale, les chênes rouvres présentent des valeurs de densité intra-cerne plus forte que celles des chênes pédonculés ;
- Chez les deux espèces, la densité intra-cerne augmente avec la largeur de cerne, mais l'augmentation demeure très faible au-delà de 2 mm de largeur de cerne ;
- La densité intra-cerne augmente plus vite avec la largeur de cerne chez les rouvres que chez les pédonculés, en revanche, les deux espèces se retrouvent à une densité très proche en fin d'accroissement annuel ;
- La variabilité inter-provenance de la densité intra-cerne est plus forte chez les chênes pédonculés que chez les chênes rouvres ;
- La densité intra-cerne diminue avec l'âge et ceci chez les deux espèces ;
- Chez les chênes rouvres, la variabilité de la densité intra-cerne en fonction de l'âge est liée à la largeur de cerne, elle diminue fortement avec cette dernière. Chez les chênes pédonculés, cette variabilité est faible et demeure la même quelle que soit la largeur de cerne.

D'après cette étude on peut admettre la présence d'une grande variabilité de densité inter- et intra-espèces mais une question demeure : l'anatomie du bois peut-elle expliquer une partie de cette variabilité ? Pour y répondre, une mesure quantitative de la proportion des éléments anatomiques a été effectuée par analyse d'image à l'aide du logiciel Visilog V. 5.0.

Références bibliographiques

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, Ann.Sci.For.52, 635-652.

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.

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. Ann. Sci. For.,1979, 36 (2), pp. 93 – 124.

BERGES 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 doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 328p.

BERGES 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, pp398 – 408.

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, 54pp + annexes 52pp.

DERET-VARCIN E., 1983,

Étude comparative de la qualité du bois de trois types de Chênes (rouvres, pédonculés et intermédiaires) en forêt de Morimond. Ann. Sci. For, 1983, 40 (4), pp. 373-398.

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.

GIRAULT D., 1990,
Orientations Locales d'Aménagement. Coteaux du Nord-Est et Vic-Bilh. O.N.F Région
Aquitaine, 48 p. + annexes.

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, 206p.

HERVE J.C., 1999,
Mixed-effects modelling of between – tree and within variations. Application to wood basic
density in the stem, Rapport final FAIR CT 96-1915 « Product properties prediction-
improved utilization in the forestry – wood chain applied on spruce sawn wood », sub-task
2.1.18p.

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. Champnoux.

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.

LE MOGUEDEC G., 2000b,
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.), Ann. Sci. For., 59 (8), p. 847 - 855.

MOTHE F., SCIAMA D., LEBAN J.M.& NEPVEU G., 1998,
Localisation de la transition bois initial - bois final dans un cerne de Chêne par analyse
microdensitométrique. Ann. Sci. For., 1998, 55 (4), pp. 437-449.

MOTHE F., DUCHANOIS G., ZANNIER B.& LEBAN J.M., 1998,
Analyse microdensitométrique appliquée au bois : méthode de traitement des données
utilisée à l'INRA-ERQB (programme Cerd). Ann. Sci. For., 1998, 55 (3), pp. 301-313.

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.

POLGE H., 1975,
Étude préliminaire de l'influence de la fertilisation sur la qualité du bois de Chêne. Revue
Forestière Française, XXVII, 3, 201-208.

POLGE H., 1966,
Établissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies. Ann. Sci. For., 1966, 23 (1), pp. 1-215.

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 Doctorat ès-Sciences Appliquées, Université de Nancy I, Station de Recherches sur la Qualité des Bois, INRA-CRF, Nancy - Champenoux, 27 Juin, 215pp.

POLGE H. & KELLER R., 1973,
Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. Annales des Sciences Forestières, 30 (2), p. 91-125.

ROZENBERG PH., FRANC A., BASTIEN C. & CAHALAN C., 2001,
Improving models of wood density by including genetic effects: A case study in Douglas-fir. Ann. For. Sci., 2001, 58 (4), pp. 385-394.

SCHULZ H., 1959,
Der Phänotyp von Furniereichen und die Beziehungen zur Holzfarbe Allgemeine Forstzeitschrift, 50: pp. 1-4.

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.

ZOBEL B.J., BUIJTENEN J.P., 1989,
Wood variation. Its causes and control.- Springer Verlag, 363p.

**CHAPITRE V. ANATOMIE DU BOIS DE
CHÊNE**

1 Anatomie du bois de chêne

Le bois est un ensemble de tissus d'origine secondaire, à parois lignifiées, résultant du fonctionnement, vers l'intérieur, de l'assise génératrice cambiale libéro-ligneuse (KELLER, 1994).

Il est élaboré par un organisme vivant dans un écosystème. L'ensoleillement, la nature du terrain, l'altitude, la température ambiante, la pollution atmosphérique... interviennent directement sur la production de ce matériau.

1.1 Le plan ligneux du bois du chêne

Les éléments constitutifs du bois sont orientés soit parallèlement soit perpendiculairement à un axe de symétrie matérialisé par la moelle.

Ils sont organisés dans trois directions de références longitudinale ou axiale (L), radiale (R) et tangentielle (T). Cette organisation laisse prévoir une importante anisotropie du bois pour un grand nombre de ses propriétés physiques, mécaniques et technologiques (Tableau 42).

| Types cellulaires du bois de chêne | | Localisation dans le cerne | Rôle dans l'arbre | Propriétés liées, pour l'utilisateur |
|------------------------------------|--------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Éléments de vaisseaux | | - vaisseaux de très gros diamètre dans le bois initial ; - vaisseaux de très petit diamètre dans le bois final, en plages. | - conduction de la sève brute ascendante ; - cellules à parois minces. | - zone du bois à faible densité et à faibles propriétés mécaniques ; - porosité ; - perméabilité mais étanchéité lorsque envahissement par les thylles. |
| Fibres | | en plages dans le bois final. | - soutien ; - résistance mécanique ; - maintien de la verticalité des tiges et de l'angle des branches ; - cellules à parois épaisses. | - zone de bois à forte densité et fortes propriétés mécaniques ; - rétractibilité élevée ; - peuvent présenter le caractère "bois de tension" ; - confère une nuance sombre à la couleur du bois en section transversale. |
| Parenchymes | Longitudinal | diffus, tangentiel, ou associé aux vaisseaux. | - biochimique ; - rôle important dans la duraminisation. | - zone de bois à faible densité ; - propriétés : chimique (ellagitanins), durabilité, à l'origine des thylles. |
| | Radial | Rayons ligneux unisériés et plurisériés. | - comme ci-dessus, plus conduction radiale. | - zone de bois à forte densité ; - propriétés comme ci-dessus plus zone préférentielle de rupture (débit par fente, fentes au séchage) ; - rôle dans la rétractibilité. |

Tableau 42 : Contribution des principaux type cellulaires constituant le plan ligneux de chêne à différentes propriétés du bois intéressant l'utilisateur (d'après FEUILLAT et al., 1998)

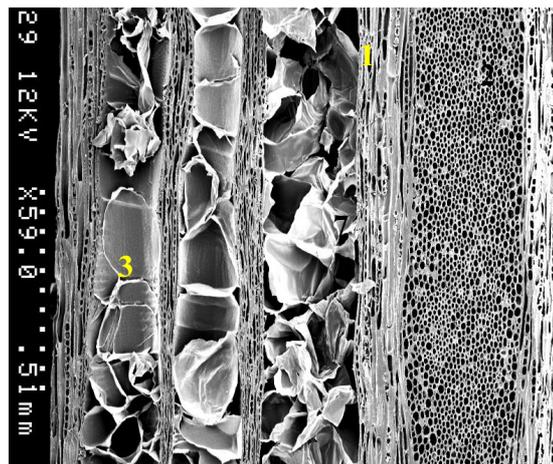
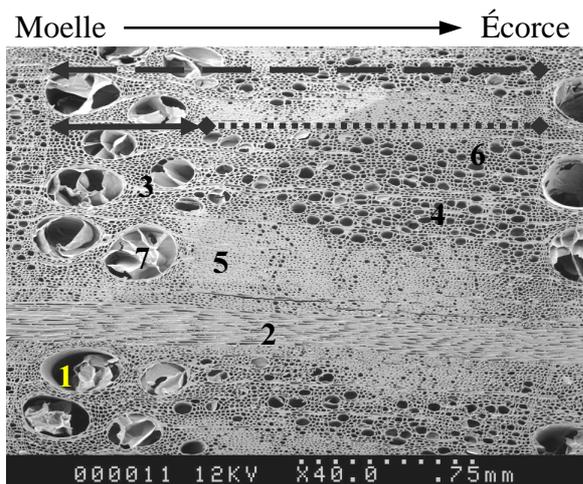
Pour comprendre la structure du bois, il est recommandé de l'étudier à l'aide de trois coupes perpendiculaires (Figure 61) :

- coupe transversale perpendiculaire à l'axe de la tige ;
- coupe radiale longitudinale dans un plan passant par la moelle ;
- coupe tangentielle longitudinale dans un plan excentré et parallèle à l'axe de tige.

Le bois de chêne rouvre et pédonculé est un matériau hétérogène à zone initiale poreuse. L'observation d'un cerne annuel en coupe transversale (Figure 61) montre qu'il est constitué de deux zones bien distinctes :

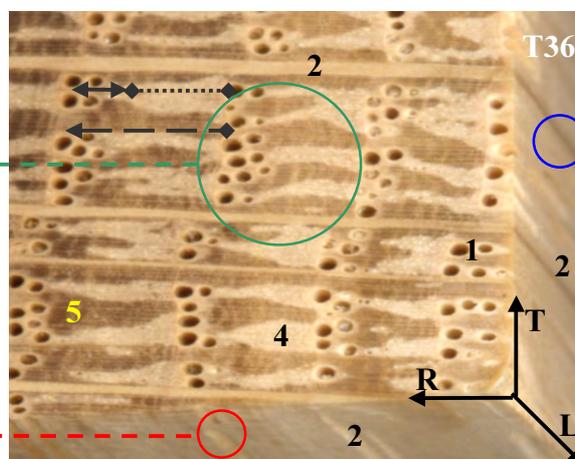
- une zone initiale poreuse, le bois de printemps, constituée essentiellement de gros vaisseaux qui sont formés avant la mise en place des feuilles (HUBER, 1935 ; WAREING, 1951 ; BREDA et GRANIER,1996) et entourés de trachéides vasicentriques. Selon NEPVEU (1994b), la largeur du bois initial moyenne varie de 0,5 à 1,2 mm chez les deux espèces ;
- une zone finale, le bois d'été, elle est généralement constituée de tissus plus denses que la zone initiale : plages de fibres, de parenchymes et de petits vaisseaux.

On observe aussi des rayons ligneux disposés radialement : les uns de petite dimensions (les rayons ligneux unisériés) ; les autres de grande dimension (les rayons ligneux plurisériés).



Plan transversal (Tr)

Plan tangentiel longitudinal (TL)



Vue en 3D du bois de chêne

Légende

← — ◆ Largeur du cerne

↔ Largeur du bois initial

◆ ◆ Largeur du bois final

1. Gros vaisseau du bois initial

2. Gros rayon ligneux (plurisérié)

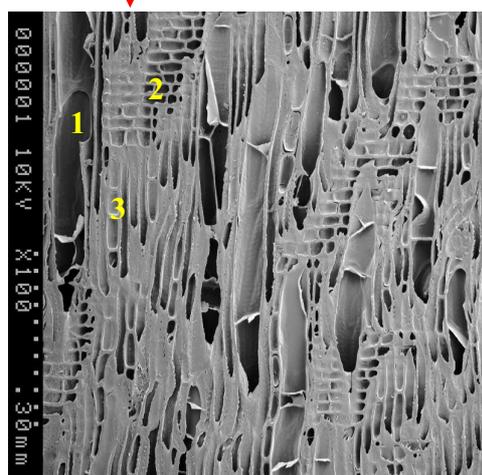
3. Petit rayon ligneux (unisérié)

4. Parenchymes et petits vaisseaux du bois final

5. Plage de fibres

6. Petit vaisseaux du bois final

7. Thyllés obstruant les gros vaisseaux



Plan radial longitudinal (RL)

Figure 61 : Plan ligneux du bois de chêne rouvre et/ou pédonculé dans les 3 plans de référence

1.1.1 Éléments verticaux

1.1.1.1 Vaisseaux et trachéides vasicentriques

Les vaisseaux constituent le système de conduction de la sève brute ; 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" (Figure 62).

Les vaisseaux sont groupés en 1 à 5 rangés au début du cerne dans le bois initial (SACHESS, 1984 ; COLLARDET et BESSET, 1992), leur diamètre tangentiel peut atteindre 400 μm (GROSSER, 1977 ; FENGEL et WEGENER, 1989), voire 500 μm (JACQUIOT et *al.*, 1973). Ils assurent la fonction de conduction de la sève brute depuis les racines jusqu'aux extrémités aériennes.

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.

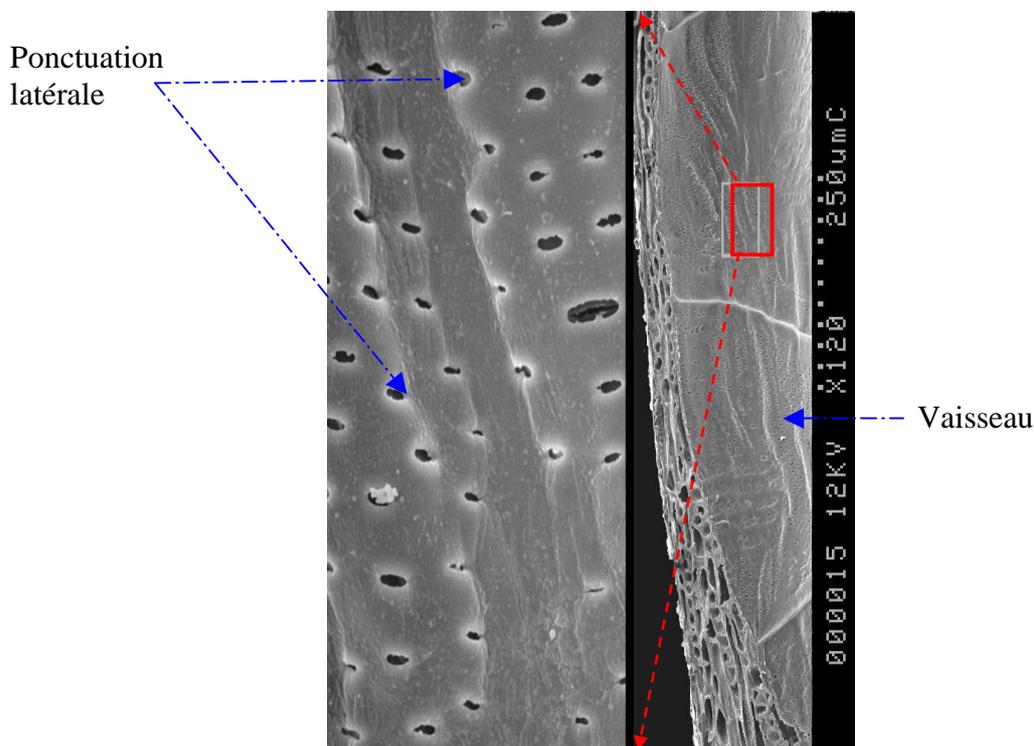


Figure 62 : Élément de vaisseau du bois de chêne (plan tangentiel) vu au microscope électronique (bois massif)

Les gros vaisseaux sont généralement au bout de quelques années obstrués par des thylles à parois minces (JACQUIOT *et al.*, 1973). Ces thylles sont fréquents dans le duramen, mais existent aussi, avec une fréquence moindre, dans l'aubier (ZIEGLE, 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 ou flammes radiales. Les plages de vaisseaux alternent avec des plages de tissus de soutien (fibres), leurs proportions relatives varient selon les individus (arbre).

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 thylles (VANSTEENKISTE *et BRED*A, 2002).

1.1.1.2 Les tissus fibreux

On rencontre chez les chênes indigènes, rouvre et pédonculé, des fibres libriformes, des fibres trachéides et des trachéides juxtavasculaires ou vasicentriques (WAGENFÜHR *et SCHEIBER*, 1974 ; GASSON, 1987 ; KELLER, 1994).

Les fibres libriformes répondent uniquement au besoin de soutien tandis que les autres formes des fibres sont de type intermédiaire et assurent ainsi une partie de la conduction de la sève brute ou de stockage d'eau (BRAUN, 1983 ; WHEELER *et BAAS*, 1991).

Les fibres libriformes sont groupées en zones radiales, entre les plages de petits vaisseaux, ce sont des éléments à lumen peu important, à parois épaisses avec des ponctuations simples et peu nombreuses à orifice en fente (KELLER, 1994 ; JACQUIOT *et al.*, 1973) (Figure 63).

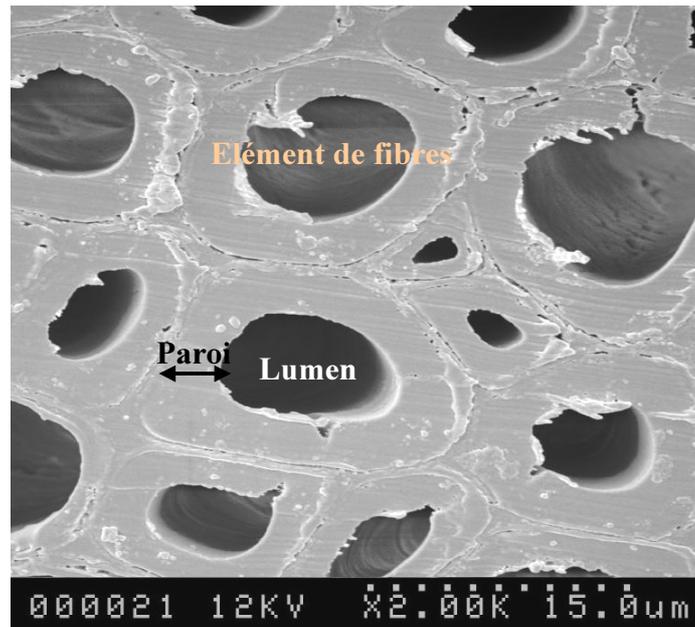


Figure 63 : Section transversale des fibres du bois final du chêne vue en microscopie électronique (bois massif)

Les fibres trachéides sont présentes surtout dans le bois final où elles assurent avec les fibres libriformes le rôle de soutien (GASSON, 1987). Elles se différencient des fibres libriformes par la présence de ponctuations aréolées sur leurs parois (KELLER, 1994).

Les trachéides vasocentriques ou juxtavasculaires se trouvent autour des vaisseaux avec lesquels elles communiquent par des ponctuations aréolées. Elles sont considérées comme un élément de transition entre les vaisseaux et les fibres, ce qui leur donne un rôle non négligeable dans la conduction de la sève avec les vaisseaux (BRAUN, 1983 ; CARLQUIST, 1988).

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.

1.1.1.3 Parenchyme longitudinal

Le parenchyme longitudinal dans le bois final est disposé de manière dite “apotrachéale” car les cellules de parenchyme ne sont pas associées aux vaisseaux. En section transversale, elles sont isolées ou dispersées en chaînettes ou encore forment des couches tangentiellles larges de une à deux cellules entre les rayons (CASPERSON, 1967 ; VENET, 1974, GROSSER, 1977 ; CARLQUIST, 1988) (Figure 64). Ces couches sont parallèles aux limites de cernes et traversent aussi bien les plages de fibres que les plages de petits vaisseaux.

Dans le bois initial, on trouve fréquemment du parenchyme paratrachéal associé aux vaisseaux ou aux trachéides vasicentriques (SCHWEINGRUBER, 1978). Les ponctuations qui assurent le passage d'un élément du parenchyme à un autre ou à un vaisseau sont simples et nombreuses sur la face radiale de la paroi des cellules des trois types de parenchyme (parenchyme longitudinal, apotrachéal et paratrachéal) (JACQUIOT *et al.*, 1973 ; KELLER, 1994). Le parenchyme longitudinal peut accumuler des réserves, les restituer et les transformer ; il joue un rôle essentiel dans le processus de duraminisation qui fait passer le bois de son rôle fonctionnel (aubier) à son état inerte de bois parfait appelé duramen ou encore bois de cœur (KELLER, 1994).

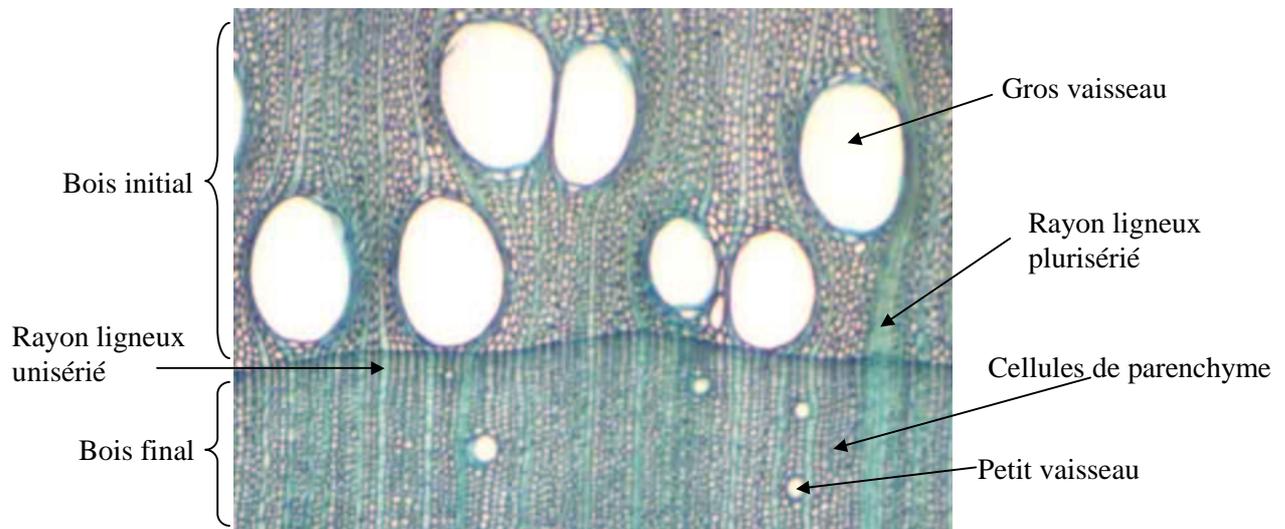


Figure 64 : Coupe microscopique de bois du chêne en section transversale

1.1.2 Éléments horizontaux

1.1.2.1 Rayons ligneux

On distingue deux types de rayons ligneux : les unisériés (une file de cellules) et les plurisériés (15 – 50 cellules en largeur et pouvant atteindre plusieurs centimètres en hauteur) (Figure 64).

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.

La hauteur et la largeur sont particulièrement visibles en section tangentielle longitudinale (TL) (Figure 65B) et la longueur en section radiale longitudinale (RL) (Figure 65C). En section transversale, les rayons ligneux se présentent sous forme de lignes radiales,

constituées de files radiales de cellules rectangulaires qui traversent le cerne (Figure 65A). La majorité des rayons ligneux ne partent pas de la moelle.

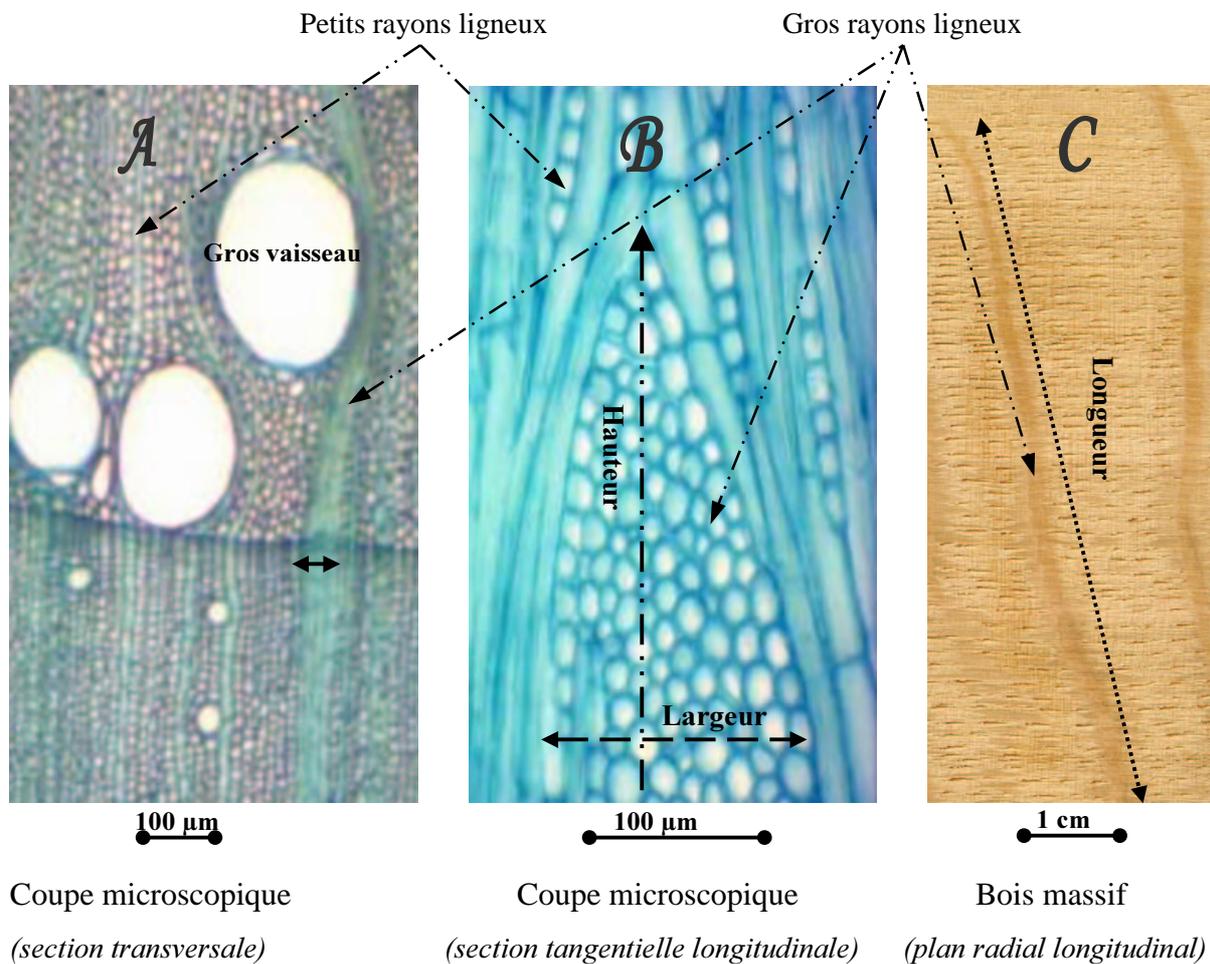


Figure 65 : Petits et gros rayons ligneux du bois des chênes

Nb. Les échelles données ci-dessus sont approximatives.

En section tangentielle, les rayons ligneux unisériés sont larges d'une cellule, les plurisériés de 10 -20 cellules parfois jusqu'à 30 cellules (KUČERA, 1985).

Selon FEUILLAT (1991), la largeur moyenne des rayons ligneux en section tangentielle est de 120 µm pour le chêne pédonculé et de 160 µm pour le chêne rouvre. DENDAN (1996) a trouvé des largeurs moyennes variant entre 150 – 340 µm, pour des épaisseurs (largeurs) moyennes des trois plus gros rayons ligneux rencontrés qui vont de 200 à 490 µm (mesures réalisées sur des barreaux large de 50 – 60 mm dans la direction tangentielle provenant de 82 arbres de chênes rouvres).

1.2 Changements anatomiques liés au vieillissement du bois

1.2.1 Duraminisation

Transformation qui amène progressivement la partie la plus ancienne, donc la plus centrale, du bois fonctionnel à l'état du bois de cœur (duramen). Ce dernier est le résultat des modifications anatomiques, physiques, chimiques, subis par les cernes les plus anciennement formés (KELLER, 1987). Il est constitué de cellules mortes où les éléments nutritifs ne circulent plus. Il se caractérise généralement par une diminution de la quantité d'eau et des matières de réserves, une augmentation de la concentration en substances chimiques (tanins, résines, matières colorantes) et par la formation de thylls chez certaines espèces.

Ces changements assurent la protection du bois contre les attaques des organismes lignivores (la durabilité naturelle du bois) (STEWART, 1966 ; ZIEGLER, 1968). Ils diminuent l'intensité du retrait.

La duraminisation s'accompagne généralement, chez certaines espèces (chênes, châtaigniers, pins...), de changement de couleur ; l'aubier est généralement plus clair que le duramen et se distingue assez nettement (Figure 66). Pour d'autres espèces (sapin, épicéa, peuplier, érable...), l'aubier ne se distingue pas visuellement du duramen, le phénomène étant bien moins marqué.

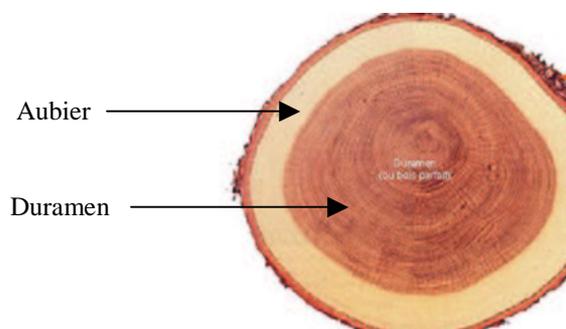


Figure 66 : Plan transversal du bois du chêne

Dans le cas du chêne le bois duraminisé devient plus foncé, rougeâtre ou brunâtre en fonction de sa texture et de sa structure anatomique (KLUMPERS, 1994).

La duraminisation chez les chênes rouvre et pédonculé se manifeste par :

- l'apparition d'une coloration du bois (Figure 66) ;
- l'imprégnation des parois cellulaires par des substances élaborées par les cellules de parenchyme longitudinal et radial ;
- l'obstruction des gros vaisseaux par des thylls.

1.2.2 Thyloose

Les thyloles résultent de l'excroissance d'une cellule de rayon ligneux, ou de parenchyme axial, à travers la cavité d'une ponctuation d'un vaisseau adjacent, obstruant partiellement ou complètement la lumière du vaisseau (Figure 67).

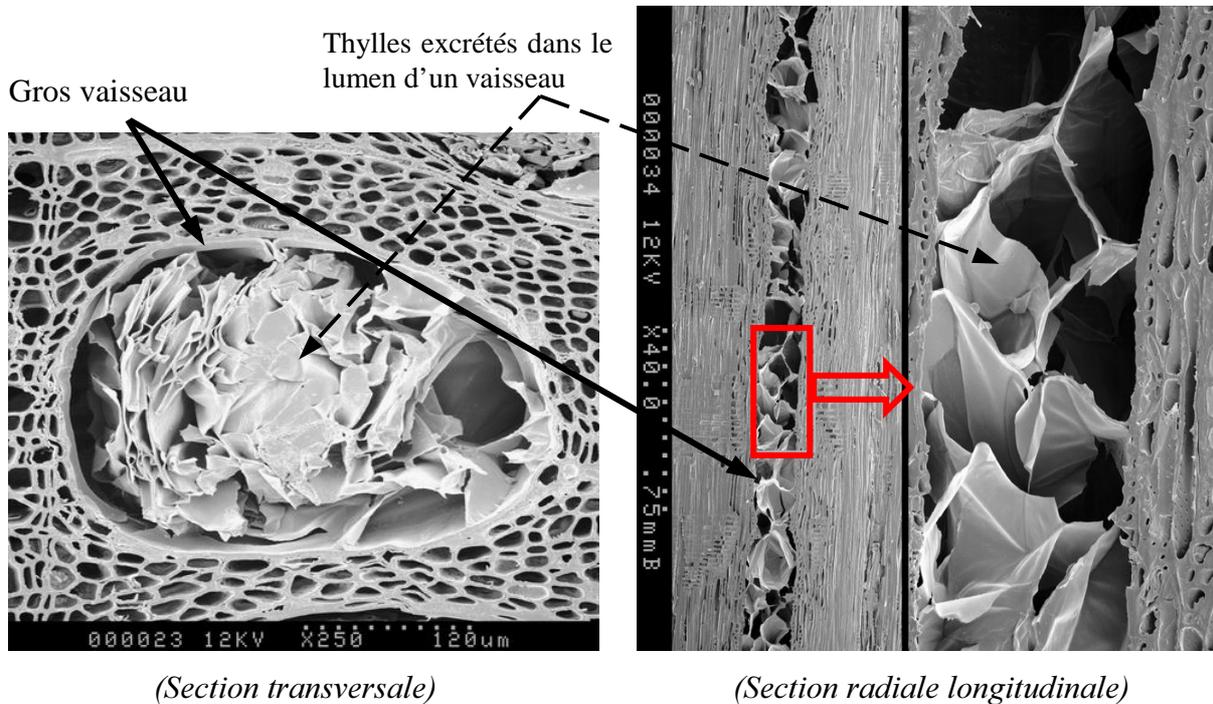


Figure 67 : Envahissement d'un vaisseau du bois initial par des thyloles émises au travers des ponctuations chez les chênes rouvre et/ou pédonculé

Les thyloles peuvent être rares ou nombreux et serrés, à parois minces ou épaisses; ponctués ou non, contenir ou non de l'amidon, des cristaux, des résines, des gommés, etc.

On distingue trois types de thyloles :

- les thyloles d'origine naturelle liés au processus de duraminisation (BOSSHARD, 1965 ; HILLIS, 1987) ;
- les thyloles traumatiques, ayant des formes plutôt cylindriques en réponse à une blessure du xylème (MEYER, 1967) ;
- les thyloles d'incubation se forment au voisinage du cambium après abattage de l'arbre (MURMANIS, 1975).

Les chênes rouvres et pédonculés (*Q. petraea* et *Q. robur*), les chênes blancs d'Amérique du Nord (par exemple, *Q. alba* et *Q. garryana*) possèdent des thyloles dans leur duramen, ceux-ci sont rares voire absents chez les chênes rouges (par exemple, *Q. rubra* et *Q. palustris*) et chez

le chêne vert (*Q. ilex*) (GERRY, 1914 ; JANE, 1970 in ZÜRCHER et *al.*, 1985 ; JACQUIOT et *al.*, 1973).

Ce caractère anatomique est déterminant, il conditionne l'aptitude des chêne à l'utilisation en tonnellerie "étanche" (GERRY, 1914). Cette particularité interdit d'ailleurs l'usage du bois des chênes rouges en tonnellerie sans traitement destinés à boucher les vaisseaux (COLLARDET et BESSET, 1992 ; FEUILLAT et *al.*, 1993 ; NEPVEU, 1994 b).

Le nombre de gros vaisseaux bouchés par les thylls augmente de manière progressive en allant de l'aubier le plus externe (sous écorce) pour atteindre presque 100% dans le bois de cœur du chêne (VASTEENKISTE et BREDA, 2002).

