UNIVERSITE MONTPELLIER II
SCIENCES ET TECHNIQUES DU LANGUEDOC

T H E S E

pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE MONTPELLIER II

Discipline : Mécanique
Formation Doctorale : Mécanique des Matériaux Complexes, des Structures et des Systèmes
Ecole Doctorale : Information, Structures, Systèmes

présentée et soutenue publiquement

par

Iris Brémaud

Le 29 Juin 2006

Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique

-Etude expérimentale des propriétés vibratoires en direction axiale de types de bois contrastés en majorité tropicaux.
-Relations à des déterminants de microstructure et de composition chimique secondaire.

JURY

René Motro *(Professeur, LMGC, Montpellier)*	Président
Vincent Gibiat *(Professeur, PHASE, Toulouse)*	Rapporteur
René Keller *(Professeur, ENGREF, Nancy)*	Rapporteur
Bernard Thibaut *(DR CNRS, Cayenne)*	Directeur de Thèse
Vincent Doutaut *(Responsable R&D, ITEMM, Le Mans)*	Examinateur
Marie-France Thévenon *(Chercheur CIRAD, Montpellier)*	Examinateur
Nelly Poidevin *(Archetière, Dinan)*	Invité

A Dominique, Charles et Basile

A la mémoire de mes grand-mères Jeanne et Marie

« Un Tronc d'Arbre appelé Tambour, on ne le fend pas »

(Proverbe Rwandais *in* [Gansemans 1988])

REMERCIEMENTS

Ce mémoire de thèse rend compte des travaux menés durant plus de trois ans au sein du Laboratoire de Mécanique et Génie Civil et de l'unité Production et Valorisation des Bois Tropicaux du département Forêts du CIRAD, ainsi que via plusieurs collaborations et échanges. Je tiens à exprimer ici mes plus sincères remerciements à ceux qui m'ont accueillie et à ceux qui ont rendu non seulement le travail possible, mais aussi sa réalisation agréable.

J'exprime mes très grands remerciements au Pr. Olivier Maisonneuve et au Pr. René Motro pour m'avoir accueillie au sein du LMGC, ainsi qu'à Christian Salles et Jean Gérard pour m'avoir accueillie au CIRAD. En plus de la qualité scientifique, la qualité humaine que j'ai rencontrée dans ces laboratoires leur doit beaucoup. Je remercie beaucoup le Pr. René Motro de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Je tiens à remercier tout particulièrement Bernard Thibaut qui m'a accueillie au sein de l'Equipe « Mécanique de l'Arbre et du Bois » du LMGC, pour m'avoir conseillée et guidée depuis le DEA, pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour avoir constamment enrichi ou cadré le sujet de ses remarques et conseils. Ma reconnaissance pour sa disponibilité malgré l'emploi du temps chargé s'est encore accrue depuis son départ en Guyane. Je tiens aussi à le remercier pour son soutien lors de la rédaction, autant par ses relectures du manuscript – y compris « en urgence » vers la fin, que pour sa compréhension et son soutien dans les phases de doute.

Ma reconnaissance à l'égard de Joseph Gril est tout aussi profonde, pour ses nombreux conseils précieux, sa très grande disponibilité, le foisonnement d'idées et les mises en perspectives. Très très grands mercis aussi pour l'aide scientifique, les relectures et le soutien dans les derniers temps de la rédaction.

Bernard, Joseph, je voudrais souligner non seulement mon estime scientifique, mais mon amitié respectueuse à votre égard.

Ma considération et mes plus sincères remerciements vont au Pr. René Keller de l'ENGREF et au Pr. Vincent Gibiat de l'Université Toulouse III qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail de thèse. Ma reconnaissance est d'autant plus grande que cela a du s'ajouter à leurs emplois du temps très chargés.

Le travail au CIRAD doit énormément à Anne Thibaut au laboratoire de physique et technologie des bois, que je remercie de tout coeur. Ses conseils et sa connaissance des méthodes et protocoles ont été aussi précieux que sa compagnie agréable ! Daniel Guibal a pris le relais du laboratoire, de l'aide technique et des bonnes discussions : Grands mercis !

Je remercie beaucoup Marie-France Thévenon et Nadine Amusant de m'avoir donné accès aux dispositifs d'extraction de l'équipe « Durabilité et préservation des bois ». Christine

Baudassé et Nicolas Leménager m'ont beaucoup aidé lors de cette phase d'expérimentations et je leur en garde une très grande reconnaissance. Merci beaucoup à Marie-France Thévenon d'avoir accepté de faire partie du jury.

J'ai eu la grande chance d'effectuer un séjour « court » -mais passionant- au Japon en début de thèse, grâce au support du « JSPS Summer Program ». Je remercie très sincèrement le Pr. Shigeru Yoshikawa du Kyushu Institute of Design et le Pr. Kazuya Minato de la Kyoto Prefectural University pour leur accueil, leur générosité scientifique et leur disponibilité quotidienne. La Pr. Kiyoko Motegi m'a fait découvrir la musique traditionnelle Japonaise dans des conditions inespérées pour une Occidentale. La Pr. Haruko Komada a été d'une grande générosité en me faisant rencontrer des luthiers et en traduisant les entrevues. Je leur garde une reconnaissance aussi respectueuse qu'amicale.

Les échanges avec le monde de la facture instrumentale doivent –en plus des contacts amicaux- beaucoup au travail de fond de Vincent Doutaut du « Pôle d'innovation de la facture instrumentale » de l'ITEMM au Mans. Je lui suis très reconnaissante pour son soutien initial à ce projet, pour ses mises en contact d'artisans et de chercheurs, et le remercie d'avoir accepté de faire partie du jury. Dans la lignée, les discussions avec les membres de l'UNFI (Union Nationale de la Facture Instrumentale) ont été extrêmement fructueuses et sympathiques. Je remercie tout particulièrement Nelly Poidevin pour les échanges passionnants sur les bois d'archets, pour son enthousiasme communicatif, pour sa générosité vis-à-vis de ses grandes connaissances sur le sujet, et je suis très heureuse qu'elle ait accepté notre invitation à être présente au jury.

Lors du DEA et au début de cette thèse, un travail a été initié au sein du Laboratoire de Botanique, Phytochimie et Mycologie de la Faculté de Pharmacie de l'Université Montpellier I, dirigé par le Pr. Claude Andary. Je lui garde une très grande reconnaissance pour son accueil, ainsi qu'à Laurence Mondolot, Annick Gargadennec et les autres membres du Laboratoire pour leur aide et leurs précieux conseils, et je regrette que les autres aspects du travail n'aient pas laissé suffisamment de place pour approfondir cette collaboration.

Pour revenir « au bercail », ce travail essentiellement expérimental doit énormément aux collègues qui ont assuré nombre des réalisations techniques. La mise en place du banc de mesures des propriétés vibratoires qui a occupé une place centrale dans cette thèse aurait été impossible sans le travail d'interfaçage d'Yves El Kaïm. Très grands remerciements pour son implication, sa disponibilité –malgré son emploi du temps chargé- pour apporter des améliorations successives, pour la qualité du résultat. La qualité du travail d'Alain Clary et de Gilles Camp, à l'Atelier de Mécanique, pour la réalisation de bâtis expérimentaux et de tout les « outils » nécessaires n'a d'égal que la qualité de leur compagnie : Merci.

De même, rien n'aurait pu être fait sans la connaissance des bois et les compétences techniques de Claude Daigremont et Sylvain Lotte, à la menuiserie du CIRAD. Je leur suis très reconnaissante pour le temps qu'ils ont consacré à rechercher les stocks appropriés, effectuer différents types de débits et pré débits, et garde un très bon souvenir des conversations sur le travail des bois !

J'ai eu le plaisir de co-encadrer le travail de DEA/Master de Jana Dlouha, qui a travaillé sur une partie de l'échantillon global présenté ici. Mes plus sincères remerciements pour la qualité du travail fourni, pour les échanges et discussions sur ce sujet d'intérêt commun, pour la bonne compagnie !

La composante bibliographique de ce travail doit énormément au service du Prêt Entre Bibliothèques de la BIU de l'UMII. Mes chaleureux remerciements à Catherine Doire puis Geneviève Boyer pour leur incroyable efficacité à dénicher des sources rares ! Je remercie aussi Jeannine Blanc au LMGC pour les coups de pouce et les renseignements –parfois demandés en urgence.

Les complexités administratives (Missions, commandes, etc...) auraient parfois été bien ardues à surmonter sans l'efficacité et l'humanité de Claudine Barre au LMGC, puis de Chantal Romano et bien sûr de Reine Bonnet, au LMGC, tout comme de Catherine Méjean et Isabelle Chalon au CIRAD. Merci aussi à Elizabeth Boulet pour l'organisation de la soutenance.

J'aurais aimé adresser mes remerciements de façon individuelle à tous ceux qui m'ont aidée, tous ceux dont la compagnie et les discussions autour d'un café ont rendu ces années agréables et apporté –parfois par hasard- de nouvelles idées... Merci à Delphine, Sandrine, Thierry, Bruno, Olivier, Caroline, Eiichi, Vincent, Bertrand... Et à l'ensemble des permanents du LMGC en fait ! Merci à mes collègues doctorants et aux stagiaires et entre autres à Wetchayan, Pierre, Pierre, Pierre, Farshid, Santosh, Fang, Claire...Pardon et grands mercis aussi à vous tous que je ne cite pas.

« En dehors » des laboratoires, l'entreprise de ce travail de thèse doit énormément à David Van Edwards, facteur de luths à Norwich, UK, mon « maître d'apprentissage », dont les discussions et conseils m'ont donné l'envie d'explorer les multiples aspects scientifiques des bois en lien avec la facture instrumentale et m'ont motivée à entreprendre ce sujet en thèse.

« Last but not least »... Rien de tout cela n'aurait été possible sans mes parents Charles et Dominique : ni bien sûr le début, ni probablement la fin.... Mille mercis immenses pour vos encouragements, votre soutien indéfectible moral comme matériel et gastronomique, merci et toute mon admiration pour ce que vous êtes. Mille mercis également à Basile et Marianne pour le soutien, la compagnie et pour les « bouffées d'air frais » si salutaires vers la fin de thèse !

Enfin, merci à tous mes amis pour leur amitié et toutes leurs qualités. Merci pour leur compréhension lors des derniers mois « d'absence » pendant la rédaction.

SOMMAIRE

Remerciements ..... **I**

Sommaire ..... **V**

Introduction **1**

I. Partie I : Définitions ; problématique ; collecte et gestion de l'information existante **5**
I.a. Descriptions et définitions préliminaires 6
I.a.1. Brève description « du » matériau et de ses échelles de variabilité 6
I.a.1.1. Matériau d'origine biologique 6
a Fonctions dans l'arbre et types de cellules 7
b Types de bois dans l'arbre 7
c Niveaux de variabilité 8
I.a.1.2. Matériau cellulaire, composite et polymérique 8
I.a.1.3. Matériau multi-échelles et anisotrope 9
I.a.1.4. Matériau hygroscopique 10
I.a.2. Propriétés vibratoires élémentaires des bois 11
I.a.2.1. Propriétés élastiques et réponse fréquentielle 11
I.a.2.2. Viscoélasticité et amortissement 12
I.a.2.3. Influence de l'humidité 15
I.b. Essences de bois employées dans différents types d'instruments 16
I.b.1. Descriptif par famille organologique 17
I.b.1.1. Idiophones 17
I.b.1.2. Cordophones 20
I.b.1.3. Quelques aspects concernant l'approvisionnement en certains bois, notamment tropicaux, employés en facture instrumentale 23
I.b.2. Mise en place d'une base de données spécifique « Bois et Instruments de musique » 25
I.b.2.1. Objectifs 25
I.b.2.2. « Matériel » : sources d'information 26
I.b.2.3. Architecture de la base de données 26
a Tables de données 27
b Relations 29
c Formulaires d'entrée et de consultation des données 29
I.b.2.4. Résumé des informations implémentées à l'heure actuelle 30
I.c. Diversité de comportement des bois : bases de données de propriétés, données manquantes, estimateurs liés aux origines microstructurales et chimiques 33
I.c.1. Bases de données de propriétés physico-mécaniques 33
I.c.1.1. Base de données du CIRAD 33
I.c.1.2. Logiciel de choix de matériaux et base de donnée CES 34
I.c.1.3. Données de la littérature concernant les coefficients d'amortissement 34
I.c.2. Indicateurs possibles en lien avec la microstructure et la composition chimique 34
I.c.2.1. Densité et quantité de matière ligneuse 35
I.c.2.2. Estimation de l'amortissement : relations avec le module spécifique en lien avec l'effet de l'angle des microfibrilles 36
I.c.2.3. Comportement « non standard » et effet des extractibles 38
I.c.2.4. Hypothèses de pré-sélection de bois tropicaux par des critères combinés propriétés/composition 39
I.d. Conclusions 39

II. Partie II : Matériel et Méthodes **43**
II.a. Matériel 43
II.a.1. Les différents échantillonnages étudiés 43
II.a.1.1. Présélection de bois à partir de critères physico-mécaniques et chimiques 43
II.a.1.2. Bois fournis par des facteurs d'instruments 44
II.a.1.3. Echantillons destinés à l'étude des déterminants des propriétés vibratoires 44
II.a.2. Récapitulatif des essences et types de bois 45
II.b. Méthodes 48
II.b.1. Protocole général 48
II.b.1.1. Préparation et conditionnement des éprouvettes 50
II.b.1.2. Mesures physiques 55
a Mesures de masse 55

b Teneur en eau à l'équilibre ... 56
c Mesures de dimensions ... 57
d Densités ... 59
e Gonflements partiels ... 60
II.b.1.3. Mesures colorimétriques et classement visuel des orientations locales de fil ... 62
a Colorimétrie ... 62
b Repérage des orientations locales visibles du fil ... 63
II.b.2. Méthodes de mesures vibratoires utilisées ... 63
II.b.2.1. Vibrations libres sur poutres flottantes ... 63
a Mode opératoire, principe et analyse ... 64
b Type d'éprouvettes ... 65
c Sources d'erreurs, répétabilité, précision ... 65
II.b.2.2. Vibrations libres sur poutres encastrées ... 66
II.b.2.3. Vibrations forcées sans contact sur poutres libre-libre très élancées ... 66
a Principe ... 66
b Type d'éprouvettes et préparation ... 66
c Dispositifs expérimentaux ... 67
d Précision et incertitudes ... 75
e Répétabilité ... 79
II.b.2.4. Mesure directe du déphasage par onde quasi stationnaire de compression ... 83
II.b.3. Comparaison des différentes méthodes vibratoires ... 83
II.c. En résumé ... 86

III. Partie III: Variabilité des propriétés vibratoires entre différentes espèces et types de bois 87

III.a. Descripteurs : relations inter- propriétés sur l'ensemble des essais ... 87
III.a.1. Densité, module d'élasticité et coefficient d'amortissement ... 88
III.a.1.1. Relations entre densité et module élastique ... 89
III.a.1.2. Distributions de module spécifique ... 91
III.a.1.3. Relations entre module spécifique et facteur d'amortissement ... 93
a Relation sur tous types de bois confondus ... 94
b Bois de feuillus et bois de résineux ... 95
c Partition sur critères d'orientation ... 96
d Partition des bois de feuillus par gammes de teneurs en extractibles ... 97
e Bois normaux de résineux et bois de feuillus à faible teneur en extractibles ... 99
f Discussion ... 100
III.a.1.4. Représentation en module spécifique complexe ... 102
III.a.2. Relations entre propriétés vibratoires et propriétés physiques ... 105
III.a.2.1. Relations entre teneur en eau et propriétés vibratoires ... 106
III.a.2.2. Densité, gonflement partiel et propriétés vibratoires ... 109
III.a.2.3. Relations entre clarté et propriétés physiques et vibratoires ... 112
III.a.2.4. Discussion ... 113
III.a.3. Conclusion sur les relations entre propriétés à l'échelle de petites pièces de bois ... 113
III.b. Classements : Résultats pour les différentes espèces ... 115
III.b.1. Récapitulatif par essence et type de bois ... 115
III.b.2. Répartition par propriété des essences & types de bois ... 120
III.b.2.1. Densité et Module d'élasticité ... 120
III.b.2.2. Module spécifique et coefficient d'amortissement ... 121
III.b.2.3. Teneur en eau et gonflements ... 124
III.b.2.4. Couleur ... 126
III.b.3. Analyses multivariables et groupement des bois ... 129
III.b.3.1. Corrélations entre propriétés à l'échelle interspécifique ... 129
III.b.3.2. Visualisation : Analyse en Composantes Principales ... 132
III.b.3.3. Classification Hiérarchique des bois sur la base des propriétés vibratoires ... 136
III.b.4. Variations de propriétés et interrelations à l'intérieur des groupes de bois ... 141
III.b.4.1. Modules spécifiques et amortissement par éprouvette, pour les différentes espèces ... 141
a Relations par types d'espèces ... 142
b Synthèse des régressions par essences ... 146
III.b.4.2. Variations entre arbres ou stocks ... 148
a Afzelia bipendensis Harms (Doussié ; Caesalpiniaceae) et Licaria cayennensis Kosterm. (Cèdre Cannelle ; Lauraceae). ... 148
b Caesalpiniaceae à faibles taux d'extraits : Dialium cochinchinense ; D. pachyphyllum ; Scorodophloeus zenkerii. ... 149

c Swartzia panacoco ; S. sp. ; S. fistuloïdes (Coração de negro et Pao Rosa ; Caesalpiniaceae) 149
d Dalbergias spp. (différents Palissandres ; Papilionaceae) ... 150
e Feuillus tempérés : Buxus sempervirens (Buis) ; Carpinus betulus (Charme) ; Sorbus domestica (Cormier) ... 151
III.b.4.3. Comparaison des aubiers et duramens ... 152
a Pour les six essences concernées ... 152
b Aubier vers duramen : If (Taxus baccata L.) ... 155
c Aubier vers duramen : Boco (Bocoa Prouaencis Aubl.) ... 157
d Discussion ... 158
III.b.5. Relations entre propriétés mesurées et données chimiques et physiques disponibles dans la base de données du CIRAD ... 160
III.b.5.1. Relations entre propriétés vibratoires et physiques mesurées, et composition chimique moyenne. 161
a Données moyennes par espèce ... 162
b Données moyennes par arbre ... 165
III.b.5.2. Amortissement en fonction du module spécifique et du taux d'extraits alcool-benzène ; moyennes par essence. ... 166
III.b.5.3. Déduction de l'effet massique des extraits sur densité, modules spécifiques et relation aux cœfficients d'amortissement ... 168
III.b.5.4. Confrontation des résultats des mesures vibratoires et des indicateurs physiques de présélection : Psf, Retrait/densité. ... 171
III.b.5.5. Discussion ... 174
III.b.6. Conclusion ... 176

IV. Partie IV : Relations entre structure et composition chimique, et propriétés physico-mécaniques : Etude de deux cas particuliers ... 179
IV.a. Variations d'angles des microfibrilles, de structure cellulaire et de composition primaire : Bois opposé/juvénile et bois de compression de Résineux ... 180
IV.a.1. Bois juvénile et bois de compression : brève définition ... 180
IV.a.2. Echantillonnage et données déjà disponibles ... 182
IV.a.2.1. Matériel ... 182
IV.a.2.2. Données issues de caractérisations antérieures ... 184
IV.a.2.3. Caractérisations effectuées dans la présente étude ... 185
IV.a.3. Résultats et discussion ... 185
IV.a.3.1. Vérifications méthodologiques ... 185
a Densité et module spécifique « secs à l'air » : comparaison des valeurs obtenues sur différentes dimensions et selon différents protocoles de stabilisation ... 186
b Comparaison des méthodes de mesure d'amortissement pour des gammes de comportements contrastés ... 186
IV.a.3.2. Marqueurs physiques macroscopiques ... 187
IV.a.3.3. Relations entre angles des microfibrilles, module spécifique et coefficient d'amortissement ... 188
a Tous types de bois confondus ... 188
b Bois normal, bois intermédiaire, bois de compression ... 189
IV.a.3.4. Relation entre module spécifique et amortissement ... 190
a Moyennes par localisation ... 190
b A l'échelle de pièces de bois de petites dimensions ... 191
IV.a.3.5. Effets contrastés du bois de compression sur les modules spécifiques et sur les coefficients d'amortissement. ... 193
IV.a.3.6. Comparaison globale des bois de compression et des bois normaux ... 194
IV.a.4. Bilan provisoire ... 195
IV.b. Effet des extractibles et prise en compte du contre-fil : bois d'espèces de Pterocarpus (Leguminosae, Papilionaceae) Africaines. ... 196
IV.b.1. Raisons de choix du matériel, description et définitions ... 197
IV.b.1.1. Usages en facture, distribution et disponibilité ... 197
IV.b.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques et chimiques et matériel disponible ... 199
a Localisation inter-propriétés dans la base de données du CIRAD ... 199
b Composition en métabolites secondaires du bois de cœur ... 200
IV.b.1.3. Contre-fil : brève définition ... 202
IV.b.2. Considérations méthodologiques pour l'étude de l'influence des composés secondaires sur les propriétés physico-mécaniques ... 203
IV.b.3. Matériel et méthodes spécifiques ... 206

IV.b.3.1. Matériel 206
a Echantillonnage 206
b Prélèvement 207
IV.b.3.2. Méthodes 209
a Relevé des angles de fil (pour le Padouk de la deuxième série d'essais uniquement) 209
b Protocole de mesures physico-mécaniques avant et après extraction 211
c Création de groupes jumelés (pour la deuxième série d'essais) 212
d Protocoles d'extraction 213
IV.b.4. Observations sur bois natifs 215
IV.b.4.1. Variations locales de propriétés 215
a Densité « sec à l'air » 216
b Module d'élasticité spécifique 216
c Coefficient d'amortissement en fonction du module spécifique 218
d Relation entre angle de fil moyen, module spécifique et coefficient d'amortissement (Padouk de la deuxième série) 219
IV.b.4.2. Comparaison des propriétés vibratoires entre espèces, stocks et localisations 220
IV.b.5. Rendements d'extraction pour les différents solvants et échantillons 223
IV.b.6. Effet d'une extraction généraliste sur les propriétés vibratoires (première série d'essai) .. 224
IV.b.7. Effets d'une extraction séquentielle sur les propriétés physico-mécaniques (deuxième série d'essais) 226
IV.b.7.1. Observation globale des modifications physico-mécaniques provoquées par les extractions 227
a Propriétés des bois natifs et extraits 227
b Corrélations entre perte de masse et variations physico-mécaniques 227
c « Signatures » de modifications physico-mécaniques des différents solvants 229
IV.b.7.2. Modifications physiques 230
a Perte de masse et variation de volume anhydre 230
b Teneurs en eau 233
c Couleur 236
IV.b.7.3. Modifications des propriétés vibratoires après extraction par différents solvants 237
a Coefficients d'amortissement 237
b Relations entre amortissement et module spécifique suite aux différents traitements 240
c Module d'élasticité spécifique 243
d Relation entre angle de fil et effet de l'extraction 244
IV.b.7.4. Discussion 246
IV.b.8. Conclusion et perspectives 250
IV.c. Conclusion de la partie IV 251

V. Conclusion générale et perspectives 253

VI. Bibliographie 259

VII. Table des figures 275

VIII. Liste des tableaux : 283

IX. Annexes 285
IX.a. Annexe: Matrices de corrélations entre propriétés vibratoires et physiques, à l'échelle de l'éprouvette, pour les différentes essences suffisamment échantillonnées. 285
IX.b. Annexe aux bois normaux/de compression de résineux 291
IX.c. Annexe aux matériels, méthodes et variations locales par pièce de bois initiale pour les espèces de Pterocarpus. 293

RESUME 295

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Le bois est la matière première d'un grand nombre d'instruments de musique. Ou plutôt *les* bois, devrait-on dire, car l'origine biologique de ce matériau lui permet de présenter une très grande variété de propriétés technologiques, acoustiques et de qualités esthétiques.

Lorsqu'on évoque l'association « bois et instruments », on pense souvent en premier lieu aux instruments du quatuor à cordes (violon, alto...) et au bois de leurs tables d'harmonie. Du point de vue des sciences des matériaux, les qualités « lutherie » de Résineux –surtout Epicéa- ont ainsi bénéficié d'un certain nombre de recherches quant à leurs propriétés acoustiques, ou mécaniques vibratoires. De façon plus fondamentale, leur structure cellulaire relativement plus simple que celle des bois de feuillus en font aussi un bon « modèle » pour étudier les origines fines des propriétés physico-mécaniques du bois et de leurs variations.

Cependant, un grand nombre d'autres types de bois sont employés dans la fabrication de différents instruments de musique et de leurs différentes parties et doivent y remplir des fonctions différentes. La diversité des bois est ainsi bien utile, en ce sens qu'elle fournit des types de matériaux « appropriés » aux différentes fonctions (à moins que la fonction ne se soit développée en adéquation avec le matériau disponible, mais cela est une autre histoire...). Parmi ces associations bois/parties d'instruments, un bon nombre implique aujourd'hui comme 'standard' des bois tropicaux lourds à très lourds. Pour ce que l'on en connaît déjà, certains de ces bois peuvent aussi présenter une stabilité dimensionnelle élevée vis-à-vis des variations d'humidité (tel le Grenadille des corps de clarinettes et hautbois), certains semblent caractérisés en premier lieu par de très faibles amortissements des vibrations (tel le Pernambouc des archets modernes notamment).

Les comportements acoustiques et physiques des différents bois tropicaux employés en facture instrumentale sont bien moins connus que ceux des Résineux de tables d'harmonie. Il semble que certaines de leurs caractéristiques importantes ne se retrouvent pas ou peu dans les bois tempérés. En parallèle, pour plusieurs de ces bois tropicaux aujourd'hui « standards », des problèmes d'approvisionnement durable sont rencontrés (sur l'espèce et/ou sur les quantités et qualités disponibles) ou sont prévisibles à relativement court terme. Il faut remarquer que les volumes requis par la facture instrumentale ne sont pas d'ordre suffisant pour être responsables de la pression subie par ces espèces. En revanche, il s'agit d'un secteur où la valorisation est élevée. Des initiatives de conservation de quelque (deux ?) espèces emblématiques sont heureusement déjà en cours, mais en terme de matériau les bénéfices de plantations sont attendus à l'échelle de quelques décennies.

Une démarche complémentaire peut viser la diversification des espèces utilisables. Ceci demande d'une part d'avoir des données sur les propriétés des bois actuellement préférés pour différents usages, d'autre part d'être en mesure de sélectionner de « nouveaux » bois intéressants pour la facture, que ce soit pour pallier les problèmes d'approvisionnement, ou pour s'adapter à ou permettre de nouvelles évolutions de design sonore et/ou structural. Le choix est vaste : plus de 10 000 espèces ligneuses. Cependant, pour certains paramètres importants en facture comme les coefficients d'amortissement des vibrations, l'on ne dispose de données que pour moins de 1% de ces espèces.

L'un des objectifs de notre travail a été de développer des outils, basés notamment sur la compréhension des facteurs d'influence des propriétés des bois à l'échelle microstructurale et chimique, pour effectuer un « screening » des espèces et repérer des bois candidats.

Cet objectif fait appel à une approche plus fondamentale. Deux niveaux de facteurs d'influence peuvent être considérés : primaires (microstructure et composition chimique macromoléculaire) et secondaires. Sur un petit nombre d'espèce, certains métabolites secondaires des bois de coeur (« extractibles ») avaient été trouvés responsables

d'amortissements des vibrations particulièrement faibles. Ceci a surtout été étudié pour le Pernambouc des archets modernes. D'autres effets cités dans la littérature concernent la stabilité vis-à-vis des variations d'humidité.

Nous avons cherché, d'une part à nous inspirer de ces observations et à les mettre en relation pour trouver des indicateurs de choix de bois ; d'autre part à étendre le nombre d'espèces observées ; enfin à approfondir la compréhension de l'impact de ces composés secondaires sur les propriétés des bois et des variations inter-spécifiques de ces effets, en se basant sur un niveau « élémentaire » de biodiversité.

Les déterminants primaires ne doivent bien sûr pas être laissés de côté, aussi nous avons étudié en parallèle les variations de propriétés vibratoires sur un matériel ciblé présentant d'importantes variations de caractéristiques microstructurales et de composition chimique primaire.

Pour revenir à la « diversité des bois utilisés ou utilisables dans les instruments », la simple diversité des espèces effectivement utilisées est loin d'être connue dans sa globalité, particulièrement si l'on se penche sur les instruments relevant de cultures musicales autres que la musique classique Occidentale. Nous avons commencé à collecter l'information éparse sur ce vaste sujet et à tenter de l'organiser.

Avant de présenter l'organisation de ce mémoire, n'oublions pas les motivations et les collaborations, sans lesquelles tout travail resterait aride.

Les thématiques « diversité des bois dans les instruments » et « facteurs d'influences microstructuraux et chimiques » représentent l'approfondissement d'interrogations et d'intérêts qui n'ont cessé de grandir au cours de mon temps d'apprentissage axé sur la fabrication d'instruments à cordes pincées et surtout durant l'année « scolaire » passée chez David Van Edwards, facteur de luths à Norwich, UK, d'un côté ; ainsi que de ma formation initiale en physiologie végétale appliquée d'un autre côté.

Ces intérêts ont rencontrés ceux de l'équipe « Mécanique de l'arbre et du bois » du LMGC et de l'équipe « Production et valorisation des bois Tropicaux et Méditerranéens » du département Forêts du CIRAD. Lors de mon arrivée le sujet a notamment pu s'intégrer dans le cadre d'un projet sur « l'influence des métabolites secondaires sur les propriétés technologiques des bois tropicaux », financé par l'ADEME et qui associait le Laboratoire de Botanique, Phytochimie et Mycologie de la Faculté de Pharmacie de Montpellier / CEFE. Un peu plus tard, cette partie du travail a commencé à être approfondie grâce à un séjour de recherche dans l'équipe du Pr. Minato (Kyoto Prefectural University) qui avait réalisé les recherches « pionnières » sur le Pernambouc. L'échange avec le milieu de la facture instrumentale a été particulièrement appréciable grâce au travail de fond du « Pôle d'Innovation de la Facture Instrumentale » de l'ITEMM au Mans et aux membres de l'UNFI (Union Nationale de la Facture Instrumentale). Des intérêts communs ont aussi été partagés avec le Laboratoire de Recherche et de Restauration du Musée de la Musique, Cité de la Musique à Paris et ont fait l'objet d'un court séjour en collaboration au sein du LAM (Laboratoire d'Acoustique Musicale, Paris VI). En fin de thèse, des questions d'ordre fondamental ont amené à élargir le champ de vision vers d'autres thématiques *via* le travail sur du matériel ayant fait l'objet d'un projet de recherche sur les « propriétés physiques et mécaniques des bois de réaction ».

...Et il y a eu bien sûr bien d'autres échanges passionnants avec des acteurs des différentes disciplines scientifiques concernées et du monde de la facture instrumentale.

Les différents aspects de la démarche et du travail expérimental seront organisés en quatre parties, suivant un schéma classique :

La partie I introduira un peu plus la démarche et l'aspect « diversité ». Elle contient quelques définitions simples « du » bois et de celles de ses propriétés qui feront l'objet de notre travail expérimental. Elle résume quelques exemples d'associations bois/fonction dans les instruments à travers des « archétypes » en facture classique Occidentale et un début d'ouverture vers d'autres cultures. La mise en place d'une base de données spécifique « espèces ligneuses et facture instrumentale » y est décrite, suivie d'une brève description des sources d'information existantes sur la diversité de propriétés des bois, données manquantes, et estimateurs possibles en lien avec les origines microstructurales et chimiques.

La partie II présentera les matériels étudiés (bois de facture et présélection de bois mal connus à cet usage) et les méthodes employées et/ou développées au cours du travail expérimental.

La partie III concernera les résultats obtenus quant à la diversité interspécifique des propriétés vibratoires en direction axiale. Ces résultats sont analysés en termes : de relations entre propriétés mécaniques (et physiques) ; de classements et définition de groupes de similitudes entre les différentes espèces et types de bois ; de relation globale à la chimie secondaire connue ; de proposition de modèles prédictifs simples pour aider au choix de bois ciblé sur leurs gammes de propriétés vibratoires.

La partie IV visera à approfondir la compréhension de facteurs d'influence microstructuraux et chimiques des propriétés vibratoires élémentaires étudiées, sur des matériels ciblés sur les deux niveaux de déterminants. Le premier chapitre concerne les effets de la microstructure (structure cellulaire, angles de microfibrilles) et de la composition chimique principale, à travers l'étude de Résineux avec bois « normaux » et de compression. Dans le deuxième chapitre on étudie l'influence des métabolites secondaires du bois de coeur sur des propriétés vibratoires et physiques à travers la comparaison de bois dans son état natif, puis extrait par différents solvants, en comparant les effets relevés sur deux espèces de feuillus tropicaux du même genre *Pterocarpus* (Papilionaceae, Leguminosae).

PARTIE I :
DEFINITIONS ; PROBLEMATIQUE ; COLLECTE ET GESTION DE L'INFORMATION EXISTANTE

I. PARTIE I : DEFINITIONS ; PROBLEMATIQUE ; COLLECTE ET GESTION DE L'INFORMATION EXISTANTE

La thématique de notre travail « diversité des bois utilisés ou utilisables dans les instruments de musique » implique une approche interdisciplinaire. L'étude « du » bois l'est déjà elle-même : ses propriétés technologiques découlent directement de son mode de fabrication biologique, qui dicte les modalités et variations de sa structure multi-échelles (types de bois dans l'arbre, bois matériau, plan ligneux et agencement cellulaire, agencement micro puis nanoscopique des parois cellulaires, composition chimique). L'application aux instruments, dans une vue globale, concerne différentes disciplines : organologie, acoustique, (ethno) musicologie. La notion de diversité demande aussi de s'intéresser : à des informations relevant de botanique ou d'ethnobotanique ; à la gestion de l'information. Cette démarche, passionnante, requiert par ailleurs de rappeler sous forme simple quelques notions, ainsi que de faire certains choix.

Cette partie introductive concernera d'abord quelques points élémentaires sur le matériau bois et sur ses propriétés mécaniques vibratoires. En ce qui concerne l'usage en facture instrumentale, ici on se place bien sûr du point de vue du matériau plus que de la structure. Les instruments de musique peuvent être considérés comme des structures à double fonctionnalité mécanique-acoustique et culturelle. Dans cette optique, le processus d'adéquation matériau–fonction formerait une boucle : les matériaux disponibles-choisis conditionnent dans une certaine mesure le résultat en termes d'acoustique, d'esthétique visuelle, mais aussi de technique de fabrication et de jeu. En retour, des standards ainsi établis soumettent le choix de matériaux à des impératifs de conformité au modèle culturel.

Un aspect « applicatif » vis à vis de standards « bois/fonction » ainsi définis peut concerner les difficultés d'approvisionnement rencontrées pour certaines espèces tropicales préférées, et les démarches possibles de résolution *via* notamment une possible diversification des choix. A l'échelle de différentes aires géoculturelles, des standards peuvent également être rencontrés, mais dans une vue globale ceci amène à une grande diversité de bois employés en facture. A ce point on peut se poser une question :

Quels sont les cas et les degrés de permanence ou de divergence dans le choix des bois pour instruments de musique, pour une fonction organologique et acoustique similaire, mais entre différentes régions et cultures du globe et/ou époques historiques ?

A priori, on peut s'attendre aux cas suivants : (i) bois archétypes pour une fonction donnée (une espèce botanique – une partie d'instrument), avec une distribution plus ou moins large ; (ii) bois divers pour une fonction donnée. Dans cette deuxième catégorie, on peut encore distinguer (iii) le cas d'utilisation d'espèces diverses, mais de propriétés matérielles comparables, et (iv) le cas où à la fois les espèces et leurs propriétés seront différentes. Pour ces différents cas de figure, la permanence ou la divergence du choix de matériaux peut se situer au sein d'un même ensemble géoculturel, ou bien entre différentes cultures et régions du monde plus ou moins éloignées. Leurs causes peuvent être d'ordre culturel, technique, ou de disponibilité des espèces (dont répartition phytogéographique notamment).

Compte tenu de la très grande diversité que cette approche implique en termes de types d'instruments, d'espèces de bois, et de propriétés matérielles, il est nécessaire de trouver un moyen de gérer et d'articuler l'information. Nous tenterons de poser les bases d'une banque de données « usage des bois en facture instrumentale » qui devrait à terme (les données actuellement recueillies sont encore loin d'être exhaustives) permettre de mieux appréhender l'ensemble de la question mais aussi et surtout de mettre en relation ces données organologiques et botaniques avec les données existantes sur les propriétés physiques et mécaniques/acoustiques des bois considérés.

Ce dernier point, concernant les données existantes quant au comportement physico-mécanique et « acoustique » des bois, surtout en référence aux bois tropicaux, est évidemment primordial. Nous présenterons quelques sources d'information, leurs lacunes, et quelques pistes pour s'inspirer de relations entre propriétés dictées par la microstructure et/ou la chimie dans le cadre d'une démarche de choix de matériaux et de diversification.

Nous commencerons par quelques brèves définitions du bois puis de ses propriétés vibratoires élémentaires – celles que nous étudierons dans notre travail expérimental. La thématique 'diversité des bois utilisés ou utilisables dans la fabrication d'instruments de musique' sera articulée en deux chapitres : d'abord sur la diversité des bois employés dans différents types d'instruments, éventuels problèmes d'approvisionnement, mise en place d'une base de données spécifique. Puis nous aborderons les sources d'information existantes sur la diversité de comportements physico-mécaniques des essences de bois, à travers des bases de données de propriétés, puis des indicateurs liés aux facteurs de variations possibles (microstructuraux et chimiques).

I.a. Descriptions et définitions préliminaires

Bien que ce soit pour l'homme un matériau familier et d'usage très ancien, il n'est en fait pas si évident de définir « le bois » d'une façon unique… « Le bois » est un matériau complexe : matériau d'origine biologique, éminemment variable, matériau multi - échelles, cellulaire, composite, polymérique… Matériau anisotrope, hygroscopique, viscoélastique.

Pour l'utilisateur des bois, cette sorte d'inventaire à la Prévert n'est pas forcément d'une limpidité immédiate, mais elle désigne cependant des réalités tangibles auxquelles l'on est confronté quotidiennement au contact de ce matériau. Nous ne présentons ci-dessous que les quelques bases et définitions qui seront utiles à la compréhension de la suite du texte. Les informations de la littérature concernant des points précis des thématiques abordées dans ce travail seront plus détaillées dans les chapitres concernés, en les confrontant à nos résultats expérimentaux.

I.a.1. **Brève description « du » matériau et de ses échelles de variabilité**

Il n'est bien sûr pas question ici de faire un cours détaillé sur le bois. Cette présentation est volontairement très résumée et simplifiée[1], et les précisions nécessaires à chaque échelle seront introduites, au cours du texte, à chaque fois qu'elles auront une implication pour les propriétés physiques et mécaniques/acoustiques considérées.

I.a.1.1. **Matériau d'origine biologique**

Notre étude se situe bien en aval. Pourtant, le matériau du facteur d'instruments a avant tout été fabriqué par un individu arbre pour assurer : i) le transport de ses éléments nutritifs minéraux et de l'eau *(sève brute)* des racines vers les feuilles ; ii) le support mécanique de son houppier ≈ machinerie photosynthétique produisant en retour la matière organique nécessaire à la production du bois. Ses cellules constitutives orientées selon l'axe de l'arbre sont physiologiquement mortes et peuvent être assimilées à des « tubes ». La production de bois *(=xylème secondaire)* correspond à la croissance *secondaire* de l'arbre,

[1] Pour une information plus détaillée, on pourra se reporter notamment aux cours de [Keller 1994] pour ce qui concerne l'origine biologique et l'anatomie; aux atlas d'identification de bois tropicaux basés sur leurs caractéristiques anatomiques [Détienne & Jacquet 1983 ; Normand & Paquis 1976 ; *et autres*]. Plus généralement une introduction au matériau bois peut être trouvée, par exemple, dans l'ensemble du volume « Le bois, matériau d'ingénierie » [Jodin 1994] ou du volume « Wood quality and its biological basis » [Barnett & Jeronimidis 2003]. Une description détaillée des relations entre eau et bois peut aussi être trouvée dans [Skaar, 1988]. De même, pour ce qui concerne les notions d'aubier/duramen et d'extractibles, une synthèse peut être consultée dans [Hillis, 1987].

c'est-à-dire sa croissance en diamètre, qui s'effectue par divisions cellulaires à partir de la périphérie du tronc, au niveau du *cambium* ou « assise génératrice libéro-ligneuse ». Ce terme *secondaire* est par opposition à la croissance *primaire* de l'arbre, en hauteur, qui s'effectue par divisions cellulaires au niveau des apex *(≈cimes)* des axes. Le bois formé récemment par l'arbre *(adulte)* est à la périphérie, le bois le plus ancien (*bois juvénile* : formé lorsque l'arbre était jeune) est au centre ; ils ont en général des propriétés différentes (cf. partie IV). La conduction de sève brute s'effectue dans les quelques cm proches de la périphérie : l'*aubier*. Toute la partie centrale n'assure plus le rôle de conduction et est très généralement *duraminisée* (transformée en bois de cœur) de différentes façons : fermeture des points de conduction d'eau entre cellules (nombreux résineux)[2]; généralement, imprégnation des parois et/ou lumières des cellules par différents composés chimiques de faible poids moléculaire *(extractibles) via* des éléments radiaux restés vivants: les *rayons ligneux* (≈parenchyme horizontal).

a Fonctions dans l'arbre et types de cellules

On peut résumer les fonctions à remplir par le bois dans l'arbre par : conduction ; soutien ; stockage. Qui dit « conduction d'eau » dit « tuyaux », qui dit « soutien mécanique » dit « éléments rigides ». Ces deux types de cellules orientées selon l'axe de l'arbre auront bien évidement des propriétés mécaniques différentes. Les stratégies sont différentes selon les types de bois : les *résineux* (bois homoxylés) adaptent un même type de cellule au cours de la saison de végétation (*trachéides* de *bois initial* de grands diamètres à parois fines et peu rigides ; de *bois final* de faibles diamètres à parois épaisses et plus rigides) ; les *feuillus* « plus évolués » disposent de types de cellules spécialisés pour les deux fonctions (bois hétéroxylés) : *éléments de vaisseaux* -de diamètres très variables- pour la conduction ; *fibres* – de différents types- pour le soutien mécanique. Leur agencement au cours de la saison de végétation *(≈cerne annuel)* sera différent selon les types d'essences ; dans le cas des bois tropicaux, l'agencement sera toujours dépendant de l'espèce, mais évidemment bien moins des « saisons » de végétation[3]. En plus de ces cellules de soutien et de conduction sont présentes des cellules de stockage et de répartition des réserves (*parenchymes*), qui peuvent être horizontales (radiales : rayons ligneux) ou verticales. Au final, le matériau sera donc caractérisé par un *plan ligneux*, soit un agencement de cellules de géométries et propriétés physico-mécaniques très différentes, qui sera à la fois *caractéristique de l'espèce* (≈il peut permettre son identification), et des *conditions de croissance* rencontrées (≈il peut permettre sa datation, dans le cas de bois tempérés tout au moins).

b Types de bois dans l'arbre

On peut retrouver différents « types de bois » dans l'arbre, qui présenteront après abattage et en tant que matériau technologique des propriétés différentes. L'aspect que nous étudierons le plus concerne les caractéristiques de duramens, notamment en référence à des bois tropicaux.

Aubier et duramen : l'étymologie de ces termes évoque deux des caractéristiques les mieux connues –au moins de façon empirique- de ces deux types de bois dans l'arbre : le bois de cœur est très souvent imprégné de métabolites secondaires pouvant procurer des caractéristiques de couleur et/ou de durabilité biologique (mais aussi physico-mécaniques comme on va l'étudier). La quantité de ces composés secondaires est souvent modérée dans les bois tempérés (≤5% et parfois jusqu'à ≈10%) et peut être nettement plus importante dans les bois tropicaux (jusqu'à plus de 25% de la masse du bois). Leur quantité est généralement

[2] Ce blocage des *tori* des ponctuations a un effet assez prononcé sur l'aptitude à l'imprégnation de certains résineux.

[3] Des marqueurs temporels peuvent être retrouvés chez certains bois tropicaux, mais ceci est beaucoup moins systématique que pour les bois tempérés et le « pas de temps » n'est pas forcément annuel.

bien plus faible dans l'aubier, mais non nulle, et il s'agit souvent (mais pas toujours) de composés de nature chimique différente.

Bois juvénile et bois adulte : on a évoqué cet aspect ci-dessus. Il sera brièvement repris au premier chapitre de la partie 4, dans la mesure où il ne concerne pas les autres aspects de notre travail.

Bois de réaction : afin d'assurer l'orientation (branches) ou la réorientation (troncs penchés accidentellement ou soumis à des vents dominants) de ses axes, l'arbre peut créer des types de bois particuliers assurant un contrôle actif de ces orientations. Les Feuillus (Angiospermes) créent généralement du bois dit de tension et les Résineux (Gymnospermes) du bois dit de compression. Ce dernier sera aussi un peu plus explicité au premier chapitre de la partie 4. Ces deux types de bois ont des caractéristiques microstructurales, chimiques et physico-mécaniques très différentes des bois « normaux ».

c Niveaux de variabilité

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

I.a.1.2. **Matériau cellulaire, composite et polymérique**

On a vu que le bois est constitué d'un arrangement de cellules dont la majorité (sauf les parenchymes de la zone périphérique) sont physiologiquement mortes dans l'arbre vivant, c'est à dire qu'elles consistent en tubes « vides » (Figure 1 A). Le matériau bois est donc constitué de la matière des parois cellulaires, et de vide (les lumens). La matière constitutive des parois (matière ligno-cellulosique ou plus simplement matière ligneuse) est faite essentiellement de 3 grands types de macromolécules :

Cellulose : c'est un polymère linéaire de glucose (en fait d'un dimère de glucose: cellobiose) de degré de polymérisation très élevé (de l'ordre de 10000 unités glucose pour la cellulose de bois). Elle est, pour environ 50-60%, sous forme cristalline : les chaînes moléculaires sont stabilisées par des liaisons faibles intra-chaîne, et associées entre elles par des liaisons faibles inter-chaines. Cette partie cristalline forme des fibrilles, de section à peu près carrée de ≈3,5nm, qui seront associées entre elles (et aux autres constituants) en microfibrilles très rigides et peu accessibles à l'eau. Le reste de la cellulose est dite amorphe.

Hémicelluloses : ce sont des polymères de sucres également, mais qui contiennent différentes unités, à 5 et 6C, et sont peu cristallins, bien plus courts que la cellulose et souvent ramifiés. Elles sont bien plus accessibles à l'eau que la cellulose cristalline. Elles peuvent s'associer aux autres constituants (cellulose et lignines). Leur composition est différente entre feuillus et résineux.

Lignines : elles constituent un réseau polymérique amorphe de nature polyphénolique, ramifié, tridimensionnel et de fort poids moléculaire. Elles peuvent présenter une extrême diversité de formes à partir de 3 monomères de base. Leur composition en monomères est différente entre feuillus et résineux, et localisation dans la paroi.

Dans une vue simplifiée (Figure 1 C), l'agencement de ces constituants est formé d'un réseau de microfibrilles parallèles entre elles et enrobées par une « matrice » amorphe et hydrophile de cellulose amorphe, hémicelluloses et lignines. En fait l'organisation fine est plus complexe et plusieurs modèles ont été proposés pour décrire l'agencement et les interactions entre les composants primaires de la paroi.

Au sein de la paroi la distribution et l'organisation de ces constituants n'est pas uniforme et fait apparaître plusieurs couches (Figure 1 B).

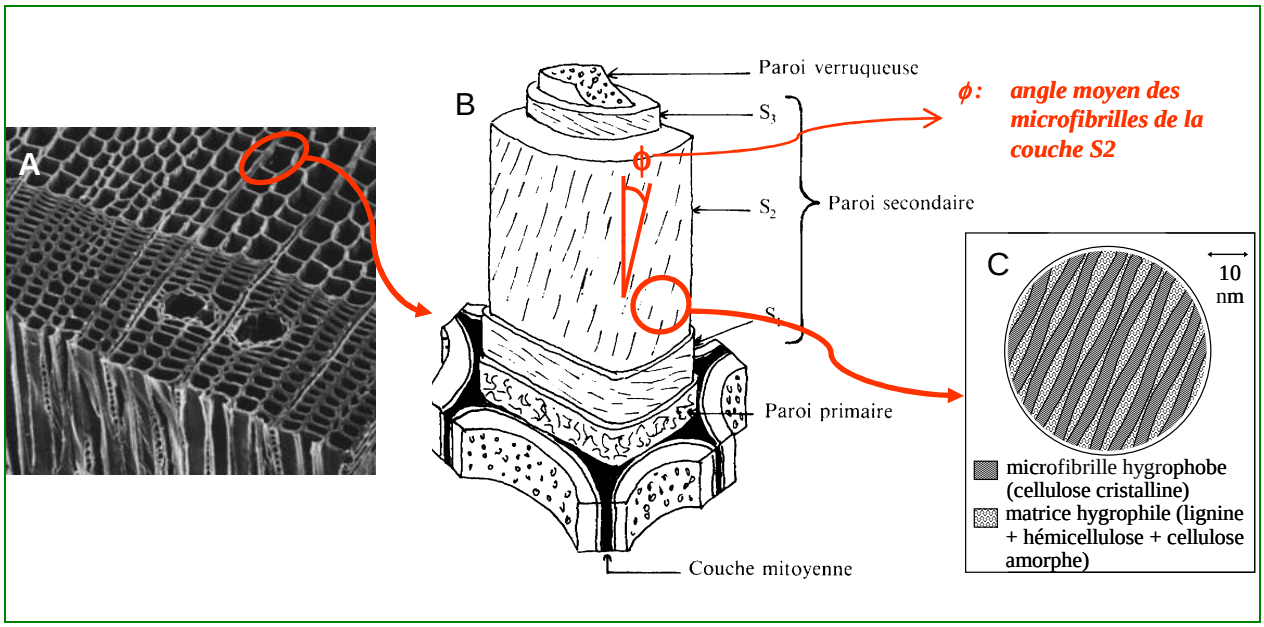


Figure 1 : A : structure cellulaire d'un résineux ; B : organisation de la paroi cellulaire d'une fibre ou trachéide ; C : représentation schématique simplifiée de la matière ligneuse.

Ces couches sont :

-la lamelle mitoyenne, commune à deux cellules et qui assure la cohésion entre elles

-la paroi primaire, très fine, formée pendant la croissance des cellules

-la paroi secondaire, épaisse, est formée lors de la différentiation des cellules, par dépôt hélicoïdal de microfibrilles par couches successives vers l'intérieur de la cavité (accompagnées d'hémicelluloses), qui seront ensuite incrustées de lignines (lors de la maturation). Elle est elle même divisée en 3 sous-couches (dans le bois normal) :

-la couche S1, très fine, où les microfibrilles forment un angle élevé avec l'axe de la cellule, et dont le sens s'inverse créant un croisillon.

-la couche S2 représente jusqu'à plus de 90% de la paroi. Les microfibrilles forment un angle généralement faible avec l'axe de la cellule. Le taux de cellulose est aussi plus élevé. Cette sous-couche et son angle de microfibrilles ont une importance prépondérante dans le comportement physico-mécanique du bois.

-la couche S3 est très fine et les microfibrilles y forment un angle très élevé avec l'axe de la cellule.

Ces orientations lors du dépôt sont contrôlées à la fois par des facteurs génétiques, et par les conditions de croissance.

A cette composition primaire, polymérique, il faut ajouter la possibilité de présence de métabolites secondaires comme on y reviendra souvent dans ce travail.

I.a.1.3. **Matériau multi-échelles et anisotrope**

Compte tenu de son mode de fabrication, et de l'orientation principalement axiale de ses éléments, le bois a des propriétés très différentes dans les différentes directions : il est anisotrope. Il peut être décrit selon une symétrie qualifiée d'orthotrope cylindrique. Au niveau « local » de la pièce de bois, son étude prend en compte 3 directions principales orthogonales entre elles (Figure 2 à gauche). On peut cependant remarquer que ceci est plus ou moins vrai selon le rayon de tige considéré, ou bien dans le cas de fibre torse par exemple.

Ses trois axes principaux sont : longitudinal (selon l'axe du tronc), radial (perpendiculaire aux cernes, soit suivant les rayons ligneux) et tangentiel (parallèle aux cernes).

Dans ce système d'axes, la loi de l'élasticité linéaire explicite les déformations en fonction des contraintes grâce à 9 constantes élastiques :

Trois modules d'Young : E_R, E_T, E_L

Trois modules de cisaillement : G_{TL}, G_{LR}, G_{RT}

Six coefficients de Poisson : υ_{RT}, υ_{TR}, υ_{TL}, υ_{LT}, υ_{LR}, υ_{RL} (qui peuvent être réduits à trois par symétrie).

Les indices R, T et L indiquent la direction radiale, tangentielle et longitudinale respectivement.

Les plans définis par ses axes sont appelés de façon courante, lorsqu'on parle des débits : 'sur quartier' ou 'sur maille' pour le plan LR, 'sur dosse' pour le plan LT, 'bois de bout' pour le plan RT (section transverse).

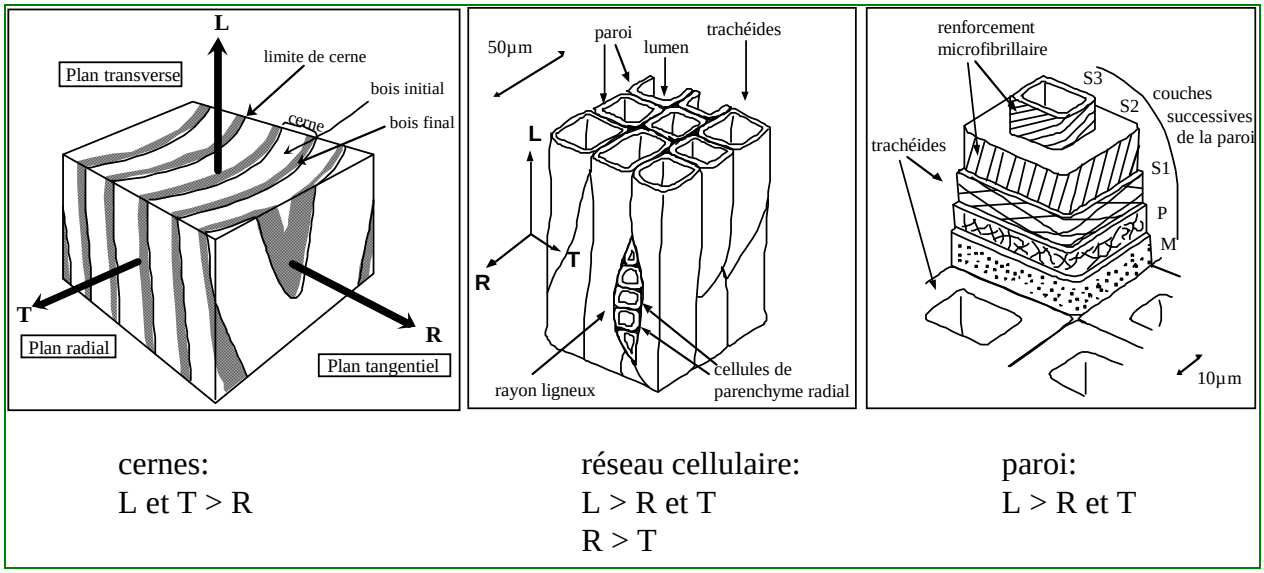


Figure 2 : Anisotropie : contribution imbriquée des différentes échelles de structure.

Les modules d'élasticité sont beaucoup plus forts en direction longitudinale, que radiale puis tangentielle (rapport 14 :2 :1 de façon schématique sur des feuillus).

L'anisotropie s'exprime aussi dans les retraits de séchage : ceux-ci sont généralement très faibles en direction axiale et s'expriment beaucoup plus en direction transverse, où ils sont plus élevés en direction tangentielle que radiale.

I.a.1.4. **Matériau hygroscopique**

En conditions d'usage, le bois contient toujours un « composé additionnel » : l'eau. Ses quantités, localisation dans la structure et état varient en fonction de l'humidité ambiante (Figure 3). La teneur en eau du bois que nous appellerons MC est définie par :

$$MC = \frac{m_{eau}}{m_0} = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Où m est la masse du bois dans un état d'humidité donné et m_0 sa masse totalement anhydre.

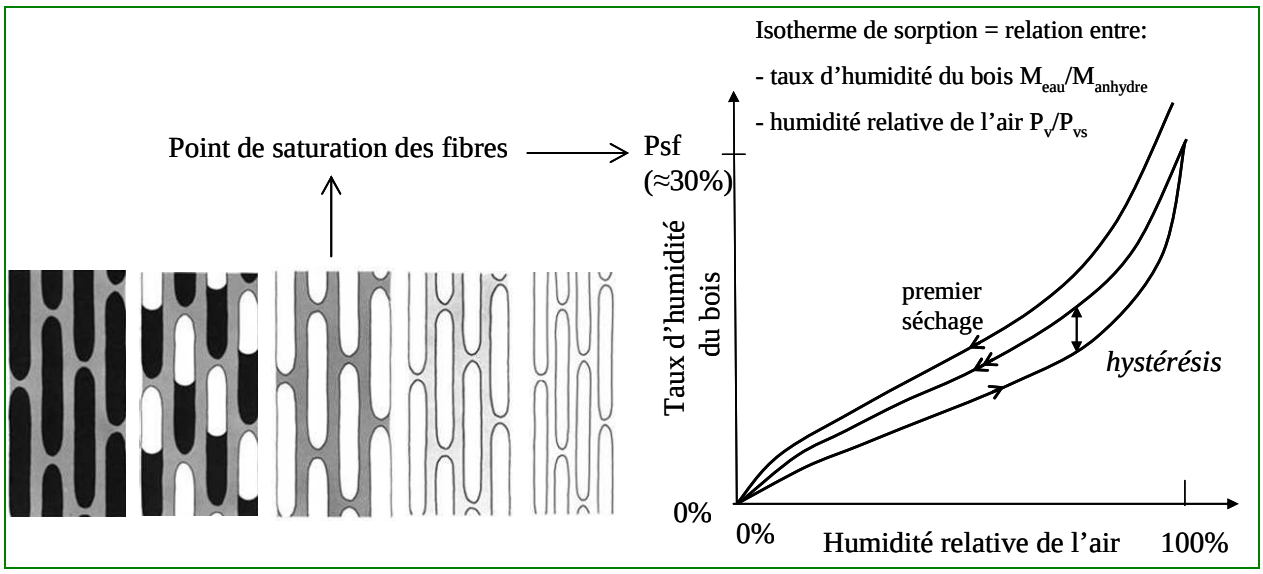


Figure 3 : L'eau dans le bois : (à gauche) représentation schématique du passage du bois saturé à anhydre (en noir : eau libre dans les cavités/lumens ; en gris : eau liée à la matière des parois). (À droite) isothermes de sorption/désorption (domaine hygroscopique).

Lorsque le bois est totalement saturé d'eau, les cavités sont pleines d'eau liquide, et les parois d'eau liée. Au fur et à mesure du séchage l'eau liquide part des lumens, sans que cela se traduise par des déformations de retrait. Lorsque les lumens ne contiennent plus d'eau liquide, mais que les parois sont encore saturées, on parle du « point de saturation des fibres » (Psf). Cette teneur en eau est souvent de l'ordre de 30%, mais plus généralement de 20-40% sur différentes essences. Entre le Psf et l'état anhydre (= dans le domaine hygroscopique), le départ d'eau liée aux parois se traduit par une déformation de retrait, et le gain d'eau par les parois par une déformation de gonflement. L'eau est liée par des liaisons faibles aux composants des parois (surtout hémicelluloses et cellulose amorphe) soit directement, soit par l'intermédiaire des molécules d'eau déjà liées à la matière ligneuse.

L'état d'humidité du bois et ses variations jouent un rôle très important vis-à-vis de son comportement mécanique.

I.a.2. **Propriétés vibratoires élémentaires des bois**

Dans ce travail, on considérera les propriétés mécaniques des bois impliquées dans le comportement vibratoire sous un angle relativement simple, correspondant à l'objectif de caractérisation de la diversité des bois, sur des pièces de géométrie simple telles que des poutres de section uniforme. La situation est très généralement bien plus complexe ne serait-ce que pour une partie « isolée » d'instrument de musique en raison des différentes géométries, et bien sur a fortiori sur des instruments finis, structures souvent complexes comprenant plusieurs composants interagissant entre eux, et avec l'air. Par ailleurs, on restera dans le cadre des gammes de fréquences, de température et d'humidité, qui peuvent être rencontrées dans l'usage des instruments.

I.a.2.1. **Propriétés élastiques et réponse fréquentielle**

Les fréquences propres d'une structure dépendent de sa géométrie, des conditions aux limites qui lui sont imposées, et des propriétés du ou des matériaux la constituant.

Pour des vibrations de flexion, dans le cas où la géométrie est celle d'une poutre de section rectangulaire constante, et où les conditions aux limites sont libre-libre (pour une étude détaillée de ce cas de figure, voir notamment Bordonné 1989 et Brancheriau 2002], les fréquences propres peuvent être déduites des modules élastiques du bois selon différents modèles théoriques.

D'après le modèle de Bernouilli (1748), la fréquence propre (f_n) du $n_{ième}$ mode peut être exprimée en fonction du Module d'Young (E) dans la direction considérée et de la densité (ρ) d'après :

$$f_n = \frac{m_n^2}{2\pi}\sqrt{\frac{I}{AL^2}} \times \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

Où : A : aire de la section ; L : longueur ; I : moment d'inertie (=$bh^3/12$ pour une section rectangulaire de base b et de hauteur h). m_1=4,730 ; m_2=7,853 ; m_3=10,996….

Cette expression repose sur l'hypothèse d'un très grand élancement (L/h), suffisant pour négliger l'influence du cisaillement et de l'inertie de rotation. En pratique, les modules apparents ainsi déterminés ne sont pas constants, mais diminuent avec la fréquence pour les modes d'ordre supérieur, d'autant plus que l'élancement est faible.

L'indépendance de E à l'augmentation de fréquence (dans la gamme audible) demande la prise en compte de l'influence du cisaillement et de l'inertie de rotation (modèle de Timoshenko [Hearmon 1958 ; Bordonné 1989]). L'expression correspondante est présentée dans la partie II en lien avec les méthodes expérimentales.

En résumé, la réponse en fréquence d'une poutre homogène très élancée peut être raisonnablement prédite par le module spécifique (E/ρ) correspondant à sa direction principale ; pour des poutres de moindre élancement, intervient le module de cisaillement dans le plan de vibration, comme paramètre additionnel.

Dans le cas de plaques minces, homogènes et bien orientées selon les directions d'orthotropie, théoriquement au moins 3 constantes élastiques sont nécessaires pour décrire le comportement vibratoire de façon approchée (E_L, E_R, G_{LR} dans le cas d'une plaque « sur quartier ») [McIntyre & Woodhouse 1984, 1985, 1986].

En sus de la définition des fréquences propres, les propriétés élastiques et la géométrie sont importantes en regard du rayonnement acoustique de plaques. Celui-ci est nul (plaque infinie « virtuelle ») ou faible (plaque finie) au dessous de la « fréquence critique » ou « fréquence de coïncidence », maximum pour celle-ci, et diminue ensuite graduellement au dessus [Holz 1996b ; David 1999]. Elle vaut :

$$fc = \frac{c^2}{2\pi}\sqrt{\frac{\rho_s}{D}}$$ où c=célérité du son ; ρ_s : masse surfacique du matériau ; D : rigidité du matériau. Cette fréquence de coïncidence est donc inversement proportionnelle à l'épaisseur, et inversement proportionnelle au module spécifique E/ρ.

I.a.2.2. **Viscoélasticité et amortissement**

L'amortissement, ou décroissance temporelle des vibrations libres d'une structure, peut être du –dans l'absolu- à différents mécanismes de dissipation de l'énergie, par couplage au milieu ambiant, ou bien intrinsèques au matériau [Bordonné 1989 ; Lambourg 1997 ; David 1999 ; Brancheriau 2002]. Dans le cas du bois[4] il semble généralement admis que la contribution propre du matériau (i.e. à géométrie et amplitude de déformation données) aux phénomènes d'amortissement relève essentiellement du facteur de perte viscoélastique et on

[4] Selon les matériaux (et les conditions expérimentales), les contributions des différents types de dissipation n'ont pas la même importance relative, certaines étant souvent petites devant d'autres, et on peut raisonnablement en ignorer pour un même matériau. Par exemple, les pertes viscoélastiques sont négligeables pour l'aluminium, tandis que la contribution des pertes par rayonnement acoustique est secondaire pour des matériaux comme le bois ayant un amortissement intrinsèque supérieur [Lambourg 1997 ; David 1999 ; Brancheriau 2002].

adoptera cette hypothèse. Les différents mécanismes possibles sont très brièvement évoqués ci-dessous :

-Interactions entre la structure vibrante et l'air environnant. Ceci comprend les pertes par rayonnement acoustique, et par frottement fluide dans l'air. Le premier point est lié aux rapports entre structure et module d'élasticité spécifique comme présenté ci-dessus. Le deuxième point semble surtout important pour de fortes amplitudes de déplacement [Lambourg 1997].

-Pertes thermoélastiques. Ces dissipations sont dues au transport de chaleur entre les zones qui sont comprimées/échauffées et étirées/refroidies lors de la vibration. Ce mécanisme apparaît être pour des cordes et plaques métalliques d'une importance secondaire aux fréquences « élevées » d'intérêt dans les instruments [Brancheriau 2002 ; David 1999], quoique son importance augmente pour des plaques relativement épaisses [Lambourg 1997]. Dans le cas du bois dont la conductivité thermique est faible on peut les considérer négligeables.

-Pertes viscoélastiques [Gril 1987 ; Bardet 2001].

Pour un matériau viscoélastique linéaire, lorsqu'on exerce une sollicitation sinusoïdale de faible amplitude σ_0 et de fréquence f (ou pulsation $\omega=2\pi f$), la réponse est également sinusoïdale, de même fréquence et déphasée d'un angle δ.

Pour un exemple où la déformation est imposée, celle-ci s'écrit :

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t)$$

La réponse en contrainte est de la forme

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta)$$

Il est commode d'utiliser une notation en nombres complexes :

$$\varepsilon^*(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t} \ ; \ \sigma^*(t) = \sigma_0 e^{(i\omega t+\delta)}$$

Les grandeurs σ et ε sont les parties réelles de σ^* et ε^*. On définit alors un module complexe E* :

$$E^*(\omega) = \frac{\sigma^*(t)}{\varepsilon^*(t)}$$

On appelle 'module de conservation' (E') la partie réelle du module complexe et 'module de perte' (E'') sa partie imaginaire. Leur rapport s'exprime par la grandeur tanδ :

$$\tan\delta = \frac{E''}{E'}$$

On appellera 'coefficient d'amortissement' cette grandeur tanδ (elle peut aussi être appelée facteur ou coefficient de perte ou tangente de l'angle de perte). tanδ caractérise le retard de la réponse par rapport à la sollicitation. On montre que tanδ est relié à l'énergie dissipée au cours d'un cycle de vibrations forcées, ainsi qu'à l'amortissement de vibrations libres (Figure 4 à gauche) selon :

$$\tan\delta = \frac{\lambda}{\pi} = \frac{1}{\pi n}\ln\left|\frac{x_1}{x_{n+1}}\right|$$

La quantité $\pi\tan\delta$ est souvent employée dans la littérature sous le terme de 'décrément logarithmique' λ.

Dans le domaine fréquentiel, on peut relier tanδ à la largeur de pic à demi-puissance ; la grandeur Q (inverse de tanδ) est souvent appelée 'facteur de qualité' (Figure 4 à droite).

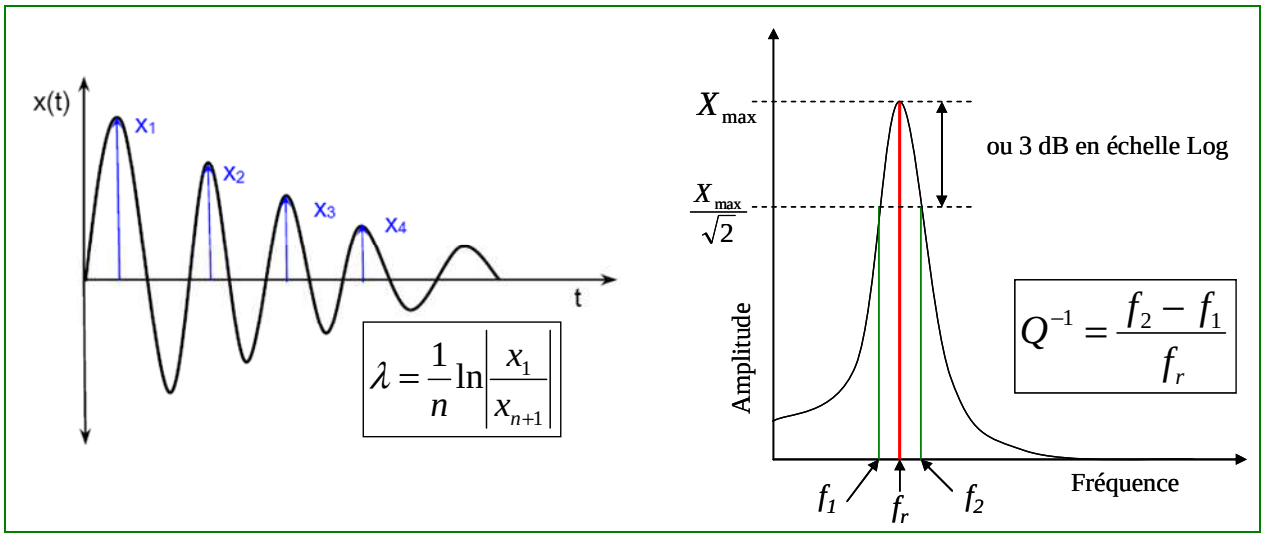


Figure 4 : Expressions du facteur de perte : dans le domaine temporel (à gauche) via le décrément logarithmique λ ; dans le domaine fréquentiel (à droite) via la largeur de pic à demi-puissance (facteur de qualité Q).

Le coefficient d'amortissement apparent dépend de la fréquence, même dans la gamme audible à considérer dans les instruments (cette gamme reste restreinte par rapport à celles qui peuvent être étudiées dans le domaine de la viscoélasticité), a priori selon deux phénomènes superposés. D'une part, pour des vibrations de flexion, l'influence du cisaillement et de l'inertie de rotation augmente, comme dans le cas du module « élastique » et ce d'autant plus que les pièces de bois sont moins élancées [Nakao et al 1985]. D'autre part, il semble que le coefficient d'amortissement présente une augmentation intrinsèque (i.e. après correction pour l'influence du cisaillement) [Ono & Kataoka 1979]. Ces auteurs trouvaient que cette augmentation se manifestait aux environs de 5kHz et était dépendante de l'espèce de bois étudiée (Figure 5).

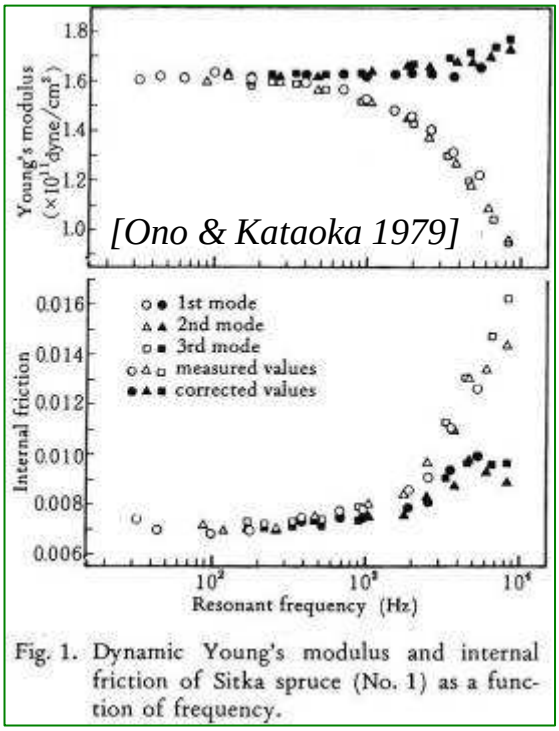


Figure 5 : Module de conservation et coefficient d'amortissement en fonction de la fréquence : évolution apparente (symboles vides) et corrigée pour l'influence du cisaillement et de l'inertie de rotation (symboles pleins). [Ono & Kataoka 1979]

I.a.2.3. **Influence de l'humidité**

Les propriétés vibratoires élémentaires considérées ici (module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement dans une plage fixée de fréquences) dépendent fortement des conditions hygrothermiques. Pour les instruments de musique, on peut espérer que dans les conditions de jeu la gamme de températures rencontrées ne dépasse pas de trop 10-40°C et pour les fréquences audibles il semble que leur influence serait modérée.

Dans le domaine hygroscopique, E' diminue avec l'augmentation de teneur en eau (MC), et tanδ augmente. Il semble que sa diminution ne soit pas linéaire en fonction de MC (Figure 6, [Obataya et al 1998]), mais présente un minimum aux environs de 6-7% (ici sur de l'Epicéa, température 20°C, fréquences aux environs de 400Hz). Ces données correspondent à ce qui était relevé pour des teneurs en eau à l'équilibre, le bois étant stabilisé pour au moins 2 semaines dans une même condition.

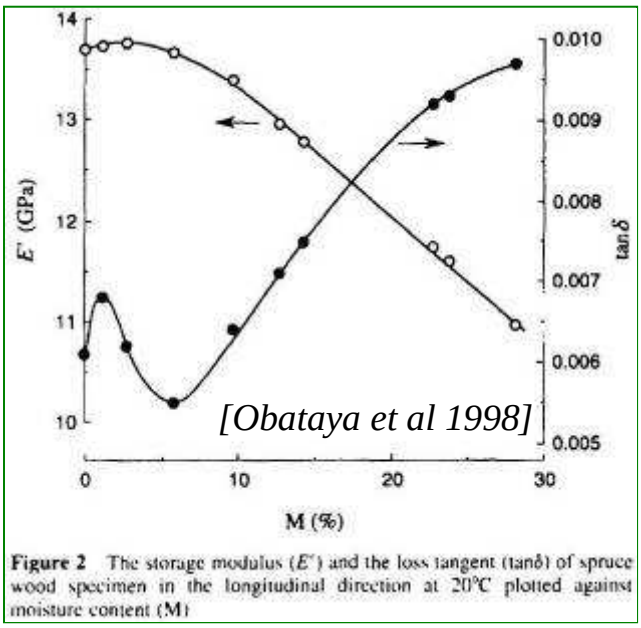


Figure 6 : Module de conservation et coefficient d'amortissement pour différentes teneurs en eau à l'équilibre, à 20°C, sur de l'Epicéa [Obataya et al 1998].

D'après [Sasaki et al 1988], l'effet de la teneur en eau était comparable sur E'/ρ et sur tanδ dans des conditions à l'équilibre et était plus important sur le coefficient d'amortissement dans des conditions hors équilibre, lors d'un changement soudain de conditions ambiantes (Figure 7 gauche).

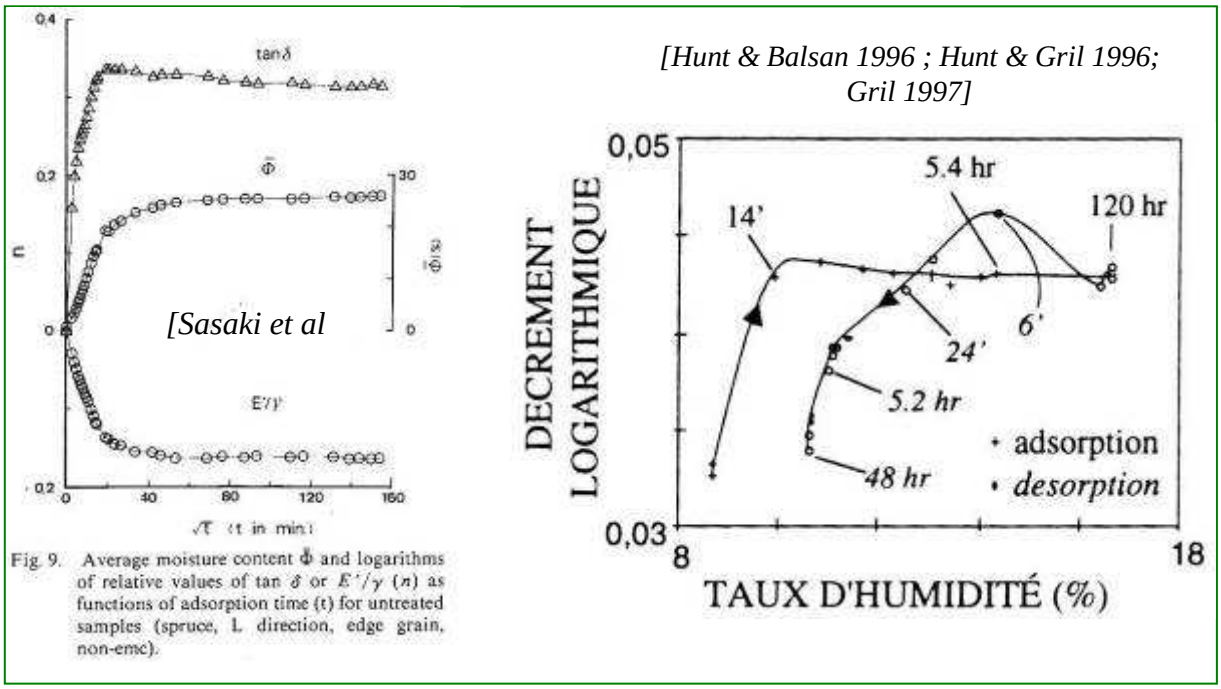


Figure 7 : Evolution des propriétés vibratoires avec la teneur en eau hors équilibre. (à gauche) Variations de tanδ, E'/ρ (module de conservation spécifique) et de la teneur en eau entre 0 et près de 30% [Sasaki et al 1988]. (à droite) Variations de décrément logarithmique λ lors du passage d'une humidité relative de 35% à 81% (à 20°C), en adsorption puis en désorption (d'après [Gril 1997]).

Le coefficient d'amortissement augmentait drastiquement lors du changement de conditions (ici extrême) avant de se stabiliser lentement. Sur une plage expérimentale moins

extrême, des pics d'amortissement étaient aussi observés pour l'adsorption et pour la désorption [Hunt & Gril 1996] et traduisaient une augmentation transitoire de la mobilité moléculaire.

I.b. Essences de bois employées dans différents types d'instruments

Dans la suite de notre travail, on étudiera surtout la diversité interspécifique de propriétés vibratoires de bois utilisés ou utilisables en facture instrumentale. Il semble utile de commencer par présenter quelques associations entre matériau bois et fonction dans les instruments de musique. Cette présentation sera un peu lacunaire compte tenu de la complexité du sujet lorsqu'on prend en compte différents types d'instruments.