COCHARD et TYREE (1990) ont montré que les thylls, chez les chênes d'origine nord-américaine, apparaissent dans les vaisseaux désactivés consécutivement à une embolie hivernale. Cependant, les vaisseaux ne sont intégralement obstrués par des thylls qu'au cours de l'été suivant. Au sein d'un même tissu conducteur, les vaisseaux les plus gros sont les plus vulnérables à la cavitation et à l'embolie (ZIMMERMAN, 1983 ; COCHARD et TYREE, 1990). Les petits vaisseaux du bois final conservent ainsi un rôle fonctionnel pendant plusieurs années et donc ne sont obstrués par des thylls que plus tardivement. L'obturation des vaisseaux est une conséquence et non la cause de l'arrêt de la conduction dans l'arbre (ZIMMERMAN, 1983).

La formation des thylls est souvent associée au processus de la duraminisation (HILLIS, 1987) ; selon COCHARD et TYREE (1990) ils apparaissent dès que les vaisseaux ne jouent plus de rôle dans la conduction.

1.3 Reconnaissance du bois de chêne rouvre et pédonculé

La distinction microscopique et macroscopique entre les deux espèces de chênes indigènes, rouvre et pédonculé, par l'anatomie de leurs bois est très difficile.

La séparation des deux bois par considération de plusieurs paramètres anatomiques à la fois est également incertaine (KLUMPERS, 1994). Selon GROSSER (1977) la distinction du bois des deux espèces peut se faire avec 75% de réussite en comparant des arbres ayant poussé sur un terrain considéré comme typique pour chacune des espèces et ayant développé des largeurs de cernes supérieures à 1,5 mm.

DERET-VARCIN (1983) a observé que le chêne rouvre possède moins de rangées de gros vaisseaux que le chêne pédonculé. Elle a aussi montré que le nombre moyen de gros vaisseaux par cerne, compté sur la radiographie de carottes de sondage à la tarière de Pressler est plus élevé chez le chêne pédonculé (23,95) que chez le chêne rouvre (17,60).

Ce même auteur n'a pas trouvé de différence significative entre les deux espèces au niveau de la surface transversale moyenne d'un gros vaisseau, $S_P = 0,0529 \text{ mm}^2$, $S_R = 0,0496 \text{ mm}^2$.

Selon FEUILLAT et *al.* (1997), la distinction des deux espèces est possible au seuil de 75% pour des arbres issus de peuplements mélangés et pour des cernes d'une largeur proche de 2 mm.

D'après HUBER et KELLER (1993) à largeur de cerne comparable :

- le chêne pédonculé présente une zone de bois initial plus large que celle de chêne rouvre. Ceci est le résultat de deux facteurs :
 - le bois initial du chêne pédonculé se compose de 2 à 6 rangés de gros vaisseaux ;
 - ces derniers sont de taille plus importante, de forme plus ovoïde que ceux rencontrés chez le chêne rouvre.
- La largeur du bois final et la proportion de fibres dans ce dernier sont souvent plus faibles chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre.

Le Tableau 43 regroupe les caractéristiques anatomiques, en section transversale, considérées comme les plus sûres pour distinguer les deux espèces avec une bonne probabilité de réussite proposées par les auteurs qui se sont intéressés à la question (HUBER et *al.*, 1941 ; CONSENS, 1965 ; WALKER, 1978 ; FLETCHER, 1978).

| Largeur de cerne | Critère anatomique | Chêne rouvre | Chêne pédonculé |
|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| > 2 mm sur le rayon | Nombre de rangées de gros vaisseaux dans le bois initial | Une à deux rangées de vaisseaux, exceptionnellement trois | Plusieurs rangées de vaisseaux (jusqu'à 4-5) |
| | Largeur relative du bois initial par rapport à la largeur de cerne | Inférieur à 25% (ce qui correspond à une texture supérieure à 75%) | Supérieur à 25% (ce qui correspond à une texture inférieure à 75%) |
| | Transition du bois initial au bois d'été | brutale | graduelle |
| Quelle que soit la largeur de cerne | Forme de la section transversale des vaisseaux | À peu près circulaire contours non déformés | Ovale, vaisseaux souvent pressés les uns contre les autres et déformés |
| | Apparence des plages de vaisseaux dans le bois final "flammas" | - en forme de bandes ou lignes effilées ; - s'il y a des bifurcations, elles sont faibles ; - plages petites et nettes. | - en forme de massues, s'élargissant vers la fin du cerne ; - sinon, bifurcation fréquentes ; - diffuses. |
| | Bois final | Fibres libriformes plus fréquentes | Fibres trachéides plus fréquentes |

Tableau 43 : Critères permettant de distinguer les bois des chênes rouvre et pédonculé en section transversale (in KELLER, 1987 ; d'après FLETCHER J., 1978)

HUBER *et al.* (1941) ont observé, chez le chêne rouvre, une zone dépourvue de vaisseaux située entre le bois initial et le bois final. Chez le chêne pédonculé, cette zone dépourvue de vaisseaux se rencontre rarement. Cependant chez les deux espèces nous pouvons observer l'inverse de ce que nous venons de décrire, mais dans ce cas le fait reste relativement rare. La taille des vaisseaux entre le bois initial et le bois final passe, en moyenne, par plus d'étapes intermédiaires chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre où le passage est moins marqué. Le chêne pédonculé présente une excentricité (diamètre tangentiel / diamètre radial) des vaisseaux du bois initial (0,75) nettement plus forte, en moyenne, que celle du chêne rouvre (0,83) ; cette excentricité augmente clairement avec la largeur de cerne. Les valeurs indiquées ont été déterminées sur le bois du tronc. Des mesures comparatives sur le bois des branches ont montré chez les deux espèces, conformément à la moindre largeur des cernes annuels, des vaisseaux plus ronds (la moyenne : chêne pédonculé = 0,85, chêne rouvre = 0,92), mais les différences entre les deux espèces se maintenaient (HUBER *et al.*, 1941).

1.4 Variabilité de bois du chêne rouvre et pédonculé

Plusieurs études ont montré la présence d'une très grande variabilité des caractéristiques anatomiques du bois de chêne rouvre et pédonculé. Le Tableau 44 montre quelques données bibliographiques concernant la variabilité de la proportion des différents tissus constituant le bois de chêne.

| Parenchyme | Parenchyme + petits vaisseaux | Proportion de fibres | | | Référence bibliographique |
|------------|-------------------------------------|----------------------|----------|----------------------------|------------------------------|
| | | Cernes larges | | Cernes étroits | |
| 3 5 6 | | 54 58 63 | 40 44 48 | WAGENFÜHR, 1989 | |
| | 48 ^{CL} à 53 ^{CE} | 40 | 32 | GUILLEY, 2000 ^R | |
| 5 | | 58 | 44 | FENGEL et WEGENER 1989 | |
| | 24 34 49 ^T | 12 32 48 | | VANSTEEKISTE, 2003 | |
| 3 5 8 | | 40 à 63 | | SACHSSE, 1984 | |
| | 25 ^T | 50 et plus | | NEPVEU, 1991 | |
| | 30 49 70 ^{TV} | 6 29 55 | | SCIAMA, 1995 ^R | |

Nb. les proportions sont relatives à la surface totale du cerne.

Valeurs moyennes représentées en gras.

^{CE} cernes étroits ^{CL} cernes larges

^{TV} trachéides vasicentriques et petits vaisseaux

^T trachéides vasicentriques

^R chêne rouvre

^P chêne pédonculé

Tableau 44 : Quelques données relatives aux proportions des tissus chez le chêne rouvre et pédonculé

Les caractéristiques des rayons ligneux (largeur, nombre, proportion) chez le chêne rouvre et pédonculé ont fait l'objet de beaucoup d'études. Le Tableau 45 résume quelques données trouvées dans la littérature relatives à la variabilité des caractéristiques des rayons ligneux.

| Largeur (μm) | Proportion % | Hauteur | Nombre/cm | Référence |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| 500 à 1000 ^{GRL} (plurisériés) 8 15 25 ^{PRL} (unisériés) | 15 à 23 ^V | 6 8 25 mm ^{GRL} 80 60 240 μm ^{PRL} | | SACHESSE, 1984 ; STEVENS et TURNER, 1970 |
| 500 à 1000 | 16 ^{CE, V} 18 29 33 ^{CL, V} | 6 38 100 mm ^{GRL} 80 160 240 μm ^{PRL} | | WAGENFÜHR et SHEIBER, 1974 |
| 265 | 9% | | | SAVILL, 1986 |
| 150 - 340 | 2,8 – 12,7 ^{L,R} | | 1,4 – 5,5 | DENDANE, 1996 |
| | 14 - 40 ^V | | | LONGMAN et COUTS, 1974 |
| | | | 100 -160 ^{PRL} dont 4 -6 ^{GRL} | VENET, 1974 ^T |
| | | | 4,3 ^C | CINOTTI, 1989 |
| 120^P / 160^R | | | | FEUILLAT, 1991 ^{Tr} |
| | | | 4 5 6 ^{GRL} 80 ^{PRL} | VANSTEENKISTE, 2003 ^{AR, t} |
| | 2 7 17 ^{S,R} | | | SCIAMA, 1995 ^t |
| | 1 6 13 | | | GUILLEY, 2000 ^t |
| 150 220 280 | 5 8 11 ^L | | 31 48 68 [*] | BARBE, 1994 ^{Tg} |
| | | | 2,4 4,3 7,6 | NEPVEU et HUBER, 1991 ^{Tr} |
| 90 300 600 | 2,4 6 14,7 | | 1,1 3,4 6,9 | FEUILLAT, 1996 ^M |

^{CE} cernes étroits

^{PRL} petits rayons ligneux

^t mesure tangentielle

^P chêne pédonculé

^{Tr} face transversale

^M chêne de merrain

^{CL} cernes larges

^V proportion volumétrique

^C mesure sur la circonférence

^{AR} cernes d'aubier de chêne rouvre

^{*} sur une surface de 80 mm X 40 mm

^{GRL} gros rayons ligneux

^L Proportion linéique

^R chêne rouvre

^S proportion surfacique

^{Tg} surface tangentielle

Valeurs moyennes représentées en gras.

Tableau 45 : Quelques données relatives aux rayons ligneux de chênes rouvres et pédonculés

La variabilité des caractéristiques des gros vaisseaux a été largement étudiée, mais la majorité des études n'a pas fait la différence entre les deux espèces de chêne, rouvre et pédonculé. Le Tableau 46 regroupe quelques données relatives aux caractéristiques des gros vaisseaux.

| Diamètre en μm | | Proportion des gros vaisseaux | Nombre de gros vaisseaux / mm^2 | Référence bibliographique |
|--------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------|
| Radial | tangentiel | | | |
| 270 310 380 | 210 230 280 | | | PANSHIN et DE ZEEUW, 1980 |
| 250 340 450 <i>(jusqu'à 550 μm individuellement)</i> | 150 260 350 | 4,2 15,4 33 | | BAKOUR, 1997 |
| 90 273 433 | | 12 22 35 | | VANSTEENKISTE, 2003 ^R |
| 266 | | | | GORHRE et WAGENKNECHT, 1995 |
| 150 270 350 | | 24 39 44 ^{CE} 4 8 13 ^{CL} | | WAGENFÜHR et SHEIBER, 1974 |
| 310 | | | | MARCHAL, 1987 |
| 337 | | | | CARLQUIST, 1988 |
| 250 | | 23 | | NEPVEU, 1991 |
| 136 207 270 | | 11 18 25 | 3,7 5,3 8 | GUILLEY et NEPVEU, 2003 ^R |
| | | | 18 ^R - 24 ^P | DERET-VARCIN, 1983 ¹ |
| 306 | | | | SAVILL, 1986 |
| | | 21 31 39 | | SCIAMA, 1995 ¹ |
| | | 14,4 ^P - 11,5 ^R | 2,6 ^P - 2,2 ^R | FEUILLAT et al. , 1997 |

NB. les proportions sont relatives à la surface totale du cerne sauf la dernière (12) qui est relative à la surface du bois initial. Valeurs moyennes représentées en gras.

^{CE} cernes étroits ^{CL} cernes larges ¹ nombre de vaisseaux par cerne

^R chêne rouvre ^P chêne pédonculé

Tableau 46 : Quelques données relatives aux caractéristiques des gros vaisseaux du bois initial du chêne rouvre et pédonculé

1.5 Sources de variabilité

1.5.1 Largeur de cerne

L'accroissement de la largeur de cerne chez le chêne se répercute principalement sur la largeur du bois final (bois d'été) riche en fibres. Ces dernières sont responsables de la dureté du bois (POLGE et KELLER, 1973). L'augmentation de la largeur du bois final se traduit par une augmentation de la texture (largeur du bois final / largeur du cerne) (HUBER et *al.*, 1941 ; GASSON, 1987) et du pourcentage de fibres (COURTOIS et *al.*, 1964).

A même largeur de cerne, la largeur du bois initial peut varier du simple au double et, par voie de conséquence, celle du bois final dans la proportion inverse. La même largeur de bois final n'implique pas, pour deux individus, le même plan anatomique : la proportion de fibres peut différer d'un arbre à l'autre (HUBER et KELLER, 1993).

Lorsque les conditions de croissance sont très difficiles, il peut arriver que l'arbre ne forme que du bois initial qui apparaît avant la sortie des feuilles et n'exprime pas son bois final pendant la saison de végétation (FEUILLAT et *al.*, 1998 1^{ère} partie).

Une corrélation positive entre la largeur de cerne et la largeur du bois initial a été observée par EYONO OWOUNDI (1992), ACKERMANN (1995) et FEUILLAT (1996).

La surface individuelle des gros vaisseaux du bois initial diminue avec l'accroissement de la largeur de cerne dans le bois juvénile du bois du chêne rouvre et pédonculé. Elle est indépendante de la largeur de cerne chez le bois adulte (HUBER, 1993). En revanche, l'excentricité des gros vaisseaux (diamètre tangentiel / diamètre radial) diminue avec la largeur de cerne (HUBER et *al.*, 1941 ; COURTOIS et *al.*, 1964 ; GASSON, 1987). En conséquence les chênes à cernes larges auront tendance à avoir des vaisseaux de forme plus ovales que ceux à cernes étroits.

COURTOIS et *al.* (1964) ont observé, chez le chêne rouvre et pédonculé, que les vaisseaux du bois initial dans les cernes étroits possèdent des diamètres radiaux réduits et que ceux dans les cernes larges ont des diamètres radiaux larges. Mais le diamètre des derniers vaisseaux du bois final est pratiquement le même quelle que soit la largeur de cerne. Aucune différence significative n'a été notée entre les deux espèces.

Sur 11 arbres FEUILLAT (1996) n'a pas trouvé de corrélation entre la largeur de cerne et le nombre de gros vaisseaux ouverts (non obstrués par des thylls), caractère essentiel pour son utilisation en tonnellerie. Une très forte corrélation positive, significative au seuil de 1%, a

été observée entre la largeur du bois initial et la largeur de cerne ($d_{ll} = 740$, $R^2 = 0,83$). D'autres corrélations aussi positives et significatives au seuil de 1‰ ont été observées entre cette dernière et la texture, le nombre et la proportion linéique des rayons ligneux.

Les caractéristiques des gros rayons ligneux étudiées sur 82 chênes rouvres (nombre, largeur et proportion) ne semblent pas liées à la largeur de cerne (NEPVEU, 1996).

La diminution, assez significative de la densité du bois adulte avec l'âge, signalée par POLGE et KELLER (1973) est expliquée d'une part par une chute de la largeur de cerne et d'autre part par des modifications quantitatives de l'activité du cambium, se traduisant par une diminution de l'épaisseur de la paroi (FEUILLAT, 1996).

1.5.2 Âge cambial

Plusieurs études ont montré que l'âge influence la structure anatomique des cernes :

- chez le chêne rouvre, lorsque l'âge depuis la moelle augmente, la texture, la proportion des rayons ligneux, la proportion de fibres et la densité des tissus diminuent. En revanche, la proportion de parenchyme augmente (GUILLEY 2000) ;
- la texture des cernes de même largeur diminue avec l'âge compté depuis la moelle (BERGES, 1998) ;
- une diminution de la proportion de fibres dans le bois final du chêne rouvre (*Quercus petraea*) avec le vieillissement du cambium est signalée par SCIAMA (1995). Le même résultat a été obtenu par RAO et al. (1997) pour le chêne pédonculé (*Quercus robur*) ;
- COURTOIS et al. (1964) ont étudié l'effet âge sur une période de 280 ans pour des cernes de 1,6 à 2 mm (moyenne = 1,78) de chêne pédonculé. Ils ont observé une forte diminution de la proportion des fibres, une légère augmentation de proportion des trachéides et des rayons ligneux. Ils ont montré aussi que chez le chêne rouvre :
 - la proportion des fibres diminue avec l'âge pour toutes les largeurs de cernes étudiées (0,41 – 1,75 mm). Cette diminution est plus importante pour les cernes larges qui présentent des proportions de fibres plus élevées que ceux à largeur étroite ;
 - une augmentation de la proportion des gros vaisseaux avec l'âge, mais les cernes les plus larges font exception ; l'âge ne semble pas les influencer ;
 - une légère croissance de la proportion du parenchyme vasculaire pour toutes les largeurs de cernes étudiées lorsque l'âge augmente ;

- la proportion des trachéides diminue avec l'âge dans les cernes étroits (<0,5 mm) et augmente dans les cernes larges (>1,35 mm). Elle est indépendante de l'âge dans les cernes à largeurs moyennes ;
- la proportion des petits vaisseaux dans le bois final augmente avec l'âge depuis la moelle (RAO et *al.*, 1997) ;
- la taille des gros vaisseaux du bois initial du chêne rouvre et pédonculé augmente fortement durant les 20 premières années environ (SAVILL, 1986 ; GASSON, 1987 ; HUBER, 1993) ;
- le nombre des gros vaisseaux du bois initial du chêne rouvre est plus faible à l'âge de 100 ans (48 / 10 mm²) qu'à l'âge de 50 ans (61 / 10 mm²). En revanche, leur taille augmente avec l'âge : 197 µm à l'âge de 50 ans ; 216 µm à l'âge de 100 ans. Les changements anatomiques du nombre et de la taille des gros vaisseaux agissent dans des sens opposés et ne provoquent pas des modifications dans la proportion des gros vaisseaux qui reste inchangée : 18% à l'âge de 100 ans comme à l'âge de 50 ans (GUILLEY et NEPVEU, 2003) ;
- le diamètre radial des gros vaisseaux du bois du chêne rouvre et pédonculé augmente avec l'âge quelle que soit la largeur de cerne. A largeur de cerne identique, l'excentricité (diamètre tangentiel / diamètre radial) est indépendante de l'âge (COURTOIS et *al.*, 1964) ;

1.5.3 Espèce

La variabilité inter-spécifique de l'anatomie du bois des deux chênes indigènes (*Quercus robur* L. et *Quercus petraea* (Matt.) Liebl) a été étudié par FEUILLAT et *al.* (1997) sur quatre peuplements mélangés de chênes rouvre et pédonculé de la forêt de Cîteaux (27 chênes pédonculés et 31 chênes rouvre) qui ont mis en évidence des différences très significatives entre espèces pour le nombre et la proportion surfacique des gros vaisseaux dans le cerne, ainsi que pour la taille et la proportion surfacique des plages de fibres. Par contre, le diamètre et la forme des gros vaisseaux n'étaient pas significativement différents. Le Tableau 47 regroupe les valeurs moyennes des caractéristiques anatomiques mesurées du bois de chênes rouvre et pédonculé de la forêt de Cîteaux (Bourgogne).

| Caractéristiques anatomiques | Chêne rouvre | Chêne pédonculé |
|---------------------------------------------------------------------|--------------|-----------------|
| Largeur du bois initial (mm) | 0,72 | 0,8 |
| Largeur du bois final (mm) | 1,49 | 1,36 |
| Texture (%) | 67 | 61 |
| Nombre de rangées de vaisseaux | 2 | 2,4 |
| Nombre de vaisseaux par mm ² | 2,2 | 2,6 |
| Proportion de vaisseaux dans le cerne (%) | 11,5 | 14,4 |
| Proportion de fibres dans le bois initial (%) | 10,1 | 7,7 |
| Proportion de fibres dans le bois final (%) | 49 | 42 |
| Proportion de fibres dans le cerne (%) | 36 | 29 |
| Proportion de parenchyme et petits vaisseaux dans le bois final (%) | 51 | 58 |
| Proportion de parenchyme et petits vaisseaux dans le cerne (%) | 52 | 57 |

Tableau 47 : Caractéristiques anatomiques du bois de chênes rouvre et pédonculé (d'après FEUILLAT et al., 1997)

Ils ont aussi montré qu'une fonction discriminante basée sur deux variables anatomiques, les proportions surfaciques des gros vaisseaux et des fibres dans le cerne, permet un taux de discrimination de l'espèce de 78%.

1.5.4 Provenance

La littérature est pauvre en références concernant l'effet provenance, car l'étude de cet effet nécessite de travailler sur plusieurs provenances et beaucoup d'échantillons.

NEPVEU et HUBER (1991) n'ont constaté ni effet espèce ni effet provenance sur le nombre des gros rayons ligneux mesurés sur la face transversale du bois du chêne rouvre et pédonculé (*Quercus robur L.* et *Quercus petraea Liebel.*). En revanche, la variabilité inter-arbre est apparue beaucoup plus forte que celle observée au niveau intra-arbre.

POLGE (1973) a observé que le cru de chêne pédonculé de Bourgogne, ayant des cernes larges de 3 mm et plus, situé sur les stations fertiles de premières terrasses de Saône, se caractérise par une zone de bois final très riche en petits vaisseaux et en parenchyme, pauvre en fibres, donc produisant un bois relativement tendre.

Selon PECHMANN et AUFSESS, 1973 ; VENET, 1962, les chênes qui poussent sur des sols riches et frais ont plus de vaisseaux.

VENET et KELLER (1986) ont montré qu'à largeur de cerne identique, les plages de petits vaisseaux dans le bois final du chêne sont plus abondantes chez les chênes de l'Ouest de France que chez le chêne de provenances plus continentales.

1.5.5 Arbre

Le rapport des deux diamètres radial et tangentiel des gros vaisseaux ne diffère pas entre les deux espèces de chênes rouvre et pédonculé. Tandis que l'effet individu à l'intérieur de l'espèce est hautement significatif et explique 23% de la variabilité totale. Il n'y a pas de différence au niveau de la surface des gros vaisseaux entre les deux espèces de chêne (In HUBER, 1993 : d'après SAVILL et MATHER, 1988).

HUBER (1993) a étudié la variabilité de la surface individuelle moyenne des gros vaisseaux de 37 chênes adultes (200 ans environ), sans distinction de l'espèce, sur 17 années du bois juvénile et 20 années du bois adulte. Elle a montré que, dans le bois juvénile, l'effet arbre et l'effet âge cambial sont de même importance, ils expliquent 67% de la variabilité totale de la surface individuelle des gros vaisseaux. Dans le bois adulte, 60% de cette variabilité est due à l'effet arbre, cependant l'effet âge est absent. Elle a noté aussi que la surface individuelle des gros vaisseaux est plus grande dans le bois adulte (57 494 μm^2) que dans le bois juvénile (22 148 μm^2). ceci signifie que les vaisseaux du bois juvénile n'ont pas encore atteint leur dimension adulte à l'âge cambial de 20 ans.

HUBER (1982) a montré que l'absence des éléments chlorophylliens due à l'attaque d'hannetons n'influence ni la proportion des gros vaisseaux du bois initial ni l'accroissement de ce dernier. En revanche, la largeur du bois final est moindre les années de défoliation.

FEUILLAT (1996) a montré un effet arbre significatif au seuil de 1‰ sur les caractéristiques anatomiques étudiées (nombre, largeur et proportion des rayons ligneux, largeur du bois initial, texture). Cet effet reste significatif même à largeur de cerne fixe.

2 Matériel et méthodes

2.1 Mesures des rayons ligneux

Des mesures de largeur et de nombre des gros rayons ligneux ont été réalisées sur la totalité de l'échantillonnage (165 chênes rouvres et 123 chênes pédonculés). Chaque arbre est représenté par deux échantillons diamétralement opposés.

Les mesures ont été effectuées sur la surface transversale des échantillons soigneusement poncés (SAß et ECKSTEIN, 1994). Sur la limite du cerne la plus au centre de l'échantillon, une tangente de 4 cm de longueur, perpendiculaire aux rayons ligneux, est tracée (Figure 68). Le long de cette dernière le nombre et la largeur des rayons ligneux ont été mesurés.

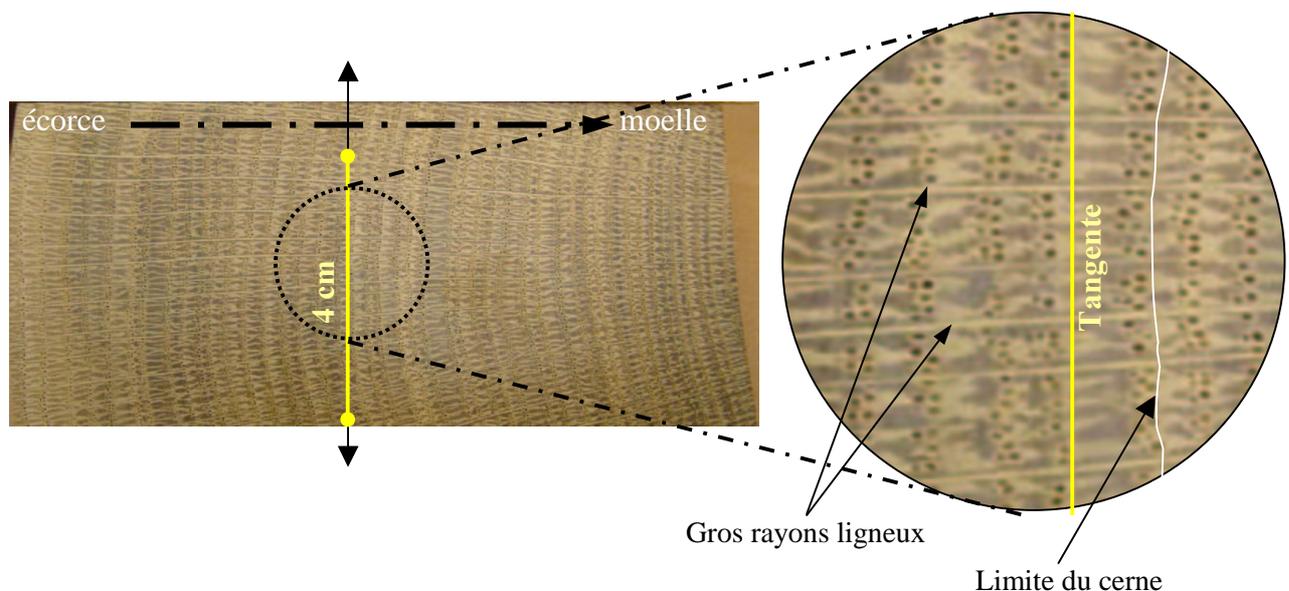


Figure 68 : Les mesures des rayons ligneux

Les mesures ont été faites à l'aide de la "machine EKLUND" (Figure 69). Elle comprend : une loupe binoculaire qui se déplace sur un rail à l'aide d'une manivelle. Cette loupe munie d'un viseur permet de pointer les bords de chaque rayon ligneux. Le déplacement est égal alors à la largeur du rayon ligneux. Les valeurs sont enregistrées directement sous forme d'un fichier informatique.

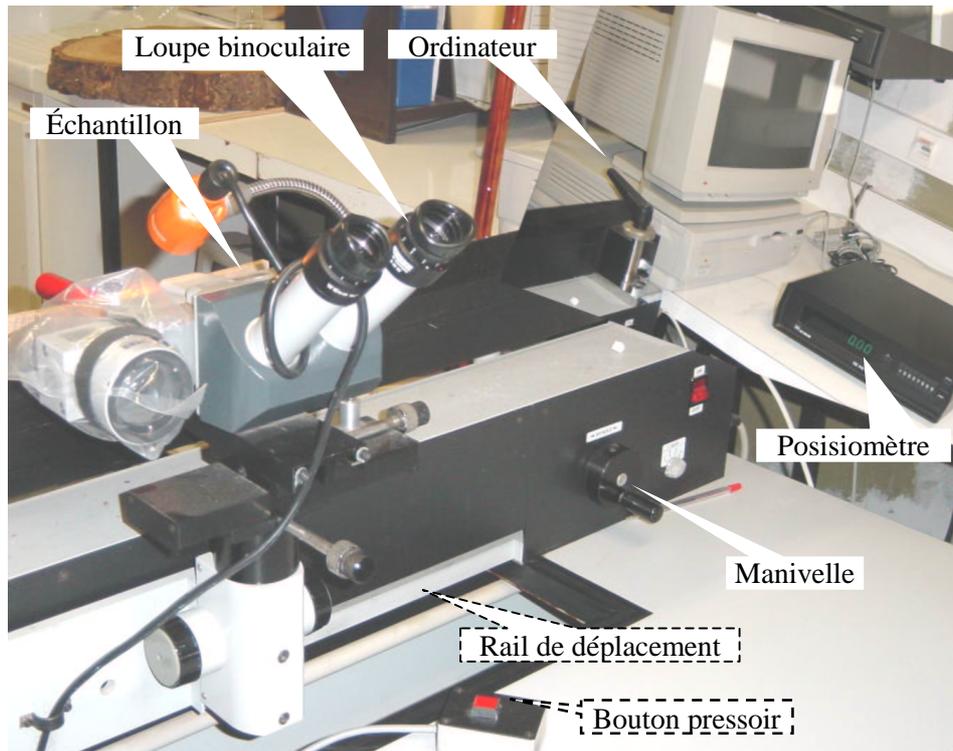


Figure 69 : “Machine EKLUND” utilisée pour les mesures des rayons ligneux

La proportion surfacique des rayons ligneux est estimée par le rapport entre la surface des rayons ligneux et la surface explorée de l'échantillon.

2.2 Mesure des autres caractéristiques anatomiques par analyse d'image

Les mesures ont été réalisées à l'aide du logiciel d'analyse d'image (Visilog V 5.0) (LAHBABI, 1995 ; MARION, 2001 ; VANSTENKISTE, 2003) à partir des clichés radiographiques scannés à 1200 points / pouce.

Les mesures ne sont effectuées que sur les images de bonne qualité (Figure 70). Celles qui sont floues ou mal contrastées ont été éliminées. Pour les images partiellement floues, seules les zones de bonne qualité ont été exploitées.

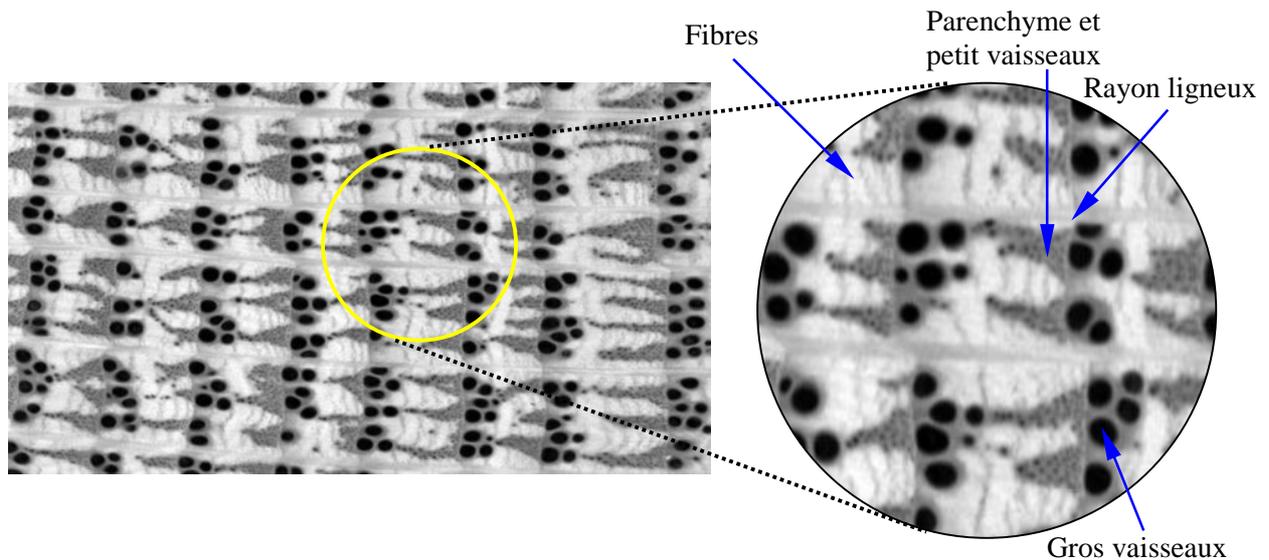


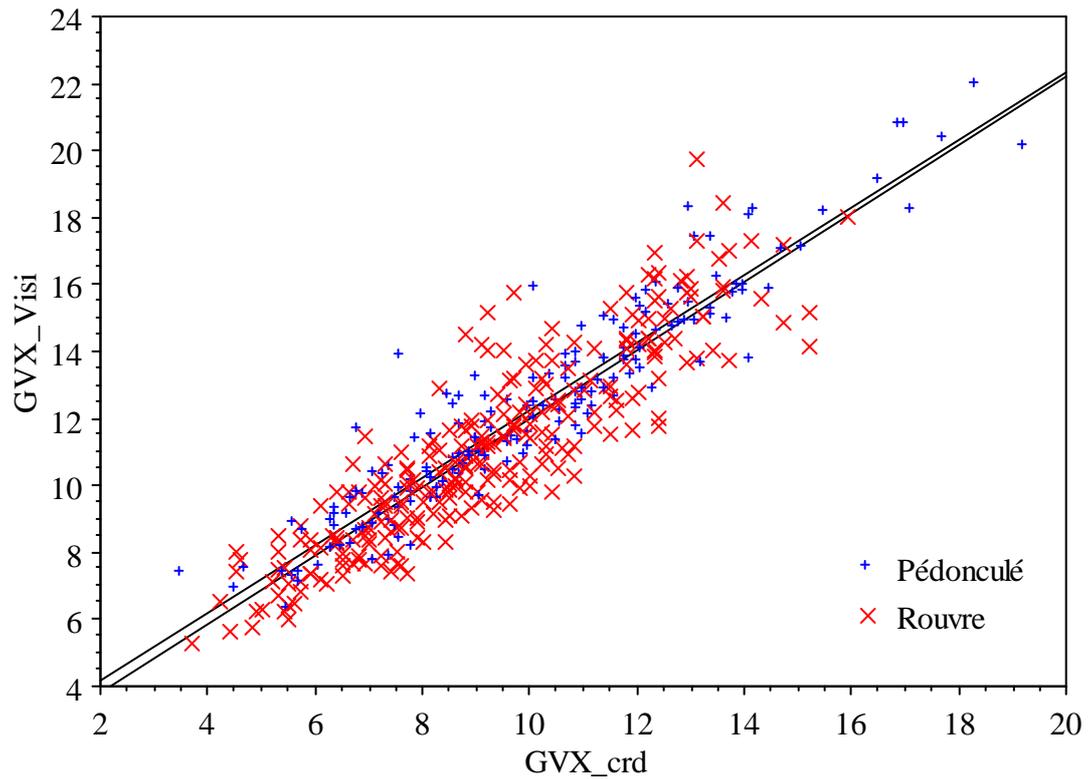
Figure 70 : Image traitée par Visilog

Compte tenu de ces exigences, nous n'avons traité que 442 échantillons (169 issus de chêne pédonculés et 273 de chênes rouvres), sur les 576 ce qui représente 80% de la totalité de l'échantillonnage.