Les critères de choix des bois dans les instruments de musique font appel à de nombreuses considérations d'ordre différent, relevant à la fois de paramètres technologiques, et culturels (Figure 8). D'un point de vue de « l'objet sonore » lui-même, ce serait un truisme de rappeler que les différentes familles et sous familles d'instruments fonctionnent sur différents principes acoustiques. De même et peut-être a fortiori pour les différentes parties des instruments composés. Le rôle du matériau dans ces fonctionnements a une influence plus ou moins sensible, et fait appel à différentes catégories de propriétés matérielles (mécaniques-acoustiques et/ou physiques, ou bien découlant des propriétés d'usinage *via* les états de surface possibles à obtenir…). Par ailleurs, les critères subjectifs quant aux « sonorités » ne sont pas forcément universels entre différentes cultures musicales, et les modes de jeu associés peut-être encore moins.

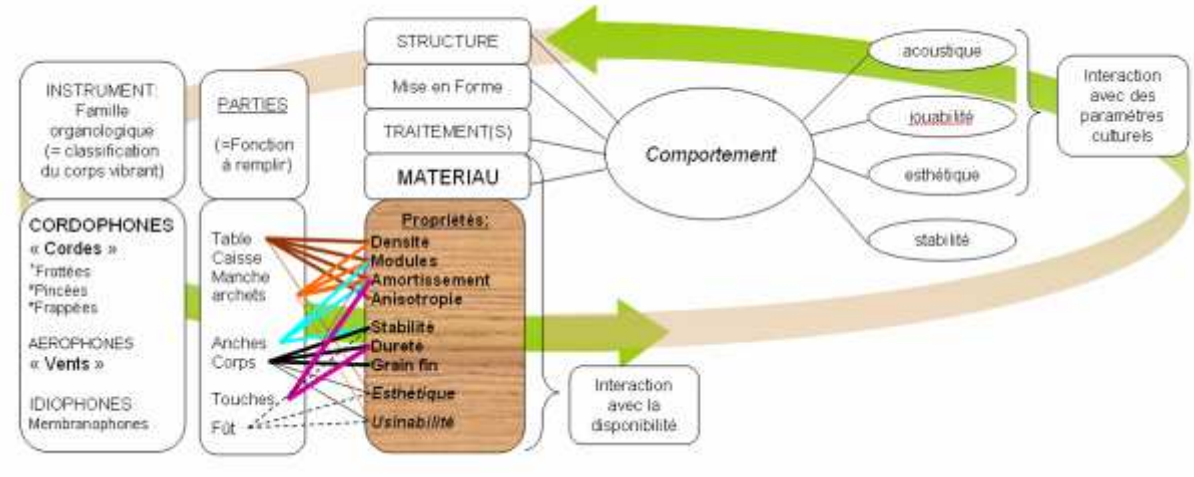


Figure 8 : Vue schématisée des interactions entre paramètres de conception pouvant entrer en jeu, vis à vis des parties d'instrument en bois

D'autres critères importants de choix du matériau relèveront aussi de leur aptitude à la mise en forme (usinage, formage, finition) en tant qu'objets manufacturés. En tant que structures, des impératifs de stabilité sont à prendre en compte (au niveau de la tenue mécanique, de la limitation des déformations hygroscopiques, de la durabilité biologique dans certains cas).

En tant «qu'objet manufacturé », la disponibilité du matériau-bois est évidemment un critère nécessaire –quoique pas suffisant. La disponibilité concerne d'abord l'espèce, puis la qualité de bois dans l'espèce, et enfin les dimensions de pièces de qualité appropriée qui peuvent être obtenues, ce point étant à la frontière des impératifs de disponibilité, et de mise en forme. Par exemple, les parties duraminisées sont fréquemment les seules employées ; certains arbres/espèces peuvent atteindre des diamètres assez conséquents mais présenter une duraminisation tardive, et donc un petit diamètre de bois effectivement utilisable ; certaines espèces sont de toute façon de petit diamètre. On peut toutefois remarquer qu'une très grande

disponibilité n'est pas forcément un critère de choix, et qu'au contraire la rareté et la « préciosité » peuvent être préférées.

Enfin, en tant « qu'objet culturel », des critères d'esthétique visuelle (du bois lui-même, et/ou du travail d'ornementation qu'il permet), de « statut culturel » du bois, de traditions et de modes sont évidemment très présents. Ceci ne concerne pas seulement les instruments de musiques traditionnelles, ni les instruments de musiques « savantes » fabriqués par des artisans luthiers, mais aussi les instruments de facture industrielle à partir du milieu de gamme.

Dans ce chapitre, on présentera brièvement quelques bois « standards » employés dans des instruments importants en musique Occidentale, et un résumé de leurs propriétés vibratoires élémentaires connues. Quelques données concernant des bois employés dans d'autres cultures pourront être mises en comparaison.

Ensuite, on présente la mise en place d'une base de données spécifique que nous avons commencée lors de ce travail, et qui devrait à terme permettre de confronter d'une part les choix de bois entre différentes aires géoculturelles, d'autre part de relier les choix de bois observés avec les propriétés physico-mécaniques disponibles pour ces essences.

I.b.1. **Descriptif par famille organologique**[5]

Dans cette section, on présentera deux niveaux d'informations : d'une part, un résumé des associations espèces de bois/partie d'instrument et des propriétés connues de ces bois, dans le cadre d'instruments « archétypes » de musique Occidentale. En parallèle, quelques informations peut être moins connues seront esquissées, concernant les associations bois/instruments à travers d'autres cultures (géographiques ou « historiques »). Seules quelques associations sont décrites, la gestion de toutes les informations récoltées faisant l'objet de la base de données dessinée ci-dessous.

Ici on parlera d'abord des familles organologiques pour lesquelles l'influence des propriétés vibratoires du bois sur l'acoustique de l'instrument est un peu mieux documentée : idiophones et cordophones. En revanche, les 4 familles organologiques (avec les aérophones et membranophones) ont été prises en compte dans notre recensement espèces botaniques/usages en facture instrumentale qui fait l'objet de la base de données spécifique présentée ci-dessous.

Dans les descriptions ci-dessous, lorsque des valeurs des propriétés mécaniques des bois « archétypes » sont disponibles, on donnera celles mesurées en conditions comparables : au premier mode de vibration (fréquences entre 100 et 1000Hz en général selon les références), et en conditions « sec à l'air » standards (20°C et 65%HR en général, on acceptera celles ne s'en écartant pas trop).

I.b.1.1. **Idiophones**

Dans cette famille, l'élément vibrant « primaire », à l'origine du son produit, est la structure même de l'instrument sans nécessiter d'éléments tendus. Parmi toute la variété des idiophones, pour ceux qui sont réalisés en bois on peut citer d'abord les « percussions à claviers » (ou « jeux de bâtons percutés » d'après [Hornbostel & Sachs ; traduction Baines 1961]) tels que xylophones, marimbas. Leur principe de fonctionnement a bien sûr attiré des recherches liées aux propriétés des matériaux-bois employés. Les qualités désirables pour le matériau des touches ont pu être résumées [Bork cité dans Holz 1996a] comme : « dureté et

[5] On adopte ici, au moins dans les grandes sub-divisions, une classification « organologique », suivant celle de [Hornbostel & Sachs 1914 ; Traduction Baines 1961]. Le principe est que les instruments sont divisés en 4 grandes familles selon la nature de l'élément vibrant primaire (i.e. on ne parlera pas « d'instruments à percussion », mais d'idiophones et de membranophones).

résistance élevée, faible tendance à fendre ou éclater, faible coefficient de perte, fort module d'Young, forte densité ».

Pour l'aspect sonore proprement dit, la réponse dépendra des propriétés mécaniques du matériau de façon plus directe que pour les autres familles d'instruments. Elle dépendra aussi bien sûr de la géométrie des touches (dimensions + coupe d'accordage), mais également des propriétés du « corps percutant » (mailloches ou baguettes) et de la présence ou non de résonateurs [Chaigne & Doutaut 1997].

Sur des pièces de bois de géométrie fixée, la comparaison des propriétés mécaniques mesurées et d'appréciations auditives de musiciens et de facteurs faisaient ressortir que le coefficient d'amortissement du fondamental était la variable la mieux corrélée avec les meilleurs classements. Ceci a été relevé soit entre plusieurs espèces très différentes [Curie 1989 ; Brillard 2002 ; Brancheriau et al 2006] soit entre plusieurs qualités d'une même espèce « préférée » (Palissandre du Honduras, *Dalbergia stevensonii*) [Hase 1987] –donc pour une gamme plus restreinte qu'à l'échelle interspécifique.

En terme d'essences utilisées, les instruments destinés à la musique occidentale, pour le haut de gamme, ont généralement des touches en Palissandres, le Palissandre de Honduras ci-dessus semblant être préféré. D'après [Record & Hess 1949], le Palissandre de Rio (*D. nigra*) avait d'abord été employé aux Etats-Unis, mais avait été supplanté par celui du Honduras qui résistait mieux aux impacts et était « plus résonnant ». [Holz 1996a] cite comme bois « typiques » ces deux espèces, plus le Palissandre d'Amazonie (*D. spruceana*). Il signale aussi que des xylophones réalisés en bois de feuillus tempérés (Bouleau, Hêtre, Erable) avaient un son « court et terne » (vérifié par ses mesures mécaniques).

D'un point de vue des gammes de valeurs de propriétés, on peut noter pour le Palissandre du Honduras : densité « sec à l'air » autour de 1,04 ; module spécifique ≈21GPa ; coefficient d'amortissement au premier mode ≈4,1‰ (3-5‰) [Hase 1987].

On peut remarquer que les instruments de type xylophone n'ont été incorporés que « récemment » dans la musique savante occidentale (vers la deuxième moitié du XIXè siècle semblerait-il). Dans les régions où ils sont ancrés de façon plus ancienne[6], plusieurs autres espèces et genres peuvent être relevés.

Par exemple, il est intéressant de relever qu'en Amérique Centrale (zone phytogéographique dont provient *D. stevensonii* et où l'on retrouve plusieurs espèces de *Dalbergia*) les touches de Marimbas traditionnelles semblent être réalisées de préférence dans des espèces de *Platymiscium* (plutôt que de *Dalbergia*) [Salazar Salvatierra 1994 ; Kaptain 1991 ; Record & Hess 1949 ; Quintanar Isaias & Paz Perez 1994]. On reste cependant sur des genres botaniquement proches (Papilionaceae, Leguminosae). Les résonateurs peuvent faits dans des bois plus légers comme *Cedrela odorata* (Cédro, Meliaceae) ou Cyprès, ou encore en calebasse ou fer.

Pour le xylophone Ranad en Thaïlande, les bois utilisés de façon traditionnelle pour les touches comprennent bien un *Dalbergia* (*D. oliveri*), mais aussi un bois de Moraceae (*Artocarpus lakoocha*), le second apparaissant relativement plus léger et moins amortissant que le premier [Rujinirun et al 2005]. Les résonateurs emploient une autre espèce d'*Artocarpus* au bois plus léger ($\rho \approx 0,5$) mais de propriétés vibratoires similaires.

L'importance et la diversité d'instruments de type xylophone en Afrique est connue. Sur un corpus de 149 instruments d'Afrique Centrale, [Déchamps 1973] a identifié les espèces de bois employées et mis ses résultats en relation avec des catégories organologiques. Les xylophones à touches libres (« simples ») ne semblaient pas présenter d'espèce

[6] Il existe une certaine quantité de littérature quant aux hypothèses de migration et/ou d'invention indépendante des xylophones entre aires géoculturelles : Asie, Indonésie, Afrique, Amérique Latine.

prédominante. En revanche, ceux à touches fixées (instruments plus pérennes) employaient dans 75% des cas des espèces de *Pterocarpus* (Papilionaceae : *P. soyauxii, luscens, tinctorius, angolensis* et *spp.).* Ce genre était suivi d'essences d'Annonaceae à bois dur, apparemment lorsque les *Pterocarpus* étaient peu disponibles. *P. soyauxii* semble utilisé dans la facture de ces instruments de façon assez vaste. Il était aussi signalé au Gabon [Raponda-Walker & Sillans 1961]. Une autre espèce de ce genre est très importante dans sa zone de répartition phytogéographique : *P.erinaceus* ([Branger 1993] par exemple). Ces deux dernières essences feront l'objet d'une partie de notre étude expérimentale (deuxième chapitre de la partie 4).

D'autres espèces ont été recensées et, pour quelques-unes, sont déjà implémentées dans notre base de données présentée ci-dessous.

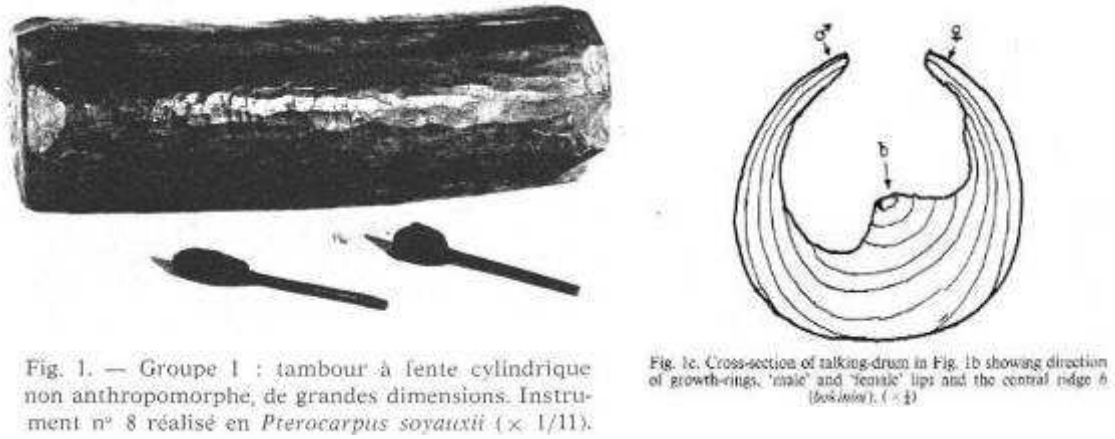


Figure 10 : Tambour à fente d'Afrique Centrale, non ornementé, destiné à la transmission de messages : Illustration d'après [Déchamp 1972] et vue en section d'après [Carrington 1976].

Une autre catégorie importante d'idiophones percutés en bois est celle des tambours à fente (parfois appelés tambours de bois, ou « slit gongs » en Anglais). Leur fonctionnement est différent puisqu'il s'agit de résonateurs de Helmoltz. Ils sont aussi intéressants d'un point de vue « histoire des techniques » puisque certains types ont constitué un système ancien de télécommunications sans fil très performant, permettant de transmettre des messages « parlés » avec des relais distants de plus de 10 kilomètres [Carrington 1976].

Les tambours à fente (« tubes à percussion ») consistent en une pièce de bois (souvent une portion de tronc) évidée de l'intérieur, à partir d'une fente longitudinale, et dont les deux côtés sont souvent travaillés selon différentes épaisseurs afin d'obtenir deux (ou plus) sons de hauteurs distinctes (Figure 10).

[Déchamp 1972], selon une même démarche que celle ci-dessus, a étudié les essences utilisées dans la fabrication d'un corpus de 313 tambours à fente d'Afrique Centrale répartis en 14 catégories organologiques. Pour la catégorie destinée à la transmission des messages le choix quasi-exclusif était encore *P. soyauxii*. Par contre, de façon globale le choix des bois était beaucoup plus disparate dans l'ensemble : 82 espèces. En revanche, à l'intérieur des groupes le choix était plus restreint et pouvait être dicté –en sus de l'implication acoustique manifeste pour le groupe déjà signalé- par l'aptitude des bois à la sculpture pour les catégories les plus ornementées. Cet auteur en concluait un choix de bois dicté par l'importance relative de la fonctionnalité prioritairement acoustique, et/ou des impératifs de mise en

Figure 9 : Tambour d'Ambrym, h : 172cm.

forme pour ces instruments dont la réalisation demande une grande maîtrise technique (la cavité est évidée uniquement via la fente dont la largeur ne doit pas être trop modifiée).

Nous avons commencé à nous intéresser aux essences de bois employées dans ces types d'instruments dans d'autres aires géoculturelles. Des tambours à fente sont retrouvés avec une grande importance culturelle en Océanie, dont des formes monumentales au Vanuatu notamment (tels les tambours d'Ambrym sculptés, Figure 9). Il est difficile d'obtenir une information botanique mais il semble qu'ils soient réalisés en un « arbre à pain » [Crowe 1995] qui pourrait être une espèce d'*Artocarpus*. D'autres essences sont citées cependant (cf. début d'implémentation dans notre base de données). Les Garamut de Papouasie Nouvelle Guinée semblent employer fréquemment un *Vitex* (Verbenaceae) [Coiffier & Orliac 2000].

On retrouve aussi ces types d'instruments en Asie et en Amérique Latine. Ici encore, il n'est pas possible de présenter dans le texte toutes les différentes cultures et espèces concernées. Nous avons déjà réuni une certaine quantité d'éléments qui pourront faire l'objet d'approfondissements ultérieurs, notamment via leur organisation dans la base de données « bois et organologie ».

I.b.1.2. **Cordophones**

Comme leur nom l'indique, le corps vibrant primaire des « instruments à corde » est une (ou plusieurs) corde tendue(s). La structure solide elle-même peut revêtir une très grande diversité de forme et de complexité, depuis un simple arc jusqu'à des structures complexes comptant des centaines de pièces comme dans les instruments à clavier. Il ne semble pas possible de détailler dans le texte les bois de toutes les parties de tous les cas de figure.

Dans le cas des instruments ayant une table d'harmonie et une caisse de résonance en bois (tels qu'instruments du quatuor, guitare, piano pour des instruments « archétypes » occidentaux), les cordes peuvent être tendues selon différents schémas et géométries sur la structure et imposer différents efforts mécaniques.

Du point de vue de la production sonore, les cordes vont imposer des vibrations à la table (via un ou plusieurs chevalets) et à la caisse (volume d'air et parois). L'importance de la table et de la cavité est plus grande que celle du « fond ». Bien évidemment la géométrie de la structure (qui peut aussi être précontrainte par les cordes et/ou les barrages) joue beaucoup, mais le rôle du matériau est reconnu. De façon générale, pour ces instruments « classiques », il est assez universellement connu que les tables emploient des bois de Résineux, surtout du genre *Picea*, dont *Picea abies* notamment en Europe. Le « Western Red Cedar » (*Thuja plicata*, Cupressaceae) est aussi très utilisé en guitares.

En terme de propriétés, l'Epicéa est relativement léger (0,4-0,5) et a un fort module spécifique axial et une forte anisotropie. A l'intérieur de la gamme de propriétés pour les espèces de type Epicéa, il a été montré que les bois préférés en facture présentaient les plus forts modules d'élasticité spécifique, et les plus faibles coefficients d'amortissements [Ono & Norimoto 1983].

A l'intérieur d'une certaine gamme « optimale », des préférences de choix individuels peuvent être effectués par différents luthiers. Il semblerait aussi qu'un « trop » faible amortissement ne soit pas désirable dans les violons, donnant un son trop « criard » [Fletcher & Rossing 1998]. Cependant, d'après des essais sur bois modifiés chimiquement pour diminuer leur amortissement, les violons traités étaient « plus brillants et sonores » [Yano & Minato 1992] et il semble que des préférences culturelles puissent intervenir.

Le Red Cedar est plus léger, a un E'/ρ plus faible et un $\tan\delta$ plus faible que l'Epicéa [Yano 1994]. De façon très résumée, des guitares ayant la table faite en ce bois avaient été classées comme plus « chaleureuses » et moins « sèches » qu'en Epicéa [Douau 1986]. Ici encore il existe des préférences individuelles.

L'importance relative des bois de fond dans le résultat sonore est moindre, mais non nul. L'érable ondé est de notoriété publique un bois de « fond de violon ». En ce qui concerne les guitares classiques, le Palissandre de Rio correspondrait à un même « standard », accompagné ou remplacé[7] par le Palissandre Indien (*D. latifolia*). L'usage du Cyprès est également bien connu pour la guitare flamenca.

Un résumé des valeurs moyennes de propriétés vibratoires élémentaires de ces bois est présenté sur le Tableau 1.

D'autres bois souvent importants en facture de guitares (manches, fonds/éclisses de guitares à cordes métalliques) concernent les « Acajous » d'Amérique Latine (Acajou de Cuba *Swietenia mahagoni* et « du Brésil » *S. macrophylla*, Meliaceae).

Tableau 1 : Propriétés vibratoires moyennes de bois « archétypes » en facture d'instruments à cordes occidentaux, d'après [Bucur 1995 ; Yano et al 1995 & 1997 ; Matsunaga et al 1996 ; Haines 2000]. Indice L : direction axiale ; indice R : direction radiale. Gammes de fréquences entre 200 et 700 Hz. E et E'/ρ en GPa, tanδ en ‰.

Essence	ρ	E_L	E_L/ρ	$\tan\delta_L$	E_R	E_R/ρ	$\tan\delta_R$
Epicéa	0,46	15,0	32,6	6,7	0,7	1,5	20,4
Red Cedar	0,35	7,3	20,7	4,8	0,62	1,7	10,4
Erable (ondé)	0,66	10,0	15,1	12,1	2,2	3,3	21,3
Palissandre de Rio	0,86	15,5	18,1	5,8	2,0	2,3	14,7
Palissandre Indien	0,77	13,4	17,4	7,3	2,3	3,0	14,3
Pernambouc	0,92	18,2	19,8	4,1			

Il faut bien sûr remarquer que différentes qualités d'un même bois pourront s'éloigner de ces valeurs moyennes.

Parmi les « accessoires » (touche, cordier...), des qualités mécaniques de résistance sont évidemment nécessaires. Il a aussi été suggéré qu'ils puissent avoir une certaine influence sur la sonorité [Hutchins 1993 ; Voskuil 1995 ; Carranza Gaytan 2003].

Pour l'archet, le bois standard (et sensiblement unique dans la fabrication des archets modernes haut de gamme) est le Pernambouc (*Caesalpinia echinata*, Caesalpiniaceae, Leg.). La baguette (Figure 11) doit avoir une résistance mécanique (au flambement notamment, [Dauchez et al 2006]) importante pour assurer la tension du crin, avec peu de marge de manoeuvre du fait que la masse de l'archet et sa section (ronde ou octogonale dans les modèles « classiques » modernes) ne peuvent être trop modifiées pour des raisons de jeu. Une densité élevée est nécessaire. Un faible coefficient d'amortissement est important pour minimiser l'absorption d'énergie [Matsunaga et al 1996 ; Wegst 1996], ainsi que semblerait-il pour la jouabilité et le ressenti du musicien. On peut remarquer dans le tableau ci-dessus que le Pernambouc a la plus faible valeur de tanδ parmi ces bois archétypes.

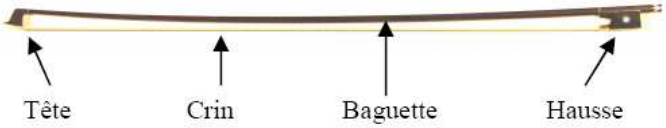


Figure 11 : Forme « standard » de l'archet moderne.

L'exemple de l'archet est intéressant aussi en terme historique, et de co-évolution structure – matériau – fonction. On associe souvent l'adoption du bois de Pernambouc –

[7] Le Palissandre de Rio est une des espèces ligneuses annexées aux listes CITES et le commerce international est très réglementé : les stocks doivent être certifiés comme ayant été abattus il y a plusieurs décennies. Aussi la qualité des stocks restants est de plus en plus inégale en même temps que leur prix augmente sérieusement.

depuis sensiblement exclusif- en archèterie avec les frères Tourte à la fin du XVIIIème siècle, lorsque la forme « moderne » de l'archet a commencé à se fixer.

Cependant, avant cette époque, la forme comme le matériau avaient connu plusieurs époques de modifications, en lien avec les modes de jeu et les musiques de l'époque, et les bois disponibles. Un des (le ?) plus ancien archet retrouvé en Europe (dans des fouilles archéologiques d'une maison du XIème siècle à Dublin) est représenté sur la Figure 12 [Homo-Lechner 1996].

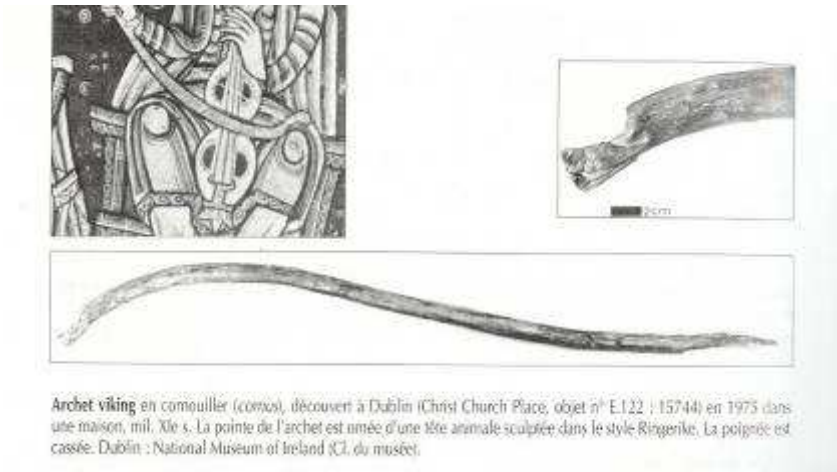


Figure 12 : Un des (le ?) plus ancien archet Européen ayant été retrouvé (époque Viking, fouilles archéologiques à Dublin). La baguette est en Cornouiller. Illustration de [Homo-Lechner 1996].

La forme de cet archet est très convexe en forme de crosse, au lieu de concave comme dans l'archet moderne ; il est en bois de Cornouiller (*Cornus*, Cornaceae).

Lors de « l'apparition » du violon il a été joué avec des archets convexes, probablement en bois de feuillus tempérés. Une comparaison des formes entre cette période et la fin du XVIIIème est présentée sur la Figure 13, à travers les reconstitutions réalisées par l'archetière Nelly Poidevin.

Figure 13 : Evolution des formes d'archets de violon avant la forme « moderne ». Reconstitutions par Nelly Poidevin.

Sur ces presque 3 siècles, de façon très résumée, la baguette s'est allongée, affinée et est passée d'une forme convexe à une forme concave, « cambrée ». Ces modifications de formes, liées aussi aux techniques de jeu, se sont accompagnées (ou ont été rendue possibles) par de « nouveaux » bois, comme des bois très rigides et denses provenant d'Amérique Latine. Le bois le plus connu pour les archets baroques est l'Amourette (*Brosimum guianense*, Moraceae), mais plusieurs autres essences ont pu être employées. Ce bois d'Amourette est plus dense que celui du Pernambouc (il fait partie des bois de densités extrêmes). Nous avons réalisé des essais vibratoires sur différentes espèces utilisées par Nelly Poidevin pour différents modèles d'archets de musique ancienne.

Par ailleurs on peut remarquer que « le violon » a migré dans beaucoup de cultures, et a pu être « réapproprié », dans des factures traditionnelles/populaires différentes (notamment avec des tables en bois de feuillus). De même pour des instruments à cordes pincées (guitare, vihuela) qui ont suivi une co-évolution en Amérique Latine en s'adaptant aussi aux espèces locales. Les luthiers de guitare classique d'Amérique Latine ont bien sûr profité aussi de la diversité d'espèces « précieuses » locales pour les fonds et éclisses [Gomes 1993 ; Guridi Gomez & Garcia Lopez 1996].

Les tables en bois de résineux ne sont pas non plus une constante si l'on s'intéresse aux instruments d'autres aires géoculturelles. Des bois de Moraceae sont employés du Moyen-Orient (en parallèle avec des bois de résineux pour des instruments distincts) à l'Extrême-Orient. On peut notamment citer le Mûrier (*Morus alba*) pour les tables de Setar en Iran [Shirazi ; Roohnia 2005]. En Inde du Sud le Jacquier (*Artocarpus integrifolia*) est le bois de choix pour les Vina et Tambura (en raison notamment de son faible amortissement semble-t-il d'après cette référence) [Bertrand 1997].

Au Japon les tables de Koto sont en *Paulownia* (Kiri) ; ce bois est aussi important dans d'autres instruments à cordes. Contrairement aux Moraceae ci-dessus, ce bois de feuillu a une densité et des propriétés vibratoires ne s'éloignant pas trop de résineux type épicéa [Minato, poster non publié]. Contrairement aux tables en résineux qui sont presque exclusivement coupées sur quartier en Europe, les tables de Koto en Kiri débité sur dosse sont très appréciées.

I.b.1.3. **Quelques aspects concernant l'approvisionnement en certains bois, notamment tropicaux, employés en facture instrumentale**

Nous avons signalé ci-dessus quelques-unes des espèces « archétypes » en facture instrumentale Occidentale (et quelques brèves informations sur celles d'autres cultures).

Parmi ces espèces « préférées », pour certaines espèces tropicales il existe depuis au moins une vingtaine d'années de sérieuses inquiétudes quant à leur statut de conservation et/ou leur approvisionnement (réglementations fortes du commerce international et/ou quantité ou qualité des stocks disponibles). Notamment plusieurs des espèces signalées sont inscrites aux annexes I ou II de la CITES (Convention sur le commerce international des espèces menacées) [UNEP-WCMC 2005], et d'autres sont proposées pour les « révisions » périodiques de cette liste.

Ces aspects d'approvisionnement, ou de gestion durable, ont éveillé l'intérêt autant du milieu professionnel bien sur [Curtis 1993 ; Von Robinson 1993 ; COMURNAT 2001 ; IPCI], que d'organisations environnementales [Read 1993 ; Soundwood], et du milieu scientifique [Holz 1996 a, c ; Wegst 1996].

A titre introductif, on peut remarquer que les échanges internationaux de bois tropicaux –soit ceux actuellement employés en facture mais alors importés pour d'autres raisons, soit des bois effectivements employés en instruments – sont loin d'être récents. Le Grenadille ou « Ebène du Mozambique » (*Dalbergia melanoxylon*) qui est à l'heure actuelle « LE » bois de clarinettes et hautbois classiques était apparemment livré de façon importante en Egypte Ancienne [Normand et al 1960]. Un luth à long manche d'époque Romaine (luth d'Antinoopolis) était apparemment réalisé en un bois d'Afrique Tropicale (peut être du Doussié, *Afzelia sp.* Caesalpiniaceae, Leg.) [Vendries 1999]. A une échelle « plus récente », le Pernambouc ou Pao-Brazil, qui est à l'origine du nom de ce pays, a fait dès sa découverte l'objet d'un intense trafic (mais qui était alors surtout lié à son utilisation en teinturerie [Montaigne 2000 ; Cardon 2006]). Il semblerait que des caisses de luths aient été réalisées en espèces Latino-Américaines de *Dalbergia* quelques décennies après la découverte de ce Continent [David Van Edwards, communication personnelle].

Pour ce qui est des difficultés actuelles, il faut signaler que les volumes nécessaires à la facture instrumentale ne sont généralement pas d'ordre suffisant pour menacer la ressource en eux-mêmes, mais que d'autres pressions s'appliquent sur ces espèces ou leur milieu.

Par ailleurs, les problèmes d'approvisionnement durable ne concernent pas que les bois tropicaux employés en instruments de musique Occidentale. Le bois de Santal Rouge (*Pterocarpus santalinus*, Inde et Asie du Sud-Est) employé pour les Shamisens Japonais est aussi inscrit à la CITES et celà pose des problèmes notables aux facteurs [entretiens avec plusieurs luthiers Japonais, traductions Haruko Komoda et Kiyoko Motegi]. En Inde il semble que l'abattage de l'*Artocarpus integrifolia* soit très réglementé, poussant parfois les luthiers de Vina et de Tambora à employer d'autres espèces moins appréciées [Bertrand 1997].

Même lorsque les espèces ne font pas l'objet d'une réglementation, des difficultés peuvent être rencontrées à l'échelle locale et/ou internationale. Au Mexique, plusieurs espèces de *Dalbergia* locales utilisées par les luthiers de la « Ville de luthiers » de Paracho semblent de moins en moins disponibles [Guridi Gomez & Garcia Lopez 1996]. En Ouganda, où la facture de tambours est une activité économique importante, une étude récente montre que la collecte en forêt des arbres nécessaires n'est pas soutenable [Omeja et al 2005].

Dans d'autres cas, l'espèce peut ne pas être fortement menacée en tant que tel, mais la proportion d'arbres bien conformés ou de taille suffisante et/ou leur accessibilité géographique peuvent diminuer. Il semblerait que ce soit le cas pour le Grenadille [Jenkins et al 2002].

Il semblerait que la réalisation d'une étude complète sur les différentes essences actuellement employées au moins en Europe, quantités et problèmes éventuels serait intéressante (des études relevant d'économie listant les besoins ont pu être publiées [Pearson & Webster 1967 ; Delune 1977] mais il semble qu'elles puissent être mises à jour).

En attendant, différentes démarches de résolution ou de contournement des éventuelles difficultés d'approvisionnement ont pu être entamées.

D'un point de vue de gestion durable et de conservation des espèces concernées, on peut notamment citer l'initiative IPCI (Initiative Internationale pour la Conservation du Pernambouc), qui associe des archetiers d'un grand nombre de pays, et implique des plantations au Brésil et un suivi botanique (il semble que l'espèce pourrait présenter différentes sous variétés [Angyalossi et al 2005]). Un projet concerne aussi la conservation du Grenadille et inclut la multiplication de plans ([ABCP 2000], African Blackwood Conservation Project).

Cependant le bénéfice de ces initiatives ne sera sensible qu'à assez long terme.

Une autre démarche concerne aussi la diversification des espèces (ou la recherche de « bois de substitution »). Les essences concernées présentent des propriétés physiques et acoustiques très particulières qui ne semblent pas être retrouvées dans des bois tempérés [Holz 1996 a & c], telles que de très faibles coefficients d'amortissements, des densités très élevées assorties de grandes stabilités vis à vis des variations d'humidité.

Compte tenu des impératifs de fonctionnement des instruments, souvent assortis d'une faible marge de manoeuvre sur les modifications structurelles surtout dans les instruments classiques, la recherche de bois alternatifs appropriés doit prendre en compte leurs propriétés physico-mécaniques et acoustiques (en plus de qualités esthétiques et d'impératifs de mise en œuvre). Quelques recherches se sont penchées sur cet aspect.

Au Brésil, au début des années 1980 une initiative a été lancée pour limiter les importations d'instruments et de bois, et des recherches ont alors été menées pour trouver des bois locaux susceptibles de remplacer des bois importés des zones tempérées, d'Afrique ou d'Asie, et promouvoir la fabrication nationale d'instruments de musique « classique » [IPT

1984 ; Van der Slooten 1985 ; Gomes 1993]. Dans les rapports dont nous disposons il ne semble pas qu'il y ait de données concernant les coefficients d'amortissement notamment.

D'autres études –surtout concernant des bois alternatifs au Pernambouc des archets modernes- ont prises en compte les propriétés mécaniques et vibratoires mesurées ([Matsunaga et al 1996 & 1998] qui étudiaient aussi des propriétés de mise en œuvre), ou bien mesurées et/ou estimées [Wegst & Ashby 1996].

Cette approche de diversification peut aussi, de façon plus large, être intéressante en terme d'élargissement des possibilités, ou bien de nouvelles associations matériau/structure/résultat.

En terme de diversification de matériaux pour instruments, on peut aussi évoquer, en parallèle de la conservation et de la diversification des espèces « précieuses » employées en bois massif, des recherches concernant des bois modifiés [Yano et al 1997 par exemple], ainsi que des matériaux composites [Douau 1986 ; Besnainou 1995 & 2000 ; Vaiedelich 1995].

I.b.2. **Mise en place d'une base de données spécifique « Bois et Instruments de musique »**

Dans les paragraphes précédents, on a présenté un bref aperçu d'espèces représentatives des bois employés dans différents types d'instruments. Cependant, dans une vue plus globale, de très nombreuses essences peuvent être relevées dans la facture de la diversité des instruments de musique. Pour explorer cette diversité, il est nécessaire de confronter et d'organiser les informations éparses, venant de différentes disciplines. Dans cette optique, nous avons commencé à mettre en place une base de données simple, liant les espèces botaniques à leurs usages dans les traditions de facture du monde, et qui doit permettre de relier aussi les informations disponibles de propriétés physico-mécaniques.

I.b.2.1. **Objectifs**

- On connaît généralement assez bien –au moins en ce qui concerne les milieux des sciences du bois et de l'acoustique- quelles sont les essences de bois préférentiellement employées pour la fabrication des instruments de musique classique, surtout Occidentale. Mais les choix adoptés dans d'autres types de facture (soit Occidentale en musiques anciennes ou traditionnelles, soit d'autres régions et cultures) sont généralement bien moins connus. Les premiers objectifs de cette base seront alors descriptifs et de mise à disposition de l'information. Dans le cadre de ce travail de thèse, l'accent a été mis en priorité sur le lien entre : espèce botanique – fonction dans les instruments – critères de choix dans l'espèce (lorsqu'ils étaient disponibles). Nous avons toutefois essayé de prévoir l'intégration future de paramètres culturels, et de les renseigner dans certains cas.
- Un premier niveau d'analyse de cette base de données, déjà esquissé mais que nous espérons approfondir à moyen terme, est une étude comparative du choix des bois dans différentes cultures et régions, pour les différentes familles organologiques et parties d'instruments.
- L'objectif comparatif ci-dessus peut appeler une autre question : Quels sont les degrés et les modalités de permanence et de divergence de choix des bois dans les instruments, pour un classement organologique et une partie/fonction d'instrument donnés ? On peut envisager plusieurs grands cas de figure, qui peuvent relever de préférences culturelles (sur la sonorité, le mode de jeu ou de fabrication, ou sur le matériau lui même), de disponibilité du matériau, de fonctionnement acoustique/mécanique/physique. Compte tenu du peu de connaissances à l'heure actuelle sur les relations entre ces différents critères, une approche « statistique » à partir de cette base de données pourrait à terme aider à appréhender cette question.

- Pour comprendre les raisons techniques et acoustiques de choix, même dans l'éventualité où l'on connaîtrait parfaitement le fonctionnement et la fabrication de cette grande diversité d'instruments, il semble nécessaire de pouvoir relier les usages, observations éventuelles, et les propriétés matérielles du matériau bois. Cette base est conçue, en sus des objectifs précédents, pour permettre la mise en relation entre paramètres organologiques, d'usage, et propriétés physiques, technologiques, mécaniques et « acoustiques » connues – ou mesurées au cours de ce travail de thèse pour quelques cas.
- Enfin, une part importante des problèmes d'approvisionnement actuellement rencontrés dans différents pays est liée à une fixation à la fois technique et culturelle d'un standard « construction -espèce employée ». Une mise en relation matériau bois – usage en facture – propriétés - disponibilité peut alors offrir de nouvelles perspectives. Des informations concernant la disponibilité devraient dans le futur être collectées et mises en relation avec les données précédentes.

I.b.2.2. **« Matériel » : sources d'information**

Pour recenser les espèces de bois utilisées en facture, on peut envisager différents types de sources :

-directes : échanges avec des facteurs. Ceci est bien sûr le meilleur cas de figure, surtout si, pour des essences mal connues, on peut disposer d'échantillons de bois pour une identification ultérieure de l'espèce. A l'échelle des différentes cultures du monde ceci demanderait toutefois un important réseau humain.

-bibliographiques : le type de démarche ci-dessus a déjà pu être menée dans un certain nombre de cas. Les informations peuvent être trouvées dans des références relevant de différentes disciplines : organologie bien sûr, ethnobotanique et/ou ethnomusicologie. Il faut toutefois remarquer que chacune de ces disciplines peut souvent ignorer les autres. Il existe cependant un certain nombre de références où l'attention a été portée aux différents aspects. Certains travaux consultés associent des botanistes ou anatomistes du bois, à des luthiers, organologues ou musicologues et ces travaux sont précieux.

Nous avons commencé par entrer des informations relevant de ce type de sources (organologie, ethnobotanique, ethnomusicologie), mais dans le futur on pourra compléter par d'autres informations, y compris catalogues de fournitures pour luthiers par exemple.

Enfin, il faut signaler les difficultés éventuelles liées à la validité des noms botaniques, ou à des « coquilles » dans leur écriture. Pour l'homogénéisation des données récoltées, nous nous sommes généralement basé sur [Mabberley 2000] pour vérifier les familles, genres et espèces botaniques.

I.b.2.3. **Architecture de la base de données**

Dans cette première approche, la base a été développée sous Microsoft Access, qui a l'avantage d'être couramment disponible.

Cette base s'articule autour de la relation instrument (d'une culture donnée) – partie – essence de bois employée. Une table de données unique « Bois-Instruments »[8] est incompatible avec la réalité de l'information : pour un même classement organographique, on aura de nombreux instruments, de régions et/ou de factures différentes. Pour un instrument, on aura des parties plus ou moins nombreuses, elles mêmes susceptibles d'être réalisées avec une gamme plus ou moins étendue d'espèces de bois. Une implémentation avec de telles entités « Bois-Partie-Instrument » présenterait de très nombreuses redondances, et par suite un

[8] A lier ensuite aux tables « Propriétés » et « Disponibilité ».

risque important d'anomalies/d'erreurs sur les différents attributs, difficiles à corriger à posteriori.

L'information a été découpée en plusieurs tables, qui présentent encore des redondances, mais ces redondances résiduelles nous ont paru faire partie intégrante de l'information, et certaines sont nécessaires aux relations entre les différentes tables. Le découpage comprend les tables suivantes : « Classement organographique » ; « Instrument individuel » (région et type de facture donnés) ; « Partie-Bois employé » ; « Essences de Bois » (nécessaire pour assurer la validité des noms botaniques qui serviront de lien vers les propriétés et disponibilités) ; « Appellations Bois » pour gérer les noms vernaculaires rencontrés ; et enfin « Références » pour pouvoir consulter des informations complémentaires dans les sources utilisées. Des tables pour l'instant non implémentées mais importantes ont été prévues : « Partie-autres matériaux » ; « Traitements et colles ».

« L'entité » centrale de cette base est l'association espèce botanique - partie d'instrument. Elle pourra présenter d'assez nombreuses redondances : par exemple l'association *Picea abies* – table d'harmonie peut correspondre à de nombreux cordophones, dans de nombreux pays, et de différents types de facture. Chacune de ses entrées sera étudiée comme une **occurrence en facture**, liée à chaque fois à sa (ses) référence (s). Un des buts est de pouvoir classer les espèces, genres ou familles botaniques en fonction du nombre de leurs occurrences en facture instrumentale, ou bien encore d'observer la plus ou moins grande dispersion d'espèces occurrentes pour une partie.

Il convient de remarquer que dans sa forme actuelle, cette base est surtout un outil de travail, et certaines de ses caractéristiques ne correspondent pas exactement aux impératifs théoriques des bases de données (certains attributs ne sont pas indivisibles, d'autres sont rarement ou très rarement renseignés par faute d'information).

a Tables de données

Instrument individuel.

Une entrée correspond à un instrument de classification, nom global, région et type de facture, culture musicale donnés. Par exemple *« guitare classique, Monde, facture et musique classique »*. Cela peut évidemment paraître assez aberrant d'un point de vue musicologique, mais de notre point de vue d'usage des bois, l'individu *«guitare classique, Brésil, facture et musique classique»* aura la possibilité d'être sensiblement différent du précédent en termes des bois employés. Bien sûr cette distinction géographique pourrait être faite au sein de la table « Partie-Bois », mais cette organisation (région incluse dans la table « partie-bois ») serait peu compatible avec le descriptif des instruments de musiques traditionnelles d'usages beaucoup plus localisés. Il s'agit donc d'un compromis, induisant un certain nombre de redondances, et qui sera peut être re-considéré ultérieurement. En reprenant l'exemple ci-dessus, on pourra de toute façon effectuer une requête pour regrouper tous les individus *« guitare classique, facture et musique classique »* en isolant les choix de bois pour une partie dans différentes régions. Les attributs descriptifs comportent : n° de classification ; nom de l'instrument tel que dans les sources d'informations ; un rappel de la famille (liste de choix) ; un nom « global » quand il existe ; pays et région d'utilisation/fabrication ; type de facture et de musique. D'autres attributs informatifs ont été inclus mais ne sont pas systématiquement renseignés : Culture d'appartenance (de l'instrument), culture d'origine (id.), mode de jeu, illustration, description et observations diverses, références consultées (liste de choix à partir de la table « Références »). Une clef primaire numérique automatique est ajoutée pour chaque enregistrement (« RéfInstru »).

Partie - Bois employé

L'association partie – bois est décrite par : un rappel de l'instrument (littéral et par lien avec la clef « RéfInstru ») ; le nom de la partie (en français et éventuellement dans la langue

d'origine) ; le bois utilisé avec nom botanique (liste de choix basée sur la table « Essences de Bois ») et le nom vernaculaire cité ; la « qualité » de facture utilisant ce bois[9] ; la fréquence d'utilisation de ce bois (pour ce cas précis) ; la (les) référence(s) de l'information. Un attribut binaire (case à cocher) est destiné à signaler la sûreté de l'information d'occurrence bois - partie (cf.§I.b.2.2). Pour simplifier tant l'implémentation des données que l'analyse ultérieure, la fréquence d'utilisation est représentée par une liste de choix : « Bois préféré ; Systématique ; Très courrant ; Commun ; Occasionnel ; Rare ; Expérimental ; [?](=non renseigné) » ; la différenciation de ces fréquences n'est pas toujours évidente d'après les sources ; mais les 4 extrêmes au moins sont généralement assez clairement renseignés. La distinction « Bois préféré » et usage « Systématique » ou « Très courrant » se justifie dans bien des cas où le bois préféré est peu disponible ou bien encore trop coûteux pour la gamme de fabrication considérée. Plusieurs essences peuvent par ailleurs « bénéficier » du statut de bois préféré pour une même partie.

Différentes informations supplémentaires peuvent être implémentées lorsque les données sont disponibles : techniques d'usinage, de formage, de finition, de traitement ; paramètres d'approvisionnement signalés; observations dont notamment les critères de choix éventuellement décrits.

Enfin, une liste permet de signaler s'il s'agit d'une partie de structure, d'accessoires, ou de décoration, pour faciliter le tri dans les analyses futures.

Espèces de Bois

Cette table est très importante en termes de structuration de la base. Effectivement, elle permet de stocker de façon concise les essences recensées en facture, chaque espèce étant unique dans cette table (l'attribut « Nom botanique » est la clef primaire). De cette façon, les occurrences Bois - Partie sont renseignées à partir d'une liste de choix basée sur les essences, et les anomalies d'implémentation sur les noms botaniques en particulier (fautes de frappe au premier chef) peuvent être évitées, ou en tout cas aisément corrigées le cas échéant. Par ailleurs elle permettra d'effectuer le lien entre les données organologiques précédemment décrites, et des tables de données de propriétés matérielles, ou bien de disponibilité, toujours *via* l'attribut « Nom botanique ». Il est donc primordial d'assurer l'unicité des modalités de cet attribut, et qu'il soit exempt d'erreurs. Mis à part les problèmes de validités et de synonymies des noms botaniques, les principales variations, erreurs ou omissions rencontrées portent sur les noms d'auteur et leur mise en forme. Nous avons choisi de le définir simplement par la forme « *Genre espèce* », qui n'est pas optimale ni du point de vue base de données puisque non-indivisible, ni du point de vue de la nomenclature, mais permet une bonne compatibilité. Par ailleurs il est très simple de retourner à un nom botanique complet – ou au contraire à une séparation en champs genre – espèce – auteur, en utilisant des fonctions texte et des fonctions logiques. Compte tenu de l'importance de la validité et de la bonne orthographie de cet attribut/clef primaire, deux attributs binaires de vérification ont été ajoutés (cases à cocher). L'un pour signaler que le nom botanique semble bien valide (d'après les sources consultées) ; l'autre est purement un outil d'implémentation : il signale que l'espèce a été ajoutée depuis la dernière vérification en date des noms botaniques, et devra être dans la prochaine opération de vérification.

Appellations des bois

Les appellations vernaculaires des bois recensés sont listées dans une table distincte, en signalant la langue et la référence.

[9] Il s'agit d'un paramètre différent du *type de facture* qui est renseigné pour l'instrument (on peut avoir différentes qualités à l'intérieur d'un même type de facture, qu'elle soit « classique-savante », industrielle, traditionnelle, populaire). Il s'agit bien sûr d'un critère extrêmement subjectif, et nous ne l'avons renseigné que lorsqu'il était explicitement décrit.

Table « références »

Elle contient les références consultées, en lien avec les instruments décrits. Le type de source (scientifique, professionnelle, grand public...) ainsi que la ou les disciplines dont relève la référence sont renseignées.

b Relations

L'organisation de ces différentes tables, ainsi que de tables « prévisionnelles » mais non encore implémentées de façon systématique, est présentée sur la Figure 14.

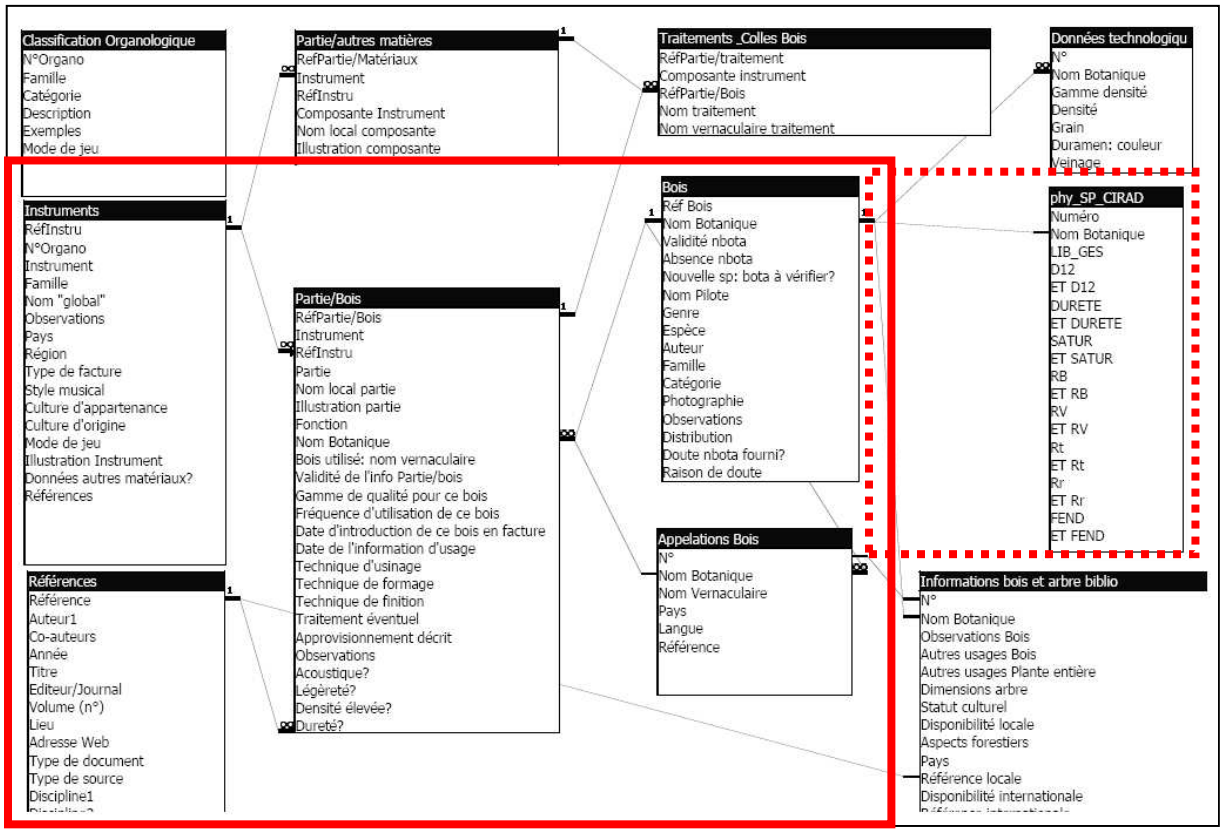


Figure 14 : Relations entre les différentes tables de données. Encadré en trait plein : partie centrale de la base opérationnelle ; en pointillé : mise en relation avec la base de données de propriétés technologiques de bois tropicaux du CIRAD. Les autres tables sont prévisionnelles (assez peu ou pas implémentées à l'heure actuelle).

La partie centrale de la base (encadrée en trait plein) correspond aux informations décrites précédemment. Elle est reliée, via l'attribut « nom botanique » (Genre espèce) à la base de données de propriétés technologique de bois tropicaux de Département Forêts du CIRAD.

c Formulaires d'entrée et de consultation des données

« L'interface » pour l'implémentation et la consultation des données consiste principalement en deux formulaires (plus un pour les références) : Bois, avec sous-formulaire pour les différentes appellations vernaculaires (Figure 15) et « Instruments », avec sous formulaires pour les différentes parties et bois employés (Figure 16).

Figure 15 : Formulaire « Bois » et sous formulaire « Appellations ». Deux liens au formulaire « instrument » permettent soit de consulter les parties dans lesquelles ce bois est utilisé, soit d'ajouter une occurrence de cette espèce en facture.

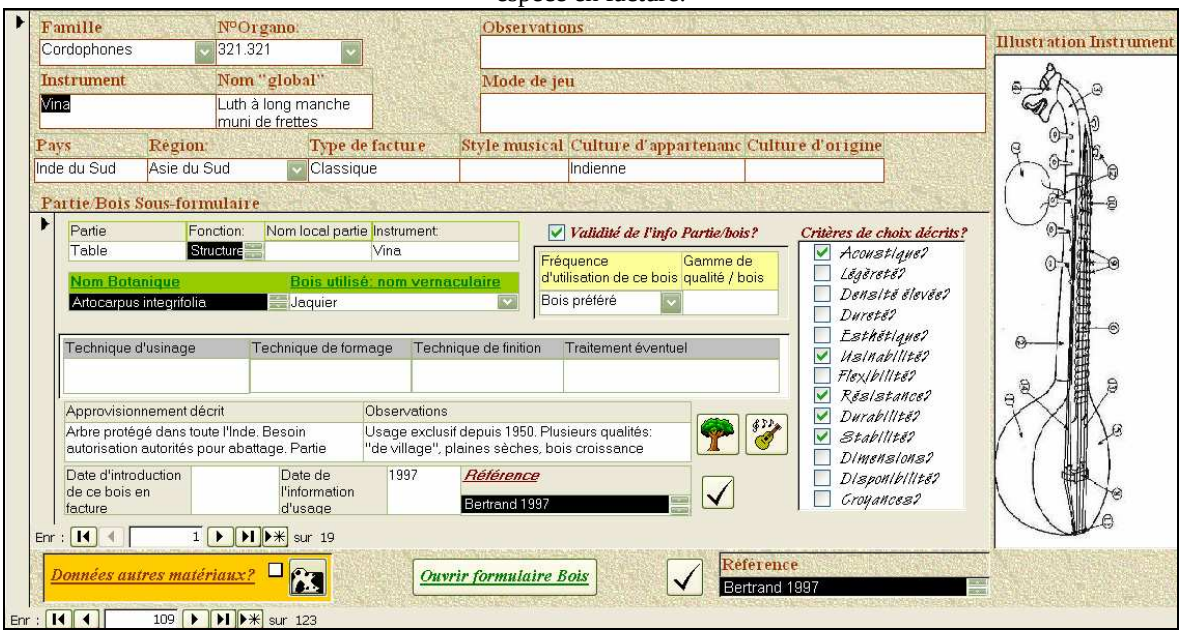


Figure 16 : Formulaire « Instrument » et sous formulaire « Partie-Bois ».

En terme d'implémentation, les données « bois » sont entrées en premier, afin de pouvoir sélectionner le nom botanique et vernaculaire du bois employé dans une partie donnée d'instrument à partir d'une liste déroulante.

En terme de consultation, à partir des enregistrements « bois », on peut par exemple : rechercher ou trier par genre, puis voir les occurrences qu'il a en facture. A contrario, on peut consulter les différents instruments, puis chercher par exemple dans le formulaire « bois » la répartition phytogéographique, ou bien effectuer un filtre sur le genre pour retourner aux utilisations d'autres espèces du même genre... On pourra aussi consulter les données technologiques lorsqu'elles sont disponibles pour l'espèce considérée.

I.b.2.4. **Résumé des informations implémentées à l'heure actuelle**

Dans cette première phase de travail sur cette base de données, nous nous sommes concentré d'une part bien sûr sur la collecte du 'matériel' (i.e. de l'information, bibliographique ou directe) et surtout sur la mise en place de l'outil afin qu'il réponde effectivement à nos besoins, permette une implémentation simple, un suivi de la validité des entrées, et finalement de faire le lien avec les propriétés physico-mécaniques disponibles.

Nous n'avons pas encore pu implémenter la totalité du vaste matériel qui a déjà été récolté. Afin d'assurer un fil conducteur avec la suite de notre travail (qui concernera surtout des bois tropicaux), mais aussi pour optimiser la correspondance avec la base de données de propriétés technologiques du CIRAD (qui concerne les bois tropicaux), nous avons entré en priorité les données concernant les traditions de facture instrumentales des zones tropicales.

Par ailleurs, dans un souci d'originalité de l'information, dans cette première phase, nous avons commencé par recenser des occurrences bois/partie d'instruments mal connues, ou bien relevant de sources peu diffusées. L'autre priorité a été donnée, autant que faire se peut, à des sources qui apparaissaient également fiables du point de vue de l'identification botanique et de la description organologique. Evidemment ces sources ne sont malheureusement pas si abondantes et quelques références relevant plus de l'une ou l'autre des disciplines ont été entrées, ainsi que quelques références plus « grand public ». Dans l'état actuel des choses, une trentaine de références ont été implémentées[10].

Au final, les données actuellement recensées concernent :

- 270 espèces ligneuses ; dont ≈200 pour lesquelles la validité du nom botanique a déjà été vérifiée, et quelques informations supplémentaires implémentées.
- 120 instruments individuels, avec pour chacun les différentes occurrences partie/bois signalées
- Soit au total près de 700 occurrences matériau/partie d'instrument ; dont ≈500 concernent des parties de structure proprement dite (i.e. ni accessoires ni décoration).
- Sur l'ensemble des parties (structure, accessoires, décoration), le Tableau 2 résume les proportions d'occurrences relevées pour les différentes familles, dans l'état actuel des choses.

Tableau 2 : Résumé des nombres d'occurrences bois/partie d'instrument pour les 4 familles organologiques.

Famille	**Compte De Partie/Bois**
Aerophones	39
Cordophones	463
Idiophones	81
Membranophones	97

On peut bien sûr remarquer que le plus grand nombre d'occurrences pour les cordophones relève en premier de leur plus grand nombre de parties par instruments ; ils ne sont pas autant sur-représentés en termes d'instruments.

En terme de types de bois recensés dans les différentes familles organologiques, les proportions de familles botaniques (employées dans les parties de structure), sont présentées sur la Figure 17.

[10] Pour information, ces références déjà implémentées comprennent : [Basu & Mukherjee 1998 ; Bertrand 1997 ; Brandily 1974 ; Branger 1993 ; Carrington 1976 ; Coiffier & Orliac 2000 ; Colombel 1990 ; Crowe 1995 ; Faligand 1993 ; Faligand 1994 ; Gabriel 1993 ; Gansemans 1988 ; Guridi Gomez & Garcia Lopez 1997 ; Jain 1965 ; Kaptain 1991 ; Lavondès 1986 ; Lévy-Bossi 2002 ; Martinez-Betancourt et al 1995 ; Merlin & VanRavenswaay1990 ; Pennington 1963 ; Pepper 1953 ; Qassim Hassan 1980 ; Raponda-Walker & Sillans 1961 ; Rondon Rangel 1993 ; Rujinirun 2005 ; Salazar Salvatierra 1994 ; Salivas 1997 ; Shirazi ; Thaman 1992 ; Wheatley 1992 (pour ce dernier, informations communiquées par P. Caballion, IRD Nouméa)]

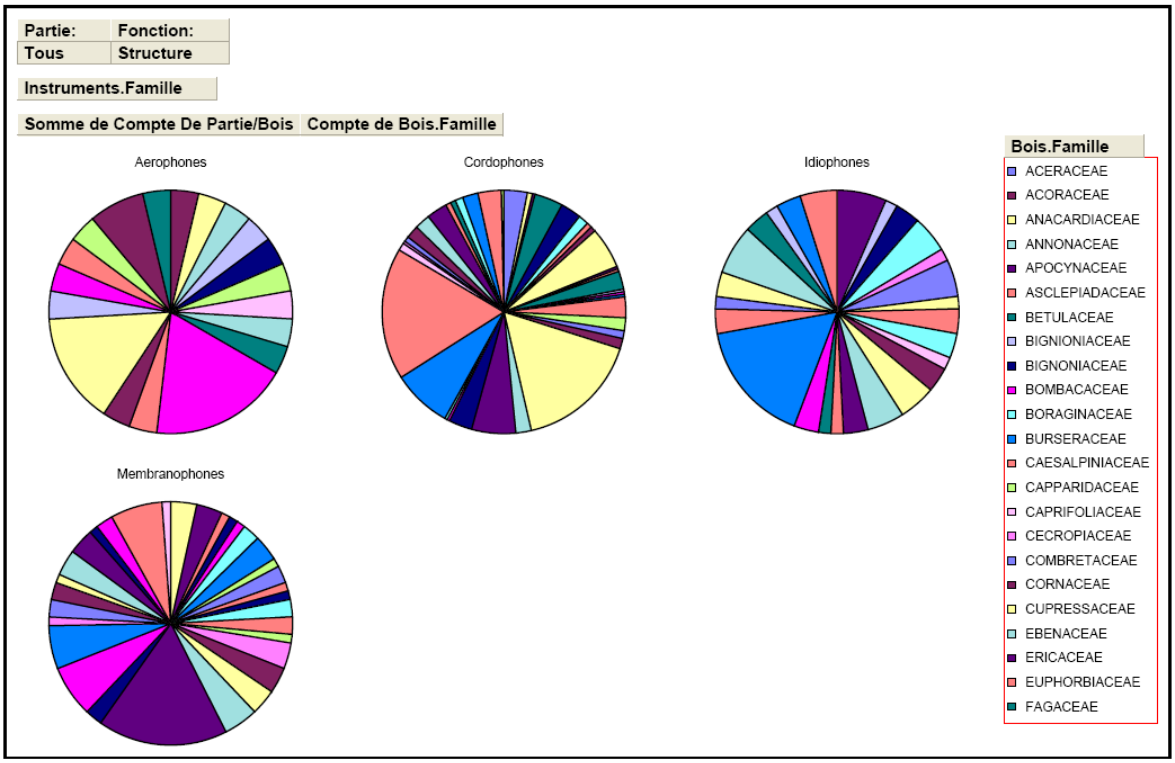


Figure 17 : Proportion d'association bois/partie pour différentes familles botaniques, pour les 4 familles organologiques, dans l'état actuel d'implémentation (sur ce graphique on a trié uniquement les parties ayant une fonction structurelle).

Bien que l'implémentation déjà effectuée soit bien sûr insuffisante pour envisager une comparaison statistique, des prédominances de familles commencent à ressortir, pour ces données qui concernent essentiellement des instruments de facture extra-européenne.

En ce qui concerne les aérophones, elles ne sont pas à interpréter dans l'état actuel des choses : seulement 39 occurrences implémentées (le plus gros secteur correspond comme on s'y attend en facture traditionnelle/populaire à des Gramineae – qui ont été entrées lorsqu'un nom botanique valide était donné, bien qu'il ne s'agisse pas de « bois » strictu senso).

Pour les cordophones, l'effet « région du Monde » est très marqué puisque la majorité des entrées concernent des informations d'Amérique Centrale (et un peu Moyen Orient). Le plus grand secteur correspond comme on s'en doute aux Pinaceae, suivies par les Meliaceae (emploi très important des *Swietenia* et *Cedrela* en Amérique Centrale), puis les Papilionaceae (Leg.).

Cette dernière famille botanique représente clairement la plus grande proportion des bois d'idiophones actuellement recensés.

Pour les membranophones, on retrouve aussi une famille prédominante ; il s'agit pour les données récoltées des Moraceae (*Artocarpus*, *Ficus*, *Morus*).

Bien entendu, l'implémentation de cette base est un travail de relativement longue haleine. Dans le futur on pourra envisager différentes analyses plus représentatives, que ce soit en terme de relations botanique-organologie, ou usage en facture et propriétés matérielles des bois, via les bases de données de propriétés existantes ou à développer.

I.c. Diversité de comportement des bois : bases de données de propriétés, données manquantes, estimateurs liés aux origines microstructurales et chimiques

Le chapitre précédent a permis de repérer de nombreuses essences de bois utilisées dans les instruments de musique à travers le monde. Les problèmes actuels d'approvisionnement en matière première de qualité appropriée pour certaines essences préférées ont également été mis en relief. Les fonctionnements des différents types d'instruments sont très différents, et les propriétés matérielles des bois employés doivent être adaptées aux différentes fonctions à remplir. Cependant, à l'issue de ce « recensement », nous ne disposons de données sur les propriétés physico-mécaniques et vibratoires que pour un petit nombre de bois « archétypes ».

Des informations sur les comportements physiques et mécaniques/acoustiques des bois considérés sont alors nécessaires, que ce soit pour mieux comprendre les raisons de leur choix, ou bien pour proposer de « nouvelles » essences intéressantes pour un usage donné.

Il existe une très grande diversité d'essences forestières (plus de 10 000), dont les bois présentent des propriétés extrêmement diverses d'après ce que l'on connaît déjà, mais leur caractérisation est fort loin d'être complète. L'objectif de ce bref chapitre est d'introduire différentes sources d'informations disponibles quant aux propriétés matérielles – et notamment « acoustiques » - de cette diversité de bois matériaux : bases de données de propriétés de bois; caractérisations issues de la littérature ; quelques causes possibles de variations à l'échelle microstructurale et chimique. Chaque type de source étant forcément lacunaire devant l'étendue du matériau d'étude, nous espérons que cette combinaison d'indicateurs, cumulée aux indicateurs d'usage organologique, permettra d'aider au repérage et/ou à la description d'essences ayant des comportements intéressants pour le domaine de la facture instrumentale.

I.c.1. **Bases de données de propriétés physico-mécaniques**

Même si la caractérisation des propriétés physico-mécaniques de l'ensemble des espèces ligneuses est loin d'être complète, il est évident que des décennies de travail de caractérisation des propriétés technologiques des différentes espèces ont conduit à une somme déjà considérable d'information. Celle-ci peut être disponible sous forme de bases de données, ou bien au « cas par cas » dans différentes publications. Notre travail s'est appuyé en premier sur la base de données du Département Forêts du CIRAD sur les propriétés technologiques de bois tropicaux.

I.c.1.1. **Base de données du CIRAD**

Cette base recense les campagnes de caractérisations menées depuis plus d'un demi-siècle au Programme Bois du CIRAD (anciennement Centre Technique Forestier Tropical, CTFT). La partie « propriétés technologiques » concerne ≈4000 séries d'essais qui portent sur 1040 espèces principalement tropicales. Les propriétés recensées sont : densité sec à l'air, dureté, point de saturation des fibres, retraits totaux (radial, tangentiel, volumique), résistance au fendage, contrainte de rupture (en : traction perpendiculaire, cisaillement, flexion statique, compression parallèle), résilience (en flexion dynamique), module d'élasticité longitudinal.

Pour le moment, pour les données « bois et facture » (sur des traditions extra-Européennes) déjà implémentées dans notre base de données, on retrouve 40 espèces communes entre les deux bases (sur ≈200 dont les noms botaniques sont vérifiés).

On peut remarquer que ces données ne comprennent pas d'informations sur les coefficients d'amortissement notamment.

La base comprend aussi une partie « composition chimique », qui concerne ≈700 espèces, dont ≈400 communes avec la base propriétés technologiques. Les données concernent notamment les proportions globales de composés primaires (Cellulose, hémicelluloses, lignines) et secondaires (extractibles aux solvants organiques ou à l'eau ; cendres dont silice).

I.c.1.2. **Logiciel de choix de matériaux et base de donnée CES**

Un autre outil peut être trouvé dans le logiciel de choix de matériaux CES Selector [Granta design ; Ashby 1992]. Ses bases de données couvrent un très grand nombre de matériaux de classes différentes. Pour les bois, un peu plus de 200 espèces sont représentées, d'après différentes données de la littérature. Des coefficients d'amortissements sont présentés, mais ils correspondent pour la très grande majorité à des estimations d'après des régressions statistiques simples en fonction du module d'élasticité (voir ci-dessous). Ce logiciel est associé à la démarche de choix de matériaux sur la base de critères mécaniques combinant plusieurs propriétés, telle qu'elle a pu être appliquée aux bois d'archets par [Wegst & Ashby 1996]. Cette démarche implique une maximisation d'indices de performance calculés vis à vis de la fonction mécanique à remplir. Accessoirement, à titre strictement personnel, il nous semble que dans le domaine précis de la facture instrumentale, cette optimisation soit utile en terme de tenue mécanique, mais qu'une réelle optimisation ne concerne pas forcément une maximisation de propriétés (même combinées), mais une adéquation/adaptation à un certain contexte culturel.

I.c.1.3. **Données de la littérature concernant les coefficients d'amortissement**

Il ressort des brèves descriptions de ces bases de données que des données réelles, mesurées, de coefficient d'amortissement pour les différentes espèces ligneuses ne sont que peu ou pas intégrées. Un certain nombre d'information est cependant disponible dans la littérature dans différents ouvrages ou articles de revue. Nous avons commencé à implémenter ces données dans une petite base de données sous Excel. On se heurte cependant assez vite à deux types de difficultés : d'une part toutes les publications ne présentent pas les données chiffrées, sous forme tabulaire, exploitable pour notre objectif. D'autre part, toutes les études n'ont pas forcément été réalisées en conditions comparables (hygrothermie, fréquence, méthodes de mesures donnant des résultats comparables).

Dans l'état actuel des choses, on pourrait estimer le nombre d'espèces pour lesquelles des données chiffrées comparables sont disponibles dans la littérature consultée à environs une centaine. Ce qui reste petit devant la diversité des bois, et ne concerne de plus qu'une proportion modérée de bois de feuillus tropicaux.

I.c.2. **Indicateurs possibles en lien avec la microstructure et la composition chimique**

Comme pour tout matériau, les propriétés physiques et mécaniques macroscopiques du bois dépendent de l'agencement et des propriétés de ses constituants. Ces dépendances sont particulièrement marquées (ou tout du moins complexes) dans le cas du bois, du fait de sa structuration fortement multi-échelles, et de sa nature polymérique composite. Si la plupart des paramètres microscopiques et chimiques ne sont certes pas accessibles au niveau de l'usage des bois, il est toutefois nécessaire d'appréhender leurs effets si l'on souhaite comprendre les origines de la diversité de comportements rencontrée. De plus, une même cause pouvant avoir plusieurs effets, cela peut permettre d'étudier – à l'échelle macroscopique – des corrélations entre propriétés pouvant servir d'indicateurs et de descripteurs, et ayant un sens physique.

I.c.2.1. **Densité et quantité de matière ligneuse**

Plusieurs propriétés macroscopiques du bois présentent d'assez bonnes corrélations avec la densité, ce qui peut permettre d'effectuer une pré-sélection d'après ce paramètre facilement accessible. Mais évidemment la densité ne représente que la proportion de matière/vide, et les effets de l'agencement de ces deux « composants » et des propriétés intrinsèques de la matière sont souvent d'importance au moins égale sinon supérieure.

Les caractéristiques rencontrées à l'échelle du plan ligneux (agencement des cellules) sont connues pour avoir une importance marquée dans les propriétés transverses (matière et vides en série), et proportionnellement moins dans le comportement longitudinal qui dépendra plutôt des caractéristiques au niveau des parois cellulaires (matière et vides en parallèle).

La densité peut être considérée à la fois comme une propriété physique et technologique importante des bois, et comme un descripteur de structure. Dans une vue simplifiée, la structure du bois peut être divisée entre matière solide (parois cellulaires) et volume d'air (lumens). La densité représente le rapport entre matière et vide, soit la porosité du bois. Si l'on admet – ce qui est généralement accepté – une densité moyenne des parois cellulaires sensiblement constante, de l'ordre de 1,50, la porosité peut être déduite de la densité anhydre du bois par : $\varepsilon=1-(\rho_{b0}/\rho_p)$. (ε: porosité ; ρ_{b0}: densité du bois anhydre ; ρ_p:densité des parois). La gamme totale de variation observable sur la densité et la porosité est beaucoup plus étendue pour les bois de feuillus que pour ceux de résineux.

Il faut toutefois signaler que la densité des parois n'est en fait pas exactement constante puisqu'elle dépend des proportions de ses différents constituants ; elle serait en fait de 1,497 à 1,517 pour les feuillus, et de 1,517 à 1,529 pour les résineux [Kellogg & Wangaard 1969 cité dans Saranpää 2003]. Une autre réserve à adopter quant à la représentativité du rapport parois/ vides par la densité globale concerne les bois où des quantités non négligeables de substances secondaires sont déposées dans les lumens.

Les propriétés élastiques des bois peuvent être globalement assez bien corrélées avec la densité. [Guitard & El Amri 1987] ont établi des régressions statistiques, basées sur des données expérimentales pour 43 essences de feuillus et 37 de résineux, entre la densité et les neufs complaisances de la matrice d'élasticité. La densité permettait d'expliquer d'environs 60% (cisaillement LR et LT) à 86% (module d'Young longitudinal) de la variance totale pour les bois de feuillus, un peu moins pour les résineux. Ces relations statistiques sont fort utiles pour des estimations de la matrice d'élasticité complète sur des bois normaux, dans la mesure où l'on ne dispose dans la plupart des cas que de la densité et du module d'Young axial. Comme on peut s'y attendre les dispersions effectivement observées dans la simple relation entre E_L et densité sont très importantes sur des types de bois différents (i.e. rigidité des parois différentes); et dans des cas extrêmes comme par exemple de bois de compression de résineux [Watanabe & Norimoto 1996], de telles relations ne sont plus du tout applicables. Par ailleurs l'anisotropie élastique a tendance à diminuer avec l'augmentation de la densité, lorsque les parois deviennent plus épaisses et les lumens plus étroits. Ici encore il faut combiner cet aspect avec l'anisotropie au niveau de l'organisation anatomique et avec l'anisotropie pariétale.

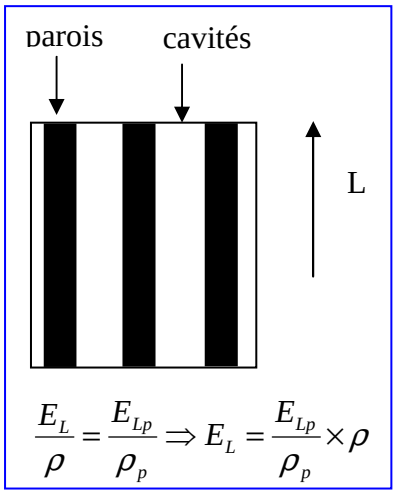


Figure 18 : Densité et module d'Young longitudinal : le module spécifique est sensément directement lié aux propriétés des parois.

En ce qui concerne les propriétés « vibratoires » en

direction axiale, le module d'élasticité spécifique E_L/ρ est « par définition » indépendant de la densité[11] et correspond au module spécifique moyen des parois (Figure 18).

De la même façon, le coefficient d'amortissement ou facteur de perte tanδ en direction axiale est en principe une grandeur indépendante de la densité et directement reliée aux propriétés des parois (d'après Norimoto et al 1986):

$$\tan\delta_L = \frac{E_L''}{E_L'} \approx \frac{E''_{Lp}\left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)}{E'_{Lp}\left(\frac{\rho}{\rho_p}\right)} = \frac{E''_{Lp}}{E'_{Lp}}$$

Expérimentalement, les coefficients d'amortissements (*tanδ*) en direction axiale ont effectivement été trouvés comme étant indépendants de la densité de façon très générale, que ce soit sur une même essence ou entre différentes essences [Norimoto et al 1986 ; Hase 1987 ; Bordonné 1989 ; Brancheriau 2002]. Cela dit, sans qu'il existe de corrélations à proprement parler, les plus faibles valeurs de tanδ relevées sur un échantillon de Pernambouc et de divers autres feuillus avaient tendance à être observées pour les densités les plus élevées [Sugiyama et al 1994].

Pour ce qui est des propriétés hygroscopiques des bois, la bonne corrélation générale entre augmentation de la densité et importance des retraits/gonflements volumiques est connue de longue date, même si l'explication de cette relation résiderait en fait dans des caractéristiques d'agencement des couches de la paroi cellulaire[12] [Skaar 1988].

I.c.2.2. **Estimation de l'amortissement : relations avec le module spécifique en lien avec l'effet de l'angle des microfibrilles**

On a vu ci-dessus que les propriétés vibratoires E'/ρ et $tan\delta$ en direction axiale sont théoriquement directement liées aux propriétés de la matière des parois.

Pour ce qui est du module d'élasticité spécifique, il est connu pour être très bien relié à l'angle moyen des microfibrilles de cellulose dans la couche S2, dans des conditions hygrothermiques données (Figure 19).

[11] Toutefois, à l'échelle globale prenant en compte différents tissus, ceci n'est pas forcément vérifié, en raison de la proportion d'éléments anatomiques de densités et rigidités intrinsèques différentes, et de corrélations biologiques entre vitesse de croissance, densité et angle de microfibrilles. Il semblerait ainsi que le module spécifique « global » puisse avoir tendance à augmenter avec la densité pour les résineux normaux [Guitard & El Amri 1987 ; Kubojima et al 1997].

[12] La dépendance du retrait total au rapport parois/vides (≈densité) n'existe que si les dimensions des « vides » ou lumens sont plus constantes que celles des parois, c'est-à-dire si leurs variations dimensionnelles sont restreintes par des couches de parois rigides dans la direction de retrait. Sinon l'ensemble se rétracterait de façon homogène quelque soit la proportion et les diamètres des lumens.

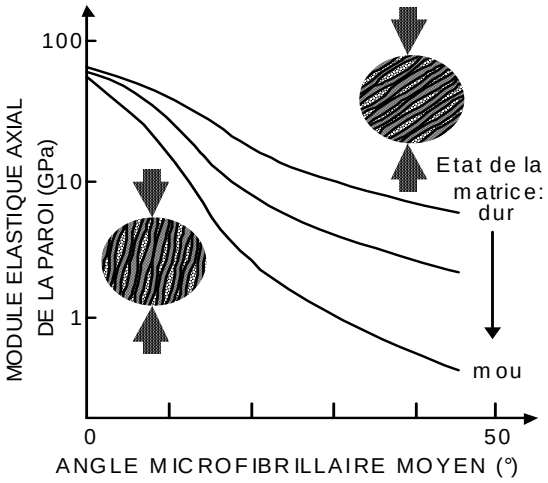


Figure 19 : Vue schématisée de la relation entre module d'élasticité des parois cellulaires et angle des microfibrilles selon l'état de la matrice [Gril 2000].