Les mesures faites sur la totalité de la surface transversale exploitable de chaque échantillon nous permettent de quantifier les différents paramètres anatomiques.

- les paramètres mesurés :
 - la proportion de l'ensemble de fibres et gros rayons ligneux ;
 - la proportion, le nombre, le diamètre et la surface individuelle des gros vaisseaux du bois initial.
- les paramètres calculés :
 - la proportion de fibres = la proportion de l'ensemble des fibres et des rayons ligneux - la proportion des rayons ligneux estimée ;
 - la proportion de l'ensemble de parenchyme et de petits vaisseaux = $100 - (\text{la somme des proportions de fibres, de vaisseaux et de rayons ligneux})$;
 - l'excentricité des gros vaisseaux par le rapport entre le diamètre radial et le diamètre tangentiel (plus la valeur numérique de ce rapport est élevée plus l'excentricité est grande).

La proportion des gros vaisseaux a été mesurée par deux logiciels : Visilog (programme pour analyse d'image) et Cerd (programme pour mesurer la microdensité). Les mesures obtenues par ces deux logiciels sont très bien corrélées (Figure 71).



$$GVX_Visi = 1.7 + 1 * GVX_crd; R^2 = 0.80 (R) ***$$

$$GVX_Visi = 2.2 + 1 * GVX_crd; R^2 = 0.89 (P) ***$$

Figure 71 : Relation entre la proportion des gros vaisseaux mesurée par analyse d'image(visilog) et celle mesurée par Cerd

3 Résultats et discussions

3.1 Texture

La texture est un caractère structural du bois qui correspond à l'importance relative du bois final dans les cernes annuels (largeur du bois final / largeur de cerne); la texture est dite forte lorsque la zone du bois final est relativement importante par rapport à la largeur totale du cerne; dans le cas contraire, elle est dite faible.

Les mesures de la texture du bois présentées dans le Tableau 48 montrent :

- sur l'ensemble de l'échantillonnage, une moyenne de 53,7% avec un coefficient de variation de 15% et des valeurs extrêmes de 28% à 74,3% ;
- toutes régions confondues, que les chênes rouvres présentent une valeur moyenne légèrement plus forte que les chênes pédonculés : 54,5% contre 52,5%, soit une différence de 2%. Ces résultats vont dans le même sens que les résultats obtenus par FEUILLAT et *al* (1997) sur des cernes de 2 mm de largeur (texture moyenne : 67% pour les rouvres, 61% pour les pédonculés). En revanche, le coefficient de variation à l'intérieur de l'espèce est plus faible chez le chêne rouvre que chez le chêne pédonculé ;

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Texture (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 53,7 | 28,0 | 74,3 | 8,2 | 15 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 52,5 | 28,0 | 72,0 | 8,7 | 17 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 54,5 | 32,0 | 74,3 | 7,8 | 14 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 47,8 | 32,0 | 66,0 | 8,2 | 17 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 57,6 | 48,0 | 67,0 | 4,2 | 07 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 52,9 | 29,0 | 70,0 | 8,0 | 15 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 61,6 | 48,5 | 74,3 | 5,4 | 09 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 46,5 | 33,0 | 59,0 | 6,7 | 14 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 52,1 | 40,0 | 64,0 | 7,0 | 13 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 50,5 | 38,0 | 66,0 | 6,4 | 13 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 56,5 | 39,0 | 72,0 | 7,6 | 13 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 58,0 | 43,0 | 71,0 | 7,1 | 12 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 58,1 | 45,0 | 74,0 | 6,5 | 11 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 48,9 | 28,0 | 68,0 | 8,3 | 17 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 54,2 | 39,0 | 69,0 | 6,3 | 12 |

Tableau 48 : Statistiques descriptives de la texture du bois du chêne rouvre et pédonculé de 288 arbres

- ce résultat est confirmé pour les régions bispécifiques, où à âges et à largeurs de cerne proches, les chênes rouvres présentent une texture toujours plus forte que les chênes pédonculés :
 - + 8,7% à Cîteaux ;
 - + 5,6% à Darney ;
 - + 5,3% à Tronçais.
- les résultats au niveau des 12 provenances montrent qu'à âge et largeur de cerne comparables, les provenances de chêne pédonculé ont une texture moyenne plus faible que les provenances de chêne rouvre.

Les régions extrêmes du chêne rouvre pour la texture sont celles de Bitche (47,8%) et Cîteaux (61,6%), soit un écart de 13,8%. Il faut noter que Bitche représente la largeur moyenne de cerne la plus étroite des rouvres (1,18 mm) tandis que Cîteaux représente en moyenne le cerne le plus large parmi les rouvres (1,91 mm). Chez les chênes pédonculés, les régions extrêmes sont celle de Darney (46,5%), qui regroupe les chênes les plus âgés des pédonculés et celle de Monlezun-Laurède (58%), qui renferme les chênes les plus jeunes des pédonculés, soit un écart de 12,5%.

Les écarts entre les coefficients de variation intra-provenance sont plus importants chez les chênes rouvres (7 – 17%) que chez les chênes pédonculés (12 – 17%). Ceci signifie qu'à âges et largeurs de cerne proches, la variabilité intra-provenance est plus grande chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre (Figure 72)

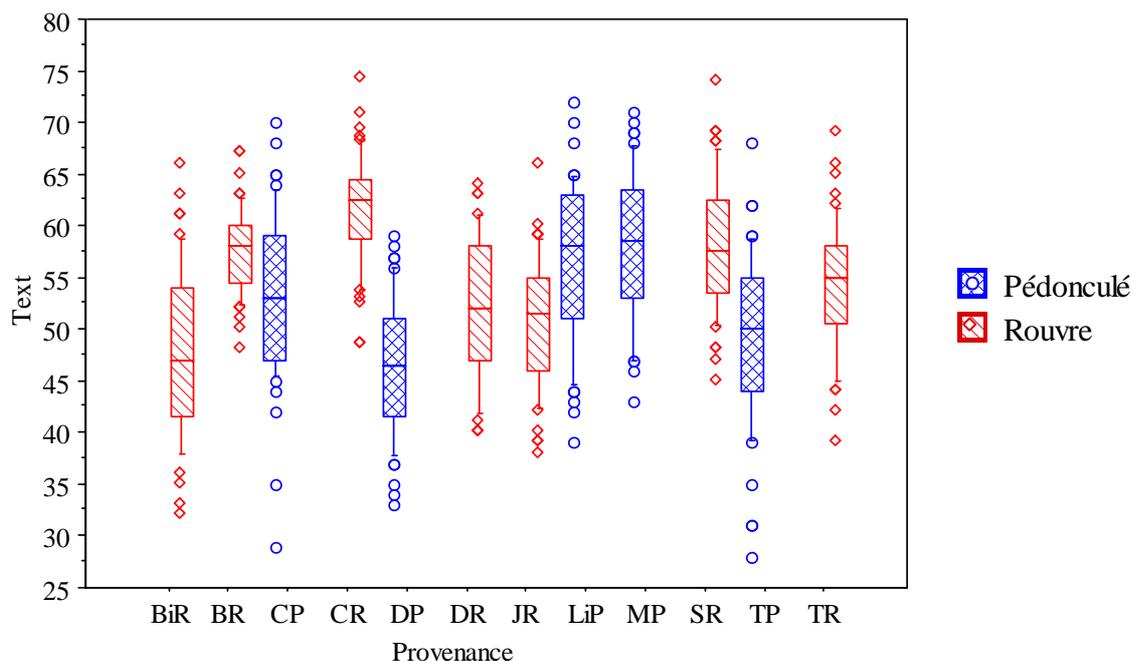


Figure 72 : Variation inter- et intra-provenance de la texture du bois du chêne

L'analyse de variance effectuée sur les régions bispécifiques montre la présence d'un effet espèce important qui explique au moins 15% de la variabilité de la texture et d'un effet région aussi important qui explique au moins 16% de la variabilité de cette dernière.

Toutes les autres analyses faites sur la texture ont montré que l'effet région est toujours significatif au seuil de 1% et explique au moins 26% de la variabilité de la texture.

Nous constatons également que l'effet arbre est dominant dans toutes les analyses et explique toujours la plus grande part de la variabilité de la texture (54% - 61%) (Tableau 49).

Ces résultats confirment ceux obtenus par FEUILLAT et *al.* (1997) qui ont montré un effet espèce, arbre et largeur de cerne significatif au seuil de 1% sur la texture du bois des chênes de Cîteaux.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 198,4*** | 15% | 0,89 |
| | | Région | 2 | 105,32*** | 16% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 5,43** | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 5,57*** | 57% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 61,97*** | 31% | 0,88 |
| | | Arbre | 276 | 4,57*** | 57% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 69,37*** | 33% | 0,87 |
| | | Arbre | 158 | 4,28*** | 54% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 60,02*** | 26% | 0,87 |
| | | Arbre | 118 | 4,88*** | 61% | |

Tableau 49 : Analyse de variance sur la texture du bois de chêne rouvre et pédonculé

Le test de la comparaison de moyennes sur la texture montre cinq groupes différents :

- le premier renferme les chênes rouvres de Cîteaux, arbres jeunes, et représente la largeur moyenne de cerne la plus élevée des chênes rouvres ;
- le deuxième ce sont les provenances de chênes rouvre et pédonculé les plus jeunes avec des cernes moyennement larges ;
- le troisième regroupe une provenance de chêne rouvre (Tronçais) et une provenance de chêne pédonculé (Cîteaux) où les rouvres sont plus âgés, et ont une largeur de cerne plus faible que les pédonculés ;

- le quatrième rassemble deux provenances de chêne rouvre avec des âges et des largeurs des cerne différents ;
- le cinquième regroupe deux provenances : Tronçais, chêne pédonculé, et Bitche, chêne rouvre, qui rassemble les arbres les plus âgés des chênes rouvres (195 ans) avec une largeur de cerne moyenne la plus faible de l'échantillonnage (1,18 mm).

Nous constatons d'après cette analyse qu'à largeur de cerne et âge proches, les chênes rouvres possèdent une texture plus forte que les chênes pédonculés.

| Groupement (Duncan) | Âge | Largeur de cerne | Texture | Échantillons | Provenances | Espèce | |
|---------------------|-----|------------------|-------------|--------------|-------------|------------|----------|
| | A | 141 | 1,91 | 61,6 | 46 | CR | R |
| | B | 128 | 1,73 | 58,1 | 48 | SR | R |
| | B | 121 | 2,1 | 58,0 | 48 | MP | P |
| | B | 136 | 1,74 | 57,6 | 48 | BR | R |
| | B | 130 | 2,29 | 56,5 | 48 | LiP | P |
| | C | 174 | 1,48 | 54,2 | 48 | TR | R |
| D | C | 152 | 1,93 | 52,9 | 50 | CP | P |
| D | E | 169 | 1,51 | 52,1 | 44 | DR | R |
| F | E | 184 | 1,18 | 50,5 | 48 | JR | R |
| F | G | 167 | 1,37 | 48,9 | 48 | TP | P |
| H | G | 195 | 1,18 | 47,8 | 48 | BiR | R |
| H | | 180 | 1,47 | 46,5 | 52 | DP | P |

Tableau 50 : Test de comparaison de moyennes sur l'ensemble des origines pour la texture

3.1.1 Relations avec l'âge et la largeur de cerne

La relation entre la texture et la largeur de cerne est significative au seuil de 1% chez les deux espèces rouvre et pédonculé.

La largeur de cerne explique 61% de la variabilité de la texture pour les chênes rouvres et 59% pour les chênes pédonculés ce qui est assez important. L'augmentation de la texture avec la largeur de cerne est à peu près similaire chez les deux espèces, mais les valeurs restent plus élevées chez les chênes rouvres que chez les chênes pédonculés (Figure 73).

À même largeur de cerne, les chênes rouvres ont globalement une texture plus forte que les chênes pédonculés.

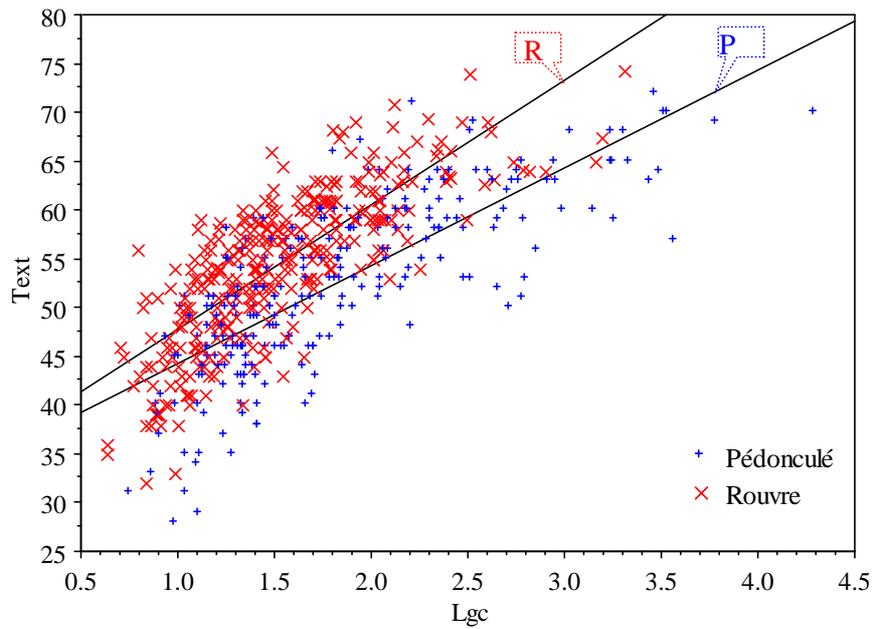


Figure 73 : Évolution de la texture en fonction de la largeur de cerne chez les deux espèces rouvre et pédonculé

La Figure 74 montre que la texture diminue avec l'âge et que la corrélation est significative au seuil de 1%, cette diminution est similaire pour les deux espèces avec des valeurs de texture qui, à âge "fixé", restent plus élevées chez les rouvres que chez les pédonculés. Ce résultat confirme les résultats obtenus par GUILLEY, 2000 et BERGES, 1998.

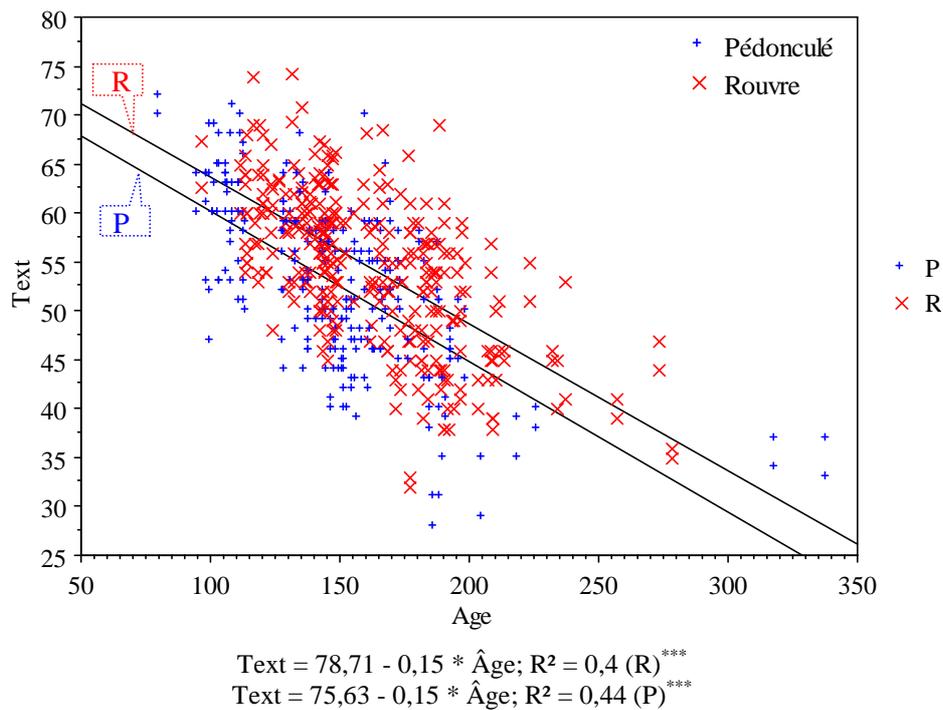


Figure 74 : Relation entre l'âge et la texture du bois du chêne rouvre et pédonculé

3.2 Proportion du bois initial dans le cerne

Une augmentation de la largeur du bois initial avec l'accroissement annuel a été observée chez les deux espèces de chêne rouvre et pédonculé (Figure 75) avec un seuil de signification de 1%. Cette relation a été signalée récemment par FEUILLAT (1996), EYONO OWOUNDI (1992) et ACKERMANN (1995). Classiquement, il était admis par exemple selon ZOBEL et BUIJTENEN (1989) que la largeur du bois initial est quasiment constante quelque soit la largeur de cerne.

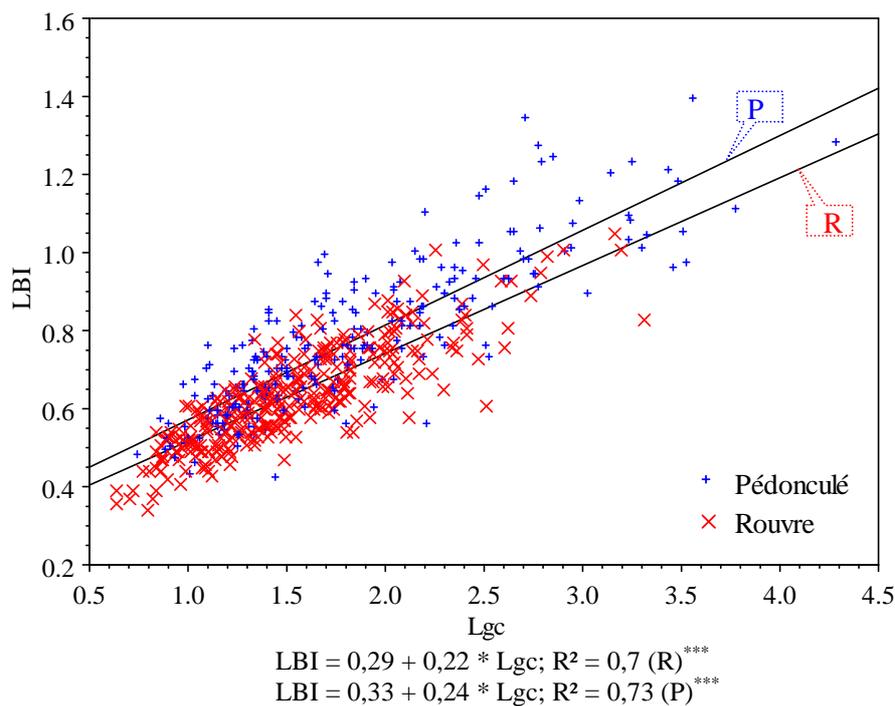


Figure 75 : Évolution de la largeur du bois initial en mm du chêne rouvre et pédonculé en fonction de la largeur de cerne en mm

Pour pouvoir comparer les deux espèces et les provenances quelle que soit la largeur de cerne, nous avons réalisé nos analyses dans la suite de notre étude en nous référant à la proportion du bois initial dans le cerne : rapport entre la largeur du bois initial et la largeur du cerne.

D'après le Tableau 51 la largeur du bois initial représente en moyenne 43,8% de la largeur du cerne pour l'ensemble de l'échantillonnage avec des valeurs extrêmes entre échantillons de 24% à 68%. Pour les provenances monospécifiques, le rapport entre la largeur du bois initial et la largeur du cerne est, en moyenne, plus élevé chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre : 44,5% contre 43,3%, soit une différence de 1,2%. Ce résultat est confirmé pour les

régions bispécifiques, où, à âge et largeurs de cerne proches, les chênes pédonculés possèdent une proportion de bois initial toujours plus élevée que les chênes rouvres.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Largeur du bois initial / largeur du cerne (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|------------------------------------------------|-----------|-----------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 43,8 | 24 | 68 | 7,9 | 18 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 44,5 | 25 | 68 | 8,3 | 19 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 43,3 | 24 | 65 | 7,5 | 17 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 49,3 | 32 | 65 | 8,1 | 17 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 40,4 | 31 | 48 | 3,9 | 10 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 43,1 | 30 | 68 | 7,2 | 17 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 36,4 | 25 | 49 | 5,0 | 14 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 50,7 | 39 | 66 | 7,0 | 14 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 45,3 | 34 | 59 | 6,6 | 15 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 47,6 | 32 | 61 | 6,3 | 13 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 41,5 | 28 | 58 | 6,9 | 17 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 39,2 | 25 | 54 | 7,2 | 18 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 40,1 | 24 | 53 | 6,4 | 16 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 47,7 | 30 | 67 | 7,8 | 16 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 43,9 | 30 | 59 | 6,4 | 14 |

Tableau 51 : Statistiques générales sur largeur du bois initial du chêne rouvre et pédonculé

Les résultats au niveau des 12 provenances montrent que les coefficients de variation intra-espèce sont compris entre 10 et 18%. Les provenances extrêmes pour la proportion du bois initial sont rencontrées :

- chez les chênes rouvres à Bitche (49,3%), où la largeur de cerne moyenne est la plus étroite des rouvres (1,18 mm), et à Cîteaux (36,4%), où la largeur de cerne moyenne est la plus élevée des rouvres (1,91 mm), soit un écart de proportion de 12,9% de bois initial dans le cerne ;
- chez les chênes pédonculés à Monlezun-Laurède (39,2%), où les arbres sont les plus jeunes des pédonculés (121 ans en moyenne), et à Darney (50,7%), où les arbres sont les plus âgés des pédonculés (180 ans en moyenne), soit une différence de proportion du bois initial dans le cerne de 11,5%. Ceci signifie que la variabilité inter-provenance est assez considérable chez ces deux espèces (Figure 76).

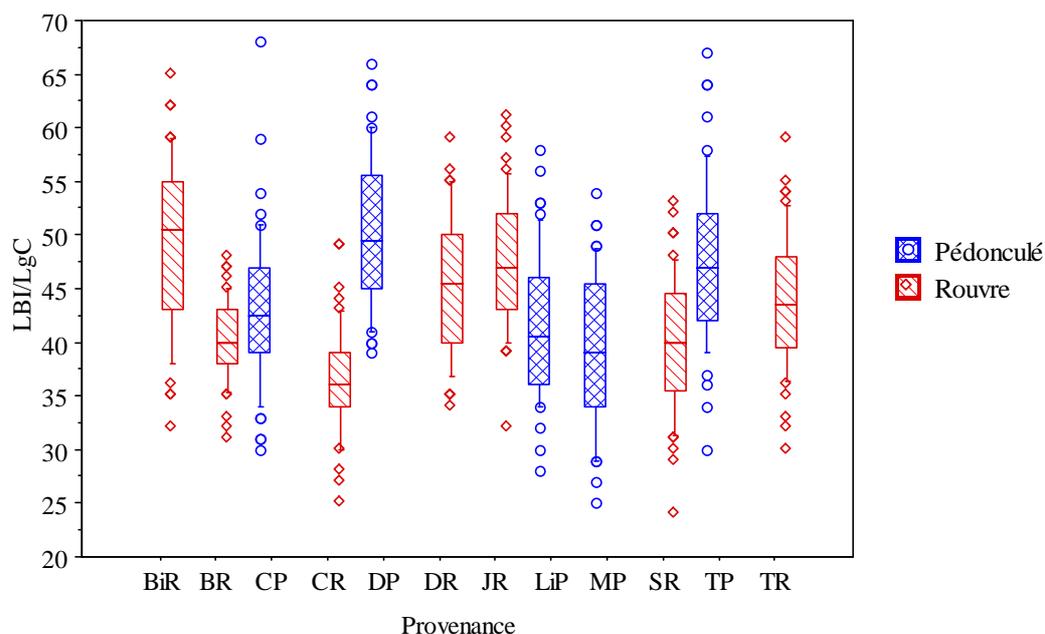


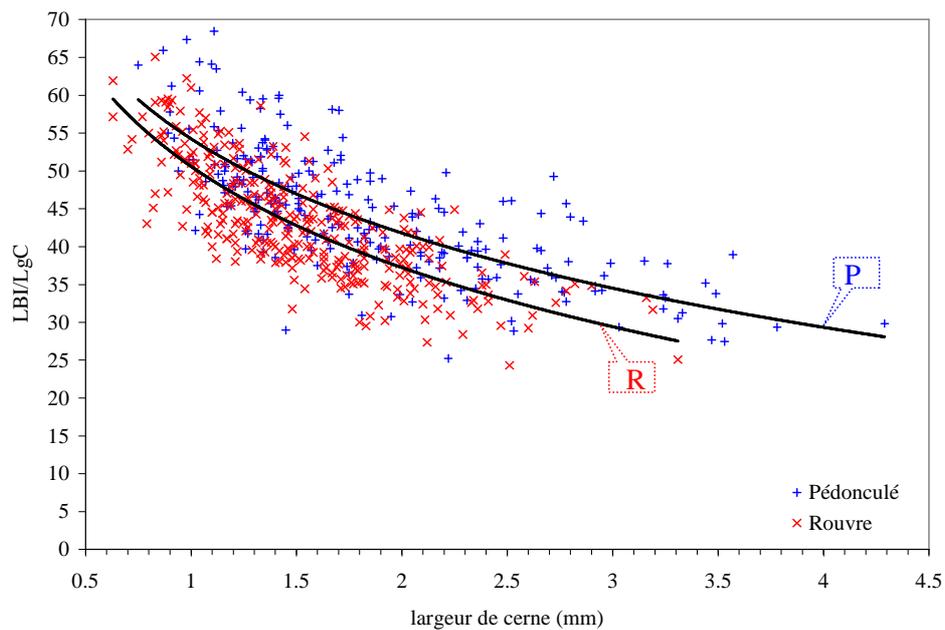
Figure 76 : Variation inter- et intra-provenance du rapport : largeur du bois initial / largeur du cerne

La variation de la proportion du bois initial dans le cerne est dépendante de l'espèce, de la région et de l'arbre. L'analyse de variance sur les régions bispécifiques montre un effet espèce, région et arbre significatif au seuil de 1% et explique respectivement 11%, 19% et 58% de la variabilité de la proportion du bois initial. Nous constatons que l'effet provenance est toujours significatif au seuil de 1% et explique entre 19% à 32% de la variabilité de la proportion du bois initial, ce qui laisse penser que la proportion du bois initial est très liée à la sylviculture et aux conditions externes. Mais la plus grande partie de cette variabilité est imputable à l'effet arbre.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 143,87 *** | 11% | 0,89 |
| | | Région | 2 | 123,61 *** | 19% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 3,72 * | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 5,49 *** | 58% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 59,98 *** | 30% | 0,87 |
| | | Arbre | 276 | 4,61 *** | 57% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 63,87 *** | 32% | 0,86 |
| | | Arbre | 158 | 4,08 *** | 54% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 66,08 *** | 26% | 0,88 |
| | | Arbre | 118 | 5,28 *** | 62% | |

Tableau 52 : Analyse de variance sur la proportion du bois initial dans le cerne

Une corrélation négative mais significative au seuil de 1‰ a été observée entre la largeur du cerne et la proportion du bois initial dans le cerne. Ceci signifie que l'augmentation de la largeur du bois initial est proportionnelle à l'accroissement annuel (Figure 75) mais, étant donnée la faible valeur du coefficient de proportionnalité, l'accroissement de la largeur de cerne conduit à une faible augmentation de la largeur du bois initial. Nous constatons aussi que la proportion du bois initial a tendance à être assez stable dans les cernes larges (plus de 2 mm). Les deux espèces réagissent à peu près de la même façon (Figure 77).



$$\text{LBI/LgC} = 50,61 - 19,29\text{Ln}(x); R^2 = 0,62 \text{ (R)}^{***}$$

$$\text{LBI/LgC} = 54,25 - 17,97\text{Ln}(x); R^2 = 0,56 \text{ (P)}^{***}$$

Figure 77 : Relation entre la largeur de cerne et la proportion du bois initial dans le cerne

La proportion du bois initial dans le cerne augmente avec l'âge, la corrélation est significative au seuil de 1‰ chez les deux espèces (Figure 78). Nous savons que la largeur de cerne et la largeur du bois initial diminuent avec l'âge, alors l'augmentation de la proportion du bois initial est expliquée par une diminution proportionnelle de la largeur de cerne plus importante que celle de la largeur du bois initial. C'est à dire les cernes âgés sont plus étroits et ont une proportion du bois initial plus élevée que les cernes jeunes qui sont normalement plus larges.

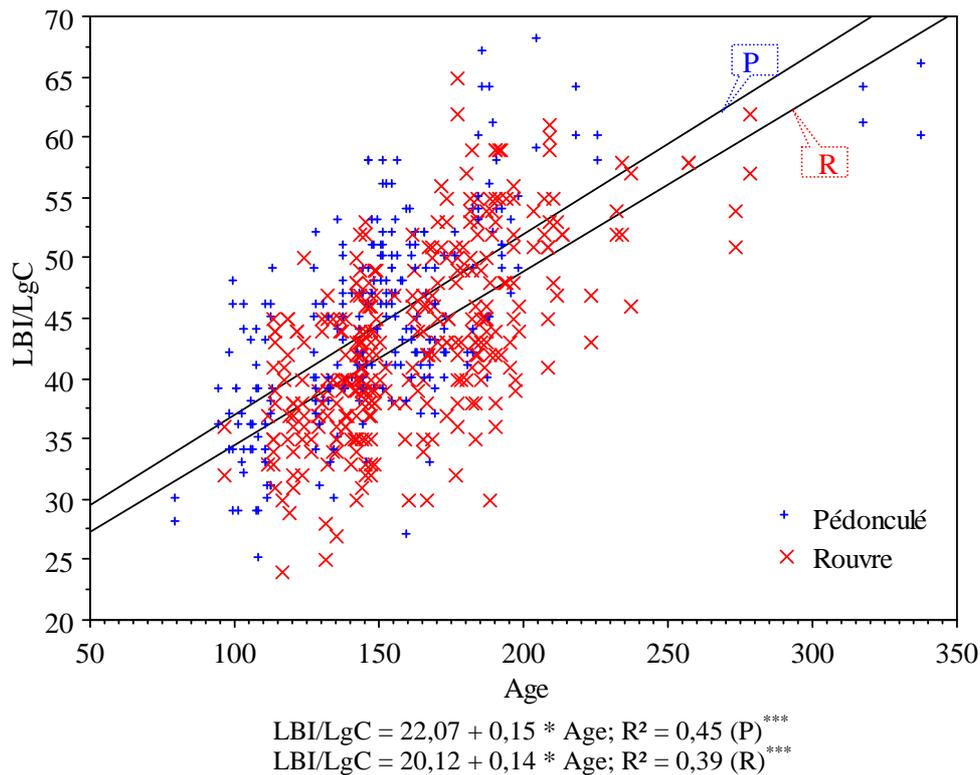
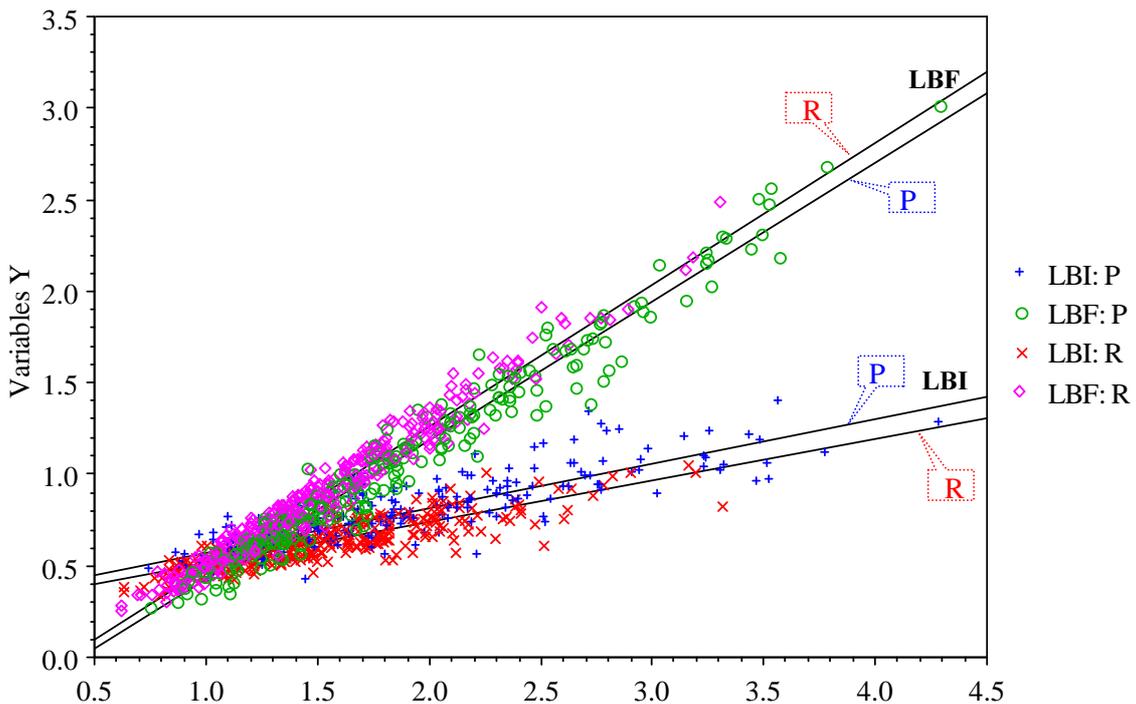


Figure 78 : Évolution de la proportion du bois initial en fonction dans le cerne en fonction de l'âge

3.3 Variation de la largeur du bois initial et du bois final en fonction de la largeur de cerne

La relation entre la largeur de cerne et la largeur du bois final chez le chêne a été confirmée depuis longtemps (POLGE et KELLER, 1973). L'augmentation de la largeur de cerne se répercute principalement sur la largeur du bois final et partiellement sur la largeur du bois initial (Figure 79). Dans notre étude les deux parties de la largeur de cerne répondent positivement à l'augmentation de cette dernière mais proportionnellement l'augmentation de la largeur du bois final est plus forte que celle du bois initial : 3,5 fois chez les chênes rouvres contre 3,2 fois chez les chênes pédonculés. L'évolution de la largeur du bois final et celle du bois initial en fonction de la largeur de cerne sont approximativement similaires chez les deux espèces de chêne avec des valeurs de largeur du bois final qui restent légèrement plus élevées chez les rouvres que chez les pédonculés et à l'inverse pour le bois initial.



$$\begin{aligned} \text{LBI} &= 0,29 + 0,22 * \text{Lgc}; R^2 = 0,7 \text{ (R)}^{***} \\ \text{LBI} &= 0,33 + 0,24 * \text{Lgc}; R^2 = 0,73 \text{ (P)}^{***} \\ \text{LBF} &= -0,29 + 0,77 * \text{Lgc}; R^2 = 0,96 \text{ (R)}^{***} \\ \text{LBF} &= -0,33 + 0,76 * \text{Lgc}; R^2 = 0,96 \text{ (P)}^{***} \end{aligned}$$

Figure 79 : Évolution de la largeur du bois initial et final en fonction de la largeur de cerne chez le chêne rouvre et pédonculé

3.4 Caractéristiques des rayons ligneux plurisériés

3.4.1 Largeur des rayons ligneux

La moyenne de la largeur des rayons ligneux sur l'ensemble des échantillons est de 0,19 mm avec un coefficient de variation de 24% et des valeurs extrêmes comprises entre 0,1 et 0,41 mm (Tableau 53).