Le comportement de la « matrice » (cellulose amorphe, hémicelluloses, lignines) intervient de plus en plus lorsque les angles de microfibrilles sont élevés.

[Ono & Norimoto 1983 & 1984] trouvaient une très bonne corrélation entre coefficient d'amortissement et module spécifique, sur 55 espèces dont 25 de feuillus et 30 de résineux (Figure 20 à droite). Cette relation (de forme puissance, ici représentée en échelle logarithmique) concordait bien entre les différentes espèces. [Norimoto et al 1986] ont étudié ces relations en fonction de l'angle des microfibrilles, et concluaient que ce paramètre était aussi le premier déterminant des coefficients d'amortissement (Figure 1 à gauche) par un effet d'entraînement de la matrice viscoélastique par les microfibrilles élastiques.

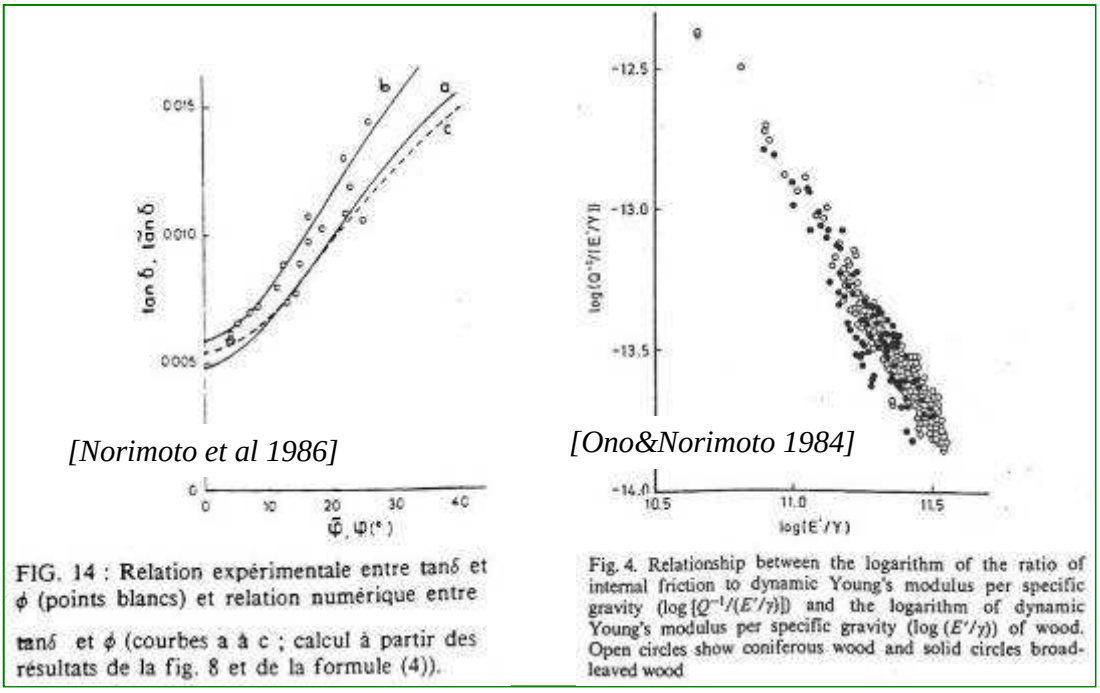


Figure 20 : (à gauche) relation entre coefficient d'amortissement et angle moyen des microfibrilles sur du Hinoki (*Chamaecyparis obtusa*, un Résineux) [Norimoto et al 1986] ; (à droite) relation entre $tan\delta/(E'/\rho)$ et E'/ρ, en échelle logarithmique, pour 30 espèces de feuillus (ronds pleins) et 25 de résineux (ronds ouverts) [Ono & Norimoto 1984].

I.c.2.3. **Comportement « non standard » et effet des extractibles**

Si l'on projette (Figure 21) les quelques bois « archétypes » en facture précédemment introduits, on peut voir qu'à l'échelle de moyennes par espèces, ces bois ne suivent généralement pas la relation statistique « standard » décrite ci-dessus.

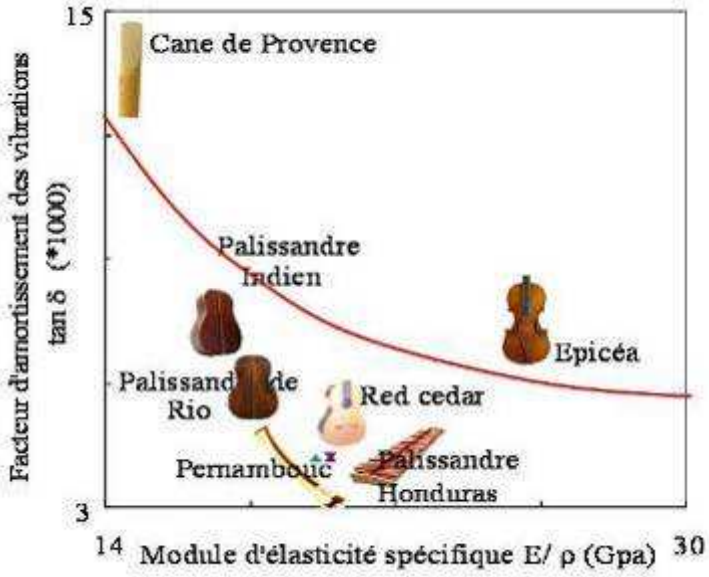


Figure 21 : Coefficient d'amortissement en fonction du module d'élasticité spécifique, pour quelques matériaux ligneux « archétypes » en facture instrumentale, et comparaison aux relations standard de [Ono & Norimoto 1983&1984 ; Norimoto et al 1986].

On remarque notamment que les bois de feuillus tropicaux tels Pernambouc et Palissandres, mais aussi le Red Cedar (résineux tempéré) employé en tables de guitares, présentent des amortissements nettement plus faibles que la relation globale correspondant aux essais de [Ono & Norimoto 1983 & 1984 ; Norimoto et al 1986]. Ce cas de figure de très faibles amortissements n'est absolument pas général pour les bois tropicaux, si l'on en juge d'après la comparaison avec d'autres données de la littérature.

Dans le cas des Palissandres de Rio et Indien [Yano et al 1995], du Red cedar [Yano 1994] et du Pernambouc [Matsunaga et al 1996&1999 ; Minato et al 1997], ces coefficients d'amortissements bien plus faibles que la moyenne inter-spécifique avaient pu être attribués à des teneurs élevées en certains métabolites secondaires, ou « extractibles ». A contrario, les extractibles (sucres) de la Canne de Provence (Gramineae ; employée dans les anches d'instruments à vent) étaient responsables d'une augmentation de son coefficient d'amortissement, accompagnée d'une augmentation de sa teneur en eau à l'équilibre [Obataya et al 1999].

Cependant, cet effet, net sur quelques espèces, ne semble pas plus documenté, notamment à l'échelle inter-spécifique.

D'autres effets des extractibles, un peu mieux documentés, concernent leurs effets sur les propriétés hygroscopiques des bois (isothermes de sorption / désorption, retraits et gonflements) [Wangaard&Granados 1967 ; Cooper 1974 ; Chafe 1987 ; Hernàndez 1989 ; Choong & Achmadi 1991 ; Mantanis et al 1995 ; Arévalo-Fuentes 2002 ; Nzokou & Kamden 2004]. Dans la plupart des cas, notamment pour des bois de feuillus tropicaux, les extractibles avaient un certain effet de diminution de la teneur en eau à l'équilibre – sur une plage plus ou moins étendue des humidités relatives. Dans des cas plus rares ils pouvaient aussi avoir un effet inverse, comme pour la Canne de Provence ci-dessus, ou le Noyer d'Amérique (*Juglans nigra* [Cooper 1974]).

Il a aussi été rapporté que les extractibles puissent jouer un effet, petit devant ceux des déterminants primaires tels que densité et angles de microfibrilles, mais observable, sur la

résistance mécanique du bois (en compression transverse et/ou en flexion longitudinale [Luxford 1931 ; Arévalo-Fuentes 2002]).

En ce qui concerne leur possible effet sur le comportement viscoélastique, [Ajuong & Breeze 1997] trouvaient, sur le Doussié (*Afzelia africana*, Caesalpiniaceae, Leg.) que le départ des extractibles localisés au sein des parois cellulaires augmentait le fluage.

I.c.2.4. **Hypothèses de pré-sélection de bois tropicaux par des critères combinés propriétés/composition**

Les références citées ci-dessus indiquent que certains extractibles sont susceptibles de jouer un rôle de diminution de l'amortissement. D'après les typologies proposées par [Norimoto et al 1992] vis-à-vis des modifications chimiques des bois, seuls des composés localisés au sein des parois pourraient avoir un rôle de stabilisation, viscoélastique et/ou des déformations hygroscopiques.

Dans cette optique, dans une tentative d'améliorer le repérage de bois présentant de très faibles coefficients d'amortissements, tels ceux observés pour les bois tropicaux « archétypes » en facture instrumentale, on a choisi des critères de présélection applicables aux données disponibles dans la base de données du CIRAD. D'une part, lorsque des espèces étaient représentées à la fois dans la base « propriétés technologiques » et dans celle « composition chimique », on a choisi des bois ayant des taux d'extraits relativement élevés et en parallèle de faibles points de saturation des fibres, et de faibles retraits volumiques par rapport à leur densité. D'autre part, on a aussi choisi des espèces pour lesquelles on ne disposait pas d'information sur les taux d'extraits, mais pour lesquelles les critères ci-dessus étaient remplis.

I.d. Conclusions

Cette partie introductive avait comme buts : de donner des définitions de base quant au matériau bois et aux propriétés vibratoires que nous allons étudier ; de présenter brièvement quelques « standards » d'usage des bois en facture et de gammes de propriétés correspondantes ; enfin de donner une première idée de la diversité qui peut être rencontrée à la fois dans les bois bien sûr, mais aussi dans les associations matériau/fonction à l'échelle de différentes aires géoculturelles.

Ce dernier point a fait l'objet de la création d'une base de données spécifique liant espèces botaniques et usages en facture instrumentale. L'outil est opérationnel et environ 500 occurrences bois/parties à fonction structurelle sont déjà implémentées pour des factures traditionnelles extra-Européennes. L'alimentation de cette base avec les données déjà récoltées se poursuit, ainsi que la collecte d'autres sources à intégrer à moyen terme.

En ce qui concerne les bois tropicaux préférés en facture d'instruments de musique « Occidentale », on peut relever quelques points pour la suite de ce travail :

- Ces bois sont caractérisés notamment par des coefficients d'amortissement faibles à très faibles, qui ne semblent pas se retrouver dans les bois tempérés et ne correspondent pas aux relations générales liées à la microstructure (angle de microfibrilles).
- Des données comparables de coefficient d'amortissement ne sont disponibles –de façon éparse- que pour ≈100 espèces (<1% de la diversité d'essences), dont une proportion modérée de bois tropicaux.
- Pour quelques espèces, la littérature indique que des extractibles pourraient être responsables de (très) faibles amortissements, bien que cet effet ne semble pas systématique. D'après la confrontation avec les informations sur les effets de ces métabolites secondaires sur le comportement hygroscopique –effets un peu mieux documentés- on pose l'hypothèse qu'une combinaison d'indicateurs mécanique (module d'élasticité spécifique), chimique (teneurs en extraits) et physique (point de

saturation des fibres et retraits par rapport à la densité) puisse améliorer le repérage de bois peu amortissants à partir des données disponibles (dans la base du CIRAD notamment).

PARTIE II :
MATERIEL ET METHODES

II. PARTIE II : MATERIEL ET METHODES

Les informations qui ont été mises en relation dans la partie précédente suggéraient, d'une part, qu'un premier jeu « élémentaire » de propriétés physico-mécaniques susceptible de définir une association bois/fonction en facture comprendrait la densité, le module d'élasticité spécifique et le coefficient d'amortissement (en direction axiale et à fréquences données dans un premier temps). Elles indiquaient aussi que ces données sont loin d'être disponibles sur tous les bois employés en facture, notamment en ce qui concerne l'amortissement, et a fortiori sur des bois moins connus. Une compréhension des déterminants et/ou des indicateurs macroscopiques de ces propriétés peut aussi apporter une aide.

Si l'on considère l'étendue du travail encore à effectuer pour appréhender la diversité interspécifique de comportements vibratoires des bois, il semble nécessaire de commencer par fixer un jeu élémentaire de paramètres, qui soit si possible comparable avec les quelques données disponibles dans la littérature.

Les orientations adoptées dans la définition du protocole expérimental comprenaient :

*En ce qui concerne le matériel, les objectifs étaient : i) d'ajouter des données concernant des bois employés dans la facture de différents instruments ; ii) d'explorer la diversité de comportements « acoustiques » de bois tropicaux tout en cherchant des indicateurs valides ; iii) d'apporter des informations sur les déterminants microstructuraux et chimiques des propriétés vibratoires, à travers l'étude de matériels ciblés.

*En ce qui concerne les méthodes, il a été décidé d'adopter un protocole général unique, reproductible et applicable à un grand nombre d'échantillons ; il comprenait en plus des mesures vibratoires quelques données physiques simples. Cet objectif a demandé la mise en place d'une méthode de mesure vibratoire qui soit précise, répétable et rapide pour les déterminations de coefficients d'amortissement.

II.a. Matériel

L'objectif de notre travail étant la diversité inter-spécifique des propriétés étudiées, l'accent a bien sûr été mis sur le nombre d'espèces. Dans l'ensemble, l'échantillonnage effectué ne permet pas d'évaluer la variabilité intra-spécifique, même si pour quelques espèces on pourra en avoir une première approche.

L'échantillon global comprend trois sous-groupes ciblés sur nos différents objectifs.

II.a.1. Les différents échantillonnages étudiés

L'échantillonnage s'est articulé autour de trois objectifs principaux : Tentative de repérage de bois faiblement amortissants à partir de critères mécaniques, physiques et chimiques ; Caractérisation de certains bois employés en facture instrumentale ; Etude de déterminants microstructuraux et chimiques des propriétés vibratoires considérées.

II.a.1.1. Présélection de bois à partir de critères physico-mécaniques et chimiques

Ce choix de bois s'est fait d'après la base de données du CIRAD, en fonction : des données de propriétés, ainsi que du matériel effectivement disponible dans les stocks du CIRAD. Il a compris trois types de critères :

-des bois choisis uniquement sur la base de leurs densités et modules spécifiques contrastés (11 essences représentées par une pièce de bois initiale ; choix noté « M »).

-des bois choisis en fonction de leurs teneurs connues en extractibles totaux (alcool-benzène plus eau chaude): ≥9% et jusqu'à 23% (moyenne dans la base « chimie » du CIRAD≈7,5%); ainsi que pour leurs faibles valeurs de point de saturation des fibres (17%≤Psf≤25%) et de retrait volumique rapporté à la densité (RB/D12≤13,5% ; moyenne dans la base ≈18%). Ceci concerne 8 espèces (choix noté « P+C »).

-des bois pour lesquels on ne disposait pas de données chimiques mais auxquels on a appliqué les mêmes critères physiques : 6 espèces (choix noté « P »).

-enfin, 4 « références » : des espèces appartenant aux familles botaniques échantillonnées ayant les plus forts taux d'extraits (Leg. Caesalpiniaceae ; Moraceae), mais pour lesquelles ces taux sont faibles et/ou les Psf et RB/D12 élevés. Choix noté « R ».

De façon générale on a cherché, lorsque cela était possible, à avoir au moins deux espèces d'un même genre sur la somme des choix P, P+C et R.

II.a.1.2. **Bois fournis par des facteurs d'instruments**[13]

Cet échantillon (choix noté « F ») comprend:

- le plus gros effectif concerne des bois de baguettes d'archet de différents modèles : Moderne (Pernambouc, fourni par Paul Borie), Baroque (Amourette, Coração de Negro, Boco, ainsi que « Mossutaiba » et « Palo Santo » à tester) et Médiéval et Renaissance (Cormier, Charme, If). Les deux derniers types étaient fournis par Nelly Poidevin. Ces différents bois nous ont été fournis avec différentes « qualités » d'usage et leurs appréciations pour plusieurs des espèces.

- des bois employés (ou à tester) pour des tables, fonds/éclisses et manches de guitares et instruments à cordes pincées (fournis par Dominique Chevallier, Hugo Cuvilliez, Christian Magdeleine, Olivier Villefranche). Ils sont généralement représentés par 1-5 éprouvette(s) par espèce/qualité.

- des bois employés en « accessoires » haut de gamme pour le quatuor (fournis par Eric Fouilhé). 3-4 éprouvettes par espèce/qualité.

Parmi cet échantillon, une grande partie concernait des espèces/stocks éprouvés, et quelques espèces étaient plutôt « à tester ».

II.a.1.3. **Echantillons destinés à l'étude des déterminants des propriétés vibratoires**

Cet échantillon (choix noté « D ») était ciblé sur deux niveaux de déterminants : i) primaires (structure cellulaire, angle des microfibrilles, composition macromoléculaire) ; ii) secondaires (extractibles). Le matériel ciblé pour le premier niveau comprend des Résineux (Pins, Epicéa) avec bois de compression, bois opposé et bois juvénile (voir premier chapitre de la partie 4). Pour le deuxième niveau (métabolites secondaires), on s'est basé sur un niveau « élémentaire » de diversité, soit sur des espèces du même genre *Pterocarpus* (Papilionaceae, Leg. Tropicales). Ces deux échantillonnages sont décrits plus précisément dans la partie 4.

Pour ces différents sous échantillons, on a cherché à obtenir également, lorsque cela était possible, des aubiers sains (i. e. sans fentes de séchage ou dégradations biologiques) provenant des mêmes arbres ou stocks que les duramens. Ceci concerne 6 espèces.

[13] Nous avons reçu d'autres bois de facture que ceux présentés ici, mais malheureusement vers la fin ou après la phase d'expérimentations de cette thèse. Nous espérons réaliser les mesures correspondantes dans les mois à venir.

II.a.2. **Récapitulatif des essences et types de bois**

L'échantillon global qui regroupe les trois sous échantillons ci-dessus comprend une soixantaine d'espèces (62 mais pour deux l'espèce n'est pas sûre et elles pourraient se recouper avec une autre), soit ≈70 types de bois (espèce + duramen/aubier ou bois normal/de compression). Pour des raisons évidentes de place il n'est malheureusement pas possible ici de donner un descriptif complet pour chaque espèce. L'échantillonnage global est résumé sur le Tableau 3, par ordre alphabétique de nom botanique, avec : la famille et le nom pilote ou nom vernaculaire qui sera employé dans la suite (certaines espèces ne sont pas listées dans la Nomenclature Générale des Bois Tropicaux [ATIBT 1975] ou bien le sont sous un nom pilote générique à plusieurs espèces d'un même genre). Un petit nombre de bois ne sont pas identifiés botaniquement, ils sont en fin de tableau.

Pour chaque bois étudié, ce tableau regroupe : i) le nombre d'arbres (ou stocks pour les bois de facture), de pièces de bois initiales et d'éprouvettes destinées au protocole général ; ii) les types de bois obtenus (duramen normal DN, duramen de fournitures pour instruments DF, aubier A, bois de compression BC) ; iii) les critères de choix (selon les abréviations introduites ci-dessus : M, P+C, P, R, F, D) ; iv) les fournisseurs (initiales Prénom Nom pour les facteurs d'instruments cités ci-dessus; CI : CIRAD ; BT : Bernard Thibaut ; IB : Iris Brémaud).

Dans la présentation des résultats, on parlera plus souvent de « types de bois » (par exemple duramen ou aubier de telle espèce). La Figure 22 présente la répartition de ces ≈70 types de bois étudiés en : Résineux, Feuillus Tempérés et Tropicaux (à gauche) ; en familles botaniques (à droite).

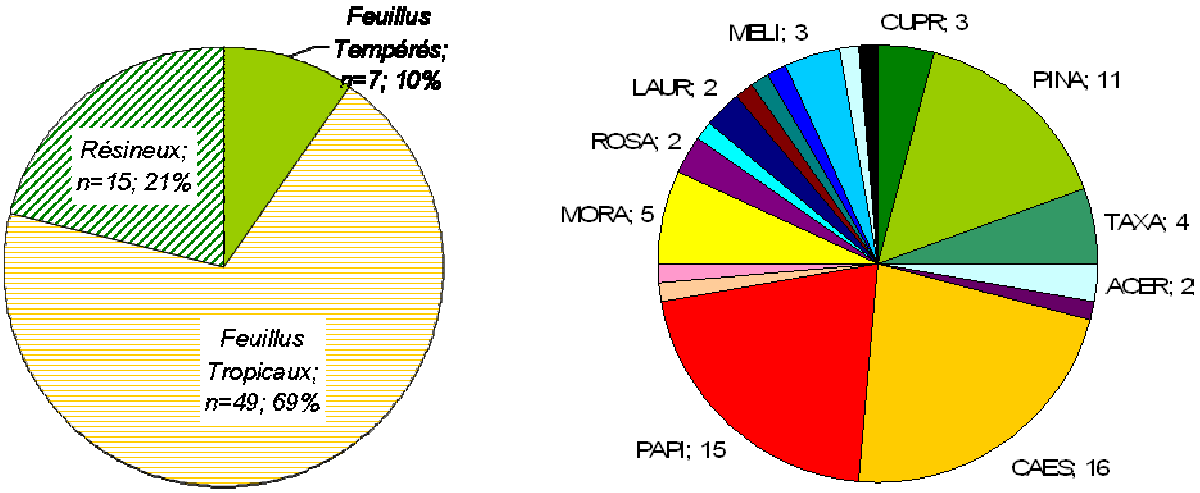


Figure 22 : Effectifs des types de bois échantillonnés par grands groupes (à gauche), et par famille botanique (à droite, les libellés correspondent aux 4 premières lettres de la famille, pour les familles représentées par plus d'un type de bois).

L'échantillon a été ciblé sur les bois tropicaux, dans la lignée du sujet initial, auxquels se sont rajoutés des résineux (dont ceux destinés à l'étude de l'effet de déterminants primaires) et quelques feuillus tempérés. En terme de familles botaniques, les bois de Léguminosae (Papilionaceae et Caesalpiniaceae) sont très représentés ; ce sur-échantillonnage est en fait « survenu » de façon relativement aléatoire : d'abord dans la sélection selon les taux d'extraits, puis par l'ajout de bois tropicaux de facture instrumentale.

Tableau 3 : Résumé de l'échantillonnage inter-spécifique : Espèces, effectifs, types de bois, critères de choix et fournisseurs (Codes : voir texte). Les séparations de lignes correspondent (traits pleins) aux passages Résineux/Feuillus Tempérés/Tropicaux, ou bien (pointillés) regroupent les espèces d'un même genre.

FAMILLE	*Nom botanique*	Nom Pilote ou vernaculaire	Arbres /stocks	Pièces	épr	Types de bois	Critère (s) de choix	Fournisseur
PINACEAE	*Abies alba* Mill.	Sapin	1	1	4	DN	M	CI
ACERACEAE	*Acer pseudoplatanus* L.	Erable (ondé)	1	1	1	DN	F	HC
ACERACEAE	*Acer* sp.	Erable Américain (ondé)	1	1	1	DN	F	HC
CAESALPINIACEAE	*Afzelia bipendensis* Harms.	Doussié	4	4	13	DN	P+C	CI
CAESALPINIACEAE	*Bocoa prouacensis* Aubl.	Boco	4	5	62	DF+A	F	NP
MORACEAE	*Brosimum guianense* (Aubl.) Huber	Amourette	9	11	47	DF	F	NP+HC+EF
MORACEAE	*Brosimum rubescens* Taub.	Satine	1	2	16	DN	P+C	CI
MORACEAE	*Brosimum utile* Pitt.	Takina	1	1	5	DN	R	CI
BUXACEAE	*Buxus sempervirens* L.	Buis	2	2	6	DF	F	EF
CAESALPINIACEAE	*Caesalpinia echinata* Lam.	Pernambouc	8	16	62	DF	F	PB+EF
BETULACEAE	*Carpinus betulus* L.	Charme	1	2	9	DF	F	NP
MELIACEAE	*Cedrela odorata* L.	Cédro	1	1	1	DF	F	HC
BOMBACACEAE	*Ceiba pentandra* Gaertn.	Fromager	1	1	5	DN	M	CI
LAURACEAE	*Chlorocardium rodiaei* Rohwer	Greenheart	1	1	5	DN	M	CI
CUPRESSACEAE	*Cupressus sempervirens* L.	Cyprès d'Italie	1	1	1	DF	F	HC
CUPRESSACEAE	*Cupressus* sp.	Cyprès	1	1	1	DF	F	DC
PAPILIONACEAE	*Dalbergia latifolia* Roxb.	Palissandre Indien	1	1	1	DF	F	HC
PAPILIONACEAE	*Dalbergia melanoxylon* Guill. et Perr.	Grenadille	2	3	16	DF	F+P	EF+IB
PAPILIONACEAE	*Dalbergia nigra* Benth.	Palissandre de Rio	1	1	1	DF	F	DC
PAPILIONACEAE	*Dalbergia retusa* Hemsley	Cocobolo	1	1	1	DF	F	HC
PAPILIONACEAE	*Dalbergia sp1*	Pal. Madagascar Bois de Rose	2	2	5	DF	F	EF
PAPILIONACEAE	*Dalbergia sp2*	Palissandre Manary	4	7	46	DN	P	CI
PAPILIONACEAE	*Dalbergia sp3*	Palissandre de Bahia	1	1	3	DF	F	EF
CAESALPINIACEAE	*Dialium cochinchinense* Pierre	Xody / Keranji	1	1	4	DN	R	CI
CAESALPINIACEAE	*Dialium pachyphyllum* Harms	Omwong / Eyoum	2	4	18	DN+A	R	CI
EBENACEAE	*Diospyros sp.*	Ebene Madagascar	1	1	3	DF	F	EF
CAESALPINIACEAE	*Guibourtia arnoldiana* J.Leon.	Bubinga	1	1	5	DN	M	CI
JUGLANDACEAE	*Juglans nigra* L.	Noyer d'Amérique	1	1	1	DF	F	DC
MELIACEAE	*Khaya senegalensis* A.Juss.	Acajou Cailcédrat	1	1	5	DN	M	CI
LAURACEAE	*Licaria cayennensis* Kosterm.	Cèdre canelle	6	7	18	DN	P	CI
MYRISTICACEAE	*Mauloutchia* sp.	Mahafotra	1	1	5	DN	M	CI

FAMILLE	*Nom botanique*	Nom Pilote ou vernaculaire	Arbres /stocks	Pièces	épr	Types de bois	Critère (s) de choix	Fournisseur
MORACEAE	*Morus mesozygia* Stapf.	Difou	1	1	3	DN	P+C	CI
CAESALPINIACEAE	*Peltogyne venosa* Benth.	Amarante	1	2	8	DN	P+C	CI
PINACEAE	*Picea abies* Karst.	Epicéa	8	37	98	DF+DN+BC	F+D	HC+CM+IB+BT
PINACEAE	*Pinus caribaea* Morelet	Pin des Caraïbes	1	1	4	DN	M	CI
PINACEAE	*Pinus laricio* Poir.	Laricio	1	1	5	DF	F	CM
PINACEAE	*Pinus patula* Schlecht. et Cham.	Pin patula	1	1	4	DN	M	CI
PINACEAE	*Pinus pinaster* Aiton	Pin maritime	1	18	54	DN+BC	D	BT
PINACEAE	*Pinus sylvestris* L.	Pin sylvestre	1	11	33	DN+BC	D	BT
PAPILIONACEAE	*Platymiscium* sp.	Macacauba	1	2	7	DN	P	CI
PAPILIONACEAE	*Platymiscium ulei* Harms	Macacauba	1	2	11	DN	P	CI
SALICACEAE	*Populus sp.*	Peuplier	1	1	5	DN(BT?)	M	BT
ROSACEAE	*Prunus avium* L.	Merisier	1	1	1	DF	F	DC
PAPILIONACEAE	*Pterocarpus erinaceus* Poir.	Vèn	1	5	81	DN	P+C (+D+F)	CI
PAPILIONACEAE	*Pterocarpus soyauxii* Taub.	Padouk	5	14	268	DN+A	P+C (+D+F)	CI
PAPILIONACEAE	*Pterocarpus tinctorius* Welw.	Umukambati	1	2	15	DN+A	P	CI
RHIZOPHORACEAE	*Rhizophora mangle* L.	Mangle	1	1	5	DN	M	CI
CAESALPINIACEAE	*Scorodophloeus zenkerii* Harms.	Divida	2	3	14	DN	R	CI
ROSACEAE	*Sorbus domestica* L.	Cormier	5	5	24	DF	F	NP+EF
CAESALPINIACEAE	*Swartzia fistuloides* Harms	Pao rosa	2	4	21	DN	P+C	CI
CAESALPINIACEAE	*Swartzia panacoco* Cowan.	Coração de Negro	2	3	13	DN+A	P+C	CI
CAESALPINIACEAE	*Swartzia (panacoco ou sp)*	Coração de Negro	2	8	45	DF	F	NP
MELIACEAE	*Swietenia macrophylla* King	Acajou du Brésil	1	1	1	DF	F	DC
TAXACEAE	*Taxus baccata* L.	If	5	6	47	DF+A	F	NP+HC
CUPRESSACEAE	*Thuja plicata* D.Don	Red Cedar	1	1	1	DF	F	HC
RUTACEAE	*Zanthoxylum tsihanimposa* H.Perr.	Fahavalonkazo	1	1	5	DN	M	CI
CAESALPINIACEAE?	*Guibourtia ?*	Bubinga?	1	1	3	DN	F	EF
CAESALPINIACEAE?	*Zollernia? (illicifolia?)*	Mossataiba (Brésil)	1	1	1	DF	F	EF
CAESALPINIACEAE?	*Zollernia? (illicifolia?)*	Mossutaiba	1	1	6	DF	F	NP
ZYGOPHYLLACEAE?	*Bulnesia sp.?*	Palo santo	1	2	14	DF	F	NP
		Chakatte	1	1	2	DN	F	PB
		Champfouti	1	1	6	DN	F	OV
TOTAL			118	223	1176			

II.b. Méthodes

Les séries d'essais qui ont été menées avaient comme double objectif : d'une part de caractériser les propriétés vibratoires élémentaires (Module d'élasticité spécifique E'_L/ρ et coefficient d'amortissement $\tan\delta$) en direction longitudinale de bois de types très différents, et ce de façon à la fois précise et utilisable « en routine » sur un grand nombre d'échantillons ; d'autre part, de mieux appréhender certains facteurs de variation de ces propriétés.

En ce qui concerne les propriétés vibratoires elles-mêmes, plusieurs méthodes ont été comparées expérimentalement en utilisant autant que faire se peut le même matériel végétal, et l'une de ces méthodes (vibrations forcées sans contact en flexion de poutres flottantes très élancées) a été appliquée de façon systématique sur l'ensemble de l'échantillon.

Dans une optique de compréhension des facteurs d'influence potentiels des propriétés vibratoires, différentes mesures physiques ont également été effectuées sur les mêmes échantillonnages : densité anhydre et « sec à l'air », teneur en eau à l'équilibre, gonflements partiels, couleur ; en parallèle les spécimens ont été classés de visu selon l'orientation locale de fil le cas échéant. La mise en relation de l'ensemble de ces résultats sera analysée en termes de corrélations entre propriétés et de liens aux différents facteurs d'influence d'une part, de « classement » des essences et types de bois étudiés et de création de groupes de similitudes d'autre part.

II.b.1. **Protocole général**

Le protocole à adopter devait donc répondre aux objectifs suivants :

- Comparer différents types de bois, et différentes méthodes de mesures vibratoires
- Mettre en relation les propriétés vibratoires mesurées et des mesures physiques

Ces objectifs imposent certaines précautions expérimentales :

-S'affranchir –autant que faire se peut !- des variations locales de propriétés au sein du matériau bois, pour la mise en relation des différentes mesures et méthodes. Ceci nécessite de travailler toujours sur la même pièce de bois initiale, en re-débitant éventuellement pour les mesures employant des éprouvettes de taille inférieure, ou au pire en utilisant du matériel immédiatement adjacent (jumelé).

-Toutes les étapes du protocole –mesures comprises- doivent être *strictement* non destructives, c'est-à-dire ne pas provoquer de modification ni des propriétés physiques et mécaniques, ni de la structure et de la composition chimique, des éprouvettes, afin de pouvoir effectivement mettre en relation les propriétés mesurées aux différentes étapes. Un même type d'éprouvette doit également pouvoir être réutilisable pour autant de mesures ultérieures que possible.

-S'affranchir autant que possible[14] des variations liées aux conditions environnementales, et notamment aux couplages hygromécaniques, dont l'effet est très sensible particulièrement sur les coefficients d'amortissement. Tous les essais sont réalisés sur des éprouvettes conditionnées de façon identique (3 semaines minimum à 20°C et 65% d'Humidité Relative).

[14] Dans la pratique, les conditions matérielles n'ont pas toujours été optimales (dispositif de régulation hygrothermique plus ou moins stable…). Les précautions prises pour y remédier et les vérifications quant à la validité des mesures seront présentées dans la description des méthodes concernées.

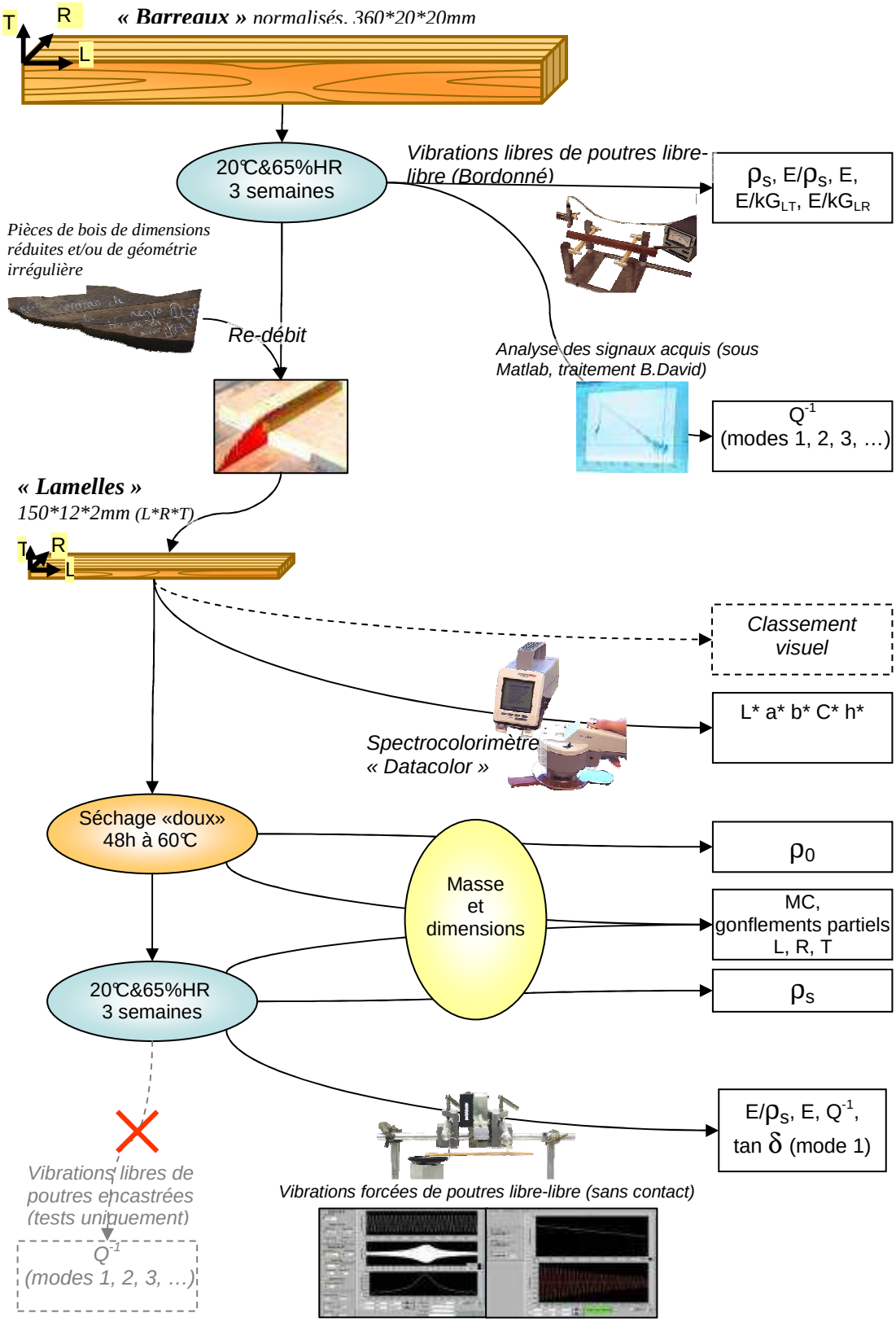


Figure 23 : Schéma général du protocole d'essais suivi, et données obtenues

NB. : Données manquantes :

-La première partie des essais suivant sensiblement ce protocole a été effectuée au Japon, (laboratoire du professeur Minato, Kyoto Prefectural University), et les mesures colorimétriques n'ont pas été effectuées. Des mesures ont été effectuées au retour, environ un mois après débit, mais il est probable que les éprouvettes aient subi une oxydation de surface.

-Pour des raisons soit de temps, soit de dimensions initiales des pièces de bois (chutes fournies par des luthiers), certaines mesures par vibrations libres de poutres libre-libre ont été omises. On dispose toutefois de suffisamment de données pour pouvoir comparer les valeurs de module spécifique et d'amortissement obtenues avec celles obtenues en vibrations forcées.

II.b.1.1. **Préparation et conditionnement des éprouvettes**

- Débit :

Le prélèvement des éprouvettes a été fait en respectant du mieux possible l'orientation principale du fil. Cependant, notre échantillonnage étant ciblé sur des bois tropicaux, il comporte plusieurs bois à « fil changeant » : contrefilés, rubanés, ondés. Le choix de l'orientation principale « mésoscopique » n'est pas toujours évident pour les éprouvettes de dimensions 150*12*2mm. Nous avons choisi d'effectuer les débits de ces « petites » éprouvettes parallèlement à l'orientation principale la plus nette sur la pièce de bois initiale. Selon les cas, on peut donc être relativement « hors du fil ». Ceci présente en fait un intérêt puisque l'on pourra observer les relations module d'élasticité – paramètres d'amortissement sur une gamme de variations un peu étendue. Par contre, un tri des éprouvettes les plus représentatives de l'orientation globale devra être effectué pour la caractérisation des types de bois concernés.

La précision de débit des éprouvettes doit être ajustée à leurs dimensions. Dans le cas des éprouvettes « barreaux », de dimensions 360*20*20mm (L*R*T), la précision d'usinage normale (« au 0,1mm près ») est tout à fait acceptable. Pour les éprouvettes « lamelles » de 150*12*2mm (L*R*T), leur faible épaisseur notamment demande une précision d'usinage accrue. L'épaisseur nominale n'est pas critique, tant qu'elle n'augmente pas trop fortement la raideur (voir paragraphe sur les mesures par vibrations forcées sans contact). Par contre, l'homogénéité d'épaisseur est importante. La méthode de débit devait à la fois assurer un parallélisme entre les faces et un état de surface optimaux, et permettre un grand nombre de débits y compris sur de très faibles dimensions initiales. D'après la littérature [Sali & Kopac 1998] il semblerait que le ponçage ou le rabotage mécaniques aient un effet sur les mesures vibratoires effectuées sur ces épaisseurs d'éprouvettes, en raison de l'arrachage des fibres en surface dans le premier cas, des ondes laissées par les fers dans le second cas. Le type d'usinage choisi a été la scie circulaire. Dans la mesure où l'appui sur un guide parallèle n'est jamais parfaitement stable d'une part, et compte tenu des risques de rejet ou d'entraînement des pièces de faible épaisseur dans la lumière d'autre part, j'ai été amenée à fabriquer un guide de découpe dédié, à monter sur le chariot d'une scie circulaire sur table équipée d'une lame de finition (Figure 24).

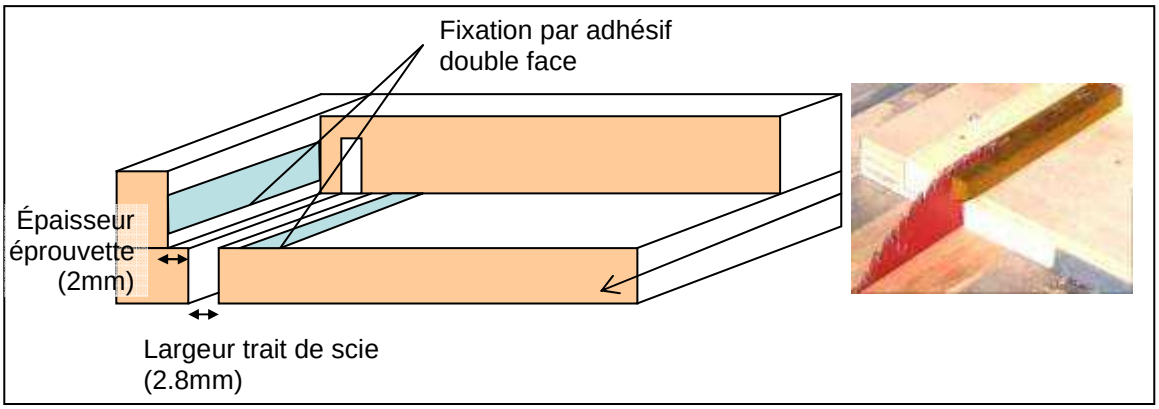


Figure 24 : Chariot de débit pour la préparation des éprouvettes de 2mm d'épaisseur.

Les pièces de bois initiales sont maintenues sur ce guide de découpe à l'aide d'adhésif double-face, ce qui permet de préparer des éprouvettes à partir de morceaux de bois de taille réduite, ce qui était important pour le re-débit des éprouvettes barreau, et pour les débits à partir de chutes fournies par des luthiers.

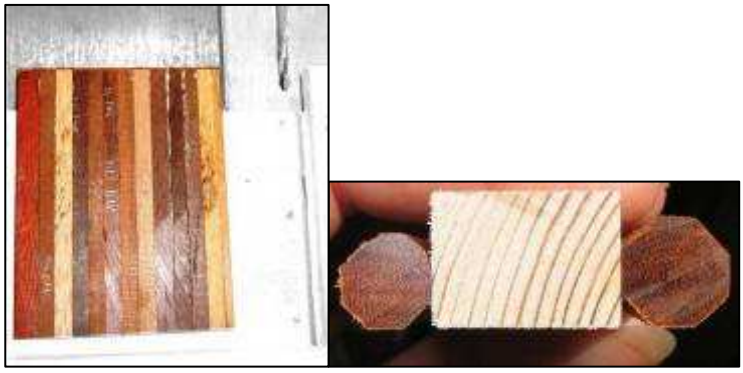


Figure 25 : Contrecollage de pièces initiales de faibles dimensions

Pour des pièces de dimensions et/ou géométrie initiale particulièrement critique (portion de baguette d'archet de section octogonale par exemple), elles ont été contrecollées entre elles ou à des cales (Figure 25). La Figure 26 présente les gammes des écarts moyens entre 3 points de mesure d'épaisseur sur une même éprouvette, pour l'ensemble des éprouvettes préparées avec ce dispositif. La moyenne de ces écarts observés est de 0,026±0.001mm (intervalle de confiance à 95% sur un millier d'éprouvettes, soit 1,3% de l'épaisseur -2mm- de l'éprouvette), et pour 90% des éprouvettes, l'écart mesuré est ≤0,05mm (2,5%). L'épaisseur intervenant au cube dans la détermination des modules d'élasticité spécifiques, la contribution de cette incertitude sera de 4% en moyenne et de 7,5% de façon globale.

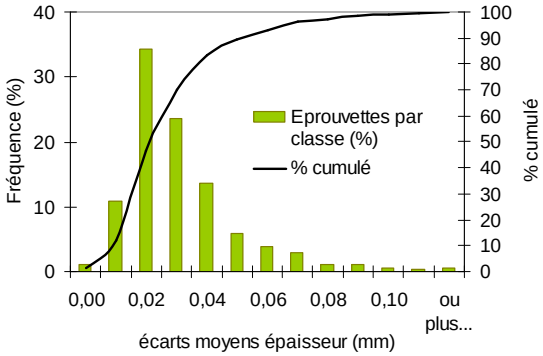


Figure 26 : Ecarts moyens entre 3 mesures d'épaisseur sur les éprouvettes lamelles et fréquence d'observation sur ≈1000 éprouvettes. Abscisses : borne supérieure de chaque classe

➢ Conditionnement hygrothermique des éprouvettes.

Les mesures vibratoires et physiques sont réalisées sur des bois « stabilisés » pour une durée minimum de 3 semaines dans des conditions régulées à 20±1°C et 65±2% d'Humidité Relative.

Cependant, nous ne connaissons pas l'historique de nos bois en termes des variations hydriques rencontrées. Nous travaillons sur des bois « en conditions d'utilisation », secs à

l'air, et donc la première désorption à partir du bois vert a déjà été effectuée (jusqu'à quel point ?). Par ailleurs, les stocks initiaux proviennent de lieux strictement non régulés, et les ateliers où ont été réalisés les débits ne sont guère régulés non plus. Pour les différentes séries d'essais, les conditions climatiques initiales rencontrées ont été : saison des pluies au Japon, climat Méditerranéen et ses variations annuelles à Montpellier, soit une gamme plausible d'humidités relatives de départ de 30 à 90% HR.

Si l'on reporte ces conditions sur des isothermes de sorption schématisés (Figure 27 a) ou expérimentaux sur deux essences contrastées de notre échantillonnage (Figure 27 b) [Rijsdijk & Laming 1994], on peut s'attendre à des variations absolues de teneur en eau à l'équilibre de 1,5 à plus de 2% (soit une variation relative de 12 à 20%).

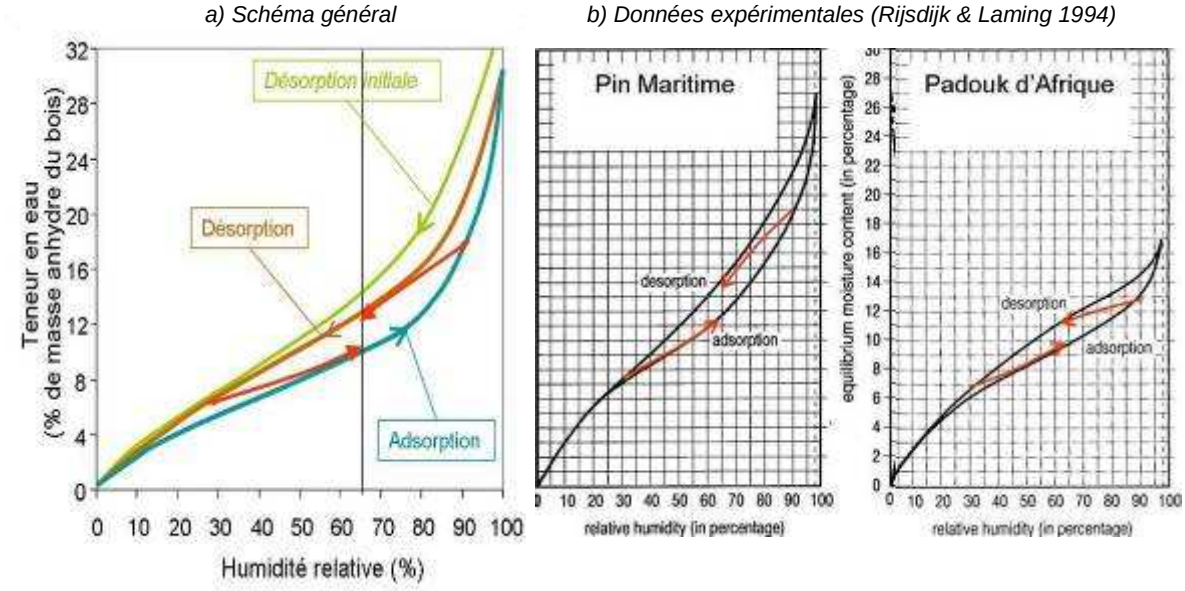


Figure 27 : Variabilité des conditions ambiantes initiales et hystérèse prévisible des teneurs en eau stabilisées à 20°C et 65%HR

Cette variabilité des conditions expérimentales nous a paru peu compatible avec la comparaison des propriétés physiques et mécaniques mesurées pour différents bois, et lors de différentes séries d'essais. Afin d'homogénéiser ces conditions, nous avons décidé de toujours se placer en sorption, en initiant la stabilisation à partir d'un état « quasi-anhydre » (voir définition ci-dessous).

Le séchage des bois jusqu'à l'état strictement anhydre se fait classiquement en étuve sèche à 103°C jusqu'à ce que les masses mesurées soient stabilisées (en pratique, 24 à 48h pour les dimensions considérées ici). Cependant, un chauffage au-delà de 100°C est susceptible de provoquer certaines modifications des bois. Même pour de faibles teneurs en eau de départ (bois « secs à l'air »), et de faibles humidités relatives au cours de la chauffe, une diminution de l'hygroscopicité des bois peut être observée. Ces éventuelles modifications doivent être réversibles, mais en effectuant une ré-humidification plus importante que celle de notre protocole. Pour de faibles teneurs en eau de départ et en chauffant en étuve sèche, on ne risque par contre pas de provoquer de modifications irréversibles touchant les composés primaires du bois (cellulose, hémicelluloses, lignines) [Obataya E., communication personnelle].

En revanche, ce chauffage à + de 100°C risque d'avoir des effets marqués sur certains extractibles. Entre autres, nous avons observé, lors de tests préliminaires, une importante exsudation d'extraits (Figure 28) lors du chauffage pour plusieurs espèces de *Dalbergia*

(Grenadille, certains stocks de Palissandres de Madagascar…), ainsi que sur certaines autres espèces (« Mossutaiba »…). Ceci a aussi été observé au laboratoire du CIRAD pour des pins très riches en résines. D'autres essais préliminaires sur du Padouk (*Pterocarpus soyauxii*) semblaient indiquer un début de « blocage » hygroscopique et dimensionnel pour un séchage à température modérée (60°C) mais prolongé (près d'une semaine).

Figure 28 : Exsudation d'extraits lors du chauffage à 103°C (épaisseur de la face LT représentée≈2mm).

Pour s'affranchir des effets potentiels cités, le séchage initial de nos éprouvettes a été effectué à 60°C, durant 48h. Les teneurs en eau résiduelles dans ces conditions « quasi-anhydre » ont été testées *a posteriori* (i.e. après avoir réalisé tous les essais sur l'échantillon) sur 220 éprouvettes de densité « anhydre » et de teneur en eau stabilisée « sec à l'air » contrastées (Figure 29). Bien que les propriétés physiques de l'échantillon soient très contrastées, la teneur en eau résiduelle suit une loi Normale, et est comprise entre 0,23 et 1,26% (IC à 95% de la moyenne : 0,75±0,03%). Elle ne paraît pas dépendre clairement de la densité des bois.

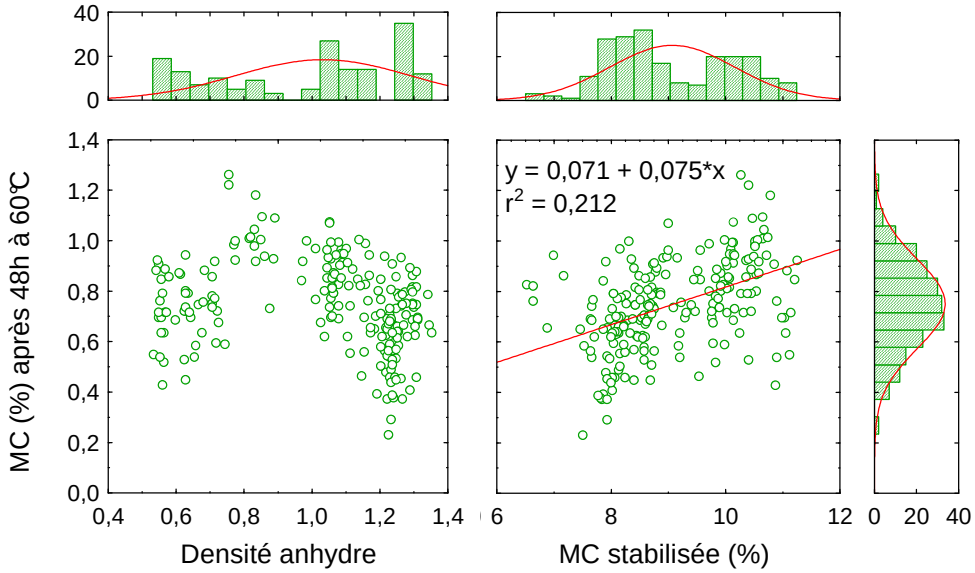


Figure 29 : Teneurs en eau (%) résiduelles après un séchage de 48h à 60°C (par comparaison avec un séchage à 103°C) pour un échantillon de densités anhydres et de teneurs en eau « sec à l'air » contrastées.

Les mesures effectuées à l'issue de ce séchage initial seront appelées « quasi-anhydres » dans la suite du texte.

Pour les mesures dans l'état dit « stabilisé » ou « sec à l'air », les éprouvettes ayant subi un séchage initial sont conditionnées 3 semaines au minimum à 20±1°C et 65±2%HR. La distribution des teneurs en eau observées dans cet état sur notre échantillon est présentée sur la Figure 30. La détermination de ces teneurs en eau prend en compte un correctif moyen pour les teneurs en eau résiduelles présentées ci-dessus. La plupart des types de bois que nous avons étudiés se stabilisent dans ces conditions à des teneurs en eau inférieures à 12% (entre 8 et 11%) avec toutefois une plus forte proportion de types de bois proches de cette valeur

« standard ». Par contre, les types de bois les plus échantillonnés en termes de nombre d'éprouvettes ont une teneur en eau à l'équilibre bien inférieure, de l'ordre de 8-9%.

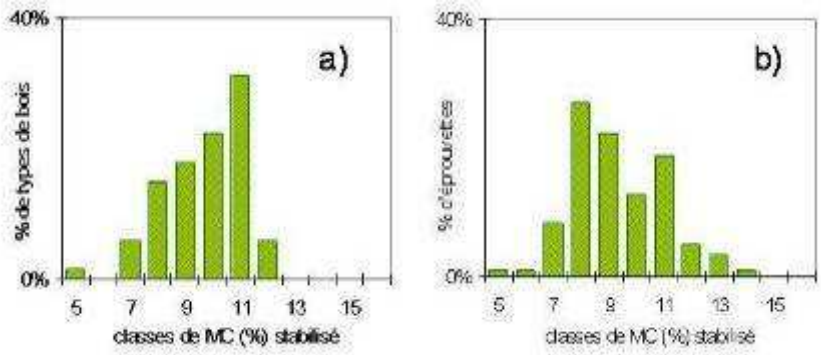


Figure 30 : Distribution des teneurs en eau « sec à l'air » stabilisées observées sur l'ensemble de notre échantillon : a) par types de bois (n≈70) ; b) pour toutes les éprouvettes (n≈1400).

NB : Les éprouvettes « barreaux » destinées aux essais par vibrations libres ont été stabilisées dans les mêmes conditions, mais n'ont pas subi de séchage initial. Ces essais étaient surtout destinés à mesurer les modules élastiques, qui sont bien moins sensibles que les paramètres d'amortissement à des variations de teneur en eau de quelques % absolus.

- Conditions réelles

En pratique, les essais de vibrations libres sur poutres flottantes ont été réalisés dans la même salle régulée en température et humidité, à 20±1°C et 65±2%HR , où les échantillons ont été stabilisés, au CIRAD. Même si nous ne connaissons pas la teneur en eau à « l'équilibre » des éprouvettes, qui n'ont pas été amenées à l'état anhydre ou quasi-anhydre, cette teneur en eau est en tout cas fixée. Par contre, le dispositif de mesures par vibrations forcées a été développé et donc implanté au LMGC, dans une salle sensément régulée, mais dont la régulation est en fait très peu fiable : pour une consigne de 20°C et 65% HR, les conditions observées en hiver sont à 20±4°C et 60±5% HR, en été à 28±2°C et 55±5% HR. Les différences de ces conditions avec les conditions normalisées ne sont pas suffisantes pour impliquer en elles-mêmes des variations instantanées importantes des propriétés viscoélastiques des bois, mais leur variabilité ne permet en aucun cas d'arriver à un état « d'équilibre » hygroscopique. Aussi, pour les éprouvettes destinées à cette mesure, la stabilisation et les mesures physiques ont été réalisées dans la salle régulée du CIRAD. Elles étaient ensuite conditionnées par groupes de 3, en chassant l'air autant que possible, dans des sachets plastiques hermétiques thermosoudés, et placées ainsi dans une sacoche isotherme pour le transport entre laboratoires (≈10minutes, en évitant les heures de pointe, et heures ou périodes de hautes températures, ou d'hygrométries extrêmes). L'évolution de la teneur en eau des éprouvettes a été suivie en effectuant une pesée au LMGC: en début de mesure, lors de l'ouverture de chaque sachet de 3 éprouvettes; puis à la fin des mesures vibratoires de chaque groupe de 3 (durée : 15 à 60minutes). La Figure 31 résume l'ensemble de ces pesées de vérification, rapportées en termes de variations de teneur en eau (en % de %) d'après la définition suivante :

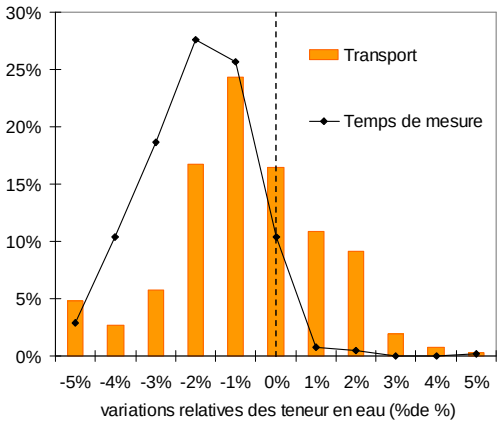


Figure 31 : Variations de teneur en eau des éprouvettes entre la mesure en conditions régulées et la fin des mesures vibratoires (distribution des observations sur l'ensemble des essais)

$$\frac{\Delta MC}{MC} = 100 * \frac{m_2 - m_{stab}}{m_{stab} - m_0}$$

Les moyennes de ces variations sont statistiquement non nulles, et ne peuvent pas être assimilées à un artefact sur des essais particuliers. La moyenne de la variation relative de teneur en eau lors du transport entre laboratoires est de -1,6±0,2%/% (intervalle de confiance à 95%), et celle observée sur la durée des mesures vibratoires est de -2,6±0,2%/%.

En ce qui concerne leur impact sur les mesures vibratoires dans ces conditions, les tests effectués seront présentés dans le paragraphe sur la répétabilité de cette méthode ; en résumé, il semble que l'incertitude générée est quasi négligeable, et en tout cas bien inférieure à ce qu'elle serait si la « stabilisation » avait été effectuée dans la salle du LMGC, et aux incertitudes évitées par le protocole adopté.

II.b.1.2. **Mesures physiques**

Les mesures considérées dans ce paragraphe ont pour nos objectifs une double utilité : d'une part en tant que descripteurs et indicateurs du comportement des bois (densités, teneurs en eau en conditions données, retraits/gonflements) qui ont une grande importance au niveau des utilisateurs, et qui peuvent aussi aider à comprendre les tendances observées sur les paramètres élastiques et d'amortissement et leurs éventuels facteurs d'influence microstructuraux et chimiques. D'autre part pour le suivi des conditions de mesures (teneur en eau) et le calcul des propriétés vibratoires (dimensions et densité). Ce sont des mesures classiques et *a priori* peu problématiques. Cependant, dans le cadre de notre protocole, les conditions de séchage (et les plages de variations hygrothermiques pour les gonflements) comme les dimensions des éprouvettes ne sont pas forcément normalisées, et impliquent certaines incertitudes qui demandent à être quantifiées. Ces déviations aux protocoles normalisés ont été dictées par le principe initial de réaliser les différentes mesures sur les mêmes pièces de bois (effet des variations locales), et par les contraintes liées aux mesures vibratoires par vibrations forcées qui incluent à la fois des dimensions relativement faibles et un suivi des variations de teneur en eau et de dimensions des éprouvettes.

a Mesures de masse

Ces mesures ont été effectuées : pour la détermination des teneurs en eau à l'équilibre et des densités, et pour le suivi du conditionnement des éprouvettes destinées aux méthodes vibratoires.

Matériels de mesure employés

Pour les éprouvettes « barreaux », les pesées ont été effectuées sur une balance de résolution 0.01g (Marque Mettler, modèle PM2000). Pour les éprouvettes « lamelles », on a utilisé une balance au 0.001g (Sartorius, Laboratory LC6205). L'exactitude de ces deux instruments est vérifiée chaque année.

Pour les mesures « quasi-anhydre », les éprouvettes ont été sorties de l'étuve sèche par séries de 6 et mesurées immédiatement (délai maximum ≈10minutes). La reprise d'humidité sur ce laps de temps est *a priori* négligeable d'autant plus sur des bois anhydres ou presque [Rijsdijk & Laming 1994 ; Clair 2001 ; Thibaut A. com. pers.]

Les vérifications de masse au LMGC ont été faites sur une balance Sartorius de résolution 0.0001g.

Précisions et incertitude

- Précision

Dans le cas des éprouvettes « barreaux », les mesures de masse ont été effectuées « au plus proche 0,01g ». On peut estimer l'erreur absolue / précision de mesure à Δm= 0,02g. Les masses minimale, moyenne et

maximale, des éprouvettes étudiées[15] étant respectivement de Ms=30 ; 90 ; 200 g, l'erreur relative sur la masse pour ces éprouvettes est évaluée à 0,01% au minimum, 0,07% au maximum, et 0,02% en moyenne.

Dans le cas des éprouvettes « lamelles », les mesures de masse ont été effectuées « au plus proche 0.001g ». On peut estimer la précision de mesure à ΔM= 0.002g. Les masses (« anhydre » et « sec à l'air » confondues) minimale, moyenne et maximale, des éprouvettes étudiées étant respectivement de $M_{(s/0)}$=0,82 ; 2,95 ; 7,82 g, l'erreur relative sur la masse pour ces éprouvettes est évaluée à 0,03% au minimum, 0,07% en moyenne, et 0,24% au maximum.

- Exactitude

Nous ne connaissions pas l'exactitude absolue de la balance au 0.0001g utilisée pour le suivi quantitatif des teneurs en eaux des éprouvettes entre laboratoires (§II.b.1.1). A défaut de vérifier son exactitude absolue (i.e. à l'aide d'étalons), nous avons vérifié son exactitude « relative » par pesées comparatives de différentes pièces de « clinquant » d'acier afin d'obtenir une référence sur un matériau non hygroscopique[16]. Les différences correspondent à l'incertitude de la mesure initiale (≈0,001g), le suivi des conditions est donc cohérent.

- Incertitude systématique sur les masses « quasi-anhydre »

Comme on l'a déjà signalé, le séchage « quasi-anhydre » implique une erreur par rapport à un séchage anhydre strict. D'après les tests présentés au §II.b.1.1 , la masse anhydre réelle serait de ≈0,992*$m_{60°C}$.

b Teneur en eau à l'équilibre

La teneur en eau « sec à l'air » (stabilisée à 20°C&65%HR), est généralement admise comme étant à 12% (pour un bois « standard » stabilisé en désorption). Pour une stabilisation en adsorption comme dans notre protocole, la valeur « standard » serait de ≈11%. En réalité et surtout pour les types de bois que nous étudions elle est bien plus variable (cf p 54). Dans le cadre de notre travail, ce paramètre à comme intérêts : de caractériser les conditions de teneur en eau lors des mesures vibratoires ; de servir d'indicateur de la physico-chimie des bois étudiés.

La teneur en eau n'a pas été déterminée sur les éprouvettes « barreaux », qui n'ont pas subi de séchage.

Définition

La teneur en eau (MC%) d'une pièce de bois pour des conditions hygrothermiques données est définie par :

$$MC(\%) = 100 * \frac{(M_x - M_0)}{M_0}$$

Avec : -M_x = Masse stabilisée dans des conditions données

-M_0= Masse anhydre

En l'occurrence, M_x correspond aux conditions standards et normalisées comme « sec à l'air », c'est-à-dire après stabilisation (3 semaines minimum) dans un environnement régulé à 20±2°C et 65±5% HR (Humidité relative).

Précision, erreur systématique et correction

- Précision

A partir des incertitudes sur les mesures de masses évaluées, la précision relative (ΔMC/MC) sur la mesure de la teneur en eau est de ±0,55% (de la teneur en eau en %), et la précision absolue de ±0,05% par rapport à une teneur en eau « sec à l'air » moyenne de ≈10% proche de l'échantillon étudié.

- Incertitude systématique sur les conditions « quasi-anhydres »

L'erreur aléatoire due à la précision de mesure est faible. Cependant, les impératifs de notre protocole en termes de non-destructivité d'une part (température <103°C), d'homogénéité des conditions de

[15] Les masses minimales et maximales correspondent à des éprouvettes de dimensions non normalisées, mais respectant les conditions générales d'élancement pour cette méthode.

[16] Ce test a été réalisé sur un temps suffisamment court et lors de périodes suffisamment sèches pour que l'influence de la condensation et de l'oxydation entre deux salles non régulées soit négligeable devant la résolution de mesure.

sorption/désorption d'autre part (§II.b.1.1), impliquent une certaine erreur systématique liée au séchage « modéré » (48h à 60°C) de nos échantillons. A partir des vérifications présentées §II.b.1.1, on pourra observer d'une part les données « brutes », comparables puisque réalisées dans les mêmes conditions, et d'autre part des valeurs corrigées par la moyenne des différences observées (0,75% absolu).

c Mesures de dimensions

Comme on l'a signalé dans le paragraphe sur la préparation des éprouvettes, la précision sur les mesures de dimensions des éprouvettes sont très importantes. Elles vont servir dans les calculs de densités, de gonflements et surtout de modules d'élasticité. Les erreurs sur ces mesures vont donc s'ajouter dans la détermination des propriétés physiques et mécaniques, et il est important de les quantifier du mieux possible.

Matériels de mesure employés

Les mesures de dimensions ont été effectuées à l'aide de pieds à coulisse de marque « Mitutoyo » modèle « DIGIMATIC ABSolu » avec sortie de données. Les mesures de largeur et d'épaisseur ont été faites en 3 points par éprouvette, les mesures de longueur en 1 point. Pour les mesures de longueur sur les carrelets de 360mm, on a utilisé une règle millimétrée métallique.

Pour les mesures « quasi-anhydre », les éprouvettes ont été sorties de l'étuve sèche par séries de 6 et mesurées immédiatement (délai maximum ≈10 minutes).

Précision et incertitudes

- Précision

*Section

D'après les données constructeur, la précision est de ±0.02mm pour les modèles de pieds à coulisse utilisés. Dans le cas des éprouvettes de section 20*20mm, cette précision est acceptable (erreur relative de ±0.1%), surtout compte tenu de la précision d'usinage, qui est généralement évaluée « au 0.1mm près ».

En ce qui concerne les éprouvettes de section 12*2mm, l'erreur relative « optimiste » sur l'épaisseur atteint ±1%, erreur qui sera amplifiée dans les calculs basés sur cette dimension. En fait, de façon statistique, la variation maximum entre 3 mesures d'épaisseur sur une même éprouvette « lamelle » est de 0.05mm (§II.b.1.1, moyenne sur plusieurs centaines d'éprouvettes). Cette variation est supérieure de 0.01mm à la précision annoncée par le constructeur, et elle inclut la précision de mesure, et la précision d'usinage (cf. vérifications au comparateur ci-dessous).

Le choix de pieds à coulisse comme instrument de mesure, malgré la plus faible précision, était déterminé par des raisons pratiques : possibilité de mesurer et sauvegarder longueur, largeur (*3points) et épaisseur (*3points) dans une même série d'essai/acquisition d'une part ; meilleur contrôle du positionnement des éprouvettes « lamelles » entre les deux faces de mesures d'autre part (Figure 32). L'erreur due à l'expérimentateur étant généralement supérieure à l'erreur due au matériel au-delà d'un certain nombre de mesures, j'ai préféré limiter la première qui est plus difficilement repérable et quantifiable.

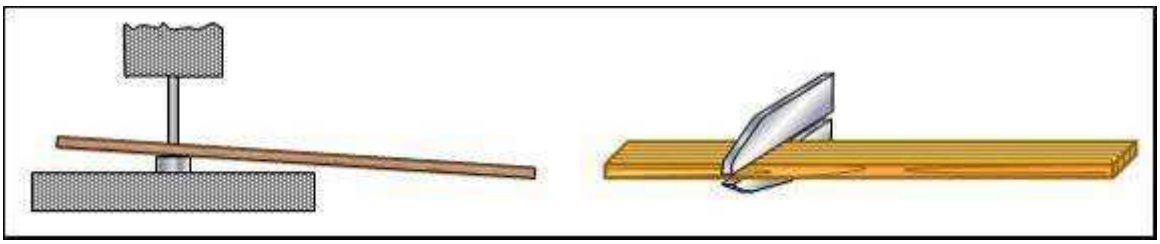


Figure 32 : Positionnement des éprouvettes « lamelles » entre les faces de mesure d'un comparateur sur socle (à gauche) ou d'un pied à coulisse.

Ceci dit, la « précision » moyenne globale (usinage + mesure) est très proche entre mesures effectuées avec un comparateur (marque Heidenhain, résolution 0.001mm), et un pied à coulisse neuf (Figure 33).

On évaluera l'erreur absolue moyenne sur les épaisseurs et largeurs des éprouvettes « lamelles » à 0,05mm (en arrondissant), soit une erreur relative de 2,5% sur l'épaisseur, et de 0,42% sur la largeur.

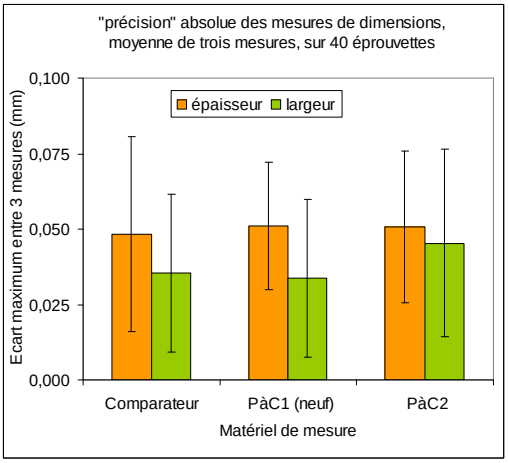


Figure 33 : Variations absolues entre 3 mesures de dimensions par éprouvette avec un comparateur, un pied à coulisse neuf, ou plus ancien.

*Longueur

Pour les éprouvettes « lamelles », l'erreur absolue sur les mesures de longueur est estimée à ±0,25mm (usinage + défaut éventuel de positionnement entre les faces de mesures) soit une erreur relative de ±0,17%.

Pour les carrelets de 360mm de long, on estime que la précision de la mesure « à l'œil » sur une règle graduée au 0,5mm est de l'ordre de 0,2 mm de chaque côté, et la précision d'usinage en bois de bout de 0,1 mm de chaque côté. En pratique, les mesures sont au plus proche mm, soit une erreur relative de 0,3%.

- Exactitude

D'après des tests effectués sur différentes épaisseurs nominales de clinquant d'acier et en parallèle sur un lot de 40 éprouvettes de bois, l'exactitude était bonne et équivalente entre comparateur et pied à coulisse neuf. En revanche, un pied à coulisse plus ancien qui a été utilisé pour les premières séries d'essais présentait une dérive systématique de -0,055mm. Les mesures effectuées avec cet instrument ont été corrigées par cette constante.

- Erreur systématique sur les dimensions « quasi-anhydres »

L'incertitude due au séchage « modéré » à 60°C doit également être élucidée en ce qui concerne les mesures de dimensions – que ce soit pour la détermination d'une densité « anhydre » ou pour les calculs de retraits/gonflements.

Nous ne connaissons pas *a priori* le comportement de nos échantillons. Si l'on prend comme données les valeurs minimales, moyennes, et maximales de la base de données du CIRAD pour les coefficients de retraits (=% de variation dimensionnelle par % de teneur en eau) transverses, et en longitudinal des valeurs de 3.10^{-4}% à 0,17% (bois de compression), et qu'on suppose que le retrait est linaire dans tout le domaine hygroscopique, on peut s'attendre sur nos dimensions d'éprouvettes aux écarts suivants entre les deux conditions de séchage :

Tableau 4 : Variations absolues prévisibles entre les dimensions des éprouvettes lamelles séchées 48h à 60°C, et leurs dimensions strictement anhydres.

(en mm)	ΔL	Δl	Δe
Min	0,001	0,006	0,002
Moyenne	0,010	0,020	0,006
Max	0,250	0,041	0,011

On est entre bien au dessous et à la limite -pour les cas extrêmes- de la précision de mesure.

*Conclusion quant à l'exploitation des données

Il semble que dans les conditions de notre protocole, les différences entre dimensions « quasi anhydres » et anhydre strict soient négligeables. Aussi, dans les déterminations de densités et de retraits, nous utiliserons les valeurs brutes, plutôt que de proposer une

« correction » des données qui risquerait en fait d'augmenter l'incertitude. Par ailleurs, tous nos essais ayant été faits suivant le même protocole et dans les mêmes conditions, les données de densité « anhydre » et de retraits seront comparables entre elles. De plus, nous ne cherchons pas dans le cadre de ce travail à effectuer une caractérisation « absolue » de nos bois pour ces paramètres, mais à pouvoir les mettre en relation avec les autres propriétés mesurées.

d Densités

La densité est une des premières propriétés de base des bois. Elle représente peu ou prou la quantité de matière, et elle peut éventuellement servir d'indicateur pour d'autres propriétés (retraits, dureté, modules).

Définition adoptée

Nous appellerons ici « densité » la masse volumique de nos échantillons, rapportée à la masse volumique de l'eau dans les mêmes conditions (en l'occurrence sensiblement constantes). En pratique, il s'agira de l'équivalent de la masse volumiqueexprimée en g/cm^3, mais sans unité. Les balances utilisées pour les mesures de masse des différents types d'éprouvettes, et leurs incertitudes, ont déjà été décrites.

Le volume a été estimé/calculé à partir des mesures de dimensions.

Ce choix peut être critiquable par rapport à la méthode de la double pesée. Effectivement, d'une part les erreurs relatives de mesures de dimensions s'additionnent, d'autre part les éventuels défauts de géométrie et d'usinage ne sont pas pris en compte. Dans la pratique, les éprouvettes présentant des irrégularités de géométrie « flagrantes » ont été éliminées. De plus, il nous a semblé que les différences de porosité ouverte méso- ou microscopique rencontrées dans nos échantillonnages (bois ayant de très gros vaisseaux – 300µm type Padouk- ou au contraire de faible diamètre – 30µm type buis [Richter & Dallwitz 2000 onwards]) induiraient une erreur du même ordre, mais qui serait systématique par essence au lieu d'être aléatoire. Nous avons considéré la présence éventuelle de très gros vaisseaux comme faisant partie intégrante du matériau et de sa densité. Par ailleurs, pour les calculs de propriétés vibratoires sur des bois stabilisés, nous avions besoin de données de densité stabilisée dans des conditions identiques à celles des mesures vibratoires, et l'effet de l'immersion dans l'eau –même rapide- nous paraissait difficile à quantifier tant en terme de teneur en eau, d'état d'équilibre, de diffusion ultérieure et de propriétés mécaniques –surtout pour les facteurs d'amortissement.

Précisions et incertitudes

- Précision

D'après les paragraphes précédents, pour les éprouvettes « lamelles », la précision relative sur la masse est estimée à 0,07% (on prend la valeur moyenne, qui correspond dans les faits à 95% de nos éprouvettes). La précision relative sur le volume a une contribution plus marquée: 3,25%, soit une erreur relative sur la densité de ≈3,3%, ce qui correspond, pour la densité stabilisée moyenne de nos échantillons, à ρ_{stab} = 0,80±0,02.

Pour les éprouvettes « barreaux », l'erreur relative moyenne sur la densité est estimée à 0,7%, ce qui donnerait pour notre densité moyenne : ρ_{stab} = 0,800±0,003.

- Incertitude systématique sur les conditions « quasi-anhydres »

Ces incertitudes ont été détaillées en ce qui concerne les mesures de masse et de dimensions quasi-anhydre. La densité anhydre étant un paramètre important en tant qu'indicateur de la quantité de matière ligneuse, et par suite des propriétés physiques et mécaniques du bois, il nous semble important d'avoir une idée de l'ordre de grandeur de l'incertitude sur cette propriété pour notre protocole.

*Estimations

En effectuant un calcul d'erreur « statistique » basé sur les variations de masse et de dimensions (Tableau 4) prévisibles entre les conditions quasi- et strictement anhydre, l'erreur relative systématique peut être estimée à 1,36% au minimum, 2,28% au maximum, et 1,67% en moyenne.

Un calcul plus physique permet également d'estimer la densité anhydre à partir de la densité à une teneur en eau donnée :

$$\rho_0 = \rho_x \frac{1+\alpha x}{1+x}$$

Avec, pour un bois « moyen partout » de notre échantillonnage :

x= 0,0075 = teneur en eau résiduelle,

ρ_x= 0,741 = densité à la teneur en eau x,

α=0,563 = coefficient de retrait volumique.

Si on fait l'hypothèse que les retraits sont linéaires, on obtient une valeur de densité anhydre de 0,739, soit une variation de 0,33% par rapport à la mesure « quasi-anhydre ». En évaluant que le coefficient de retrait est 2 fois inférieur dans cette gamme de teneur en eau, on obtient une densité anhydre de 0,737, soit une différence de 0,54%.

*Conclusion quant à l'exploitation des données

D'après les deux estimations ci-dessus, les différences prévisibles sont inférieures à la précision de mesure des densités. Par ailleurs, elles font appel aux coefficients de retraits, et ne sont donc pas universellement applicables à tous les bois. Il semble préférable de présenter les résultats bruts de « densité quasi-anhydre » affectés d'une incertitude relative totale de 4,2% (mesures+conditions), et éventuellement en parallèle une correction ne prenant en compte que les différences de teneur en eau entre les deux types de séchage.

e Gonflements partiels

Les déformations hygroscopiques peuvent être intéressantes sous deux aspects pour notre travail : d'un point de vue de l'application, pour la stabilité des instruments ; et d'un point de vue plus fondamental, en tant qu'indicateur du comportement de la matière ligneuse (relations gonflements transverses/densité/extractibles ; rapport entre déformations axiales et transverses et angle de microfibrilles ou de fil).

Ceci dit, l'objectif de notre travail n'était pas prioritairement axé sur leur caractérisation ; les mesures effectuées faisaient d'une part partie du suivi expérimental, et d'autre part seront exploitées dans certains points par leurs relations à d'autres propriétés.

Définition

Le retrait (ou gonflement) est défini comme la variation dimensionnelle entre deux états de teneur en eau, rapportée à la dimension anhydre :

$\lambda = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l_x - l_0}{l_0}$ entre une teneur en eau x et l'état anhydre, ou $\lambda = \frac{l_{x1} - l_{x2}}{l_0}$ entre deux teneurs en eau différentes. On se rapporte toujours à la référence anhydre pour avoir une expression réversible.

On appelle gonflements ou retraits partiels des variations où la teneur en eau maximum est inférieure au point de saturation des fibres, par opposition à des retraits (ou gonflements) dits totaux entre l'état saturé et l'état anhydre (et inversement).

A partir de cette définition, λ dépendra à la fois de la teneur en eau humide (ici celle stabilisée à 20°C et 65%HR) qui est variable entre essences, et des coefficients de retrait/gonflement α : % de variation dimensionnelle relative par % de perte de teneur en eau.

$$\alpha = \frac{\lambda}{\Delta MC}$$

On peut remarquer deux choses à ce sujet : d'une part, nous nous situons dans une gamme de teneurs en eau du bois « humide » de 6 à 13% environs. Les retraits/gonflements entre ces teneurs en eau et l'état « quasi-anhydre » ne seraient *a priori* linéaires que sur 1/3 à

2/3 de la gamme d'humidité (d'après [Skaar 1988]) et les coefficients de retrait/gonflement moyens seraient donc sous-estimés par rapport à leur valeur sur l'ensemble du domaine hygroscopique. D'autre part, on retrouve ici l'incertitude sur l'état « quasi-anhydre », au niveau des teneurs en eau, et des dimensions anhydres.

Cependant, ici encore, les valeurs devraient être comparables sur l'échantillon étudié.

Incertitudes et corrections

- Précision

D'après les précisions relatives déjà présentées, on peut évaluer la précision relative des déterminations de gonflements partiels à $\Delta\lambda/\lambda$ = 1,00% en Axial, 1,25% en Radial, et 7,50% en Tangentiel. Pour les coefficients de retrait/gonflement, l'erreur relative sur la teneur en eau s'ajoute et on obtient des $\Delta\alpha/\alpha$ de = 2,10% en Axial, 2,35% en Radial, et 8,60% en Tangentiel. L'erreur en direction Tangentielle est relativement élevée, mais acceptable compte tenu de nos objectifs et du fait que les dimensions ne sont pas optimales.

Par souci de vérification, nous avons observé les gammes de valeurs « brutes » obtenues sur notre échantillonnage pour les retraits/gonflements partiels et les coefficients de retrait/gonflement (Figure 34). Ces données apparaissent cohérentes dans leurs ordres de grandeurs, et l'on n'observe qu'une très faible proportion de valeurs aberrantes. La dispersion observée en tangentiel est supérieure à celle en radial, mais il n'est guère possible à ce stade de savoir si cela vient de l'erreur relative plus importante ou d'une réalité physique, ou des deux.

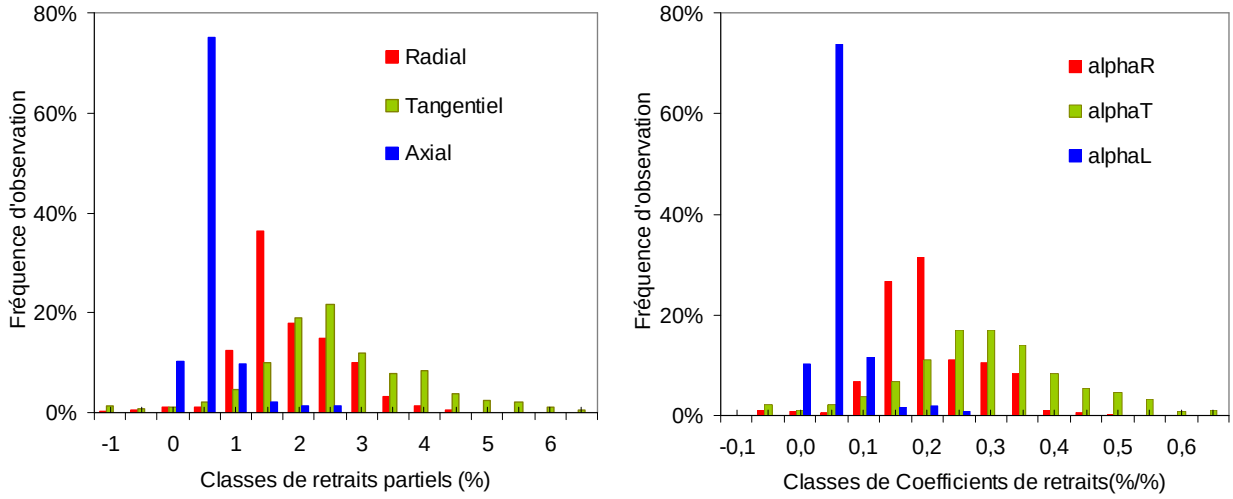


Figure 34 : Histogrammes des valeurs de retraits/gonflements partiels, et de coefficients de retrait/gonflement, mesurées sur notre échantillonnage

- Incertitude systématique sur les conditions « quasi-anhydres » et conclusion sur l'exploitation des données

Comme on l'a déjà signalé (c), la très faible amplitude des différences de dimensions entre le séchage à 60°C et strictement anhydre ne justifie pas de mettre en œuvre des correctifs. En prenant en compte ces différences, l'incertitude relative totale sur $\Delta\lambda/\lambda$ devient de 1,02% ; 1,76% et 8,42% pour les directions L ; R et T respectivement, et celle sur $\Delta\alpha/\alpha$ (L ; R ; T) : 2,12% ; 2,86% ; 9,52%. L'incertitude ajoutée est négligeable devant l'incertitude de mesure.

Cependant, concernant la détermination des coefficients α, la différence significative de teneur en eau entre les deux conditions de séchage, justifie une présentation « brute » et « corrigée » de la teneur en eau. D'après les définitions $\alpha = \frac{\lambda}{\Delta MC}$ et $\lambda = \frac{l_{x1} - l_{x2}}{l_0}$, et l_{x2} pouvant ici être assimilé à l_0, il nous semble plus cohérent d'utiliser dans le calcul des coefficients de retrait/gonflement les valeurs brutes de teneur en eau, qui correspondent aux variations effectivement rencontrées lors du retrait.

II.b.1.3. **Mesures colorimétriques et classement visuel des orientations locales de fil**

Ces deux points ne sont regroupés que du fait qu'ils concernent des paramètres d'aspect.

a Colorimétrie

La mesure de la couleur peut apporter des informations à deux niveaux dans le cadre de notre travail : d'une part, une objectivation de paramètres liés à l'esthétique des bois ; d'autre part, un possible indicateur en lien avec les composés secondaires, particulièrement sur les bois surtout tropicaux considérés.

Les mesures ont à chaque fois été réalisées en tout début de protocole, entre 1 et 2 jours après débit des éprouvettes.

Les données mesurées sont exprimées dans le système CIEL*a*b* (espace représenté sur la Figure 35).

Ces paramètres colorimétriques correspondent à :

L* : clarté (ou luminance). Noir=0 ; blanc = 100 ;

a* : composante rouge (positif) – vert (négatif) :

b* : composante jaune (positif) – bleu (négatif)

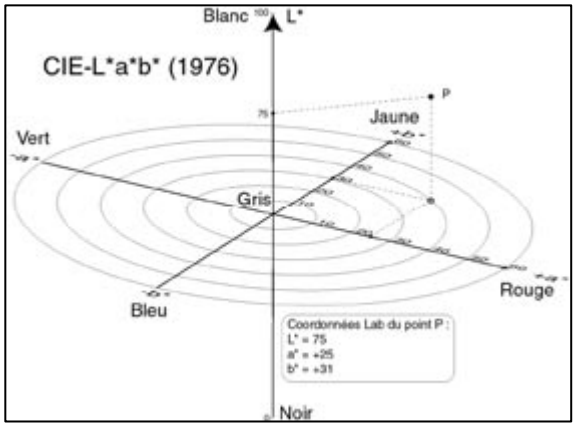


Figure 35 : Système CIEL*a*b*.

On peut y ajouter les valeurs en coordonnées polaires CIEL*Ch* :

C : chromaticité (ou saturation) = $\sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$ une valeur 0 correspond à une absence de couleur (vision en nuances de gris), une valeur élevée à des couleurs « criardes ».

h* : angle de teinte = arc-tangente (b*/a*) (exprimé en degrés dans la suite).

On peut trouver une description plus complète de la colorimétrie et de son application au bois dans [Janin 1994 ; Nishino et al 1998] notamment.

L'appareil de mesure utilisé est spectrocolorimètre « Microflash 100 » de marque Datacolor. Les conditions de mesures sont les suivantes :

-géométrie d'éclairage : diffuse,

-géométrie de lecture : 45°,

Intervalle d'intégration : 400-710 nm (pas de 10nm),

-courbes du standard : CIE 10°,

-illuminant : A

-type de réflexion spéculaire : exclue,

-surface observée : 59mm² (ouverture de 8,7mm).

Les mesures ont été effectuées en 6 points par éprouvettes « lamelles », trois sur chaque face radiale.

Remarque sur le choix de l'illuminant : dans les domaines des pigments, teintures, etc, l'illuminant D65 est le plus courrament utilisé. Dans le cas des bois, toutes les mesures qui ont pû être effectuées montrent des valeurs positives de a* et b* [Nishino et al 1998]. L'illuminant A semble alors plus approprié dans la mesure où il privilégie ce quartier « jaune-rouge ».

b Repérage des orientations locales visibles du fil

Comme on l'a signalé lors de la préparation des éprouvettes, plusieurs des essences étudiées sont susceptibles de présenter un fil « changeant » : ondé, rubané, contre filé… de façon systématique ou occasionnelle. Selon l'amplitude et la longueur d'onde de ces phénomènes d'orientation, ils pourront être surtout assimilable à un angle de fil local sur les petites dimensions de nos éprouvettes. Afin de permettre des tris dans les analyses des résultats, les éprouvettes « lamelles » on été classées visuellement en : contrefil léger ou marqué ; onde légère ou marquée. Lorsque des orientations semblaient bien définies dans le plan LT (champs des éprouvettes), leurs angles approchés ont été notés pour aider à la séparation. Dans le cas du Padouk étudié au second chapitre de la partie 4, les débits effectués permettaient une meilleure extrapolation de ces observations.

II.b.2. **Méthodes de mesures vibratoires utilisées**

Deux méthodes vibratoires (en flexion) principales ont été utilisées : vibrations libres sur poutres flottantes, et vibrations forcées sans contact sur poutres flottantes très élancées. Chacune de ces deux méthodes présentent des avantages (et des limitations éventuelles) spécifiques en termes de précision et de répétabilité, d'utilisation en routine sur un grand nombre d'échantillons, de type d'information fournie, et de dimensions d'éprouvettes. La méthode par vibrations forcées sans contact servira de référence pour les mesures de coefficients d'amortissement, et a servi à réaliser la grande majorité de nos essais. La méthode par vibrations libres, sur éprouvettes de plus grandes dimensions, servira plutôt de référence pour les mesures de modules d'élasticité.

Deux autres méthodes (vibrations libres de verges encastrées, ondes quasi-stationnaires de compression) ont été testées sur des échantillons réduits, mais ne seront présentées qu'à titre de comparaison.

La méthode par vibrations libres était déjà disponible au laboratoire du CIRAD, tandis que le dispositif de vibrations forcées a été mis en place au LMGC au cours de ce travail.

Notre objectif premier a été l'étude de types de bois contrastés et les éventuels déterminants des facteurs d'amortissement, et non le développement de nouvelles techniques de mesures. Aussi, nous détaillerons plutôt ici des aspects « pratiques » sur l'utilisation de ces mesures dans une optique de routine, ainsi que sur « l'optimisation » de cet objectif pour la dernière méthode. Une étude approfondie sur les méthodes elles-mêmes pourra être trouvée notamment dans les thèses de Bordonné (1989), David (1999), Brancheriau (2002).

II.b.2.1. **Vibrations libres sur poutres flottantes**

La méthode qui a été employée, développée par Bordonné (1989), est utilisée au CIRAD pour la caractérisation de routine du module d'élasticité longitudinal des bois. Elle permet également d'obtenir une estimation du cisaillement (G_{LT} et G_{LR}) à condition que la géométrie des éprouvettes (élancement et facteur de forme) soit fixée, ce qui est le cas.

Dans la mesure où cette méthode sert aux campagnes de caractérisation courante des bois, il serait intéressant d'obtenir par le même essai une information sur les facteurs d'amortissements. Parallèlement à l'acquisition automatique des fréquences et des modules,

les signaux audio ont été enregistrés, puis analysés par un traitement écrit en langage Matlab® par [David 1999].

a Mode opératoire, principe et analyse

➢ Détermination des modules élastiques (d'après Bordonné, 1989).

-La masse et les dimensions de l'éprouvette sont mesurées ;

-L'éprouvette est placée sur des supports élastiques (≈aux nœuds de vibration du 1er mode propre de flexion) ;

-L'éprouvette est mise en vibration de flexion par percussion à une extrémité de l'éprouvette, en prenant soin que l'impulsion soit bien verticale.

-Un microphone enregistre les variations de pression à l'autre extrémité de l'éprouvette. Le signal électrique résultant est ensuite amplifié et filtré (filtre antirepliement) puis échantillonné et enregistré sur un PC via une carte d'acquisition analogique/numérique ;

-Une FFT du signal est effectuée pour la détermination des fréquences propres ;

-Une interface permet de visualiser à l'écran les pics correspondants aux fréquences propres et de les sélectionner. Le programme détermine et sauvegarde les modules d'élasticité et de cisaillement à partir de ces fréquences et des masses et dimensions précédemment enregistrées.

Les résultats sont calculés et affichés suivant deux modèles théoriques :

*Timoshenko

On prend en compte l'inertie de rotation et l'énergie de déformation de cisaillement.

Le module spécifique est donné pour une fréquence propre k par :

$$\left(\frac{E}{\rho}\right)_k = \frac{4\pi^2 f_k^{\,2} l^2}{\alpha X_k}\left[1+\alpha F_{1k}(m_k)+\alpha\frac{E}{KG}F2k(mk)\right]$$

avec :

$\alpha = \dfrac{I}{Al^2}$ (A aire de la section, l longueur de l'éprouvette, I module d'inertie = bh^3 pour un prisme)

K facteur de forme pris ici à 0,9

G module de cisaillement

et :

$$X_k = m_k^{\,4}$$

$$m_k : \textit{kième solution de } \cos(m)ch(m) = 1$$

$$F_{1k} = \Theta^2(m_k) + 6\Theta(m_k)$$

$$F_{2k} = \Theta^2(m_k) - 2\Theta(m_k)$$

$$\Theta(m_k) = m_k \frac{tg(m_k)th(m_k)}{tg(m_k) - th(m_k)}$$

E/ρ est alors déterminé par régression linéaire (Figure 36) sur les couples de valeurs ($a_k b_k$) tels que :

$$a_k = \frac{E}{\rho} - \frac{E}{KG} b_k \;\; avec\; bk = \frac{(2\pi l f_k)^2 F_{2k}}{X_k} \;\; et\; a_k = \frac{(2\pi l f_k)^2 (1+\alpha F_{1k})}{\alpha X_k}$$

La fiabilité du résultat peut être estimée par le coefficient de détermination r^2 : effectivement elle dépend du bon alignement des points correspondant aux fréquences mesurées, et donc : de la résolution de la mesure elle-même, et de la sélection des pics.

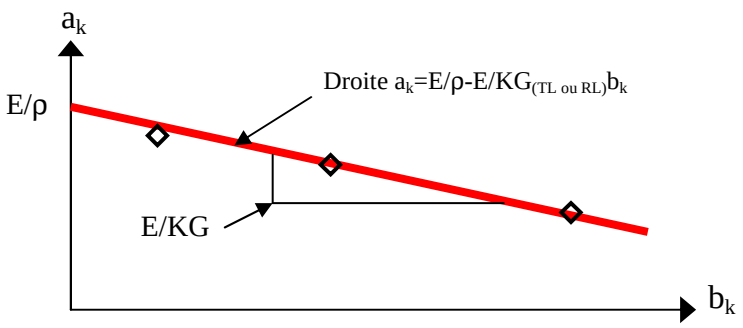


Figure 36 : Détermination de *E/ρ* et de *E/KG*$_{(TL\ ou\ RL)}$ par régression linéaire suivant le modèle de Timoshenko.

*Bernouilli :

C'est un cas particulier du précédent où l'on considère l'énergie de déformation due au cisaillement négligeable devant celle due à la flexion. Le module spécifique est alors déterminé pour chaque fréquence par :

$$\left(\frac{E}{\rho}\right)_k = \frac{4\pi^2 f_k^{\,2} l^2}{\alpha X_k}$$ avec $X_k=m_k^4$, et m_1=4,73, m_2=7,8532, m_3=10,9956

Les données sauvegardées pour chaque essai comprennent : masse, dimensions, masse volumique, les 3 premières fréquences propres, les *E/ρ* et *E* calculés pour celles-ci (Bernouilli), *E/ρ* et *E* par régression (Timoshenko), le ratio *E/KG* et le module de cisaillement G (pour un facteur de forme K=0,9), et le coefficient de détermination r^2 de la régression.

- Etude des facteurs d'amortissement

Le signal du microphone est enregistré via la carte son d'un PC, en format audio (.wav), puis traité sous Matlab grâce à un programme écrit par [David 1999]. Les décroissances/facteurs de qualité sont calculées pour les différents modes propres exploitables. Chaque essai est sauvegardé dans un fichier individuel, l'ensemble étant ensuite regroupé.

b Type d'éprouvettes

Les éprouvettes pour cette méthode sont des carrelets normalisés de 20*20*360mm, R*T*L. Dans certains cas nous avons dû adapter ces dimensions (dimensions initiales réduites, ou au contraire besoin de pouvoir obtenir plus de « lamelles » d'un même carrelet), mais un élancement identique a toujours été respecté.

c Sources d'erreurs, répétabilité, précision

Pour les mesures de module, l'incertitude relative sur E a été estimée voisine de 4% [Brancheriau 2002].

Pour les déterminations de coefficients d'amortissement, l'exploitation des données demande un travail non négligeable de pré-traitement des données : sur 2-3 traitements d'un même signal, le coefficient de variation, au premier mode, est de 0 à 70% (moyenne 7%). Ceci ne semble pas lié à la méthode de traitement, mais au signal acquis : au premier chef, l'aspect de contact, de rebond éventuel, et de répétabilité de la percussion. Après un tri extensif des signaux les plus « propres », les coefficients de variation apparaissent comparables pour les trois premiers modes (≈ 7% entre différents traitements d'un signal). Cependant, compte tenu des incertitudes liées au contact et du temps important nécessaire au

tri des données, nous n'avons réalisé que ≈120 essais par cette méthode, qui ne seront exploités qu'à titre de comparaison avec les valeurs obtenues par vibrations forcées sans contact.

II.b.2.2. **Vibrations libres sur poutres encastrées**

Les éprouvettes (section 2*20mm, longueur 250mm dont vibrante 200mm) étaient inclues (sur 50mm) dans une résine chargée. L'impulsion était encore par contact. L'acquisition se faisait via un accéléromètre fixé à l'éprouvette par une cire. Le traitement employait le même programme Matlab que ci-dessus. Après bien des essais, les variations minimales entre répétitions ne descendaient pas au dessous de 30% au mieux pour les coefficients d'amortissement et cette méthode a été abandonnée (des vérifications ultérieures sur des éprouvettes ayant été ainsi testées montraient aussi que les valeurs moyennes étaient systématiquement surestimées de +40 à +60%).

Par ailleurs l'aspect destructif (éprouvettes fixées dans la résine) n'était pas compatible avec nos objectifs.

II.b.2.3. **Vibrations forcées sans contact sur poutres libre-libre très élancées**

Les principales sources d'erreur expérimentales sur les facteurs d'amortissement obtenus par les deux méthodes précédentes sont dues aux conditions aux limites d'une part (dans le cas des poutres encastrées), à la répétabilité de l'excitation d'autre part. Cette troisième méthode permet de s'affranchir de ces paramètres de contact, mais implique un très grand élancement des éprouvettes. Les faibles dimensions requises permettent en retour d'effectuer des mesures sur des « stocks » initiaux de taille réduite, et sont également compatibles avec des traitements d'extraction sans stress majeur sur la structure. Elles peuvent aussi permettre une étude des variations locales de propriétés à l'échelle « mésoscopique ».

a Principe

L'éprouvette est suspendue par de très fins fils au niveau des nœuds de vibration du mode étudié. Un balayage en fréquence lui est imposé via un électroaimant placé en regard d'une très fine pastille d'acier collée à l'extrémité de l'éprouvette. L'amplitude de vibration de l'éprouvette est mesurée par un capteur de déplacement sans contact placé en regard d'un ventre de vibration du mode étudié.

Le module d'élasticité dynamique spécifique E'_L/ρ est calculé, pour la fréquence de résonance considérée, à partir du modèle de Bernouilli, ce qui impose un très grand élancement des éprouvettes (ici L/h≈75). En se plaçant à une fréquence de résonance, le facteur d'amortissement $tan\delta$ est déterminé par le décrément logarithmique de l'amplitude des vibrations après arrêt de l'excitation. Parallèlement, en fréquentiel, le facteur de qualité Q est mesuré par la largeur de bande à demi puissance (-3dB).

b Type d'éprouvettes et préparation

Les éprouvettes (« lamelles » de 150*12*2mm, L*R*T en général) ont toutes suivi strictement le protocole décrit. Les nœuds de vibrations des modes de résonance en flexion à étudier (ici, seulement le premier), sont tracés sur chaque éprouvette (précision du trait ≈0,5mm). Puis une fine pastille d'acier (clinquant de 0,05mm, couvrant la largeur de l'éprouvette et de largeur 2-3mm) est collée à une extrémité de l'éprouvette avec une goutte de colle cyanoacrylate (« super glue »).

Dans la grande majorité des essais, les éprouvettes sont débitées radialement (largeur dans le plan LR). Ce sont ces essais qui serviront à la comparaison entre types de bois. Dans certains cas, des éprouvettes ont également été préparées dans le plan LT : on peut pour certains bois être à l'échelle d'un cerne de croissance, ou d'une couche de duraminisation particulière. Ce type d'étude n'a pas pu être mené de façon systématique ici. Par ailleurs, si ces éprouvettes tangentielles sont assez hétérogènes dans l'épaisseur (= en R), comme par exemple pour une couche de bois initial et une couche de bois final, il est probable que l'on soit confrontés à un effet de structure (« bilame ») difficile à analyser.

Remarque sur le dimensionnement des éprouvettes : les dimensions adoptées ici sont assez standard pour ce type de méthode. Elles doivent assurer un bon compromis entre précision (l'incertitude relative sur l'épaisseur intervient au cube dans la détermination des modules spécifiques), très grand élancement (hypothèse de Bernouilli lorsqu'on prend un seul mode en considération), et raideur relativement basse (la précision de détermination des paramètres d'amortissement dépend de celle des mesures d'amplitudes ; 0,2mm supplémentaires sur l'épaisseur diminuent déjà de façon significative la précision sur le décrément logarithmique pour des bois à forts modules).

c Dispositifs expérimentaux

Sur ce principe (voir par exemple [Obataya et al 2000]), trois variations de dispositifs ont été utilisés. Les différences d'appareillage et d'acquisition informatique leur confèrent de faibles différences en termes de précision, mais de grandes différences en termes de praticité et de temps de mesure, paramètres importants dans une optique d'utilisation « en routine ». Les mesures ont été effectuées au premier mode de résonance (entre 200 et 600Hz).

Montage « initial » utilisé au Japon

Ce dispositif est installé comme mesure courante au Laboratoire du Pr. Minato, Kyoto Prefectural University. Il a servi à effectuer nos premières mesures sur ce principe, et a servi de base au développement des montages ensuite utilisés au LMGC.

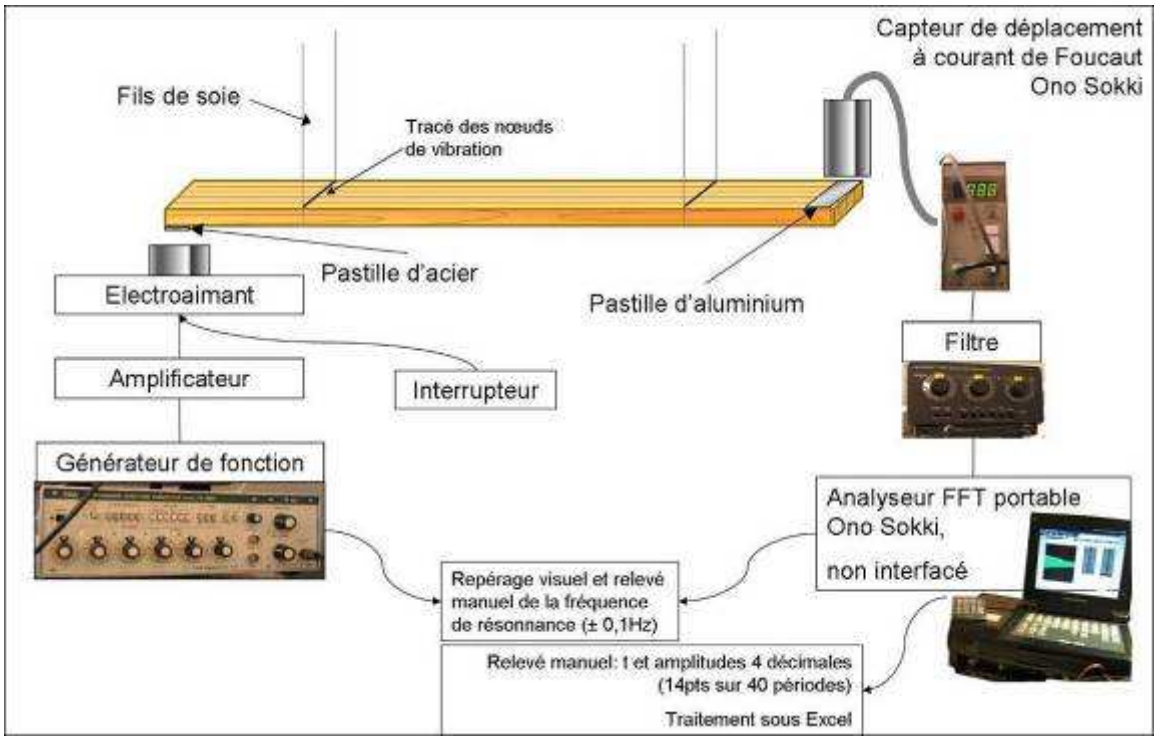


Figure 37 : Schéma du dispositif de mesures vibratoires sans contact par vibrations forcées utilisé à l'Université Préfecturale de Kyoto.

➢ Appareillage :

-Générateur de fonctions marque TDA, modèle FS 2201

-Amplificateur audio

-Electroaimant

-Capteur de déplacement sans contact selon le principe des courants de Foucault marque Ono Sokki, modèle VT120 Gap Detector. Résolution ≤0,005mm. Linéarité ±0,008mm. L'utilisation de ce type de capteur impose que la cible en regard du capteur soit conductrice ; en pratique, une plaquette d'aluminium d'épaisseur 0,1mm est collée à l'éprouvette, à l'extrémité opposée de la plaquette d'acier servant à l'excitation. La plage de mesure étant de quelques mm, la distance capteur-cible doit être réglée à chaque essai.

-Filtre anti-bruit

-Analyseur FFt portable Ono Sokki modèle CF3200, conversion A/D 16bits. Gamme d'amplitude : 10mV-10V, gamme de fréquence : 1Hz-40kHz. Précision en fréquence : ±0,005% de la valeur lue.

➢ Relevé et traitement des mesures :

Le balayage en fréquence est effectué « manuellement » à partir du générateur. La fréquence de résonance est repérée visuellement sur l'écran de l'analyseur FFT (affichage en temporel et en fréquentiel) et relevée manuellement. Dans cette gamme de fréquences, la résolution de réglage du générateur est de 0,01Hz, mais en pratique les fréquences de résonance sont relevées au 0,1Hz. L'amplitude mesurée à la résonance est alors réglée à ≈1-2V, soit ≈1-2mm en déplacement.

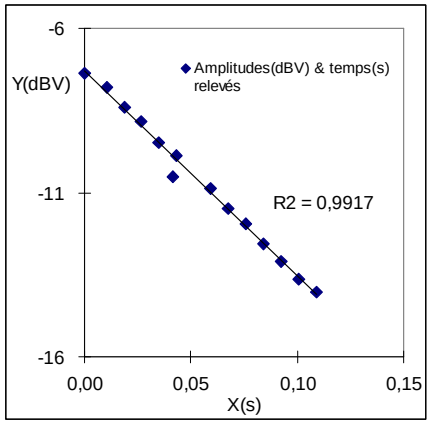


Figure 38 : exemple des mesures amplitude/temps relevées

Après arrêt de l'excitation à la fréquence de résonance, la décroissance temporelle est affichée sur l'analyseur avec les valeurs numériques (4 décimales) des amplitudes (V) et temps (s) toutes les 3 périodes sur une fenêtre d'observation de 40 périodes. Ces données ont été relevées manuellement[17], puis le décrément logarithmique moyen calculé sous Excel. La régularité de la décroissance enregistrée est décrite par le coefficient de détermination r^2 de la régression amplitude (dBV) / temps(s) (Figure 38).

➢ Observations

Grâce à la précision de l'appareillage, ce montage est fiable et précis. Cependant, son utilisation serait grandement améliorée par une acquisition informatique des mesures, non seulement en termes de temps de mesure, mais aussi et surtout en termes de limitation des erreurs « expérimentateur ». Par exemple, sur la figure ci-dessus, le point non aligné peut provenir soit d'une erreur d'acquisition proprement dite, soit probablement d'une erreur lorsque les points de mesure ont été entrés manuellement sous Excel… Malgré ce « détail » pratique, la bonne répétabilité de la méthode et son potentiel d'utilisation « en routine » nous ont incités à l'utiliser pour la suite de ce travail.

Il a été entrepris de « dupliquer » au LMGC ce dispositif, qui permet d'obtenir des résultats fiables, et surtout comparables sur l'ensemble de notre échantillonnage, ainsi qu'avec une grande partie des résultats de la littérature. Ne disposant pas des équipements ci-dessus, le montage résultant a été différent, et a subi plusieurs modifications au cours du temps. L'acquisition automatique des décroissances était en tout cas un point majeur du cahier des charges.

[17] L'analyseur FFT n'était pas interfacé au moment de mon court séjour (ou bien pas interfaçable ?). Chaque mesure de décrément correspond donc à 14*2 valeurs à 4 décimales relevées manuellement.

➢ Mesures effectuées avec ce dispositif

Les données sauvegardées pour chaque essai comprennent : 1è fréquence de résonance (pas de répétition), $tan\delta$ et R^2 associé (2 répétitions). Un échantillon de ≈300 éprouvettes a été mesuré avec ce montage. Il est possible de mesurer entre 4 et 7 éprouvettes par heure avec le nombre de répétitions signalé. Des répétitions sur une cinquantaine d'éprouvettes de cet échantillon ont été effectuées au LMGC avec le premier dispositif.

Mise en place d'un dispositif similaire au LMGC : 1ère Version

Cette version correspond à la phase de mise en place de la méthode ; cependant, après avoir effectué les tests de validité, de nombreuses mesures ont effectivement été réalisées avec ce dispositif. Le montage correspondant est schématisé sur la Figure 39.

En termes de capteurs de déplacement, nous avons tout d'abord essayé des capteurs sans contact capacitifs, mais ceux-ci nécessitent que la « cible » conductrice en regard du capteur soit mise à la masse, ce qui impliquait une préparation et une manipulation des éprouvettes assez longue et délicate. Finalement, nous avons utilisé un capteur à triangulation laser, qui offrait un bon compromis entre précision de mesure, et praticité de manipulation (la distance de mesure est de 30 à 50mm, ce qui permet un positionnement facile des éprouvettes sur les supports et évite un réglage supplémentaire à chaque essai ; par ailleurs il n'est pas nécessaire de coller de cible conductrice).

L'interface d'acquisition a été développée sous Labview par Y. Elkaïm (I.E. CNRS du LMGC), avec des améliorations successives.

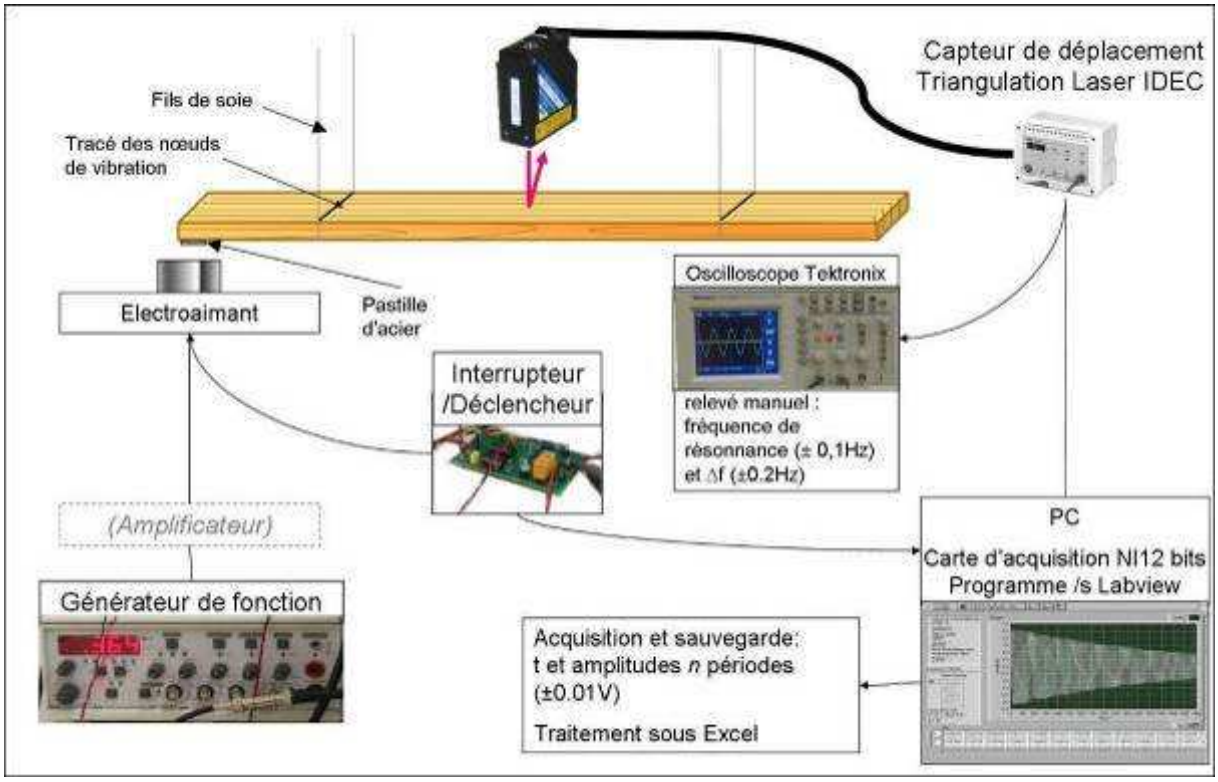


Figure 39 : Première version du montage développé au LMGC : le balayage en fréquence, le relevé des fréquences de résonance et des facteurs de qualité sont toujours manuels. L'acquisition et la sauvegarde des décroissances sont faites directement sur PC *via* une carte d'acquisition « National Instrument » et un programme sous Labview.

➢ Appareillage :

-Générateur de fonctions marque Centrad, modèle 763AF

-Amplificateur audio (non présent au début)

-Electroaimant

-Capteur de déplacement sans contact à triangulation laser marque Idec, modèle MX1A-B, résolution 0,01mm (→10mV), fréquence 11,3kHz.

-Oscilloscope marque Tektronix, modèle TDS 2002. Fréquence d'échantillonnage 1GS/s, sensibilité verticale min 2mV/division.

-PC équipé d'une carte d'acquisition National Instruments. Conversion A/D : 12bits dans un premier temps, puis 16bits.

- Relevé et traitement des mesures :

Le balayage en fréquence est effectué « manuellement » à partir du générateur. La fréquence de résonance est repérée visuellement sur l'écran de l'oscilloscope (affichage en temporel) et relevée manuellement. L'amplitude observée à la résonance est réglée à ≈1-2V, soit ≈1-2mm en déplacement. La largeur de bande à demi-puissance est relevée manuellement également. La précision « générateur+oscilloscope+observateur » permet cependant de relever les fréquences à ±0,1Hz.

L'interrupteur permettant de stopper l'excitation est connecté à la carte NI et sert de déclencheur pour l'acquisition de la décroissance. La durée d'acquisition est réglable. Les valeurs de temps et d'amplitudes sont sauvegardées dans un fichier texte qui est ensuite traité sous Excel comme précédemment.

- Observations

Bien que l'appareillage utilisé présente en général une moins bonne précision que pour le dispositif précédent, le fait que l'acquisition des décroissances soit automatique apporte une amélioration conséquente. D'une part, il est possible de calculer le décrément logarithmique moyen sur un grand nombre de périodes, ce qui augmente statistiquement la fiabilité, surtout pour les bois faiblement amortissants. D'autre part, l'erreur « expérimentateur » et le temps de mesure sont très nettement diminués pour ce qui concerne l'acquisition des amortissements temporels. L'écart-type moyen entre répétitions est cependant supérieur à celui du dispositif initial.

- Mesures effectuées avec ce dispositif

Les données sauvegardées pour chaque essai comprennent : 1è fréquence de résonance, largeur de bande et Q^{-1} (pas de répétition), $tan\delta$ et R^2 associé (de 3 à 6 répétitions). Un échantillon de ≈600 éprouvettes a été mesuré avec ce montage (les tests ne sont bien sûr pas considérés comme mesures). Il est possible de mesurer entre 5 et 12 éprouvettes ($\bar{m}$≈7 en comptant les temps « annexes » de mise au point) par heure avec le nombre de répétitions signalé.

Version finale du dispositif développé au LMGC

Finalement, une carte d'émission et acquisition a été implantée dans le dispositif, et les perfectionnements apportés au programme d'interfaçage ont abouti à une méthode quasi-automatique (Figure 40), permettant toutefois si nécessaire de nombreux réglages sur les paramètres de balayage fréquentiel, d'acquisition, et de traitement des mesures. Cette méthode présente une bonne fiabilité et précision (§ suivant) et peut être utilisée « en routine », ce qui était le but initial.

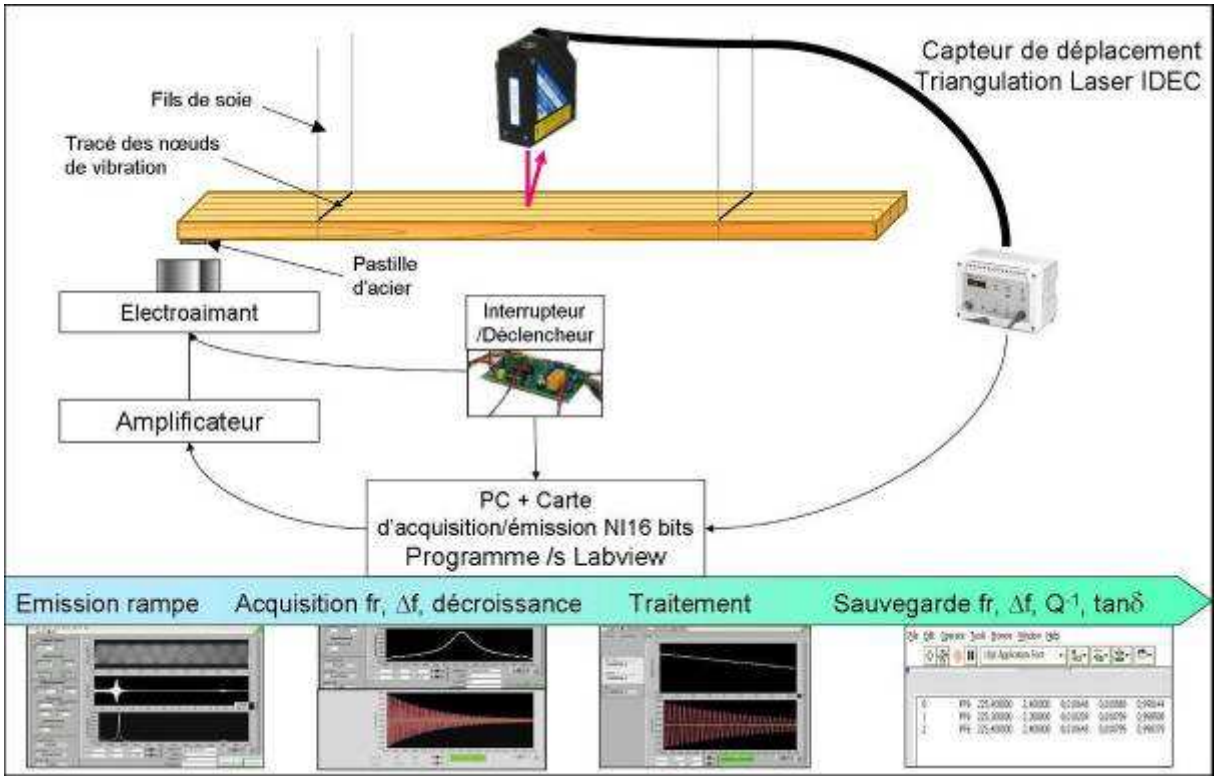


Figure 40 : Version finale du dispositif de mesures vibratoires développé au LMGC (par Y. Elkaïm) : Le balayage en fréquence est piloté depuis le PC, la fréquence de résonance, la largeur de bande, le facteur de qualité et le coefficient d'amortissement sont automatiquement mesurés/calculés et sauvegardés. Différents réglages permettent de s'adapter à des bois de comportement très différents.

- Appareillage :

-PC équipé d'une carte d'émission/acquisition National Instruments. Conversion A/D : 16bits.

-Amplificateur audio

-Electroaimant

-Capteur de déplacement sans contact à triangulation laser marque Idec, modèle MX1A-B, résolution 0,01mm (→10mV), fréquence 11,3kHz.

- Interfaçage :

*Détection des fréquences de résonance

Un premier balayage en fréquence (10secondes par défaut, 50 000echs/s, soit une résolution de 0,1Hz) est effectué, piloté depuis le PC (Figure 41). L'étendue en fréquence est réglable selon que le comportement de l'échantillon est inconnu (on prend par défaut un balayage de 150 à 750 Hz, correspondant à des modules spécifiques de 3 à 43 GPa, avec une extension de gamme en prévision d'éprouvettes de dimensions légèrement différentes), ou prévisible (pour différentes éprouvettes d'un même type de bois, on pourra restreindre l'étendue du balayage). L'amplitude de sortie est de 2V par défaut mais réglable le cas échéant. Pratiquement, dans le cas d'éprouvettes de raideurs spécialement fortes ou faibles (dues à des modules et/ou épaisseurs sortant de la gamme moyenne), le réglage de l'amplitude de déplacement est effectué manuellement sur l'amplificateur, afin de rester dans les mêmes gammes de déformations tout en assurant une amplitude suffisante pour la précision de mesure.

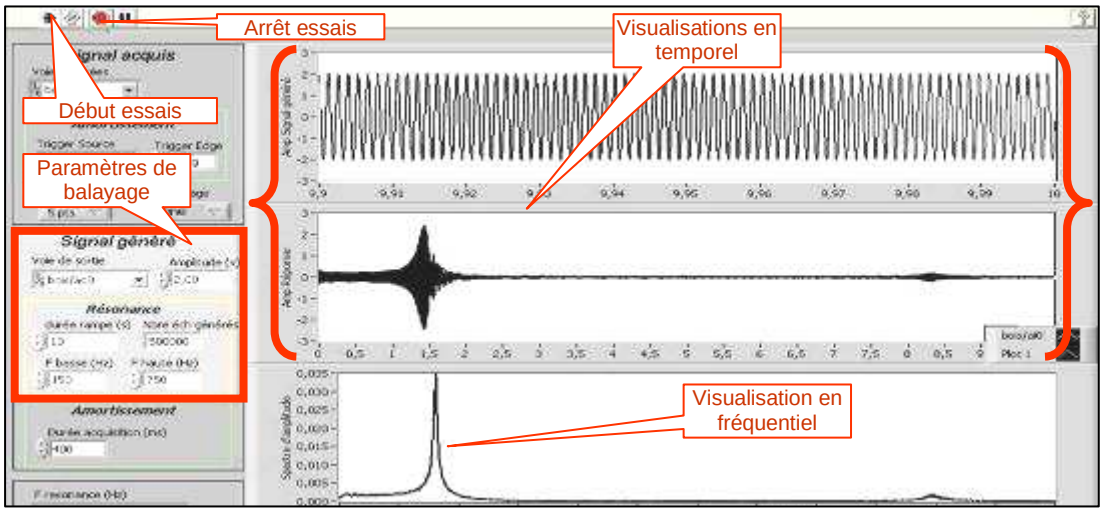


Figure 41 : Commandes et visualisations pour la détection de la 1ère fréquence de résonance (on peut remarquer une légère détection du 2cd mode, malgré le positionnement du capteur au centre de l'éprouvette ; même en plaçant le capteur en regard d'un ventre du second mode, nous n'avons pas réussi dans l'état actuel des choses à obtenir d'amplitudes suffisantes pour être rigoureusement exploitables).

Cette interface de mesure fonctionne en boucle. Une fois le programme lancé, on effectue les réglages éventuels pour cette première phase, puis on lance l'émission/acquisition simultanées. En fin de rampe, les amplitudes de déplacement sont affichées en temporel et en fréquentiel, la fréquence de résonance détectée, et un second balayage centré autour de cette fréquence est lancé avec les mêmes paramètres.

*Mesure du facteur de qualité

A partir de la fréquence de résonance détectée, un second balayage fin est effectué afin de mesurer la largeur de bande à demi-puissance (-3dB) (Figure 42). Par défaut, l'étendue de la rampe est de ±2% de la fréquence de résonance, ce qui est théoriquement largement suffisant pour couvrir toute la gamme possible de largeurs de bandes dans les cas de bois en direction axiale. Cependant, comme on verra ci-dessous, les paramètres de traitement du signal utilisés nécessitent en fait une augmentation de la largeur relative de rampe pour les bois très amortissants (Q^{-1}≥0.015) afin que les lobes secondaires ne perturbent pas la mesure, et une commande sur cette étendue a été ajoutée sur le panneau de commande depuis la capture d'écran présentée.

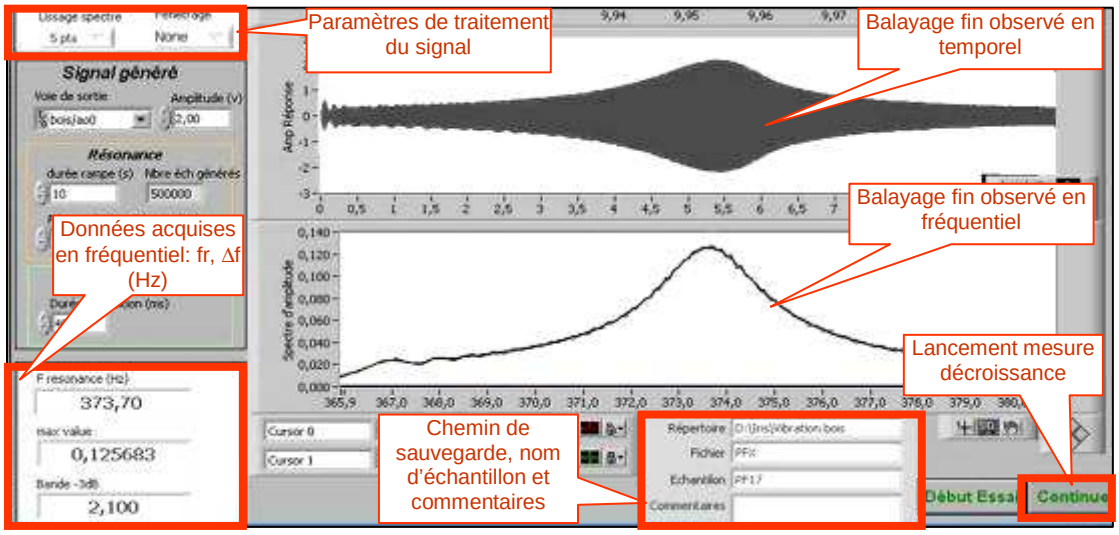


Figure 42 : Visualisations, indicateurs et commandes pour l'acquisition et la sauvegarde de la fréquence de résonance et du facteur de qualité

A ce niveau, l'on est confrontés à un problème de traitement du signal : si l'on choisit une fenêtre carrée ou fenêtre « naturelle », le signal acquis est modulé par un sinus carré (visible en fréquentiel sur la figure ci-dessus) dont les oscillations induisent une incertitude importante à la fois sur les fréquences et sur les amplitudes relevées. Il existe bien sûr de nombreux autres fenêtrages sans modulation mais ils sont destinés à augmenter la séparation entre pics, atténuer les lobes secondaires, et donc une largeur de bande mesurée avec ces fenêtrages n'aurait que peu de sens physique. On peut diminuer l'amplitude et la fréquence de la modulation en fenêtre naturelle en augmentant la durée de rampe, à fréquence d'échantillonnage égale. Son impact sur les mesures n'est pas plus quantifiable, et de plus, on risque rapidement de saturer la mémoire du PC. Nous avons choisi de lisser par moyenne mobile le signal, acquis sans fenêtrage. Le nombre de points à utiliser pour ce lissage a été testé : 3 points sont insuffisants, laissant de fortes oscillations résiduelles ; 7 points sont excessifs et commencent à « aplatir » le spectre faussant ainsi la résolution en amplitudes. Nous avons utilisé un lissage par moyenne mobile sur 5 points, qui s'ajuste au plus près de la courbe expérimentale modulée, avec un bon lissage.

Afin de vérifier l'effet de ce lissage, les fréquences de résonances détectées par le programme sur le signal lissé ont été comparées avec celles mesurées par un balayage manuel utilisant un générateur de fonction de précision (relevé effectué au 0,01Hz). Sur 4 éprouvettes (ayant des fréquences de résonance de 350 à 450Hz), et 17 à 36 répétitions par éprouvettes, aucune différence significative entre les deux types d'acquisition n'apparaît, l'effet du lissage semble donc négligeable devant la variation de la mesure elle-même (CV≤0,1% pour les deux méthodes sur ce test).

Enfin, le réglage de la durée de rampe est important pour assurer une bonne résolution de la mesure du facteur de qualité Q^{-1} (voir § sur les incertitudes de la méthode). Pour une durée – et donc une résolution fréquentielle – données, l'incertitude sur Q^{-1} dépendra : de la largeur de bande, et de la fréquence de résonance (soit en fait du module spécifique, la géométrie des éprouvettes étant relativement constante). La résolution sur Q^{-1} ne sera donc pas la même selon les matériaux. Pour une durée de rampe de 10s, la résolution est de 5-10% pour les combinaisons fréquence/facteur de qualité réalistes pour le premier mode de flexion sur nos dimensions d'éprouvettes (Figure 43). L'incertitude devient relativement très faible pour 20s, mais l'essai est plus gourmand en mémoire. La meilleure solution semble d'adapter cette durée d'acquisition au matériau étudié afin de rester dans une gamme proche de 5%.

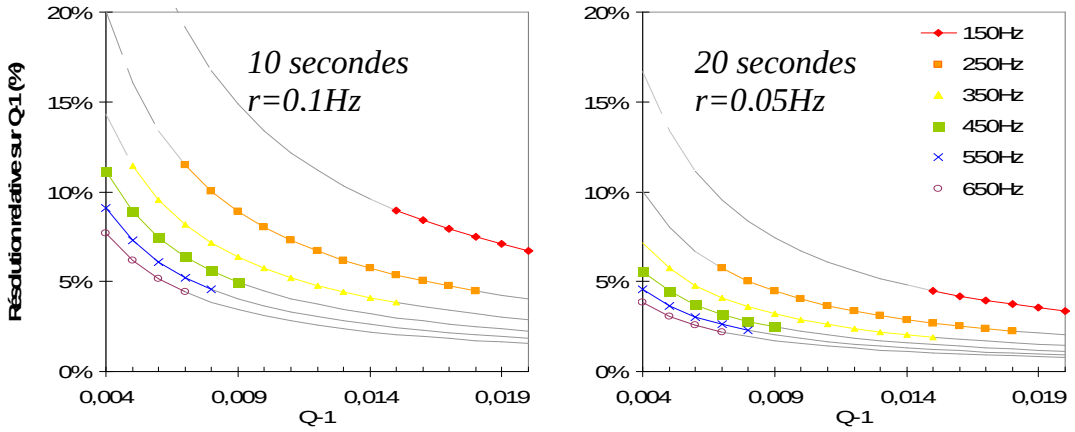


Figure 43 : Résolution relative sur la détermination du facteur de qualité Q^{-1} en fonction : de la fréquence de résonance *fr* et du facteur de qualité de l'éprouvette, et de la durée d'acquisition (Fréquence d'échantillonnage de 50kHz). Les portions de courbes en tirets gris correspondent à des couples de valeurs Q^{-1}/fr irréalistes pour le premier mode de flexion avec nos dimensions d'éprouvettes et pour l'échantillonnage de bois étudié en direction axiale.

En fin d'acquisition, la fréquence de résonance et la largeur de bande relevées et le facteur de qualité calculé sont sauvegardés selon le chemin spécifié, avec les commentaires éventuels sur l'éprouvette et/ou le signal, et l'on peut alors lancer l'acquisition du facteur d'amortissement temporel.

*Mesure du décrément logarithmique

a. L'éprouvette est excitée à la fréquence de résonance précédemment repérée.

b. Après quelques secondes de stabilisation de la vibration, l'excitation est stoppée en déclenchant l'acquisition de la décroissance libre (400ms par défaut, mais une commande sur ce temps a été ajoutée pour s'adapter au mieux aux différents bois) qui s'affiche alors sur l'écran (Figure 44 en bas).

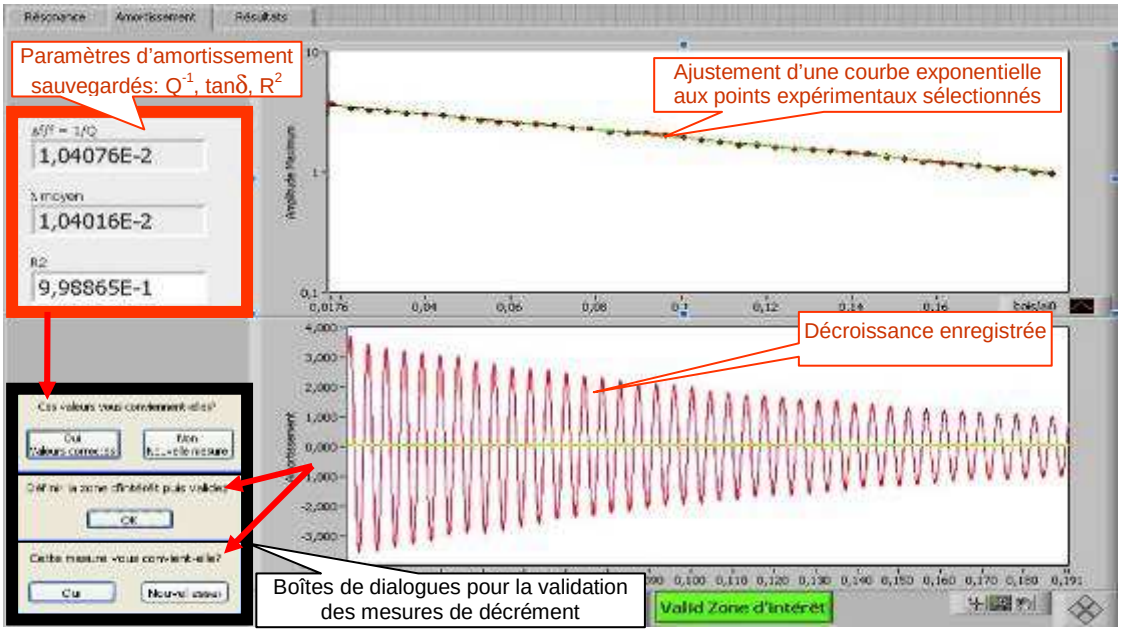


Figure 44 : Acquisition et traitement des décroissances, calcul du décrément logarithmique, et comparaison avec le facteur de qualité.

c. Affichage de la décroissance : si elle n'est pas régulière, on peut relancer l'émission/acquisition au point a. Si elle est régulière, on sélectionne la plus grande plage possible où la décroissance est régulière, en évitant les dernières périodes de faible amplitude.

d. Une courbe exponentielle est ajustée aux points expérimentaux, le décrément logarithmique et $tan\delta$ sont calculés sur cette courbe. La régularité des points expérimentaux est exprimée par le coefficient de détermination R^2 et sauvegardée.

e. Si les valeurs semblent correctes (fort R^2, cohérence avec Q^{-1}, qui est théoriquement plus stable mais pour lequel la résolution expérimentale est plus limitée), les données sont sauvegardées dans un fichier texte à la suite des précédents essais, et on revient à la fenêtre de balayage en fréquence pour un nouvel essai.

e.bis. Si les valeurs ne sont pas correctes, on peut relancer une acquisition de décroissance sans ré-effectuer les étapes de balayage.

➢ Mesures effectuées avec ce dispositif

Les données sauvegardées pour chaque essai comprennent : 1ère fréquence de résonance, largeur de bande, Q^{-1}, $tan\delta$ et R^2 associé (3 répétitions). Un échantillon de ≈500 éprouvettes a été mesuré avec ce montage. Il est possible de mesurer entre 6 et 18 éprouvettes (¯m≈10 en comptant les temps « annexes » de mise au point) par heure avec le nombre de répétitions signalé. Le temps de manipulation est maintenant généralement supérieur au temps de mesure proprement dit : une acquisition complète dure moins d'une minute.

d Précision et incertitudes

- Fréquences

Pour la fréquence de résonance, on estime l'erreur absolue à 0,1Hz pour les trois dispositifs, soit une erreur relative de 0,06 à 0,02% sur notre échantillon. L'erreur sur les fréquences f_1 et f_2 à demie puissance peut être évaluée entre ce même ordre de grandeur – pour l'acquisition automatique ; et supérieure d'un facteur 1,5-2 dans le cas de la lecture sur l'écran de l'oscilloscope (voir remarques sur les amplitudes ci-dessous).

- Amplitudes

La principale source physique d'incertitude est la résolution des capteurs de déplacements utilisés : 0,005mm pour le capteur à courants de Foucault, 0,01mm pour le capteur à triangulation laser. La présence de la cible en aluminium plane dans le 1er cas, le très faible diamètre du faisceau incident dans le 2ème cas, rendent quasi négligeables l'effet d'irrégularités de surface telles que des très gros vaisseaux par exemple. On considère que la fréquence d'échantillonnage est suffisante pour que la principale source physique d'erreur soit effectivement la résolution du capteur.

Par contre, la lecture « à vue » qui a été effectuée sur l'écran de l'oscilloscope implique une erreur quasi systématique sur la détermination des amplitudes (et par suite fréquences) à demi-puissance, qui est estimée à -1%. L'influence sur le facteur de qualité calculé est décrite dans les incertitudes sur ce paramètre.

- Module d'Young longitudinal

L'incertitude relative expérimentale sur les modules spécifiques calculés à partir de la 1ère fréquence de résonance est due aux erreurs relatives de mesure de longueur, épaisseur (prédominante) et de fréquences. Elle est évaluée par calcul à ≈7%.

Le module d'Young est déduit du module spécifique et de la densité. On arrive à une incertitude relative théorique de 10%.

En pratique, les résultats obtenus par cette méthode seront comparés avec ceux obtenus en vibrations libre-libre de poutres flottantes, pour laquelle l'erreur théorique est plus faible (la contribution notamment de l'incertitude relative sur l'épaisseur est alors quasi-négligeable).

- Paramètres d'amortissement

*Facteur de qualité Q^{-1}

Le calcul d'incertitude relative sur Q^{-1} donne :

$$\frac{\Delta Q^{-1}}{Q^{-1}} = 2\left|\frac{\Delta f_{1\&2}}{f_2 - f_1}\right| + \left|\frac{\Delta f_o}{f_o}\right|$$

où : f_1 et f_2 : fréquences à demi-puissance (-3dB), f_o : fréquence de résonance.

Comme on l'a déjà signalé, cette incertitude est dépendante à la fois de la résolution fréquentielle expérimentale, de la largeur de pic à demi-puissance et de la fréquence centrale, et donc des propriétés du matériau, à géométrie d'éprouvette fixée.

N.B. : Il est important de noter que cette incertitude correspond plus à une résolution/pas de mesure, qu'à une erreur/variabilité expérimentale. Si les variations expérimentales (causes physiques diverses) sont inférieures à cette résolution, le facteur de qualité apparaîtra constant entre différentes répétitions, mais cela ne signifiera pas forcément qu'il est plus répétable que la mesure par décrément logarithmique.

i) Dans le cas de l'acquisition automatique (dispositif 2 au LMGC), la résolution fréquentielle *r* est déterminée par :

$$r = \frac{Fe}{Np} = \frac{1}{Dacq°}$$

où *Fe* est la fréquence d'échantillonnage (50kHz), et *Dacq°* la durée d'acquisition (variable entre ≈10-20s pour les essais présentés).

Pour les mesures effectuées avec ce dispositif, on estime que les incertitudes sur f_o, f_1 et f_2 sont équivalentes entre elles et égales à la résolution permise par la durée d'acquisition.

L'incertitude relative sur Q^{-1} pourra alors être repérée sur la Figure 43, en fonction des paramètres de réponse de l'éprouvette. Sur l'ensemble de nos essais, on admet une incertitude maximum de 10%.

ii) Dans le cas de l'acquisition « manuelle », le balayage à partir du générateur de fonction et la lecture à vue sur l'oscilloscope permet une résolution fréquentielle de l'ordre de 0,1Hz. L'incertitude relative théorique serait donc du même ordre que pour une acquisition automatique sur 10secondes (Figure 43).

En pratique, comme on l'a déjà signalé, la lecture des amplitudes implique une erreur quasi systématique sur f_1 et f_2. Effectivement, cette lecture a été effectuée en réglant la graduation de l'oscilloscope de façon à ce que celle-ci soit au maximum à la résonance, et la lecture des amplitudes lors du balayage s'est faite sur les graduations de l'écran. Aussi, $(A_0/\sqrt{2})$ a généralement été « arrondi » à la graduation la plus proche (par exemple, pour A_{max}=4, relevé de f_1 et f_2 pour une amplitude de 2,8 au lieu de 2,8284).

La Figure 45 représente un relevé manuel des fréquences effectué pour chaque graduation matérielle de l'écran. L'écart de largeur de bande entre le relevé à A_1&A_2=2,8 et celle recalculée pour $(A_0/\sqrt{2})$ réel, sur une courbe ajustée à ces points expérimentaux, est de $\Delta(f_2-f_1)$=0,05Hz, soit inférieure à la résolution du relevé de fréquences. Sur cet exemple, la valeur de Q^{-1} relevée est supérieure de 1,2% à sa valeur pour un relevé strictement à demi puissance. Cet écart sera *a priori* supérieur pour des bois plus amortissants. D'autre part, en conditions réelles de mesures, où seuls sont relevés les 3 couples de valeurs $A/f_{(0,\,1,\,2)}$, l'écart avec la valeur réelle risque d'être plus important que ce sur test.

Par ailleurs, on peut remarquer que sur cet exemple, le pic relevé est asymétrique, bien que l'éprouvette soit de droit fil et homogène. L'effet de l'asymétrie par rapport à la fréquence centrale n'a dans ce cas une répercussion que de <0,05% sur le calcul de Q^{-1}.

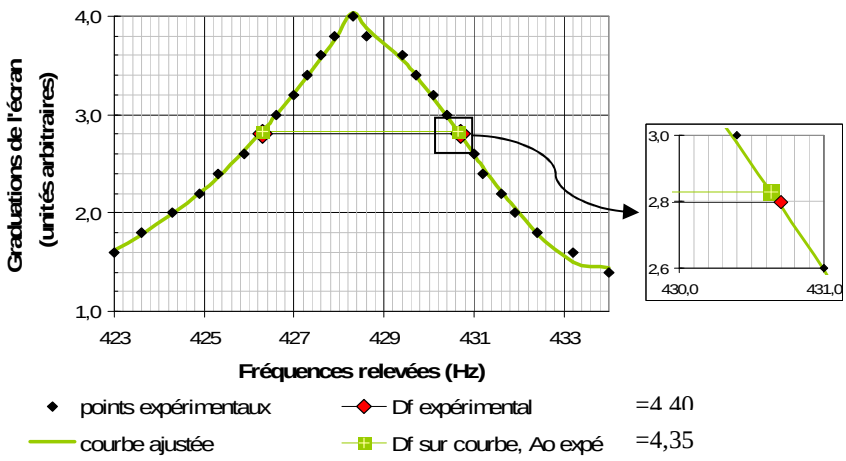


Figure 45 : Relevé visuel du pic de résonance sur une éprouvette de Charme (*Carpinus betulus*, Q^{-1}≈0,010), pour chaque graduation d'amplitude matérialisée à l'écran de l'oscilloscope, et erreur générée sur la largeur de bande Δf mesurée

*$tan\delta$ obtenu par la méthode du décrément logarithmique

La précision théorique sur une période correspond au ratio entre résolution du capteur et amplitude de déplacement.

Si la mesure était faite entre deux périodes seulement, d'amplitudes A_0 et A_n, la précision relative sur la détermination de tanδ serait donc donnée par :

$$\frac{\Delta \tan\delta}{\tan\delta} \approx \left|\frac{\Delta A_0}{A_0}\right| + \left|\frac{\Delta An}{An}\right| = \left|\frac{\Delta A}{A_0}\right| + \left|\frac{\Delta A}{A_0} e^{\pi n \tan\delta}\right|$$

Avec ΔA : 2*résolution du capteur.

Ici encore, on peut représenter l'incertitude relative de mesure en fonction des conditions expérimentales, et des paramètres d'amortissement du matériau (Figure 46). Le choix de l'étendue entre les deux périodes à prendre en compte doit assurer un compromis entre précision sur la 2ème période, et bonne représentation de l'ensemble de la décroissance.

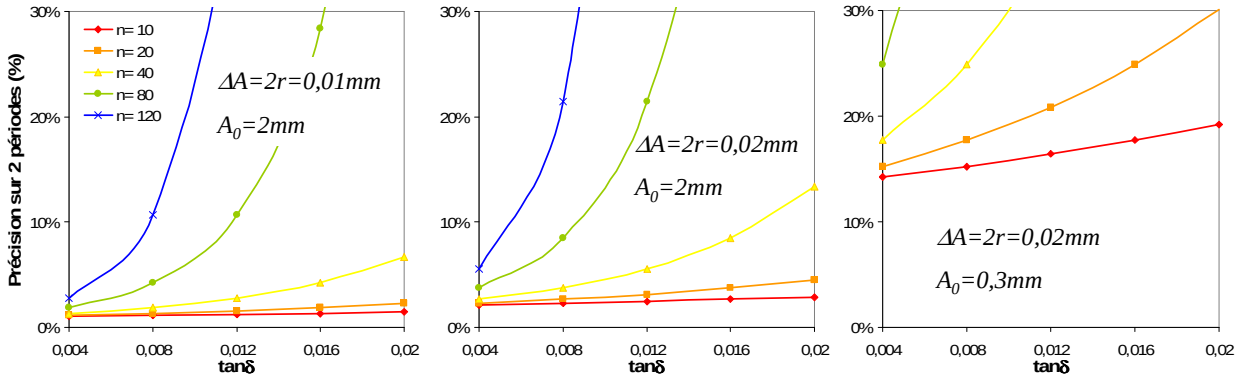


Figure 46 : Incertitude relative calculée pour un décrément logarithmique « hypothétique » mesuré sur deux périodes seulement, en fonction : de l'amortissement du matériau étudié, de l'ordre *n* de la 2ème période prise en compte, de la résolution *r* du capteur, et de l'amplitude de déplacement initiale A_0.

Cette précision de mesure « hypothétique » sur deux points seulement est évidemment meilleure avec le capteur à courants de Foucault utilisé au Japon, permettant ainsi d'observer une étendue d'au moins 40 périodes avec ≤5% d'erreur sur une large gamme de matériaux. L'erreur avec le capteur laser employé reste toutefois très acceptable : dans la gamme de 3 à 8% pour une étendue de 40 périodes (et jusqu'à 120 pour les bois les moins amortissants). Le

capteur laser utilisé est de type « industriel », mais on pourrait améliorer la précision tout en gardant les avantages de cette technologie de capteur en employant un modèle de résolution supérieure.

Par contre, il est très important d'assurer une amplitude initiale de déplacement suffisante : pour les tout premiers tests réalisés sans amplificateur, l'étendue observable avec moins de 20% d'erreur est théoriquement limitée à 10 à 40 périodes.

Cependant, le décrément logarithmique est calculé par un ajustement à un nombre plus où moins important de périodes mesurées. L'erreur sur la détermination de $tan\delta$ sera donc plutôt exprimée par le coefficient de détermination r^2 de la régression sur les valeurs expérimentales de temps et d'amplitude. Pour des matériaux très amortissants, l'erreur relative calculée ci-dessus augmentera très vite, ce qui limite à la fois la précision de mesure, le nombre de périodes exploitables, et donc la qualité de la régression[18]. On peut remarquer que pour ces types de bois la résolution sur le « facteur de qualité » par largeur de pic à demi puissance augmente, et on peut envisager d'adopter, selon le matériau testé, le paramètre le plus fiable.

Dans le cas de notre échantillonnage de bois en direction longitudinale, le coefficient de détermination r^2 correspondant aux essais présentés est au minimum de -0,9425, en moyenne de -0,9972, et la médiane sur l'ensemble de nos essais est à -0,9987 (la proportion de valeurs faibles de r^2 est très réduite, car les essais correspondants n'ont soit pas été sauvegardés, soit pas été pris en compte dans la synthèse des résultats). La distribution de ce coefficient de détermination, ainsi que des autres paramètres des essais influant sur la précision pour les paramètres d'amortissement, est présentée sur la Figure 47.

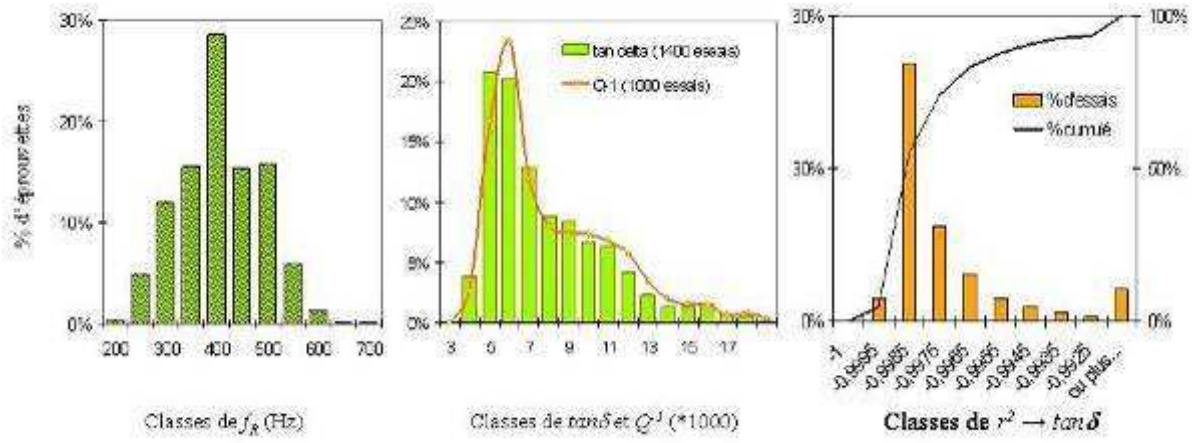


Figure 47 : Distribution des paramètres de réponse des éprouvettes ayant un effet sur la précision des mesures des paramètres d'amortissement, pour toutes les éprouvettes de notre échantillon. f_R ; fréquence de résonance ; $r^2 \rightarrow tan\delta$: coefficient de détermination relevé pour les calculs de $tan\delta$ par décrément logarithmique.

En comparant ces distributions avec les incertitudes théoriques déjà présentées, on peut raisonnablement estimer l'erreur sur les paramètres d'amortissement de l'ensemble de nos essais comme ≤10%. Chaque essai correspondant à 3 répétitions en général, on pourra comparer l'étendue de variation observée à cette estimation.

[18] On pourrait cependant, dans ce cas, augmenter la précision en exploitant le maximum de l'information du signal acquis, par une représentation et un traitement dans le plan de phase au lieu d'une représentation temporelle ne prenant en compte que les valeurs des pics d'amplitude pour chaque période [Cai *et al*, 1997].

e Répétabilité

***De la mesure vibratoire elle-même**

➢ Vérification lors la mise en place de la méthode au LMGC

Lors de la duplication de la méthode au LMGC, une série d'essais a été réalisée sur 55 éprouvettes ayant déjà été mesurées au Japon. Il faut remarquer que les conditions « nominales » de stabilisation étaient identiques, mais qu'en pratique les éprouvettes avaient été conditionnées bien plus longtemps lors de cette deuxième série d'essais, et leur teneur en eau était légèrement plus grande que lors des premières mesures (variation de +0,4 à+0,6% relatif en moyenne). Pour chaque éprouvette, 6 répétitions ont été effectuées : 3 en prenant systématiquement 45 périodes pour le calcul du décrément logarithmique, 3 en ajustant le nombre de périodes au type de bois et/ou à la régularité de la décroissance observée. Pour la fréquence de résonance, une seule mesure a été effectuée. Les résultats sont synthétisés sur la Figure 48.

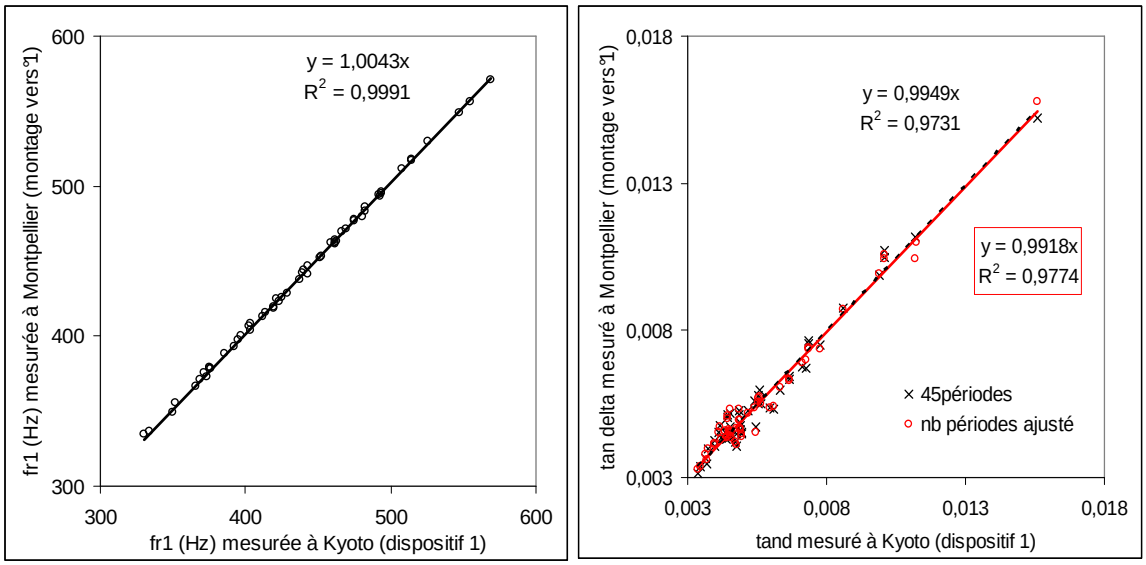


Figure 48 : comparaison des fréquences de résonance (à gauche, pas de répétition) et des facteurs d'amortissement (à droite, 6 répétition) au premier mode, mesurés avec le dispositif initial puis avec la première version mise en place au LMGC.

Pour ce qui concerne les fréquences de résonance, la corrélation entre les mesures effectuées sur les deux dispositifs est très bonne (r^2>0,99), mais les fréquences mesurées à Montpellier apparaissent légèrement supérieures (de ≈0,44%, IC à 95% de la moyenne des différences : de +1,47 à + 2,36Hz). Pour les $tan\delta$, la différence entre les deux dispositifs/conditions n'est pas significative ; mais s'il existait une différence, elle serait probablement masquée par la résolution sur ce paramètre. Il faut remarquer que ces tests ont été effectués lors du tout début de la mise en place de la méthode au LMGC, avant l'insertion d'un amplificateur dans le montage. La précision / répétabilité des mesures est donc moindre que pour les premières mesures ; elle est cependant un peu améliorée en sélectionnant un nombre de périodes approprié à la réponse de l'éprouvette (Figure 49).

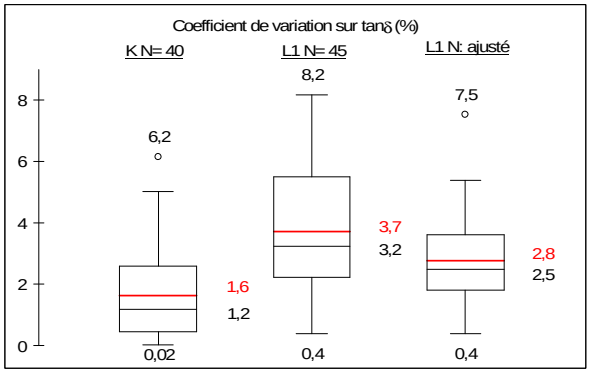


Figure 49 : Comparaison des coefficient de variation de $tan\delta$ entre répétitions : lors de la mise en place de la méthode au LMGC (L1), par rapport au dispositif initial. N : nombre de périodes prises en compte dans la détermination du décrément logarithmique.

➢ Répétabilité dans les conditions d'essais

Le Tableau 5 présente le nombre de répétitions sur les paramètres mesurés, et le nombre d'éprouvettes étudiées, pour les trois dispositifs.

Tableau 5 : Récapitulatif des mesures effectuées avec les différents dispositifs

Dispositif	Nb éprouvettes	Nb répétitions		
		f_R	Q^{-1}	$tan\delta$
K (Kyoto)	277	1	0	2
L1 (LMGC manuel)	639	1	1	3 (6)
L2 (LMGC automatique)	491	3	3	3

En ce qui concerne les fréquences de résonance et facteurs de qualité mesurés « manuellement » (pas de répétitions en conditions d'essais), un test de répétabilité a été effectué sur 4 éprouvettes de propriétés bien contrastées, et 5 répétitions pour chaque. L'étendue de variation[19] entre 5 répétitions de f_R est de 0,3Hz en moyenne (1,1Hz max), soit un coefficient de variation[20] de 0,04% en moyenne, 0,08% au maximum. Pour le facteur de qualité, l'étendue moyenne est de 7.10^{-4} (max $1,4.10^{-3}$), soit des coefficients de variations de 3,6% en moyenne et 5,6% maximum.