Sur les provenance monospécifiques, les chênes rouvres présentent en moyenne des rayons ligneux plus larges (0,2 mm) que les chênes pédonculés (0,18 mm), soit une différence de 0,02 mm (10%).

Ce résultat est confirmé pour les régions bispécifiques, où à âge et largeur de cerne comparables, les rayons ligneux sont plus larges chez les chênes rouvres que chez les chênes pédonculés.

Les résultats obtenus sur les 12 provenances montrent qu'à l'exception de celle du Limousin, les provenances de chênes pédonculés ont une largeur de rayon ligneux en moyenne plus faible (0,18 mm) que les provenances de chênes rouvres (0,2 mm). Ce résultat est comparable au résultat obtenu par FEUILLAT, 1991 (0,12 pour le chêne pédonculé, 0,16 pour le chêne rouvre)

Les arbres de Tronçais représentent à la fois la valeur moyenne maximale (0,21 mm) dans le cas des chênes rouvres et la valeur moyenne minimale (0,17 mm) dans celui des chênes pédonculés pour la largeur des rayons ligneux.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Largeur moyenne de rayons ligneux (mm) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|----------------------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 0,19 | 0,1 | 0,41 | 0,05 | 24 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 0,18 | 0,1 | 0,37 | 0,04 | 22 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 0,2 | 0,1 | 0,41 | 0,05 | 24 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 0,19 | 0,1 | 0,37 | 0,05 | 26 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 0,2 | 0,13 | 0,32 | 0,04 | 20 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 0,19 | 0,13 | 0,28 | 0,03 | 17 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 0,2 | 0,11 | 0,31 | 0,05 | 23 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 0,18 | 0,1 | 0,26 | 0,04 | 23 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 0,19 | 0,13 | 0,32 | 0,04 | 21 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 0,2 | 0,12 | 0,41 | 0,06 | 29 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 0,2 | 0,14 | 0,37 | 0,05 | 24 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 0,17 | 0,1 | 0,28 | 0,04 | 23 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 0,2 | 0,12 | 0,33 | 0,04 | 22 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 0,17 | 0,11 | 0,23 | 0,03 | 19 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 0,21 | 0,11 | 0,34 | 0,05 | 23 |

Tableau 53 : : Statistiques descriptives de la largeur de rayons ligneux chez les chênes rouvre et pédonculé

L'analyse de variance effectuée sur les régions bispécifiques montre que l'effet espèce est significatif au seuil de 1%, elle explique au moins 10% de la variabilité de la largeur des rayons ligneux. L'effet interaction entre l'espèce et la région est significatif au seuil de 1% mais n'explique que 3% de la variabilité de la largeur des rayons ligneux, l'effet région en revanche n'apparaît pas.

Les autres analyses sur l'ensemble et sur les lots de chênes pédonculés montrent des effets région significatifs aussi au seuil de 1%, qui expliquent, dans les deux cas, 10% de la variabilité de la largeur des rayons ligneux (Tableau 54). En revanche, la largeur des rayons ligneux chez le chêne rouvre est indépendante de la provenance (effet provenance non significatif).

La grande partie de la variabilité de la largeur des rayons ligneux est due à l'effet arbre qui explique entre 64 et 73% de cette variabilité.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 55,31 *** | 10% | 0,77 |
| | | Région | 2 | 1,96 NS | | |
| | | Espèce*Région | 2 | 9,07 *** | 3% | |
| | | Arbre | 138 | 2,9 *** | 64% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 11,49 *** | 10% | 0,78 |
| | | Arbre | 276 | 3,24 *** | 68% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 1,84 NS | 2% | 0,75 |
| | | Arbre | 158 | 3,07 *** | 73% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 14,63 *** | 10% | 0,80 |
| | | Arbre | 118 | 3,64 *** | 70% | |

Tableau 54 : Analyse de variance sur la largeur moyenne de rayons ligneux

Chez les chênes rouvres, la largeur des rayons ligneux ne dépend ni de la largeur de cerne ni de l'âge cambial de l'arbre (Figure 80). En revanche, chez les chênes pédonculés, elle est liée à la largeur de cerne avec une corrélation faible mais significative au seuil de 1%. Elle est indépendante de l'âge.

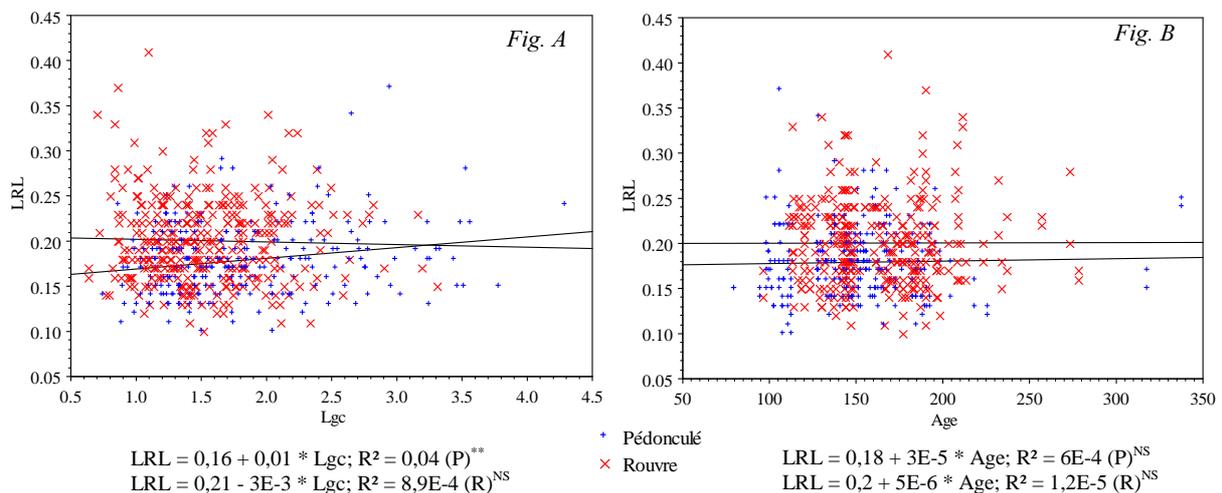


Figure 80 : Évolution de la largeur de rayons ligneux en fonction de la largeur de cerne (Fig. A) et de l'âge (Fig. B)

3.4.2 Nombre de rayons ligneux

En moyenne le nombre de rayons ligneux par centimètre dans la direction tangentielle est plus élevé chez les chênes pédonculés (4,2) que chez les chênes rouvre (3,6) (Tableau 55) contrairement à ce qui a été observé pour leur largeur.

Au niveau de 12 provenances monospécifiques, les provenances de chênes pédonculés ont un nombre moyen de rayons ligneux plus élevé que les provenances de chênes rouvres.

Ce résultat est confirmé dans les régions bispécifiques, où à largeurs de cerne et à âges voisins, les rayons ligneux sont toujours plus nombreux chez les chênes pédonculés que chez les chênes rouvres.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Nombre de rayons ligneux par cm | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 3,8 | 1,3 | 7,3 | 1,0 | 26 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 4,2 | 2,0 | 7,3 | 1,0 | 24 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 3,6 | 1,3 | 6,0 | 0,9 | 25 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 3,8 | 2,0 | 5,8 | 1,0 | 26 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 3,6 | 2,0 | 5,8 | 0,8 | 23 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 3,9 | 2,0 | 6,0 | 0,9 | 22 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 3,7 | 2,3 | 5,3 | 0,8 | 23 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 4,1 | 2,8 | 6,0 | 0,8 | 20 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 3,4 | 1,3 | 5,0 | 0,9 | 27 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 3,5 | 2,0 | 6,0 | 0,9 | 26 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 4,3 | 2,8 | 7,3 | 1,1 | 25 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 4,5 | 2,5 | 6,5 | 1,1 | 24 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 3,6 | 2,0 | 6,0 | 0,9 | 24 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 4,1 | 2,0 | 6,8 | 1,1 | 28 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 3,5 | 1,5 | 5,8 | 0,8 | 23 |

Tableau 55 : Statistiques descriptives du nombre de rayons ligneux par cm chez les chênes rouvre et pédonculé

L'analyse de variance sur les régions bispécifiques ne montre pas de différences significatives entre les régions sur le nombre de rayons ligneux (Tableau 56). En revanche, le facteur espèce est significatif au seuil de 1% et explique plus de 8% de la variabilité du nombre de rayons ligneux. Ce résultat est contradictoire au résultat obtenu par NEPVEU et HUBER (1991) qui n'ont pas trouvé de différence significative entre les deux espèces pour le nombre de rayons ligneux.

L'effet provenance, dans les analyses sur l'ensemble de l'échantillonnage et sur les lots de chênes pédonculés, est toujours significatif au seuil de 1%, mais n'explique que 4 et 12% de

la variabilité du nombre de rayons ligneux. Il n'est significatif qu'au seuil de 1% pour les lots de chênes rouvres et n'explique que 2% de la variabilité.

Les résultats de toutes les analyses de variance montrent un effet arbre hautement significatif et explique au moins 72% de la variabilité du nombre de rayons ligneux quelle que soit l'espèce et/ou la provenance.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 57,37 *** | 8% | 0,81 |
| | | Région | 2 | 0,47 NS | | |
| | | Espèce*Région | 2 | 5,17 ** | 1% | |
| | | Arbre | 138 | 4 *** | 72% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 18,71 *** | 12% | 0,84 |
| | | Arbre | 276 | 4,6 *** | 72% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 2,98 ** | 2% | 0,81 |
| | | Arbre | 158 | 4,27 *** | 79% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 7,93 *** | 4% | 0,83 |
| | | Arbre | 118 | 5 *** | 79% | |

Tableau 56 : Analyse de variance sur le nombre de rayons ligneux

Le test de la comparaison de moyennes sur le nombre de rayons ligneux montre une discrimination inter-espèce assez nette. En revanche, la distinction des provenances est faible notamment à l'intérieur de l'espèce.

| Groupement (Duncan) | | NRL | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|---|-----|--------------|------------|--------|
| | A | 4,5 | 46 | MP | P |
| | B | 4,3 | 48 | LiP | P |
| C | B | 4,1 | 48 | DP | P |
| C | B | 4,1 | 48 | TP | P |
| C | D | 3,9 | 48 | CP | P |
| E | D | 3,8 | 48 | BiR | R |
| E | D | 3,7 | 50 | CR | R |
| E | | 3,6 | 44 | BR | R |
| E | G | 3,6 | 48 | SR | R |
| | G | 3,5 | 48 | JR | R |
| | G | 3,5 | 48 | TR | R |
| | G | 3,4 | 52 | DR | R |

Tableau 57 : Test de comparaison de moyennes sur l'ensemble des origines pour nombre de rayons ligneux (NRL)

Chez le chêne rouvre, aucune relation n'a été trouvée entre l'âge, la largeur de cerne et le nombre de rayons ligneux. En revanche, le nombre de rayons ligneux augmente avec la largeur de cerne et diminue avec l'âge chez le chêne pédonculé. Ces corrélations sont très faibles mais significatives au seuil de 1% et les deux variables, âge et largeur de cerne, expliquent chacune 3% de la variabilité du nombre de rayons ligneux (Figure 81).

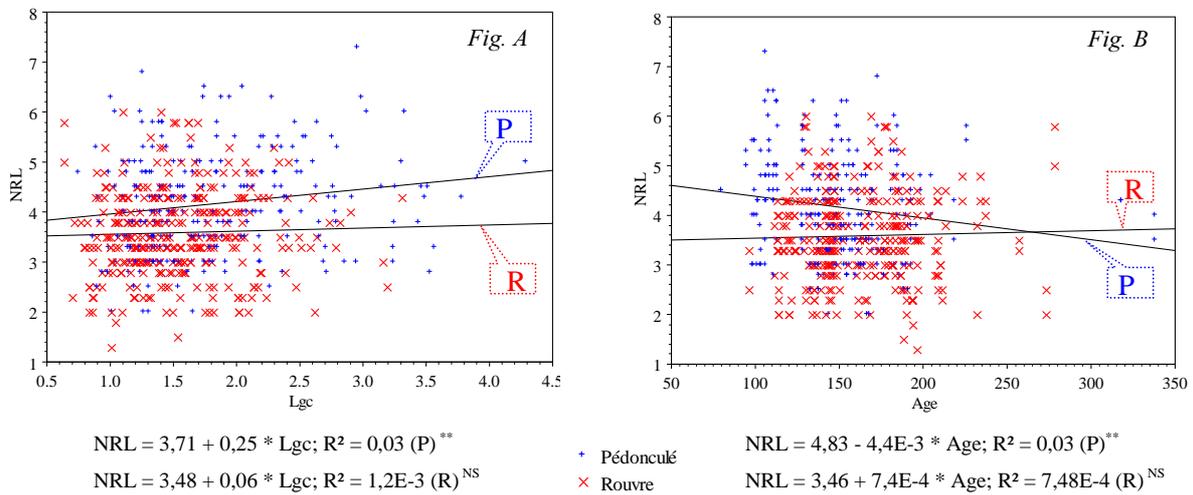


Figure 81 : Évolution du nombre de rayons ligneux(NRL) en fonction de la largeur de cerne (Fig. A) et de l'âge (Fig. B)

Les deux caractéristiques des rayons ligneux, la largeur et le nombre, sont liées négativement entre elles. Cette liaison est plus forte chez les rouvres que chez les pédonculés. Ce résultat confirme les résultats obtenus par FEUILLAT (1996).

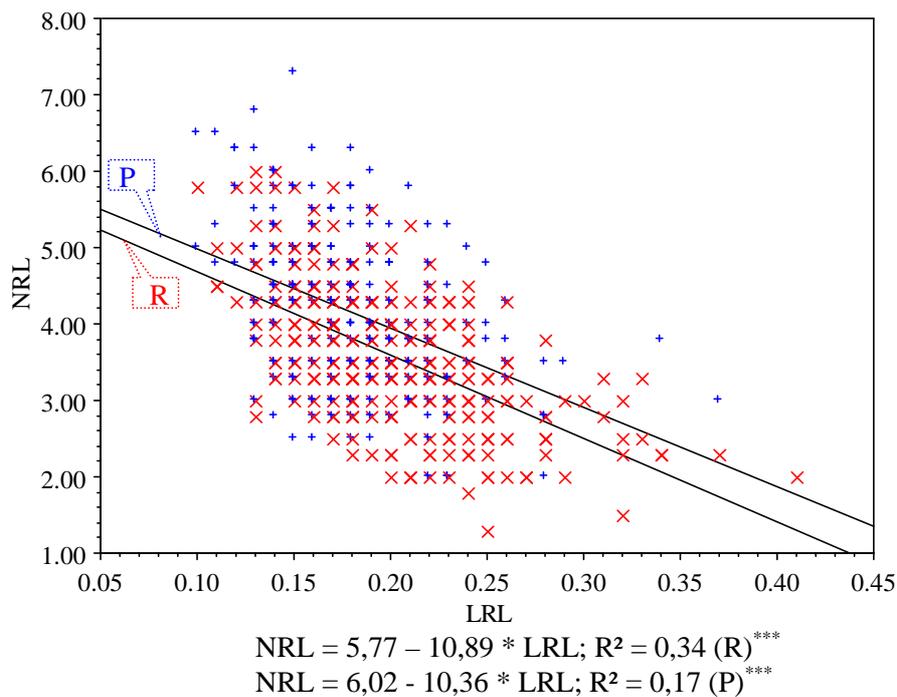


Figure 82 : Relation entre le nombre et la largeur des rayons ligneux

3.4.3 Proportion des rayons ligneux

D'après le Tableau 58 la proportion moyenne des rayons ligneux est de 7,1% pour l'ensemble de l'échantillonnage avec un coefficient de variation de 23% et des valeurs extrêmes de 3,2 à 12,6%.

Au niveau des deux espèces, les résultats montrent une proportion des rayons ligneux plus élevée chez les chênes pédonculés (7,3%) que chez les chênes rouvres (6,9%) soit une différence en moyenne de 0,4%.

Pour les régions bispécifiques :

- pas de différence en moyenne entre les deux espèces à Cîteaux (7,1%) ;
- à Darney, la proportion des rayons ligneux est plus importante chez les chênes pédonculés (7%) que chez les chênes rouvres (6,3%) ;
- à Tronçais, ce sont les chênes rouvres qui représentent une proportion plus élevée (7,2%) que les chênes pédonculés (6,6%).

Les régions extrêmes pour la proportion des rayons ligneux sont celles de Tronçais qui représente à la fois la valeur moyenne la plus élevée des chênes rouvres (7,2%) et la valeur moyenne la plus faible des chênes pédonculés (6,6%), celle de Darney : chêne rouvre, (6,3%) et celle de Limousin : chêne pédonculé, (8,2%).

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Proportion des rayons ligneux (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 7,1 | 3,2 | 12,6 | 1,6 | 23 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 7,3 | 3,8 | 12,6 | 1,8 | 25 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 6,9 | 3,2 | 11,2 | 1,5 | 22 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 7,0 | 4,0 | 9,8 | 1,3 | 19 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 6,9 | 4,1 | 10,8 | 1,4 | 21 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 7,1 | 4,5 | 11,8 | 1,7 | 24 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 7,1 | 4,0 | 10,5 | 1,6 | 22 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 7,0 | 4,4 | 11,3 | 1,5 | 22 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 6,3 | 3,2 | 11,2 | 1,9 | 29 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 6,8 | 4,5 | 10,3 | 1,3 | 20 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 8,2 | 4,7 | 12,6 | 1,9 | 23 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 7,4 | 3,9 | 12,0 | 1,9 | 25 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 6,9 | 4,3 | 10,7 | 1,5 | 21 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 6,6 | 3,8 | 12,2 | 1,7 | 25 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 7,2 | 4,7 | 11,2 | 1,4 | 20 |

Tableau 58 : Statistiques générales de la proportion des rayons ligneux

L'analyse de variance sur les régions bispécifiques ne montre pas de différence significative entre les deux espèces pour la proportion des rayons ligneux. En revanche, l'effet région est

significatif au seuil de 1%, l'effet interaction entre l'espèce et la région est significatif au seuil de 1%, mais n'explique que 2% de la variabilité de la proportion des rayons ligneux.

L'effet région est significatif au seuil de 1% dans les analyses concernant l'ensemble des provenances et les provenances monospécifiques et explique de 3 à 8% de la variabilité de la proportion des rayons ligneux (Tableau 59).

Mais toutes les analyses de variance montrent que la plupart de la variabilité de la proportion des rayons ligneux est due à l'effet arbre qui explique 78 à 80% de cette variabilité.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 0,42 ^{NS} | | 0,85 |
| | | Région | 2 | 5,9 ^{**} | 1% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 10,86 ^{***} | 2% | |
| | | Arbre | 138 | 5,72 ^{***} | 82% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 12,11 ^{***} | 7% | 0,85 |
| | | Arbre | 276 | 5,6 ^{***} | 78% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 3,94 ^{***} | 3% | 0,82 |
| | | Arbre | 158 | 4,52 ^{***} | 79% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 22,27 ^{***} | 8% | 0,88 |
| | | Arbre | 118 | 7,17 ^{***} | 80% | |

Tableau 59 : Analyse de variance sur la proportion des rayons ligneux

Le Tableau 60 donne les coefficients de corrélation observés entre l'âge, la largeur de cerne et les caractéristiques des rayons ligneux chez les deux espèces de chêne. Nous constatons que :

| Espèce | Variable | Âge | Lgc | NRL | LRL | %RL | Espèce |
|-----------------|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|-----------------|--------------|
| Chêne pédonculé | Âge | 1 | -0.67 <0.0001 | 0.03 0.6208 | 0.003 0.9503 | 0.01 0.8162 | Chêne rouvre |
| | Lgc | -0.56 <0.0001 | 1 | 0.03 0.5316 | -0.03 0.5904 | 0.02 0.6923 | |
| | NRL | -0.16 0.0104 | 0.16 0.0097 | 1 | -0.59 <0.0001 | 0.51 <0.0001 | |
| | LRL | 0.02 0.7025 | 0.2 0.0016 | -0.41 <0.0001 | 1 | 0.35 <0.0001 | |
| | %RL | -0.13 0.0391 | 0.36 <0.0001 | 0.59 <0.0001 | 0.46 <0.0001 | 1 | |

Tableau 60 : Matrice symétrique des corrélations entre l'âge, la largeur de cerne et les caractéristiques des rayons ligneux chez les chênes rouvre et pédonculé

- les caractéristiques des rayons ligneux sont toutes corrélées entre elles avec une signification de 1% chez les deux espèces ;

- chez les chênes rouvres, toutes ces caractéristiques sont indépendantes de l'âge et de la largeur de cerne. Ceci confirme le résultat obtenu par NEPVEU (1996) ;
- chez le chêne pédonculé, toutes les variables des rayons ligneux sont faiblement dépendantes de l'âge et de la largeur de cerne sauf le nombre de rayons ligneux qui est indépendant de l'âge.

Il faut noter que les valeurs moyennes et extrêmes des caractéristiques des gros rayons ligneux sont comparables voire très proches de certains résultats cités dans la littérature que nous avons regroupés dans le Tableau 45.

3.5 Proportion des fibres

La mesure de la proportion des fibres réalisées sur 442 échantillons provenant de 262 arbres conduisent à une moyenne de 32,5% avec un coefficient de variation de 25% et des valeurs extrêmes entre échantillons de 7,4% à 54,5% (Tableau 61). Ces résultats sont en concordance avec ceux obtenus par SCIAMA (1995) et VANSTEENKISTE (2003) et ils sont proches, en moyenne, de ceux cités dans le Tableau 44.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Proportion des fibres (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 32,5 | 7,4 | 54,5 | 8,2 | 25 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 30,7 | 7,4 | 48,2 | 7,7 | 25 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 33,6 | 12,2 | 54,5 | 8,2 | 25 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 29,1 | 14,4 | 44,8 | 7,8 | 27 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 35,3 | 19,5 | 50,8 | 6,5 | 18 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 29,9 | 11,3 | 45,3 | 7,1 | 24 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 35,6 | 23,4 | 54,5 | 8,3 | 23 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 25,8 | 13,9 | 39,6 | 6,7 | 26 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 29,1 | 12,2 | 45,6 | 7,8 | 27 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 33,3 | 16,4 | 48,6 | 7,8 | 23 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 30,3 | 14,1 | 41,1 | 7,1 | 24 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 37,2 | 24,6 | 48,2 | 4,9 | 13 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 38,9 | 24,6 | 51,5 | 7,6 | 20 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 31,4 | 7,4 | 45,0 | 7,8 | 25 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 34,3 | 17,4 | 51,8 | 7,7 | 23 |

Tableau 61 : Statistiques descriptives de la proportion des fibres des 153 chênes rouvres et des 109 chênes pédonculés

Les chênes rouvres présentent, en moyenne, une proportion des fibres plus élevée que les chênes pédonculés : 33,6% contre 30,7%, soit une différence en moyenne de 2,9%.

Pour les régions mixtes, à âge et largeur de cernes voisins, les chênes rouvre ont plus de fibres que les chênes pédonculés :

- + 5,7% à Cîteaux ;
- + 3,3% à Darney ;
- + 2,9% à Tronçais.

Les résultats au niveau des 12 provenances monospécifiques confirment qu'à âge et largeur de cerne proches, les chênes rouvres possèdent plus de fibres que les chênes pédonculés. Les provenances extrêmes pour la proportion de fibres chez le chêne rouvre sont celles de Bitche (29,1%), provenance la plus âgée des chênes rouvres (193 ans), et Saint Palais (38,9%), provenance la plus jeune des chênes rouvres (122 ans), soit un écart de 9,8%.

Chez le chêne pédonculé, les provenances extrêmes sont celles de Darney (25,8%), provenance la plus âgée des pédonculés, et Monlezun-Laurède (37,2%), provenance la plus jeune des pédonculés, soit un écart de 11,4% ce qui est assez considérable. La Figure 83 montre la présence d'une grande variabilité de la proportion de fibres inter- et intra-provenance.

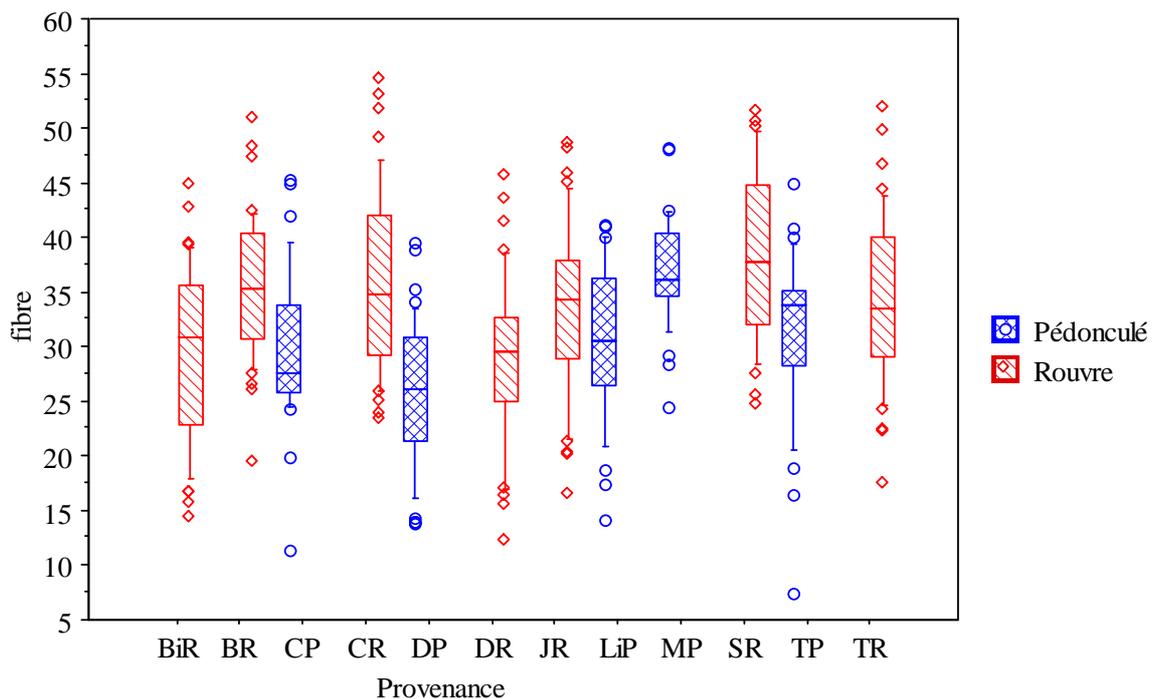


Figure 83 : Variation inter- et intra-provenance de la proportion de fibres

L'analyse de variance sur les régions bispécifiques (Tableau 62) montre des différences significatives au seuil de 1% entre les deux espèces et entre les provenances pour la proportion des fibres. Le résultat concernant l'effet espèce est en accord avec celui obtenu par FEUILLAT et al. (1997).

Sur l'ensemble de l'échantillonnage, l'effet région est significatif au seuil de 1‰ et explique au moins 21% de la variabilité de la proportion de fibres ce qui est assez important.

A l'intérieur de l'espèce, l'effet provenance est toujours significatif au seuil de 1‰ chez les deux espèces, mais cet effet provenance explique mieux la variabilité de la proportion de fibres chez le chêne pédonculés que chez le chêne rouvre :27% contre 13%. Ceci est peut-être dû à une variabilité génétique plus importante entre les provenances de chêne pédonculé qu'entre les provenances de chêne rouvre.

L'effet arbre explique toujours la majorité de la variabilité de la proportion de fibres (61% à 63%) pour toutes les analyses effectuées.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 26,45 *** | 6% | 0,80 |
| | | Région | 2 | 21,04 *** | 11% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 1,17 NS | | |
| | | Arbre | 123 | 2,21 *** | 62% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 18,51 *** | 21% | 0,82 |
| | | Arbre | 250 | 2,4 *** | 61% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 12,49 *** | 13% | 0,79 |
| | | Arbre | 146 | 2,42 *** | 63% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 28,93 *** | 27% | 0,88 |
| | | Arbre | 104 | 2,56 *** | 61% | |

Tableau 62 : Analyse de variance sur la proportion de fibres

La comparaison de moyennes sur la proportion de fibres (Tableau 63) permet de distinguer quatre groupes différents :

- le premier regroupe les deux provenances les plus jeune : Saint Palais, chêne rouvre, et Monlezun-Laurède, chêne pédonculé ;
- le deuxième rassemble quatre provenances de chênes rouvres où les âges et les largeurs des cernes sont assez différents, mais à l'intérieur du groupe elles sont bien classées en fonction de l'âge et de la largeur de cerne ;
- le quatrième renferme trois provenances de chênes pédonculés, à des âges et largeurs des cernes variables, et deux provenances de chênes rouvres dont Bitche, la plus âgée avec une largeur moyenne de cerne la plus étroite des chênes rouvres ;
- le cinquième présente la provenance de chêne pédonculé la plus âgée.

| Groupement (Duncan) | | Âge | LgC (mm) | %Fibres | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|---|------------|-------------|--------------|--------------|------------|----------|
| | A | 127 | 1,78 | 38,86 | 34 | SR | R |
| B | A | 122 | 2,09 | 37,17 | 35 | MP | P |
| B | C | 140 | 1,89 | 35,56 | 40 | CR | R |
| B | C | 136 | 1,79 | 35,33 | 40 | BR | R |
| | C | 173 | 1,51 | 34,32 | 40 | TR | R |
| D | C | 178 | 1,2 | 33,31 | 40 | JR | R |
| D | E | 170 | 1,39 | 31,39 | 30 | TP | P |
| | E | 124 | 2,39 | 30,31 | 33 | LiP | P |
| | E | 152 | 2,03 | 29,85 | 30 | CP | P |
| | E | 170 | 1,49 | 29,14 | 36 | DR | R |
| | E | 193 | 1,16 | 29,10 | 43 | BiR | R |
| | F | 181 | 1,43 | 25,79 | 41 | DP | P |

Tableau 63 : Test de comparaison de moyenne (Duncan) sur l'ensemble des provenances pour la proportion de fibres

3.5.1 Relations avec l'âge et la largeur de cerne

La proportion de fibres diminue avec l'âge chez les deux espèces, mais les valeurs restent relativement plus élevées chez les rouvres que chez les chênes pédonculés. La corrélation est significative au seuil de 1‰ chez les deux espèces (Figure 84a). Cette corrélation a été observée par plusieurs auteurs : GUILLEY (2000), RAO *et al.* (1997) et SCIAMA (1995).

Une corrélation positive est significative au seuil de 1‰ entre la proportion de fibres et la largeur de cerne chez les deux espèces (Figure 84). Cette relation est plus notable chez le chêne rouvre où elle explique 30% contre 13% seulement chez le chêne pédonculé.

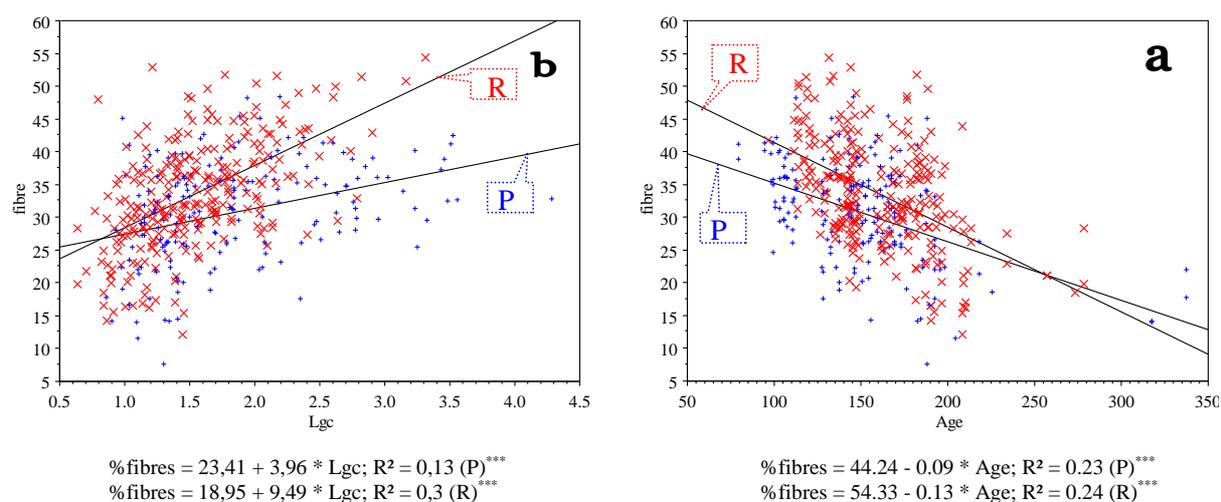


Figure 84 : Évolution de la proportion des fibres en fonction de l'âge et de la largeur de cerne

3.6 Proportion des parenchymes et des petits vaisseaux

Sur l'ensemble de l'échantillonnage, il y a en moyenne 48,9% de parenchyme et de petits vaisseaux, le coefficient de variation de 13% et des valeurs extrêmes entre échantillons de 31,8 à 74,3% (Tableau 64).

Au niveau de l'espèce, les chênes rouvres montrent une proportion moyenne un peu plus faible (48,5%) que les chênes pédonculés (49,6%). Les coefficients de variation à l'intérieur de chaque espèce sont très proches. Ces résultats vont dans le même sens que les résultats obtenus par FEUILLAT et *al.* (1997), ces auteurs n'ont pas tenu compte des rayons ligneux dans leur mesure des tissus parenchymateux.

Pour les régions monospécifiques, les chênes pédonculés sont un peu plus riches en parenchyme et petits vaisseaux que les chênes rouvres.