Les coefficients de variations entre répétitions effectivement observés lors des campagnes d'essais sont présentés sur la Figure 50. A l'exception d'une dizaine d'individus extrêmes (correspondant à des essais sans amplificateur), le coefficient de variation est <10% pour les paramètres d'amortissement. Leurs valeurs moyennes par dispositif semblent cohérentes avec les précisions attendues. Les variations sur les fréquences acquises de façon automatique restent de très faible amplitude : <0,05% en moyenne, à l'exception d'une faible proportion d'individus.

[19] C'est-à-dire l'écart entre la valeur maximale, et minimale, relevée.
[20] Ecart type rapporté à la moyenne

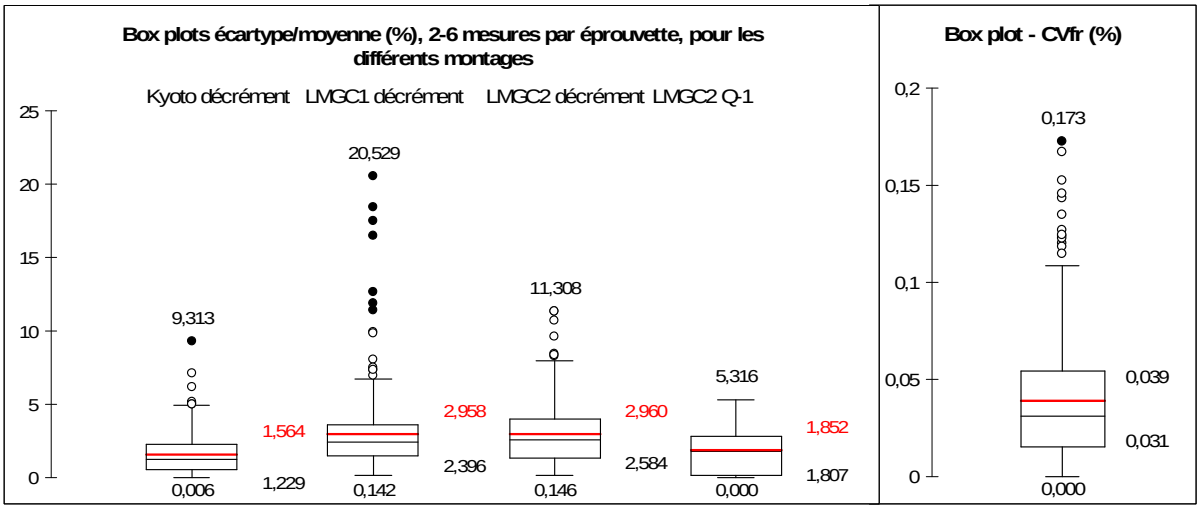


Figure 50 : Distribution des coefficients de variations (%) entre répétitions pour les paramètres mesurés, selon les différents dispositifs expérimentaux

En terme d'étendue de variation, l'écart relatif maximum (valeur max - valeur min) entre trois répétitions est ≤10% pour 90% des mesures de $tan\delta$ par décrément logarithmique effectuées au LMGC (2 dispositifs confondus).

Enfin, les valeurs de Q^{-1} mesuré par largeur de bande apparaissent de façon systématique légèrement supérieures à celles de $tan\delta$ mesuré par décrément logarithmique (IC à 95% de la moyenne des différences : $1{,}66.10^{-4}$ à $2{,}25.10^{-4}$, soit +2,6% en moyenne). Il est vraisemblable que cela soit en bonne partie due aux incertitudes quasi-systématiques qui ont été signalées pour la lecture à vue sur l'écran de l'oscilloscope. Effectivement, ce décalage est beaucoup plus important pour le premier montage (Figure 51). Mais il existe aussi pour l'acquisition automatique (+1,17% en moyenne). Il est délicat de savoir si cela est dû aux paramètres de traitement du signal/lissage, ou à une réalité physique.

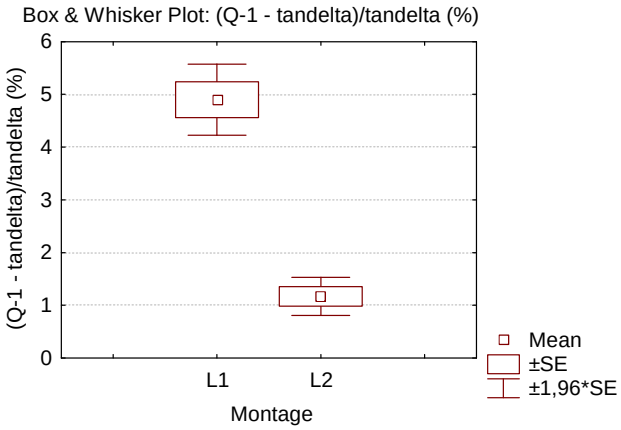


Figure 51 : Différences observées entre les mesures par largeur de bande, et par décrément logarithmique, pour les acquisitions manuelles (L1), et automatiques (L2).

Des mesures en fonction des étapes du protocole

➢ Incertitudes sur la teneur en eau et l'état « d'équilibre »

Les incertitudes sur l'état de stabilisation hygroscopique des éprouvettes dans les conditions de nos essais ont déjà été introduites (II.b.1.1). On peut comparer (Figure 52) les variations de teneur en eau que nous avons observées -lors des transports entre lieux d'expérimentation et lors des temps de mesures en conditions non strictement régulées- avec des données de la littérature [Obataya et al 1998] sur l'évolution des propriétés vibratoires avec la teneur en eau stabilisée. Il apparaît de cette comparaison que les variations susceptibles d'être provoquées par les incertitudes du plan expérimental seraient de l'ordre de +0,2% pour le module d'élasticité et de -0,9% pour le facteur d'amortissement. Ces ordres de grandeurs sont inférieurs aux incertitudes de la méthode elle-même. Nous exploiterons donc les valeurs obtenues sans aucun « correctif ».

Cependant, le graphique ci-dessus correspond aux variations observées pour des teneurs en eau à l'équilibre. Or les variations hors équilibre doivent avoir un effet plus

important particulièrement sur le facteur d'amortissement [Sasaki et al 1987 ; Gril 1987 ; Hunt & Balsan 1996].

Bien que les temps (<30 minutes), les variations de teneur en eau (<3% relatifs soit <0,3% absolu), et les différences absolues de conditions hygrothermiques correspondants à un essai/3répétitions ne nous paraissaient pas suffisants pour provoquer d'importantes modifications de comportement, nous avons « par acquis de conscience » observé l'évolution des valeurs mesurées entre la première, 2è, et 3è répétitions (Versions initiale et finale du dispositif pour le décrément logarithmique →1100 essais; version finale pour la fréquence de résonance, la largeur de bande et Q^{-1} →500 essais). Par ailleurs, il nous avait semblé remarquer au cours de certaines campagnes d'essai, une augmentation de la fréquence de résonance entre les 3 répétitions (dispositif « final »). En résumé, il existe une légère dérive des fréquences (moyenne de la variation entre 1è et dernière répétition : +0,07%, significatif au seuil de 0,01 bien qu'on soit très proche de l'incertitude relative). Il est délicat de savoir si cela correspond à une réalité physique, ou à un artefact dû à l'appareillage et/ou au traitement du signal ; en tout cas une telle variation n'aura pas de répercussion notable sur les mesures effectuées. Par contre, aucune évolution même faiblement significative n'est repérable pour les paramètres d'amortissement (largeur de bande ou décrément) ; cependant si il y avait effectivement une évolution de ces paramètres, elle serait masquée par la résolution expérimentale, dans cette gamme de variations.

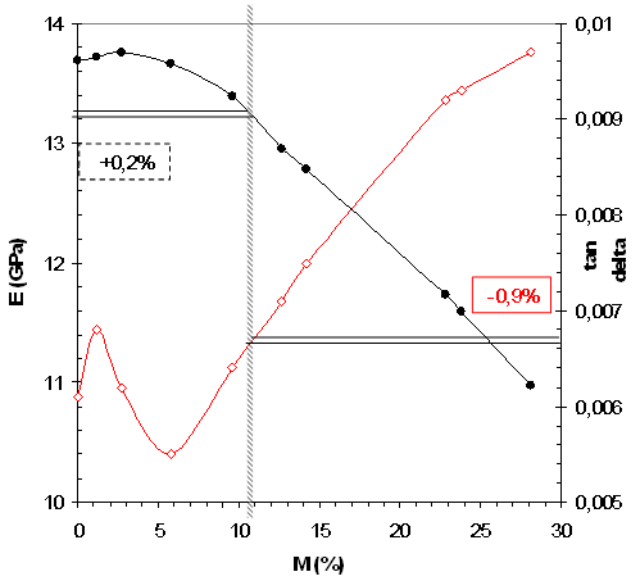


Figure 52 : Comparaison des variations de teneur en eau subies par nos éprouvettes, avec les variations prévisibles de propriétés vibratoires pour l'état stabilisé à 20°C et différentes HR(%) sur de l'épicéa [Obataya et al 1998]. Zone en grisé : variations maximales de teneur en eau à la fin des mesures vibratoires. Traits horizontaux : gammes de variations prévisibles des propriétés vibratoires.

Nous avons « profité » d'une période où les conditions dans la salle d'essais étaient extrêmes, à la fois en elles-mêmes (28°C et 50%HR) et par leur stabilité (±1°C & ±2%HR), pour observer les évolutions « hors équilibre » à un peu plus long terme sur un petit échantillon (18 éprouvettes du même bois : Padouk *Pterocarpus soyauxii*, provenant d'une même pièce de bois initiale). 6 éprouvettes avaient été mesurées 12h auparavant, et douze l'avaient été 8jours plus tôt, et étaient restées dans cette salle d'essais depuis leur première mesure.

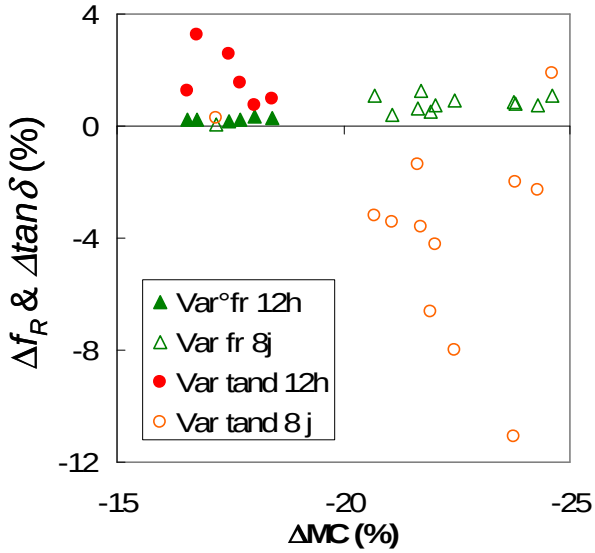


Figure 53 : Evolution des fréquences de résonance et facteurs d'amortissement mesurés en fonction de la variation de teneur en eau (hors équilibre) entre 20°C & 65%HR et 28°C & 50%HR (au bout de 12 heures puis 8 jours)

La variation relative de teneur en eau au bout de 12h était de -17,5±0,7%. Au bout

de 8 jours, de -22,1±2,0%. Bien que la teneur en eau initiale pour ce bois soit plus faible que la moyenne (≈8% absolu « non corrigé », cf §II.b.1.2.b), cette dernière variation relative approche la variation relative prévisible entre 20°C&65%HR et 28°C&50%HR d'après les courbes standard d'équilibre hygroscopique des bois. Les variations observées sur la 1è fréquence de résonance et sur le facteur d'amortissement sont représentées sur la Figure 53.

La fréquence de résonance augmente avec la diminution de teneur en eau, quel que soit le temps écoulé depuis le changement de conditions hygrothermiques (+0,25±0,06% après 12h ; +0,76±0,33% après 8j). Par contre, les variations du facteur d'amortissement sont contrastées : 12 h après le changement de conditions, le facteur d'amortissement a légèrement augmenté (+1,73±0,99%) alors que la teneur en eau diminuait. Au bout de 8 jours, au contraire, les facteurs d'amortissement diminuent (-3,64±3,56%). Malgré les relativement faibles amplitudes, ces tendances de variations sont significatives à un seuil α de 0,01. La fréquence de résonance (en lien avec le module d'élasticité) serait plus sensible à la variation de teneur en eau qu'à l'état de stabilisation, tandis que le facteur d'amortissement serait d'abord augmenté par un déséquilibre transitoire, puis diminuerait en raison de la plus faible humidité après un temps de stabilisation. Si ces observations semblent cohérentes avec la littérature [Sasaki et al 1988], il n'est toutefois guère possible d'en tirer plus de conclusions vu le faible échantillon considéré.

II.b.2.4. **Mesure directe du déphasage par onde quasi stationnaire de compression**

Nous avons brièvement testé une méthode basée sur la mesure directe du déphasage entre contrainte et déformation, aux fréquences audibles, qui a été développée par Marc François (LMT, ENS Cachan). Ces essais étaient dans le cadre d'un projet de recherche commun associant le laboratoire de Recherche et de Restauration du Musée de la Musique de la Cîté de la Musique, à Paris ; l'ENS Cachan ; le LAM (Paris VI) ; et le LMGC. Les essais que nous avons effectués correspondaient à une première phase de tests pour l'application aux bois (rapport d'étape [Brémaud & Gril 2004]).

II.b.3. **Comparaison des différentes méthodes vibratoires**

Les valeurs expérimentales de module spécifique obtenues en vibrations forcées sans contact et en vibrations libres sont comparées sur la Figure 54, pour les 125 carrelets initiaux correspondants aux deux mesures et, à chaque fois les lamelles en ayant été re-débitées.

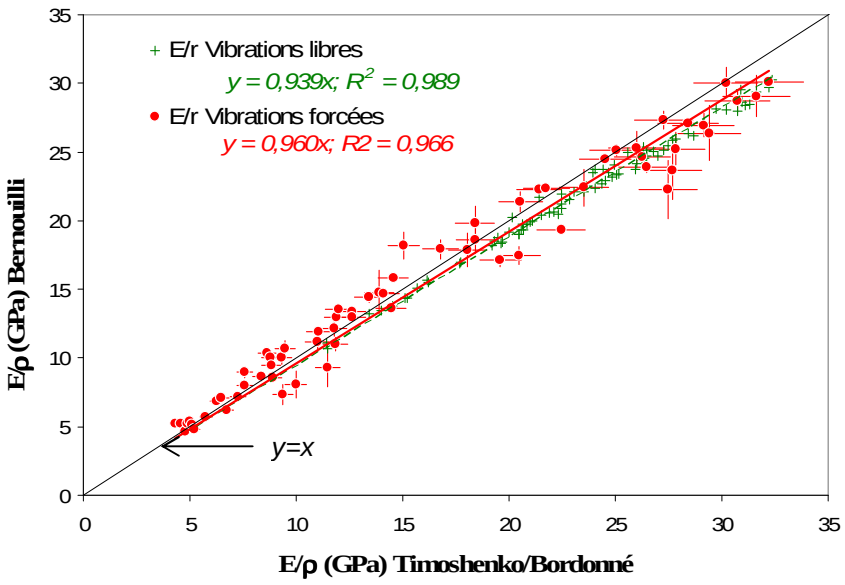


Figure 54 : Comparaison des mesures de module spécifiques obtenues : par vibrations libres sur barreaux normalisés ; par vibrations forcées sur des éprouvettes de taille réduite débitées du barreau initial. En X : calcul suivant le modèle de Timoshenko, pour les éprouvettes normalisées ; en Y : calcul suivant le modèle de Bernouilli, pour les éprouvettes normalisées, et pour les éprouvettes de vibrations forcées. Barres d'erreur X : précision de la mesure (≤5%), barre d'erreur Y : variations observées en vibrations forcées entre 3-5 éprouvettes redébitées de l'éprouvette initiale.

Sur la figure ci-dessus on a aussi représenté en ordonnée, pour comparaison, les valeurs obtenues en vibrations libres sur carrelets selon le modèle de Bernouilli. La dispersion des mesures obtenues selon ce modèle est un peu plus élevée en vibrations forcées (effet des variations locales entre re-débits petits en épaisseur ?). En revanche la relation globale est plus proche de l'unité (ce à quoi on s'attendait en théorie pour de très grands élancements). Par contre, pour les valeurs les plus élevées de E'/ρ, les mesures par vibrations libres sur lamelles correspondent moins bien à la « référence » Timoshenko/Bordonné sur carrelets. Ce dernier point n'est pas évident à interpréter de façon systématique car les essais correspondants ont été réalisés avec la première version du dispositif, sans amplificateur et pour lesquels l'influence de la raideur des éprouvettes était encore marquée. Il faudrait envisager d'autres séries d'essais comparatives avec la version finale du banc de mesure, sur bois à fil bien homogène.

En ce qui concerne les mesures de coefficient d'amortissement, on prendra plutôt comme « référence » les valeurs obtenues par vibrations forcées sans contact, le principe de cette méthode étant éprouvé dans ce domaine. Les valeurs expérimentales obtenues au premier mode en vibrations libres de carrelets percutés leur sont comparées sur la Figure 55.

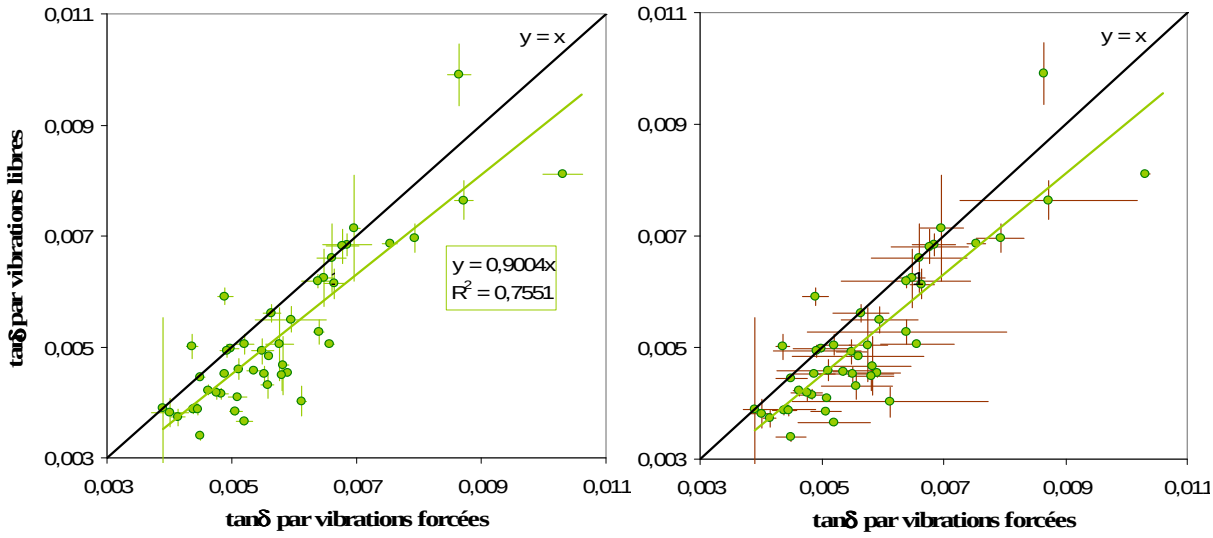


Figure 55 : Comparaison des mesures de *tanδ* obtenues : par vibrations libres sur barreaux normalisés ; par vibrations forcées sur des éprouvettes de taille réduite débitées du barreau initial. Barres d'erreur Y : Coefficient de variation entre 3-6 répétitions par vibrations libres. Barres d'erreur X : (à gauche) CV moyen pour 3-6 répétitions et 3-5 éprouvettes (≈répétabilité); (à droite) CV observé entre les différentes éprouvettes redébitées de l'éprouvette initiale (≈variations locales de propriétés).

La dispersion est bien plus élevée que ce qui était observé pour les modules spécifiques. La répétabilité des mesures est généralement moindre en vibrations libres. Les valeurs apparaissent généralement plus faibles qu'en vibrations forcées. En revanche, les vibrations forcées prennent en compte des variations locales plus marquées. Les valeurs généralement plus faibles par vibrations libres sont difficiles à interpréter du fait notamment que la plage de valeurs sur les 50 carrelets initiaux communs au deux mesures est concentrée sur des valeurs moyennes à faibles. Il faudrait étendre cette gamme si l'on souhaitait approfondir cet aspect. Par ailleurs, peut être que la percussion avec une barre métallique a un effet aussi.

Pour finir, on a comparé les mesures de coefficient d'amortissement en vibrations de flexion (forcées) aux données préliminaires de déphasage en onde quasi-stationnaire de compression, sur du matériel jumelé (Figure 56).

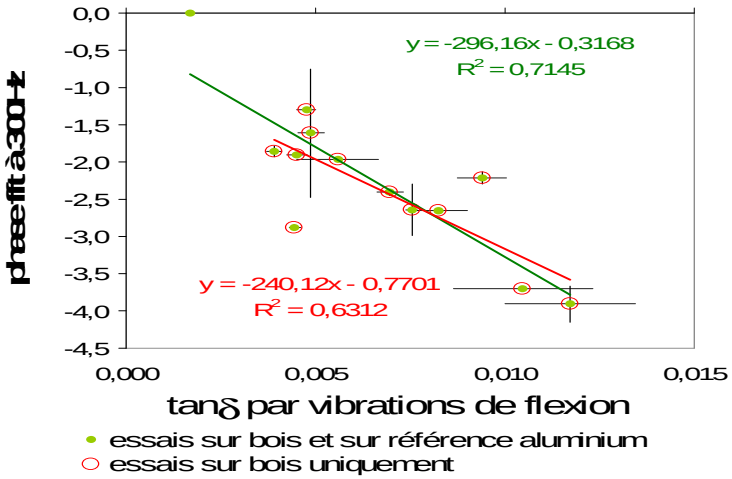


Figure 56 : Relation entre déphasage (à 300Hz), et facteur d'amortissement mesuré par vibrations de poutre libre-libre, pour l'échantillonnage de bois présenté au §II (en rouge), et en incluant une éprouvette « de référence » en aluminium (en vert, données de facteur d'amortissement : CES Selector). Barres d'erreurs : X variations entre 4 éprouvettes jumelées en T; Y : CV entre répétitions sur une éprouvette jumelée en L.

Ces données sont à titre purement indicatif puisque seulement 11 spécimens sont considérés d'une part, que la méthode testée en était à ses débuts d'autre part. Cependant, une corrélation apparaît bien. Il pourrait être intéressant d'approfondir ces comparaisons avec cette méthode qui a évolué depuis, sur des types de bois plus nombreux et contrastés.

II.c. En résumé

Notre travail expérimental a porté sur ≈60 espèces, représentées par ≈70 types de bois, dont ≈70% de bois tropicaux. Les critères de choix de ces espèces se répartissent comme suit : i) critères 'mécaniques' (densité, module spécifique) : 11 espèces ; ii) critères 'physico-chimiques' (taux d'extraits, Psf, Retrait rapporté à la densité) : 18 espèces dont 8 à fort taux d'extraits connus et 4 références ; iii) bois fournis par des facteurs d'instruments (usage éprouvé ou à tester) : 31 espèces d'effectifs différents ; iv) matériel ciblé sur l'étude de déterminants : 3 résineux et 2 feuillus tropicaux.

Différentes méthodes vibratoires ont été testées et on a retenu : vibrations de flexion, forcées sans contact sur poutres libre-libre très élancées pour l'ensemble des essais ; vibrations libres de poutres flottantes pour des « références » de module spécifique sur échantillons plus « massifs ».

A partir d'une méthode somme toute classique, les impératifs que nous visions en terme de reproductibilité, de précision et surtout d'utilisation en routine (i. e. mesure fiable ; sauvegarde automatique des résultats sous forme aisément exploitable ; temps d'essai et de récupération des données aussi réduit que possible) ont été obtenus. Ce ban de mesures vibratoires mis en place, fiable et rapide, est notamment attribuable au travail d'interfaçage de Y. ElKaïm.

Au final, cette étape a permis de développer une méthode de mesures vibratoires automatisée pour laquelle l'erreur de mesure est ≤5% pour les paramètres d'amortissement, et le temps d'essai/acquisition et sauvegarde des données sous forme directement exploitable est de l'ordre de la minute (ce qui comprend trois répétitions).

Le protocole général a été établi en fonction des éprouvettes de petites dimensions destinées à cette méthode et les données récoltées comprennent :

-densité « sec à l'air » et « quasi-anhydre »,

-module d'élasticité et module spécifique,

-coefficient d'amortissement (par décrément logarithmique et par largeur de pic),

-teneur en eau à l'équilibre, gonflements partiels (indicatif),

-paramètres colorimétriques CIELab et CIELCh.

Ceci concerne ≈1200 séries d'essais sur bois natifs, plus ≈200 sur bois « modifiés » (extraits).

PARTIE III :
VARIABILITE DES PROPRIETES VIBRATOIRES ENTRE DIFFERENTES ESPECES ET TYPES DE BOIS

III. PARTIE III: VARIABILITE DES PROPRIETES VIBRATOIRES ENTRE DIFFERENTES ESPECES ET TYPES DE BOIS

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent l'ensemble des échantillons qui ont été étudiés lors de ce travail : bois sélectionnés uniquement sur la base de propriétés élastiques contrastées ; bois présélectionnés sur des critères combinant indicateurs mécaniques, physiques et chimiques, pour un essai de repérage d'essences faiblement amortissantes ; bois fournis par des facteurs, destinés à différentes parties d'instruments et de différentes qualités d'usage le cas échéant ; échantillons destinés à l'étude plus spécifique de déterminants microstructuraux et chimiques des propriétés vibratoires considérées.

Les principales propriétés observées sont le module d'élasticité spécifique, et le coefficient d'amortissement, en direction axiale, pour une gamme de fréquence de ≈200-600Hz, ainsi que la densité comme paramètre additionnel. Elles pourront être mises en relation avec d'autres propriétés physiques, telles que teneur en eau à l'équilibre en conditions données, retraits/gonflements partiels, et paramètres colorimétriques.

L'analyse s'articule en deux aspects : descripteurs du comportement, par l'étude des relations entre propriétés à l'échelle locale (i. e. éprouvette par éprouvette) ; puis comparaison et classement des essences et types de bois sur la base des valeurs moyennes. En ce qui concerne l'étude de descripteurs au niveau de l'éprouvette, l'analyse est effectuée d'abord de façon globale, puis en isolant de grands groupes de bois clairement identifiables, mais en ne prenant guère en compte les différences d'essences. Pour le deuxième point, les relations entre propriétés pourront être à nouveau observées au niveau de l'espèce pour celles qui sont suffisamment échantillonnées.

Dans le cas de la densité et du module spécifique, on dispose d'une assez bonne connaissance, et des gammes de valeurs pour différentes essences, et des déterminants impliqués. Par contre, pour ce qui est des coefficients d'amortissement, l'on dispose surtout d'informations obtenues sur des « bois standards » tels que divers Epicéas notamment (mais aussi un certain nombre d'autres résineux et feuillus), et pour ces matériels une forte corrélation avec le module spécifique avait été trouvée [Ono & Norimoto 1983, 1984]. Cependant, la proportion d'espèces pour lesquelles des gammes de valeurs de ce paramètre sont disponibles reste très faible devant la diversité des bois. Comme on l'a déjà évoqué, des comportements déviant notablement des relations ci-dessus (vers une diminution ou au contraire une augmentation de l'amortissement) ont été trouvés pour quelques espèces ligneuses telles que : Pernambouc (-), Palissandre Indien et de Rio (-), Red Cedar (duramen -, aubier +), Canne de Provence (+). Pour les cas cités, ces différences de comportement avaient pu être attribuées à la présence de certains métabolites secondaires (extractibles) [Matsunaga et al 1996, Minato 1997 ; Yano 1994 ; Yano et al 1997 ; Obataya 1999]. Compte tenu de ces observations, des groupements par gammes de teneurs en extraits connues seront effectués dans l'analyse par grands groupes de types de bois ; puis les données de composition chimique disponibles par essences seront mises en relation avec les valeurs moyennes de propriétés physiques et vibratoires.

III.a. Descripteurs : relations inter- propriétés sur l'ensemble des essais

Ce premier niveau d'analyse a comme objectifs d'une part de mieux comprendre la variabilité rencontrée dans les propriétés vibratoires, d'autre part de repérer éventuellement

des corrélations entre propriétés suffisamment robustes pour servir d'indicateurs acceptables pour une présélection de bois.

Sous le terme « descripteurs », on peut envisager des descripteurs directs (≈paramètres de structure, microstructure, chimie sur le spécimen lui-même), ou bien indirects (≈relations entre propriétés relevant en fait de plusieurs effets d'une même cause). Les premiers sont bien sûr les déterminants réels de la variabilité des propriétés et c'est leur étude qui permettrait de mieux comprendre le comportement du matériau ; cependant, ils ne sont généralement pas accessibles à l'échelle du choix de matériau, comme information de classification potentielle.

Les relations entre les différentes propriétés mesurées sont analysées ici au niveau le plus élémentaire de l'échantillon, c'est-à-dire éprouvette par éprouvette. Ceci permet d'avoir un maximum de variabilité des propriétés en additionnant variabilité intra- et inter-spécifique ; mais aussi et surtout d'effectuer l'analyse des interrelations entre propriétés à l'échelle matérielle la plus locale de notre étude. L'étude porte d'abord sur l'ensemble de l'échantillon, puis sur des partitions en sous groupes de types de bois clairement identifiables : Bois de feuillus/résineux ; Bois de droit fil/bois contrefilés ou ondés ; Bois normaux/bois de compression ; Bois à fortes/faibles teneurs en extraits. Sur ce dernier point, les données correspondent aux moyennes sur l'arbre (cas d'un certain nombre des échantillons provenant du CIRAD), sinon aux moyennes sur l'espèce (d'après des données du CIRAD ou de la littérature), au pire à des estimations (cas des aubiers, qui est un peu problématique dans la mesure où relativement peu d'informations sont disponibles sur les essences étudiées). Lorsqu' aucune de ces « sources » ne paraissait satisfaisante, les bois concernés n'ont pas été classés. Pour certains points de l'analyse, les sous échantillons trop atypiques pour une propriété ou une relation entre propriétés, et/ou ayant un trop fort poids statistique en terme de nombre d'éprouvettes par types de bois, pourront être isolés. Il faut aussi garder en mémoire que les objectifs initiaux de l'étude impliquent un certain sur-échantillonnage de bois dans la gamme supérieure des densités et des modules d'élasticité, et dans la gamme moyenne à basse des coefficients d'amortissement.

Nous commencerons par une observation des relations entre propriétés directement impliquées dans le comportement vibratoire : densité et modules élastiques ; modules spécifiques et coefficients d'amortissement ; en comparant les résultats obtenus avec des relations expérimentales issues de la littérature.

Dans un deuxième temps, certaines relations avec les propriétés physiques (taux d'humidité, gonflements, couleur) seront présentées, en prenant toujours en compte d'une part l'ensemble de l'échantillon, d'autre part les groupements par types de bois.

III.a.1. Densité, module d'élasticité et coefficient d'amortissement

Les corrélations linéaires obtenues sur l'ensemble de l'échantillon entre densité, module d'élasticité, module spécifique et amortissement, sont présentées sur le Tableau 6.

Tableau 6 : Matrice de corrélation entre densité, module, module spécifique et amortissement. En gras : corrélation significative au seuil de 0,001.

	ρstab	E (Gpa)	E/ρ (GPa)	tanδ
ρstab	1	**0,88**	**0,53**	**-0,59**
E (Gpa)		1	**0,85**	**-0,67**
E/ρ (GPa)			1	**-0,67**
tanδ				1

On retrouve les corrélations généralement bien connues entre densité ρ et module d'élasticité E d'une part, entre module spécifique E/ρ et coefficient d'amortissement $tan\delta$

d'autre part. Les coefficients de corrélation linéaire ne peuvent guère être interprétés de façon quantitative, dans la mesure notamment où les relations connues entre E/ρ et $tan\delta$ ne sont pas de forme linéaire. On peut aussi relever des relations apparentes significatives qui n'étaient pas forcément prévues d'après la littérature, telles qu'entre densité et E/ρ ou $tan\delta$ (qui sont théoriquement indépendants de la densité); ou bien des coefficients équivalents pour les deux relations « E/ρ - $tan\delta$ » et « E - $tan\delta$ ». Ces relations apparentes pourront être observées en marge de l'étude des relations ayant plus de bases théoriques et expérimentales, en prenant en compte les effets d'échantillonnage et les différents sous groupes de types de bois.

III.a.1.1. **Relations entre densité et module élastique**

La densité est souvent considérée comme un estimateur utile des propriétés physiques et mécaniques des bois, voire même comme un des premiers indicateurs en qualité des bois [Saranpaa 2003], en ce sens qu'elle représente la proportion de matière et de vide dans ces matériaux cellulaires/poreux (selon les gammes de densité / porosité), d'une façon qui peut être appréhendée à l'échelle de l'utilisation. En revanche, elle ne permet pas d'appréhender les variations d'élasticité rencontrées au niveau de la matière ligneuse elle-même.

La Figure 57 présente la relation entre densité et module d'élasticité longitudinal « sec à l'air » pour l'ensemble des éprouvettes étudiées par vibrations forcées de poutres flottantes très élancées. Les ajustements de [Guitard & El Amri, 1987], qui définissent des bois standards de feuillus et de résineux à partir de régressions expérimentales sur 43 espèces de feuillus et 37 de résineux, sont également représentés.

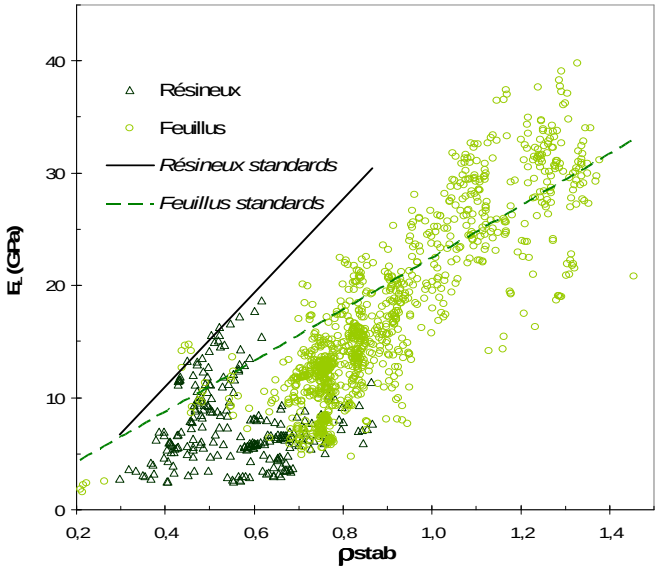


Figure 57 : Relation entre module d'élasticité et densité « sec à l'air » sur l'ensembles des essais effectués par vibrations forcées, tous types de bois confondus.

En première observation, la dispersion est élevée – à la fois en terme de type de matériau ce qui était le but de l'échantillonnage, et en terme d'écart aux « bois standards ». On peut notamment remarquer une forte proportion de valeurs de modules bien inférieures à la moyenne pour la gamme inférieure des densités. Toutes les éprouvettes proviennent de pièces de bois « bien orientées » selon la direction axiale principale, et ont été débitées parallèlement à cette orientation. Cependant, comme nous l'avons déjà signalé, les éprouvettes débitées à partir de bois à fil changeant peuvent dans certains cas présenter une orientation de fil prédominante, et donc ne plus être strictement « de droit fil » ou axiales au sens de l'orientation des fibres du bois, sur ces dimensions, bien que leur débit corresponde à la direction axiale du matériau en conditions d'emploi. Par ailleurs les données ci-dessus

incluent également des bois de compression de résineux. Les sous échantillons correspondants sont isolés sur la Figure 58.

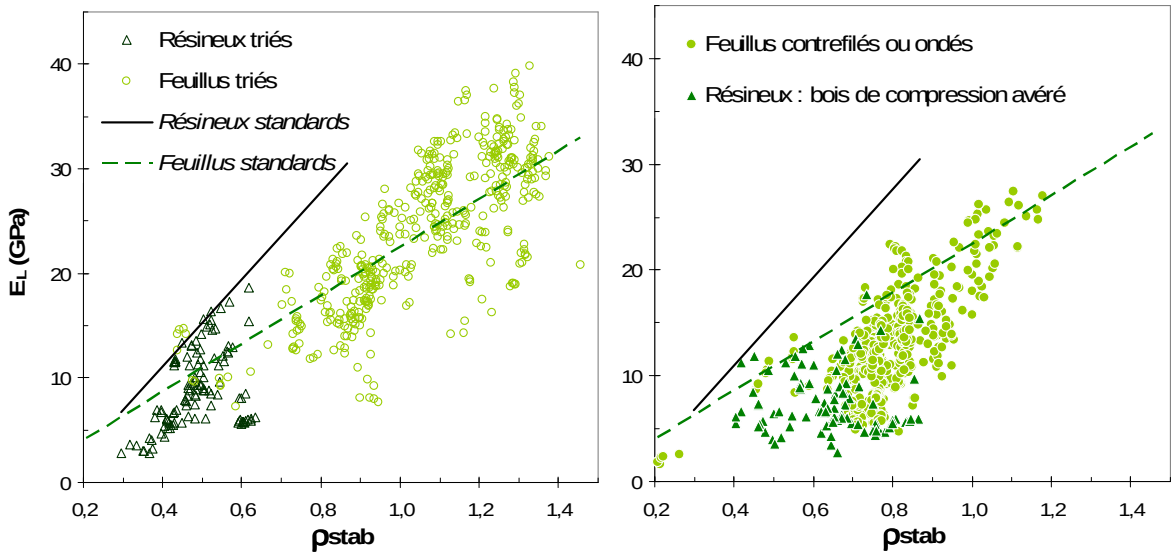


Figure 58 : Relation entre module d'élasticité et densité « sec à l'air » pour : les bois « normaux » et de droit fil, et pour les sous-échantillons présentant du bois de compression avéré (résineux), ou du fil changeant (feuillus).

Pour les bois bien orientés à l'échelle du fil et sans bois de compression repéré, on peut remarquer une importante proportion de modules bien supérieurs aux bois standards pour les feuillus très denses (ρ>1). Pour les résineux, la majorité de l'échantillon présente des modules bien inférieurs aux « standards ». Sur ce dernier point, il faut rappeler que l'échantillon ne comprend que quelques éprouvettes d'épicéa de « qualité lutherie », la plupart de l'échantillon est représenté par : des qualités « courantes » d'Epicéa et de Pins tempérés susceptibles de contenir du bois juvénile ; certains Pins tropicaux ; de l'If.

Par ailleurs, la dispersion observée reste élevée même pour les bois « normaux » de résineux, et pour les bois de feuillus de droit fil. On peut comparer (Figure 59) cette dispersion globale (résineux plus feuillus) à celle relevée sur les ≈3000 séries d'essais de la base de données du CIRAD, correspondant chacune à une moyenne sur au moins 10 éprouvettes de dimensions normalisées (20*20*360mm, R*T*L).

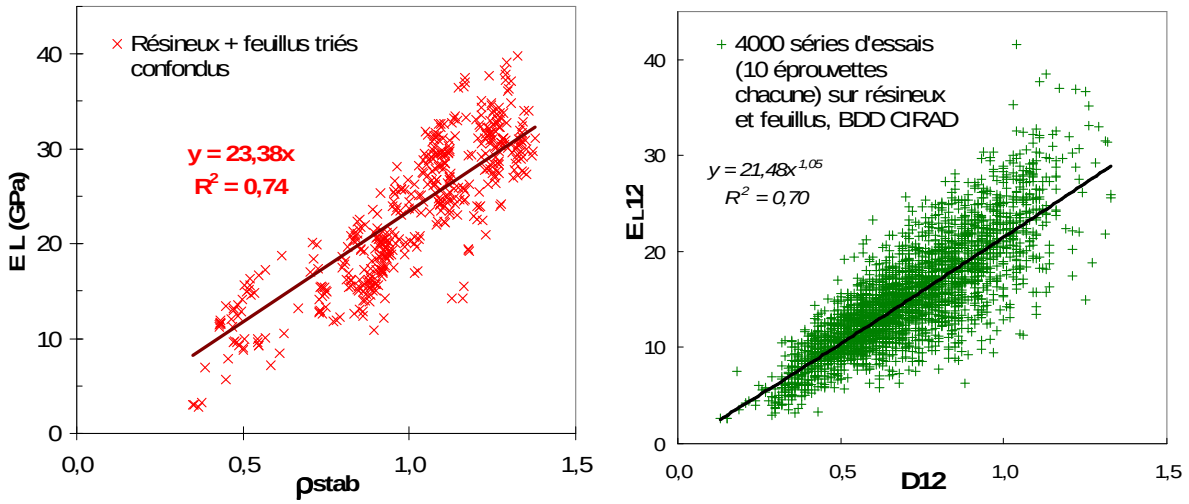


Figure 59 : Densité et module d'Young longitudinal : courbes de tendances et dispersion sur : nos essais sur bois de résineux et de feuillus normaux et de droit fil (à gauche ; un point = une éprouvette) ; et sur les ≈ 3000 séries d'essais sur feuillus et résineux de la base de données du CIRAD (à droite ; un point = un essais, moyenne de 10 éprouvettes).

Sur notre échantillon de « bois normaux », la proportion de variance de E expliquée par la densité apparaît relativement plus élevée que sur l'ensemble des essais de la base de données du CIRAD. La pente de la régression linéaire est aussi plus élevée : les bois échantillonnés ont en moyenne tendance à avoir des modules plutôt supérieurs au cas de figure général, à densités égales. De façon prévisible, si l'on effectue une régression linéaire sur l'ensemble de l'échantillon (y compris bois de compression et bois à fil changeant en petites dimensions), le coefficient de détermination devient inférieur à celui obtenu sur la BDD du CIRAD (R^2 = 0,61), et le rapport E/densité diminue également (E ≈ 19 x ρ).

III.a.1.2. **Distributions de module spécifique**

La représentation du module spécifique (= module d'élasticité divisé par densité) sera plus « lisible » en termes de propriétés élémentaires de la matière ligneuse d'une part, et des propriétés vibratoires d'autre part. Théoriquement, il est sensé être indépendant de la densité, et être directement proportionnel à l'élasticité des parois cellulaires (cf. p39). Dans une première approche, il semble toutefois utile de le représenter en parallèle de la densité (Figure 60), que ce soit du fait de la corrélation apparente significative observée plus haut, et/ou par souci descriptif de l'échantillon considéré.

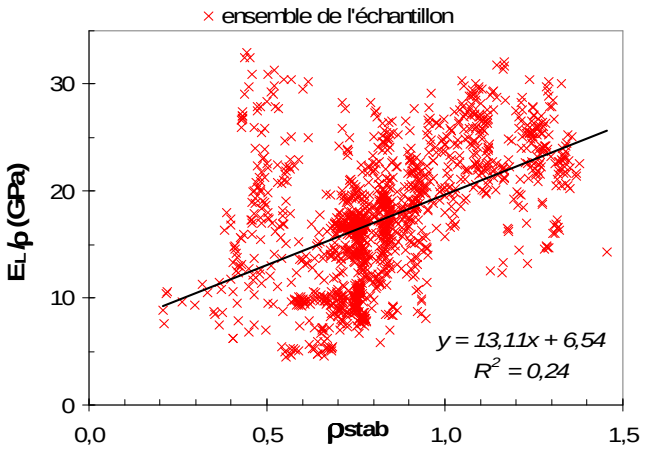


Figure 60 : Module d'élasticité spécifique et densité sur l'ensemble de l'échantillon étudié

Cette représentation fait ressortir la présence de plusieurs sous populations, la relation apparente globale est ainsi une représentation peu fiable. Sur la Figure 61 on a dissocié les grands « types de bois » étudiés pour mieux définir leur répartition sur ces deux propriétés.

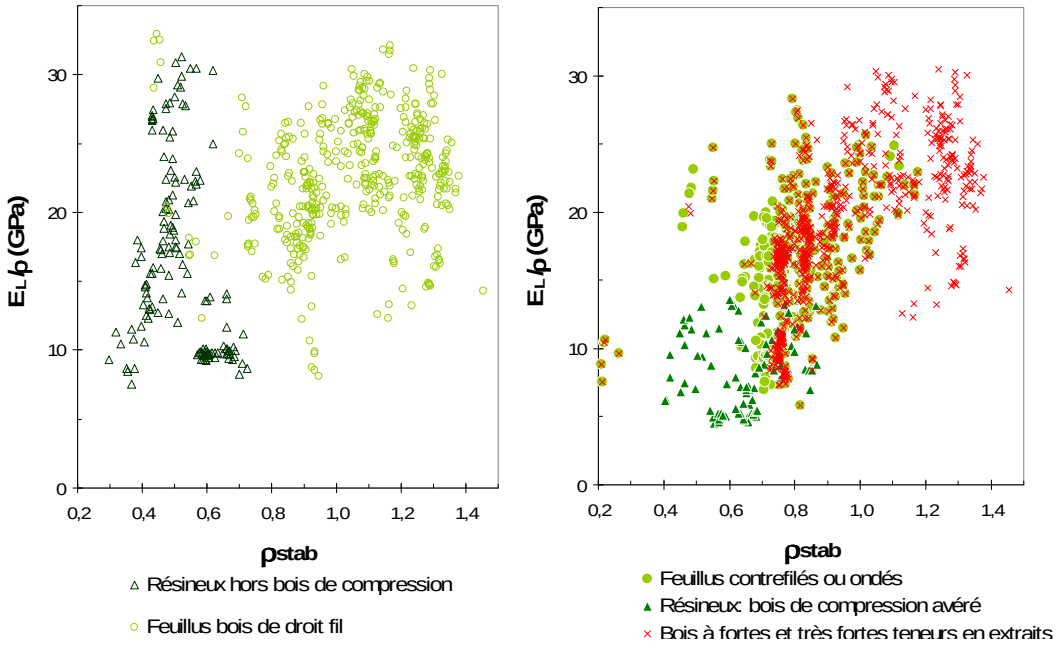


Figure 61 : Module spécifique longitudinal et densité « sec à l'air » pour les différents types de bois étudiés : « Bois normal » de résineux et feuillus à bois de droit fil (à gauche) ; Bois de compression avéré, bois à fil changeant et bois à teneurs en extraits élevées (à droite).

A l'intérieur des groupes, il apparaît délicat de parler de relation entre densité et module spécifique. Dans le cas des bois normaux de résineux, si l'on omet le petit sous-groupe atypique de bois d'If de faible E/ρ (≈10GPa) et densité assez élevée (≈0,7), on pourrait évoquer une légère tendance ($R^2 \approx 0{,}2$, soit $R \approx 0{,}45$, $ddl = 104$) d'augmentation du module spécifique avec la densité. Les « résineux standards » de [Guitard & El Amri 1997] impliquent une telle évolution. Ceci correspondrait à une liaison entre densité à l'échelle du matériau et angles de microfibrilles à travers la largeur de cerne et la proportion de bois final (où les AMFs sont généralement plus faibles que dans le bois initial) [Kubojima et al 1997 ; Hori et al 2002]. Cependant, notre échantillon de résineux manque numériquement de bois à très faibles largeurs de cernes et/ou très rigides. Hors bois de compression, cet échantillon couvre une large gamme de E/ρ (7-32 GPa) pour une fenêtre assez réduite de ρ. Par comparaison, les bois de compression avérés présentent, de façon classique, des densités à la fois plus élevées et plus dispersées, et des valeurs de modules spécifiques bien inférieures à la moyenne. La proportion non négligeable de valeurs faibles pour les bois supposés « normaux » pose cependant question : si une partie est attribuable à du bois juvénile (cf. 1er chapitre de la partie IV), on peut se demander pour d'autres échantillons s'il ne s'agirait pas de bois de compression non repéré, par exemple pour l'If précité (quoique les seules données que nous ayons relevées dans la littérature indiquent effectivement pour cette essence des E/ρ assez faibles : ≈11,6GPa [Logiciel CES Selector]).

En ce qui concerne les feuillus, les modules spécifiques sont très dispersés sur la fenêtre –plus large- de densités étudiées. Compte tenu des effets d'échantillonnage, on ne peut guère raisonner en terme de corrélation entre ces deux paramètres ; il semble toutefois que deux tendances contrastées puissent être repérées sur les bois bien orientés : d'une part, une proportion assez importante de modules spécifiques relativement élevés pour les très fortes densités. Ceci pourrait s'interpréter par une proportion croissante de fibres par rapport aux éléments anatomiques plus « ouverts » dans le cas de ces plans ligneux très denses. On peut aussi s'interroger sur les proportions relatives des différentes couches de la paroi pour des épaisseurs de parois très contrastées (la proportion de S2 à microfibrilles « bien orientées » reste-t-elle constante, ou bien est elle inférieure pour des densités assez faibles ?). En tout état de cause, ces éventuels effets ne correspondraient pas un rapport « vide/matière », mais plutôt entre types d'éléments, superposé bien sûr au déterminant principal qu'est l'angle moyen des microfibrilles.

D'autre part, on peut repérer deux sous-groupes présentant des E/ρ particulièrement faibles par rapport au reste de l'échantillon : celui ayant une densité de ≈1 correspond à des échantillons de buis, et ici encore l'on peut se demander s'il s'agirait de bois de compression non repéré; ceci demanderait à être confirmé ou infirmé par des observations anatomiques. L'autre sous-groupe présentant d'assez faibles E/ρ correspond à du Grenadille (*Dalbergia melanoxylon* Guill. & Per.). Ce bois est particulièrement fortement imprégné de métabolites secondaires, ce qui pourrait avoir deux effets selon la localisation histologique de ces composés : soit une augmentation apparente de la densité globale, non représentative de la proportion réelle de matière des parois (imprégnation des lumens) ; soit, additionné à cet effet, une diminution marquée de la fraction relative des microfibrilles de cellulose dans les parois (imprégnation des parois causant un gonflement important, ayant potentiellement un effet comparable à un gonflement par l'eau par analogie), dont l'effet serait d'autant plus marqué que les AMFs seraient forts.

Pour ce qui concerne les bois « atypiques », on peut remarquer : i) que certains feuillus présentant du contre-fil ou du fil ondé (modérés) peuvent avoir des modules spécifiques équivalents à ceux de la majorité des bois « de droit fil » (ici encore il y a certainement superposition aux effets des AMFs : c'est à dire probablement des bois à fil changeant avec

faibles angles de microfibrilles, et, a contrario, des bois normaux et « de droit fil » à relativement forts AMFs) ; ii) mis à part le cas précédemment cité (Grenadille), la plupart des bois à fortes et très fortes teneurs en extraits de notre échantillon présentent des modules spécifiques plutôt élevés – sauf lorsque de fortes teneurs en extraits sont superposées à un contre-fil très accentué. Les deux effets envisagés ci-dessus de diminution du E/ρ apparent pour une très forte imprégnation ne semblent donc pas avoir un effet prononcé sur l'ensemble de l'échantillon.

Enfin, la plupart des études concernant les propriétés vibratoires des bois et les relations entre module spécifique, amortissement, et paramètres de microstructure, ont généralement pris comme références de forts modules spécifiques des qualités « lutherie » d'Epicéas (sur différentes espèces du genre *Picea*, mais avec une nette prédominance de *P. abies* et *P. sitchensis*). Les bois de résineux de notre échantillon ne comprennent qu'une infime proportion de ce type de bois. La Figure 62 résume la distribution des modules spécifiques mesurés pour résineux et feuillus « normaux et de droit fil » de notre échantillon.

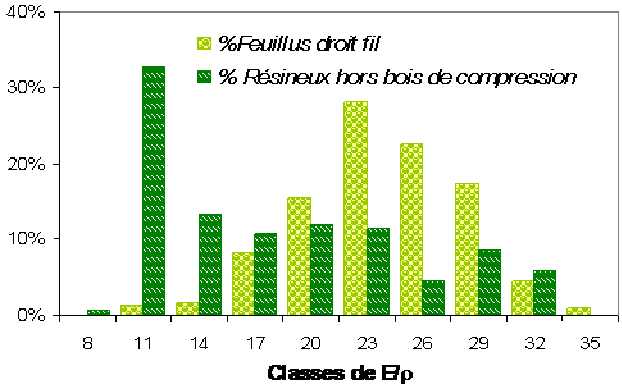


Figure 62 : Répartition des modules spécifiques mesurés par vibrations forcées pour les bois de résineux « normaux » (N=113) et de feuillus parfaitement de droit fil (N=444).

Pour les résineux étudiés, on peut dissocier deux sous populations correspondant manifestement aux bois « normaux » juvéniles à faible E/ρ, et du bois adulte normal dont la médiane de E/ρ est comparable à celle des feuillus, soit autour de 20-23 GPa. La distribution globale est cohérente avec celle des données de la base du CIRAD, avec une fenêtre usuelle de environ 12/15 à environ 30/35 GPa. Sur notre échantillon, les feuillus (>80% du total) présentent cependant une distribution relativement plus importante vers des rigidités intrinsèques plus élevées que les bois adultes de résineux. Pour ce qui concerne l'élasticité longitudinale, les différences rencontrées au niveau des parois cellulaires semblent bien être prédominantes par rapport aux différences dues aux différents niveaux de complexité anatomique.

III.a.1.3. **Relations entre module spécifique et facteur d'amortissement**

En terme d'utilisations des bois en facture instrumentale, on s'intéressera selon les cas aux couples de valeurs E - $tan\delta$ (besoin d'une raideur spécifiée à géométrie donnée plus une certaine gamme d'amortissement), ou aux couples de valeurs E/ρ - $tan\delta$ (besoin de certaines fréquences propres à géométrie donnée, ou bien optimisation de la rigidité en minimisant la masse, plus à nouveau une certaine gamme d'amortissement). Dans ces deux cas, la densité sera toujours un paramètre additionnel important à prendre en compte, selon la fonction à remplir. Les gammes de valeurs de ρ, E_L, E_L/ρ et $tan\delta_L$ seront présentées lors du classement des types de bois (§ III.b.1).

En terme de descripteurs des facteurs d'amortissement, on observera en priorité les inter – relations E/ρ - $tan\delta$, ces deux grandeurs étant connues pour être très bien corrélées (leurs relations ont notamment été étudiées par [Ono & Norimoto 1983, 1984, 1985 ; Norimoto, Ono *et al* 1983 ; Norimoto, Tanaka *et al* 1986 ; Obataya, Ono *et al* 2000]), et

présupposées comme directement liées aux propriétés de la matière ligneuse (cf p. 39-40). L'angle moyen des microfibrilles est le premier déterminant des variations de ces deux paramètres, à l'origine de leur très bonne corrélation [Références ci-dessus].

a Relation sur tous types de bois confondus

Dans un premier temps, on peut représenter (Figure 63) l'ensemble de nos résultats pour E_L/ρ et pour $tan\delta_L$, en échelle linéaire (à gauche), et dans l'échelle logarithmique (à droite) correspondant aux représentations d'Ono & Norimoto [1983, 1984, *& onwards*]. Les régressions obtenues par ces auteurs sur 55 espèces (dont 25 résineux, 17 feuillus tempérés et 13 feuillus tropicaux) sont également représentées. Elles correspondent à une loi puissance de la forme : $tan\delta = 10^{A}.(E/\rho)^{-B}$ ou encore, lorsqu'elle est exprimée sous forme linéaire dans la représentation en échelle logarithmique : $\log[\tan\delta/(E/\rho)] = -(1+B).\log(E/\rho) + A$; avec dans les deux cas E/ρ exprimé en Pa pour les valeurs données dans le texte[21]. Dans la suite, cette représentation en échelle Log sera souvent utilisée dans la mesure où il est plus aisé de comparer visuellement des tendances de forme linéaire que de forme puissance, que ce soit pour nos différents types de bois, et/ou pour une comparaison aux données de la littérature. Mais il est évident que pour repérer les gammes de valeurs et pour observer et quantifier la dispersion effective la représentation en échelle « naturelle » est préférable.

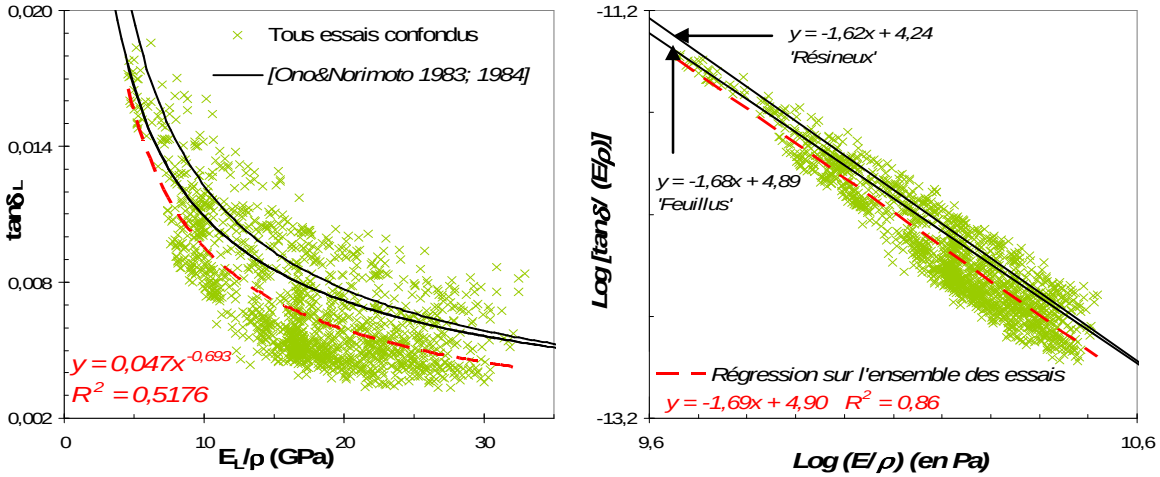


Figure 63 : Relations entre module spécifique, et coefficient d'amortissement, pour l'ensemble de nos essais (tous types de bois confondus). A gauche : en échelle linéaire ; à droite : en échelle logarithmique (E/ρ exprimé en Pa). En tirets : régression sur nos essais. En traits pleins : régressions de [Ono&Norimoto 1983&1984].

On retrouve bien l'allure globale des relations connues, le meilleur ajustement étant obtenu avec une loi puissance, avec une assez bonne homogénéité (i. e. s'il y a différentes sous populations, elles ne forment pas de groupements manifestement isolés comme c'était le cas pour les distributions de module et module spécifique en fonction de la densité). Cependant, la dispersion observée, bien visible en échelle linéaire, est très élevée : les variations de module spécifique n'expliquent que ≈50% de la variance observée du coefficient d'amortissement. De façon claire, une importante proportion de l'échantillon présente notamment des valeurs de tanδ bien inférieures aux régressions de la littérature, et ce sur une large gamme de E/ρ (~8-32GPa).

[21] Pour E/ρ exprimé en GPa, l'estimation sera : $tan\delta = 10^{A-9B}.(E/\rho)^{-B}$

Sur la Figure 63, nous avons représenté les deux ajustements de la littérature obtenus sur des bois de feuillus (A=4,24 et B=0,62)[22] et de résineux (A=4,89 ; B=0,68). En fait les auteurs concluaient à une absence de différence significative entre ces deux échantillons [Ono&Norimoto 1984]. Il nous semble cependant que deux régressions distinctes peuvent être conservées, les échantillons n'étant pas de poids comparable (Résineux : N ~1200 ; Feuillus : N~120). La répartition de notre échantillon est inverse : Résineux : N~250 ; Feuillus : N~1150. On peut à ce sujet remarquer que ce type de « loi » empirique est forcément sujette à un effet d'échantillonnage prononcé.

La comparaison – représentée en échelle logarithmique - de la régression obtenue sur l'ensemble de nos essais (A=4,90 ; B=0,69), et de celles précitées, montre globalement une très forte similitude, particulièrement avec la régression « résineux » de la littérature. Cependant, on peut remarquer plusieurs choses : *i)* Les valeurs faibles de E/ρ de notre échantillonnage sont surtout représentées par des résineux, ce qui risquerait de décaler la régression globale si une différence significative existait entre bois de feuillus et de résineux; *ii)* bien que similaire, la droite représentant notre échantillon, dans la plage expérimentale, est nettement décalée vers le bas[23]; *iii)* la dispersion observée reste considérable, quoique bien sûr un peu écrasée par l'échelle logarithmique. Cette dispersion en forme d'éventail laisse penser qu'une régression unique cache en fait plusieurs sous groupes de types de bois. Dans les paragraphes suivants les sous échantillons 'résineux/feuillus' ; 'bois normaux et de droit fil/bois à fil changeant et de compression' ; 'bois à faibles/fortes teneurs en extraits' ; seront dissociés.

b Bois de feuillus et bois de résineux

Le premier niveau de différenciation (bois de feuillus/bois de résineux) est présenté sur la Figure 64.

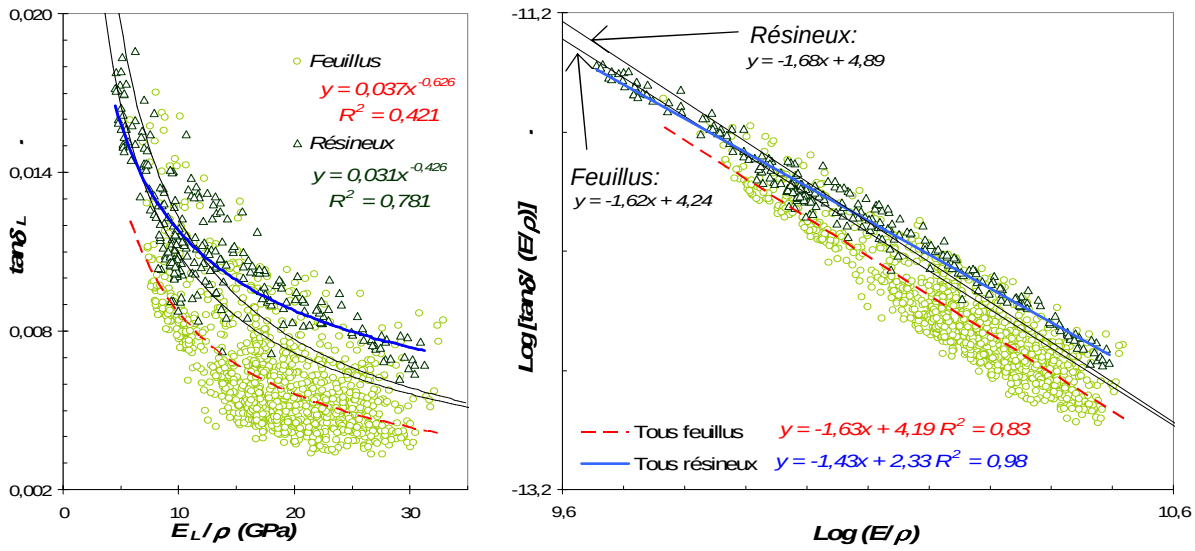


Figure 64 : Relations entre tanδ et E/ρ pour les bois de feuillus (N=1155), et les bois de résineux (N=252), de notre échantillon. Echelles linéaire (à gauche) et logarithmique (à droite). Traits pleins fins : régressions citées.

Les bois de résineux forment un groupe distinct qui présente dans l'ensemble des valeurs de tanδ –à E/ρ donné- bien supérieures à celles de la majorité de notre échantillon de feuillus. On peut toutefois remarquer que ce groupe des résineux ne sort pas de la gamme

[22] Ces constantes correspondent aux régressions avec E/ρ en Pa. Les régressions initiales étaient exprimées pour des modules spécifiques en dyne/cm^2.
[23] Ce décalage doit beaucoup plus à la légère variation de la pente, qu'à celle de l'ordonnée à l'origine.

totale des feuillus, et qu'une part non négligeable de ces derniers présente des couples de valeurs *tanδ – E/ρ* très comparables aux résineux. Par ailleurs, l'échantillon de résineux que nous avons étudié et qui comporte des bois de compression présente apparemment deux sous populations, à comportements tous deux assez parallèles à la régression « Résineux » de la littérature. Le sous groupe dans la gamme supérieure des *E/ρ* tend à avoir des valeurs de tanδ –à *E/ρ* donné- supérieures à cette droite ; tandis que pour des *E/ρ* <15GPa les valeurs de tanδ sont plutôt inférieures au « modèle » empirique. La pente de la régression globale sur résineux apparaît ainsi nettement plus faible que celles de la littérature, et de nos feuillus, mais est manifestement une mauvaise représentation illustrant un effet échantillonnage. La dispersion observée sur les résineux (malgré l'effet ci-dessus, près de 80% de la variance observée de tanδ est explicable par *E/ρ*) est beaucoup plus faible que sur les feuillus (seulement ≈40% des variations de tanδ sont explicables par *E/ρ*). En ce qui concerne notre échantillon de feuillus, la grande majorité des individus présentent des valeurs de tanδ –à *E/ρ* donné- fortement inférieures aux « modèles » empiriques. La régression globale est comparable à celle sur feuillus de la littérature, mais toujours décalée vers le bas, et la dispersion en forme d'éventail est toujours aussi marquée que lors de la représentation de tous les types de bois confondus. La séparation entre bois de résineux et de feuillus n'apparaît ainsi pas pouvoir expliquer la dispersion observée.

c Partition sur critères d'orientation

[Ono&Norimoto, 1983] avaient observé que pour des échantillons de résineux débités avec des angles croissants (0→45°) dans le plan LR, la régression était superposable et dans la continuité de celle –obtenue sur éprouvettes de droit fil- correspondant à des variations de propriétés de la matière ligneuse (AMFs moyens au premier chef), mais présentait une pente plus faible (en échelle Log, l'équation de cette régression avec rotation dans le plan LR était : *y= -1,41x+1,83*). Des essais dans les trois directions principales L, R & T, sur feuillus et sur résineux, conduisaient aux mêmes types de résultats. Cette différence était interprétée par l'augmentation de l'influence relative de l'agencement cellulaire, par rapport à l'influence du comportement des parois, lorsque l'on passe d'une orientation purement longitudinale à une orientation transversale [Ono & Norimoto 1985]. Sur la Figure 65, sont isolés les sous échantillons incluant de façon évidente des rotations notables d'orientation soit anatomique (fil changeant à l'échelle mésoscopique), soit microstructurale (forts AMFs des bois de compression de résineux).

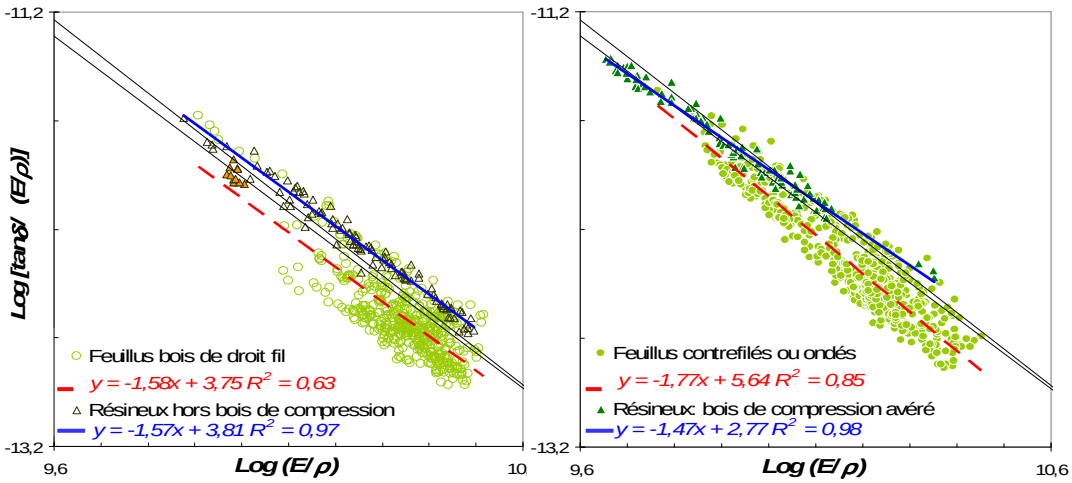


Figure 65 : Relations entre tanδ et *E/ρ* pour les sous-groupes de bois susceptibles de présenter des orientations méso- ou microscopiques différentes. A gauche : bois « normaux » et de droit fil (triangles pleins : duramen d'If); à droite : bois à fil changeant et bois de compression avéré.

Pour ce qui concerne les bois présentant *a priori* des orientations axiales prédominantes des éléments (méso- ou microscopiques), les pentes obtenues pour les feuillus et les résineux sont très similaires, avec la régression sur feuillus toujours très nettement décalée vers le bas. La pente de la droite « résineux hors bois de compression » est beaucoup plus proche (-1,57) de celles de la littérature, que celle de la Figure 64 sur l'ensemble. Il faut cependant signaler que la droite représentée sur la Figure 65 ne prend pas en compte le petit sous-groupe de duramen d'If (triangles pleins sur le graphique) dont le comportement atypique (proche de celui des bois de compression) à l'extrémité de l'étendue de variation « bois normaux » de E/ρ avait un effet de levier prononcé (en prenant en compte ce sous-groupe, les constantes deviennent : A~2,72 ; B~0,46, le coefficient de détermination est aussi légèrement inférieur). On retrouve aussi la superposition de feuillus aux résineux, sur toute la gamme de E/ρ des résineux.

Par contre, la majorité des feuillus de droit fil sont concentrés dans le coin inférieur droit, et on retrouve toujours la même étendue de dispersion en ordonnée. Il faut aussi noter que la « régression » obtenue dans ce cas est peu fiable compte tenu de la distribution des couples de valeurs. On peut remarquer un sous groupe de feuillus très proche des bois de résineux normaux, et d'étendue de variation de E/ρ plus importante que le reste des feuillus de droit fil. Il comprend du Buis, différents aubiers et « bois blancs », mais aussi quelques bois colorés tempérés ou tropicaux, qui seront dissociés lors du récapitulatif par espèce.

Pour les bois de compression de résineux, on observe plus clairement la différence de comportement évoquée ci-dessus, avec une pente, et des valeurs de $tan\delta/(E/\rho)$ plus faibles que pour des bois normaux ou juvéniles. L'interprétation de cette observation n'est pas évidente compte tenu des caractéristiques connues de ce type de bois[24]. Elle fera l'objet d'un chapitre spécifique.

Pour les bois contrefilés ou ondés, on retrouve toujours la forte dispersion initiale. Un petit groupe de feuillus à fil changeant très voisin des bois de compression de résineux correspond à du bois de Fromager, et d'Acajou Cailcedrat. La pente globale est plus élevée (-1,77) que précédemment, mais représente manifestement l'effet « éventail de dispersion ». La séparation selon le critère « bois de droit fil/bois à fil changeant » n'a apparemment eu un effet discriminant que sur les gammes de E/ρ, et non sur le ratio $tan\delta/(E/\rho)$.

d Partition des bois de feuillus par gammes de teneurs en extractibles

Comme on l'a déjà signalé à plusieurs reprises, les travaux sur un petit nombre d'espèces laissent présager une influence potentiellement forte de certains métabolites secondaires sur les coefficients d'amortissement. Sur ce point, la Figure 66 représente la séparation de nos types de bois de feuillus selon le critère 'importance des teneurs en extraits'. Les données utilisées ont été présentées en introduction de ce sous chapitre. Dans l'optique de bois tropicaux, nous avons considéré que des taux d'extraits « faibles à normaux ou moyens » admettaient jusqu'à environs 8% d'extractibles (dans la base de données du CIRAD, la moyenne des taux d'extraits alcool-benzène + eau chaude est de ≈ 7,5%, la médiane de 6,4%, premier quartile 4,4% ; pour les seuls extraits alcool-benzène, les taux sont considérés élevés au-delà de 7% [Gérard 1991]).

[24] Soit de façon typique : de forts AMFs ; de fortes teneurs en lignines ; une proportion de cellulose cristalline inférieure à la moyenne ; une anatomie des trachéides différente avec des cellules plus arrondies, des parois plus épaisses et souvent microfissurées à l'état sec, une moins bonne cohésion entre cellules ; que dans du bois « normal ».

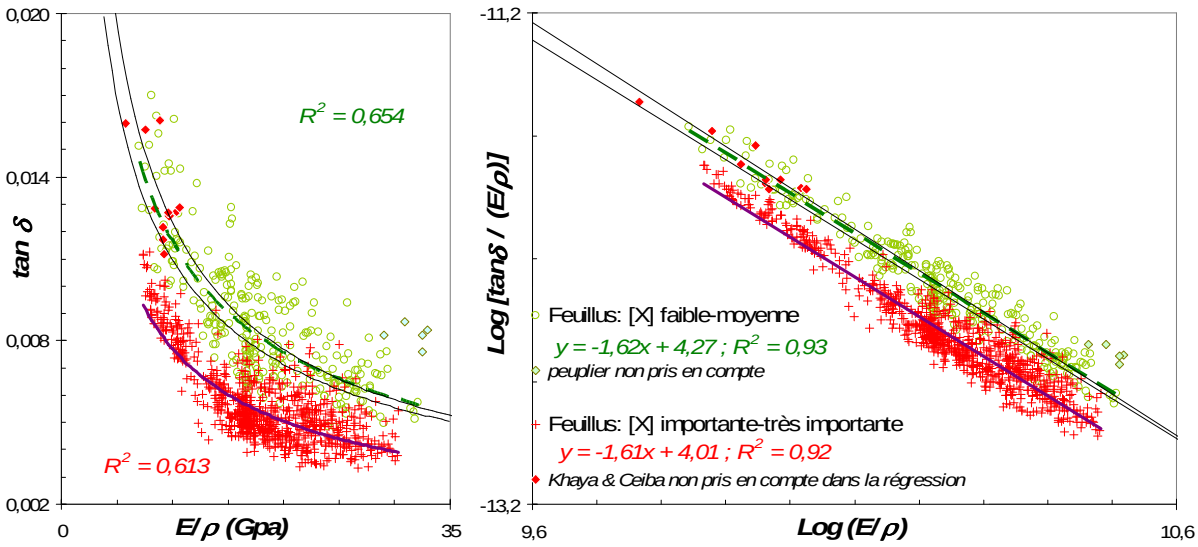


Figure 66 : Relations entre tanδ et E/ρ pour les bois de feuillus classés par gammes de teneurs en extraits [X]. [X] « faible-moyenne » : ≤8% ; « importante-très importante » :8~30% (d'après les données moyennes ou estimations disponibles sur l'arbre, à défaut sur l'espèce). Losanges pleins : groupuscules atypiques pour chaque classe, non pris en compte dans les régressions globales

Bien que le critère de séparation ne soit pas très précis (les types de bois sont regroupés selon des données ou estimations de teneurs en extraits ne portant pas sur l'éprouvette elle-même), et qu'il soit délicat d'assigner une limite franche de ce critère pour la définition des sous-groupes, on obtient une discrimination des ratios $tan\delta/(E/\rho)$ beaucoup plus nette qu'avec les critères précédents. La dispersion à l'intérieur de ces deux sous groupes reste marquée, mais est réduite par rapport à l'observation globale sur feuillus ou après séparation sur critères d'orientation. En isolant ces deux groupements de taux d'extraits, la proportion de variance d'amortissement expliquée par le module spécifique est de 60-65% dans les deux cas (au lieu de ≈40% de façon globale). On peut remarquer deux groupuscules atypiques : Peuplier présentant tous les symptômes de bois de tension[25] pour les taux d'extraits « modérés » ; Fromager à forte teneur en extraits hydrosolubles et Acajou Cailcedrat pour les [X] importants. Ils n'ont pas été pris en compte dans les régressions ; ils ont toutefois un faible poids sur la dispersion générale (±0,02% absolu sur les R^2).

Les deux régressions pour bois de feuillus à teneurs en extraits *[X]* 'faible – moyenne' et 'importante - très importante' sont bien dissociées, sensiblement parallèles dans les deux échelles linéaire et logarithmique, et présentent en échelle log des pentes très similaires entre elles, et avec la régression « feuillus » de la littérature. La relation $tan\delta/(E/\rho) = f(E/\rho)$ observée pour les feuillus à teneurs en extraits « faibles à modérées » *(A~4,27 ; B~0,62)* est assez proche des observations sur feuillus de [Ono&Norimoto 1984] *(A~4,29 ; B~0,62)*. Dans le cas des bois à fortes teneurs en extraits, la relation est de la même forme, mais les valeurs de tanδ –à E/ρ donné- sont nettement inférieures. Même si la discrimination entre les deux groupes n'est pas totale[26], et s'il existe un certain sous échantillonnage des valeurs faibles de E/ρ, le critère « teneur en extraits » permet de décrire une partie importante de la dispersion initialement observée pour les ratios $tan\delta/(E/\rho)$.

[25] Bois pelucheux ; lors du débit en plan tangentiel, une forte déformation immédiate de flexion s'est manifestée (flèche de ≈4-5mm pour une longuer de 150mm et une épaisseur de 2mm).

[26] On peut notamment observer un certain recoupement des deux sous-ensembles, ainsi que quelques couples de valeurs individuels des « fortes teneurs en extraits » nettement localisés dans l'ensemble '[X] modérées'. Le repérage des types de bois concernés sera abordé dans l'analyse par essence & type de bois (§III.a.3).

Enfin, la bonne correspondance entre la régression obtenue sur notre échantillon de feuillus à '[X] faibles ou modérées' et celle sur feuillus de [Ono&Norimoto 1984] peut en fait poser question, dans la mesure où ce sous groupe de nos bois surtout tropicaux admet jusqu'à ~8% d'extractibles, y compris des espèces appartenant aux mêmes genres ou familles que celles pour lesquelles des effets marqués des extractibles sur les facteurs d'amortissement ont pu être observés dans la littérature. L'échantillon des auteurs cités comprend ~40% de feuillus tropicaux, dont plusieurs espèces susceptibles de contenir des taux non négligeables de composés secondaires du bois de cœur. Leur régression sur bois de feuillus pourrait ainsi être un tant soit peu biaisée par un certain décalage dû à ces essences.

e Bois normaux de résineux et bois de feuillus à faible teneur en extractibles

Sur la Figure 67, on a isolé uniquement les [X] supposés « faibles » et très faibles (soit inférieurs à 4-5%, gamme moyenne souvent admise pour des feuillus tempérés), afin de les comparer : aux régressions de la littérature, et aux résineux ne présentant ni bois de compression, ni forte teneur connue en extraits. Cette représentation exclut également le bois de Peuplier probablement de tension signalé ci-dessus.

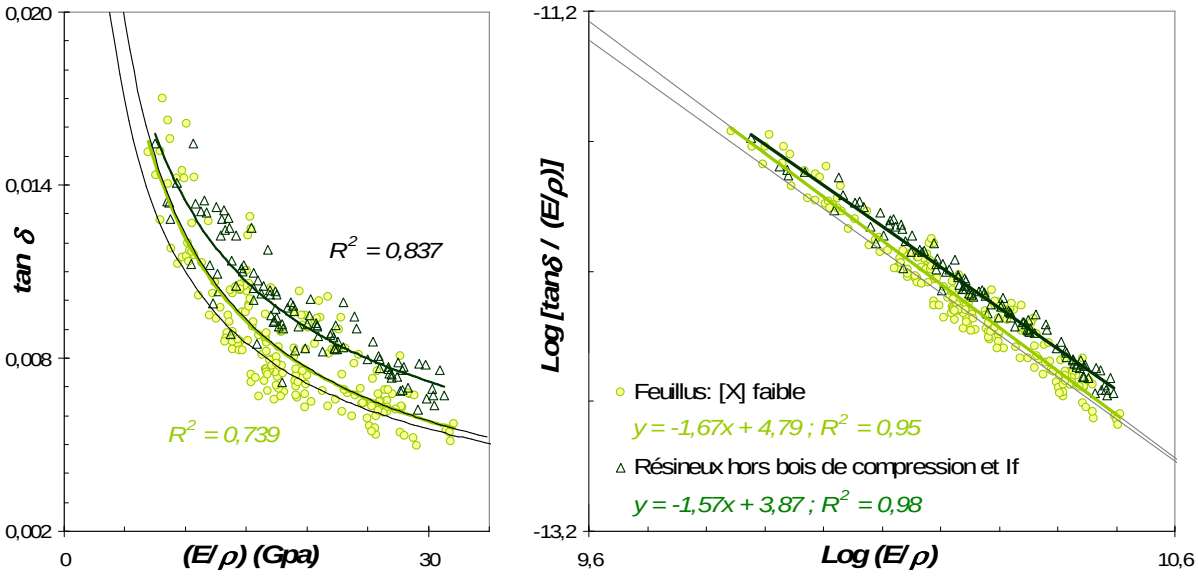


Figure 67 : Relations entre E/ρ et tanδ pour : les résineux -hors bois de compression et bois à teneurs en extraits marquées; les feuillus ayant de faibles teneurs en extraits [X]≤4~5% (d'après les données moyennes ou estimations disponibles sur l'arbre, à défaut sur l'espèce).

Pour ces bois à teneurs en extraits *a priori* parmi les plus faibles (≤4,5%, soit ≤ au premier quartile des ≈1400 essais de la base chimie du CIRAD, toujours au sens de bois tropicaux ; mais cette définition de gamme pourrait probablement être étendue à bon nombre d'essences « secondaires » ou « semi-précieuses » tempérées et méditerranéennes), les relations observées pour les feuillus et pour les résineux sont très proches ; bien plus qu'entre feuillus à faibles, et fortes [X].

On peut cependant remarquer que : *i)* notre échantillon de résineux « normaux » présente toujours des ratios *tanδ/(E/ρ)* légèrement supérieurs aux feuillus à faibles *[X]*, et aux données de la littérature (effet des proportions de composés primaires ou secondaires sous-estimés ? du taux de cristallinité ? de l'anatomie ?) ; *ii)* quoique très nettement réduite, il existe toujours une certaine dispersion des ratios *tanδ/(E/ρ)* sur ces feuillus (effets des autres paramètres évoqués ci-dessus, mésestimation des [X] faibles, influence de certains extraits pour de faibles importances pondérales?).

f Discussion

En isolant les types de bois les plus « normaux », on retrouve bien une relation « standard » entre module spécifique et coefficient d'amortissement. Cette relation de forme puissance, $tan\delta = 10^{A}.(E/\rho)^{-B}$ est sensiblement identique pour des bois normaux de résineux, et des bois de feuillus contenant peu de métabolites secondaires (même si potentiellement de faibles pourcentages de certains composés pourraient avoir un effet). La relation obtenue est également cohérente qualitativement et quantitativement avec les relations de la littérature [Ono & Norimoto 1983, 1984, 1985], avec des pentes de -1,6 à -1,7 environ dans une représentation logarithmique $\log[\tan\delta/(E/\rho)] = -(1+B).\log(E/\rho) + A$.

Cet ordre de grandeur était retrouvé théoriquement d'une manière analogique simple par [Brancheriau 2002] en combinant l'expression de la pulsation en fonction de (E/ρ) ; et les expressions du module complexe (module de conservation et facteur de perte) en fonction des paramètres caractéristiques d'un modèle viscoélastique élémentaire (Zener solide). La pente valait alors -1,5 et le terme A dépend des temps caractéristiques de fluage et de relaxation. Cependant, il est connu que le comportement du matériau bois doit être décrit par des modèles rhéologiques plus complexes (plus d'éléments), ce qui est certainement une des premières raisons faisant que les pentes observées sont différentes de ce calcul.

En tout état de cause, il s'agit d'une relation forte, résultant apparemment directement des changements relatifs entre la partie élastique (imputable aux microfibrilles de cellulose cristalline) et viscoélastique (liée à la « matrice » d'hémicellulose, lignines, et éventuels composés additionnels) du comportement du bois, gouvernée au premier chef par le changement d'orientation (microfibrilles ou fibres), ce qui explique sa robustesse entre bois de feuillus et de résineux « non modifiés ». [Norimoto et al 1986] en donnaient une explication qualitative en représentant, à l'aide de modèles rhéologiques, deux cas extrêmes d'angle de microfibrilles (AMF) nul (microfibrilles et matrice disposées en parallèle), et d'AMF = 90° (microfibrilles et matrice en série).

La bonne concordance entre les résultats expérimentaux obtenus sur bois « normaux » de feuillus et de résineux soutient cette interprétation basée sur l'échelle des parois cellulaires. Effectivement, si les plans ligneux sont plus complexes et plus divers dans le cas des feuillus, les éléments prédominants en direction axiale restent très généralement les fibres, que l'on peut comparer aux trachéides en termes de structure et de comportement. De plus, si l'on considère qu'en direction axiale les éléments rigides, et ceux peu ou très peu rigides, sont disposés en parallèle, il serait éventuellement envisageable d'assimiler l'influence des vaisseaux (et parenchymes longitudinaux le cas échéant) à celle des zones de bois initial de résineux (trachéides à diamètres de lumens importants, parois fines et présentant souvent des AMFs plus élevés que dans le bois final).

Cependant, si cette relation entre module spécifique et amortissement, régie par des paramètres d'orientation, reste forte, la dispersion résiduelle observable est très importante. A titre illustratif, nous présentons ci dessous un récapitulatif des paramètres des régressions[27] obtenues pour notre échantillon et ses différents sous-groupes ayant eu un effet discriminant (niers ; et enfin teneur en eau.

Tableau 7), et de celles de la littérature (Tableau 8). Toute rotation mise à part, la matière ligneuse est sujette à plusieurs facteurs de variabilité : importance des différentes

[27] Il faut remarquer que les pentes et ordonnées à l'origine de ces régressions expérimentales ne sont pas forcément d'interprétation évidente, compte tenu des différents paramètres pouvant entrer en compte, et des effets d'échantillonnage.

couches de la paroi ; taux de cristallinité[28] et proportion des différents composés primaires (cellulose, hémicelluloses, lignines) ; présence de composés « secondaires[29] » et nature, localisation histologique et importance pondérale de ces derniers ; et enfin teneur en eau.

Tableau 7 : Paramètres des régressions $tan\delta = 10^{A}.(E/\rho)^{-B}$ obtenues sur notre échantillonnage. [X]~teneur en extraits ; BC°~Bois de compression. Gamme de fréquences : 200-600Hz. Les coefficients de détermination R^2 sont exprimés pour les représentations en échelle linéaire (en gras), et logarithmique (en italique).

Type de bois	*n*	A	B	r^2*(Log)*	**r^2(Lin)**
Tous confondus	*1408*	4,90	0,69	*0,86*	**0,52**
Feuillus : tous	*1155*	4,19	0,63	*0,83*	**0,42**
Feuillus : [X] importante	*846*	4,01	0,61	*0,92*	**0,61**
Feuillus : [X] faible + moyenne	*283*	4,27	0,62	*0,93*	**0,65**
Feuillus : [X] faible	*198*	4,79	0,67	*0,95*	**0,74**
Résineux hormis BC° et If	*101*	3,87	0,57	*0,98*	**0,84**
Résineux à BC° avéré	*92*	2,77	0,47	*0,98*	**0,78**
Résineux : tous	*252*	2,33	0,43	*0,98*	**0,78**

Tableau 8 : Paramètres des régressions $Log[tan\delta(E/\rho)] = -(1+B)*Log(E/\rho)+A$ obtenues dans la gamme de fréquence 200-700 Hz par *[Ono&Norimoto 1983, 84, 85]*. Les coefficients de détermination R^2 sont exprimés pour les représentations en échelle Log uniquement.

Type de bois	*n*	A	B	r^2*(Log)*
Feuillus (orientation L)	*118*	4,24	0,62	*0,83*
Résineux (orientation L)	*1227*	4,89	0,68	*0,91*
Epicéa de Sitka (θ plan LR)	*24*	2,13	0,41	*0,99*

Comme on l'a observé dans les paragraphes précédents, bien que les relations restent de la même forme pour les différents regroupements de types de bois, la proportion de variance d'amortissement expliquée par le module spécifique (soit vraisemblablement par des variations d'orientation) n'est en fait pas très importante lorsque les types de bois sont considérés de façon globale (de l'ordre de 50%). Ceci est surtout marqué pour les feuillus où elle n'est que de ≈40%, ce qui est attribuable à la superposition de différents groupes de teneurs en extraits ayant des gammes différentes d'amortissement « intrinsèque ». Cependant, même en isolant autant que possible les bois de feuillus à faibles teneurs en extraits, la dispersion reste plus importante que sur les bois normaux de résineux. Par ailleurs, en comparant les coefficients de détermination obtenus en échelle logarithmique et linéaire on peut estimer que la dispersion est du même ordre de grandeur sur l'échantillon de feuillus de [Ono&Norimoto 1984] et sur le notre pris de façon globale. Pour les 25 espèces de résineux de ces auteurs E/ρ expliquerait de l'ordre de 60% des variations de tanδ.

Il ressort manifestement que deux effets principaux sont superposés : d'une part les effets d'orientation proprement dite (imputables aux AMFs en premier lieu) ; d'autre part, des différences de composition chimique de la matrice impliquant des différences marquées du comportement visqueux. Sur l'échantillon étudié, ce deuxième effet est imputable à la présence de métabolites secondaires se traduisant pour la grande majorité des bois concernés par une diminution importante du facteur de perte, sur toute la plage expérimentale de variations d'élasticité imputable aux variations d'orientations.

[28] En ce qui concerne les deux premiers facteurs, pour lesquels nous n'avons pas d'information sur nos échantillons (la proportion volumique de couche S2, et le taux de cristallinité), il semble, d'après des simulations numériques, que dans leurs plages de variations pour du bois normal leurs effets, sans être négligeables, sont modérés devant ceux de modifications de propriétés de la matrice (augmentation de l'humidité par exemple) dès lors que les orientations ne sont pas strictement axiales [Norimoto et al 1986 ; Gril 1987].

[29] Le terme « secondaire » est au sens de la chronologie de mise en place ; au sens pondéral on peut se demander si des composés additionnels représentant de l'ordre de 10% ou plus de la masse totale peuvent encore être considérés comme secondaires vis-à-vis des constituants de la matrice.

On pourrait toutefois considérer que dans certains cas au moins les extraits n'aient qu'un effet de masse ajoutée (simple remplissage des lumens par exemple). Dans cette optique le décalage pourrait être attribué à une diminution du E/ρ apparent ne correspondant pas à une représentation réelle du module des parois. Cependant, sur ce principe et en extrapolant les régressions « bois normaux », pour atteindre les valeurs les plus faibles de tanδ mesurées il faudrait que le module spécifique « sans extraits » soit de l'ordre de 50GPa (soit un module de parois de l'ordre de 75GPa) ce qui est irréaliste. Il est donc plus que probable que sur la plupart des types de bois étudiés, les composés secondaires jouent un rôle de « stabilisation viscoélastique » au niveau des parois elles-mêmes.

III.a.1.4. **Représentation en module spécifique complexe**

Dans une représentation du module dans le plan complexe, en divisant par la densité, on obtient un module spécifique complexe $[E^*/\rho = (E'/\rho) + i(E''/\rho)]$. E''/ρ est le module de perte spécifique, E'/ρ le module de conservation spécifique (peu différent du module d'élasticité spécifique déjà présenté).

En représentant le module spécifique dynamique dans le plan complexe (Figure 68 pour l'échantillon global et pour les bois de feuillus et de résineux), de façon très schématique, l'axe des X correspondrait à un indicateur des orientations des éléments (micro- ou mésoscopiques), et l'axe des Y à un indicateur de comportement plus ou moins visqueux des parois – à rotation donnée – soit *a priori* à des différences de composition chimique.

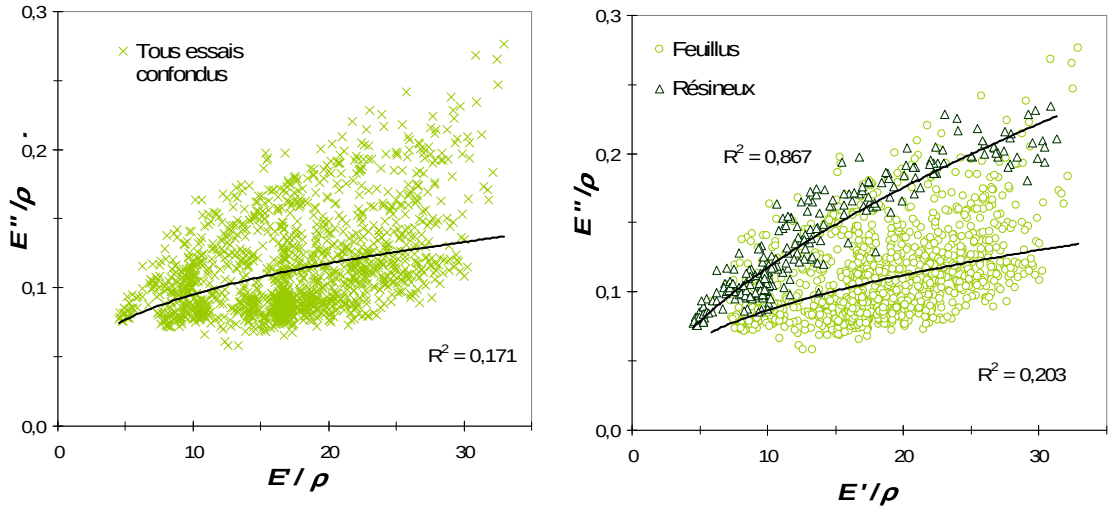


Figure 68 : Modules spécifiques de perte (E''/ρ) et de conservation (E'/ρ) pour l'ensemble de notre échantillon (à gauche) et pour les bois de résineux et de feuillus (à droite).

Sur l'ensemble de l'échantillon, les fortes variations de E'/ρ indiquent *a priori* une gamme étendue des orientations (AMFs, éventuellement superposés aux angles de fil locaux). De façon globale, et sur les bois de feuillus, le module de perte spécifique est peu dépendant du module de conservation spécifique ($R^2 \approx 0{,}17$ sur l'ensemble et 0,20 pour les feuillus). De façon contrastée, pour les résineux E''/ρ est fortement lié à E'/ρ. En termes de distribution de E'/ρ (Figure 69 à gauche), il semble nécessaire d'isoler les deux cas particuliers qui seront étudiés dans la partie IV, soit des bois de compression et/ou juvénile de résineux, et de Padouk d'Afrique avec de forts angles de fil locaux.

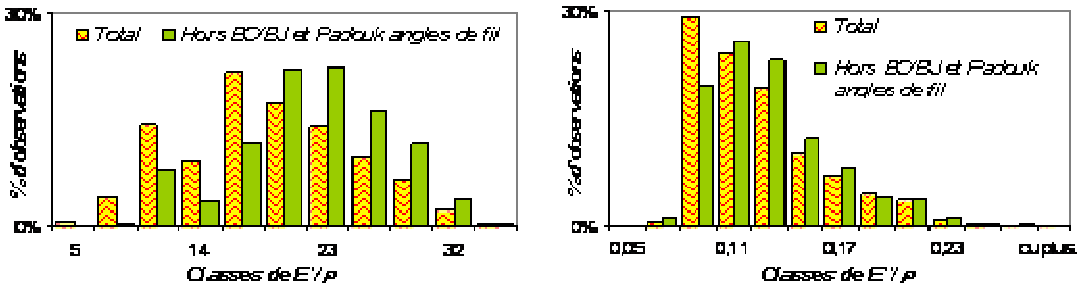


Figure 69 Distribution des E'/ρ et E''/ρ sur l'ensemble de l'échantillon (barres avec motifs), et en excluant (barres unies) les deux forts sous échantillons de résineux avec bois de compression et/ou juvénile (§IV.a) et de Padouk d'Afrique avec forts angles de fil locaux (§IV.b).

L'ensemble des autres types de bois étudiés présentent une majorité de E'/ρ « standards » et une distribution quasiment symétrique. La distribution de E''/ρ reste par contre asymétrique avec une prédominance des valeurs relativement faibles : 54% de l'échantillon présente des valeurs inférieures à la moyenne ; cette proportion atteint 60% si l'on inclut les bois de compression et le Padouk. Comme on l'avait déjà observé, la distribution des feuillus recouvre l'ensemble des variations de E''/ρ observables (« cas particuliers » compris ; Figure 68 à droite). Cette répartition peut être décomposée d'après les différents sous groupes de types de bois déjà définis (Figure 70 a, b, c, d).

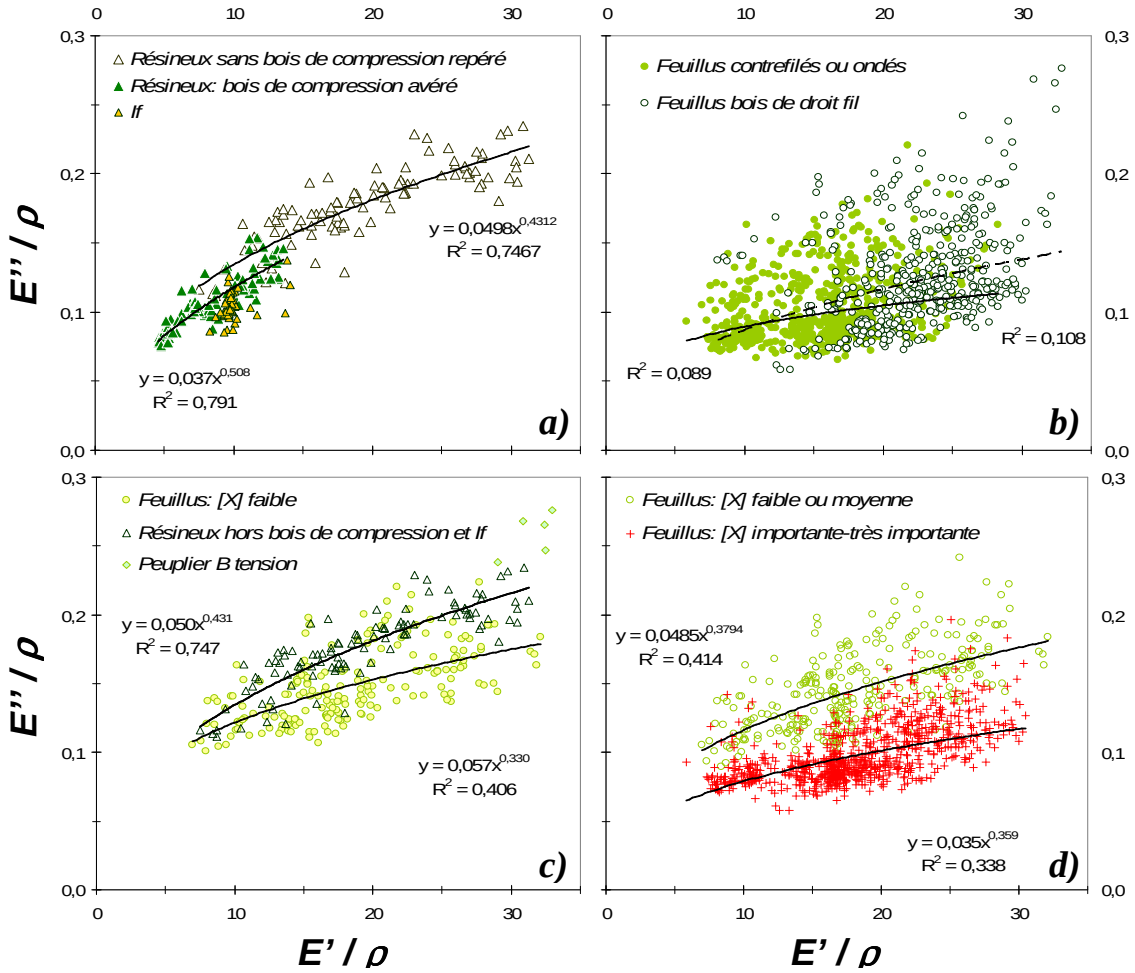


Figure 70 : Modules spécifiques de perte (E''/ρ) et de conservation (E'/ρ) pour les différents types de bois étudiés : a) Résineux : Bois normal, bois de compression et If ; b) Feuillus : bois de droit fil et bois contrefilés ou ondés ; c) Bois supposés « normaux » : sans bois de réaction ni forte teneur en extraits manifestes et projection de peuplier probablement de tension; d) Bois à teneurs en extraits : modérées, et (très) importante (cf. Figure 66).

Pour les bois de résineux (a), E''/ρ est peu dispersé et est fortement lié à E'/ρ, avec lequel il augmente nettement, autant pour les bois normaux que pour les bois de compression. On pourrait en déduire une plus grande importance des phénomènes d'orientation, que de composition chimique, pour ces bois (ou bien une forte corrélation entre AMF et composition chimique). Par contre, les bois de compression montrent en fait un caractère « visqueux » moins important que les bois normaux. Le bois d'If échantillonné présente un comportement similaire à ces bois de compression, avec de faibles modules de perte spécifiques. L'interprétation de ces deux cas particuliers n'est pas évidente ; pour l'If, on pourrait bien sur penser à une influence des composés secondaires, quoique aubier et duramen soient ici assez superposés ; il pourrait aussi s'agir de bois de compression non repéré. En tout état de cause, il semble qu'il y ait un ou deux effets atypiques de composition primaire et/ou secondaire réduisant le comportement « visqueux » de ces deux sous groupes de bois très peu rigides.

La différenciation des bois de feuillus selon l'orientation apparente de fil (b) se traduit comme prévu par une certaine séparation en termes de E'/ρ, mais qui n'est toutefois pas complète (effet superposé des AMFs). E''/ρ ne dépend sensiblement pas de E'/ρ, ni pour les bois de droit fil ni a fortiori pour ceux à fil changeant. La large plage de variation de E''/ρ observable pour les bois de feuillus apparaît globalement indépendante d'effets d'orientation. Par contre, pour des bois de feuillus à faibles teneurs en extraits (c), le module de perte spécifique montre une co-évolution avec E'/ρ. Cette relation est cependant beaucoup moins nette par rapport aux bois normaux de résineux. On retrouve la superposition d'une partie de ces feuillus aux résineux. Cependant leur dispersion sur E''/ρ bien plus marquée que dans le cas des résineux semble indiquer l'existence de plus nombreuses causes de variation du comportement visqueux pouvant être liées à la composition primaire et/ou aux composés secondaires « résiduels » (y compris précurseurs dans les aubiers), et/ou à d'éventuels autres facteurs aux échelles supérieures. A ce sujet, la projection dans ce graphique de bois de peuplier présentant les symptômes de bois tension montre un comportement très atypique avec à la fois des valeurs de E'/ρ dans la gamme maximale de l'échantillon, et de E''/ρ supérieures à tous les autres types de bois. En admettant qu'il s'agisse effectivement de bois de tension, le fort contraste entre le caractère apparemment très « visqueux »[30] de ce groupuscule, et celui au contraire réduit des bois de compression pose question quant aux effets de la composition chimique primaire, des AMFs, et de l'agencement des composants/couches de la paroi et de celui des cellules.

La comparaison (c et d) des bois de feuillus ayant différentes teneurs en extractibles met en évidence une forte discrimination en terme de E''/ρ, bien observable et assez constante pour toute la gamme de E'/ρ (cette dernière pouvant être reliée à la gamme d'orientations des éléments). A l'intérieur de chaque groupement, on retrouve une certaine liaison entre E''/ρ et E'/ρ, mais toujours beaucoup moins significative que pour les résineux, et qui est encore réduite dans le cas des bois à forts taux d'extraits. Les bois ayant des taux d'extraits importants présentent dans la grande majorité des modules de perte spécifiques fortement inférieurs au bois « normaux » de feuillus (i. e. bois non « modifiés » chimiquement) et de résineux. Les valeurs statistiques de E''/ρ pour les différents types de bois sont présentés sur la Figure 71.

[30] L'aspect « extractibles » n'est pas forcément à ignorer sur ce bois atypique de Peuplier : d'après [Rowe&Conner 1979], le bois de cœur contiendrait entre autres des acides gras, et des sucres simples. Les sucres simples étaient responsables d'une forte augmentation de l'amortissement de la Canne de Provence [Obataya et al 1999].

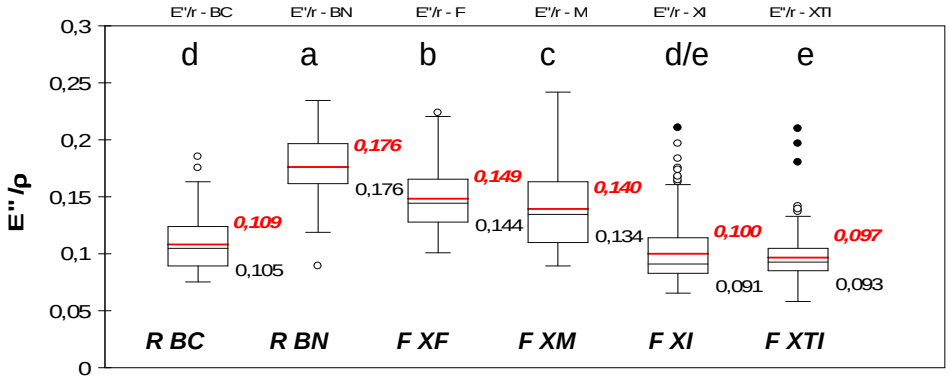


Figure 71 : Gammes de *E''/ρ* selon les types de bois (R : résineux, BC : bois de compression, BN : Bois normal ; F : feuillus à gammes de teneurs en extraits (%) : XF ≤4,5 ; 4,5< XM≤7,5 ; 7,5<XI≤15 et XTI >15). a→e : groupes différents au seuil de 0,05. En gras : moyenne ; trait fin : médiane ; boites : 1er au 3ème quartile.

La diminution du caractère « visqueux » exprimé par *E''/ρ* en fonction des gammes de teneurs en extraits est bien repérable, les bois classés dans les taux très importants présentant en moyenne des valeurs de module de perte spécifique inférieures de 35% à celles relevées pour les bois à relativement faibles taux d'extraits. Il apparaît cependant que l'influence des extraits ne soit pas à proprement parler directement quantitative, dans la mesure où : d'une part, les bois ayant des taux de 7,5-15% ne sont pas statistiquement différents de ceux ayant des taux d'extraits de 15-28% ; d'autre part la dispersion à l'intérieur de chaque sous groupe reste importante. Notamment, on peut remarquer que les plus petites valeurs de *E''/ρ* relevées sur les bois à teneurs en extraits ≤4,5% sont du même ordre que la moyenne du groupe de *[X]* compris entre 7,5 et 15% ; à l'opposé, tous les groupes de teneur en extraits >4,5% présentent une certaine proportion d'individus ayant des modules de perte spécifiques supérieurs à la valeur moyenne sur le groupe à faibles *[X]*. Ces disparités d'influence sont attribuables à plusieurs aspects : soit différences dans la nature des composés secondaires et/ou de leurs localisation dans la structure du bois, soit superposition à des variations de composition primaire, soit peut être effets liés à des échelles supérieures. On peut aussi garder en mémoire que les teneurs en extraits sont susceptibles de constituer un marqueur taxonomique et/ou de facteurs biologiques ou environnementaux au niveau de l'arbre, et que d'autres caractéristiques chimiques et microstructurales liées à ces aspects peuvent s'y superposer.

Par ailleurs, les valeurs moyennes de *E''/ρ* relevées pour les bois de compression sont également très faibles. A première vue, on pourrait les comparer à celles du groupe de feuillus à *[X]* 7,5-15%. Cependant, la forte dépendance et augmentation de *E''/ρ* en fonction de *E'/ρ* pour les résineux interdit une comparaison avec les feuillus dont le module de perte spécifique reste beaucoup plus stable vis à vis de *E'/ρ*.

III.a.2. Relations entre propriétés vibratoires et propriétés physiques

Des propriétés physiques telles que teneur en eau, retraits/gonflements, et paramètres colorimétriques, peuvent servir de descripteurs ou d'indicateurs pour mieux appréhender les importantes variations observées de propriétés vibratoires. Les corrélations entre ces paramètres sur l'ensemble de l'échantillon sont présentées sur le Tableau 9.

Tableau 9 : Matrice des corrélations entre propriétés physiques et vibratoires mesurées. MC : teneur en eau à l'équilibre ; g : gonflement partiel entre l'état anhydre et MC ; α : coefficients de gonflement (g/MC) ; L* : Luminance. En gras : valeurs significatives au seuil de 0,001.

N=1400	ρstab	E (Gpa)	E/ρ (GPa)	tanδ	E''/ρ	MC (%)	gL (%)	g Vol (%)	gR+gT-gL (%)	αL (%/%)	α Vol (%/%)	αR+αT-αL	L*
ρstab	1	**0,88**	**0,53**	**-0,59**	**-0,16**	**-0,39**	**-0,33**	**0,19**	**0,30**	**-0,34**	**0,43**	**0,50**	**-0,71**
E (Gpa)		1	**0,85**	**-0,67**	**0,17**	**-0,29**	**-0,48**	**0,37**	**0,54**	**-0,50**	**0,57**	**0,69**	**-0,52**
E/ρ (GPa)			1	**-0,67**	**0,46**	**-0,18**	**-0,58**	**0,39**	**0,60**	**-0,61**	**0,53**	**0,70**	**-0,26**
tanδ				1	**0,26**	**0,62**	**0,70**	**0,18**	**-0,10**	**0,66**	**-0,18**	**-0,41**	**0,69**
E''/ρ					1	**0,48**	**-0,15**	**0,60**	**0,64**	**-0,22**	**0,36**	**0,41**	**0,50**
MC (%)						1	**0,38**	**0,51**	**0,34**	**0,28**	**0,10**	-0,03	**0,60**
gL (%)							1	**0,09**	**-0,30**	**0,98**	**-0,11**	**-0,47**	**0,46**
g Vol (%)								1	**0,92**	0,00	**0,82**	**0,72**	**0,37**
gR+gT-gL (%)									1	**-0,38**	**0,83**	**0,87**	**0,18**
αL (%/%)										1	**-0,15**	**-0,51**	**0,40**
α Vol (%/%)											1	**0,93**	0,03
αR+αT-αL												1	**-0,12**
L*													1

Compte tenu du degré de liberté relativement important, la plupart des relations apparaissent significatives ; cependant, ces relations linéaires risquent en fait de cacher soit de très vagues tendances, soit des relations non linéaires, soit la présence de différents sous groupes de comportements différents.

Dans les paragraphes suivants, les allures effectives de certaines relations ressortant du tableau ci-dessus sont observées, telles que les relations entre teneur en eau et propriétés vibratoires ; entre densité, gonflements, module d'élasticité et module de perte ; et entre clarté (luminance) et densité, teneur en eau et paramètres d'amortissement.

III.a.2.1. **Relations entre teneur en eau et propriétés vibratoires**

L'influence importante de variations de teneur en eau sur les propriétés vibratoires des bois est connue [Sasaki et al 1988 ; Obataya et al 1998]. Toutefois, ici on se place non pas dans le cadre d'une évolution de teneur en eau pour un même bois vis-à-vis de variations de conditions ambiantes, mais dans celui de différentes humidités de stabilisation entre différents bois, à conditions hygrothermiques données. Les différences de teneurs en eau à l'équilibre observées peuvent en fait être envisagées sous deux aspects : pour leurs effets intrinsèques sur les propriétés viscoélastiques (≈teneur en eau = cause de différences); et comme indicateurs de la physico-chimie de la matière ligneuse (≈différences de teneur en eau et de propriétés vibratoires = deux effets liés à une même cause).

D'après la matrice de corrélations ci-dessus, il apparaissait une légère relation négative entre teneur en eau MC et module d'Young spécifique E'/ρ. En fait l'observation de cette relation ne permet pas de distinguer de tendance évidente (Figure 72). La très faible significativité entre espèces de l'influence des différences de teneur en eau en conditions « sec à l'air » sur la rigidité des bois était déjà notée par [Guitard et El Amri 1987].

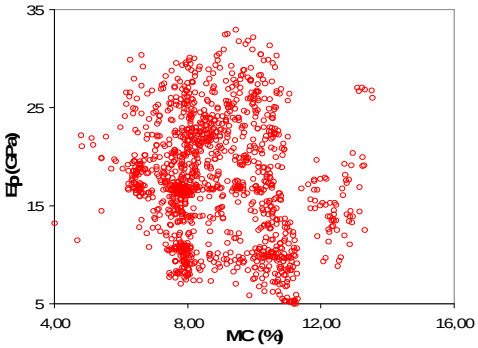


Figure 72 : Module spécifique et teneur en eau

Les coefficients de corrélations (positives)

relevés pour MC et tanδ (coefficient d'amortissement) et pour MC et E''/ρ (module de perte spécifique) apparaissent eux plus élevés (0,62 et 0,48 respectivement). [Sasaki et al 1988] montraient que l'humidité avait une influence bien plus marquée sur tanδ que sur E'/ρ. Les observations (Figure 73) laissent entrevoir une relation de forme exponentielle entre teneur en eau et coefficient d'amortissement, ainsi que –de façon plus vague !- avec le module de perte spécifique.

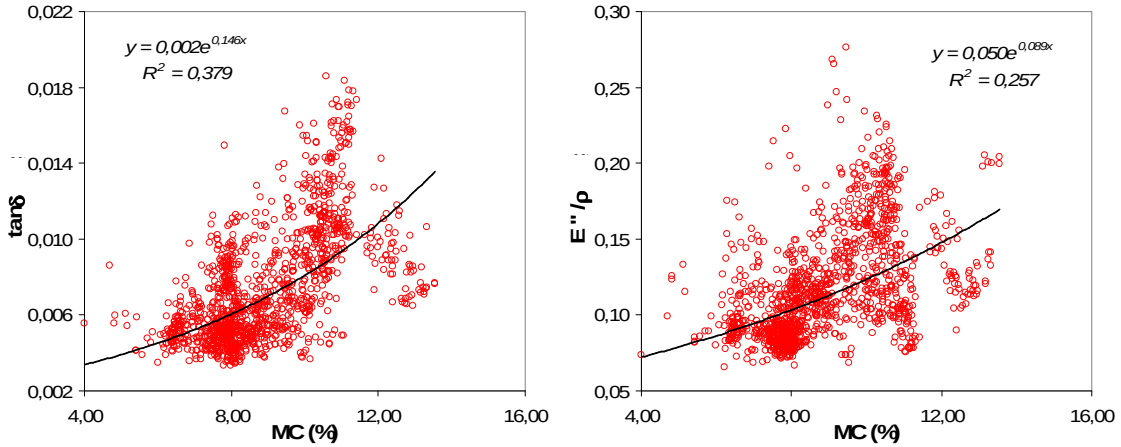


Figure 73 : Relation entre teneur en eau apparente et coefficient d'amortissement (à gauche) et module de perte spécifique (à droite).

Dans l'ensemble, les plus faibles valeurs de tanδ et de E''/ρ ont tendance à être concentrées sur une plage de MC de l'ordre de 5-9%. Pour un même bois soumis à différentes conditions d'humidité relatives, [Obataya et al 1998 & 2001] trouvaient un minimum de tanδ dans la gamme de teneurs en eau 4-8% (épicéa « natif » ou imprégné d'hæmatoxyline proche des extractibles du Pernambouc). Cependant, les distributions des données ci-dessus suggèrent en fait la présence de sous-groupes s'écartant manifestement de la tendance globale. Dans un premier temps, la prise en compte à la fois de la teneur en eau, et de E'/ρ, dans une corrélation multiple permet d'expliquer de l'ordre de 70% des variations observées de tanδ (au lieu de ≈50% en ne prenant en compte que E'/ρ), et environs 53% des variations de E''/ρ.

Par ailleurs, il est connu que les extractibles peuvent jouer un rôle sur les teneurs en eau à l'équilibre [Wangaard&Granados 1967 ; Hernàndez 1989 ; Choong & Achmadi 1991 ; Arévalo-Fuentes 2002 ; Nzokou & Kamden 2004]. Dans certains cas leur influence est surtout marquée pour des humidités relatives assez élevées (HR > 70%) ; dans d'autres cas elle peut être observable sur une large plage de HR, avec un effet d'abaissement [Matsunaga et al 2000 par exemple], ou au contraire d'élévation ([Cooper 1974] ; [Obataya & Norimoto 1999] dans le cas de sucres), des isothermes de sorption. Il est donc plus que probable qu'un effet des extraits sur les teneurs en eau stabilisées à 65%HR soit observable pour certains bois. Sur la Figure 74, les relations entre MC et paramètres d'amortissement sont observées en isolant les sous groupes de bois de feuillus à gammes de taux d'extraits «faible - moyenne » et « importante - très importante ».

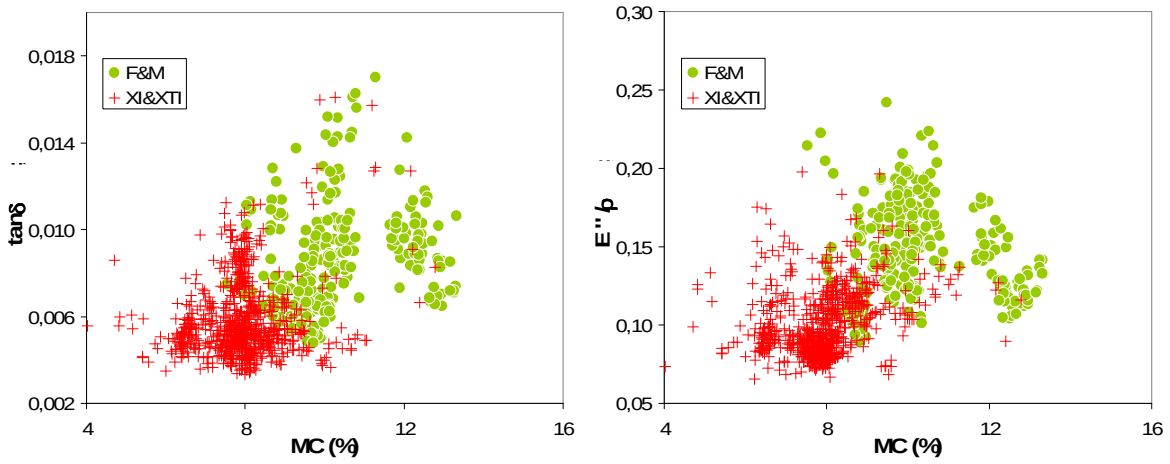


Figure 74 : Amortissement, et module de perte spécifique en fonction de la teneur en eau apparente, pour les bois de feuillus groupés par gammes de teneurs en extraits (F&M : « faible à moyenne » ≤8%; XI&XTI: « Importante - très importante » 8% à + de 20%).

Ces deux sous groupes présentent bien sur un certain degré de recoupement, mais peuvent néanmoins être caractérisés par les associations « forts taux d'extrait [X] – faibles MC, tanδ et E''/ρ », et « [X] modérés – MC, tanδ et E''/ρ plus élevés ». Par contre aucune tendance claire n'est observable entre MC et paramètres d'amortissement à l'intérieur de chaque sous-groupe. On retrouve en fait pour la teneur en eau à l'équilibre le même type de partition par le critère « extraits » qui a déjà été relevé pour tanδ et E''/ρ. Par ailleurs, sur la Figure 74, les classes d'extraits « faibles et moyennes » et « importantes et très importantes » ont été regroupées pour ne pas alourdir les graphiques. Les gammes de teneurs en eau diminuent en fait de façon significative entre chacun des groupes de bois de feuillus depuis les taux d'extraits « faibles » jusqu'à ceux « très importants » (Figure 75). Les bois de résineux (normaux et de compression) forment un seul groupe de teneur en eau, non différent des bois de feuillus à faibles [X].

On peut cependant remarquer que ces teneurs en eau « apparentes » ne correspondent pas strictement à l'humidité de la matière ligneuse primaire, puisqu'elles sont déterminées par rapport à la masse anhydre, qui inclut à la fois la masse de composés primaires, et de composés secondaires. Pour observer plus spécifiquement la teneur en eau de la matière ligneuse, on peut appliquer le correctif suivant [Hernandez 1989 ; Arévalo Fuentes 2002] :

$$MC_{corrigée} = MC_{apparente} / (1- [X])$$

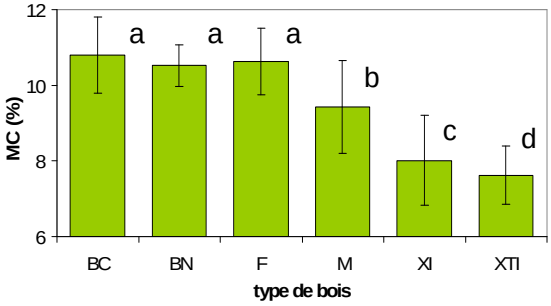


Figure 75 : Gammes de teneurs en eau pour différents types de bois (BC et BN : Bois de compression/bois normal de résineux ; F, M, XI, XTI : bois de feuillus à taux d'extraits croissants, cf Figure 71). a, b, c, d : groupes différents au seuil de 0,01.

La forte disparité entre groupes observée pour les teneurs en eau apparentes (Figure 76 gauche) est nettement réduite après correction (Figure 76 droite); les bois à taux d'extraits importants et très importants ne sont plus significativement différents entre eux, et présentent des « humidités de la matière ligneuse » moins éloignées de celles des bois à [X] moyens (écart de ≈-1% absolu), ou faibles (≤-2% absolu). Ces deux derniers groupes restent par contre significativement différents.

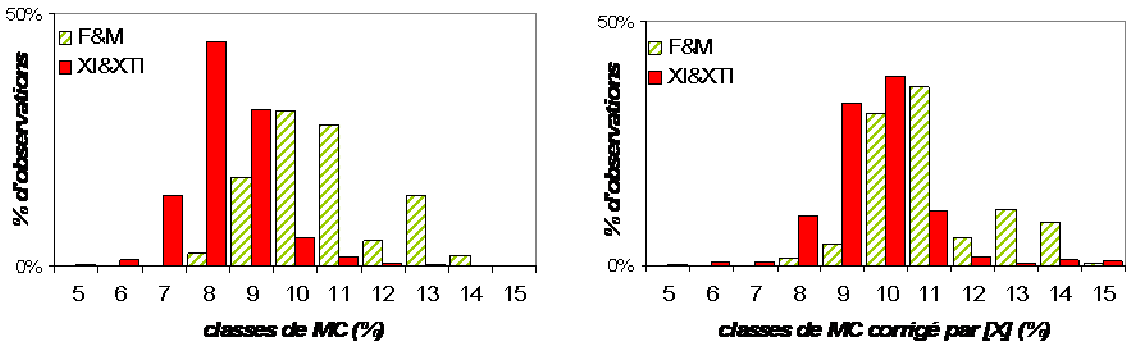


Figure 76 : Distribution des teneurs en eau « apparentes » (à gauche) et corrigées par le taux d'extrait (à droite), pour les groupes de [X] faibles - moyens (≤8%) et (très) importants (>8%). Ne sont représentés que les bois pour lesquels les données ou estimations de teneurs en extraits sont les plus fiables.

Ces « humidités de la matière ligneuse » sont représentées en parallèle des paramètres d'amortissement sur la Figure 77.

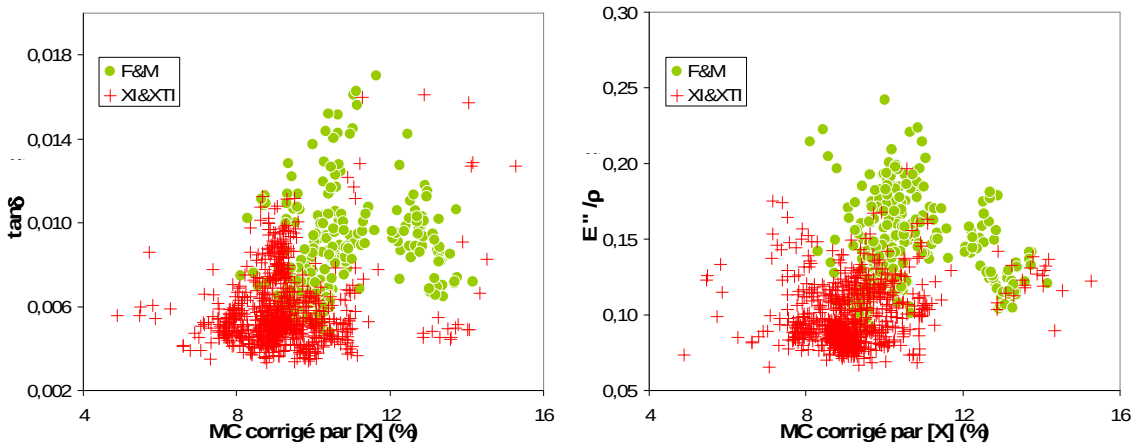


Figure 77 : Amortissement, et module de perte spécifique, comparés à la teneur en eau corrigée par le taux d'extraits.

Il n'apparaît pas de relation marquée, ni sur l'ensemble, ni à l'intérieur des groupes, entre ces teneurs en eau rapportées à la matière ligneuse et tanδ ni E''/ρ - dans cette gamme de différences d'humidité tout au moins. D'après les données de la littérature, s'il s'agissait d'un type de bois unique, les variations rencontrées dans cette gamme de MC de 7-14% (cas général) seraient vraisemblablement modérées devant les disparités observées ci-dessus. Pour de l'Epicéa lors du passage d'une condition stabilisée à 7%, à une condition stabilisée à 14%, les modifications approximatives de tanδ seraient de 5,8‰ vers 7,5‰, et celles de E''/ρ de 0,176 vers 0,212 d'après les données de [Obataya et al 1998]).

III.a.2.2. **Densité, gonflement partiel et propriétés vibratoires**

A la lecture de la matrice de corrélations présentée plus haut, on peut remarquer la très faible valeur du coefficient de corrélation obtenu entre densité et gonflement volumique, ces deux grandeurs étant pourtant connues pour être généralement bien corrélées. Si l'on représentait l'ensemble des données, une courbe de tendance sur le nuage de point serait presque horizontale, et de coefficient de détermination R^2 = 0,02. Il faut bien sûr garder en mémoire que ni les plages de variations d'humidités ni les dimensions des éprouvettes, ne sont optimales pour l'étude des variations dimensionnelles ; toutefois une telle absence de relation est trop flagrante pour n'être due qu'au « bruit » des incertitudes de mesures. On peut

observer à nouveau cette relation en effectuant un partitionnement entre bois de feuillus ayant différents taux d'extraits (Figure 78).

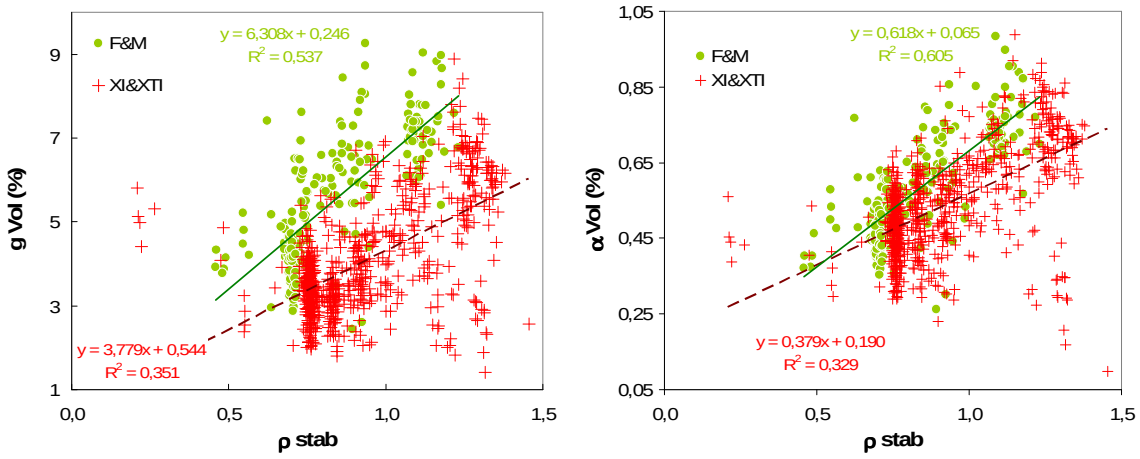


Figure 78 : Densité « sec à l'air » et gonflement volumique partiel (anhydre vers sec à l'air), pour les feuillus à taux d'extraits « faibles à moyens » (≤8% ; F&M) et « importants à très importants » (>8% ; XI & XTI). A gauche : gonflements partiels ; à droite : coefficients de gonflement (α = g/MC, en %/%).

En dissociant de grandes gammes de teneurs en extraits, des relations significatives ressortent entre densité et gonflements partiels (Figure 78 gauche). Pour des taux d'extraits faibles à modérés ces relations sont à la fois plus robustes et présentent des valeurs de gonflement plus importantes à densité donnée, que pour des [X] importantes où la dispersion est encore très élevée et où les valeurs de gonflement sont très généralement plus faibles. Ces résultats sont comparables à plusieurs études de la littérature ; entre autres [Chafe 1987] retrouvait une liaison normale à la densité en effectuant une « extraction mathématique » des composés secondaires. En soustrayant l'effet des différences de teneur en eau « sec à l'air » par une représentation des coefficients de gonflements (Figure 78 à droite), les différences globales entre ces types de bois sont réduites mais subsistent, et si la densité explique une bonne partie des variations de ces coefficients pour les bois à taux d'extraits modérés, la dispersion est toujours élevée pour les forts [X] avec notamment des sous-groupes très atypiques (principalement Fromager pour les faibles densités, Grenadille pour les fortes) .

Par ailleurs, si la relation expérimentale existant, pour des bois de chimie comparable, entre densité et retrait/gonflement volumique correspond à l'effet du volume de parois susceptible de présenter des variations dimensionnelles, le rapport entre variations dimensionnelles en directions transverse et longitudinale est lui lié aux angles de microfibrilles. Si l'on s'en tient toujours à une estimation d'effets dus à l'AMF de la couche S2, et dans une vue très simplifiée, plus cet angle sera important, plus le retrait/gonflement augmentera en direction axiale, et diminuera en direction transverse [Skaar 1988]. Dans cette optique, il doit exister une bonne relation entre gonflement transverse auxquel on soustrait le gonflement axial, et module d'élasticité spécifique (Figure 79).

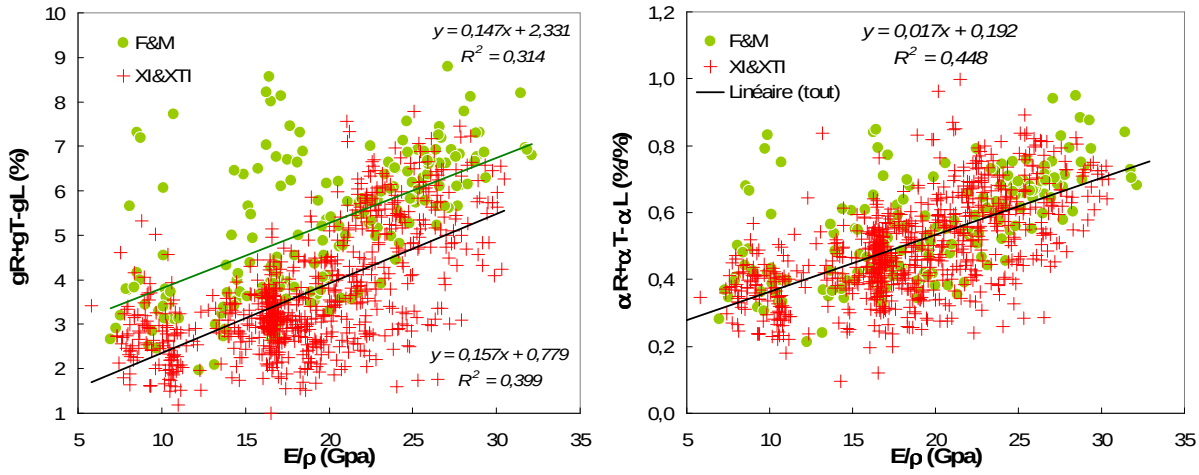


Figure 79 : Relation entre module d'Young spécifique, et gonflement « transverse moins longitudinal ». A gauche : gonflement partiel ; à droite : coefficient de gonflement (α = g/MC, en %/%).

Les gonflements partiels *R+T-L* montrent bien une co-évolution avec le module spécifique. La pente de cette relation est comparable pour les bois à taux d'extraits modérés, et importants, mais ces derniers montrent des gonflements partiels en moyenne bien inférieurs, quoiqu'il existe une dispersion importante dans chaque groupe et un recoupement marqué. Ces différences selon les groupes apparaissent principalement liées aux effets des extraits sur les teneurs en eau à l'équilibre, dans la mesure où les relations entre coefficients de gonflement et E'/ρ sont beaucoup moins différenciées que dans le cas des gonflements partiels (Figure 79 à droite, seule la droite de tendance globale est représentée ; les régressions individuelles sont : sur [X] modérées : *y = 0,016x + 0,250* ; sur [X] importantes à très importantes : *y = 0,016x + 0,191)*. La corrélation globale est aussi nettement plus forte.

La combinaison des gonflements *R+T-L* ressortait également de la matrice de corrélation (p.106) comme le paramètre physique le plus fortement lié au module de perte spécifique. Les coefficients de gonflements lui étaient par contre bien moins corrélés. Cette relation entre gonflements partiels « transverse moins axial » et E''/ρ (Figure 80 pour les différents types de bois) reflète en fait l'influence cumulée de E'/ρ, et de la teneur en eau/indicateur de taux d'extraits. Elle est ainsi plus explicative de E''/ρ (R^2≈0,4) que la seule prise en compte de E'/ρ (R^2<0,2) lorsque l'on considère l'échantillon global. Par contre les tendances à l'intérieur de chaque groupe (non représentées sur la Figure 80) sont bien plus faibles. On peut considérer qu'il s'agit plutôt d'un indicateur composé décrivant des types de bois.

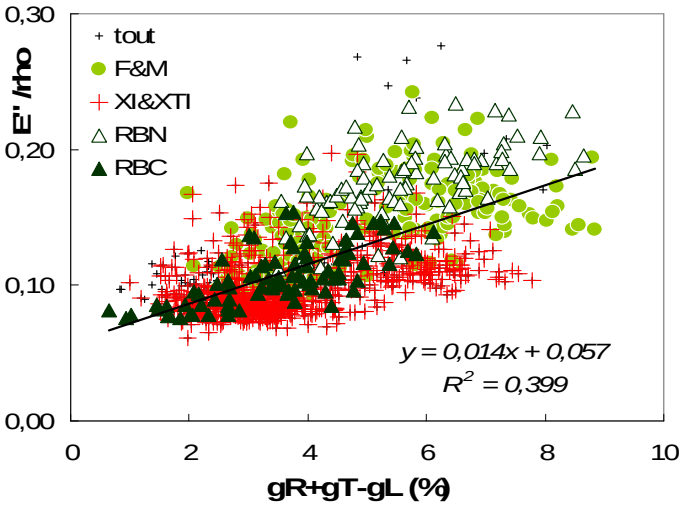


Figure 80 : Gonflements R+T-L et module de perte spécifique. Tendance sur l'ensemble et représentation des types de bois (F&M et XI&XTI : voir figures précédentes ; RBN : Bois Normaux de résineux, RBC de compression)

III.a.2.3. **Relations entre clarté et propriétés physiques et vibratoires**

D'après la matrice de corrélation présentée en introduction de ce chapitre, des relations significatives ressortent entre la luminance (ou clarté) L* et, notamment, la densité (Figure 81 à gauche), la teneur en eau à l'équilibre (Figure 81 à droite), et les paramètres d'amortissement (Figure 82). Compte tenu de l'importance connue de certains extraits dans la détermination des paramètres de couleur des bois d'une part, des différences de couleur associées aux bois de compression d'autre part, ces relations doivent ici encore être examinées par sous groupes de types de bois. Les autres paramètres colorimétriques ne sont pas inclus à cette échelle en raison des différences de poids des différentes essences, mais également parce que les variations de chromaticité notamment sont souvent relativement cachées par l'influence de la clarté lorsque des bois très contrastés sont comparés.

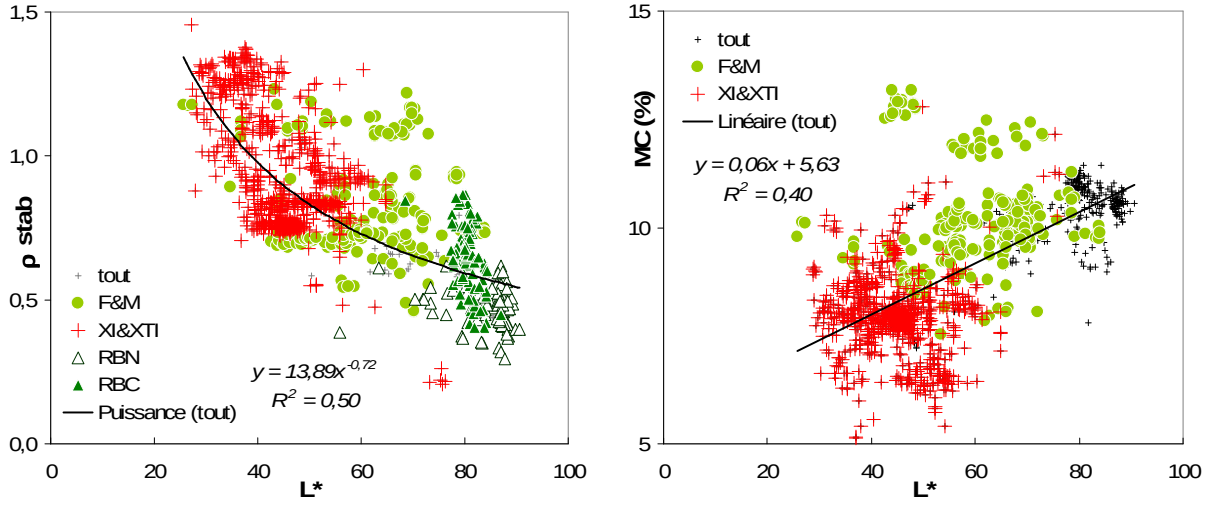


Figure 81 : Relations entre Luminance L* et densité (à gauche) et teneur en eau (à droite) « sec à l'air »; courbe de tendance sur l'ensemble et représentation des types de bois (F&M et XI&XTI : voir figures précédentes ; RBN : Bois Normaux de résineux, RBC de compression)

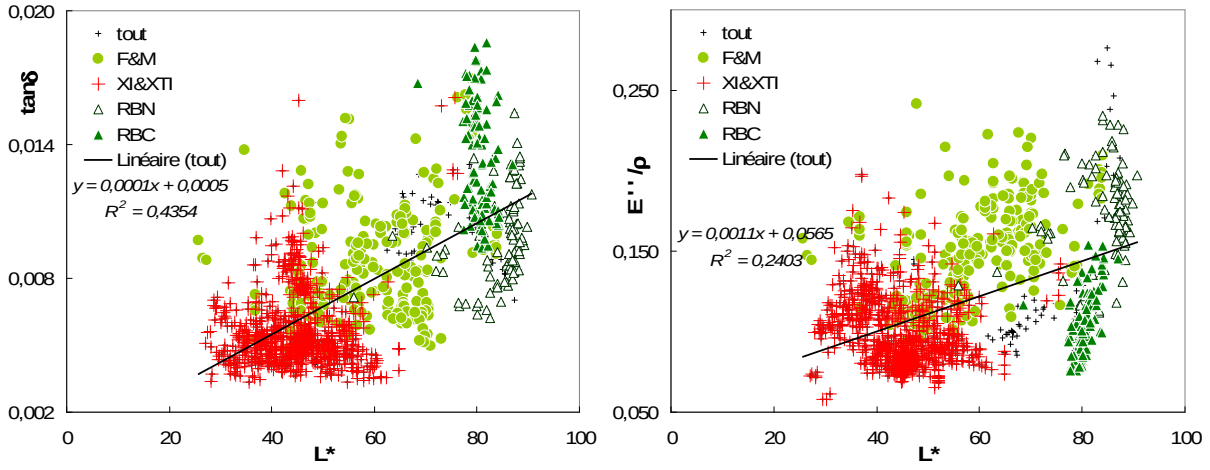


Figure 82 : Relation entre luminance et coefficient d'amortissement (à gauche) et module de perte spécifique (à droite) ; courbe de tendance sur l'ensemble et représentation des types de bois (légende : voir Figure 81).

La relation entre clarté et densité est bien marquée et, toutes proportions gardées, de dispersion relativement homogène. Par contre, les liens à la teneur en eau, au coefficient d'amortissement et à fortiori au module de perte spécifique, apparaissent plutôt comme de simples tendances qualitatives, avec une dispersion très hétérogène à la fois à l'intérieur des types de bois et entre eux.

III.a.2.4. **Discussion**

Pour la grande majorité des propriétés physico-mécaniques observées, les relations –plus ou moins claires- observables sur l'ensemble de l'échantillon peuvent en fait se décomposer en sous groupes assez bien différenciés, qui définissent des « zones » de propriétés, et correspondent aux groupements par différents types de bois.

Les teneurs en eau apparaissent assez bien corrélées aux coefficients d'amortissement, toutefois cette relation recouvre manifestement non pas un effet direct, mais des effets conjoints des extraits sur les comportements hygroscopique, et viscoélastique. La diminution « par pas » des teneurs en eaux apparentes pour les gammes croissantes de teneurs en extraits est très significative chez les feuillus, l'effet quantitatif des taux d'extraits étant plus marqué que dans le cas des paramètres d'amortissement. Ces effets « extractibles » sont prédominants devant les différences potentielles entre feuillus à faibles [X], et bois normaux ou de compression de résineux, qui ne sont globalement pas significatives dans ces conditions hygrothermiques.

L'influence globale des extractibles sur la diminution des teneurs en eau se répercute sur les gonflements partiels en provoquant un décalage vers des valeurs plus faibles de gonflement dans les relations normales à la densité/volume de matière d'une part, au module d'Young spécifique pris comme indicateur des angles de microfibrilles d'autre part. Il ne semble ici pas approprié de chercher à observer les éventuels effets intrinsèques des extraits sur les coefficients de gonflement (% de variations dimensionnelles rapportés aux % de variations d'humidité). Les gonflements partiels « transverse moins axial » peuvent donner un début d'indication quand aux gammes de module de perte spécifique, dans la mesure où ils combinent des effets d'orientation et de composition chimique/taux d'humidité.

Par ailleurs un effet de ces relations « par groupes » se traduit par la relation apparente assez prononcée relevée sur notre échantillon entre densité et coefficient d'amortissement, alors que ces deux paramètres sont théoriquement indépendants. Effectivement, de façon globale les bois les plus denses étudiés sont ceux qui présentent à la fois de forts taux d'extraits, de faibles teneurs en eau, et souvent des modules spécifiques dans la gamme supérieure. Il ne s'agit pas d'une relation exprimant directement un effet de la densité, mais plutôt d'un descripteur de différents types de bois. Ces remarques peuvent s'étendre à l'observation qui était faite de corrélations apparaissant également marquées entre tanδ et E qu'entre tanδ et *E/ρ*.

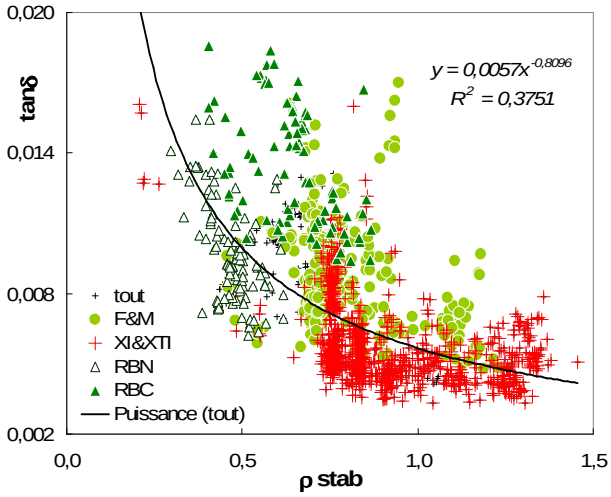


Figure 83 : Coefficients d'amortissement et densité par groupes de types de bois (marques ; voir Figure 81) et relation globale apparente (courbe).

III.a.3. **Conclusion sur les relations entre propriétés à l'échelle de petites pièces de bois**

Dans ce chapitre, le comportement vibratoire élémentaire en direction axiale (module d'Young spécifique et coefficient d'amortissement en conditions hygrothermiques fixes, dans la gamme de fréquence 200-600Hz) a été étudié sur des types de bois très contrastés, à travers

≈1400 séries d'essais comprenant 80% de bois de feuillus, dont une grande majorité d'essences tropicales. Ces séries d'essais comprennent aussi quelques mesures physiques simples (densité, variations dimensionnelles entre l'état anhydre et l'état « sec à l'air », colorimétrie). La confrontation des données à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions, de façon globale et en isolant des types de bois clairement identifiables, permet de conforter les « lois » empiriques connues. D'un autre côté elle met aussi en évidence un haut degré de variabilité non expliquée par ces relations, mais pour lequel on peut formuler des hypothèses réalistes quant à l'importance des critères de composition chimique. Notamment on peut étendre à un bon nombre d'essences les observations concernant l'influence des composés secondaires sur les facteurs d'amortissement.

On peut retenir de cette première approche les points suivants :

- La relation forte existant entre module d'Young spécifique et coefficient d'amortissement est retrouvée, avec une bonne cohérence tant qualitative que quantitative vis-à-vis des « lois » empiriques de la littérature [Ono & Norimoto 1983]. En terme d'interprétation microstructurale cette relation est attribuable à un effet d'entraînement de la matrice viscoélastique par les microfibrilles cristallines et peut être directement reliée aux phénomènes d'orientation.
- Cette relation ne constitue cependant qu'une tendance générale et n'explique qu'environs la moitié des variations observées sur les coefficients d'amortissement. Elle est toutefois relativement plus robuste dans le cas de bois de résineux que de feuillus.
- Les bois de feuillus contenant des taux importants d'extractibles présentent de façon générale des coefficients d'amortissement remarquablement plus faibles (près d'un tiers en moyenne) que ceux en contenant peu, ou que les résineux. En parallèle, de fortes teneurs en extraits se traduisent globalement par une diminution de l'hygroscopicité de ces bois. Celle-ci n'apparaît cependant pas directement responsable de la diminution d'amortissement tout du moins dans notre plage de conditions expérimentales. L'effet des extractibles sera étudié de façon plus quantitative sur deux espèces dans le second chapitre de la partie 4.
- En contrepoint à cette tendance globale, il faut remarquer des cas où de fortes teneur en extraits n'ont que peu d'influence, ou a contrario des amortissements faibles pour des bois auxquels on connaît peu d'extraits.
- Les bois de compression de résineux présentent un caractère proportionnellement moins amortissant que les bois normaux des mêmes arbres et espèces. Ce comportement apparaît paradoxal compte tenu des caractéristiques structurales et chimiques connues de ce type de bois, et fera l'objet d'une analyse plus détaillée dans le premier chapitre de la partie 4.

Cependant, tout au long de ce chapitre, des groupuscules « atypiques » ont pu être remarqués, correspondant à des échantillons et/ou essences bien identifiables. Par ailleurs, l'importante dispersion résiduelle à l'intérieur des grands groupes de types de bois demande clairement à ce que les différentes espèces –et éventuellement types de bois à l'intérieur de l'espèce- soient détaillés.

III.b. Classements : Résultats pour les différentes espèces

L'analyse à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions a permis de confirmer ou dégager de grandes tendances descriptives des propriétés vibratoires considérées et particulièrement pour les coefficients d'amortissement, en terme de corrélations entre propriétés physico-mécaniques, et en terme de grands groupes de types de bois. A l'intérieur de ces grandes tendances, la dispersion résiduelle reste toutefois prononcée.

Dans cette section, la notion de « type de bois » est d'abord réduite à l'échelle inter-spécifique (éventuellement intra- lorsque l'échantillonnage le permet). Des regroupements entre ces types de bois « élémentaires » sont alors recherchés, cette fois en partant des propriétés effectivement mesurées, plutôt que sur des critères globaux tels qu'adoptés ci-dessus.

Dans un premier temps, les données moyennes de propriétés vibratoires, physiques et colorimétriques qui ont été obtenues sont présentées pour chaque espèce (et type de bois dans l'espèce le cas échéant). Pour ces différentes propriétés, les répartitions des types de bois sont observées, ainsi qu'un premier niveau de classement, univarié. Les corrélations entre propriétés sont ensuite réexaminées à cette échelle interspécifique. Des analyses multivariables devraient permettre de mieux visualiser et définir des regroupements d'espèces/types de bois prenant en compte plusieurs propriétés. Les regroupements, uni- ou multi- variés, peuvent être interprétés purement en termes mécaniques/physiques, ou bien par l'appartenance d'essences « références » en facture instrumentale à certaines classes.

Les variations de propriétés et leurs interrelations sont ensuite étudiées à l'intérieur de groupes, ou d'espèces pour celles suffisamment échantillonnées. Notamment, lorsque des aubiers sains avaient pu être obtenus, on comparera leur comportement à celui des bois de cœur correspondants.

Enfin, les données moyennes disponibles de composition chimique et particulièrement de taux d'extractibles sont mises en relations avec les propriétés physico-mécaniques mesurées sur l'arbre, ou plus généralement sur l'espèce. Une comparaison est aussi effectuée entre les critères physico-chimiques de présélection qui avaient été adoptés dans l'optique de repérer des bois faiblement amortissants, et les résultats effectivement obtenus.

III.b.1. **Récapitulatif par essence et type de bois**

Dans une optique d'accessibilité des données, il semble utile de présenter sous forme tabulaire les valeurs moyennes (et coefficients de variations le cas échéant) correspondant à chaque essence (et éventuellement type de bois pour quelques espèces : aubier/duramen ; bois normal/bois de compression), y compris pour les bois peu ou très peu échantillonnés. Le Tableau 10 synthétise ces résultats pour les ≈70 types de bois étudiés. Les données sont organisées par ordre alphabétique de noms botaniques, et les familles sont rappelées, ainsi que les effectifs.

Ces résultats concernent, comme dans la section précédente, l'ensemble des sous - échantillonnages. La structure de cet échantillon global appelait donc certaines pondérations et/ou tris liés aux disparités d'effectif ou aux spécificités de prélèvement:

-Les données statistiques ont tout d'abord été calculées pour chaque pièce de bois initiale et les *N* éprouvettes en provenant. Lorsque l'on disposait de plusieurs pièces initiales par essence (différentes positions, différents arbres, ou différents stocks/qualités pour les bois de facture instrumentale), les valeurs présentées ici correspondent aux moyennes et variations entre ces différentes pièces (le nombre d'éprouvettes par pièce n'étant pas toujours uniforme).

-Les mesures concernant des éprouvettes ayant de trop forts angles de fil locaux n'ont pas été prises en compte dans les calculs lorsque ces orientations pour des petites dimensions n'étaient pas vraiment représentatives des conditions d'emploi ; de même pour des éprouvettes débitées dans le plan tangentiel à l'échelle d'un cerne de croissance par exemple. Cela concerne environs 160 éprouvettes de l'échantillon global, dont majoritairement une part de l'échantillon de Padouk (second chapitre partie 4). Les éprouvettes ayant subi différents traitements (n≈230) ne sont bien sûr pas incluses.

- Les données concernant les aubiers, ou les bois de réaction, sont signalées par les codes A pour aubier, BC pour bois de compression, BT pour bois de tension. Lorsque plusieurs stocks/arbres étaient représentés pour le bois de cœur (ou le bois normal), mais un seul pour à la fois aubier et duramen (ou à la fois bois normal et de compression), ce dernier a été isolé (symbole '*' après le code de type de bois) pour permettre la comparaison entre types de bois.

Il faut par ailleurs bien sûr garder en mémoire que la variabilité intra spécifique est fort susceptible de recouper largement les variations entre espèces présentées ci-dessous. Notamment, pour les bois peu échantillonnés il est évident que les résultats sont présentés à titre indicatif.

Les propriétés présentées sont toutes pour des bois « sec à l'air » (stabilisés 3 semaines à 20°C et 65%HR). Elles comprennent : densité ρ, Module d'Young dynamique E', module spécifique E'/ρ, coefficient d'amortissement tanδ (exprimé ici en ‰), module de perte spécifique E''/ρ, pour ce qui est des propriétés premièrement impliquées dans le comportement vibratoire. Y sont ajoutées comme propriétés physiques : teneur en eau à l'équilibre MC, gonflement volumique partiel entre l'état anhydre et l'état sec à l'air gVol, coefficient de gonflement αVol (= % de variation dimensionnelle par % de variation de teneur en eau), ainsi que les paramètres colorimétriques CIELab : L* (luminance ou clarté), a* (axe des rouges), b*(axe des jaunes).

La colonne « Libellé » de ce tableau présente aussi les abréviations des noms de bois qui seront utilisées dans la suite des analyses (graphiques, tableaux de regroupements, etc.). Ces libellés sont basés sur les noms communs, et correspondent de façon générale à leurs 4 premières lettres (auxquelles sont éventuellement ajoutées A, D, BC…pour le type de bois). Les Palissandres sont désignés par P.xxx.

Un premier niveau de description de la structure de ces données est présenté au paragraphe suivant, à travers les distributions de propriétés par type de bois, et des classements unidimensionnels par grands groupes.

Tableau 10: Valeurs moyennes (m) des propriétés vibratoires et physiques (et coefficients de variation (cv) le cas échéant), pour les différentes espèces et types de bois. Les données sont présentées par ordre alphabétique de nom botanique, sauf pour les bois mal ou non identifiés qui sont en fin de tableau. « A/D/BR » : type de bois : A= Aubier, D= Duramen de bois normal, BC : Bois de compression manifeste, BT= Bois de tension probable ; Dp= éprouvettes poncées ; * : un arbre est isolé du stock pour la comparaison de différents types de bois. Libellé : abréviation utilisée dans la suite. N = effectif (ép : comptage des éprouvettes ; pi : comptage des pièces de bois initiales). Les séparations de lignes marquent soit le passage entre résineux/feuillus tempérés/feuillus tropicaux ; soit regroupent les espèces d'un même genre ; ou les types de bois d'une même espèce.