Nous constatons, pour les 12 provenances monospécifiques, que Darney renferme les valeurs moyennes maximales pour les chênes rouvres (52,6%) et pour les chênes pédonculés (53%). Il faut noter que cette région regroupe les chênes pédonculés les plus âgés mais regroupe également des chênes rouvres âgés. La valeur moyenne minimale pour les chênes rouvres se trouve à Saint Palais (44,3%) et celle des chênes pédonculés à Monlezun-Laurède (44,6%). Ces deux provenances rassemblent les chênes rouvres et pédonculés les plus jeunes de l'échantillonnage.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Proportion du parenchymes et des petits vaisseaux (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 48,9 | 31,8 | 74,3 | 6,4 | 13 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 49,6 | 34,2 | 74,3 | 6,1 | 12 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 48,5 | 31,8 | 64,7 | 6,5 | 13 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 50,9 | 39,6 | 62,9 | 6 | 12 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 48,2 | 36,3 | 58,1 | 5,3 | 11 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 50,9 | 36,7 | 60,7 | 5,4 | 11 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 48,2 | 34 | 58,3 | 6,5 | 14 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 53 | 42,6 | 64,5 | 4,6 | 9 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 52,6 | 38,2 | 64,7 | 6,6 | 12 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 47,8 | 37,4 | 60,7 | 6,1 | 13 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 50,5 | 42,1 | 65,7 | 5,7 | 11 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 44,6 | 34,3 | 53,5 | 4,1 | 9 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 44,3 | 31,8 | 55,1 | 6,1 | 14 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 48,4 | 34,2 | 74,3 | 7,2 | 15 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 46,7 | 33,2 | 59,5 | 5,8 | 12 |

Tableau 64 : Statistiques générales de la proportion du parenchyme et des petits vaisseaux

Les analyses de variance effectuées sur les trois régions mixtes (CDT) montrent un faible effet espèce qui n'est significatif qu'au seuil de 5%. En revanche, l'effet région est significatif au seuil de 1% et explique au moins 12% de la variabilité de la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux.

Pour les analyses faites sur l'ensemble des provenances et sur les provenances monospécifiques, l'effet provenance est toujours significatif au seuil de 1% mais explique mieux la variabilité de la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux chez les pédonculés (24%) que chez les rouvres (12%). Ceci est peut-être dû à une variabilité génétique plus importante entre les provenances de chêne pédonculé qu'entre les provenances de chêne rouvre.

L'effet arbre est toujours significatif au seuil de 1% et explique la plus grande partie de la variabilité (61 à 65%).

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 6,06 * | 1% | 0,79 |
| | | Région | 2 | 24,86 *** | 12% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 0,64 NS | | |
| | | Arbre | 123 | 2,2 *** | 65% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 13,99 *** | 17% | 0,80 |
| | | Arbre | 250 | 2,22 *** | 62% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 10,89 *** | 12% | 0,77 |
| | | Arbre | 146 | 2,25 *** | 63% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 23,2 *** | 24% | 0,85 |
| | | Arbre | 104 | 2,31 *** | 61% | |

Tableau 65 : Analyse de variance sur la proportion du parenchyme et des petits vaisseaux

Chez les deux espèces, la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux augmente avec l'âge (Figure 85a). Les corrélations sont significatives au seuil de 1% mais l'âge n'explique que 12 à 13% de la variabilité de la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux.

Des autres corrélations tout aussi significatives (seuil de 1%) entre cette dernière et la largeur de cerne ont été observées chez les deux espèces (Figure 85b), mais la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux diminue plus chez les chênes rouvres en fonction de la largeur de cerne que chez les chênes pédonculés qui ne réagissent eux pas beaucoup.

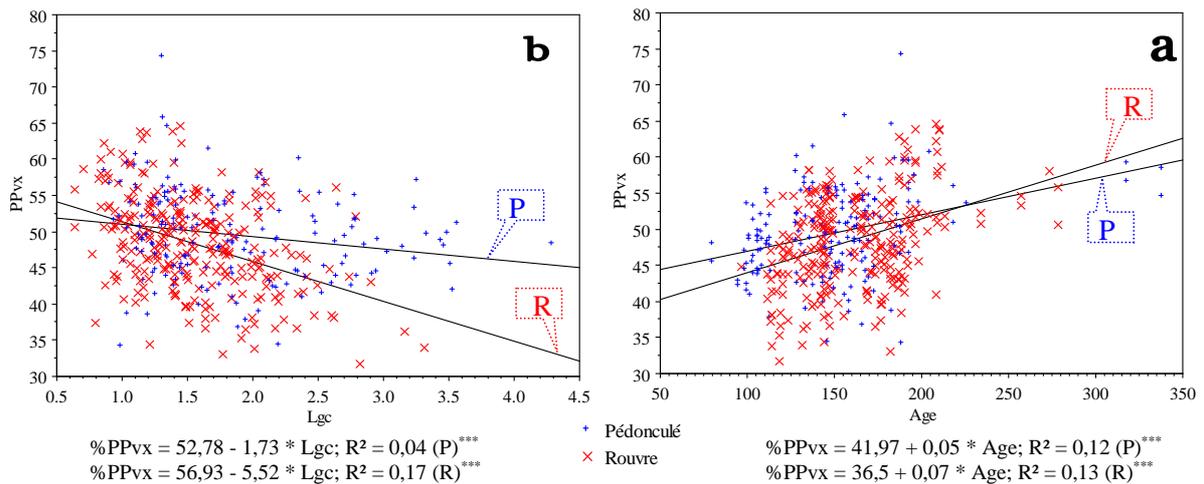


Figure 85 : Évolution de la proportion du parenchyme et des petits vaisseaux (PPvx) en fonction de l'âge et de la largeur de cerne (mm)

3.7 Caractéristiques des gros vaisseaux du bois initial

3.7.1 Proportion des gros vaisseaux

La proportion surfacique des gros vaisseaux sur l'ensemble de l'échantillonnage est en moyenne de 11,6%, les valeurs extrêmes entre échantillons sont 5,3 et 22% (Tableau 66).

Cette proportion est plus élevée chez le chêne pédonculé, 12,4%, chez le chêne rouvre, elle est de 11,2%, soit une différence de 1,2%. En revanche, les coefficients de variation intra-spécifique sont égaux : 25%.

Dans les régions bispécifiques, à âges et à largeurs de cernes voisins, les chênes pédonculés représentent toujours une proportion des gros vaisseaux plus importante que les chênes rouvres : + 3% à Cîteaux, +2,3% à Darney et +1,6 à Tronçais.

Au niveau des 12 provenances monospécifiques, les provenances de chênes rouvres qui ont la proportion extrême en gros vaisseaux se trouvent à Cîteaux (9%) et à Bitche (13,1%), soit un écart de 4,1%, celles de chênes pédonculés sont à Monlezun-Laurède (10,6%) et à Darney (14,3%), soit une différence de 3,7%.

Nous constatons que les provenances représentant les valeurs maximales moyenne chez les deux espèces sont celles qui regroupent les chênes les plus âgés. En revanche, les valeurs minimales en moyenne se trouvent dans les provenances où les arbres sont plus jeunes.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Proportion des gros vaisseaux (%) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------|------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 11,6 | 5,3 | 22,0 | 3,0 | 26 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 12,4 | 6,3 | 22,0 | 3,2 | 25 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 11,2 | 5,3 | 19,8 | 2,8 | 25 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 13,1 | 6,5 | 19,8 | 3,1 | 24 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 9,6 | 6,0 | 14,4 | 1,8 | 19 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 12,0 | 7,3 | 20,8 | 3,0 | 25 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 9,0 | 5,3 | 14,1 | 2,0 | 22 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 14,3 | 9,0 | 22,0 | 2,9 | 21 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 12,0 | 7,8 | 16,3 | 2,3 | 19 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 12,3 | 6,9 | 17,0 | 2,6 | 21 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 11,1 | 6,3 | 18,3 | 2,8 | 25 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 10,6 | 6,9 | 15,9 | 2,6 | 25 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 10,0 | 6,2 | 17,3 | 2,5 | 25 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 13,6 | 9,7 | 20,2 | 2,7 | 20 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 12,0 | 6,6 | 18,4 | 2,7 | 23 |

Tableau 66 : Statistiques descriptives de la proportion des gros vaisseaux de 153 chênes rouvres et 109 chênes pédonculés

Le Figure 86 montre la présence d'une très grande variabilité dans la proportion des gros vaisseaux entre les deux espèces, notamment dans les régions mixtes (CDT), entre les provenances et même à l'intérieur de chacune de ces provenances.

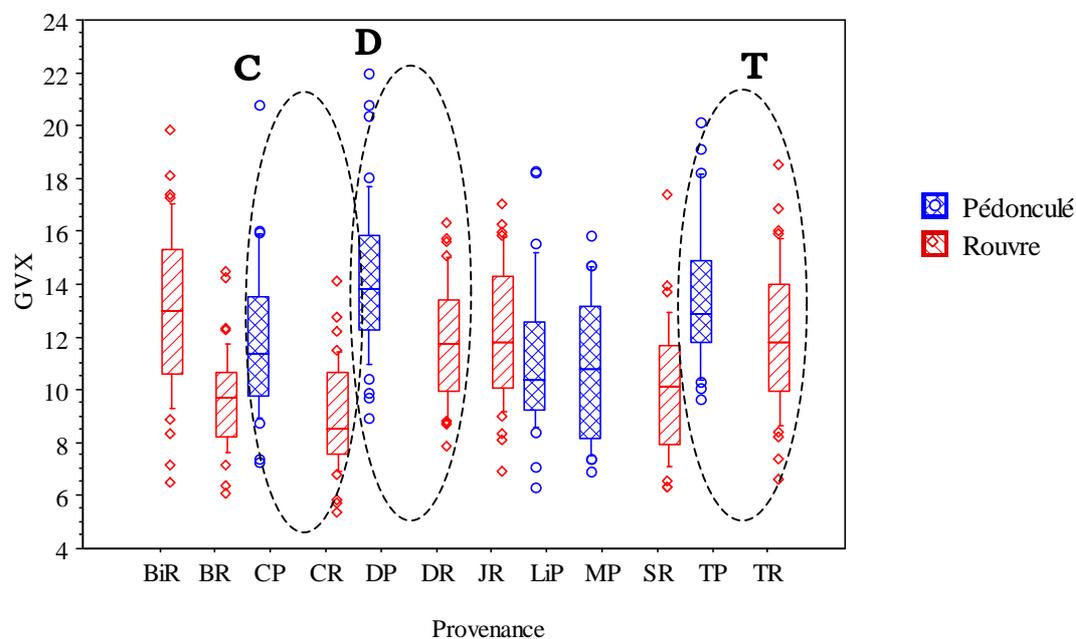


Figure 86 : Variation inter- et intra-provenances de la proportion des gros vaisseaux

L'analyse de variance réalisée sur les régions bispécifiques montre une différence significative au seuil de 1% entre les deux espèces pour la proportion des gros vaisseaux

(Tableau 67). L'effet espèce explique 15% de la variabilité totale de cette dernière. L'effet région est significatif aussi au seuil de 1‰ et explique 12% de la variabilité de la proportion des gros vaisseaux. Les deux facteurs espèce et région expliquent au moins 27% (15% + 12%) de la variabilité totale, ce qui est assez considérable. La différence significative observée entre les deux espèces a été signalée aussi par FEUILLAT *et al.* (1997).

L'effet région est également très important dans les analyses de variance sur l'ensemble de l'échantillonnage et sur les provenances monospécifiques ; 19 à 25% de la variabilité de la proportion des gros vaisseaux est due à l'effet région.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 135,21 *** | 15% | 0,90 |
| | | Région | 2 | 53,25 *** | 12% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 3,35 * | 1% | |
| | | Arbre | 123 | 4,47 *** | 60% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 36,32 *** | 25% | 0,89 |
| | | Arbre | 250 | 4 *** | 62% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 32,32 *** | 23% | 0,86 |
| | | Arbre | 146 | 3,45 *** | 60% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 35,08 *** | 19% | 0,92 |
| | | Arbre | 104 | 5,02 *** | 71% | |

Tableau 67 : Analyse de variance sur la proportion des gros vaisseaux

Nous constatons que la proportion des gros vaisseaux est très liée à l'âge et à la largeur de cerne (Figure 87). Elle augmente avec l'âge et diminue avec la largeur de cerne chez les deux espèces, ce que montraient déjà les travaux de COURTOIS *et al.* (1964).

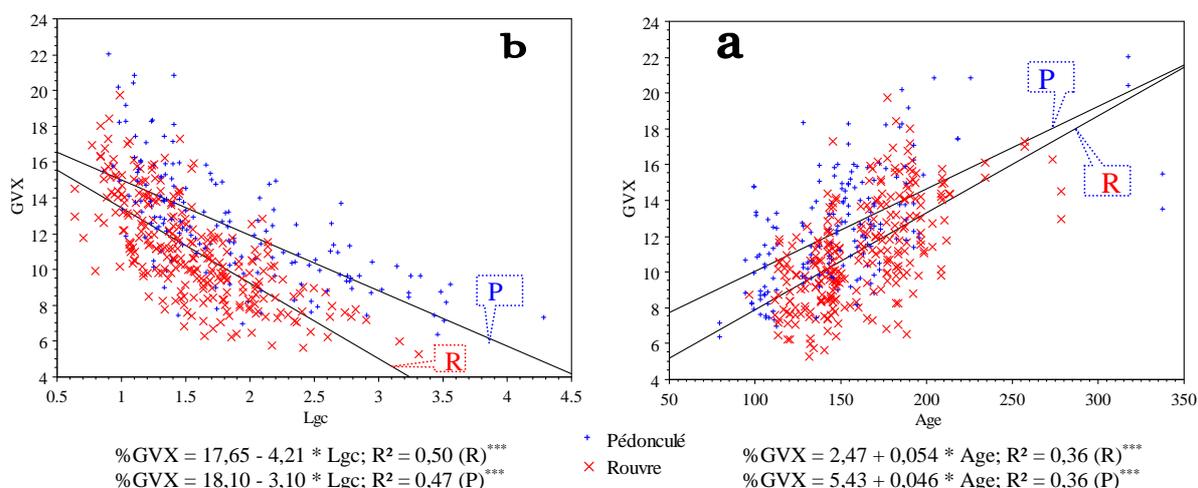


Figure 87 : Évolution de la proportion des gros vaisseaux en fonction de l'âge et de la largeur de cerne chez les deux espèces

3.7.2 Nombre de gros vaisseaux

Nous constatons d'après le Tableau 68 que les chênes pédonculés ont en moyenne plus de vaisseaux par unité de surface (2,2 / mm²) que les chênes rouvres (2,1 /mm²). La même tendance a été observée par FEUILLAT et *al.* (1997).

Dans les régions bispécifiques, à âges et à largeurs de cernes proches, les chênes rouvres représentent moins de vaisseaux que les chênes pédonculés.

Au niveau des 12 provenances, les provenances extrêmes sont :

- pour les rouvres celles de Cîteaux avec 1,7 vaisseaux par mm² et Bitche 2,5 vaisseaux / mm², soit un écart de 0,8 ;
- pour les pédonculé celles de Monlezun-Laurède (1,8 /mm²) et Darney et Tronçais (2,4 /mm²), soit un écart de 0,6. Nous remarquons que les valeurs moyennes maximales chez les deux espèces se trouvent chez les provenances qui regroupent les arbres les plus âgés.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | nombre des gros vaisseaux par mm ² | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------------------|------------|------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 2,1 | 0,9 | 3,9 | 0,6 | 26 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 2,2 | 1,1 | 3,9 | 0,6 | 25 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 2,1 | 0,9 | 3,9 | 0,6 | 27 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 2,5 | 1,3 | 3,6 | 0,6 | 25 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 1,9 | 1,2 | 2,9 | 0,3 | 17 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 2,1 | 1,2 | 3,4 | 0,5 | 25 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 1,7 | 0,9 | 2,7 | 0,4 | 21 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 2,4 | 1,4 | 3,6 | 0,5 | 19 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 2,2 | 1,5 | 3,4 | 0,5 | 20 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 2,4 | 1,4 | 3,4 | 0,6 | 24 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 2,0 | 1,2 | 3 | 0,5 | 26 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 1,8 | 1,1 | 2,7 | 0,4 | 22 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 1,9 | 1 | 2,9 | 0,5 | 27 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 2,4 | 1,5 | 3,9 | 0,6 | 24 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 2,2 | 1,2 | 3,9 | 0,6 | 27 |

Tableau 68 : Statistiques descriptives du nombre des gros vaisseaux du bois chez les deux espèces

L'analyse de variance sur les trois régions bispécifiques montre un effet espèce et un effet région significatifs au seuil de 1% expliquant respectivement 6 et 9% de la variabilité du nombre de vaisseaux, (pas d'effet interaction entre la région et l'espèce).

L'effet provenance est toujours significatif au seuil de 1% dans toutes les autres analyses effectuées sur l'ensemble de l'échantillonnage et sur les lots monospécifiques. Cet effet explique entre 17 et 20% de la variabilité

La plupart de la variabilité en nombre des gros vaisseaux est due à l'effet arbre, il explique 62 et 70% de cette variabilité, chez les monospécifiques.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|-----------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 42,25 *** | 6% | 0,87 |
| | | Région | 2 | 31,13 *** | 9% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 1,71 NS | | |
| | | Arbre | 123 | 3,81 *** | 68% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 23,7 *** | 19% | 0,87 |
| | | Arbre | 250 | 3,57 *** | 65% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 26,42 *** | 20% | 0,85 |
| | | Arbre | 146 | 3,34 *** | 62% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 26,89 *** | 17% | 0,91 |
| | | Arbre | 104 | 4,33 *** | 70% | |

Tableau 69 : Analyse de variance sur le nombre des gros vaisseaux du chênes rouvre et pédonculé

Le nombre de gros vaisseaux est lié à l'âge et à la largeur de cerne. Il augmente avec l'âge et diminue avec la largeur de cerne. La corrélation avec l'âge est significative au seuil de 1% et la réaction des deux espèces est similaire vis à vis l'augmentation de l'âge (Figure 88a). La relation avec la largeur de cerne est aussi significative au seuil de 1% chez les deux espèces qui montrent la même tendance (Figure 88b).

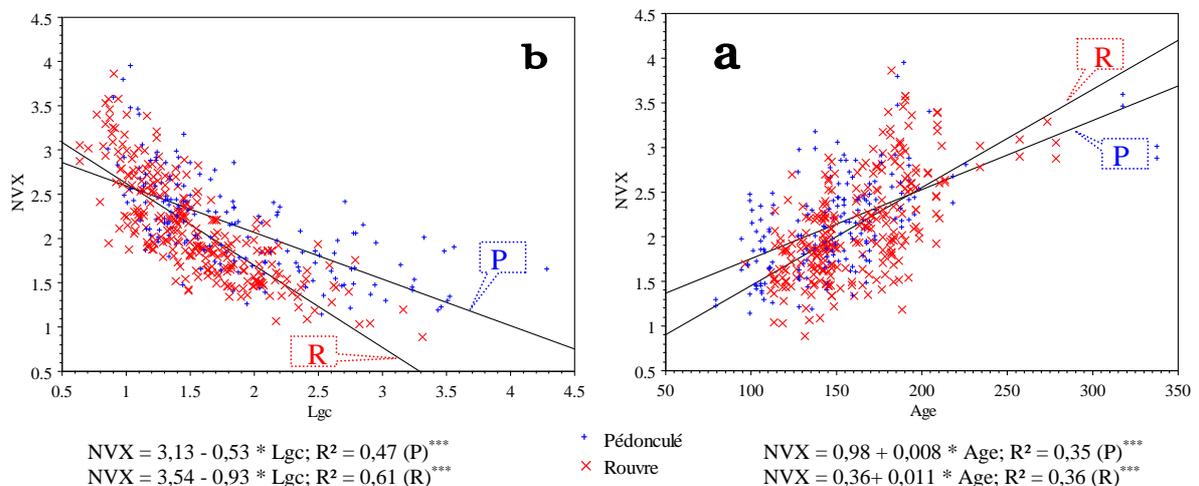


Figure 88 : Évolution du nombre des gros vaisseaux en fonction de l'âge et de la largeur de cerne chez les chênes rouvres et pédonculés

3.7.3 Surface individuelle des gros vaisseaux

La surface individuelle des gros vaisseaux est en moyenne de 0,055 mm², tous arbres confondus, le coefficient de variation est de 15% et les valeurs extrêmes entre échantillons sont 0,034 et 0,088 mm², soit un écart de 0,054 mm². Ces résultats confirment ceux obtenus par HUBER (1993).

Toutes régions confondues, les chênes pédonculés présentent en moyenne une surface individuelle des gros vaisseaux plus grande (0,058 mm²) que les chênes rouvres (0,053 mm²), soit une différence de 0,005 mm² (6%). Les coefficients de variation à l'intérieur de chacune des espèces sont égaux (Tableau 70). Nous trouvons les mêmes résultats dans les régions bispécifiques.

Nous remarquons que :

- Tronçais représente à la fois la valeur moyenne maximale (0,056 mm²) pour les chênes rouvres et la valeur moyenne minimale (0,057 mm²) pour les chênes pédonculés ;
- Cîteaux représente les valeurs moyennes minimales de la surface individuelle des vaisseaux pour les rouvres (0,052 mm²) et pour les pédonculés (0,057 mm²) ;
- C'est à Darney que se trouve la valeur moyenne maximale des chênes pédonculés (0,060 mm²).

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Surface individuelle de gros vaisseaux (mm ²) | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 0,055 | 0,034 | 0,088 | 0,008 | 15 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 0,058 | 0,043 | 0,088 | 0,008 | 14 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 0,053 | 0,034 | 0,078 | 0,007 | 14 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 0,053 | 0,042 | 0,071 | 0,007 | 13 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 0,052 | 0,034 | 0,068 | 0,008 | 14 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 0,057 | 0,044 | 0,074 | 0,007 | 12 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 0,052 | 0,042 | 0,064 | 0,006 | 11 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 0,060 | 0,043 | 0,088 | 0,010 | 17 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 0,054 | 0,042 | 0,063 | 0,005 | 10 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 0,053 | 0,039 | 0,078 | 0,008 | 15 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 0,058 | 0,044 | 0,081 | 0,008 | 14 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 0,058 | 0,043 | 0,075 | 0,009 | 15 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 0,054 | 0,039 | 0,075 | 0,010 | 18 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 0,057 | 0,046 | 0,066 | 0,006 | 10 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 0,056 | 0,042 | 0,072 | 0,007 | 12 |

Tableau 70 : Statistiques générales de la surface individuelle des gros vaisseaux des chênes rouvres et pédonculés

La surface individuelle des gros vaisseaux est très variable selon les arbres, on trouve à Bertrange, chêne rouvre, la valeur minimale (0,034 mm²) et à Darney, chêne pédonculé, la valeur maximale (0,088 mm²). Nous constatons que la variabilité est très forte à Saint Palais avec un coefficient de variation de 18%, cette région renferme aussi les chênes rouvres les plus jeunes.

En revanche, la variabilité la plus forte pour les pédonculés se trouve à Darney, avec un coefficient de variation de 17%, Darney regroupe les chênes pédonculés les plus âgés.

La variabilité inter- et intra-spécifique est aussi importante dans les régions mixtes notamment à Darney (Figure 89).

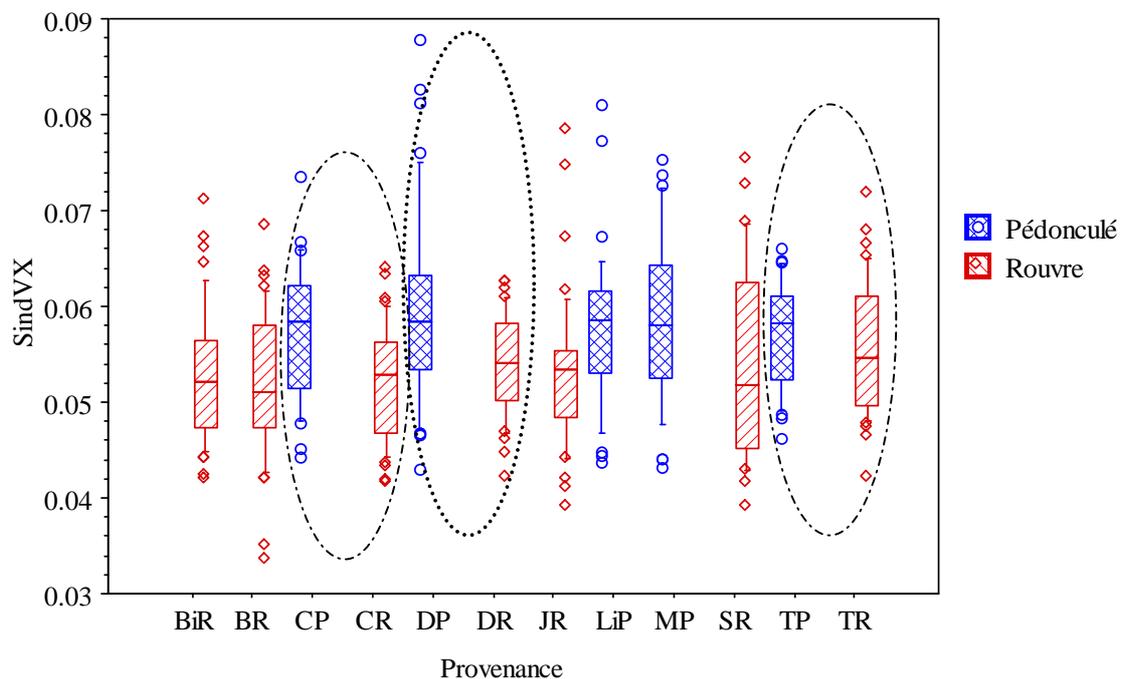


Figure 89 : Variation inter- et intra-spécifique de la surface individuelle des gros vaisseaux

L'analyse de variance faite sur les régions bispécifiques pour la surface individuelle des gros vaisseaux montre un effet espèce et un effet région significatifs au seuil de 1%, expliquant respectivement 9% et 2% de la variabilité de la surface individuelle (Tableau 71). (FEUILLAT et al. (1997) n'ont pas trouvé de différence significative entre les deux espèces pour la surface individuelle des gros vaisseaux mais celle-ci était mesurée sur des cernes d'une largeur proche de 2 mm. L'effet interaction entre l'espèce et la région est aussi significatif au seuil de 1%.

Les analyses sur les 12 lots et sur les lots monospécifiques présentent un effet provenance significatif au seuil de 1%. Il n'explique que 3% de la variabilité de la surface individuelle des gros vaisseaux pour les chênes rouvres, 2% pour les chênes pédonculés et 11% pour

l'ensemble des provenances. En revanche, l'effet arbre est considérablement élevé, il explique 83% de la variabilité de la surface individuelle des gros vaisseaux dans les analyses effectuées sur les régions mixtes et sur l'ensemble des provenances, 89% dans le cas des rouvres et 94% dans le cas des pédonculés. Ceci laisse supposer que la variabilité de la surface individuelle des gros vaisseaux est expliquée en grande partie par la génétique de l'arbre.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 102,41 *** | 7% | 0,94 |
| | | Région | 2 | 13,23 *** | 2% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 14,17 *** | 2% | |
| | | Arbre | 123 | 9,96 *** | 83% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 31,71 *** | 11% | 0,94 |
| | | Arbre | 250 | 10,3 *** | 83% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 6,12 *** | 3% | 0,92 |
| | | Arbre | 146 | 8,95 *** | 89% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 8,92 *** | 2% | 0,96 |
| | | Arbre | 104 | 13,17 *** | 94% | |

Tableau 71 : Analyse de variance sur la surface individuelle des gros vaisseaux

La comparaison de moyenne réalisée sur l'ensemble des provenances pour la surface individuelle des gros vaisseaux montre que les deux espèces sont nettement séparées, malgré l'absence de différence significative entre les deux espèces à Tronçais où elles sont classées dans le même groupe. Nous constatons aussi que les provenances sont classées dans des groupes qui se chevauchent, ceci explique l'effet provenance significatif certes, mais faible, observé dans l'analyse de variance.

| Groupement (Duncan) | Âge | LgC (mm) | S _{ind.VX} | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|------------|-------------|---------------------|--------------|------------|----------|
| A | 181 | 1,43 | 0,0596 | 41 | DP | P |
| B | 122 | 2,09 | 0,0584 | 35 | MP | P |
| B | 124 | 2,39 | 0,0576 | 33 | LiP | P |
| B | 152 | 2,03 | 0,0573 | 30 | CP | P |
| B | 170 | 1,39 | 0,0570 | 30 | TP | P |
| C | 173 | 1,51 | 0,0557 | 40 | TR | R |
| D | 170 | 1,49 | 0,0540 | 36 | DR | R |
| D | 127 | 1,78 | 0,0540 | 34 | SR | R |
| D | 178 | 1,2 | 0,0529 | 40 | JR | R |
| D | 193 | 1,16 | 0,0526 | 43 | BiR | R |
| E | 140 | 1,89 | 0,0524 | 40 | CR | R |
| E | 136 | 1,79 | 0,0519 | 40 | BR | R |

Tableau 72 : Test de comparaison de moyenne sur l'ensemble des provenances pour la surface individuelle des gros vaisseaux (S_{ind.VX})

La surface individuelle des gros vaisseaux ne dépend ni de l'âge ni de la largeur de cerne quelle que soit l'espèce (Figure 90) malgré l'existence d'une très faible corrélation avec la largeur de cerne dans le cas des chênes rouvres. Ce résultat confirme les résultats signalés par HUBER (1993), mais infirme les résultats obtenus par GUILLEY et NEPVEU (2003).

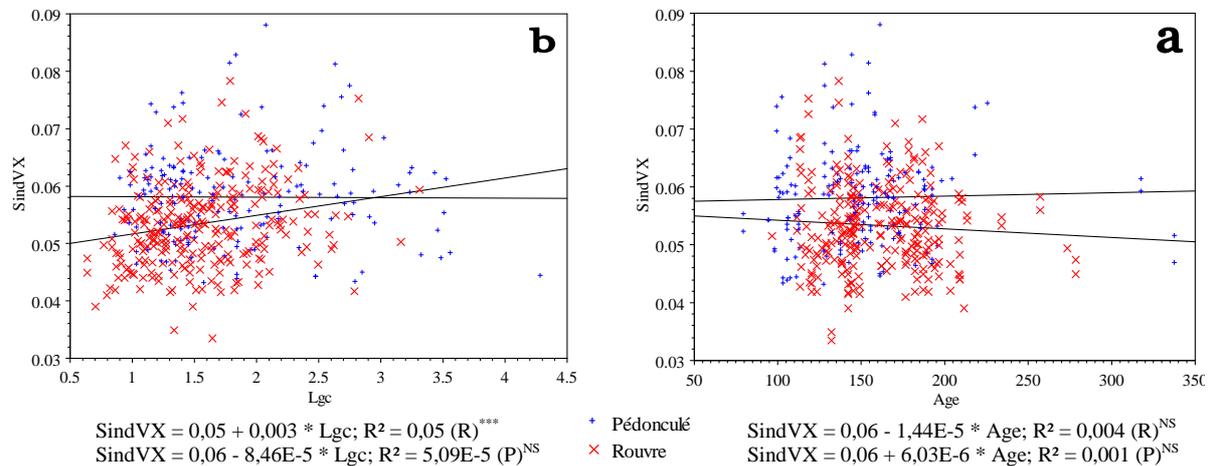


Figure 90 : Liaison entre l'âge, la largeur de cerne et la surface individuelle des gros vaisseaux

Le fort effet arbre et l'absence de l'effet âge et l'effet largeur de cerne sur la surface individuelle des gros vaisseaux laissent à penser que cette dernière représente la carte d'identité de l'arbre.

3.7.4 Excentricité des gros vaisseaux

L'excentricité (Ext) est définie dans notre étude comme :

le rapport entre le diamètre radial (Dr) et le diamètre tangentiel (Dt) des gros vaisseaux

$$\text{Excentricité} = \frac{\text{Diamètre radial (mm)}}{\text{Diamètre tangentiel (mm)}}$$

Les deux espèces présentent en moyenne une excentricité très proche : 1,36 chez les pédonculé contre 1,34 chez les rouvres. Les coefficients de variation à l'intérieur de chacune des espèces sont très voisins (Tableau 73). Ce résultat est contradictoire avec le résultat obtenu par HUBER et *al.* (1941) qui ont montré que le chêne pédonculé présente en moyenne une excentricité des gros vaisseaux (1,33) nettement plus forte que celle du chêne rouvre (1,20).

Dans notre étude, il n'y a pas de différences significatives entre l'excentricité des deux espèces pour les régions bispécifiques.

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | excentricité des gros vaisseaux=diamètre radial/diamètre tangentiel | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|---------------------------------------------------------------------|-------------|-------------|------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 442 | 157 | 1,66 | 1,35 | 1,21 | 1,65 | 0,07 | 5 |
| P | | 169 | 151 | 1,85 | 1,36 | 1,21 | 1,65 | 0,07 | 5 |
| R | | 273 | 161 | 1,54 | 1,34 | 1,22 | 1,54 | 0,06 | 5 |
| R | BiR | 43 | 193 | 1,16 | 1,32 | 1,22 | 1,41 | 0,04 | 3 |
| R | BR | 40 | 136 | 1,79 | 1,37 | 1,29 | 1,48 | 0,06 | 4 |
| P | C | 30 | 152 | 2,03 | 1,37 | 1,26 | 1,58 | 0,08 | 6 |
| R | | 40 | 140 | 1,89 | 1,37 | 1,24 | 1,54 | 0,08 | 6 |
| P | D | 41 | 181 | 1,43 | 1,34 | 1,21 | 1,42 | 0,05 | 4 |
| R | | 36 | 170 | 1,49 | 1,35 | 1,25 | 1,49 | 0,06 | 4 |
| R | JR | 40 | 178 | 1,2 | 1,31 | 1,23 | 1,45 | 0,05 | 4 |
| P | LiP | 33 | 124 | 2,39 | 1,43 | 1,31 | 1,65 | 0,07 | 5 |
| P | MP | 35 | 122 | 2,09 | 1,36 | 1,27 | 1,47 | 0,06 | 4 |
| R | SR | 34 | 127 | 1,78 | 1,37 | 1,28 | 1,48 | 0,06 | 4 |
| P | T | 30 | 170 | 1,39 | 1,32 | 1,24 | 1,47 | 0,05 | 3 |
| R | | 40 | 173 | 1,51 | 1,33 | 1,22 | 1,44 | 0,06 | 4 |

Tableau 73 : Statistiques descriptives de l'excentricité des gros vaisseaux

L'analyse de variance sur les trois régions bispécifiques (Tableau 74) ne montre pas de différence significative entre les deux espèces pour l'excentricité. En revanche, l'effet région est significatif au seuil de 1% et explique 9% de sa variabilité.

L'effet provenance constaté dans les autres analyses est aussi significatif au seuil de 1% et explique 16 et 19% de la variabilité de cette dernière.

Une grande partie de la variabilité est due à l'effet arbre qui explique 60 à 78% de la variabilité de l'excentricité.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|----------------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 129 | Espèce | 1 | 1,65 ^{NS} | | 0,87 |
| | | Région | 2 | 31,71 ^{***} | 9% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 0,33 ^{NS} | | |
| | | Arbre | 123 | 4,31 ^{***} | 78% | |
| Toutes les provenances | 262 | Provenance | 11 | 21,6 ^{***} | 19% | 0,86 |
| | | Arbre | 250 | 3,17 ^{***} | 63% | |
| Rouvre | 153 | Région | 6 | 19,47 ^{***} | 16% | 0,84 |
| | | Arbre | 146 | 3,42 ^{***} | 67% | |
| Pédonculé | 109 | Région | 4 | 23,05 ^{***} | 19% | 0,87 |
| | | Arbre | 104 | 2,74 ^{***} | 60% | |

Tableau 74 : Analyse de variance sur l'excentricité des gros vaisseaux

La comparaison de moyenne sur l'ensemble des provenances pour l'excentricité permet de distinguer quatre groupes :

- le premier ne renferme que Limousin qui représente la largeur de cerne moyenne la plus élevée avec des arbres jeunes (124 ans) ;
- le deuxième regroupe les provenances de chêne rouvre et pédonculé qui se composent d'arbres jeunes à cernes larges ;
- le troisième rassemble les deux espèces de Darney ;
- le quatrième regroupe les chênes rouvres et pédonculé de Tronçais et les chênes rouvres les plus âgées avec des cernes étroits de Bitche et Jupille.

Nous constatons que les régions bispécifiques sont classées dans des groupes différents en fonction de la provenance et dans le même groupe en fonction de l'espèce. Ceci justifie l'absence de l'effet espèce et la présence de l'effet région dans les analyses de variances faites sur l'excentricité.

| Groupement (Duncan) | Âge | LgC (mm) | Excentricité | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|------------|-------------|--------------|--------------|------------|----------|
| A | 124 | 2,39 | 1,43 | 33 | LiP | P |
| B | 140 | 1,89 | 1,37 | 40 | CR | R |
| B | 127 | 1,78 | 1,37 | 34 | SR | R |
| B | 152 | 2,03 | 1,37 | 30 | CP | P |
| B | 136 | 1,79 | 1,37 | 40 | BR | R |
| C | B | 122 | 2,09 | 35 | MP | P |
| C | D | 170 | 1,49 | 36 | DR | R |
| E | D | 181 | 1,43 | 41 | DP | P |
| E | F | 173 | 1,51 | 40 | TR | R |
| F | F | 170 | 1,39 | 30 | TP | P |
| F | F | 193 | 1,16 | 43 | BiR | R |
| F | F | 178 | 1,2 | 40 | JR | R |

Tableau 75 : Test de comparaison de moyenne sur l'ensemble des provenances pour l'excentricité des gros vaisseaux (Dr/Dt)

Une corrélation faible mais significative au seuil de 1% a été observée entre l'excentricité et l'âge chez les deux espèces (Figure 91a).

L'excentricité augmente avec l'accroissement annuel du cerne chez les deux espèces (Figure 91b), ce qui signifie que les chênes à cernes larges ont tendance à avoir des vaisseaux plus ovoïdes que ceux à cernes étroits. Ce résultat a été observé par plusieurs auteurs : HUBER et al. (1941) ; COURTOIS et al. (1964) et GASSON (1987).

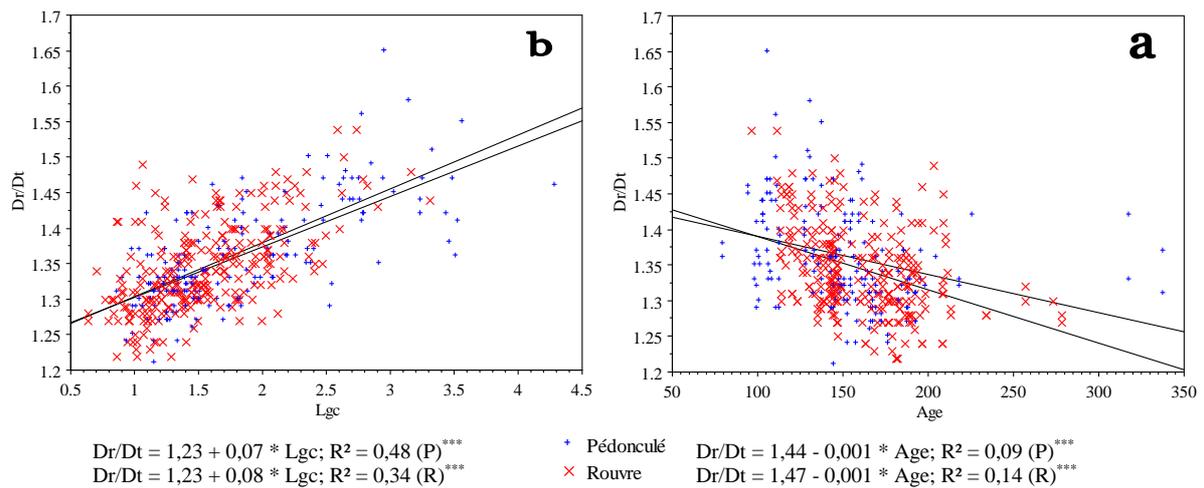


Figure 91 : Évolution de l'excentricité des gros vaisseaux en fonction de l'âge et de la largeur de cerne chez les chênes rouvres et pédonculés

3.7.5 Nombre de rangées tangentielles des gros vaisseaux

Le nombre de rangées de vaisseaux a été estimé sur la surface totale de chaque échantillon à partir des clichés radiographiques. le nombre moyen de rangées de gros vaisseaux de 1,62 pour l'ensemble des échantillons avec un coefficient de variation de 34% et des valeurs entre échantillons extrêmes de 1 à 3,5 (Tableau 76). Les chênes pédonculés ont en moyenne plus de rangées de vaisseaux (1,95) que les chênes rouvres (1,38). Ceci est confirmé dans les régions mixtes, où à âges et largeurs de cernes proches, les chênes pédonculés présentent un nombre de rangées de vaisseaux plus important que les chênes rouvres. Ceci a été mentionné dans la littérature par HUBER et *al.*(1941); CONSENS (1965); WALKER (1978) et FLETCHER, 1978 qui considèrent que le nombre de rangées de vaisseaux peut être un des critères de reconnaissance de l'espèce.

Nous constatons que le nombre minimal des rangées de vaisseaux chez les deux espèces est une rangée sauf Limousin qui a au moins 2 rangées de vaisseaux. En revanche, le nombre maximal est généralement plus élevé chez les pédonculés que chez les rouvres.

Parmi les rouvres, les régions extrêmes pour le nombre de rangées de vaisseaux sont celles de Darney (1,67) et Bitche (1), cette région n'a pas présenté de variabilité du nombre de rangées de vaisseaux ; le coefficient de variation est égal à 0, mais il faut noter que cette région regroupe les chênes les plus âgés des rouvres avec des cernes très étroits (1,18 mm). Parmi les pédonculés, les régions extrêmes sont celles de Tronçais (1,51) et Limousin (2,31).

| Espèce | Région | Nombre d'échantillons | Âge | Largeur de cerne (mm) | Nombre de rangées de vaisseaux | | | | |
|------------|------------|-----------------------|------------|-----------------------|--------------------------------|----------|------------|-------------|----------------|
| | | | | | Moyenne | Minimum | Maximum | Écart-type | Coef. Var. (%) |
| P+R | | 576 | 156 | 1,66 | 1,62 | 1 | 3,5 | 0,54 | 34 |
| P | | 246 | 150 | 1,83 | 1,95 | 1 | 3,5 | 0,51 | 26 |
| R | | 330 | 161 | 1,53 | 1,38 | 1 | 2,5 | 0,44 | 32 |
| R | BiR | 48 | 195 | 1,18 | 1 | 1 | 1 | 0 | 0 |
| R | BR | 48 | 136 | 1,74 | 1,44 | 1 | 2 | 0,5 | 35 |
| P | C | 50 | 152 | 1,93 | 1,96 | 1 | 3 | 0,57 | 29 |
| R | | 46 | 141 | 1,91 | 1,48 | 1 | 2 | 0,45 | 30 |
| P | D | 52 | 180 | 1,47 | 1,92 | 1 | 3 | 0,41 | 21 |
| R | | 44 | 169 | 1,51 | 1,67 | 1 | 2,5 | 0,43 | 26 |
| R | JR | 48 | 184 | 1,18 | 1,25 | 1 | 2 | 0,34 | 27 |
| P | LiP | 48 | 130 | 2,29 | 2,31 | 2 | 3,5 | 0,38 | 16 |
| P | MP | 48 | 121 | 2,1 | 2,02 | 1 | 3 | 0,4 | 20 |
| R | SR | 48 | 128 | 1,73 | 1,54 | 1 | 2 | 0,4 | 26 |
| P | T | 48 | 167 | 1,37 | 1,51 | 1 | 2 | 0,42 | 28 |
| R | | 48 | 174 | 1,48 | 1,32 | 1 | 2 | 0,39 | 30 |

Tableau 76 : Statistiques générales du nombre de rangées de vaisseaux dans le bois initial du chêne rouvre et pédonculé

Les analyses de variances sur les régions bispécifiques pour le nombre de rangées de vaisseaux montrent la présence d'un effet espèce et d'un effet région qui sont significatifs au seuil de 1% et explique respectivement 9% et 11% de la variabilité du nombre de rangées de vaisseaux (Tableau 77).

Nous constatons que l'effet provenance est hautement significatif dans les autres analyses concernant l'ensemble des provenances et les provenances monospécifiques et explique une partie importante de la variabilité du nombre de rangées de vaisseaux : 22%, 25% et 44%.

Malgré le fort effet provenance et espèce, la majorité de la variabilité du nombre de rangées de vaisseaux reste due à l'effet arbre qui explique 46%, 57% et 67% de cette variabilité.

| Type de l'échantillonnage | Nombre d'échantillons | Effet (variable) | ddl | Test F | Proportion expliquée de la variance | R ² |
|-------------------------------|-----------------------|------------------|-----|------------|-------------------------------------|----------------|
| Cîteaux Darney Tronçais | 144 | Espèce | 1 | 82,2 *** | 9% | 0,84 |
| | | Région | 2 | 46,85 *** | 11% | |
| | | Espèce*Région | 2 | 6,94 *** | 2% | |
| Toutes les provenances | 288 | Provenance | 11 | 105,51 *** | 44% | 0,90 |
| | | Arbre | 276 | 4,41 *** | 46% | |
| Rouvre | 165 | Région | 6 | 52,91 *** | 22% | 0,89 |
| | | Arbre | 158 | 6,25 *** | 67% | |
| Pédonculé | 123 | Région | 4 | 42,88 *** | 25% | 0,82 |
| | | Arbre | 118 | 3,28 *** | 57% | |

Tableau 77 : Analyse de variance sur le nombre de rangées de vaisseaux dans le bois initial

La comparaison de moyenne sur l'ensemble des provenances pour le nombre de rangées de vaisseaux montre qu'à l'exception de Tronçais, les provenances de chênes pédonculés ont en moyenne plus de rangées de vaisseaux que les provenances de chênes rouvres. Les provenances sont classées dans six groupes différents (Tableau 78) :

- dans le premier, Limousin elle représente la largeur moyenne la plus élevée de l'échantillonnage ;
- le deuxième regroupe trois provenances de chênes pédonculés qui sont bien classées de façon croissante en fonction de l'âge et décroissante en fonction de la largeur de cerne à l'intérieur du groupe ;
- le troisième ne contient que les chênes rouvres Darney ;
- le quatrième rassemble les jeunes chênes rouvres avec des accroissement assez larges ceux de Saint Palais, de Cîteaux et de Bertrange et les chênes pédonculés de Tronçais ;
- le cinquième renferme les chênes rouvres âgés de Tronçais et de Jupille ;
- dans le dernier on trouve la provenance de chêne rouvre de Bitche. Elle représente à la fois l'âge moyen le plus élevé (195 ans) et la largeur moyenne de cerne la plus étroite (1,18 mm).

| Groupement (Duncan) | Âge | LgC (mm) | Rang. VX | Échantillons | Provenance | Espèce |
|---------------------|------------|-------------|-------------|--------------|------------|----------|
| A | 130 | 2,29 | 2,31 | 48 | LiP | P |
| B | 121 | 2,1 | 2,02 | 48 | MP | P |
| B | 152 | 1,93 | 1,96 | 50 | CP | P |
| B | 180 | 1,47 | 1,92 | 52 | DP | P |
| C | 169 | 1,51 | 1,67 | 44 | DR | R |
| D | 128 | 1,73 | 1,54 | 48 | SR | R |
| D | 167 | 1,37 | 1,51 | 48 | TP | P |
| D | 141 | 1,91 | 1,48 | 46 | CR | R |
| D | 136 | 1,74 | 1,44 | 48 | BR | R |
| E | 174 | 1,48 | 1,32 | 48 | TR | R |
| E | 184 | 1,18 | 1,25 | 48 | JR | R |
| F | 195 | 1,18 | 1,00 | 48 | BiR | R |

Tableau 78 : Test de comparaison de moyennes sur l'ensemble des provenances pour nombre de rangées des gros vaisseaux (Rang. VX)

Les statistiques citées ci-dessus montrent que les deux espèces peuvent avoir des nombres de rangées de vaisseaux très variables en fonction de la provenance ou même de l'individu, mais la proportion d'individus change beaucoup d'une espèce à l'autre en fonction du nombre de rangées de vaisseaux.

Nous constatons que la majorité des chênes rouvres n'a qu'une seule rangée de vaisseaux, en revanche, la plupart des chênes pédonculés en ont deux (Figure 92). Nous pouvons remarquer

aussi que la proportion de chêne pédonculé est plus importante dans les classes où le nombre de rangées de vaisseaux est plus grand, alors que la proportion de chêne rouvre est plus grande dans les classes où le nombre de rangées de vaisseaux est plus faible.

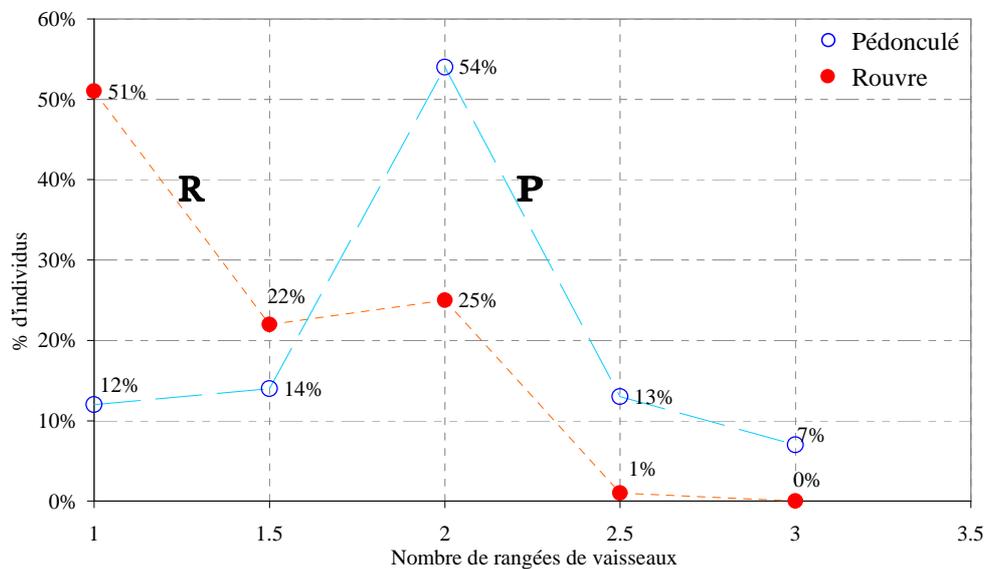


Figure 92 : Pourcentage d'individu dans chaque classe de nombre de rangées de vaisseaux en fonction de l'espèce

La matrice des corrélations (Tableau 79) montre que les caractéristiques des vaisseaux étudiés précédemment sont liées entre elles par des relations plus ou moins significatives chez les deux espèces sauf les corrélations suivantes (soulignées dans le tableau) :

- chez les chênes rouvres, entre le nombre de rangées de gros vaisseaux et leur proportion et entre la surface individuelle des gros vaisseaux leur excentricité ;
- chez les chênes pédonculés, entre le nombre de rangés des vaisseaux, leur excentricité et leur surface individuelle.

| Esp. | Variables | %GVX | NVX | Dr/Dt | S _{ind} VX | Rang. VX | Esp. |
|-----------------|---------------------|-----------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|--------------|
| Chêne pédonculé | %GVX | 1 | 0.87 <i><0.0001</i> | -0.31 <i><0.0001</i> | 0.16 <i>0.009</i> | -0.10 <i>0.115</i> | Chêne rouvre |
| | NVX | 0.86 <i><0.0001</i> | 1 | -0.23 <i>0.0001</i> | -0.33 <i><0.0001</i> | -0.20 <i>0.001</i> | |
| | Dr/Dt | -0.32 <i><0.0001</i> | -0.26 <i>0.0007</i> | 1 | -0.09 <i>0.1268</i> | 0.45 <i><0.0001</i> | |
| | S _{ind} VX | 0.26 <i>0.0008</i> | -0.26 <i>0.0006</i> | -0.12 <i>0.135</i> | 1 | 0.22 <i>0.0002</i> | |
| | Rang. VX | -0.20 <i>0.0087</i> | -0.17 <i>0.0268</i> | 0.64 <i><0.0001</i> | -0.05 <i>0.5065</i> | 1 | |

Tableau 79 : Matrice symétrique des corrélations entre les caractéristiques des gros vaisseaux chez les chênes rouvre et pédonculé

3.8 Conclusion

- Chez les deux espèces de chêne, la texture, la proportion de fibres, le nombre et l'excentricité des gros vaisseaux augmentent, tous, avec l'accroissement de la largeur de cerne et diminuent avec l'âge. En revanche, la proportion du bois initial, la proportion de parenchyme et petits vaisseaux, la proportion et le nombre des gros vaisseaux diminuent avec l'accroissement de la largeur de cerne et augmentent avec l'âge ;
- Chez les chênes rouvres, le nombre et la proportion des rayons ligneux ne dépendent ni de l'âge ni de la largeur de cerne, chez les chênes pédonculés, ils sont plus ou moins liés à ces deux variables ;
- Chez les chênes pédonculés, la surface individuelle des gros vaisseaux ne dépend ni de l'âge ni de la largeur de cerne, chez les chênes rouvres, elle est liée à la largeur de cerne mais pas à l'âge ;
- Chez les chênes rouvres, la largeur moyenne des rayons ligneux est indépendante de l'âge et de la largeur de cerne, chez les chênes pédonculés, elle est légèrement liée à la largeur de cerne, mais ne dépend pas de l'âge ;
- Des différences significatives entre les deux espèces de chênes (rouvre et pédonculé) ont été mises en évidence pour toutes les caractéristiques anatomiques étudiées (texture, proportion des tissus, caractéristiques des gros vaisseaux et des rayons ligneux) sauf la proportion des rayons ligneux plurisériés et l'excentricité des gros vaisseaux ;
- A l'intérieur de chaque espèce, l'effet provenance est toujours significatif pour toutes les caractéristiques anatomiques étudiées.

Références bibliographiques

ACKERMANN F., 1995,

Etude 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, 156p.

BAKOUR R., 1997,

Liaisons entre l'anatomie et certaines propriétés du bois des Chênes rouvre et pédonculé (*Quercus petraea*, *Quercus robur*). DEA Sciences de Bois, ENGREF Nancy, 30 p.

BARBE C., 1994,

Proposition d'une méthode de typologie des gros rayons ligneux chez le chêne rouvre (*Quercus petraea* Liebl). Variabilité interarbre de certaines caractéristiques des gros rayons ligneux. DEA Sciences de Bois, ENGREF Nancy, 30p

BOSSHARD H. H., 1965,

Aspects of the aging process in cambium and xylem. *Holzforschung*, 19 (3) : 65 –69.

BERGES 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 doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 348 p.

BRAUN H.J., 1983,

Zur Dynamik des Wassertransportes in Bäumen. Berlin-Deutsche Botanische Gesellschaft, 96, 29 – 47.

BREDA N. & 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.

CASPERSON G., 1967,

Über die Bildung von Zellwänden bei Laubhölzern. *Mitt. 4 : Untersuchungen an Eiche* (*Quercus robur* L.). *Holzforschung* 21 (1), p. 1 – 6.

CINOTTI B., 1989,

La Gélivure des chênes : front de gel source de contraintes internes, incidence des propriétés anatomiques et mécano-physiques. Thèse de docteur en Sciences du bois, INPL, 159 p.

CARLQUIST Sh., 1988,

Comparative wood anatomy, systematic, ecological, and evolutionary aspects of dicotyledon wood. Springer Verlag, 436 p.

COCHARD M., TYREE M. T., 1990,
Xylem dysfunction in *Quercus* : vessel sizes, tyloses, cavitation and seasonal changes in embolism. *Tree Physiology*, 6 : p. 393 – 407.

COLLARDET J., BESSET J., 1992,
Bois commerciaux. Feuillus des zones tempérées. Tome II, Vial H. & centre Technique du bois de l'Ameublement, Dourdan, 400 p.

COUSENS J.E., 1965,
The status of the pedunculata and sessile oak in Britain. *Watsonia*, n° 6, p. 161 – 176.

COURTOIS H., ELLING W. & BUSH A., 1964,
Einfluss von Jahrringbreite und alter auf den mikroskopischen Bau von Trauben- und stieleichenholz. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 5/6, p. 181 –191.

DENDAN A., 1996,
Analyse de la variabilité de quelques caractéristiques des gros rayons ligneux chez le chêne rouvre (*Quercus petraea lieb.*). Possibilité d'une estimation non destructive en forêt. DUT statistique et traitement informatique des données, Université de Metz – ERQB, INRA Nancy, 74 p.

DERET-VARCIN E., 1983,
Étude comparative de la qualité du bois de trois types de Chênes (rouvres, pédonculés et intermédiaires) en forêt de Morimond. *Ann. Sci. For*, 1983, 40 (4), pp. 373-398.

EYONO OWOUNDI R., 1992,
Modélisation de la rétractabilité 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 *Q. petraea Liebl.* Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 270 p.

FENGEL N., WEGENER G., 1989,
Wood : chemistry, ultrastructure, reactions. Walter de Gruyter, Berlin-New York, 613 p.

FEUILLAT F., KELLER R., HUBER F., 1998,
« Grain » et qualité du chêne de tonnellerie (*Quercus robur L.*, *Quercus petraea Liebl.*) : Mythe ou réalité ? (Première partie). *Revue des Œnologues* n° 87, p. 11 - 16.

FEUILLAT F., DUPOUEY J.L., SCIAMA D., KELLER R., 1997,
A new attempt at discrimination between *Quercus petraea* and *Quercus robur* based on wood anatomy. *Can. J. Res.* Vol. 27, N° 3: p. 343 - 351

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.

FEUILLAT F., 1991,
Etude de caractère exploratoire sur quelques aspects de la qualité du chêne de tonnellerie en relation avec la qualité des vins. DEA Sciences de Bois, ENGREF Nancy, 84 p.

FEUILLAT F., HUBER F., KELLER R., 1993,
La porosité du bois de Chêne (*Quercus robur* L. ; *Quercus petraea* Liebl.) utilisé en tonnellerie. Relation avec la variabilité de quelques caractéristiques physiques et anatomiques du bois. Revue Française d'Œnologie n° 142, P. 5 - 19.

FLETCHER J., 1978,
Dating the geographical migration of *Quercus petraea* and *Quercus robur* in holocene times. Tree-ring Bulletin, vol. 38, p. 45 - 47.

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), p. 149 – 166.

GERRY E. J., 1914,
Tyloses : their occurrence and practical significance in some American wood. Journal of Agricultural Research, 1 : P445 – 469.

GÖRHRE K., WAGENKNECHT E., 1995,
Die Roteiche und ihr Holz. Deutscher Bauernverlag, 300 p.

GRANIER A., ANFODILLO T., SABATTI M., COCHARD H., DREYER E., TOMASI M., VALENTINI R. & BREDA N., 1994,
Axial and radial water flow in the trunks of oak trees : a quantitative and qualitative analysis. Tree Physiology, 14, p. 1383 – 1396.

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.

GROSSER D., 1977,
Die Hölzer Mitteleuropas. Ein mikrophotographischer Lehratlas. Springer Verlag, Berlin Heildeberg, New york.

GUILLEY E. et NEPVEU G., 2003,
Interprétation anatomique des composantes d'un modèle mixte de densité du bois chez le Chêne sessile (*Quercus petraea* Liebl.): âge du cerne compté depuis la moelle, largeur de cerne, arbre, variabilité interannuelle, duraminisation. Ann. For. Sci., 60 (4), pp. 331-346.

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, 206p.

HILLIS W. E., 1987,
Heartwood and tree exudates. Springer Verlag, Berlin Heildeberg, New york, 268 p.

HUBER B., 1935,
Die physiologische Bedeutung der Ring- und zerstreutporigkeit. Berlin-Deutsche Botanische Gesellschaft, 53, p. 711 – 719.

HUBER B., HOLDHEIDE W. & RAACK K., 1941,
Zur Frage der Unterscheidbarkeit des Holzes von stiel- und traubeneiche. Holz als Roh- und Werkstoff, t. 4, (11), p. 373 – 380.

HUBER F., 1982,
Effet de défoliations des chênes par les hannetons sur la structure du bois. Revue Forestière Française, Vol. 3, p. 185 – 190.

HUBER F., 1993,
Déterminisme de la surface des vaisseaux du bois des Chênes indigènes (*Quercus robur L.*, *Quercus petraea Liebl*). Effet individuel, effet de l'appareil foliaire, des conditions climatiques et de l'âge de l'arbre. Ann. Sci. For, 50 (5), p. 509 - 524.

HUBER F., KELLER R., 1993,
Variabilité de la constitution anatomique d'accroissements annuels de Chênes indigènes. Acta Botanica Gallica, 140 (4), p. 383 - 388.

JACQUIOT C., TRENARD Y. & DIROL D., 1973,
Atlas d'anatomie des bois des Angiospermes (Essences feuillus). Tome I, Centre Technique du Bois, Paris, 175 p.

KELLER R., 1987,
Différentes variétés de chêne et leur répartition dans le monde. Connaissance de la vigne et du vin, n° 3, 1987, p. 191-229.

KELLER R., 1994,
La constitution du bois, chapitre I de l'ouvrage « Le bois matériau d'ingénierie », ARBOLOR Nancy, 433 p.

KLUMBERS 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 l'ENGREF, Sciences forestières du bois, 195p.

KUČERA L. J., 1985,
Zur Morphologie der Interzellularen in den Markstrahlen. Teil 2 :
Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen. Vierteljahrschrift-der Naturforschungs-gesellschaft in Zürich, 130 (2), P.157 – 198.

LAHBABI R., 1995,
Mesure par analyse d'image de paramètres microscopiques requis pour une prédiction déterministe des propriétés du bois. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences forestières, 141 p.

LONGMAN K. A., COUTS M. P., 1974,
Physiology of the oak tree. In: The British oak (H. G. Morris et F.H. Perrings, Eds.),
Faringdom, p. 194 – 221.

MARCHAL R., 1987,
Valorisation par tranchage et déroulage des bois de chênes méditerranéens (*Quercus ilex*,
Quercus pubescens, *Quercus suber*).Thèse de docteur en Sciences du bois, INPL, 294 p.

MARION C., 2001,
Caractérisation de l'agencement cellulaire du bois à l'aide de critères morphologiques
mesurables par analyse d'image. DEA Sciences de Bois, ENGREF Nancy, 29 p.

MEYER R. W., 1967,
Tyloses development in white oak. Forest Products Journal, 17, P 50 – 56.

MURMANIS L., 1975,
Formation of tyloses in felled *Quercus rubra* L. Wood Science and Technology, 9, p 3 – 14.

NEPVEU G., HUBER F., 1991,
Variabilité inter- et intraarbre du nombre de gros rayons ligneux chez les chênes indigènes
(*Quercus robur* L, *Quercus petraea* Liebl). Procédure d'échantillonnage. Annexe au compte-
rendu final du rapport C.E.E.' 'Genetics and breeding of oaks'. INRA, Équipe de Recherche
sur la Qualité des Bois, 14 p.

NEPVEU G., 1991,
La variabilité du bois. Extrait de la 2^{ème} édition de « Le bois matériau d'ingénierie »,
ARBOLOR Nancy, 433 p.

NEPVEU G.,1994B,
Qualités, défauts et utilisations du bois de chêne rouge. Comparaison avec les chênes
indigènes. Effets de la sylviculture, du milieu et des facteurs génétiques. In : 'Le chêne
rouge d'Amérique' (Timbal, J., Le Goff. N., et Nepveu G., Eds) INRA, Pais, p. 287 – 347.

PANSHIN A. J. & DE ZEEUW C., 1980,
Structure, identification, properties and uses of the commercial woods of the United States
and Canada. Textbook of Wood Technology, 722p.

PECHMANN H. von, AUFSEß H. von, 1973,
Struktur und Farb als Qualitätsmerkmale von Eichenfurnierholz. Holzforschung, 27(2), pp.
51 – 59.

POLGE H., KELLER R., 1973,
Qualité du bois et largeur d'accroissements en forêt de Tronçais. Annales des Sciences
Forestières, 30 (2), p. 91-125.

RAO R. V., AEBISCHER D. P.& DENNE M. P., 1997,
Latewood density in relation to wood fibre diameter, wall thickness, and fibre and vessel
percentages in *Querus robur* L. IAWA, Vol. 18 (2), p. 127 – 138.

SACHSSE H., 1984,
Einheimische Nutzhölzer und ihre Bestimmung nach makroskopischen Merkmalen. Pareys
Studententexte 44, 160 p. Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin.

SAB U., ECKSTEIN D., 1994,
Preparation of large thin sections and surfaces of wood for automatic image analysis.
Holzforschung, 48 (2), p 117 – 118.

SAVILL P. S., 1986,
Anatomical characters in the wood of oak (*Quercus robur L.* and *Quercus petraea Liebl.*)
which predispose tree to shake. Commonwealth forestry Review, 65 (2), p. 109 – 116.

SCHWEINGRUBER F. H., 1978,
Mikroskopische Holz Anatomie. Kommissionsverlag Zürcher AG, Zug, Suisse.

SCIAMA D., 1995,
Estimation de la proportion et de la répartition des tissus d'un cerne de chêne sessile
(*Quercus petraea Liebl.*) à partir de la connaissance des densités et des largeurs de son bois
initial et de son bois final. DEA Sciences de Bois, ENGREF Nancy, 30 p.

STEVENS W. C., TURNER N., 1970,
Wood bending handbook. London :Her Majesty's Stationery Office, janvier, 109 p

STEWART C. M., 1966,
Excretion and heartwood formation in living tree. Science 153, p. 1068 – 1074.

VANSTEENKISTE D. et BREDA N., 2002,
Caractéristiques anatomiques du cerne de chêne et perspectives d'interprétation
écophysiologique et climatique. Séminaire "Biologie hivernale", Groupe d'Etude de
l'Arbre, Saint-Flour, 21 – 22 mars 2002. 12 p.

VANSTEENKISTE D., 2003,
Mise au point et application d'une méthode rapide d'analyse quantitative de l'anatomie du
bois de chêne : analyse d'image automatisée de clichés radiographiques de barrettes
transversales de bois de faible épaisseur. Thèse de doctorat de l'ENGREF, Sciences
forestières et du bois, 403 p.

VENET J., KELLER R., 1986,
Identification et classement des bois français, 2^{ème} édition, ENGREF Nancy, 308 p.

VENET J., 1962,
Tournées relatives au chêne, chêne rouvre (*Quercus sessiflora smith.*) et chêne pédonculé
(*Quercus pedunculata Ehr.*). document ENGREF.

VENET J., 1974,
Identification et classement des bois français, ENGREF Nancy, 308pp.

WAGENFÜHR H., SCHEIBER C., 1974,
Holz atlas. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 690 pp.

WAGENFÜHR H., 1989,
Anatomie des Holzes. VEB Fachbuchverlag, Leipzig, 334 p.

WALKER F. S., 1978,
Pedonculate and sessile Oaks : species determination from differences between their wood.
In "Dendrochronology in Europe", Fletcher J., S. British Archaeological Reports,
International series 51: pp. 329 – 338.

WAREING P. F., 1951,
Growth studies in woody species. 4. The initiation of cambial activity in ring-porous
species. *Physiol. Plant.* 4, p. 446 – 562.

WHEELER E. A., BAAS P., 1991,
A survey of the fossil record for dicotyledonous wood and its significance for
evolutionary and ecological wood anatomy. *IAWA Bull. n.s.* 12 (3), p. 275 – 332.

ZIEGLER H., 1968,
Biologische Aspekte der Kernholzbildung. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 46, p. 61 – 68.

ZIEGLER H., 1983,
Physiologie. In : "Lehrbuch der Botanik für Hochschulen", Gustav Fischer Verlag,
Stuttgart, New-York, pp. 310 – 372.

ZIMMERMANN M. H., 1983,
Xylem structure and the ascent of sap. Springer Series in Wood Science, Springer Verlag,
139 p.

ZÜRCHER E., KUČERA L. & BOSSHARD H. H., 1985,
Bildung und Morphologie der Thyllen : eine Literaturübersicht. *Vierteljahrsschrift der
Naturforschungsgesellschaft in Zürich*, 130, pp. 311 – 333.

CHAPITRE VI. SYNTHÈSE

1 Influence de l'espèce et de la région

Le Tableau 80 rassemble les paramètres pour lesquels des différences significatives en fonction de l'espèce et / ou de la région ont été observées.

Dans les régions bispécifiques, à condition de croissance comparable (sylviculture et milieu) c'est à dire à largeur de cerne et âge "identiques" (largeur de cerne et âge non significativement différents entre les deux espèces), les deux espèces présentent des différences significatives pour la plupart des variables étudiées (19 paramètres / 23).

Les paramètres les plus discriminants sont : la densité du bois initial, la densité moyenne, l'angle de teinte, la proportion de gros vaisseaux, la texture et la densité du bois final.

En moyenne, comparativement au chêne pédonculé, le chêne rouvre se caractérise par :

- une densité du bois initial et du bois final plus forte. Ceci se traduit au niveau anatomique par une texture et une proportion de fibres plus élevées et au contraire, par des proportions de vaisseaux et de parenchyme moins forte. La différence concernant la proportion de gros vaisseaux s'explique par des gros vaisseaux à la fois moins nombreux (moins de rangées de gros vaisseaux) et ayant une surface individuelle plus faible ;
- des rayons ligneux moins nombreux mais plus larges ; mais il n'y a pas de différence sur leur proportion;
- un angle de teinte plus faible se traduisant par une tonalité moins jaune (plus rosée) ;
- une clarté plus élevée ;
- une épaisseur d'écorce plus faible, une largeur et un nombre de cernes dans l'aubier plus élevés.

En ce qui concerne l'effet région, on observe également des différences significatives pour la plupart des variables étudiées (20 paramètres / 23).

Les résultats de l'analyse de variance sur les provenances monospécifiques montrent un fort effet région sur tous les paramètres analysés. Cependant, une large part de ces effets "région" peuvent être expliqués par les paramètres largeur de cerne et âge qui diffèrent significativement entre les régions.

Cette hypothèse peut être étayée par les corrélations significatives observées pour les deux espèces entre la largeur de cerne, l'âge et la plupart des paramètres étudiés.