FAMI	*Nom botanique*	Nom vernaculaire	A /D /BR	Libellé	*N*		ρstab		E' (Gpa)		E'/ρ (Gpa)		tanδ (‰)		E"/ρ (Gpa)		MC (%)		gVol (%)		aVol (%/%)		L*		a*		b*	
					ép	*pi*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*
PINA	*Abies alba*	Sapin	D	Sapi	4	*1*	0,54	*4*	15,8	*8*	29,1	*5*	6,72	*4*	0,195	*3*	10,1	*2*	6,5	*15*	0,63	*14*	80	*2*	12	*4*	26	*2*
ACER	*Acer pseudoplatanus*	Erable	Dp	ErFr	1	*1*	0,64		6,4		10,1		16,11		0,163		10,7		5,2		0,48		76		11		20	
ACER	*Acer sp.*	Erable Américain	Dp	ErAm	1	*1*	0,72		7,3		10,1		11,52		0,116		10,2		6,2		0,60		76		11		22	
CAES	*Afzelia bipendensis*	Doussié	D	Dous	13	*5*	0,82	*5*	19,2	*14*	23,2	*10*	4,23	*7*	0,098	*13*	6,8	*8*	2,8	*19*	0,41	*19*	48	*3*	19	*2*	26	*4*
CAES	*Bocoa prouacensis*	Boco	A	BocoA	23	*3*	1,11	*3*	30,6	*13*	27,4	*10*	6,05	*11*	0,165	*3*	10,0	*2*	7,5	*3*	0,74	*5*	68	*3*	16	*7*	35	*6*
			D	BocoD	35	*5*	1,26	*2*	32,3	*12*	25,6	*10*	4,19	*12*	0,106	*7*	8,2	*5*	6,5	*6*	0,79	*2*	38	*13*	10	*26*	13	*38*
MORA	*Brosimum guianense*	Amourette	D	Amou	39	*10*	1,32	*2*	29,1	*9*	22,1	*8*	5,48	*10*	0,120	*6*	8,3	*7*	5,9	*11*	0,71	*8*	37	*6*	13	*16*	14	*17*
			D*	Amou	2	*1*	1,28	*6*	29,2	*1*	22,8	*7*	5,04	*5*	0,115	*2*	9,5	*1*	6,8		0,70		43		16		21	
		Am. "Franche"	Df*	AmouFr	2	*1*	1,15	*4*	27,9	*7*	24,2	*3*	5,39	*15*	0,130	*13*	9,6	*1*	6,6	*2*	0,67	*1*	52	*4*	20	*1*	30	*4*
MORA	*Brosimum rubescens*	Satine	D	Sati	16	*3*	1,02	*8*	24,0	*4*	23,7	*12*	4,56	*10*	0,109	*21*	9,4	*23*	5,5	*24*	0,60	*6*	47	*10*	22	*6*	24	*17*
MORA	*Brosimum utile*	Takina / Sande	D	Taki	5	*1*	0,47	*3*	10,0	*11*	21,0	*8*	8,64	*15*	0,181	*15*	10,4	*4*	4,0	*6*	0,40	*9*	70	*1*	13	*3*	26	*4*
BUXA	*Buxus sempervirens*	Buis	D	Buis	6	*2*	0,93	*0*	8,6	*12*	9,3	*12*	15,31	*9*	0,141	*3*	10,8	*3*	8,1	*9*	0,75	*11*	78	*1*	12	*8*	35	*13*
CAES	*Caesalpinia echinata*	Pernambouc	D	Pern	55	*15*	1,01	*9*	21,1	*16*	21,0	*12*	4,37	*14*	0,090	*9*	8,0	*10*	4,5	*11*	0,62	*12*	53	*9*	26	*10*	38	*14*
BETU	*Carpinus betulus*	Charme	D	Char	9	*2*	0,74	*0*	15,0	*2*	20,2	*2*	9,51	*1*	0,192	*0*	9,9	*0*	5,6	*5*	0,56	*5*	83	*1*	8	*3*	18	*1*
MELI	*Cedrela odorata*	Cedro	Dp	Cedr	1	*1*	0,48		9,7		20,4		7,85		0,160		10,0		4,1		0,40		63		17		28	
BOMB	*Ceiba pentandra*	Fromager	D	From	5	*1*	0,22	*10*	2,1	*18*	9,4	*13*	14,02	*12*	0,130	*7*	11,2	*6*	5,1	*10*	0,45	*14*	75	*2*	11	*3*	22	*5*
LAUR	*Chlorocardium rodiaei*	Greenheart	D	Gree	4	*1*	1,05	*1*	28,7	*2*	27,4	*2*	4,30	*4*	0,118	*3*	7,3	*1*	4,6	*5*	0,63	*5*	49	*0*	14	*4*	25	*4*
CUPR	*Cupressus sempervirens*	Cyprès d'Italie	Dp	Cyprl	1	*1*	0,45		5,7		12,7		10,32		0,131		10,2		4,8		0,47		76		13		30	
CUPR	*Cupressus sp.*	Cyprès	Dp	CyprSp	1	*1*	0,46		7,9		17,3		9,30		0,161		9,7		4,8		0,49		74		11		22	
PAPI	*Dalbergia latifolia*	Palissandre Indien	Dp	P.Ind	1	*1*	0,75		13,3		17,7		7,28		0,129		7,8		4,8		0,62		39		10		13	
PAPI	*Dalbergia (maritimensis?)*	Pal. Mada. de Rose	D	P.Rose	5	*2*	1,07	*10*	22,0	*12*	20,5	*2*	4,02	*17*	0,082	*15*							29	*5*	8	*16*	6	*17*
PAPI	*Dalbergia melanoxylon*	Grenadille	D	Gren	10	*2*	1,31	*1*	20,0	*13*	15,3	*12*	5,77	*14*	0,089	*26*	6,1	*48*	2,7	*4*	0,43	*37*	29	*7*	3	*45*	3	*50*
PAPI	*Dalbergia nigra*	Palissandre de Rio	Dp	P.Rio	1	*1*	0,81		16,2		20,0		6,96		0,139		8,0		5,4		0,67		40		15		19	
PAPI	*Dalbergia retusa*	Cocobolo	Dp	Coco	1	*1*	0,95		10,9		11,5		8,61		0,099		4,7		3,1		0,65		36		16		23	
PAPI	*Dalbergia sp.*	Palissandre Manary	D	P.Man	44	*8*	0,96	*12*	19,1	*22*	19,6	*11*	4,62	*9*	0,091	*16*	7,7	*16*	3,5	*27*	0,47	*22*	42	*8*	13	*13*	13	*22*
PAPI	*Dalbergia? sp.?*	Palissandre de Bahia	D	P.Bah	3	*1*	1,15	*2*	14,6	*5*	12,7	*4*	4,65	*7*	0,059	*3*							30	*2*	8	*6*	6	*11*

FAMI	*Nom botanique*	Nom vernaculaire	A /D /BR	Libellé	*N*		ρstab		E' (Gpa)		E'/ρ (Gpa)		tanδ (‰)		E''/ρ (Gpa)		MC (%)		gVol (%)		aVol (%/%)		L*		a*		b*	
					ép	*pi*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*
CAES	*Dialium cochinchinense*	Xody / Keranji	D	Xody	4	*1*	1,10	*2*	25,9	*4*	23,6	*5*	6,42	*13*	0,152	*17*	9,4	*3*	6,5	*7*	0,73	*6*	37	*0*	12	*2*	14	*1*
CAES	*Dialium pachyphyllum*	Omwong / Eyoum	D	Omwo	8	*1*	1,10	*1*	27,2	*8*	24,8	*8*	6,51	*9*	0,161	*8*	8,8	*1*	6,4	*8*	0,73	*7*	47	*3*	16	*6*	21	*7*
			A*	OmwoA	4	*1*	0,90	*0*	21,1	*2*	23,4	*2*	6,57	*10*	0,154	*10*	9,2	*4*	5,5	*11*	0,63	*9*	65	*2*	15	*0*	24	*1*
			D*	OmwoD	4	*1*	0,92	*3*	24,7	*6*	26,9	*4*	5,80	*8*	0,156	*10*	9,1	*3*	6,2	*5*	0,72	*3*						
EBEN	*Diospyros sp.*	Ebene Madagascar	D	Eben	3	*1*	1,18	*0*	19,3	*1*	16,4	*1*	9,13	*5*	0,150	*5*	10,0	*2*	8,6	*4*	0,85	*5*	27	*3*	2	*7*	2	*7*
CAES	*Guibourtia arnoldiana*	Bubinga	D	Bubi	4	*1*	0,84	*1*	21,2	*1*	25,3	*1*	5,64	*4*	0,143	*3*	9,2	*1*	6,4	*4*	0,68	*4*	55	*2*	17	*2*	27	*2*
JUGL	*Juglans nigra*	Noyer d'Amérique	Dp	Noye	1	*1*	0,58		7,2		12,3		8,04		0,099		8,7		4,6		0,53		50		9		13	
MELI	*Khaya senegalensis*	Acajou Cailcédrat	D	Ac.Cail	4	*1*	0,85	*0*	7,7	*5*	9,0	*5*	11,96	*6*	0,107	*3*	9,7	*1*	4,7	*5*	0,48	*4*	43	*2*	16	*1*	20	*2*
LAUR	*Licaria cayennensis*	Cèdre canelle	D	Canel	16	*7*	1,01	*5*	26,2	*14*	25,8	*9*	5,65	*8*	0,145	*7*	6,8	*5*	3,7	*12*	0,54	*13*	35	*2*	14	*9*	15	*5*
MYRI	*Mauloutchia sp.*	Mahafotra	D	Maha	5	*1*	0,71	*1*	18,6	*8*	26,0	*8*	7,67	*7*	0,199	*7*	10,5	*1*	6,2	*9*	0,58	*9*	67	*2*	11	*8*	20	*7*
MORA	*Morus mesozygia*	Difou	D	Difo	3	*1*	0,87	*2*	16,6	*8*	19,0	*7*	5,09	*1*	0,097	*7*	8,0	*4*	4,2	*12*	0,55	*2*	51	*0*	20	*0*	30	*0*
CAES	*Peltogyne venosa*	Amarante	D	Amar	8	*2*	0,80	*0*	21,1	*6*	26,3	*7*	5,63	*7*	0,147	*0*	9,4	*1*	5,2	*5*	0,55	*5*	44	*0*	21	*6*	9	*13*
PINA	*Picea abies*	Epicéa	Luth	EpiLut	18	*7*	0,46	*6*	12,6	*10*	27,2	*7*	7,88	*7*	0,213	*5*	10,7	*1*	6,1	*1*	0,59	*2*	84	*2*	9	*8*	25	*2*
			D	EpiBN	31	*13*	0,54	*14*	10,6	*26*	20,0	*24*	9,14	*13*	0,178	*19*	10,4	*4*	7,1	*12*	0,73	*11*	86	*3*	9	*23*	24	*14*
			BC	EpiBC	40	*14*	0,70	*16*	7,5	*17*	10,8	*20*	11,09	*8*	0,119	*17*	10,8	*4*	5,6	*8*	0,56	*5*	81	*2*	13	*13*	28	*9*
PINA	*Pinus caribaea*	Pin des Caraïbes	D	PinCar	3	*1*	0,36	*4*	3,1	*4*	8,6	*2*	13,21	*3*	0,114	*2*	10,1	*2*	4,6	*8*	0,45	*6*	82	*3*	12	*13*	30	*9*
PINA	*Pinus laricio*	Lariciu	D	Lari	5	*1*	0,51	*4*	9,4	*5*	18,4	*5*	8,83	*6*	0,162	*2*	9,6	*3*	5,8	*10*	0,60	*12*	72	*2*	17	*3*	32	*1*
PINA	*Pinus patula*	Pin patula	D	PinPat	4	*1*	0,54	*9*	16,4	*10*	30,1	*3*	6,61	*5*	0,199	*7*	10,6	*1*	7,2	*16*	0,67	*16*	79	*4*	12	*14*	29	*9*
PINA	*Pinus pinaster*	Pin maritime	D	PinMBN	18	*7*	0,42	*6*	5,8	*16*	13,7	*12*	11,96	*10*	0,162	*5*	10,5	*1*	5,6	*4*	0,57	*6*	87	*1*	8	*7*	22	*5*
			BC	PinMBC	33	*11*	0,57	*17*	3,4	*21*	6,1	*32*	15,80	*9*	0,094	*21*	11,0	*2*	5,7	*11*	0,55	*10*	80	*2*	13	*9*	28	*8*
PINA	*Pinus sylvestris*	Pin sylvestre	D	PinSBN	14	*5*	0,48	*12*	8,3	*16*	17,2	*13*	10,59	*13*	0,180	*2*	10,5	*2*	6,0	*9*	0,61	*7*	87	*2*	8	*11*	23	*5*
			BC	PinSBC	16	*6*	0,61	*10*	4,9	*18*	8,0	*17*	13,79	*8*	0,109	*8*	10,4	*8*	5,4	*4*	0,56	*10*	80	*1*	13	*9*	29	*8*
PAPI	*Platymiscium sp.*	Macacauba	D	MacaSp	4	*1*	1,02	*1*	25,3	*5*	24,8	*5*	4,75	*2*	0,118	*4*	8,0	*1*					44	*2*	15	*6*	17	*7*
PAPI	*Platymiscium ulei*	Macacauba	D	MacaUl	10	*2*	0,75	*9*	14,8	*0*	19,7	*9*	4,94	*14*	0,097	*21*	7,7	*13*	3,4	*25*	0,44	*12*	53	*7*	21	*5*	27	*4*
SALI	*Populus sp.*	Peuplier	BT	PeupT	5	*1*	0,45	*2*	14,1	*6*	31,6	*5*	8,21	*5*	0,259	*6*	9,2	*2*	6,0	*10*	0,65	*9*	85	*1*	7	*9*	19	*6*
ROSA	*Prunus avium*	Merisier	Dp	Meri	1	*1*	0,62		10,5		16,9		9,98		0,168		9,5		7,4		0,77		66		15		29	
PAPI	*Pterocarpus erinaceus*	Vèn	D	Vèn	78	*3*	0,82	*2*	15,4	*6*	18,7	*4*	5,56	*8*	0,104	*11*	6,5		3,2		0,56		52	*3*	18	*2*	26	*4*
PAPI	*Pterocarpus soyauxii*	Padouk	D	Padou	92	*8*	0,74	*11*	13,6	*15*	18,5	*15*	5,16	*15*	0,096	*26*	7,9	*3*	3,4	*14*	0,47	*16*	45	*9*	27	*21*	29	*24*
			A*	PadoA	16	*2*	0,69	*13*	11,0	*11*	15,9	*2*	9,59	*3*	0,152	*4*	12,1	*2*					64	*10*	8	*8*	24	*18*
			D*	PadoD	62	*6*	0,80	*6*	12,6	*8*	15,7	*10*	5,54	*11*	0,086	*5*	7,8	*6*					43	*5*	28	*5*	30	*6*
PAPI	*Pterocarpus tinctorius*	Umukambati	A	UmukA	8	*1*	0,71	*6*	10,6	*12*	14,8	*9*	10,16	*5*	0,150	*4*	10,0	*9*	4,5	*17*	0,49	*18*	72	*0*	12	*0*	26	*0*
			D	UmukD	6	*1*	0,93	*2*	12,9	*8*	13,8	*7*	6,84	*9*	0,094	*1*	7,0	*3*	2,9	*18*	0,41	*17*						

FAMI	*Nom botanique*	Nom vernaculaire	A /D /BR	Libellé	*N*		ρstab		E' (Gpa)		E'/ρ (Gpa)		tanδ (‰)		E"/ρ (Gpa)		MC (%)		gVol (%)		aVol (%/%)		L*		a*		b*	
					ép	*pi*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*	m	*cv%*
RHIZ	*Rhizophora mangle*	Mangle	D	Mang	5	*1*	1,13	*1*	32,2	*4*	28,4	*4*	7,26	*4*	0,206	*6*	8,2	*9*	7,4	*13*	0,89	*6*	58	*7*	17	*17*	25	*7*
CAES	*Scorodophloeus zenkerii*	Divida	D	Divi	14	*2*	0,88	*8*	19,8	*7*	22,5	*15*	6,81	*1*	0,153	*16*	10,8	*13*	6,0	*9*	0,64	*7*	68	*5*	17	*2*	35	*5*
ROSA	*Sorbus domestica*	Cormier	D	Corm	24	*5*	0,81	*7*	15,3	*20*	18,8	*17*	9,91	*16*	0,183	*8*	10,7	*6*	6,3	*9*	0,58	*7*	66	*8*	14	*5*	20	*4*
CAES	*Swartzia fistuloides*	Pao rosa	D	Pao	19	*2*	0,96	*5*	16,3	*16*	17,0	*10*	4,80	*8*	0,082	*18*	7,4	*7*	4,4	*10*	0,62	*9*	51	*0*	21	*5*	25	*6*
CAES	*Swartzia panacoco*	Coração de negro	D	CoraPa	5	*1*	1,23	*1*	32,8	*5*	26,8	*5*	3,90	*5*	0,104	*4*	10,0	*1*	8,1	*8*	0,79	*8*	33	*3*	7	*6*	7	*6*
			A*	CoraA	4	*1*	1,07	*1*	30,1	*3*	28,0	*3*	6,64	*3*	0,186	*4*	9,6	*2*	7,5	*10*	0,81	*14*	63	*0*	18	*0*	34	*0*
			D*	CoraD	3	*1*	1,09	*1*	26,4	*7*	24,2	*7*	4,92	*15*	0,119	*16*	8,4	*3*	6,1	*5*	0,77	*3*	41	*0*	14	*0*	17	*0*
CAES	*Swartzia (sp ou panacoco)*	Coração de negro	D	CoraSp	42	*8*	1,21	*7*	31,1	*7*	25,9	*10*	4,31	*6*	0,111	*12*	8,0	*2*	5,4	*7*	0,68	*6*	38	*16*	9	*34*	11	*43*
MELI	*Swietenia macrophylla*	Acajou du Brésil	Dp	Ac.Brés	1	*1*	0,48		9,6		19,9		6,41		0,128		9,0		4,9		0,54		56		19		30	
TAXA	*Taxus (bacata?)*	If	A*	IfA	13	*2*	0,59	*0*	5,8	*2*	9,7	*2*	10,68	*2*	0,104	*0*	11,0	*0*	3,6	*8*	0,33	*8*	79	*0*	11	*1*	26	*1*
			ZT*	IfZT	8	*2*	0,66	*0*	6,5	*3*	9,9	*3*	11,40	*2*	0,113	*1*	10,5	*1*	3,9	*5*	0,37	*6*	72	*3*	12	*5*	25	*2*
			D*	IfD	13	*3*	0,60	*2*	5,9	*2*	9,8	*2*	10,58	*4*	0,103	*2*	10,2	*2*	3,4	*12*	0,34	*7*	66	*2*	14	*3*	28	*3*
			D	IfD2	13	*3*	0,66	*7*	7,6	*11*	11,6	*17*	9,48	*4*	0,110	*22*	8,9	*5*	3,8	*14*	0,42	*19*	65	*3*	21	*5*	38	*4*
CUPR	*Thuja plicata*	Red cedar	Dp	RedC	1	*1*	0,39		6,9		18,0		7,16		0,129		8,0						56		15		25	
RUTA	*Zanthoxylum tsihanimposa*	Fahavalonkazo	D	Faha	5	*1*	0,57	*9*	10,3	*16*	17,9	*6*	6,18	*6*	0,110	*4*	8,9	*1*	4,7	*8*	0,53	*8*	58	*2*	11	*2*	26	*2*
CAES?	*Zollernia sp.? (illicifolia?)*	Mossataiba (Brésil)	D	Moss1	1	*1*	0,88		15,6		17,8		5,59		0,100								28		3		3	
CAES?	*Zollernia sp.? (illicifolia?)*	Mossutaiba	D	Moss2	6	*1*	1,06	*4*	22,3	*10*	21,1	*6*	5,05	*10*	0,106	*10*	8,0	*2*					32	*6*	9	*16*	8	*22*
ZYGO?	*Bulnesia sp.?*	Palo santo	D	Palo	14	*1*	1,16	*4*	24,0	*4*	20,8	*7*	5,75	*7*	0,119	*6*	8,0	*14*	3,6	*29*	0,44	*21*	35	*9*	7	*21*	10	*25*
CAES?	*Guibourtia sp.?*	Bubinga?	D	Bubi?	3	*1*	0,84	*1*	10,8	*2*	12,8	*1*	11,26	*1*	0,144	*1*	10,5	*0*	5,3	*4*	0,50	*4*	48	*1*	19	*2*	20	*3*
?	*?*	Chakatte	D	Chak	2	*1*	1,02	*1*	17,0	*1*	16,7	*1*	7,54	*5*	0,126	*4*	10,1	*2*	4,9	*11*	0,52	*9*	35	*13*	4	*30*	7	*42*
?	*?*	Champfouti	D	Cham	5	*1*	0,85	*7*	10,6	*12*	12,5	*5*	11,13	*16*	0,139	*15*	8,4	*6*	2,8	*19*	0,33	*26*	59	*23*	20	*8*	31	*9*
	Total				1018	*224*	0,81	*33*	15,7	*56*	18,4	*35*	7,91	*44*	0,128	*31*	9,2	*17*	5,2	*27*	0,59	*22*	60	*32*	14	*43*	23	*38*

Remarques/rappels :

i) Les données de gonflement partiel sont présentées à titre indicatif et pour comparaison. Il semble délicat de les comparer à des données de retraits totaux compte tenu de la plage réduite de variations d'humidités. Il faut aussi se souvenir que l'erreur de mesure est assez élevée sur ces dimensions.

ii) Les teneurs en eau « sec à l'air » sont légèrement sous-estimées compte tenu du mode de séchage ; par ailleurs elles sont obtenues en adsorption.

iii) Pour les bois signalés par « Dp », c'est à dire des éprouvettes qui nous ont été fournies mises d'épaisseur à la calibreuse, il peut exister un doute quant à la représentativité des mesures effectuées. D'après les résultats de [Sali et Kopac 1998], un tel type de traitement est susceptible de provoquer, sur de faibles épaisseurs comme les nôtres, de nettes diminutions de rigidité (et par suite augmentation d'amortissement apparent ??) en raison des arrachages de fibres ou des rayures plus ou moins profondes dues aux grains d'abrasif. Cependant, les valeurs de propriétés vibratoires mesurées sur de telles éprouvettes (1 par essence) sur Palissandre de Rio et Indien sont assez comparables à celles de la littérature [Yano et al 1995 & 1997].

III.b.2. **Répartition par propriété des essences & types de bois**

La présentation des résultats adoptée ci-dessous a un double but : d'une part, description de l'échantillon ; d'autre part une première échelle de classement « large » des types de bois. Pour les différentes propriétés mesurées, la distribution est d'abord observée pour des classes ayant des bornes régulières fixées, et éventuellement comparée avec une distribution plus générale *via* les données de la base du CIRAD. Un premier regroupement est aussi effectué en 5 classes (nombre choisi arbitrairement), présentées sous forme tabulaire avec libellés (définis dans le Tableau 10) des types de bois. Ces classes sont obtenues par partitionnement univarié, qui recherche des classes aussi homogènes que possible, en minimisant la somme des variances intra-classe.

III.b.2.1. **Densité et Module d'élasticité**

Les distributions de densité et module d'Young axial, comparées à celles de la BDD du CIRAD, sont présentées sur la Figure 84.

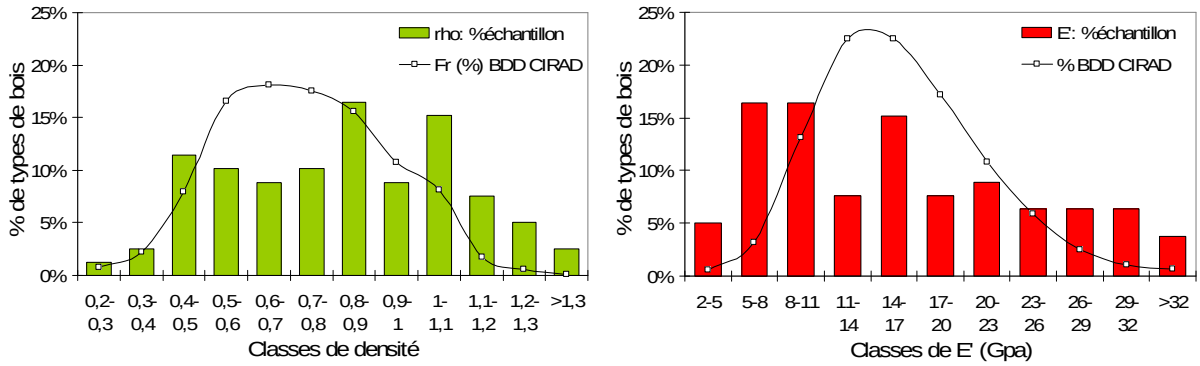


Figure 84: Distribution des types de bois étudiés par gammes de densité (à gauche) et de module d'Young dynamique axial (à droite). Courbe : fréquences (%) pour les ≈1000 espèces de la base de données du CIRAD.

Tableau 11: Répartition des types de bois en 5 classes de densité et de module d'Young (partitionnement univarié). Les libellés correspondent à ceux donnés dans le Tableau 10.

	Densité "sec à l'air"					Module d'Young (GPa)				
Classe	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Objets	16	19	20	14	9	17	16	16	15	14
Barycentres classes	0,45	0,67	0,87	1,06	1,22	6,0	10,4	15,2	21,2	29,0
Variance intra-classe	0,006	0,004	0,003	0,002	0,004	3,0	1,3	1,5	3,7	6,6
	Sapi	ErFr	Dous	BocoA	BocoD	ErFr	Taki	Sapi	Dous	BocoA
	Taki	ErAm	Buis	Sati	Amou	ErAm	Buis	Char	Sati	BocoD
	Cedr	Char	P.Rio	Pern	AmouFr	From	Cedr	P.Ind	Pern	Amou
	From	P.Ind	Coco	Gree	Gren	Cyprl	Coco	P.Rio	P.Rose	AmouFr
	Cyprl	Noye	P.Man	P.Ros	P.Bah	CyprSp	EpiLut	P.Bah	Gren	Gree
	CyprSp	Maha	OmwoD	Xody	Eben	Noye	EpiBN	Difo	P.Man	Xody
	EpiLut	EpiBC	OmwoA	Omwo	CoraPa	Ac.Cail	Lari	PinPat	OmwoD	Omwo
	EpiBN	PinMaBC	Bubi	Canel	CoraSp	EpiBC	PinSyBN	MacaUl	OmwoA	Canel
	PinCar	PinSyBC	Ac.Cail	MacaSp	Palo	PinCar	Meri	PeupT	Eben	MacaSp
	Lari	MacaUl	Difo	Mang		PinMaBN	PadoA	Vèn	Bubi	Mang
	PinPat	Meri	Amar	CoraA		PinMaBC	PadoD	Padou	Maha	CoraPa
	PinMaBN	PadoA	Vèn	CoraD		PinSyBC	UmukA	UmukD	Amar	CoraA
	PinSyBN	Padou	PadoD	Moss2		IfZT	Ac.Brés	Corm	Divi	CoraD
	PeupT	UmukA	UmukD	Chak		IfA	Faha	Pao	Moss2	CoraSp
	Ac.Brés	IfZT	Divi			IfD	Bubi?	Moss1	Palo	
	RedC	IfA	Corm			IfD2	Cham	Chak		
		IfD	Pao			RedC				
		IfD2	Moss1							
		Faha	Bubi?							
			Cham							

La gamme de densités des types de bois étudiés (Figure 84 gauche) recouvre bien la plage usuelle « bois ». Malgré l'existence des deux classes prédominantes (0,8-0,9 et 1-1,1) prévisibles d'après les objectifs globaux de l'étude, les proportions de représentation de chaque classe de densité sont relativement plus égales que pour une distribution « aléatoire » globale ; notamment les bois d'extrêmement fortes densités (>1,1) sont bien mieux représentés. Les classes de densités par types de bois, présentées à titre indicatif, recoupent bien celles en « bois légers », « bois mi-lourds » etc. couramment employées [normes

françaises ; Chichignoud et al 1990 par ex]. Dans notre cas, nous n'avons quasiment pas de bois « très légers » de type Balsa. A l'opposé il semble que l'on pourrait ajouter une classe « Bois très-très lourds » correspondant à la classe V (1,22±0,06), dont les essences, telles Grenadille, Amourette, sont certes peu utilisées en technologies courantes mais sont importantes en facture instrumentale.

La distribution de module d'élasticité (Figure 84 droite) présente, comme pour la densité, une meilleure égalité des différentes classes, notamment des extrêmes, que la distribution globale. On a aussi une sur-représentation des classes 5-11, et 14-17GPa. 24 types de bois ont des modules supérieurs à 20GPa, 14 supérieurs à 25GPa. Dans la classe V de modules (29±2,6GPa), on retrouve des bois d'archèterie baroque (Amourette, Coração de Negro, Boco…), ainsi que d'autres espèces qui avaient été sélectionnées sur le critère « forts modules/fortes densités » ; mais le recoupement est loin d'être total avec la classe V de densités. La classe IV inclut entre (15) autres le Pernambouc employé en archets modernes.

III.b.2.2. **Module spécifique et coefficient d'amortissement**

La répartition de module spécifique (Figure 85 gauche) recouvre bien elle aussi la plage usuelle, avec à nouveau une plus grande représentation relative des extrêmes que sur l'ensemble de la base du CIRAD – qui est plus marquée pour les valeurs faibles, que fortes.

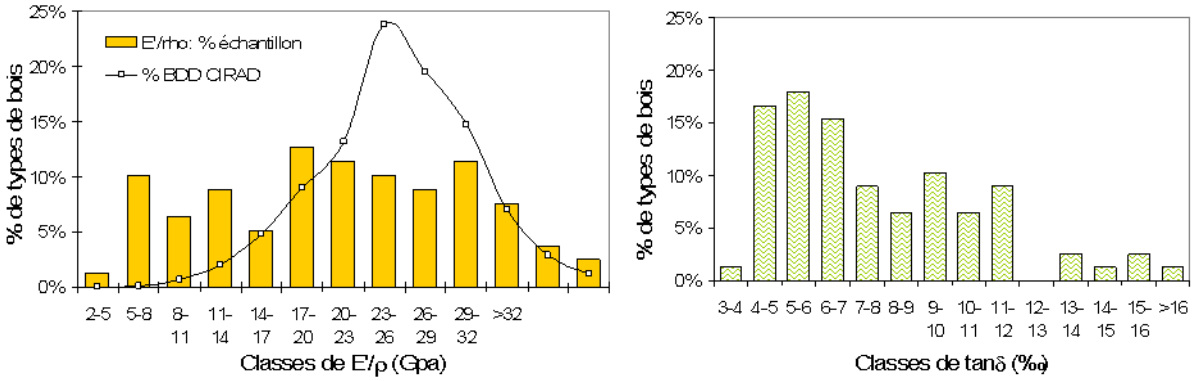


Figure 85: Distribution des types de bois étudiés par gammes de module spécifique dynamique (à gauche) et de coefficients d'amortissement (à droite).

Tableau 12: Répartition des types de bois en 5 classes de E'/ρ, et de tanδ. *Italique: Leguminosae.*

	Module d'élasticité spécifique					Coefficient d'amortissement				
Classe	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Objets	14	12	26	16	10	28	20	12	12	6
Barycentres classes	9,6	14,1	19,0	24,5	28,3	4,99	6,97	9,19	11,05	14,71
Variance intra-classe	2,0	2,2	2,0	1,7	2,4	0,36	0,35	0,29	0,36	1,42
	ErFr	Cyprl	Taki	*Dous*	Sapi	*Dous*	Sapi	Taki	ErAm	ErFr
	ErAm	*Gren*	*Pern*	*BocoD*	*BocoA*	*BocoD*	*BocoA*	Char	Cyprl	Buis
	Buis	*P.Bah*	Char	Amou	Gree	Amou	Cedr	CyprSp	Ac.Cail	From
	From	Eben	Cedr	AmouFr	*OmwoA*	AmouFr	*P.Ind*	*Coco*	EpiBC	PinCar
	Coco	Noye	CyprSp	Sati	EpiLut	Sati	*P.Rio*	Eben	PinMBN	PinMBC
	Ac.Cail	PinMBN	*P.Ind*	*Xody*	PinPat	*Pern*	*Xody*	EpiBN	PinSBN	PinSBC
	EpiBC	*PadoA*	*P.Ros*	*Omwo*	PeupT	Gree	*Omwo*	Lari	*UmukA*	
	PinCar	*PadoD*	*P.Rio*	*OmwoD*	Mang	*P.Ros*	*OmwoD*	PeupT	IfZT	
	PinMBC	*UmukA*	*P.Man*	*Bubi*	*CoraPa*	*Gren*	Noye	Meri	IfA	
	PinSBC	*UmukD*	Difo	Canel	*CoraA*	*P.Man*	Maha	*PadoA*	IfD	
	IfZT	Bubi?	EpiBN	Maha		*P.Bah*	EpiLut	Corm	Bubi?	
	IfA	Cham	Lari	*Amar*		*OmwoA*	PinPat	IfD2	Cham	
	IfD		PinSBN	*MacaSp*		*Bubi*	*UmukD*			
	IfD2		*MacaUl*	*Divi*		Canel	Mang			
			Meri	*CoraD*		Difo	*Divi*			
			Vèn	*CoraSp*		*Amar*	*CoraA*			
			Padou			*MacaSp*	Ac.Brés			
			Corm			*MacaUl*	RedC			
			Pao			*Vèn*	Faha			
			Ac.Brés			*PadoD*	Chak			
			RedC			*Padou*				
			Faha			*Pao*				
			Moss1			*CoraPa*				
			Moss2			*CoraD*				
			Palo			*CoraSp*				
			Chak			Moss1				
						Moss2				
						Palo				

Cette distribution est aussi nettement plus disparate que ce qui était observé par pièces de bois. La majorité des bois sont dans la gamme moyenne voire faible (35i. <18GPa, soit 45%). 16 types de bois (≈21%) ont des valeurs moyennes de E'/ρ supérieures à 25GPa (soit atteignant les gammes de valeur d'Epicéa « de résonance »). Dans la classe des plus forts E'/ρ (classe V : 28,3±1,5GPa), on retrouve effectivement l'Epicéa « qualité lutherie » ainsi que d'autres résineux très rigides, mais également le bois (supposé de tension) de Peuplier, ainsi que des feuillus tropicaux des classes IV et V de densité (6/10 individus).

Par contraste avec la proportion modérée des forts modules spécifiques, les faibles valeurs de coefficients d'amortissement sont très représentées (Figure 85 droite): la moitié des types de bois ont des tanδ moyens ≤7‰ (qui est l'ordre de grandeur pour des Epicéas « de résonance », pour garder le même point de comparaison). On retrouve 14 types de bois dans la gamme <5‰ (soit proche du Pernambouc des archets modernes, qui est considéré comme extrêmement peu amortissant). La classe I de coefficient d'amortissement définie par partitionnement univarié et centrée autour de 5‰ contient effectivement les essences employées en archets (modernes comme baroques), et d'autres essences tropicales employées en facture Occidentale, ainsi que des essences additionnelles comme le Doussié, le Vèn, le Greenheart, le Difou…

Par contre on peut remarquer que seulement 3 individus sur les 28 de cette classe de faibles amortissements proviennent de la classe V de E'/ρ. Elle regroupe par contre 19 des 31 types de bois de la super-famille des Légumineuses (Caesalpiniaceae et Papilionaceae, suréchantillonnées dans ce travail ; en italique dans le Tableau 12), alors que ceux-ci sont répartis de manière assez homogène entre les classes de E'/ρ. On retrouve aussi 4 Moraceae et 2 Lauraceae. Notre échantillon n'est pas suffisant pour en retirer plus que cette remarque.

Afin de faciliter la lecture, les couples de valeurs E'/ρ - $tan\delta$ par types de bois sont présentés, par ordre croissant de E'/ρ, sur la Figure 86 (feuillus tropicaux) et la Figure 87 (feuillus tempérés et résineux). Sont aussi représentées (barres étroites) les valeurs de tanδ à E'/ρ donné correspondant aux régressions « bois normaux » du chapitre précédent ($tan\delta = 10^{4,89}.(E'/\rho)^{-0,68}$ avec E'/ρ en Pa ; les constantes retenues ici sont celles qui correspondent à la fois à nos essais sur feuillus/résineux « normaux » et aux résultats de [Ono & Norimoto 1983]).

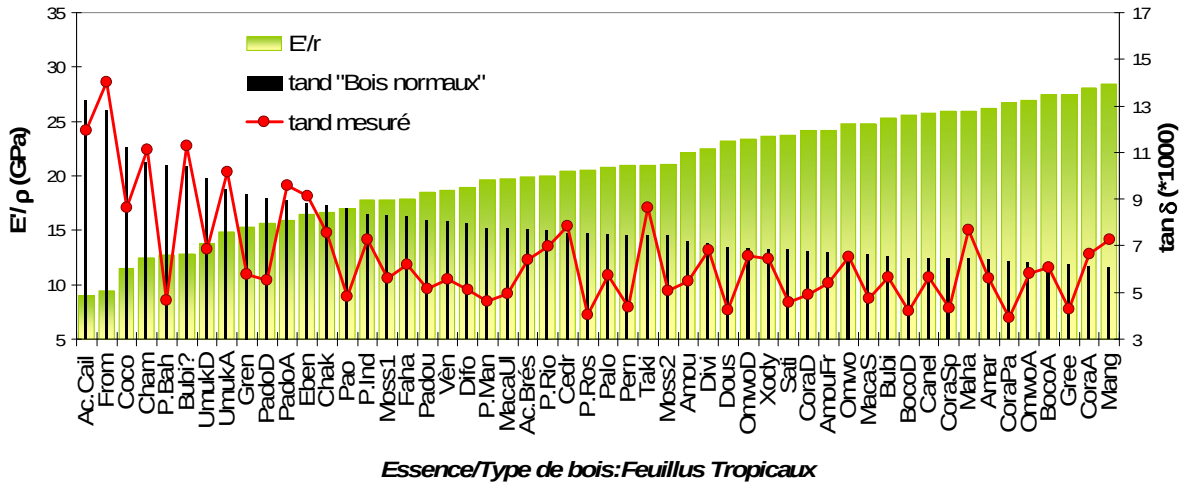


Figure 86: Couples de valeurs E'/ρ – tanδ, classés par ordre croissant de E'/ρ, pour les bois de feuillus tropicaux.

Pour notre échantillon de feuillus tropicaux, la co-évolution E'/ρ - $tan\delta$, quoique suivant approximativement la tendance « normale », montre des disparités importantes entre essences/types de bois. A quelques exceptions près (de valeurs supérieures à la « moyenne »),

les valeurs d'amortissement mesurées sont soit cohérentes avec cette tendance, soit, plus généralement, nettement inférieures.

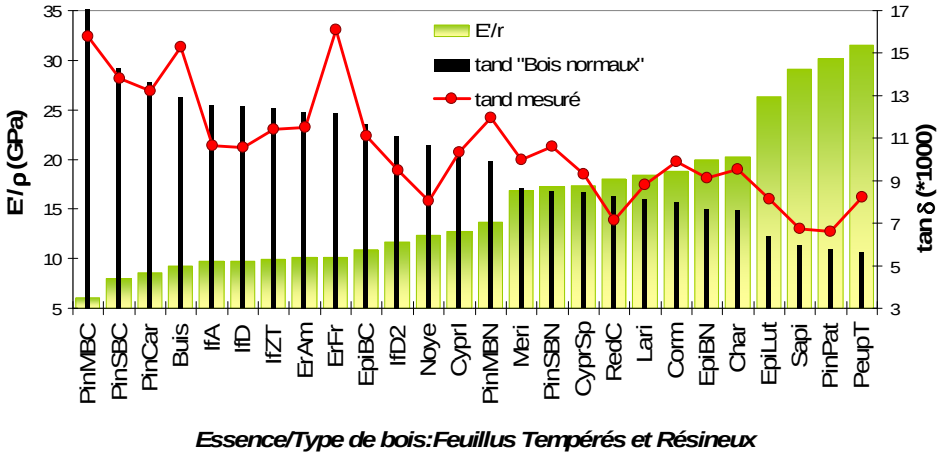


Figure 87: Couples de valeurs E'/ρ – tanδ, classés par ordre croissant de E'/ρ, pour les bois de feuillus tempérés et de résineux.

Pour les feuillus tempérés et les résineux qui ont été échantillonnés dans notre étude (soit une représentation limitée), on trouve aussi des disparités marquées, mais la proportion de valeurs supérieures à la tendance globale est ici plus importante que celle des valeurs qui lui sont inférieures.

Ces disparités et divergences observées par rapport à la tendance globale sont exprimées ci-dessous par deux indicateurs du caractère plus ou moins « intrinsèquement » amortissant. Le premier est le module de perte spécifique E''/ρ (≡E'/ρ x tanδ), en tant que paramètre mécanique, mais pour lequel l'on ne dispose de « références » en terme de variations interspécifiques que *via* les régressions expérimentales E'/ρ vs tanδ déjà présentées. On peut aussi considérer un indicateur « statistique », exprimé en %, des écarts relevés entre valeurs de tanδ mesurées, et valeurs prévisibles pour un bois « neutre » de même E'/ρ, selon les régressions les plus robustes présentées dans la section précédente, soit :

$$\Delta \tan\delta(\%) = 100 \times \frac{\tan\delta_{mesuré} - 10^{4,89} \times (E'/\rho)^{-0,68}}{10^{4,89} \times (E'/\rho)^{-0,68}}$$ (avec E'/ρ exprimé en Pa).

Les distributions de ces deux indicateurs sont présentées sur la Figure 88, et les regroupements de types de bois sur ces critères sur le Tableau 13.

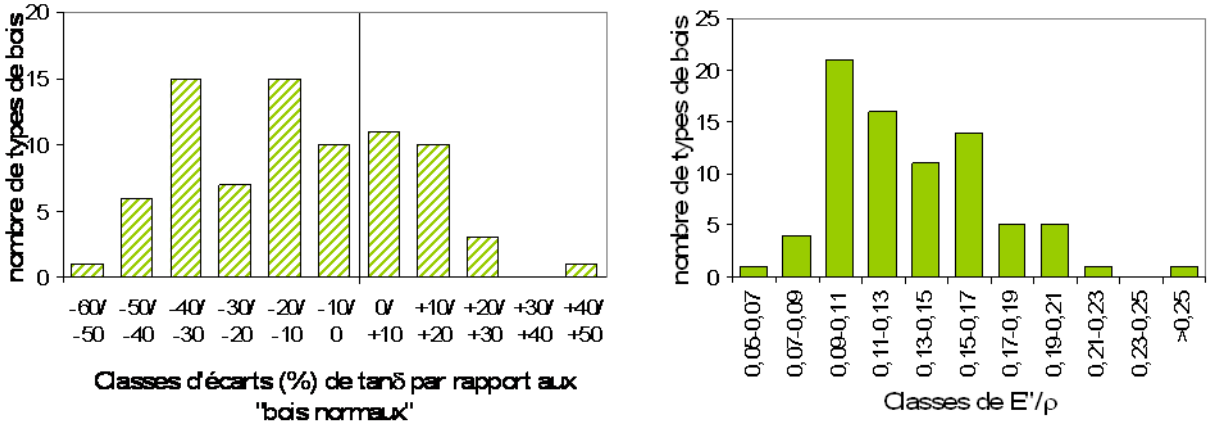


Figure 88: Distribution des types de bois étudiés : (à gauche) par gammes d'écarts des coefficients d'amortissement mesurés par rapport aux relations « bois normaux » ; (à droite) par gammes de module de perte spécifique.

Tableau 13: Répartition des bois en 5 classes selon les écarts de tanδ à la tendance globale; et selon E''/ρ.

	Amortissement: écarts aux "bois normaux" (%)					Module de perte spécifique (Gpa)				
Classe	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Objets	13	15	25	15	10	20	24	22	11	1
Barycentre classes	-42	-30	-11	7	22	0,093	0,118	0,153	0,192	0,259
Variance intra-classe	29	18	21	17	66	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	Dous	Amou	ErAm	Sapi	ErFr	*Dous*	ErAm	ErFr	Sapi	PeupT
	BocoD	AmouFr	*BocoA*	Taki	Buis	*Pern*	*BocoD*	*BocoA*	Taki	
	Pern	Sati	Cyprl	Cedr	Char	*P.Ros*	Amou	Buis	Char	
	P.Ros	Gree	*P.Ind*	From	Maha	*Gren*	AmouFr	Cedr	Maha	
	Gren	*Coco*	*P.Rio*	CyprSp	EpiLu	*Coco*	Sati	CyprSp	EpiLu	
	P.Man	Noye	*Xody*	Eben	PinMBN	*P.Man*	From	*P.Rio*	EpiBN	
	P.Bah	*MacaSp*	*Omwo*	EpiBN	PinSBN	*P.Bah*	Gree	*Xody*	PinPat	
	Difo	*Vèn*	*OmwoD*	Lari	PeupT	Noye	Cyprl	*Omwo*	PinSBN	
	MacaUl	*UmukD*	*OmwoA*	PinPat	Mang	Difo	*P.Ind*	*OmwoD*	Mang	
	PadoD	*CoraD*	*Bubi*	Meri	Corm	PinMBC	Ac.Cail	*OmwoA*	Corm	
	Padou	*CoraSp*	Ac.Cail	*PadoA*		*MacaUl*	EpiBC	Eben	*CoraA*	
	Pao	Faha	Canel	*UmukA*		*Vèn*	PinCar	*Bubi*		
	CoraPa	Moss1	*Amar*	*CoraA*		*PadoD*	PinSBC	Canel		
		Moss2	EpiBC	Bubi?		*Padou*	*MacaSp*	*Amar*		
		Palo	PinCar	Cham		*UmukD*	*CoraD*	Lari		
			PinMBC			*Pao*	*CoraSp*	PinMBN		
			PinSBC			*CoraPa*	Ac.Brés	Meri		
			Divi			IfA	IfZT	*PadoA*		
			Ac.Brés			IfD	IfD2	*UmukA*		
			IfZT			Moss1	RedC	*Divi*		
			IfA				Faha	Bubi?		
			IfD				Moss2	Cham		
			IfD2				Palo			
			RedC				Chak			
			Chak							

Le caractère « faible amortissement intrinsèque » d'une grande proportion des types de bois est bien visible autant dans la répartition des Δtanδ -majoritairement négatifs (43types de bois, soit 55% de l'échantillon, sont < -10%), que dans la distribution nettement asymétrique de E''/ρ (Figure 88 à droite).

Les observations déjà évoquées quant aux types de bois rencontrés dans les classes intrinsèquement les moins « amortissantes » se retrouvent : présence de bois employés en archets ; en xylophones Occidentaux et/ou Africains et Latino-Américains (Padouk, Vèn, Macacaubas). On retrouve aussi la prédominance des bois de Légumineuses dans ces classes (12 individus/13 pour la classe I de Δtanδ: -42±5% ; 14/20 dans la classe I de E''/ρ: 0,093±0,011GPa). On peut aussi remarquer que pour celles de ces essences pour lesquelles on dispose d'aubiers, ceux-ci se retrouvent 2 ou 3 classes « plus loin » vers un comportement plus amortissant. Ces derniers sont alors regroupés avec des « bois blancs » tempérés ou tropicaux, et des résineux. Le comportement très atypique du bois (supposé de tension) de Peuplier est flagrant en terme de E''/ρ élevé, aucun autre type de bois ne lui ayant été regroupé.

Avant de présenter brièvement les répartitions par essences de propriétés physiques, il importe de souligner que l'observation des gammes de valeurs des propriétés mécaniques prises une à une n'est évidemment pas suffisante pour définir des groupes de types de bois, que ce soit en regard de leurs usages, ou dans une optique de compréhension des déterminants du comportement. Ces premières observations pourront être complétées par les analyses multivariables du §III.b.3.

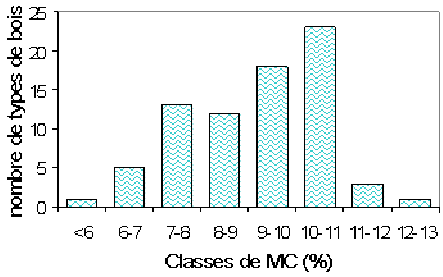
III.b.2.3. **Teneur en eau et gonflements**

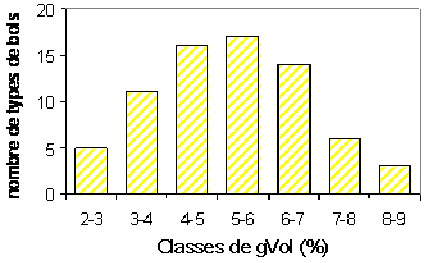
Des propriétés hygroscopiques (point de saturation des fibres, rapport retrait total/densité) avaient été prises en compte dans notre démarche de présélection de bois. Bon nombre d'essences se sont ajoutées, pour lesquelles le choix avait été indépendant de ces paramètres (et pour certaines desquelles nous n'avions aucune donnée). Les résultats présentés ci-dessous, de teneur en eau stabilisée à 20°C et 60% HR et de gonflement volumique partiel entre l'état « quasi-anhydre » et cet état, ne sont pas directement comparables à des données obtenues sur de plus grandes plages de variations d'humidité. Par contre, les différents types de bois étudiés peuvent tout à fait être comparés sur la base de ces

données, le protocole expérimental suivi ayant été le même pour tous les sous-échantillons. Comme précédemment, la Figure 89 et le Tableau 14 présentent pour ces paramètres d'une part la distribution par gammes de valeurs fixées, d'autre part le regroupement des types de bois en 5 classes.

Figure 89 & Tableau 14: Teneur en eau à l'équilibre « sec à l'air » et gonflement partiel volumique entre l'état anhydre et sec à l'air : Distribution par gammes de valeurs fixées, et répartition des types de bois en 5 classes.

Distribution





Classement	Teneur en eau à l'équilibre (%)					Gonflement partiel volumique (%)				
Classe	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Objets	6	20	18	22	9	15	16	14	16	9
Barycentres classes	6,32	7,95	9,28	10,25	11,01	3,32	4,56	5,45	6,23	7,66
Variance intra-classe	0,73	0,09	0,10	0,06	0,18	0,15	0,08	0,04	0,05	0,26
	Coco *Gren* *Vèn* Canel *Dous* *UmukD*	Gree Pao *P.Man* *MacaUl* *PadoD* *P.Ind* *Padou* *MacaSp* *P.Rio* Palo Moss2 Difo *CoraSp* *Pern* RedC Mang *BocoD* Amou *CoraD* Cham	Noye *Omwo* Faha IfD2 Ac.Brés *OmwoA* PeupT *OmwoD* Bubi Sati *Xody* *Amar* Meri *CoraA* AmouFr Lari CyprSp Ac.Cail	Char *BocoA* *UmukA* *CoraPa* Eben Cedr Chak PinCar Sapi IfD ErAm Cyprl Taki PinSBC EpiBN Bubi? Maha IfZT PinSBN PinMBN PinPat EpiLut	Corm ErFr Buis *Divi* EpiBC IfA PinMBC From *PadoA*	*Gren* *Dous* Cham *UmukD* *Coco* *Vèn* *Padou* IfD *MacaUl* *P.Man* Palo IfA Canel IfD2 IfZT	Taki Cedr Difo Pao *UmukA* *Pern* PinCar Noye Grée Ac.Cail Faha CyprSp Cyprl *P.Ind* Ac.Brés Chak	From ErFr *Amar* Bubi? *P.Rio* PinSBC *CoraSp* *OmwoD* Sati PinMBN Char EpiBC PinMBC Lari	EpiLut Amou *Divi* PinSBN PeupT *CoraD* Maha ErAm *OmwoA* Corm *Bubi* *Omwo* Sapi *BocoD* *Xody* AmouFr	EpiBN PinPat Mang Meri *BocoA* *CoraA* *CoraPa* Buis Eben

La distribution de teneurs en eau par types de bois est très asymétrique, avec une prédominance de cas « quasi-standards » (compte tenu de la légère sous-estimation des MC dans notre protocole, on peut considérer que la classe 10-11% est proche du cas général, qualifié de « à 12% » pour des essais n'étant pas forcément en adsorption, et subissant a posteriori un séchage plus complet à 103°C). Les valeurs supérieures sont presque absentes, tandis que la distribution diminue progressivement vers des MC de l'ordre de 6-7%. L'allure globale de cette distribution est d'une forme comparable à celle des Psf sur la base de données du CIRAD (allure non représentée en raison des évidentes différences de gammes de valeurs ; il semble aussi plus que délicat d'établir un parallèle entre MC en conditions sec à l'air et Psf en ne disposant pas -au moins dans la littérature- d'isothermes de sorption/désorption pour nombre des espèces). Les essences regroupées dans la classe I de très faibles (6,32±0,85%) teneurs en eau à l'équilibre en conditions « ambiantes » correspondent effectivement à celles qui avaient été présélectionnées (sauf le Cocobolo : pas de données disponibles) sur la base de très faibles Psf (<23%) et d'une grande stabilité dimensionnelle, et sont des essences particulièrement riches en extraits, colorées et qui seraient empiriquement qualifiées de « grasses ». On les retrouve toutes dans la classe des plus faibles gonflements partiels. Les bois de cœur de Légumineuses sont à nouveau surtout représentés par les faibles valeurs de MC. La classe des plus fortes MC correspond en revanche presque exclusivement à des « bois blancs », légers à très lourds, résineux ou feuillus ; ainsi qu'à des aubiers.

Pour ce qui concerne les gonflements partiels, la distribution est proche de la normale (ce qui correspond assez bien à l'allure pour les retraits totaux sur la base du CIRAD, quoique ici encore les différences de valeurs absolues empêchent une représentation simultanée). La classe I des plus faibles gonflements partiels comprend une majorité de bois lourds à très lourds mais appartenant aux classes I et II de faibles MC à l'équilibre, ainsi que du bois d'If, pourtant plus hygroscopique, mais dont le faible E'/ρ semble indiquer des AMFs élevés proches de bois de réaction (susceptibles de réduire les variations dimensionnelles transverses ; ce bois est cependant bien plus stable que les bois de réaction manifestes de Pins et Epicéa). Pour la classe des plus forts gonflements volumiques, on ne retrouve que le Buis comme représentant de la classe V de MC. Les autres types de bois sont soit de forts modules spécifiques, et/ou très denses (Merisier en exception).

Ici encore l'interprétation demande la mise en relation de plus de 2 propriétés.

III.b.2.4. **Couleur**

En plus de permettre une objectivation de certains critères importants dans l'esthétique des bois (caractéristique non mécanique mais qui joue son rôle), les mesures colorimétriques peuvent dans certains cas servir d'indicateurs pour d'autres propriétés. Dans le cas d'un échantillon composé en majorité de bois riches en extraits et/ou dits « précieux », l'aspect indicateur de teneurs en extraits colorés, comme l'aspect indicateur de paramètres esthétiques, semblent importants à prendre en compte. Dans l'analyse à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions, nous n'avions retenu que la clarté (ou luminance) L*, du fait des disparités de poids (nombre d'éprouvettes) entre espèces et types de bois. A cette échelle de comparaison entre moyennes par types de bois, on peut ajouter aux données de clarté L* celles de a* (axe des rouges, en coordonnées cartésiennes) et de b*(axe des jaunes) (Figure 90 pour les feuillus tropicaux, Figure 91 pour les feuillus tempérés et les résineux).

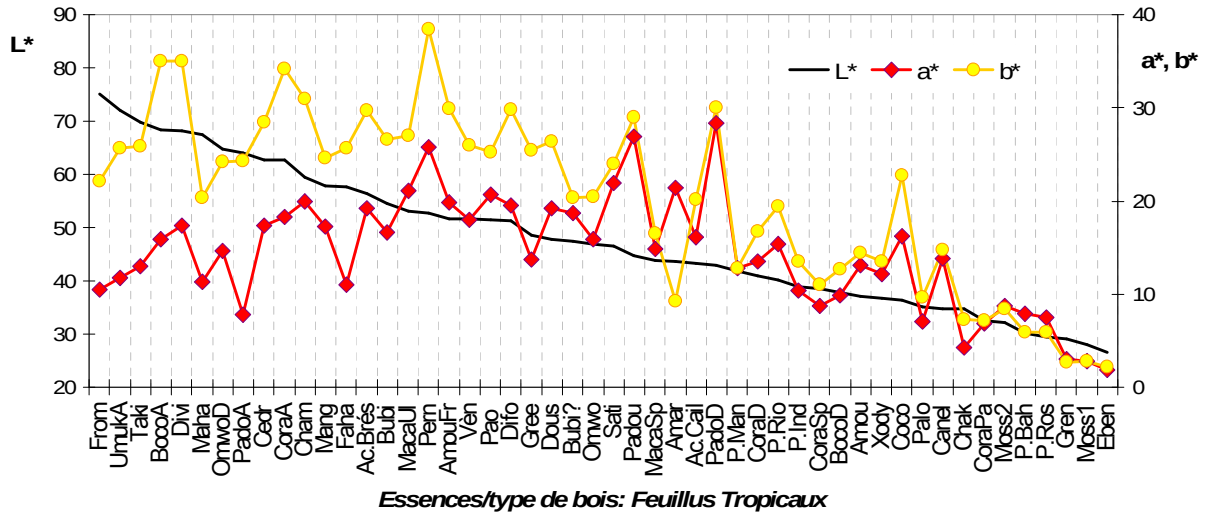


Figure 90: Paramètres colorimétriques CIELab pour les bois de feuillus tropicaux, classés par ordre décroissant de luminance.

Les disparités de a* et b* sont élevées sur presque toute la gamme de types de bois et de clartés. Cependant, on peut remarquer que: i) les évolutions des ces deux paramètres vont en règle générale dans le même sens (à l'exception comme on s'en doute du cas atypique de l'Amarante qui sort de la gamme de couleurs des autres bois) ; ii) pour des luminances supérieures à ≈55, le paramètre « jaune » b* est nettement plus fort que le paramètre « rouge » a* et la tendance globale de ces deux paramètres semble ascendante; iii) pour des bois de luminances ≤55, les valeurs de a* et de b* sont beaucoup plus proches en règle générale, et diminuent avec la diminution de clarté. Ce dernier point correspond aux observations

[Nishino et al 1998] qui situaient l'inflexion vers L*=54. Ces observations sont difficilement comparables à notre petit échantillon de feuillus tempérés (et de résineux) dans la mesure où le bois le plus « sombre » (Noyer d'Amérique), représenté par une seule éprouvette, présente une clarté correspondant au début de cette inflexion dans les relations entre a* et b*.

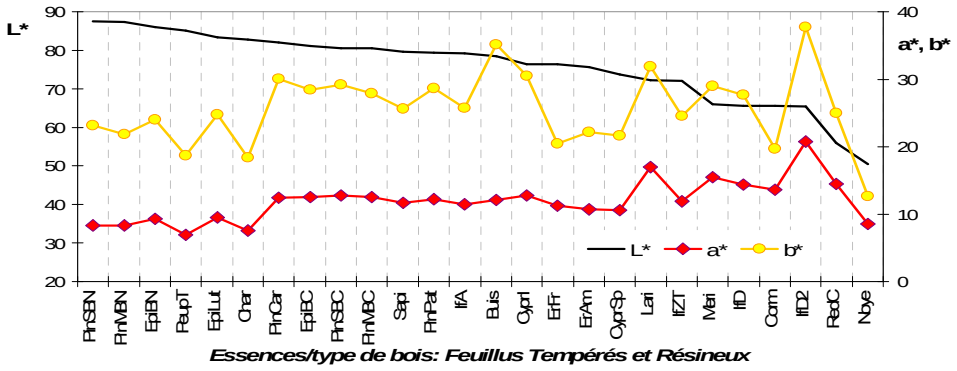


Figure 91: Paramètres CIELab par ordre décroissant de luminance, pour les bois de feuillus tempérés et résineux.

Sur ces bois de feuillus tempérés et de résineux, l'évolution entre a* et b* est somme toute plus parallèle que pour les feuillus tropicaux étudiés, et le paramètre a* (rouge) est plus stable que b*. De façon générale, les tendances apparaissent plus liées aux rapports entre a* et b*, et entre la « quantité de couleur » et la clarté, qu'aux paramètres individuels a* et b*, et il semble plus logique de présenter les résultats en coordonnées polaires L*Ch* (Figure 92).

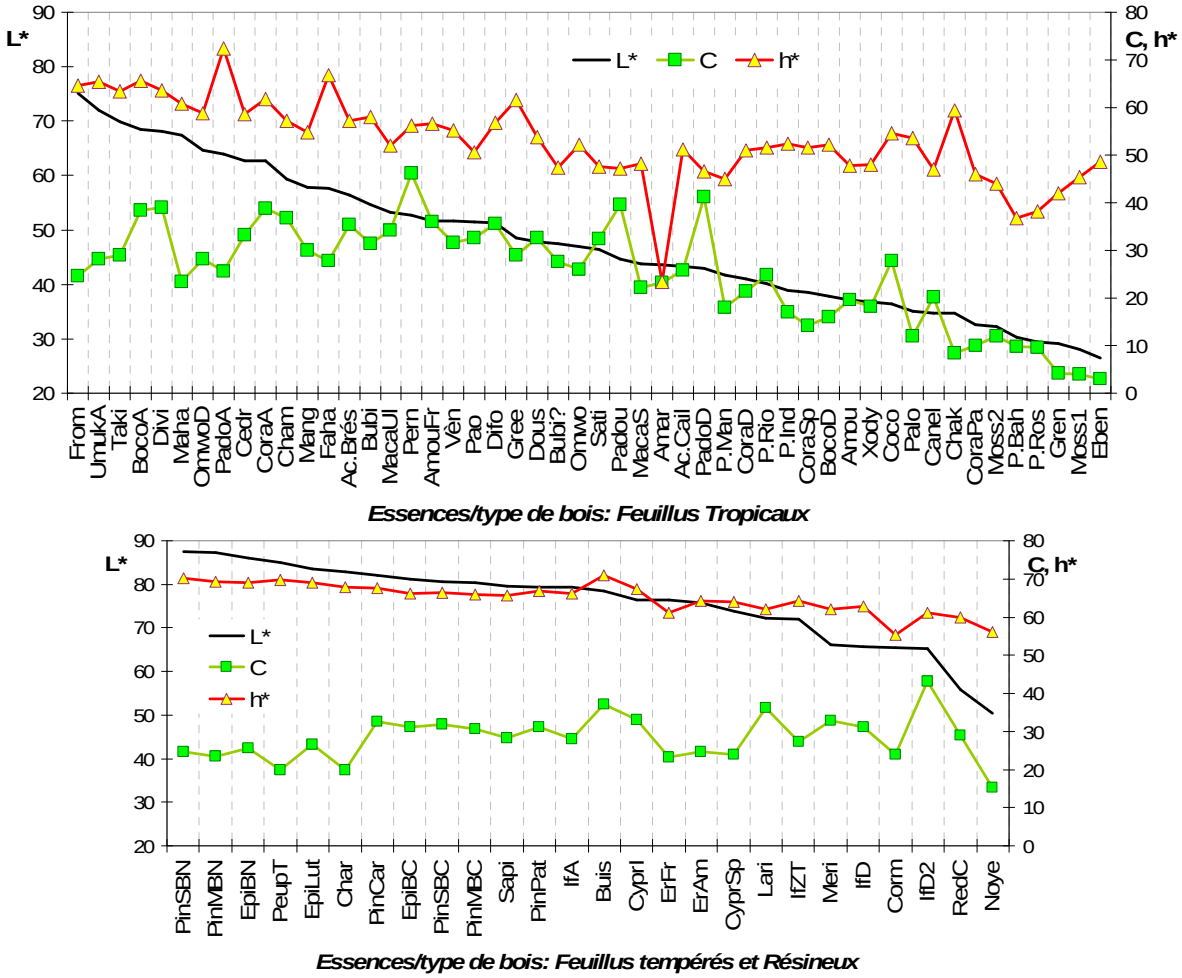


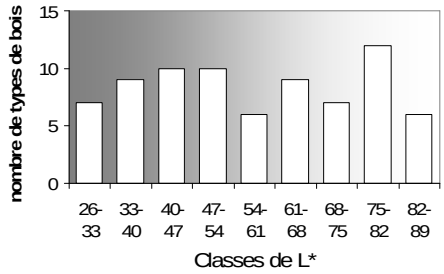
Figure 92: Paramètres colorimétriques CIELCh (coordonnées polaires) classés par ordre décroissant de luminance, pour les bois de feuillus tropicaux (en haut), et de feuillus tempérés et résineux (en bas).

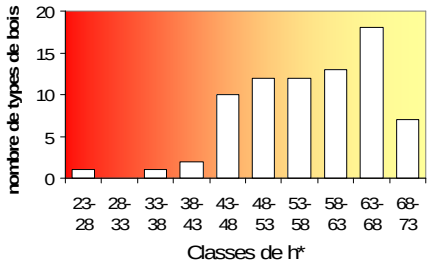
Dans le système L*Ch* (Luminance, chromaticité, angle de teinte), les tendances évoquées ci-dessus sont plus clairement repérables. L'angle de teinte h* tend à diminuer depuis les bois très clairs jusqu'aux très foncés (soit passage de « bois blanc-jaune » à bois tendant vers les rouges foncés) ; mais avec une pente plus douce que L*. Sans grande surprise son évolution est beaucoup plus linéaire pour les résineux et feuillus tempérés échantillonnés (légère inflexion vers le jaune pour le Buis, vers le rouge pour le Cormier), que pour les feuillus tropicaux où les disparités entre bois sont importantes. Pour ces derniers on repère tout de suite le « pic » du bois d'Amarante. Pour des luminances <55, la chromaticité (ou saturation) décroît globalement suivant la même allure que la diminution de clarté. Les exceptions à cette tendance générale, soit des pics de forte saturation pour une gamme de clarté donnée, sont représentés comme on peut s'y attendre par le Pernambouc, le Padouk (2 bois de teinture), et le Cocobolo ; ainsi que légèrement par le Satiné et le Cèdre Cannelle.

Compte tenu de la décroissance générale avec l'assombrissement, ces fortes saturations ne sont toutefois repérables qu'en regard de la clarté du type de bois considéré. Le paramètre C pris isolément sera peu représentatif du type de bois pour une comparaison sur l'ensemble de l'échantillon (par exemple, l'aubier de Boco est aussi saturé que le bois de cœur de Padouk). Pour les distributions (Figure 93), et classements (Tableau 15), de nos types de bois selon la couleur, on présente les paramètres de clarté L* et d'angle de teinte h*.

Figure 93 & Tableau 15: Luminance (ou clarté) L* et angle de teinte h* (en °) : Distribution par gammes spécifiées, et répartition des types de bois en 5 classes.

Distribution





Classement

	Luminance L					Angle de teinte h (°)				
Classe	I	II	III	IV	V	I	II	III	IV	V
Objets	15	13	13	15	18	3	13	21	18	19
Barycentres classes	34,1	44,5	54,2	67,5	80,9	33	46	54	62	68
Variance intra-classe	17,2	7,4	8,9	13,5	15,0	68	4	5	4	4
	BocoD	*Dous*	AmouFr	*BocoA*	Sapi	*P.Ros*	Amou	*Dous*	ErFr	Sapi
	Amou	Sati	*Pern*	Taki	ErFr	*P.Bah*	Sati	*BocoD*	ErAm	*BocoA*
	P.Ind	Gree	*Bubi*	Cedr	ErAm	*Amar*	Gren	AmouFr	Taki	Buis
	P.Ros	*P.Rio*	Noye	CyprSp	Buis		*P.Man*	*Pern*	Cedr	Char
	Gren	*P.Man*	Difo	*OmwoD*	Char		*Xody*	*P.Ind*	From	CyprI
	Coco	*Omwo*	*MacaUl*	Maha	From		Ebèn	*P.Rio*	Gree	EpiLut
	P.Bah	Ac.Cail	*Vèn*	Lari	CyprI		Canel	*Coco*	CyprSp	EpiBN
	Xody	*Amar*	Mang	Meri	EpiLut		*MacaSp*	*Omwo*	*OmwoD*	EpiBC
	Ebèn	*MacaSp*	*Pao*	*PadoA*	EpiBN		*PadoD*	Noye	*Bubi*	PinCar
	Canel	*PadoD*	Ac.Brés	*UmukA*	EpiBC		*Padou*	Ac.Cail	Maha	PinPat
	CoraPa	*Padou*	RedC	*Divi*	PinCar		*CoraPa*	Difo	Lari	PinMBN
	CoraSp	*CoraD*	Faha	Corm	PinPat		Moss1	*MacaUl*	Meri	PinMBC
	Moss1	Bubi?	Cham	*CoraA*	PinMBN		Moss2	*Vèn*	*Divi*	PinSBN
	Moss2			IfZT	PinMBC		Bubi?	Mang	*CoraA*	PinSBC
	Palo			IfD	PinSBN			Corm	IfZT	PeupT
	Chak			IfD2	PinSBC			*Pao*	IfD	*PadoA*
					PeupT			*CoraD*	IfD2	*UmukA*
					IfA			*CoraSp*	RedC	IfA
								Ac.Brés	Chak	Faha
								Palo		
								Cham		

La distribution de clarté couvre de façon relativement homogène la plage de variations qui est étendue. Celle d'angle de teinte est plus asymétrique, avec une prédominance de bois proches de l'axe des « jaunes » (43% ont des h* >60°) et une proportion plus réduite de bois presque également définis par les « rouges » et les « jaunes » (22% de bois ont un h*<50°). Ces derniers correspondent aux bois généralement qualifiés de rouges, c'est-à-dire en fait ceux pour lesquels le rouge et le jaune sont très proches, quand ils ne sont pas trop sombres. Les classements sur critères colorimétriques peuvent aider à objectiver un peu plus les

qualificatifs de « bois blancs », « bois (très) colorés », etc. qui sont souvent utiles dans la description, mais aussi assez empiriques. A ce niveau univarié, seules les classes de clarté semblent des descripteurs représentatifs. Pour rendre un peu plus « solides » les appellations « bois blancs » déjà employées, on considèrera qu'il s'agit des classes IV et V ci-dessus, et on les appellera plutôt « Bois clairs » (même si ce découpage ne serait pas forcément optimal au regard de bois tempérés, il semble qu'il soit acceptable sur l'échantillon considéré). Pour exprimer mieux l'ensemble de l'aspect coloré des bois, des regroupements plus pertinents devront prendre en compte simultanément les différents paramètres L*a*b* ou L*Ch*.

III.b.3. **Analyses multivariables et groupement des bois**

L'étude des distributions unidimensionnelles des essences et types de bois permet une première approche de la diversité, et de la caractérisation des différentes catégories de matériaux-bois étudiés. La comparaison des classements selon différentes propriétés peut aussi donner une idée empirique de grandes tendances. Toutefois il est évident que la définition des types de matériaux étudiés demande la prise en compte simultanée de plusieurs paramètres, généralement plus de deux, que ce soit en regard des utilisations ou de la compréhension des déterminants du comportement. Les corrélations entre propriétés donnent un premier niveau d'indication quant aux tendances, mais non quant aux types de bois concernés par les différentes modalités de ces évolutions.

On cherche ici à décrire des groupes de similitude entre essences/types de bois définis par plusieurs propriétés, difficiles à appréhender par des représentations graphiques bi variées. Dans une première approche, on visualisera la répartition des individus pour l'ensemble des variables dans le « meilleur » espace réduit ; toutes les propriétés mesurées (mécaniques & physiques) sont prises en compte dans une analyse en composantes principales pour effectuer un premier repérage « de visu ». Puis ces types de bois seront regroupés par classification hiérarchique en se basant uniquement sur densité et propriétés « acoustiques ».

III.b.3.1. **Corrélations entre propriétés à l'échelle interspécifique**

Dans un premier temps, on peut réexaminer (Tableau 16) les corrélations 2 à 2 entre les différentes propriétés, non plus en fonction de variations locales à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions, mais de variations moyennes entre essences (+ types de bois).

Tableau 16: Matrice des corrélations entre propriétés mécaniques, physiques et colorimétriques sur tous les types de bois. **En gras** : relation expliquant plus de 50% de la variabilité ; *en italique* : relation expliquant plus de 25% des variations observées.

N=78	ρStab	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	MC	gVol	αVol	L*	a*	b*	C	h	Δtanδ
ρStab	1	***	**	*** (-)	** (-)	*** (-)	NS	***	*** (-)	NS	*** (-)	** (-)	***(-)	*** (-)
E'	**0,824**	1	***	*** (-)	NS	*** (-)	**	***	*** (-)	NS	** (-)	* (-)	***(-)	** (-)
E'/ρ	0,344	**0,785**	1	*** (-)	***	10% (-)	***	***	10% (-)	NS	NS	NS	*(-)	NS
tanδ	*-0,568*	**-0,746**	**-0,715**	1	*	***	NS	* (-)	***	NS	**	NS	***	***
E''/ρ	-0,322	0,040	0,460	0,221	1	***	***	**	***	NS	NS	NS	***	***
MC	-0,463	-0,376	-0,207	*0,613*	0,452	1	***	NS	***	** (-)	10%	NS	***	***
gVol	0,151	0,331	0,367	0,071	*0,536*	*0,507*	1	***	NS	* (-)	NS	NS	NS	***
αVol	0,458	*0,611*	*0,534*	-0,279	0,342	-0,009	**0,838**	1	NS	NS	NS	NS	NS	NS
L*	**-0,744**	*-0,574*	-0,213	*0,658*	*0,538*	*0,669*	0,177	-0,178	1	NS	***	***	***	***
a*	-0,019	0,045	0,073	-0,185	-0,166	-0,289	-0,258	-0,111	-0,007	1	***	***	NS	* (-)
b*	-0,439	-0,321	-0,122	0,295	0,175	0,218	-0,034	-0,129	*0,631*	*0,650*	1	***	***	*
C	-0,350	-0,237	-0,070	0,173	0,087	0,086	-0,101	-0,136	0,489	**0,816**	**0,968**	1	***	NS
h	*-0,613*	-0,483	-0,203	*0,581*	0,470	*0,565*	0,181	-0,079	**0,850**	-0,163	*0,608*	0,406	1	***
Δtanδ	*-0,522*	-0,331	0,013	*0,638*	**0,888**	*0,653*	0,450	0,122	**0,718**	-0,223	0,265	0,139	*0,637*	1

Les tendances générales de corrélations à l'échelle interspécifique suivent un schéma très comparable à ce qui était obtenu à l'échelle locale :

- La relation négative entre E'/ρ et tanδ reste forte entre essences (sa représentation montre qu'elle est bien toujours de forme puissance : $\tan\delta=10^{5,22} \times (E'/\rho)^{-0,72}$ avec E'/ρ en Pa ; R^2=0,53 comparable au coefficient de détermination sur les 1400 éprouvettes : 0,52).
- Le module de perte spécifique explique près de 80% des écarts à « la normale » de l'amortissement ;
- La teneur en eau apparaît toujours bien corrélée positivement avec les paramètres d'amortissement tanδ, E''/ρ et Δtanδ, ainsi que négativement avec la densité.
- Le retrait partiel volumique n'est pas significativement lié à la densité ;

Il reste en revanche bien corrélé positivement aux modules spécifiques de conservation et de perte, et à l'indicateur « statistique » Δtanδ de déviation de l'amortissement aux « cas standard ».

- La clarté reste bien corrélée négativement à la densité, et positivement aux paramètres d'amortissement et à la teneur en eau.

En ce qui concerne les autres paramètres colorimétriques (qui n'avaient pas été pris en compte précédemment faute de pondération entre bois beaucoup et peu échantillonnés), on remarque que :

-Les paramètres individuels b* et à fortiori a* sont mal ou non corrélés aux propriétés physico mécaniques ; de même, dans l'ensemble, pour la chromaticité C ; ce qui semble normal au vu du §III.b.2.4 et de la bonne corrélation positive entre L* et C.

L'angle de teinte apparaît par contre bien corrélé à la densité (-), aux paramètres d'amortissement (+) et à la teneur en eau (+). Il est aussi fortement lié (+) à la clarté L*.

Par ailleurs on retrouve encore les relations apparentes marquées entre densité et module d'Young spécifique (avec une intensité réduite par rapport à l'échelle précédente toutefois), et coefficient d'amortissement, peu compatibles avec une interprétation théorique microstructurale. Dans l'analyse au niveau de petites pièces de bois, on a vu que ces effets relèveraient en fait de la superposition de grands groupes de bois : résineux, feuillus pauvres, et riches, en extraits, la gamme de densité des derniers étant généralement supérieure. On peut observer (Figure 94) la répartition des densités pour nos « bois clairs » (deux classes de L*) et nos « bois foncés » (3 classes de L*).

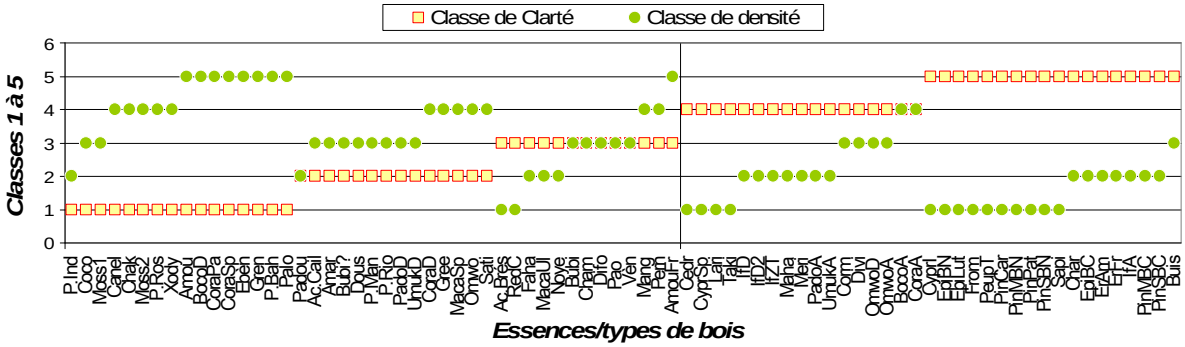


Figure 94: Distribution des classes de densité pour les "bois foncés" (classes I, II & III de L*, voir Figure 93) et les"bois blancs" (classes IV & V de luminance).

La gamme de densités rencontrées pour les bois clairs est de 0,224 à 1,114 (moyenne 0,636) ; celle pour les bois foncés de 0,386 à 1,318 (moyenne 0,951). Les premiers contiennent la plupart des bois de résineux, une bonne partie des quelques feuillus tempérés étudiés, et les aubiers. Ces essences et types de bois montraient des comportements physico-mécaniques contrastés par rapport aux « bois foncés » ici surtout représentés par des feuillus

tropicaux riches en extraits. Les Tableau 17 et Tableau 18 résument les corrélations entre propriétés qui sont obtenues en séparant ces deux grands groupes de bois.

Tableau 17: Matrice de corrélations pour les “bois foncés”.

N=43	ρStab	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	MC	gVol	αVol	L*	C	h*	Δtanδ
ρStab	1	***	*	10% (-)	NS	NS	**	***	*** (-)	** (-)	*(-)	NS
E'	0,78	1	***	*** (-)	10%	NS	***	***	10% (-)	NS	NS	NS
E'/ρ	0,35	0,85	1	*** (-)	**	NS	**	***	NS	NS	NS	NS
tanδ	-0,28	-0,55	-0,63	1	**	10%	NS	NS	NS	NS	NS	***
E''/ρ	0,02	0,29	0,41	0,39	1	**	***	**	NS	NS	NS	***
MC	0,00	0,09	0,11	0,26	0,40	1	***	NS	NS	NS	NS	**
gVol	0,39	0,54	0,47	-0,02	0,56	0,67	1	***	NS	* (-)	NS	**
αVol	0,49	0,64	0,54	-0,20	0,46	0,25	0,87	1	NS	NS	NS	NS
L*	-0,58	-0,27	0,06	0,14	0,24	0,05	-0,18	-0,23	1	***	***	NS
C	-0,46	-0,23	0,03	0,03	0,05	-0,13	-0,30	-0,23	0,82	1	**	NS
h*	-0,31	-0,17	-0,05	0,19	0,16	-0,06	-0,07	-0,00	0,57	0,38	1	NS
Δtanδ	-0,12	-0,04	0,01	0,73	0,91	0,42	0,39	0,24	0,23	0,04	0,21	1

Tableau 18: Matrice de corrélations pour les « bois clairs ».

N=35	ρStab	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	MC	gVol	αVol	L*	C	h*	Δtanδ
ρStab	1	***	NS	10% (-)	NS	NS	**	**	** (-)	*	NS	NS
E'	0,74	1	***	*** (-)	**	* (-)	***	***	* (-)	NS	NS	NS
E'/ρ	0,26	0,81	1	*** (-)	***	* (-)	**	***	NS	NS	NS	**
tanδ	-0,32	-0,77	-0,86	1	*** (-)	**	NS	* (-)	*	NS	NS	NS
E''/ρ	0,00	0,52	0,85	-0,54	1	NS	**	**	NS	* (-)	NS	***
MC	-0,19	-0,36	-0,37	0,44	-0,22	1	NS	NS	NS	NS	*	NS
gVol	0,44	0,54	0,46	-0,20	0,47	-0,01	1	***	NS	NS	NS	*
αVol	0,51	0,64	0,54	-0,33	0,48	-0,23	0,95	1	NS	NS	NS	*
L*	-0,47	-0,39	-0,11	0,35	0,13	0,18	0,14	0,08	1	** (-)	***	*
C	0,39	0,23	-0,05	-0,15	-0,36	-0,24	0,09	0,15	-0,42	1	NS	*** (-)
h*	-0,23	-0,21	-0,06	0,20	0,09	0,35	0,22	0,19	0,69	-0,19	1	NS
Δtanδ	-0,22	0,09	0,42	-0,01	0,84	0,02	0,40	0,33	0,34	-0,55	0,21	1

Il ressort de la comparaison entre les corrélations précédemment obtenues de façon globale, et celles à l’intérieur des groupes « bois clairs » et « bois foncés » :

-Les corrélations apparaissant précédemment entre densité et E’/ρ, tanδ, E’’/ρ, Δtanδ, MC et h* sont à présent non significatives ou d’intensité très réduite. A contrario, le gonflement est maintenant significativement lié à la densité à l’intérieur de ces groupes.

Ceci confirme qu’il s’agissait d’effets « groupes de bois à comportements contrastés » et non de relations à sens physique, dans la mesure où la variabilité résiduelle de densité à l’intérieur des deux groupes reste importante. La même remarque peut être faite quand aux variations résiduelles de clarté, non négligeables : 63-87 (moyenne 75) pour les bois clairs ; 27-59 (moyenne 43) pour les bois foncés. La clarté n’est cependant généralement plus liée aux propriétés physico-mécaniques, sauf toujours négativement avec la densité, à l’intérieur de ces groupes.

-Corrélations conservées entre l’échantillon global et ses sous-groupes : Liens négatifs entre clarté et densité ; entre E’/ρ et tanδ (mais d’intensités différentes) ; relations positives entre E’/ρ et gonflement ; entre gonflement et E’’/ρ et Δtanδ ; entre L* et h*.