Lorsque les corrélations ne sont pas significatives ou faiblement significatives (caractéristiques de rayons ligneux, surface individuelle des gros vaisseaux, angle et saturation de la teinte), l'effet région reste significatif mais faible.

| Variable | Moyenne | | Liaison avec LgC (R ²) | | Liaison avec l'âge (R ²) | | Analyses de variance | | | |
|----------------------------|---------|-----------|------------------------------------|-----------|--------------------------------------|-----------|----------------------|--------------|--------------------|-----------------------|
| | Rouvre | Pédonculé | Rouvre | Pédonculé | Rouvre | Pédonculé | Régions mixtes | | Effet région | |
| | | | | | | | Effet espèce | Effet région | Rouvre (7 régions) | Pédonculé (5 régions) |
| LC (mm) | 1,65 | 2,01 | | | - 0,59*** | - 0,46*** | NS | 22% | 43% | 46% |
| Âge (année) | 161 | 150 | | | | | NS | 16% | 55% | 35% |
| Ee (cm) | 1,06 | 1,31 | - 0,015* | NS | 0,057*** | 0,02* | 11% | 1% * | 17% | 16% |
| LCA (mm) | 1,72 | 1,9 | 0,54*** | 0,38*** | - 0,27*** | - 0,21*** | 2% | 12% | 17% | 26% |
| NCA | 19 | 16 | - 0,18*** | - 0,09*** | 0,12*** | 0,09*** | 1% | 2% | 8% | 7% |
| LA (cm) | 3,07 | 2,78 | 0,37*** | 0,39** | - 0,17*** | - 0,2** | 15% | 14% | 18% | 31% |
| L* | 70,9 | 70,4 | 0,033*** | 0,034* | 0,013* | -0,051*** | 2% | 1% * | 14% | 11% |
| C* | 26,08 | 25,95 | NS | 0,08*** | NS | 0,08*** | NS | 2% ** | 5% | 9% |
| h* (degré) | 64,9 | 65,8 | 0,12*** | NS | - 0,03*** | NS | 21% | 5% | 18% | 8% |
| Infra (kg/m ³) | 541 | 516 | 0,36*** | 0,22*** | - 0,27*** | - 0,26*** | 21% | 6% | 14% | 29% |
| DBI (kg/m ³) | 551 | 525 | 0,25*** | 0,01*** | - 0,18*** | - 0,07*** | 23% | NS | 13% | 34% |
| DBF (kg/m ³) | 787 | 761 | 0,23*** | 0,07*** | - 0,20*** | - 0,10*** | 14% | 3% | 9% | 23% |
| DMoy (kg/m ³) | 692 | 665 | 0,37*** | 0,20*** | - 0,3*** | - 0,22*** | 21% | 4% | 17% | 31% |
| Texture | 54,5 | 52,5 | 0,61*** | 0,59*** | - 0,4*** | - 0,44*** | 15% | 16% | 33% | 26% |
| % BI | 43,3 | 44,5 | - 0,62*** | - 0,56*** | 0,39*** | 0,45*** | 11% | 19% | 32% | 26% |
| LRL (mm) | 0,2 | 0,18 | NS | 0,04** | NS | NS | 10% | NS | 2% | 10% |
| NRL/cm | 3,6 | 4,2 | NS | 0,03** | NS | 0,03** | 8% | NS | 2% | 4% |
| %RL | 6,9 | 7,3 | NS | 0,13*** | NS | 0,02* | NS | 1% * | 3% | 8% |
| %Fibre | 33,6 | 30,7 | 0,3*** | 0,13*** | - 0,24*** | - 0,23*** | 6% | 11% | 13% | 27% |
| %PPvx | 48,45 | 49,58 | - 0,17*** | - 0,04*** | 0,13*** | 0,12*** | 1% | 12% | 12% | 24% |
| %VX | 11,2 | 12,4 | - 0,50*** | - 0,47*** | 0,36*** | 0,36*** | 15% | 12% | 23% | 19% |
| NVX/mm ² | 2,1 | 2,2 | - 0,61*** | - 0,47*** | 0,36*** | 0,35*** | 6% | 9% | 20% | 17% |
| SindVX (mm ²) | 0,053 | 0,058 | 0,05*** | NS | NS | NS | 7% | 2% | 3% | 2% |
| Ext | 1,344 | 1,363 | 0,34*** | 0,48*** | - 0,14*** | - 0,09*** | NS | 9% | 16% | 19% |
| NrangVx | 1,38 | 1,95 | 0,24*** | 0,41*** | - 0,15*** | - 0,06*** | 9% | 11% | 22% | 25% |

Tableau 80 : Résultats des principales analyses sur les caractéristiques physiques et anatomiques du bois du chêne rouvre et pédonculé

NB. Le pourcentage représente la proportion expliquée de la variance par le facteur étudié

Pour montrer l'effet espèce et l'effet région indépendamment de la largeur de cerne et de l'âge, nous étudions dans la suite un exemple du profil microdensitométrique en contrôlant ces deux paramètres.

1.1 Effet de l'espèce et de la région sur le profil de densité en contrôlant la largeur de cerne et l'âge

➤ En contrôlant la largeur de cerne :

La Figure 93 fait apparaître, à largeur de cerne proche, des différences à la fois entre les deux espèces et entre les régions notamment dans le cas des chênes pédonculés.

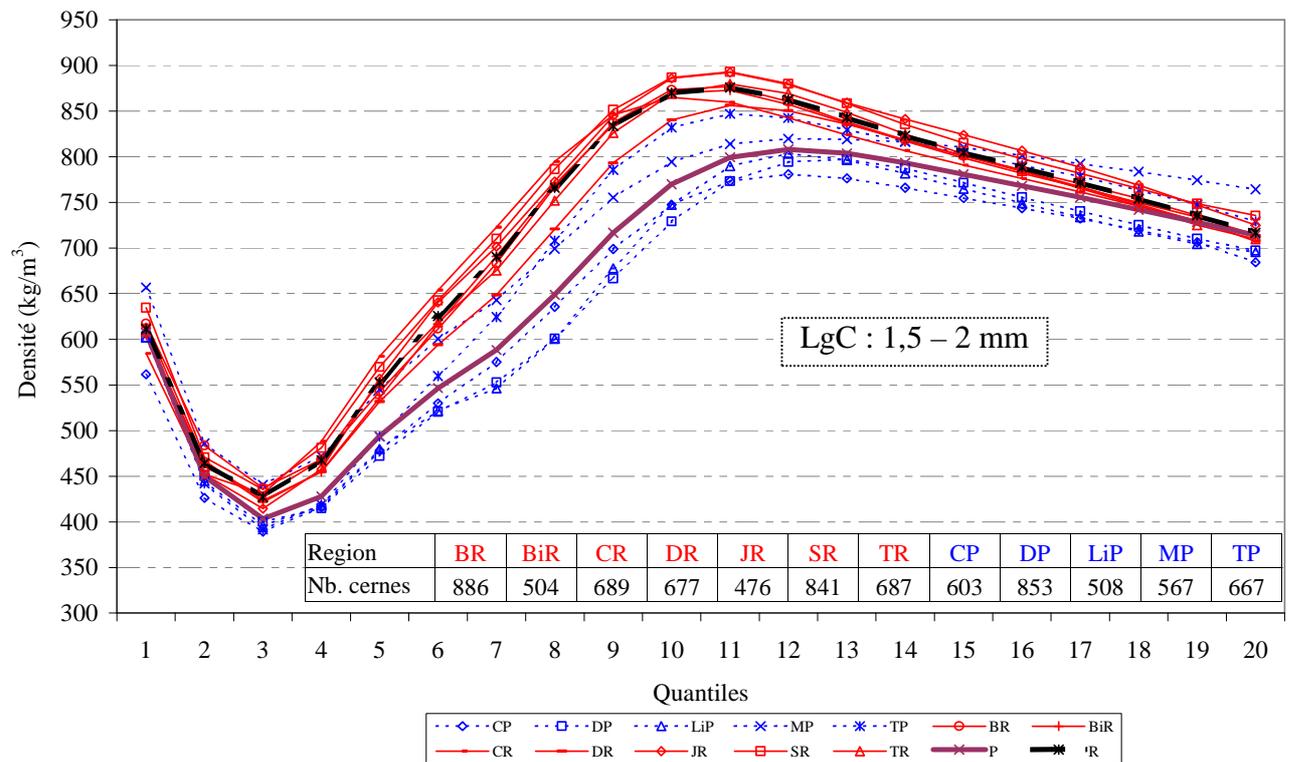


Figure 93 : Évolution de la densité intra-cerne en fonction de la provenance à largeur de cerne "fixée"

➤ À largeur de cerne et âge "fixés"

La Figure 94, où la largeur de cerne et l'âge sont contrôlés, confirme les différences observées ci-dessus entre les provenances pour une largeur de cerne considérée constante.

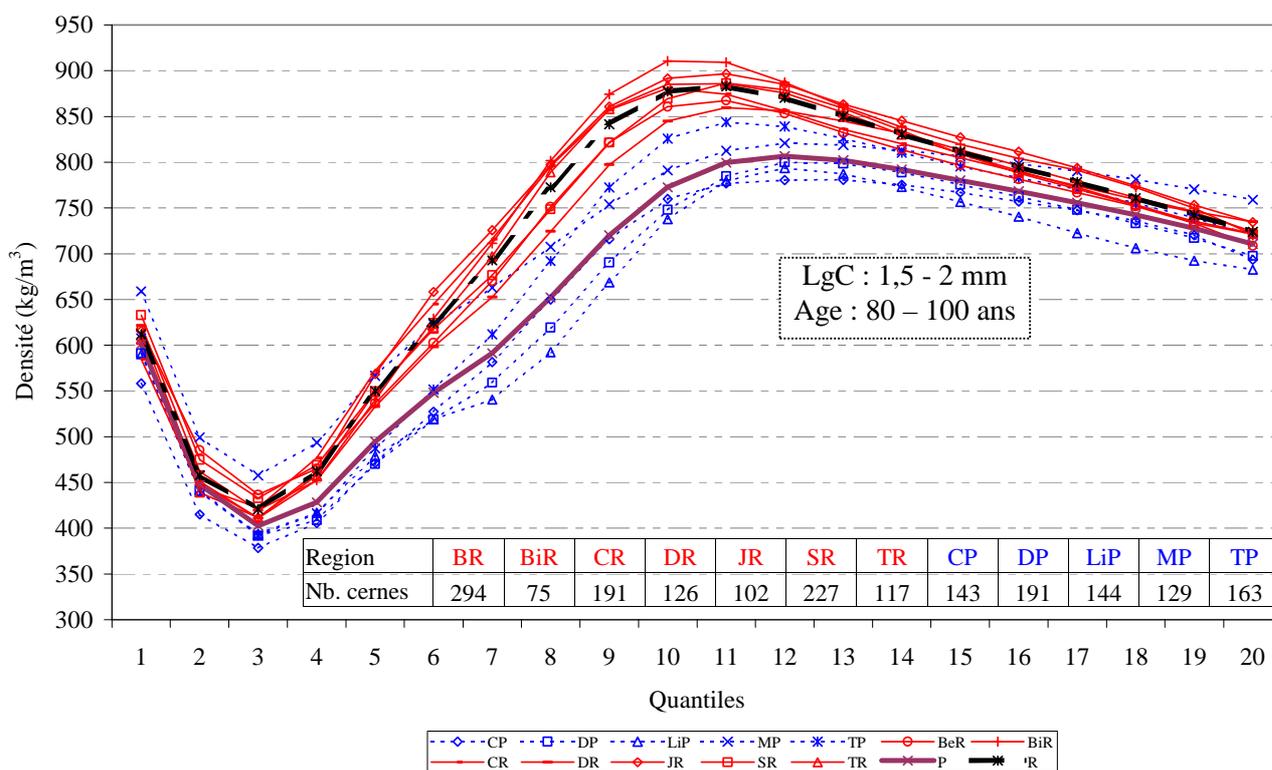


Figure 94 : Évolution de la densité intra-cerne en fonction de la provenance à largeur de cerne et âge contrôlés

Ces profils qui constituent des signatures de l'espèce et de la région peuvent être interprétés par des différences anatomiques.

Le grand écart observé entre les deux espèces dans la zone médiane du profil qui correspond à la première partie du bois final (Q9 – Q4) peut être expliqué par une richesse en fibres plus importante chez le chêne rouvre que chez le chêne pédonculé. Par ailleurs, on constate aussi une différence dans la zone du profil correspondant à la transition entre le bois initial et le bois final qui peut être reliée à une zone initiale poreuse plus large, riche en gros vaisseaux chez le chêne pédonculé comparativement au chêne rouvre.

Chez le chêne pédonculé, l'inflexion dans la zone du profil correspondant au quantile 7 peut être attribuée à la présence des gros vaisseaux dans la zone de transition.

Dans les parties initiales (Q1 et Q2) et finales (Q16 à Q20) du profil, les différences entre les deux espèces ont tendance à s'amenuiser fortement. Ceci se traduit dans la partie finale du cerne (Q10 à Q20) par une décroissance plus forte chez le chêne rouvre que chez le chêne pédonculé chez qui la densité a tendance à être plus constante.

En ce qui concerne les différences entre régions, on remarque qu'elles sont plus marquées chez le chêne pédonculé que chez le chêne rouvre. Par exemple, la région Monlezun-Laurède (MP) se caractérise par une densité élevée notamment dans la partie finale du cerne

(Q10 – Q20), contrairement à la région Limousin (LiP) qui présente les valeurs de densité les plus faibles tant dans la zone de transition (Q3 –Q8) que dans la partie finale du cerne (Q10 – Q20)

Parmi les corrélations bien connues, on peut présenter celle liant la densité moyenne (DMoy) à la largeur de cerne.

En accord avec la première étude sur le sujet (POLGE et KELLER, 1973), pour les deux espèces, on observe que la densité augmente fortement de manière quasiment linéaire avec la largeur de cerne jusqu'à 2 mm. Au delà de cette largeur, l'augmentation se poursuit mais avec une intensité nettement moindre (Figure 95). Bien que les deux espèces présentent le même comportement en fonction de la largeur de cerne, les chênes rouvres ont une densité moyenne systématiquement plus élevée.

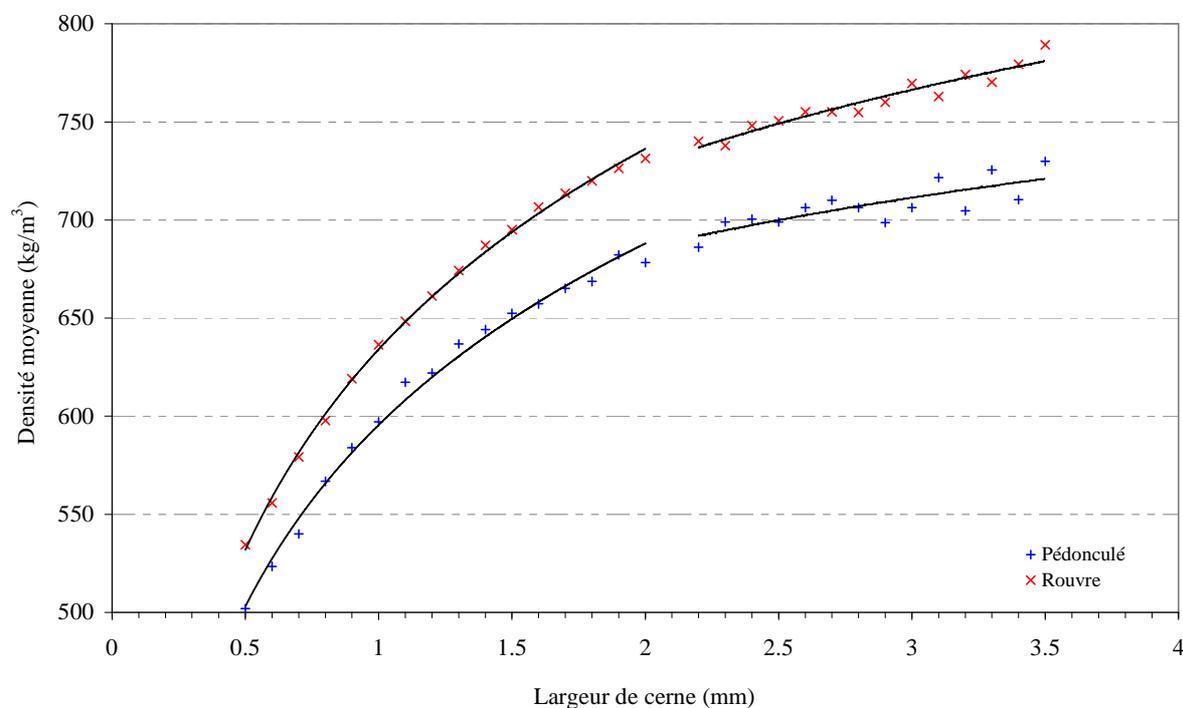


Figure 95 Évolution de la densité moyenne en fonction de la largeur de cerne chez les chênes rouvre et pédonculé

Peut-on expliquer cette relation par l'anatomie, et si, oui, quels sont les éléments anatomiques explicatifs et quelle est la part prise par chaque élément anatomique dans cette relation?

Pour répondre à cette question, nous avons réalisé des analyses de régressions progressives multiples en trois étapes, sur l'infradensité qui est fortement liée à la densité moyenne, en ne retenant que les régressions qui présentent des significations inférieures ou égales à 5 % et ceci sur :

1. L'ensemble de l'échantillonnage toutes régions confondues

Les analyses effectuées sur l'ensemble de l'échantillonnage (442 échantillons) pour la relation entre la proportion des gros vaisseaux du bois initial (vx), la proportion de l'ensemble des parenchymes et petits vaisseaux du bois final (PPvx) et l'infradensité, en tenant compte de l'espèce, donnent les relations suivantes :

$$(Relation 1) \text{ Chêne pédonculé : infradensité} = - 3,74 PPvx - 6,90 vx + 788,45 ;$$

$$(Relation 2) \text{ Chêne rouvre : infradensité} = - 3,39 PPvx - 7,58 vx + 789,79.$$

Les relations (1 et 2) sont hautement significatives au seuil de 1‰, chez les deux espèces. Elles expliquent 81% de la variabilité de la densité chez les pédonculés et 79% chez les rouvres, nous remarquons que la relation est légèrement meilleure dans le cas du pédonculé ce qui est, peut-être, dû à la variabilité de la structure anatomique entre les deux espèces.

2. Sur l'échantillonnage des régions monospécifiques

D'autres analyses faites sur les provenances monospécifiques (225 échantillons) ont montré la présence des relations suivantes :

$$(Relation 3) \text{ Chêne pédonculé : infradensité} = - 4,16 PPvx - 7,43 vx + 818,69 ;$$

$$(Relation 4) \text{ Chêne rouvre : infradensité} = - 3,29 PPvx - 7,01 vx + 779,16.$$

Ces relations (3 et 4) sont significatives au seuil de 1‰, chez les deux espèces, et expliquent une grande partie de la variabilité de l'infradensité qui représente 80% pour les pédonculé et 75% pour les rouvres.

3. Sur l'échantillonnage des régions bispécifiques

Dans les trois régions mixtes (217 échantillons) où les deux espèces sont présentes, nous avons obtenu les relations suivantes :

$$(Relation 5) \text{ Chêne pédonculé : infradensité} = - 3,31 PPvx - 6,01 vx + 751,89 ;$$

$$(Relation 6) \text{ Chêne rouvre : infradensité} = - 3,44 PPvx - 8,65 vx + 802,84.$$

Nous constatons que ces deux relations (5 et 6) qui sont très significatives au seuil de 1‰, pour les deux espèces, expliquent mieux la variabilité de l'infradensité que les relations précédentes ; elles expliquent 85% chez les pédonculés et 77% chez les rouvres.

D'après ces analyses, nous constatons que la proportion des vaisseaux et celle de parenchyme et de petits vaisseaux expliquent mieux l'infradensité chez les pédonculé que chez les rouvres.

Le même type d'analyse portant sur les autres éléments anatomiques (fibres, rayons ligneux et proportion des vaisseaux) a montré des relations significatives au seuil de 1‰, chez les

deux espèces ; la proportion des fibres seule explique au moins 65% de la variabilité de l'infradensité.

Pour tester nos relations, nous avons estimé l'infradensité dans les régions bispécifiques en appliquant les relations (3 et 4) établies sur les régions monospécifiques.

Une corrélation significative au seuil de 1% entre les deux densités, mesurée et estimée, a été trouvée chez les deux espèces (Figure 96). Elle est légèrement meilleure chez les rouvres ($r = 0,92$; $ddl = 115$) que chez les pédonculés ($r = 0,88$; $ddl = 100$). D'après cette évaluation de la méthode d'estimation, nous pouvons accepter que nos relations puissent servir à estimer l'infradensité à partir de la proportion des vaisseaux et de parenchyme et petits vaisseaux.

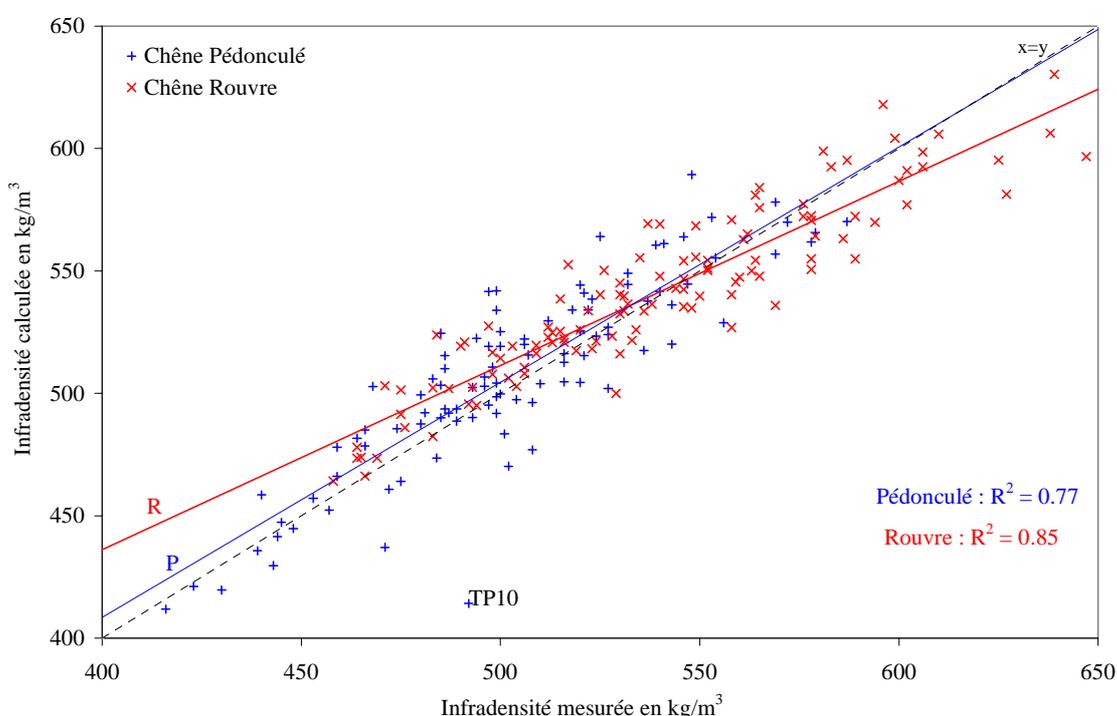


Figure 96 : Relation entre l'infradensité mesurée et celle calculée à partir de la proportion des vaisseaux et de parenchyme et petits vaisseaux

Dans la suite, on va s'intéresser à deux provenances traditionnellement réputées pour leur utilisation en tonnellerie : le chêne du Limousin et le chêne de Tronçais.

La Figure 97 permet de comparer les profils densitométriques à largeur de cerne et âge "fixés" pour les chênes pédonculés du Limousin et les chênes rouvres et pédonculés de Tronçais. Nous observons que les trois profils se différencient dans l'ordre suivant : Tronçais rouvre, Tronçais pédonculé et Limousin pédonculé. Dans ces conditions

particulières (largeur de cerne et âge “fixés”), le chêne pédonculé du Limousin apparaît donc comme le plus poreux comparativement aux chênes de Tronçais.

Dans les conditions de la pratique le chêne typique du Limousin est représenté par des arbres à accroissement fort, contrairement au chêne typique de Tronçais qui, lui, présente des accroissement fin. Ces différences sont dues principalement aux conditions de milieux et aux modes de conduites qui caractérisent chaque région :

- station fertile et conduite en taillis sous futaie pour le Limousin ;
- station pauvre et conduite en haute futaie pour la forêt de Tronçais.

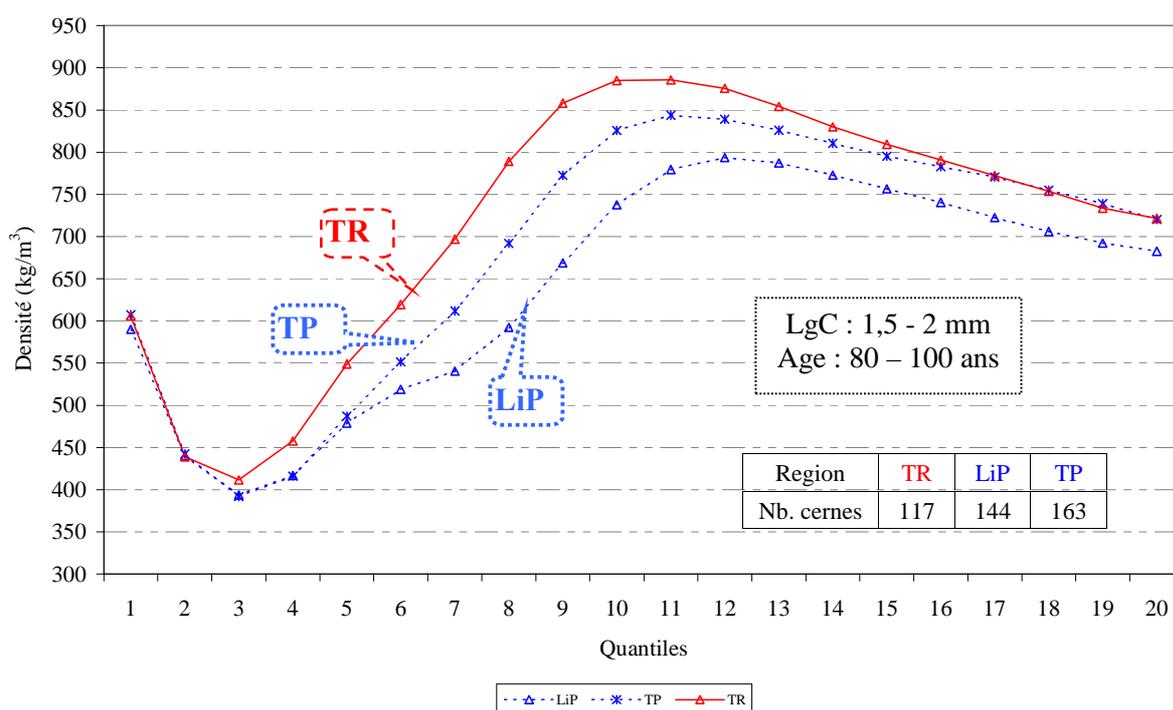


Figure 97 : Profil synthétique de densité à âge et largeur de cerne contrôlés pour les chênes de Limousin et les chênes de Tronçais

La Figure 98 illustre les profils de densité correspondants à des cernes typiques de ces deux provenances (Limousin et Tronçais) :

- le profil du Limousin présente des accroissements proches de 3 mm en moyenne. Ce profil se caractérise par une transition bois initial-bois final très progressive pour atteindre un maximum proche de 850 kg/m³ suivie par une décroissance à pente douce ;
- le profil typique de chêne rouvre de Tronçais correspond à des accroissements proches de 1 mm qui présentent une augmentation brutale de densité dans la zone bois initial bois final pour atteindre un maximum de 750 kg/m³ suivie d’une chute importante ;

- le profil typique de chêne pédonculé de Tronçais a une allure proche de celle du chêne rouvre avec cependant des valeurs de densité plus faibles.

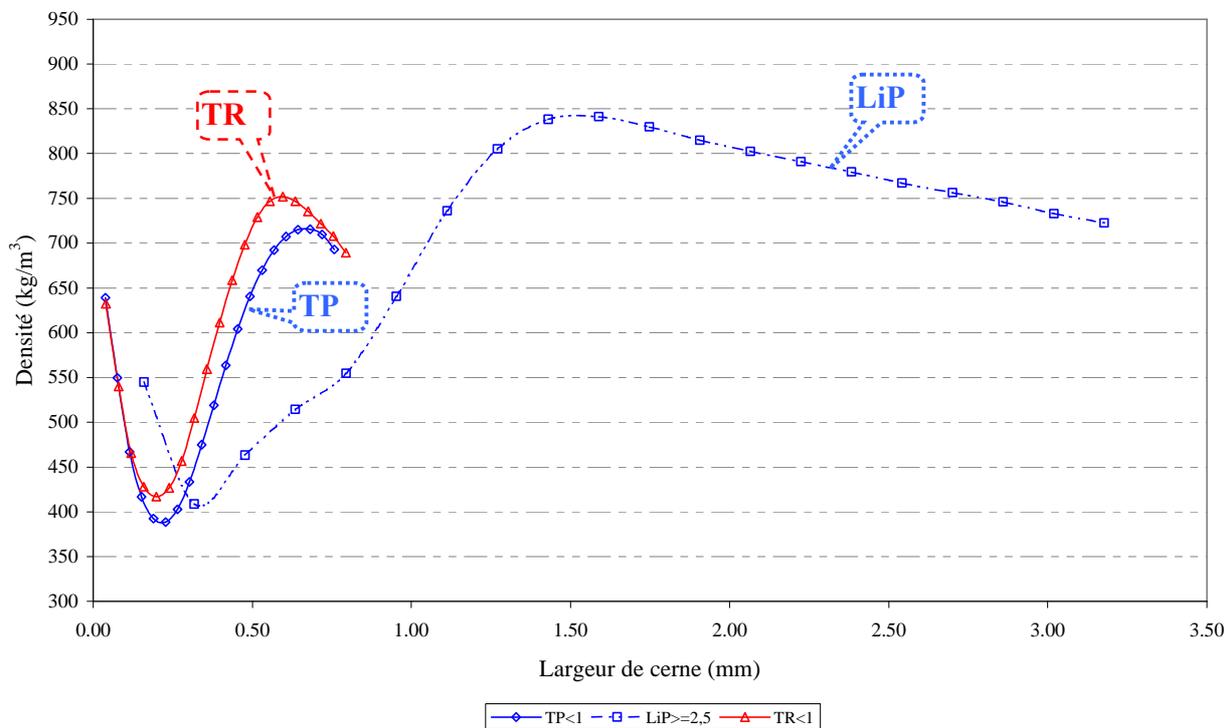


Figure 98 : Profil synthétique de densité des cernes typiques des provenances de Limousin et de Tronçais

1.2 Approche par analyses multivariées

1.2.1 Analyses des composantes principales

Nous avons réalisé deux analyses en composante principale :

- la première portant sur 15 variables de 262 arbres (arbres traités par analyse d'image) ;
- la seconde, sur les moyennes par provenance de 15 variables ;
- en outre, deux paramètres chimiques (tanin et whisky lactone) ont été introduits dans ces analyses en variables supplémentaires.

La Figure 99 présente le cercle des corrélations dans le plan factoriel 1 et 2 qui expliquent 54% de la variabilité totale (40% + 14%).

La première composante (40%) est formée par l'opposition entre deux groupes de variables :

- du côté positif : les caractéristiques densitométriques, la texture et la largeur de cerne ;

- du côté négatif : la proportion et le nombre des gros vaisseaux, la proportion de parenchyme et des petits vaisseaux.

La composante 2 oppose :

- du côté positif : l'angle de teinte , le nombre de rayons ligneux, la surface individuelle des gros vaisseaux et la proportion des rayons ligneux ;
- du côté négatif : la largeur des rayons ligneux.

On peut remarquer que les variables supplémentaires sont corrélées à l'axe 2 du côté positif pour les tanins et du côté négatif pour la whisky lactone

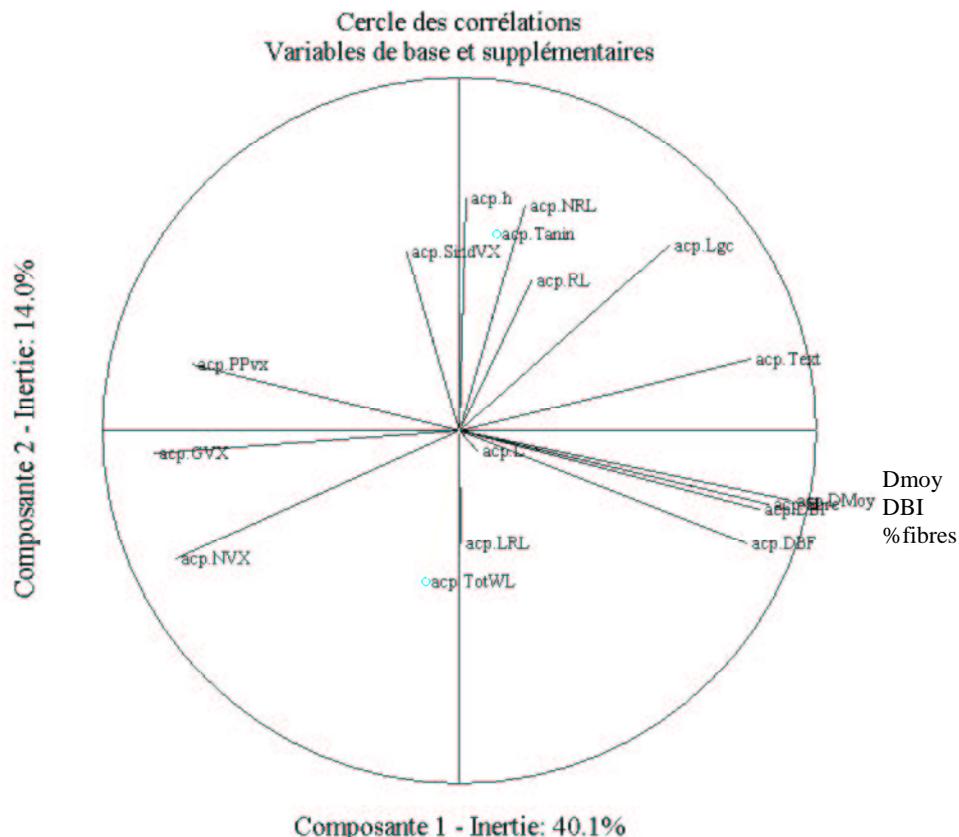


Figure 99 : Projection des 15 variables de 262 arbres dans le plan factoriel 1-2 d'une analyse en composante principale

L'examen des individus, dans le plan factoriel 1-2, montre une discrimination partielle en fonction de l'espèce. Cette discrimination est liée à la composante principale 2 qui montre que les chênes pédonculés présentent un angle de teinte, un nombre de rayons ligneux, une surface, une proportion des rayons ligneux et une teneur en tanins plus importantes que les chênes rouvres. Au contraire, ces derniers se caractérisent par des rayons ligneux plus larges et par un teneur en whisky lactone plus forte (Figure 100).

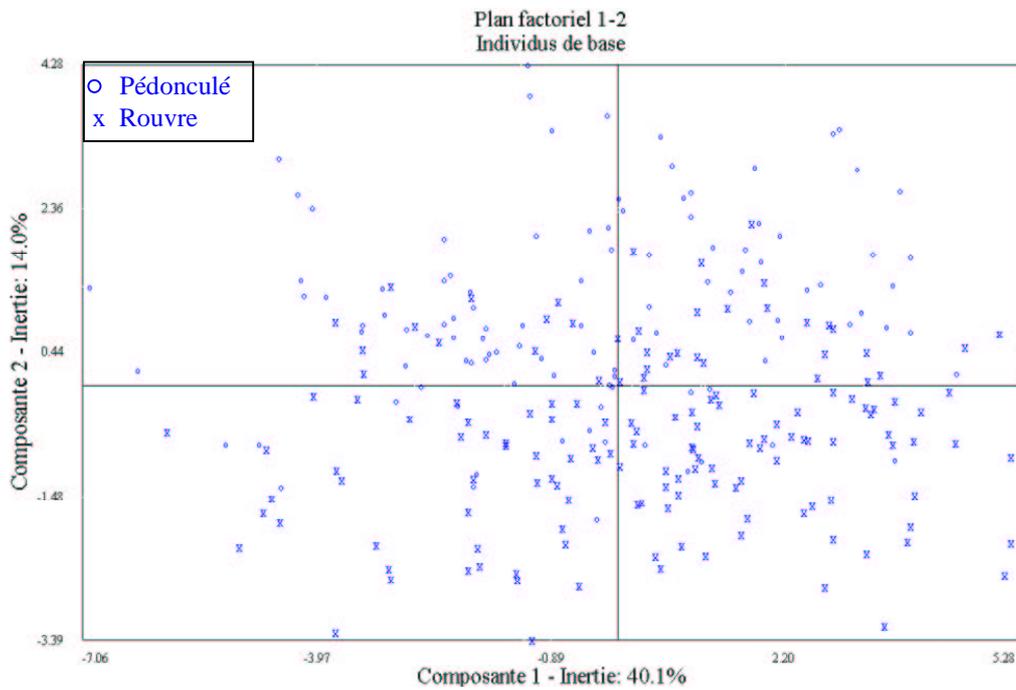


Figure 100 : Projection des individus de 262 arbres dans le plan factoriel 1-2 d'une analyse en composante principale

L'analyse sur les moyennes par provenance montre globalement la même structuration des variables dans le plan factoriel 1-2 que dans l'analyse précédente, mais le pourcentage de variance expliquée est de 49,8% pour la composante 1 et de 25% pour la composante 2 (Figure 101).

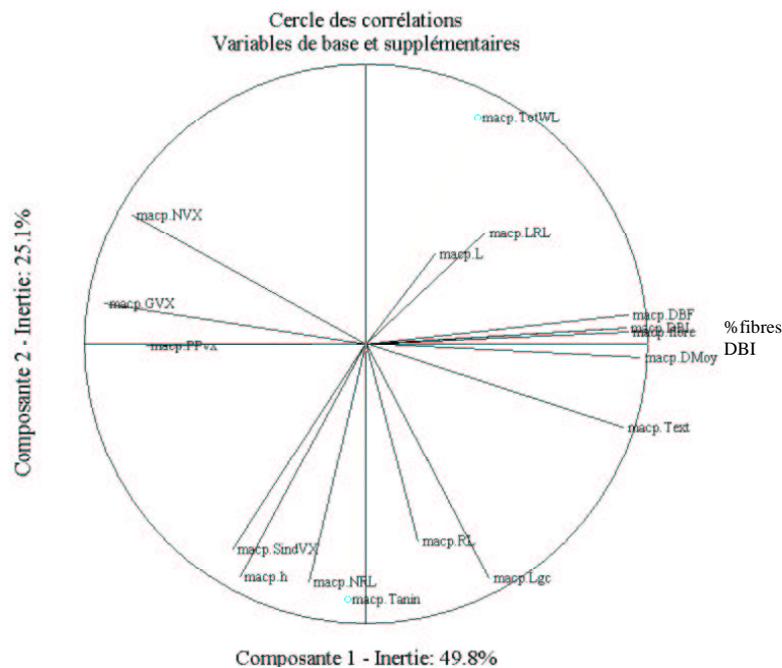


Figure 101 : : Projection des moyennes de 15 variables par provenance dans le plan factoriel

1-2

Le plan des individus montre une discrimination des provenances en fonction de l'espèce principalement sur l'axe 2 (Figure 102). La discrimination des provenances sur l'axe 1 correspond à un gradient de densité donc d'anatomie. Les provenances extrêmes sont représentées d'une part par la provenance Darney pédonculé (cerne fin, proportion de gros vaisseaux forte, densité et proportion de fibres faibles) d'autre part par les provenances de Côteaux (CR) et de Saint Palais (SR) rouvres et Monlezun-Laurède pédonculés (MP) (caractéristiques de densité, texture et proportion de fibres élevés).

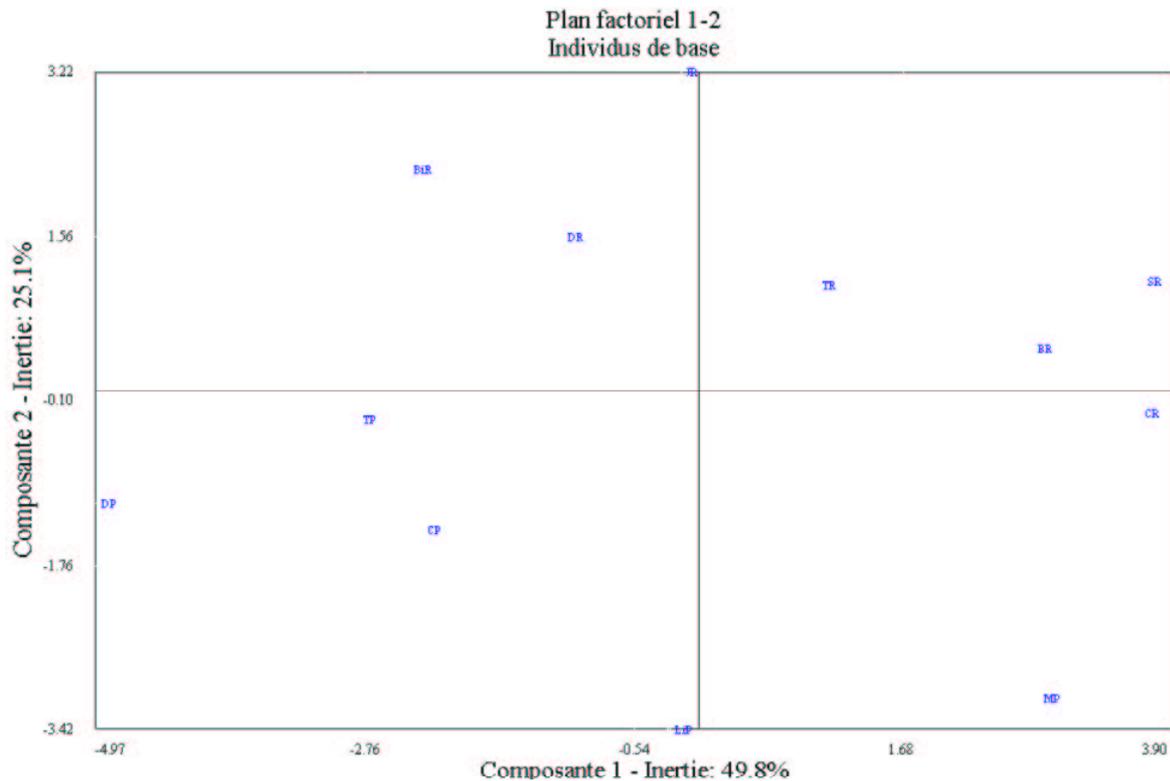


Figure 102 : Projection des provenances dans le plan factoriel 1-2 d'une analyse en composante principale

1.2.2 Analyse factorielle discriminante

1.2.2.1 Reconnaissance de l'espèce à partir de son bois

Pour des fins pratiques de gestion des approvisionnements en bois de merrain (FEUILLAT et al., 2003), l'une des questions qui se pose serait de pouvoir identifier l'espèce de chêne à partir de critères mesurables sur les merrains et si possible facilement.

Dans ce but, nous avons utilisé l'analyse discriminante en testant plusieurs combinaisons de variables anatomiques et physiques et / ou chimiques (Tableau 81).

La meilleure fonction discriminante fondée sur quatre critères (2 chimiques, 1 anatomique, 1 physique) permet d'arriver à des taux de reclassement de 86% pour le chêne rouvre et de plus de 98% pour le chêne pédonculé. Cependant, la fonction discriminante basée sur deux critères faciles à obtenir (angle de teinte et nombre de rayons ligneux) permet déjà d'arriver à un taux de reconnaissance proche de 80% pour les deux espèces. Ce résultat est comparable à celui obtenu par FEUILLAT et *al.* (1997) qui ont utilisé une fonction discriminante basée sur deux critères anatomique beaucoup plus difficiles à mesurer : la proportion des gros vaisseaux et de fibres.

| Indices de reconnaissance de l'espèce | Taux de reclassement | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------|
| | Pédonculé (123 arbres) | Rouvre (165 arbres) |
| $I = 0,015 * \text{infra} + 0,062 * \text{TotWL} - 8,665$ | 97% | 77% |
| $I = 0,013 * \text{infra} - 0,836 * h + 0,048 * \text{TotWL} + 46,983$ | 95% | 86% |
| $I = 1,461 * h - 0,013 * \text{infra} - 88,654$ | 82% | 75% |
| $I = 0,916 * h - 0,009 * \text{DMoy} + 0,064 * \text{Tanin} - 55,954$ | 86% | 88% |
| $I = 0,064 * \text{TotWL} + 0,009 * \text{Dmoy} - 6,971$ | 98% | 75% |
| $I = 0,010 * \text{DMoy} + 7,025 * \text{LRL} + 0,044 * \text{TotWL} - 0,060 * \text{Tanin} - 6,628$ | 95% | 89% |
| $I = 0,75 * \text{Ee} - 0,017 * \text{infra} - 0,824 * \text{LA} + 2,796 * \text{LC} + 5,8$ | 78% | 87% |
| $I = 0,066 * \text{TotWL} - 0,044 * \% \text{BI} + 0,887$ | 100% | 73% |
| $I = 1,148 * h - 0,019 * \text{infra} + 1,136 * \text{Lgc} + 66,798$ | 82% | 84% |
| $I = 0,081 * \text{Tanin} - 10,612 * \text{LRL} - 0,013 * \text{infra} + 6,494$ | 81% | 86% |
| $I = 1,603 * h - 104,685$ | 81% | 75% |
| $I = 0,460 * \text{NRL} + 1,428 * h - 94,957$ | 81% | 79% |
| $I = 0,038 * \text{TotWL} - 0,041 * \text{Tanin} - 0,257 * \text{NRL} - 0,605 * h + 41,234$ | 98% | 86% |
| $I = 0,047 * \text{TotWL} - 0,056 * \text{Tanin} + 1,082$ | 95% | 85% |

Tableau 81 : Indices de reconnaissance de l'espèce en fonction de plusieurs combinaisons de variables anatomiques et physiques et / ou chimiques

Il faut noter que l'angle de teinte seul permet d'arriver à un taux de reclassement de 81% pour le chêne pédonculé et de 75% pour le chêne rouvre.

Dans la suite, nous avons testé une fonction discriminante fondée sur une seule mesure (couleur). Cette fonction a été obtenue à partir des données brutes faciles à mesurer et qui n'exigent aucun calcul particulier.

Un indice de reconnaissance de l'espèce $I = 2,993*a - 1,378*b + 0,004$ a été obtenu par l'analyse factorielle discriminante sur les coordonnées a^* et b^* de la couleur. La distribution normale des observations montre que si cet indice est inférieur à 0, les arbres sont des chênes pédonculés, s'il est supérieur à 0, les arbres sont des chênes rouvres.

D'après le Tableau 82, nous constatons, que 83% des chênes pédonculés et 72% des chênes rouvres sont bien répartis selon leur espèce, cependant le taux des rouvres mal classés (28%) est plus élevé que celui des pédonculés mal classés (17%).

| espèce actuelle | Nombre d'échantillons | espèce prédite | |
|-----------------|-----------------------|----------------|--------------|
| | | P | R |
| P | 246 | 203 (83%) | 43 (17%) |
| R | 330 | 91 (28%) | 236 (72%) |

Tableau 82 : Répartition des observations selon l'espèce

La Figure 103 montre la répartition des chênes rouvres et pédonculés en fonction de leur coordonnées de couleur a^* et b^* . Nous pouvons distinguer deux groupes différents malgré la présence des chênes mal classés nous remarquons aussi que les chênes rouvres sont plus dispersés que les chênes pédonculés.

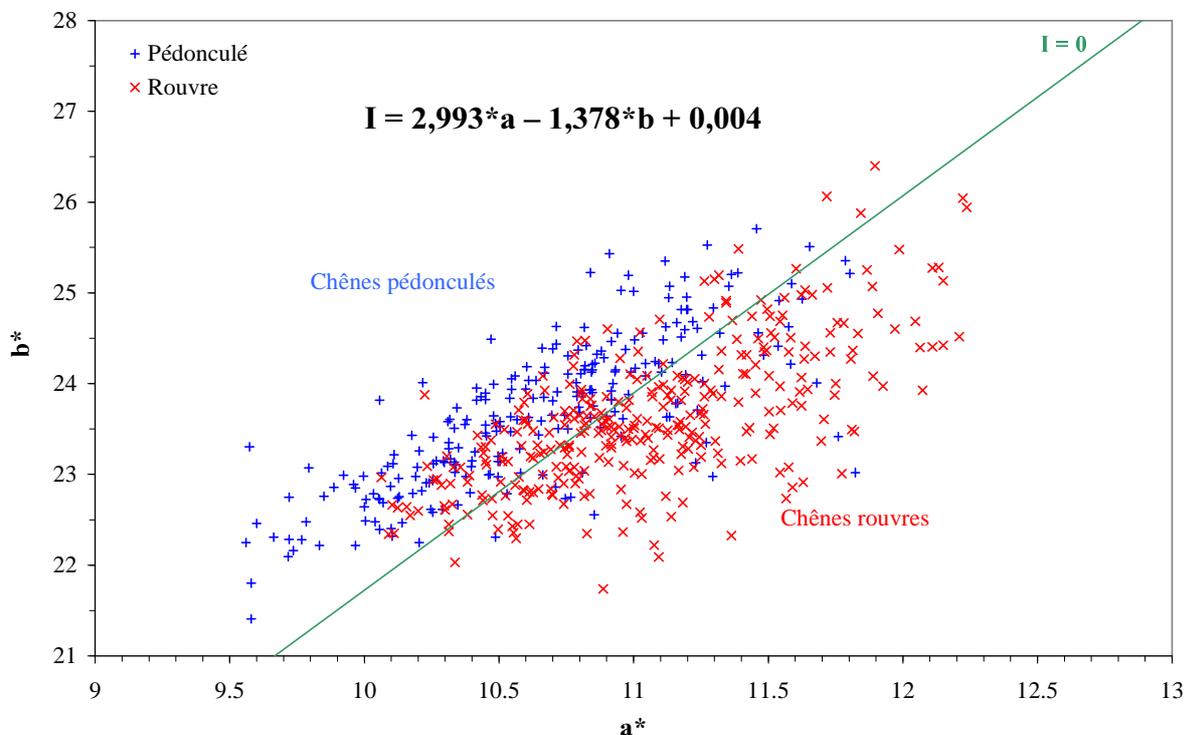


Figure 103 : Répartition des chênes rouvres et pédonculés en fonction des coordonnées de la couleur a^* et b^*

Dans le même ordre d'idée, nous avons essayé d'utiliser l'analyse discriminante pour identifier l'espèce et la région des arbres de Cîteaux, Darney et Tronçais.

La fonction discriminante testée utilise 15 variables anatomiques et physiques (Lgc, Text, LRL, NRL, RL, fibre, PPvx, GVX, NVX, SindVX, RangVX, L*, h*, DBI, DBF, DMoy).

Les taux de reconnaissances varient selon les lots entre 55% pour Darney rouvre et 85% pour Tronçais rouvre (Tableau 83).

| Régions | Nb. arbres | CP | CR | DP | DR | TP | TR |
|---------|------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| CP | 20 | 17 85% | | 1 5% | | 2 10% | |
| CR | 22 | | 17 77% | | 3 14% | | 2 9% |
| DP | 25 | 1 4% | | 19 76% | 1 4% | 4 16% | |
| DR | 20 | | 2 10% | 2 10% | 13 65% | 1 5% | 2 10% |
| TP | 20 | 3 15% | | 2 10% | 1 5% | 11 55% | 3 15% |
| TR | 22 | | 3 14% | | | 1 5% | 18 82% |

Tableau 83 : Taux de reconnaissance de l'espèce et de la région en fonction de la combinaison de 15 variables anatomiques et physiques

1.2.2.2 Reconnaissance de l'espèce à partir de son plan ligneux

Les analyses factorielles discriminantes effectuées sur les variables anatomiques des trois régions bispécifiques (Cîteaux, Darney et Tronçais) ont contribué à plusieurs indices de reconnaissance de l'espèce bien identifiée. Ces indices ont été, par la suite, appliqués sur les provenances monospécifiques qui n'ont pas participé à la mise en place de l'indice. Les résultats sont présentés dans le Tableau 84 :

- la première colonne représente la combinaison des indices de reconnaissance ;
- la seconde colonne indique les taux de classement des individus des deux espèces de chêne participant à l'analyse (CDT) ;
- et la troisième les taux de reclassement des individus des provenances monospécifiques (BR, BiR, JR, SR, LiP et MP) après avoir appliqué les indices obtenus sur les régions bispécifiques.

| Indice de reconnaissance de l'espèce | Taux de classement (CDT) | | Taux de reclassement (BR, BiR, JR, SR, LiP et MP) | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------------------------------------|------------------------------|
| | Pédonculé (150 échantillons) | Rouvre (138 échantillons) | Pédonculé (96 échantillons) | Rouvre (192 échantillons) |
| $I = 1.82 * Lgc - 0.55 * Text - 0.4 * \%BI + 44$ | 73% | 79% | 60% | 76% |
| $I = 1.43 * RangGVX + 0.29 * \%GVX_{cerd} - 5.2$ | 71% | 72% | 65% | 74% |
| $I = 0.31 * \%GVX - 0.46 * NGVX + 24.05 * S_{ind}GVX - 3.13 * Ext + 1.35 * RangGVX - 2.2$ | 73%* | 74%* | 60% ¹ | 76% ¹ |
| $I = 0.46 * \%GVX - 1.2 * NVX + 1.17 * RangGVX - 4.9$ | 75%* | 73%* | 63% ¹ | 76% ¹ |
| $I = 1.59 * Lgc - 0.52 * Text - 0.38 * \%BI + 0.46 * NRL + 40.17$ | 75% | 80% | 71% | 74% |
| $I = 0.74 * NRL + 0.31 \%GVX_{cerd} - 5.75$ | 70% | 72% | 50% | 62% |
| $I = 1.32 * LBF + 0.47 \%GVX_{cerd} - 5.72$ | 68% | 72% | 54% | 62% |
| $I = 0.39 \%GVX_{cerd} + 0.65 * NRL + 0.94 * Lgc - 7.74$ | 72% | 74% | 67% | 69% |
| $I = 1.17 * RangGVX + 0.27 \%GVX_{cerd} + 0.57 * NRL - 6.73$ | 74% | 74% | 73% | 76% |
| $I = 0.17 * Text - 1.6 * Lgc - 0.5 * NRL - 4.5$ | 69% | 79% | 71% | 71% |

- * Pédonculé = 101 échantillons, Rouvre = 116 échantillons
- ¹ Pédonculé = 68 échantillons, Rouvre = 157 échantillons

Tableau 84 : Indices de reconnaissance de l'espèce en fonction de plusieurs combinaisons de variables anatomiques

Parmi ces indices, nous allons détailler la fonction discriminante qui à la fois est basée sur des critères faciles à mesurer et qui présente un taux élevé pour la reconnaissance de l'espèce :

$$I = 0.17 * \text{Text} - 1.6 * \text{Lgc} - 0.5 * \text{NRL} - 4.5$$

Cet indice fondé sur trois critères anatomiques (la texture, la largeur moyenne du cerne et le nombre des rayons ligneux) a permis d'identifier 71% des chênes rouvres et pédonculés des régions n'ayant pas participé aux analyses (Figure 104).

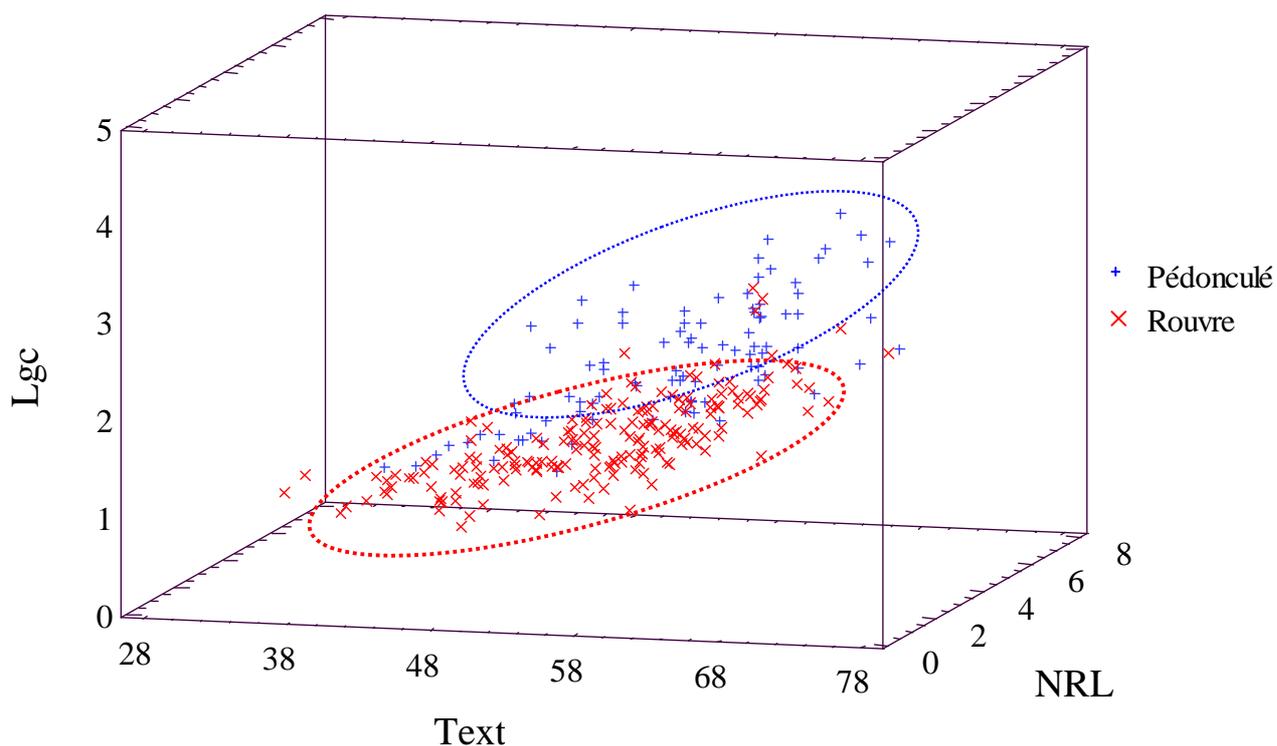


Figure 104 : Répartition des 144 arbres (48 chênes pédonculés et 96 chênes rouvres) en fonction de 3 paramètres anatomiques : texture, largeur du cerne et le nombre des rayons ligneux

2 Conclusion

- À conditions de croissance “identiques” les bois des deux espèces diffèrent significativement pour la plupart des caractéristiques mesurées ;
- À l’intérieur de chaque espèce, on observe également un effet région significatif sur les mêmes caractéristiques. Cet effet région peut être expliqué pour une large part par la largeur de cerne et l’âge ;
- La proportion des tissus par unité de surface du bois de chêne explique une très grande partie (plus de 77%) de la variabilité de la densité du bois chez les deux espèces ;
- Les relations obtenues par les régressions linéaires multiples montrent que deux variables anatomiques (proportion des gros vaisseaux du bois initial et proportion de l’ensemble des parenchymes et petits vaisseaux du bois final) peuvent suffire pour donner une bonne estimation de l’infradensité du bois ;
- L’analyse factorielle discriminante pour identifier l’espèce et la région des arbres dans les régions mixte (CDT) montre des taux de reconnaissances variant entre 55% et 85% en fonction de la combinaison de 15 variables anatomiques et physiques ;
- Une fonction de discrimination des deux espèces à partir de leurs coordonnées de couleur a^* et b^* permet de séparer les deux espèces avec un taux de discrimination supérieur à 70 % ;
- Une autre fonction de discrimination des deux espèces à partir de caractères anatomiques faciles à mesurer (texture, largeur moyenne du cerne et nombre des rayons ligneux) permet de séparer les deux espèces avec un taux de discrimination supérieur à 71 %.

Conclusions et perspectives

1 Conclusion générale

- Notre étude s'appuie sur un échantillonnage exceptionnel constitué de 288 arbres dont les origines géographique et botanique sont parfaitement connues, sélectionnés dans les régions couvrant les principales zones d'approvisionnement en chêne à merrain français. Parmi ces régions trois d'entre elles comportaient à la fois des chênes rouvres et des chênes pédonculés, ce qui a permis d'étudier les propriétés du bois des deux espèces à milieu et sylviculture comparables.
- Le protocole d'échantillonnage et de mesures, nous a permis d'étudier l'influence de l'espèce et de l'origine géographique sur les paramètres anatomiques et physiques du bois de chêne rouvre et pédonculé en contrôlant la largeur de cerne et l'âge cambial.
- L'un des principaux résultats de ce travail montre une différence significative entre les deux espèces pour la plupart des paramètres mesurés :
 - caractéristiques de couleur (angle de teinte h^* , clarté L^*) ;
 - caractéristiques densitométriques (DMoy, DBI, DBF) ;
 - caractéristiques anatomiques (texture, proportion des tissus, nombre et surface individuelle de gros vaisseaux)

Les analyses de variance sur les lots monospécifiques montrent un effet "région" significatif pour toutes les variables étudiées. Cependant, une bonne part de cet effet "région" peut être attribuée à l'influence de la largeur de cerne et de l'âge. Ces deux dernières caractéristiques apparaissent, en effet, fortement dépendantes de la région et présentent de nombreuses corrélations significatives avec les paramètres étudiés (densité et anatomie).

L'analyse des profils microdensitométriques montre qu'à largeur de cerne et à âge "fixés", il subsiste des différences entre les régions notamment dans le cas de l'espèce pédonculée.

Mais cependant, les différences anatomiques conduisent, à largeur de cerne “fixée” et à âge “fixé”, à des profils microdensitométriques ayant des allures qui sont typiques pour chacune des espèces. Ces profils constituent pratiquement la signature de l’espèce.

L’approche par analyses multivariées (ACP) a fait apparaître une séparation en fonction de l’espèce. Ce résultat nous a conduit à établir une fonction discriminante permettant un taux de reconnaissance de l’espèce de 80% à partir de deux variables très faciles à mesurer : angle de teinte et nombre de rayons ligneux.

Notre travail confirme et précise aussi deux résultats classiquement obtenus chez le chêne :

- premièrement, la relation positive entre la largeur de cerne et la densité, cette dernière augmente rapidement avec la largeur de cerne jusqu’à 2 mm, au-delà de ce seuil, la densité continue à augmenter nettement moins vite quelle que soit la croissance ;
 - deuxièmement, l’importance de la variabilité individuelle qui se manifeste quelles que soient les provenances étudiées, laquelle malheureusement ne peut être, au stade actuel des recherches, mise à profit par l’utilisateur.
- En effet au niveau pratique, la variabilité considérable du bois de chêne, bois de merrain, mise en évidence dans ce travail est susceptible d’avoir des répercussions importantes pour l’utilisateur. Le critère le plus utilisé en tonnellerie, pour le tri des merrains, est la largeur de cerne (le grain). Notre étude montre que la plupart des paramètres mesurés varient en fonction de la largeur de cerne, mais qu’il subsiste cependant une forte variabilité même à largeur de cerne “fixée”.

Ainsi le tri selon plusieurs critères, le premier d’entre eux étant l’espèce, mais aussi la région et la largeur de cerne permettraient à l’utilisateur de mieux contrôler l’énorme variabilité du bois de merrain. Dans cette perspective les fonctions discriminantes proposées dans notre étude pourraient peut être permettre de prendre plus facilement en compte l’effet “espèce” aux différents stades de la filière.

En guise de conclusion, la présente étude permet de mieux comprendre l’influence de la provenance du chêne au travers de la composition spécifique et de la sylviculture des peuplements qui exercent un effet notable sur les propriétés du bois de merrain.

2 Perspectives

- La réunion des données dendrométriques, physiques et anatomiques utilisées dans ce travail et de celles qui ont été obtenues sur les mêmes échantillons à l'INRA de Montpellier sur la nature chimique des extractibles, constitue une base de données actuellement unique qui mériterait des traitements complémentaires et croisés pour approfondir l'interprétation de la variabilité du bois de chêne rouvre et pédonculé en fonction des facteurs contrôlés ;
- Il conviendrait de compléter ce travail par des mesures de perméabilité aux liquides et aux gaz sur une sélection d'échantillons présentant des structures anatomiques et des propriétés physiques très contrastées ;
- En outre, cet échantillonnage pourrait servir à poursuivre des investigations fines au niveau de la structure anatomique, par exemple en ce qui concerne la thyllose et les ponctuations qui jouent très probablement un rôle prépondérant dans les transferts liquides et gazeux à travers les douelles des tonneaux.

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

Résumé

L'objectif de cette étude est d'estimer et de préciser la qualité du bois du chêne pédonculé (*Quercus robur*) et du chêne rouvre ou sessile (*Quercus petraea*) qui constituent une ressource en bois feuillu d'une importance économique considérable, notamment pour leur aptitude à être utilisés en bois de tonnellerie.

Dans les vingt dernières années, il a été constaté que :

- La demande annuelle de grumes de chênes français pour la fabrication de merrain avait augmenté régulièrement pour atteindre 320 000 m³ en 2002, soit près de 10% de la récolte totale en chêne français, soit une fabrication de 650 000 fûts d'une capacité de 228 litres qui se commercialisent à un prix unitaire de 500 € ;
- Des importations de merrains se sont développées en provenance des États Unis (chêne blanc) et plus récemment d'Europe centrale et orientale (chêne rouvre et chêne pédonculé) ;
- Certains tonneliers français se sont intéressés de plus en plus à de nouvelles zones d'approvisionnement en Europe (Hongrie, Russie,...) moins onéreuses que celles des forêts françaises.

Suite à ces changements importants du marché du bois de merrains, une expérimentation de grande envergure, intitulée "Chêne de Tonnellerie 2000", a été mise en place en France à l'automne 1996. Dans le cadre de cette expérience, notre travail a eu pour but d'apporter des réponses aux principales questions qui se posaient :

- la largeur de cerne, le "grain", critère le plus utilisé en tonnellerie pour le tri des merrains, est-elle un descripteur suffisant des propriétés du bois de chêne de tonnellerie ?
- y a-t-il des différences de propriétés entre les bois des deux chênes, rouvre et pédonculé ?
- pour une même espèce, existe-t-il des différences entre les provenances géographiques ?

Les bois de 123 chênes pédonculés et 165 rouvres, sélectionnés dans 9 régions réputées pour la production de bois de tonnellerie, ont été caractérisés à l'aide de mesures par analyse d'image, par microdensitométrie ainsi que par des techniques classiquement utilisées en anatomie et en physique du bois.

De nombreuses différences ont été mises en évidence entre les deux espèces et entre les provenances à l'intérieur de l'espèce même, notamment dans le cas de propriétés physiques et anatomiques. L'étude a aussi montré que le tri des bois de chêne selon l'espèce (rouvre ou pédonculé), la provenance géographique (Cîteaux, Darney, Tronçais, Bertranges, Bitche, Jupilles, Saint Palais, Limousin et Monlezun-Laurède) et la largeur de cerne permettrait à l'utilisateur non seulement de mieux contrôler la grande variabilité du bois de merrain mais encore d'en tirer parti.

Mots clés : *chêne, Quercus robur, Quercus petraea, provenance, âge, largeur de cerne, anatomie, densité, couleur, merrain.*

THE INFLUENCE OF SPECIES AND PROVENANCE OF THE TWO MAIN KINDS OF FRENCH OAKS (*QUERCUS ROBUR* L.; *QUERCUS PETRAEA* LIEBL.) ON THE ANATOMICAL STRUCTURE AND THE PHYSICAL PROPERTIES OF THE STAVE WOOD

Abstract

The purpose of this study is to estimate and specify the quality of the wood of the pedunculate oak (*Quercus robur*) and of the sessile oak (*Quercus petraea*) which constitute a broad leaved timber resource of considerable economic importance, in particular for their aptitude for being used in the wet cooperage.

In the last twenty years, it had been noticed:

- That the annual request for logs of French oaks for the manufacturing of stave wood had increased regularly to reach 320 000 m³ in 2002, either nearly 10 % of total harvest of French oak, or a fabrication of 650 000 barrels of a capacity of 228 litres which are sold at 500 €s the unit.
- The development of the import of stave wood (white oak) coming from the USA and more recently of Central and Eastern Europe (sessile and pedunculate oak);
- That certain French coopers were interested more and more in new zones of supply in Europe (Hungary, Russia...) as they are cheaper than those of the French forests.

Following these significant changes of the market of the stave wood, an experimentation of great scale, entitled "Oak of Cooperage 2000", was launched in France in autumn 1996. Within the framework of this experiment, the purpose of our work was to bring answers to the principal questions that arose:

- Is the ring width used traditionally in cooperage for the sorting of the barrel stave woods, a sufficient descriptor of the properties of the wood of oak of cooperage?
- Are there any differences in properties between the woods of the two oaks, sessile and pedunculate?
- For the same species, are there any differences between the several provenances?

The wood of 123 pedunculate oaks and 165 sessile oaks, selected from 9 areas considered for the production of wood of cooperage, were characterized by using measurements of image analysis, by micro-densitometry like the techniques classically used in anatomy or the physique of wood.

Many differences were highlighted between the two species and even in the provenances inside the species, in particular in the case of physical and anatomical properties. The study showed as well that the sorting of the wood of oak according to the species (sessile or pedunculate), of the following provenances: (Cîteaux, Darney, Tronçais, Bertranges, Bitche, Jupilles, Saint Palais, Limousin and Monlezun-Laurède) and the width of ring would make it possible to the user not only to better control the great variability of the stave wood but still to benefit from it.

Key words: oak, *Quercus robur*, *Quercus petraea*, provenance, age, width of ring, anatomy, density, colour, barrel stave wood.