-Relations différentes entre « bois clairs » et « bois foncés » : pour ces derniers, le lien entre E’/ρ et tanδ est bien moins fort ($R^2=0,44$; $tan\delta=10^{4,82} \times (E'/\rho)^{-0,69}$) que pour les bois clairs ($R^2=0,81$; $tan\delta=10^{3,55} \times (E'/\rho)^{-0,55}$). Relations positives entre MC et E’’/ρ et Δtanδ conservées pour les bois foncés, non significatives pour les bois clairs (peu de variations de MC). Pour ces derniers, C augmente avec l’assombrissement, tandis qu’elle décroît pour les

bois foncés. Relation négative entre chromaticité et E''/ρ et Δtanδ pour les bois clairs, pas de relation globale significative entre couleur et paramètres d'amortissement pour les bois foncés. Ce dernier point doit toutefois être nuancé du fait de la présence du bois d'Amarante, dont l'angle de teinte très faible (bois « violet parme ») est connu pour être très atypique en couleur ; mais dont l'amortissement n'a rien d'exceptionnellement faible. En ne prenant pas ce bois en compte, il existe une relation positive significative (*) entre angle de teinte et E''/ρ et Δtanδ pour les bois foncés. Un élargissement de l'échantillon serait intéressant pour confirmer ou infirmer une relation entre caractère peu amortissant et faibles h*, qui pourrait le cas échéant servir d'indicateur de présélection, la mesure de la couleur étant rapide et aisée.

En résumé : On retrouve globalement entre essences des relations robustes entre propriétés correspondant à celles relevées à l'échelle de variations locales. Des effets de groupements de bois à comportements contrastés s'y superposent toutefois en « brouillant » le tableau. La couleur (clarté) peut fournir une première clef de tri général. Passé ce premier tri, la recherche d'indicateurs du comportement plus ou moins amortissant doit être adaptée au sous-échantillon en combinant les relations mécaniques, et des paramètres hygroscopiques et/ou de couleur selon les cas.

Les corrélations qui viennent d'être décrites peuvent être visualisées dans une analyse en composantes principales, afin de localiser également les essences/types de bois étudiés. Dans une optique de typologie large, tous les types de bois seront confrontés ; mais il faut garder en mémoire que plusieurs des corrélations entre variables décrivent la structure de l'échantillon plus que des relations physiques générales.

III.b.3.2. **Visualisation : Analyse en Composantes Principales**

Cette méthode d'analyse permet la visualisation simultanée de plusieurs variables dans un même plan, et la localisation des individus. Des exemples d'applications à l'étude interspécifique de bois tropicaux ont pu concerner : la recherche des applications technologiques les mieux adaptées à des essences mal connues à l'usage, par confrontation aux essences d'usage éprouvé [Caillez & Guéneau 1972 ; Déon et al 1976] ; la comparaison des caractéristiques technologiques globales d'essences « proches » (du point de vue botanique et/ou commercial) [Guiscafre & Sales 1977] ; ou encore une aide pour la séparation anatomique d'espèces pour lesquelles ce travail s'avérait particulièrement délicat [Vitalis-Brun & Mariaux 1982]. La méthode consiste à rechercher la meilleure projection sur un (ou plusieurs) plans principaux du nuage de points initial des *n* individus dans un espace à *N* dimensions (nombre de variables initiales). A partir de ce nuage de points initial, est recherchée une première droite (premier axe principal) qui minimise la distorsion des distances initiales entre points, lors de la projection sur cette droite ; et qui maximise la proportion représentée de l'inertie du nuage. Puis est recherchée de

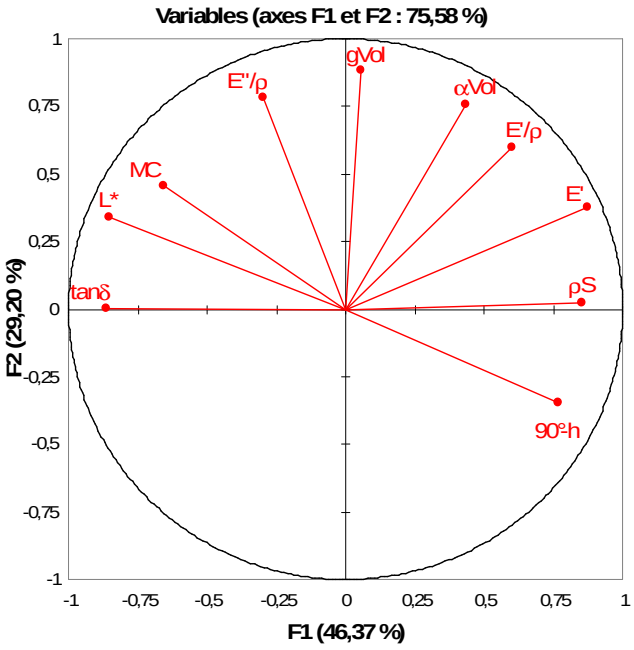


Figure 95: Cercle des corrélations (facteurs 1 et 2) ; ACP sur propriétés mécaniques, physiques et couleur.

la même façon une deuxième droite orthogonale à celle-ci (puis des axes supplémentaires, jusqu'à un nombre N-1 et ce que toute l'inertie initiale soit représentée). A partir de la projection des points sur ces axes, sont définies de nouvelles variables appelées composantes principales. Chaque composante principale est une combinaison linéaire des variables initiales. Elles ont la propriété de ne pas être corrélées entre elles.

Les variables initiales peuvent être projetées sur un plan ayant pour axes ces composantes principales (Figure 95). Ici nous n'avons pas pris en compte a*, b* et C, mal corrélées aux autres propriétés, ni Δtanδ, plus ou moins redondant avec E''/ρ. Les deux premiers facteurs permettent de représenter ≈75% de la variabilité initiale. Plus une variable est proche de la périphérie (cercles de corrélations), mieux elle est représentée dans cette projection. Les variables bien représentées sont : corrélées (+) entre elles si elles sont proches ; corrélées (-) entre elles si elles sont symétriquement opposées par rapport au centre ; significativement non corrélées si elles sont orthogonales.

L'axe 1 oppose des bois denses, rigides, peu amortissants, tendant vers les « rouges sombres » (à droite du graphique : exprimé en 90°-h* pour la lisibilité, L* et h* étant quasi colinéaires), à des bois légers, « mous » et amortissants, clairs et hygroscopiques (à gauche). L'axe 2 qui lui est non corrélé est plutôt un « axe de stabilité » lié à des valeurs plus ou moins importantes de module de perte spécifique et de gonflement. La direction oblique de E'/ρ désignera des bois de forts modules spécifiques dans la région supérieure droite, faibles dans la région inférieure gauche. Une « cartographie » des essences/types de bois, soit leur projection sur ce premier plan principal est présentée sur la Figure 96.

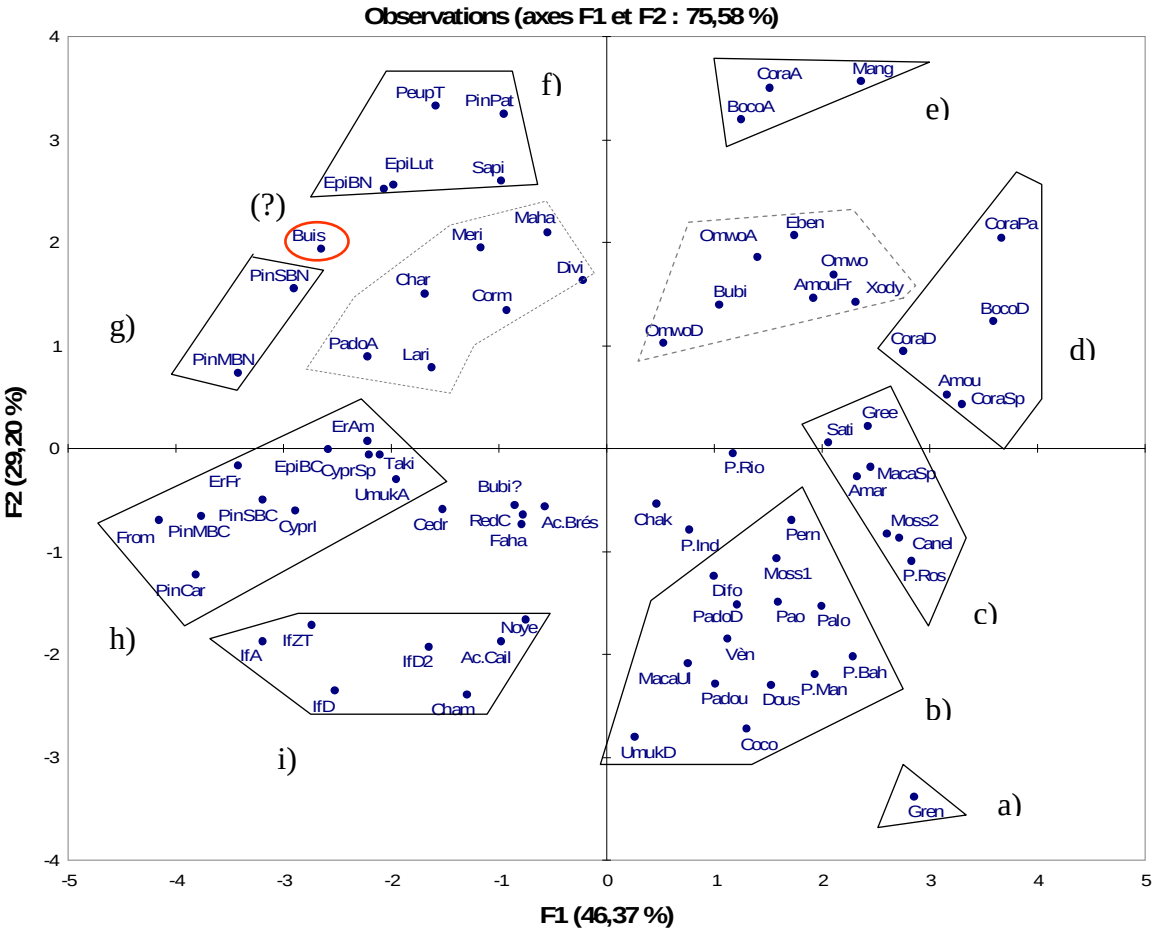


Figure 96: Représentation des individus sur le premier plan principal (ACP sur propriétés mécaniques, physiques et couleur). Libellés : voir Tableau 10.

En première observation, cette projection des individus fait clairement ressortir les contrastes importants entre types de matériaux-bois, tous les « cas de figures » étant représentés. Peu d'individus sont proches de l'origine (cas « moyen » théorique). Particulièrement pour ce qui concerne l'axe 1, une première opposition de groupes est assez nette entre « bois solides peu amortissants et colorés » comprenant la majorité des feuillus tropicaux étudiés, et « bois plus mous amortissants et clairs ». La dispersion selon l'axe 2 est importante également, définissant des bois de « stabilité » (vibratoire ou dimensionnelle) très contrastées, mais relativement plus d'individus sont proches de l'origine.

Comme cas très particulier, on peut remarquer le Grenadille (a), défini à la fois par une très forte densité, stabilité dimensionnelle, un caractère intrinsèquement peu amortissant, une clarté très faible et un angle de teinte faible (proche de l'axe des rouges). A proximité, une catégorie plus nombreuse et moins extrême (b) regroupe, sans qu'une limite interne franche apparaisse, d'autres *Dalbergia*, les bois de cœur des *Pterocarpus*, le Pernambouc, le Doussié, le Pao Rosa, le Difou… On peut les qualifier comme des bois lourds (mais en dessous de la gamme extrême), définis prioritairement par leur grande stabilité (dimensionnelle et très faible amortissement intrinsèque) et leurs teintes « orange-rouge » ; mais dont la rigidité apparaît moins clairement impliquée dans le regroupement.

A proximité se dessine (c) un groupe « intermédiaire » tendant vers de plus fortes densités et rigidités, et toujours globalement « rouges » mais moins représentées par leur « stabilité » dans cette projection. Ce groupe pourrait être qualifié de « transition » vers le groupe (d) de bois de densités et rigidités extrêmes, typiquement composé de bois employés en archets baroques (Amourette, Boco, Coração de Negro). D'après les directions des vecteurs associés aux variables initiales il semble que les premiers descripteurs de ce groupe sont une densité et un module d'Young très élevé. L'observation des données brutes montre que s'y associe un faible à très faible amortissement intrinsèque. Par comparaison les aubiers de deux de ces bois (Boco et Coração) forment un groupe clairement distinct (e) combinant densité encore élevée et très fort module d'élasticité spécifique, associés à des modules de perte plutôt élevés et de forts gonflements. Ce petit groupe inclut aussi le duramen de Mangle.

On retrouve ces dernières caractéristiques, mais avec une densité plus de 2 fois plus faible, dans le groupe (f) contenant Epicéa, Sapin et Pin rigides, et Peuplier (supposé de tension). Dans la continuité de la « rotation » amorcée, on retrouve les qualités courantes/juvéniles de Pins (g) assorties de plus faibles rigidités. Suivies de bois d'abord clairs (h) puis tendant vers le « coloré » (i), répartis sur une gamme non négligeable de densités, et prioritairement décrits par de très faibles modules d'élasticité spécifiques (dont bois de compression, bois ondés) associés à de forts coefficients d'amortissement, mais ceux-ci restant intrinsèquement modérés pour des bois très « mous ».

Les bois plus proches de l'origine des deux axes sont plus délicats à qualifier. Même si les deux zones représentées en pointillés regroupent certes des caractéristiques communes, l'observation des données unidimensionnelles montre que certains individus seraient certainement mieux affectés à d'autres groupes, ou isolés. Les précautions à prendre dans l'interprétation liées à la projection d'un nuage de points à N dimensions sur seulement 2 sont bien sûr à garder en mémoire. D'après l'examen de la qualité de représentation des individus (cosinus carrés des individus avec le plan), on voit qu'ici les bois les plus proches de l'origine des 2 axes sont effectivement mal représentés. Par ailleurs, quelques bois plus éloignés de l'origine sont manifestement assez mal regroupés, ou exagérément décrits par un groupe de variables initiales par rapport à une ou deux autres. Par exemple, il semble un peu choquant que le bois lourd de Buis soit très proche de celui léger de Pin Sylvestre, même s'ils ont certes en commun une hygroscopicité plus élevée que la moyenne, une couleur tendant vers le

« jaune clair », et un module d'Young du même ordre de grandeur (soit un E'/ρ bien plus faible pour le Buis). La qualité de représentation du Buis est effectivement plutôt mauvaise dans ce plan.

Cependant, ce type de mauvais rapprochement suggère aussi que, pour établir maintenant une « typologie » des bois sur la base des propriétés vibratoires, on doive s'affranchir d'une part des relations générales aux propriétés hygroscopiques et de couleur, qui participent certes à la description des bois et qui sont des indicateurs utiles, mais dont les modalités prises par certains individus atypiques de l'échantillon peuvent brouiller la lecture. D'autre part, on voudra aussi s'affranchir des redondances entre propriétés mécaniques (ex : E' sera forcément défini par ρ x E'/ρ) et avoir un jeu de variables aussi décorrélées entre elles que possible. Dans cette optique, le coefficient d'amortissement ne sera pas un bon descripteur du caractère intrinsèquement plus ou moins amortissant des bois, compte tenu de sa forte corrélation avec E'/ρ. Parmi les deux indicateurs déjà utilisés (Δtanδ et E''/ρ), il semble que E''/ρ ne soit pas non plus approprié ici, puisqu'il reste très corrélé avec E'/ρ (aussi fortement que l'est tanδ pour les « bois clairs » ; significatif au seuil de 1% pour les « bois foncés » cf. Tableau 17&Tableau 18) ; la disparité de l'intensité de corrélation pour ces deux grands groupes de bois ferait aussi ressortir tout bois clair de fort E'/ρ comme ayant un amortissement anormalement élevé.

Pour classer les bois en lien avec leurs caractéristiques vibratoires, on a pris en compte densité (ρ), module d'élasticité spécifique dynamique (E'/ρ), et écart statistique d'amortissement par rapport aux « bois courants » (Δtanδ). A titre de visualisation, l'ACP sur ce jeu réduit de variables est présentée sur la Figure 97.

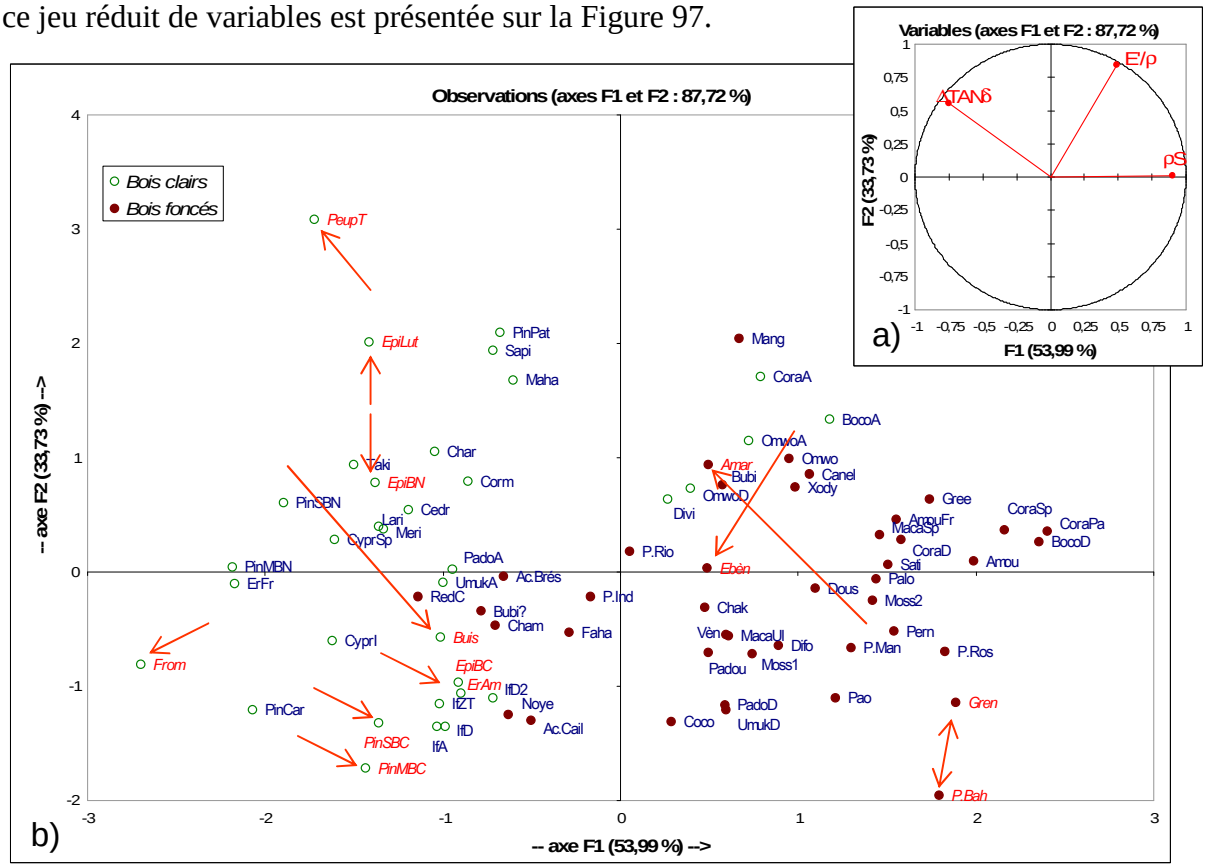


Figure 97: ACP sur densité, module d'élasticité spécifique et écarts du coefficient d'amortissement aux "bois standards". a) : Cercle des corrélations (Facteurs 1&2) ; b) : Représentation des individus dans le premier plan principal. En italique : Bois dont les regroupements ont été le plus modifiés par rapport à une analyse prenant en compte propriétés hygroscopiques et couleur (plus flèches indiquant leurs localisations antérieures).

Les directions des vecteurs associés aux variables initiales de densité et de module spécifique sont sensiblement identiques par rapport à l'analyse « générale » ; celle en rapport à $\Delta\tan\delta$ est comme prévu orthogonale à E'/ρ, soit intermédiaire entre les directions « fort module de perte spécifique » et « forte teneur en eau » de l'analyse précédente. Pour la majorité des essences, le schéma de répartition reste très comparable à ce qui est obtenu en prenant en compte toutes les propriétés mesurées. Ceci semble confirmer une certaine robustesse des relations globales mécanique-physique-couleur (la répartition des essences reste aussi similaire dans une analyse ne prenant en compte que les propriétés physiques – colorimétriques). Les répartitions ont été proportionnellement plus modifiées pour les « bois clairs » (les deux grands groupes de clarté ont été représentés ci-dessus comme variable supplémentaire qualitative ne participant pas à la définition des composantes principales). Le Buis a été rapproché de bois plus denses et de faibles modules spécifiques. L'Epicéa « qualité lutherie » est beaucoup plus distant de ses « qualités courantes/juvéniles » que précédemment. Le comportement vibratoire très atypique du bois (supposé de tension) de Peuplier ressort à présent de façon flagrante. Le Fromager, très léger, est lui aussi isolé ; tandis que les bois mi-lourds à très faible module spécifique et amortissement intrinsèque modéré (bois de compression, bois ondés, If) sont mieux regroupés lorsque leurs teneurs en eau et couleurs ne sont plus prises en compte.

Du côté des « bois foncés lourds », la non prise en compte des paramètres hygroscopiques et colorimétriques ne se traduit que par peu de remaniements. Les deux essences dont le voisinage est le plus « modifié » sont l'Ebène (dont les densité et gonflement élevés le rapprochaient de bois ayant des E'/ρ bien plus forts que le sien), et l'Amarante (probablement rapprochée par son très faible angle de teinte de bois « tendant vers le rouge » mais beaucoup moins amortissants qu'elle). Ce quartier inférieur droit est par ailleurs peu différent de celui de l'analyse précédente, avec des essences à modules spécifiques plutôt moyens, mais qui présentent des caractéristiques d'amortissement exceptionnellement faibles. D'après le regroupement de *Dalbergia*, *Pterocarpus*, *Platimyscium*, on serait presque tenté de parler du « quartier des Dalbergioidées », même si bien sûr il inclut aussi le Pernambouc, le Doussié (Caesalpiniaceae), le Difou (Moraceae)... Il sera intéressant d'effectuer une analyse similaire prenant en compte les données collectées dans la littérature pour augmenter le nombre d'essences et infirmer ou confirmer ces regroupements, sur critères mécaniques, apparaissant liés à la taxonomie.

Enfin, la représentation des essences ici étudiées dans cette ACP donne une bonne idée de leur appartenance à une tendance globale de paramètres vibratoires + densité. Cependant il semble délicat de définir « de visu » des groupes de similitudes bien définis, surtout compte tenu des distorsions inévitables dans une projection. Une tentative de regroupement un peu moins « empirique » nécessite la mise en oeuvre de méthodes de classification « automatique ».

III.b.3.3. **Classification Hiérarchique des bois sur la base des propriétés vibratoires**

L'analyse en composantes principales permet une visualisation d'un nuage à N dimensions dans le meilleur espace réduit, mais en biaisant inévitablement les distances entre points. Dans la classification hiérarchique, les individus sont regroupés sur la base de leurs plus ou moins grandes proximités « réelles » dans l'espace à N dimensions.

Les individus sont regroupés, en commençant par les deux « plus proches » ; puis par itérations successives sont créées des partitions de moins en moins fines de l'ensemble. Le critère d'agrégation utilisé ici (méthode de Ward, couramment utilisée) utilise la même notion d'inertie que l'ACP. A chaque pas on cherche à obtenir un minimum de l'inertie intra-classe,

et un maximum de l'inertie inter-classe. La représentation graphique de l'arbre de classification « vibratoire » de nos essences selon les trois paramètres ci-dessus (ρ, E'/ρ, et $\Delta\tan\delta$) est présentée sur la Figure 98. Le trait en pointillé représente un niveau pour la définition du nombre de classes, qui a été choisi relativement empiriquement (i.e. après plusieurs essais et vérification de la cohérence des groupes, tout en évitant de créer un nombre excessif de classes malgré la grande étendue de variation des propriétés considérées).

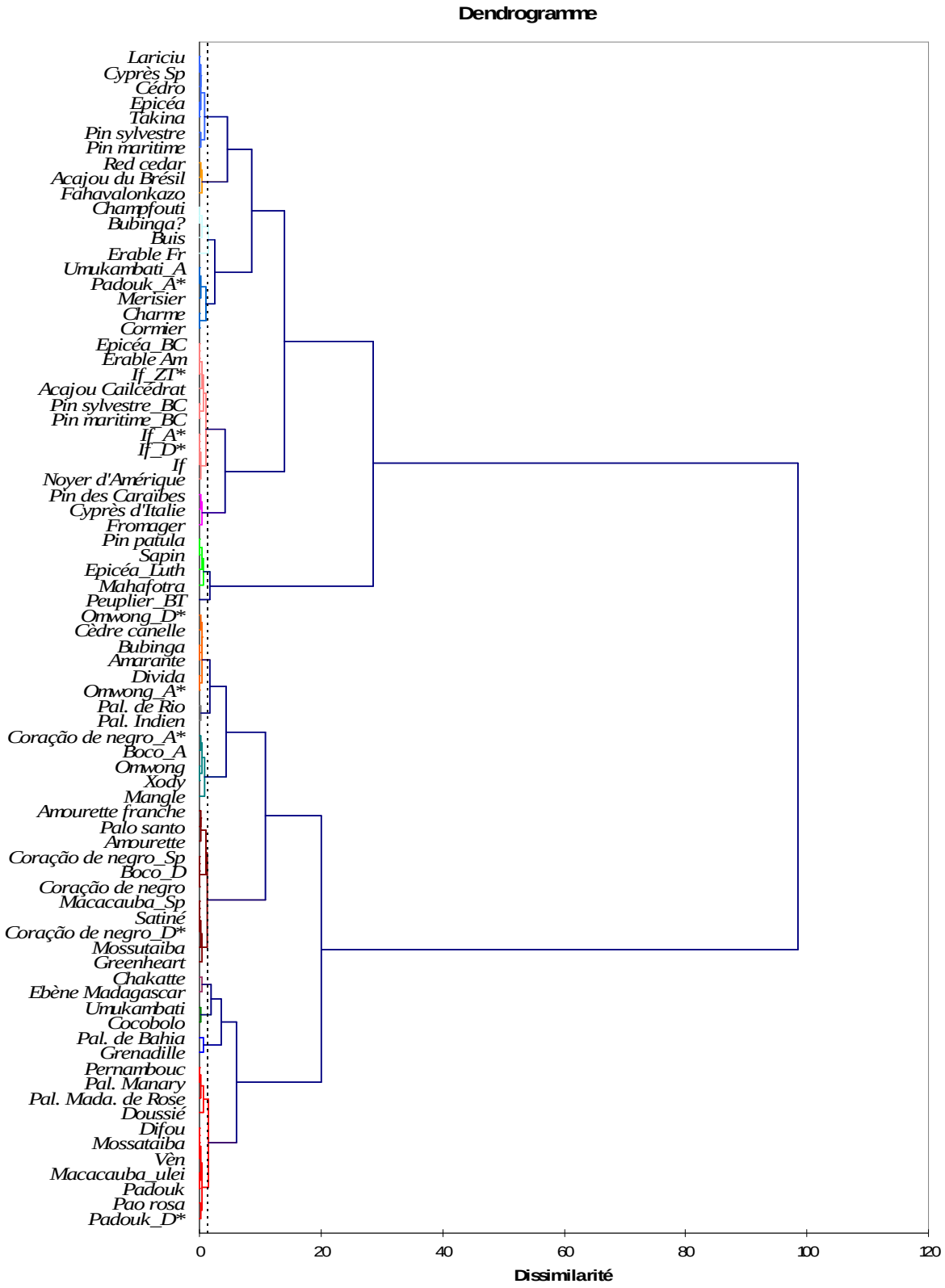


Figure 98: Arbre de classification hiérarchique ascendante (« CAH » ; méthode de Ward) des types de bois prenant en compte comme variables: densité, module d'élasticité spécifique, déviation du coefficient d'amortissement aux « bois normaux ».

En parallèle de cette représentation graphique, les caractéristiques des classes (variance intra, barycentres sur les 3 paramètres pris en compte, essences/types de bois regroupés) sont présentées sur le Tableau 19. Comme on l'avait déjà évoqué au sujet de

l'ACP, le plus grand niveau de dissimilarité visible sur le dendrogramme sépare les bois « lourds à très-très lourds » (classes 1 à 8) et les bois «légers à mi-lourds » (classes 9 à 16). Une deuxième partition de niveau élevé de dissimilarité différencie, parmi les bois «légers à mi-lourds », ceux ayant un module spécifique très élevé, ici assorti d'amortissements supérieurs à la tendance générale (classes 13 et 16, Epicéa qualité lutherie, résineux rigides, Mahafotra ; et à fortiori bois probablement de tension de Peuplier qui n'est agrégé à personne pour ce nombre de classes). Le prochain grand niveau de dissimilarité sépare les bois « lourds à très-très lourds » ayant : d'un côté, des E'/ρ moyens à plutôt faibles, mais surtout des amortissements exceptionnellement faibles (classes 3, 4, 5, 7 ; essences visualisables dans le quart inférieur droit de l'ACP précédente). D'un autre côté, des essences ayant des amortissements relatifs plus variés, mais généralement des modules spécifiques élevés (classes 1, 6, 8 ; quart supérieur droit sur l'ACP). La classe 2, retrouvée dans cette grande partition, pourrait être considérée comme des bois « moyens partout » en regard de notre échantillon. Le fait qu'elle contienne les Palissandres Indien et de Rio n'est pas à interpréter directement, dans la mesure où ces deux bois ne sont représentés que par une éprouvette chacun (les données sont cependant assez cohérentes avec les résultats de [Yano et al 1995&1997]).

Tableau 19: Exemple de regroupement des types de bois par CAH : la partition des classes correspond au niveau illustré par la droite en pointillé sur la (Figure 98). Les données en regard des propriétés correspondent aux barycentres des classes sur la propriété considérée (données centrées-réduites).

Classe	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Objets	11	2	11	2	2	5	2	6	10	4	3	7	4	5	3	1
Variance intra-classe	0,34	0,11	0,32	0,62	0,14	0,36	0,42	0,19	0,27	0,62	0,25	0,27	0,33	0,33	0,39	0,00
Barycentres:																
ρstab	1,28	-0,12	0,28	1,62	0,51	1,13	1,12	0,32	-0,59	0,02	-1,27	-1,27	-0,94	-0,36	-1,80	-1,41
E'/ρ	0,86	0,00	0,05	-0,77	-0,99	1,21	-0,37	0,98	-1,46	-1,23	-0,04	-0,09	1,47	-0,24	-1,37	2,02
Δtanδ	-0,90	-0,05	-1,30	-1,65	-0,78	0,60	0,29	0,03	-0,06	1,19	-0,39	1,08	1,26	1,15	0,53	2,52
	BocoD	P.Ind	P.Ros	Gren	Coco	Xody	Ebèn	Canel	Ac.Cail	Bubi?	Ac.Brés	Taki	Maha	Meri	From	PeupT
	Amou	P.Rio	Moss1	P.Bah	UmukD	Omwo	Chak	Amar	Noye	Cham	RedC	Cedr	Sapi	PadoA	Cyprl	
	CoraPa		Dous			Mang		Bubi	IfZT	ErFr	Faha	CyprSp	EpiLut	UmukA	PinCar	
	CoraSp		P.Man			BocoA		OmwoD	IfD	Buis		Lari	PinPat	Corm		
	Moss2		PadoD			CoraA		Divi	IfD2			EpiBN		Char		
	Palo		Padou					OmwoA	ErAm			PinMBN				
	Sati		Pern						EpiBC			PinSBN				
	Gree		Difo						PinMBC							
	MacaSp		MacaUl						PinSBC							
	CoraD		Vèn						IfA							
	AmouFr		Pao													

Passées ces grandes distinctions globales, les regroupements en classes présentées ci-dessus peuvent être qualifiés en fonction de leurs définitions vis-à-vis des propriétés considérées, et/ou par l'examen des essences regroupées et éventuellement de leurs usages connus, en complément des premières observations notées pour l'ACP.

-Bois (très) denses et à fort module spécifique :

La classe 1, définie par ces critères (soit au final fort module d'Young) combinés à de faibles amortissements intrinsèques, contient typiquement les bois préférés en archèterie baroque (Amourette, différents Coração de negro). A ceux-ci s'ajoutent d'autres essences, certaines fournies comme bois « à tester » (par l'archetière Nelly Poidevin : Mossutaiba, Palo Santo) ; d'autres qui avaient été présélectionnées dans la base du CIRAD d'après des critères physico-mécaniques et pour certaines chimiques (Greenheart, Satiné, le *Platimyscium sp.* plus dense que *P. ulei*… Le Coração de negro et le Boco ressortaient aussi de cette sélection). A ce sujet on peut remarquer d'une part un bon recoupement entre les bois qui ressortaient de façon manifeste lors de cette présélection, et les bois contenus dans les classes ci-dessus à faibles

amortissements intrinsèques. D'autre part, ce repérage « physico-mécanique & chimique » faisait aussi ressortir un certain recoupement avec des essences qui ont pu être employées en facture de différentes cultures, même si souvent ces usages et essences sont peu connues à la facture Occidentale moderne.

Les deux autres classes (6&8) de « bois denses très rigides » sont proportionnellement plus amortissantes, surtout la classe 6 qui contient les aubiers de Boco et de Coração, accompagnés des duramens de Mangle et de *Dialium*. Concernant les *Dialium*, on peut remarquer que deux exemplaires de duramen d'espèces différentes (*D. cochinchinensis*, Asie du Sud-Est, et *D. pachyphyllum*, Afrique) sont ici plus similaires entre eux, que deux exemplaires différents de la même essence Omwong, dont l'un est dans la classe 8 (légèrement plus légère et comparativement moins amortissante), aubier et duramen étant dans son cas regroupés. Les essences de cette classe 8, d'amortissements moyens, contiennent en outre : un « bois clair » contenant peu d'extraits (Divida), et deux bois franchement colorés (Amarante et Cèdre Cannelle) qui avaient été présélectionnés sur le critères de leurs faibles PsF et retraits et de leur contenu manifeste en extraits. Ceci suggère qu'il ne faille pas considérer ces indicateurs comme strictement systématiques. Nous ne connaissons pas d'usage en facture marqué[31] à ces classes 6 et 8.

-Bois (très) denses à modules spécifiques moyens à faibles :

La classe 3, numériquement la plus importante, contient des bois exceptionnellement peu amortissants, et qui ont déjà été plus discutés dans le texte. On y retrouve certes le Pernambouc des archets modernes (moins rigide que les bois d'archets baroques), ainsi que des bois employés (dans leurs régions de croissance ou bien à l'échelle internationale) en « xylophones » et en fonds et éclisses de guitares. On peut remarquer que ce regroupement est à la limite du niveau de dissimilarité adopté, et que si on ajoute seulement une classe, il sera divisé entre ses bois relativement plus rigides (Pernambouc, Palissandres Malgaches « Manary » et « Bois de Rose », Doussié), et les autres à plus faibles E'/ρ.

Les autres classes (4, 5, 7) ne contiennent que deux individus chacune. Le Grenadille (corps d'instruments à vents ; des luthiers Américains le présentent comme excellent en fonds et éclisses de guitares… A condition de trouver des dimensions suffisantes venant de cet arbre de savanes !) et le « Palissandre de Bahia » (4), encore relativement dissimilaires entre eux, sont extrêmes en densité et faible amortissement, avec d'assez faibles E'/ρ. Le Cocobolo et l'Umukambati, moins denses et d'encore plus faibles E'/ρ, restent faiblement amortissants ; tandis que l'Ebène et le Chakatte (7) diffèrent surtout des bois précédents par leurs amortissements intrinsèques plutôt élevés.

Tous ces bois présentent (d'après les données disponibles ou de façon manifeste) de forts contenus en métabolites secondaires. Les aubiers de deux d'entre eux (Pterocarpus soyauxii et P. tinctorius) sont eux regroupés avec des bois de feuillus tempérés mi-lourds et plutôt plus amortissants que la moyenne (classe 14).

-Bois légers à mi-lourds à modules spécifiques moyens à faibles :

Les « bois légers très rigides et intrinsèquement amortissants » (classes 13&15), et les « feuillus mi-lourds à E'/ρ moyens et relativement amortissants » (classe 14) ont déjà été évoqués. Avec des propriétés vibratoires similaires à cette classe 14, mais une plus faible

[31] Même si certains Bubingas sont employés en fonds et éclisses de guitares, ou en vents, et si des *Dialium spp.* d'Indonésie/Malaisie –un peu moins amortissants que les nôtres- sont cités par [Matsunaga et al 1996] comme étant en phase expérimentale de commercialisation pour des archets modernes.

densité, on retrouve (12) des résineux « classiques » ainsi que deux feuillus tropicaux (Takina et Cédro).

Comme on l'a déjà observé, ces bois légers à mi-lourds qui ont été échantillonnés ont généralement des amortissements intrinsèques dans la gamme « neutre » à supérieure. Les deux exceptions concernent : la petite classe 11 (Acajou du Brésil, Red Cedar et Fahavalonkazo) de bois très peu échantillonnés ; la classe 9, de bois mi-lourds à particulièrement faibles modules spécifiques, qui contient des bois de compression, l'If (aubier et duramen confondus), l'Erable ondé Américain et l'Acajou Cailcédrat très contrefilé. Les deux classes restantes (10 et 15) ne semblent pas vraiment une bonne description, dans la mesure où elles contiennt en fait des bois relativement « en marge » par rapport à l'ensemble de l'échantillon (par exemple le Buis et le Fromager), et surtout peu échantillonnés.

Ces regroupements permettent une première typologie. Ils sont toutefois encore assez généralistes au regard de l'usage en facture instrumentale. Deux niveaux d'analyse additionnels seront à prévoir : d'une part, une analyse « interspécifique » mais plus ciblée sur un des grands groupes (i.e. spécifique aux bois lourds à très lourds par exemple), en confrontant nos résultats avec les données ayant pu être collectées dans la littérature pour augmenter le nombre d'espèces. D'autre part, et dans la mesure du possible compte tenu de notre échantillon, une analyse « inter- + intra-spécifique », comparant le degré de recoupement de différents stocks par espèces, et de différentes espèces.

III.b.4. Variations de propriétés et interrelations à l'intérieur des groupes de bois

Dans les paragraphes précédents, les différentes essences étudiées ont pu être comparées et classées sur la base de leurs valeurs moyennes de propriétés physico-mécaniques. Des corrélations entre ces propriétés peuvent servir d'indicateurs pour le choix de bois, à l'échelle inter-spécifique. Cependant il est plus que probable qu'au sein d'une seule espèce, ou de quelques espèces proches, les relations entres propriétés physico-mécaniques suivent des schémas spécifiques. Dans cette section, on ré-observera d'abord les relations entre module spécifique et amortissement, à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions, en faisant ressortir les différentes essences. Dans un deuxième temps, pour les ≈20 essences plus échantillonnées, les propriétés vibratoires moyennes obtenues pour différents arbres ou stocks d'une même espèce seront présentées, ainsi que la comparaison des aubiers et duramen pour 6 essences. Bien sur, notre échantillon n'est pas approprié pour vraiment quantifier la variabilité intra-spécifique ; les résultats présentés ici peuvent toutefois donner un premier ordre d'idée de ces variations.

III.b.4.1. Modules spécifiques et amortissement par éprouvette, pour les différentes espèces

Dans le §III.a, il ressortait de l'étude de ces relations par grands groupes de types de bois : à la fois une tendance globale assez robuste et cohérente avec la littérature [Ono & Norimoto 1983], et un décalage vers de faibles valeurs d'amortissement, à module spécifique donné, pour les bois à fortes teneurs en extraits. Les variations résiduelles à l'intérieur de ces groupes restaient toutefois importantes ; dans cette section, ces relations sont observées espèce par espèce. Celles-ci sont regroupées d'après des critères « botaniques », pour la lisibilité mais aussi en raison du sur-échantillonnage des bois de Légumineuses dans notre travail.

Par ailleurs, seuls les bois de coeur sont présentés dans ce paragraphe ; les aubiers sont dissociés dans le suivant, et les bois de compression de résineux feront l'objet d'un sous-chapitre spécifique. Les données concernant un certain nombre d'espèces qui ne sont

représentées que par 1-4 éprouvettes ont été incluses à titre indicatif/comparatif. Les gammes de variations incluent les pièces de bois ayant des angles de fil locaux non forcément représentatifs des conditions d'emploi en plus grandes dimensions (données non prises en compte dans les valeurs moyennes par essence ou arbre).

a Relations par types d'espèces

Dans les graphiques suivants (Figure 99 pour les Résineux), les données sont surtout présentées en échelle linéaire afin de mieux repérer les gammes de valeurs, et la dispersion effective. L'allure globale en échelle logarithmique est présentée en parallèle, sur une étendue fixe de coordonnées pour pouvoir comparer visuellement les groupes. Les régressions obtenues sur les essences suffisamment échantillonnées sont résumées en fin de section. Pour celles-ci, on trouvera également en annexe les matrices de corrélations entre propriétés vibratoires et physiques, à l'échelle de l'éprouvette, pour chaque espèce. Quelques points de ces corrélations sont signalés dans le texte ci-dessous.

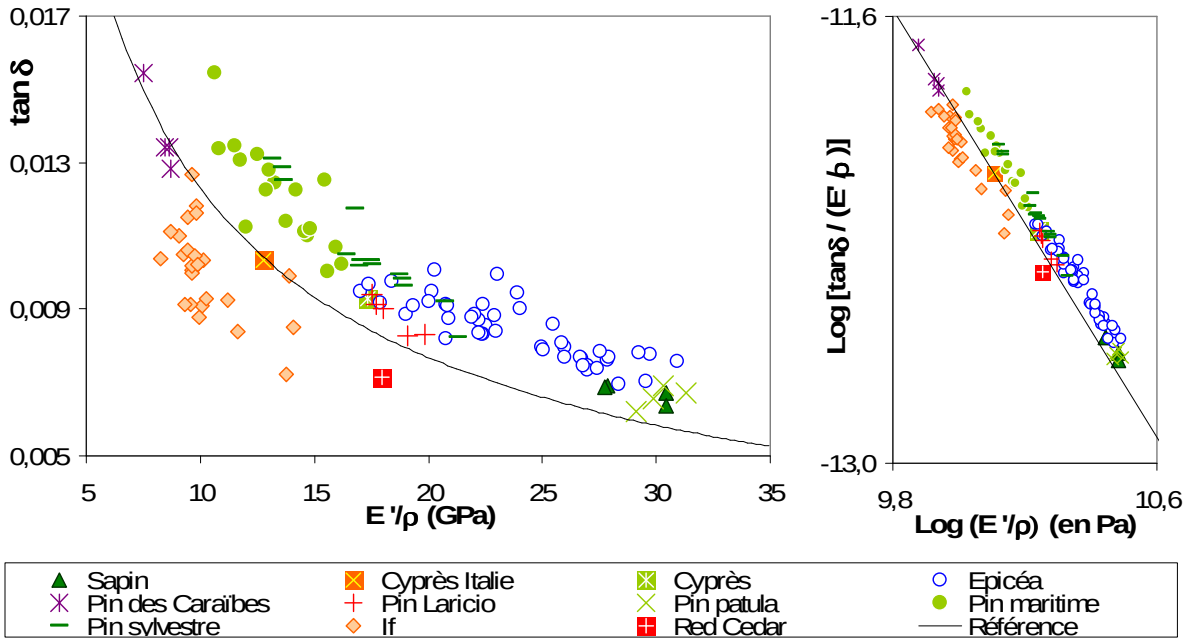


Figure 99: Relation entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique pour les bois de Résineux. A gauche en échelle linéaire, à droite en échelle logarihmique. La « référence » correspond toujours à la tendance globale cohérente entre nos essais et les résultats de [Ono & Norimoto 1983].

Ces bois de résineux sont entre proches, et au dessus de la « référence », à l'exception de l'If et du Red Cedar qui sont au dessous. Pour les Pins et Epicéas, la relation $tan\delta - E'/\rho$ est assez homogène et on voit en échelle Log qu'ils sont bien alignés, parallèlement à la tendance moyenne. Pour l'If, la dispersion est plus importante. Sur cet échantillon tout du moins, les déviations à la « tendance » ne sont pas corrélées ni à la teneur en eau, ni à la couleur. La chromaticité (+) et l'angle de teinte (-) sont par contre liés à la densité et au coefficient d'amortissement, et fortement (- et + respectivement) à la teneur en eau.

La Figure 100 présente ces relations $tan\delta - E'/\rho$ pour les quelques bois de Feuillus tempérés étudiés (la plupart très peu échantillonnés).

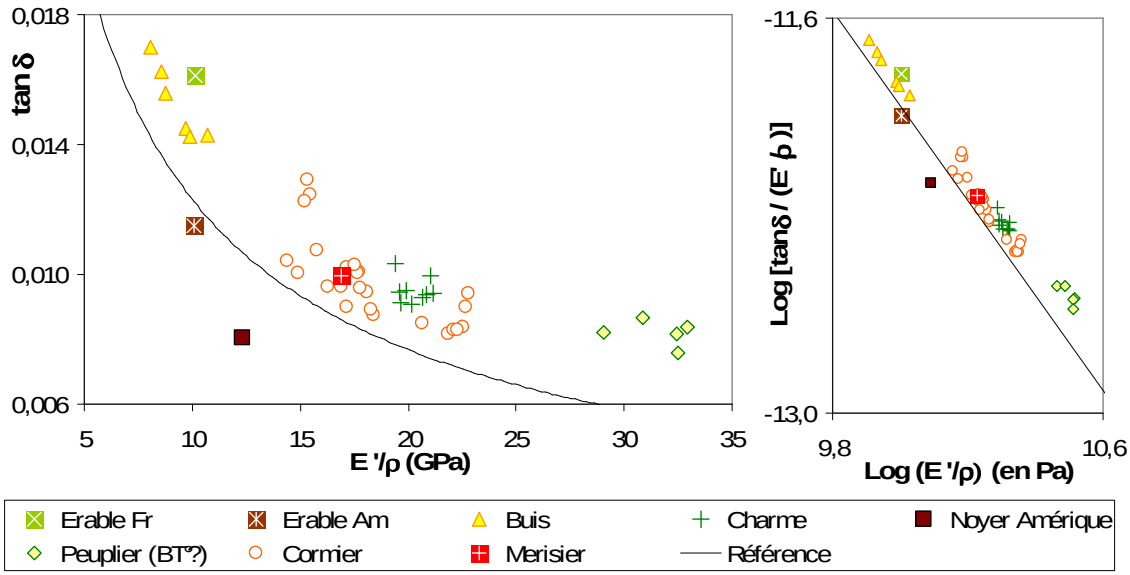


Figure 100: E'/ρ et tanδ pour les bois de Feuillus tempérés.

A l'exception du Noyer d'Amérique (une seule éprouvette), ces bois sont soit proches, soit au dessus, de la « référence ». En représentation logarithmique, les différentes essences sont assez bien alignées et parallèles à la tendance moyenne, avec une dispersion modérée. Le Bois de Charme échantillonné montre peu de variations. Pour le Buis (2 stocks) et le Cormier (5 stocks), la relation entre coefficient d'amortissement et module spécifique est significative. Cette relation présente plus de dispersion pour le Cormier. Pour celui-ci, les déviations à la « référence » sont bien corrélées (+) à la clarté et à l'angle de teinte.

On peut comparer cette dispersion modérée avec d'autres bois relativement peu échantillonnés, mais cette fois de Feuillus tropicaux de diverses familles (Figure 101).

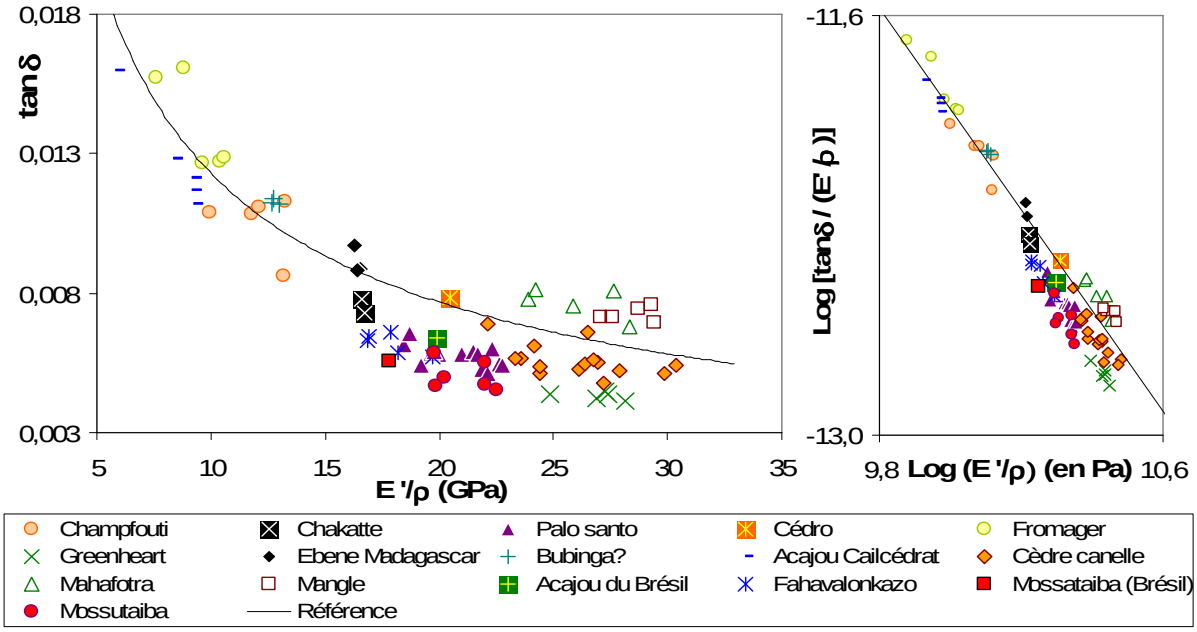


Figure 101: E'/ρ et tanδ pour divers bois de Feuillus tropicaux peu reliés botaniquement et/ou peu échantillonnés.

La dispersion globale est ici plus importante et les différentes espèces se répartissent de part et d'autre de la tendance, avec maintenant plus d'individus nettement au dessous. La relation $tan\delta - E'/\rho$ est significative pour le Cèdre Cannelle et le Palo Santo (par contre pour

ces deux bois les paramètres d'amortissement intrinsèques ne sont ici pas corrélés avec teneur en eau ou couleur), ainsi que pour le Fromager et l'Acajou Cailcédrat (malgré le petit nombre d'éprouvette pour ces deux derniers). Les 4 espèces de Moraceae (dont 3 *Brosimum*) étudiées ont été isolées sur la Figure 102.

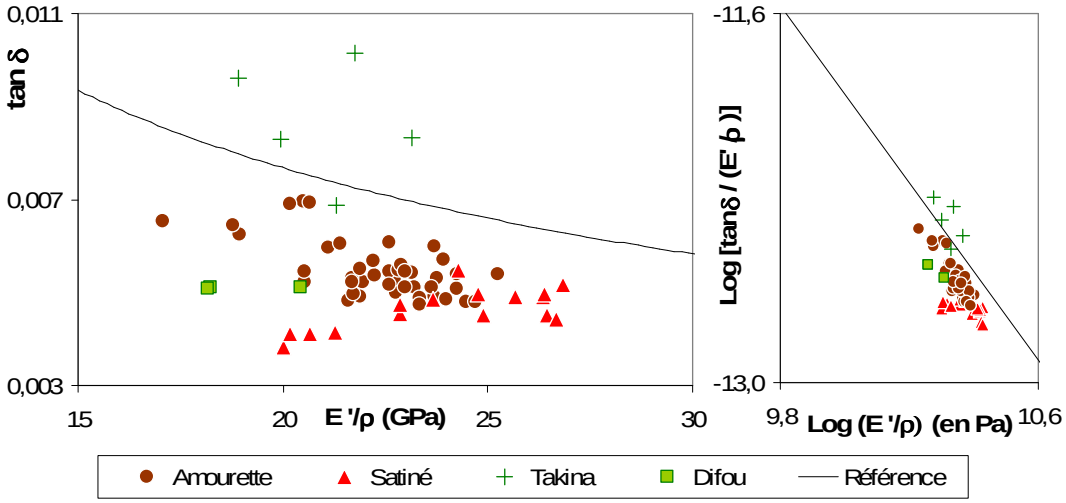


Figure 102: E'/ρ et tanδ pour des bois de Moraceae.

Sur ces 4 essences la dispersion dans la relation $tan\delta - E'/\rho$ est importante. A part le « bois clair » de Takina, ces bois sont nettement moins amortissants que la « référence ». Le Difou mériterait d'être plus échantillonné. Pour l'Amourette (9 stocks), la relation $tan\delta - E'/\rho$ est significative ; à l'échelle des variations entre éprouvettes les paramètres physiques n'ont (au moins pour cet échantillon) pas d'influence sur les écarts d'amortissement observés. Pour le Satiné (1 n° CTFT), les coefficients d'amortissement ne dépendent ici pas de E'/ρ (relation apparente positive…) ; ils sont par contre très liés (en valeurs brutes et a fortiori en terme d'amortissement intrinsèque) à la teneur en eau (+) et à la couleur (positivement à la clarté mais surtout à la chromaticité, et à l'angle de teinte).

Les bois les plus échantillonnés appartiennent à la super-famille des Legumineuses ; sur la Figure 103 sont présentées les essences de Caesalpiniaceae étudiées.

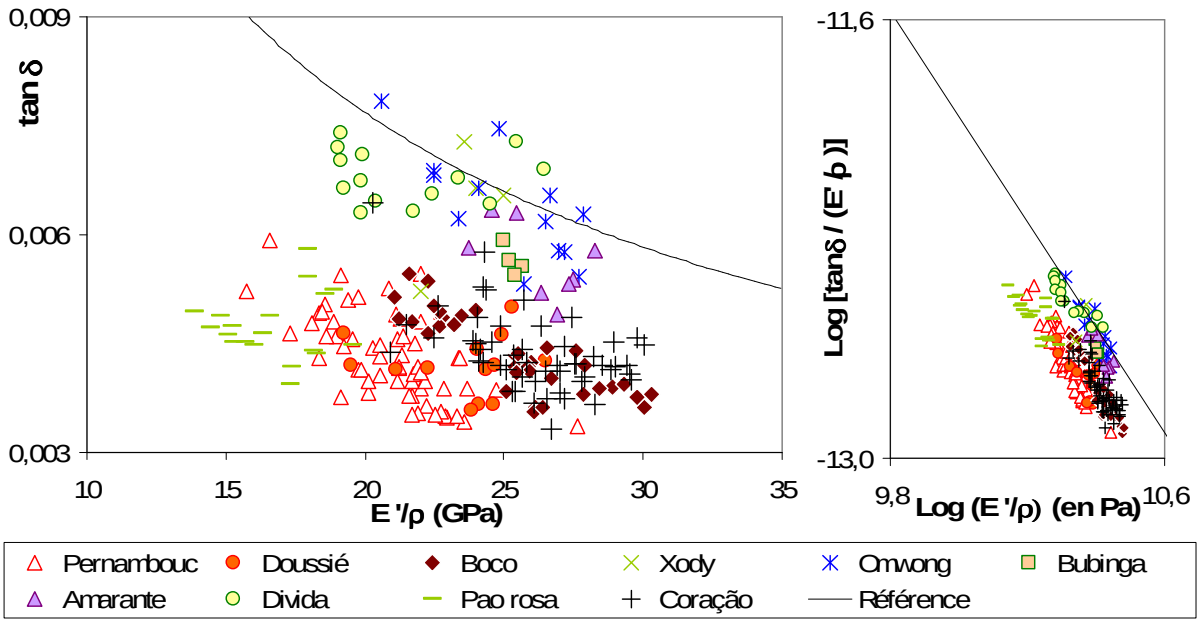


Figure 103: E'/ρ et tanδ pour les bois de cœur de Leguminosae : Caesalpiniaceae.

Sur une plage de module spécifique de ≈15 à 30GPa, la dispersion globale de coefficients d'amortissements est très importante, et en considérant toutes ces essences aucune tendance générale n'apparaît en échelle linéaire. Deux sous groupes semblent se dessiner, l'un (Divida, *Dialium*, Amarante) plus en accord avec la référence, et l'autre d'amortissements extrêmement faibles. La relation *tanδ-E'/ρ* n'est significative que pour 4 espèces : Pernambouc (8 stocks, R^2=0,41), Omwong (2 n° CTFT, R^2=0,52), Coração de Negro (4 stocks, R^2=0,24) et Boco (3 stocks, R^2= 0,71). A part pour ce dernier, la dispersion intra-spécifique reste toutefois très importante. Pour ces essences, les déviations résiduelles d'amortissement n'apparaissent ici pas corrélées aux propriétés physiques/colorimétriques (sauf légèrement à la teneur en eau pour le Pernambouc) ; leurs teneurs en eau ont par contre des liens à la couleur sauf pour l'Omwong.

Pour les essences où les coefficients d'amortissements ne sont pas, du moins dans la plage expérimentale considérée, expliqués par *E'/ρ*, l'amortissement intrinsèque présente certains liens aux propriétés physiques et/ou à la couleur (Doussié, Pao Rosa, Divida).

L'autre part des bois de Leguminosae (Papilionaceae) est présentée sur la Figure 104.

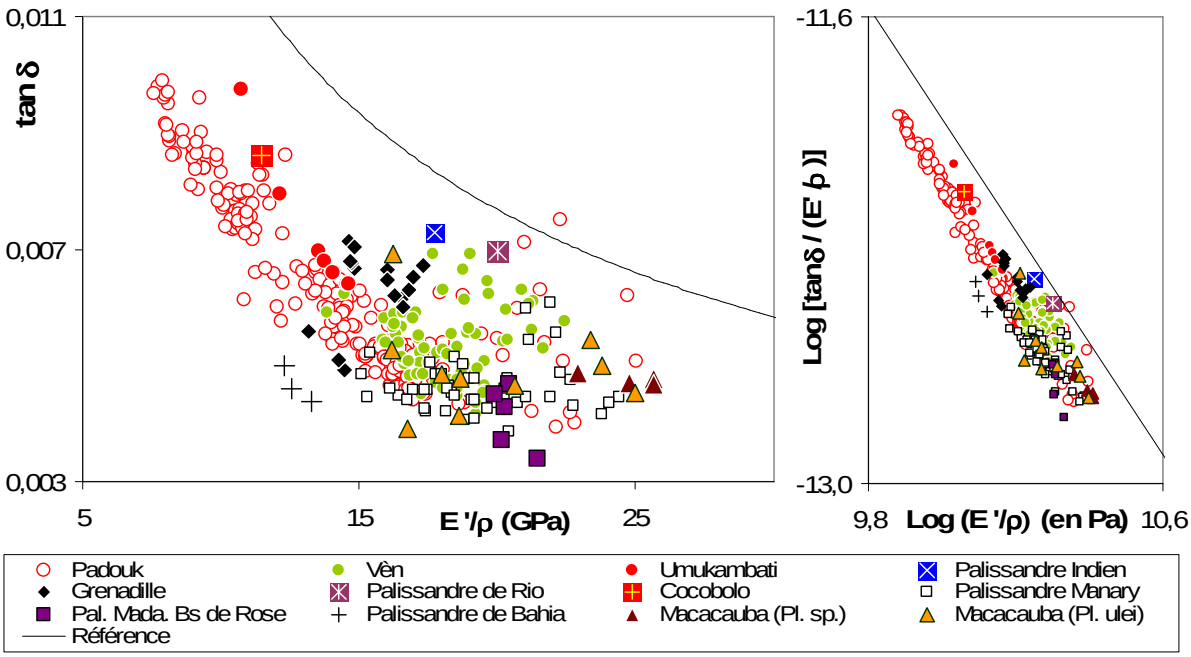


Figure 104: E'/ρ et tanδ pour les bois de cœur de Leguminosae : Papilionaceae.

Par rapport aux bois de Caesalpiniaceae étudiés, la gamme de module spécifique est décalée vers des valeurs plus faibles de module spécifique (de ≈12 à ≈27GPa, les valeurs inférieures à 12 correspondent à des angles de fil non représentatifs des conditions générales d'usage). La dispersion sur la relation $tan\delta - E'/\rho$ est ici encore très élevée ; toutefois l'on ne retrouve presque plus de bois proches de la tendance de référence, tous y étant très nettement inférieurs. De ce fait et à cause de la plus grande étendue de variation de E'/ρ, ces essences se répartissent plus linéairement, et sensiblement parallèlement à la référence, en échelle Log.

Les relations $tan\delta - E'/\rho$ ne sont significatives que pour le *Platymiscium sp.*, l'Umukambati, et le Padouk. Pour ce dernier (5 arbres), les déviations résiduelles d'amortissement sont un peu liées (+) à la teneur en eau, et plus fortement (-) à la chromaticité (pas aux autres paramètres colorimétriques). Pour les essences où les relations « mécaniques » ne sont pas significatives, les Δtanδ et E''/ρ peuvent être liés à la teneur en eau (Vèn, positivement), et/ou à la couleur (Grenadille : ++ avec clarté et + avec angle de teinte ; Vèn – avec h*).

b Synthèse des régressions par essences

Pour les essences représentées par au moins 5 éprouvettes et pour lesquelles la relation $tan\delta - E'/\rho$ est significative en échelle linéaire, la Figure 105 et le Tableau 20 résument les allures et paramètres des régressions entre ces deux propriétés.

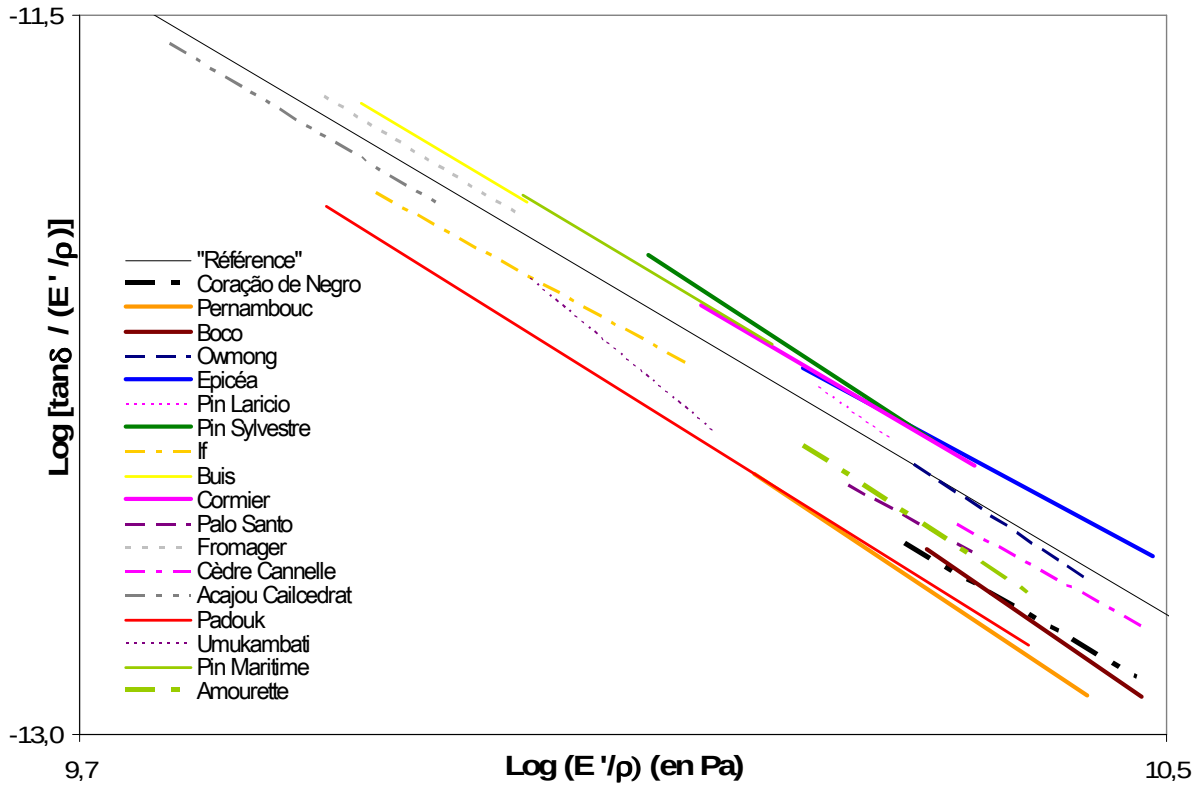


Figure 105: Droites de régression *Log[tanδ/(E/ρ)]=f[Log(E/ρ)]*.

Tableau 20: Paramètres des régressions entre amortissement et module spécifique (*Log[tanδ/(E/ρ)] = - (1+B)*Log(E/ρ)+A* ou bien $tan\delta = 10^{A}.(E/\rho)^{-B}$), pour les essences représentées par au moins 5 éprouvettes et où la relation en échelle linéaire est significative (au seuil α).

Essence	n	α	R²Lin	R² Log	A	B
Acajou Cailcédrat	5	***	0,95	0,99	4,91	0,69
Amourette	43	***	0,41	0,76	6,50	0,85
Boco	35	***	0,71	0,91	7,63	0,96
Buis	6	***	0,91	0,98	4,98	0,68
Cèdre Canelle	15	*	0,26	0,73	3,40	0,54
Coração de negro	52	***	0,24	0,68	4,25	0,64
Cormier	24	***	0,61	0,91	4,92	0,68
Epicéa	45	***	0,71	0,95	3,40	0,53
Fromager	5	*	0,71	0,93	5,56	0,74
If	26	***	0,38	0,83	3,64	0,56
Omwong	13	**	0,52	0,83	6,92	0,88
Padouk	249	***	0,81	0,96	5,59	0,77
Palo Santo	11	**	0,33	0,80	3,33	0,54
Pernambouc	61	***	0,41	0,76	6,70	0,88
Pin Laricio	5	**	0,90	0,97	8,14	0,99
Pin Maritime	18	***	0,68	0,93	5,05	0,69
Pin Sylvestre	14	***	0,92	0,98	6,72	0,85
Umukambati	6	***	0,99	1,00	11,69	1,37

Accessoirement, on peut remarquer que pour les espèces avec au moins 5 éprouvettes, à peine plus de la moitié présentent une relation significative entre coefficient d'amortissement et module spécifique (18 contre 16 ; avec un nombre moyen d'éprouvettes de 19 vs 12 si l'on exclut les très gros échantillons de Padouk et de Vèn). Parmi celles où la relation n'est pas significative, il peut s'agir de la présence de stocks différents à comportements contrastés, comme d'une non-significativité pour un seul et même arbre.

Pour les essences représentées ci-dessus où cette relation est significative, les tendances en échelle Log sont raisonnablement parallèles entre elles et avec la « référence » (pentes de -1,53 à -1,99, soit -1,73 en moyenne en excluant l'Umukambati). Les variations –

dans l'ensemble relativement modérées - de pente peuvent avoir des causes physiques (le cisaillement entre aussi probablement en compte), mais aussi forcément liées à l'échantillon comme pour toute régression expérimentale de ce type.

Les droites représentant les Pins et Epicéa apparaissent en bonne continuité entre elles, et avec celles du Cormier et du Buis (et avec celle du Fromager avec un léger décalage vers le bas). L'If est par contre beaucoup plus bas que ces autres résineux. Parmi les bois très faiblement amortissants, on peut remarquer que la droite de régression du Padouk et celle du Pernambouc sont bien dans une continuité (malgré les différences de gamme de modules spécifiques). De même, avec des amortissements intrinsèques un peu moins extrêmes, pour Boco et Coração de Negro ; qui sont eux-mêmes encore décalés vers le bas par rapport à l'Amourette et au Palo Santo ; puis au Cèdre Cannelle ; et enfin à l'Omwong qui correspond sensiblement à la tendance de référence.

III.b.4.2. **Variations entre arbres ou stocks**

Pour une vingtaine d'espèces, le matériel étudié provenait d'au moins deux arbres (ou stocks) différents. Notre échantillon n'est bien sûr pas approprié pour une étude de la variabilité intra-spécifique, toutefois il semble intéressant de présenter brièvement les degrés de différences de propriétés rencontrés sur le matériel étudié. Le cas échéant, différentes espèces du même genre sont comparées. Dans ce cas des essences représentées par un seul spécimen pourront être inclues.

Pour les *Pterocarpus*, les comparaisons entre différents arbres et localisations dans le tronc sont présentées dans le chapitre dédié à l'étude des effets des extractibles sur ces espèces.

a *Afzelia bipendensis* Harms *(Doussié ; Caesalpiniaceae) et Licaria cayennensis* Kosterm. *(Cèdre Cannelle ; Lauraceae).*

Nous avions précédemment étudié ces deux essences, sur le même échantillon (travail de DEA [Brémaud 2001]), mais la méthode de mesure alors employée n'était pas très fiable sur les coefficients d'amortissements. Il s'agit ici d'un résumé des données vibratoires vérifiées sur ces essences. Pour le Doussié, l'échantillon comporte 4 arbres (=N°CTFT), et pour le Cèdre Cannelle 6, représentés chacun par une ou deux positions de duramen.

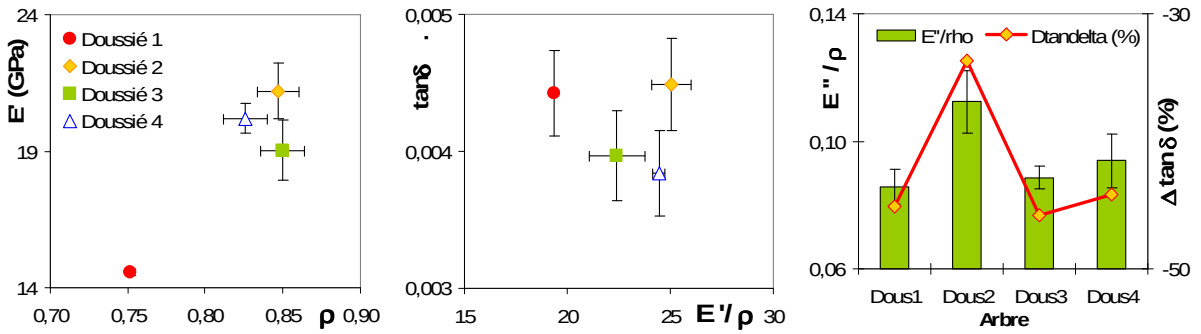


Figure 106: Densité et propriétés vibratoires pour des échantillons provenant de 4 arbres de Doussié (*Afzelia bipendensis* Harms.)

Sur la base de ces données vérifiées, cette essence présente des coefficients d'amortissements parmi les plus faibles des essences étudiées (inférieurs à 4,5‰ en moyenne). Entre le spécimen le moins rigide (n°1) et le plus rigide (n°2), les coefficients d'amortissements sont équivalents ; soit des paramètres d'amortissement intrinsèque beaucoup plus faibles pour le premier. D'après les données chimiques disponibles (uniquement pour ces deux arbres), le « Douss1 » a un taux d'extraits Alcool-benzène de

≈24%, le « Douss2 » de ≈19%. Les individus 1, 3 et 4 sont peu différents en terme de E''/ρ et de Δtanδ, seul le n°2 est significativement plus amortissant.

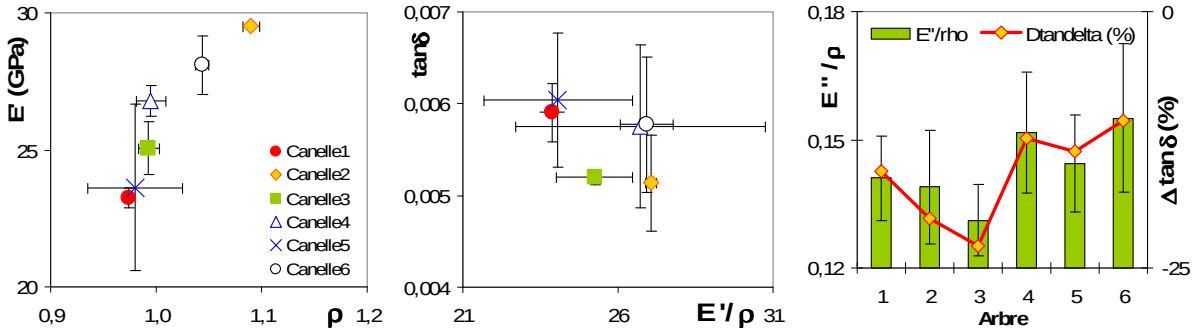


Figure 107: Densité et propriétés vibratoires pour des échantillons provenant de 6 arbres de Cèdre Cannelle (*Licaria cayennensis* Kosterm.)

Les valeurs vérifiées d'amortissement sont pour le Cèdre Cannelle aussi nettement plus faibles que ce qui avait été mesuré précédemment. Les coefficients de variation de tanδ et E'/ρ apparaissent assez élevés pour la plupart des individus. En conséquence, les variations d'amortissement intrinsèque entre arbres ne sont pas significatives.

b Caesalpiniaceae à faibles taux d'extraits : Dialium cochinchinense ; D. pachyphyllum ; Scorodophloeus zenkerii.

Ces essences avaient été choisies comme « références » en regard de l'ensemble de notre échantillon : soit des Feuillus tropicaux, de la même famille botanique que des bois extrêmement peu amortissants (Pernambouc, Pao Rosa, Doussié, Boco…), mais ayant de très faibles (≤3%) teneurs en extraits connues.

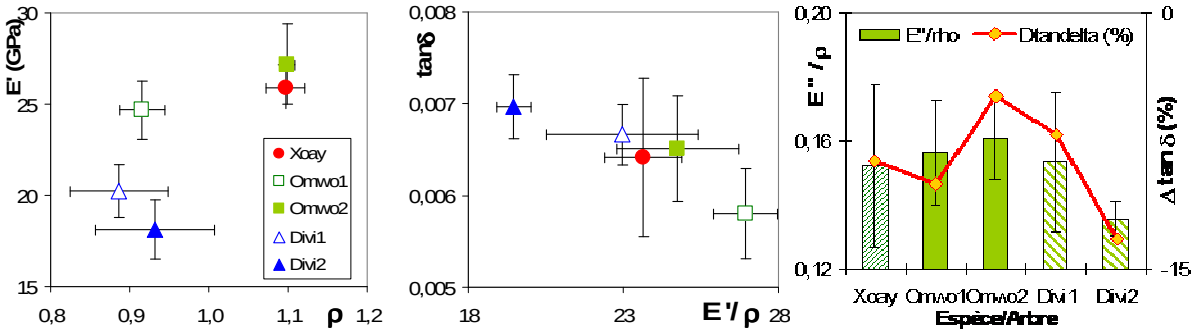


Figure 108: Densité et propriétés vibratoires pour 3 espèces de Caesalpiniaceae à faibles taux d'extraits : *Dialium cochinchinense* (Xoay, 1 indiv.), *D. pachyphyllum* (Omwong, 2 inds.), *Scorodophloeus zenkerii* (Divida, 2 inds.)

A part en terme de densité/module d'Young (le Divida est significativement moins rigide que les *Dialium*), les différences entre 2 individus pour le Divida et l'Omwong sont plus importantes que celles entre les 3 espèces. Ces bois présentent aussi des amortissements intrinsèques bien moins faibles que les autres Caesalpiniaceae étudiées.

c Swartzia panacoco ; S. sp. ; S. fistuloïdes (Coração de negro et Pao Rosa ; Caesalpiniaceae)

L'échantillon comprend deux types d'essences commerciales du genre *Swartzia*. Le nom pilote "Coração de Negro" (Bois Perdrix, Ferréol, etc. en France) recouvre au moins 4 espèces Amazoniennes et Guyanaises de *Swartzia spp.* à cœur noir. Ici deux sont identifiées comme *S. panacoco*.

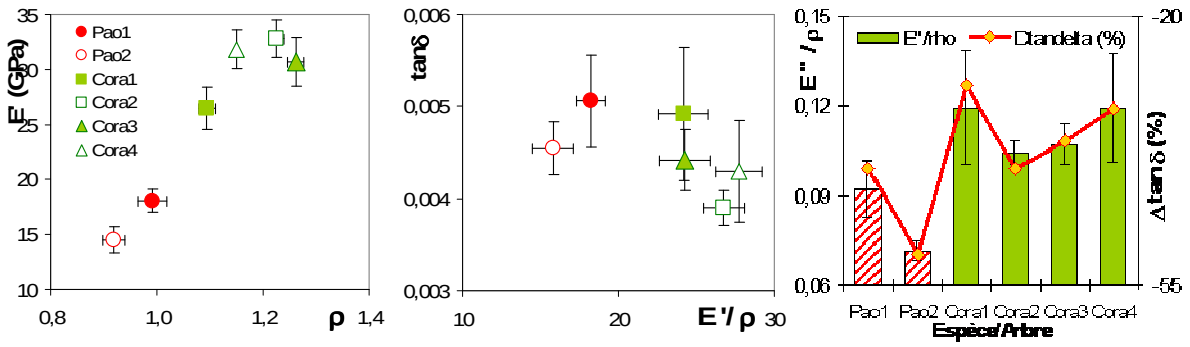


Figure 109: Densité et propriétés vibratoires pour les *Swartzia* (Caesalpiniaceae) : Pao Rosa (*S. fistuloides*, Afrique) et Coração de Negro (*S. panacoco* : Cora1&2 ; *S. sp* à cœur noir : Cora2&3 ; Amérique Latine).

Le Pao Rosa n°1 est significativement plus lourd, plus rigide et plus intrinsèquement amortissant que le n°2. Il a un taux d'extraits aux solvants organiques de ≈16% contre ≈26% pour le n°2. Il est aussi moins « rouge » (h*=37°) que le « Pao2 » (h=42°)

Les Pao Rosa sont nettement moins denses, moins rigides, et aussi moins intrinsèquement amortissants, que les Coração de Negro. D'après ce que l'on connaît par la Base du CIRAD, ils ont des teneurs en extraits deux fois et demie supérieures à ces derniers.

Les différences ne sont pas significatives entre les Coração de Negro identifiés comme *S. panacoco* et les *S. spp.* à cœur noir, les différences entre deux individus identifiés (ou non) étant plus grandes qu'entre ces deux groupes.

d Dalbergias spp. (différents Palissandres ; Papilionaceae)

L'échantillon comprend deux sortes de Palissandres de Madagascar : Palissandre Manary d'aspect plus « fibreux » et « violet sombre » que le second (4 n° CTFT) ; et « Bois de Rose » ou Volombodipona, d'aspect « gras » et « rouge sombre », cf. aussi [Normand 1988] (2 stocks), du Grenadille (2 stocks), du «Palissandre de Bahia » (1 stock). D'autres espèces ne sont représentées que par une éprouvette, poncée, chacune : Palissandre de Rio et Indien, Cocobolo. Leurs densités, modules et paramètres d'amortissement sont comparés sur les Figure 110 et Figure 111.

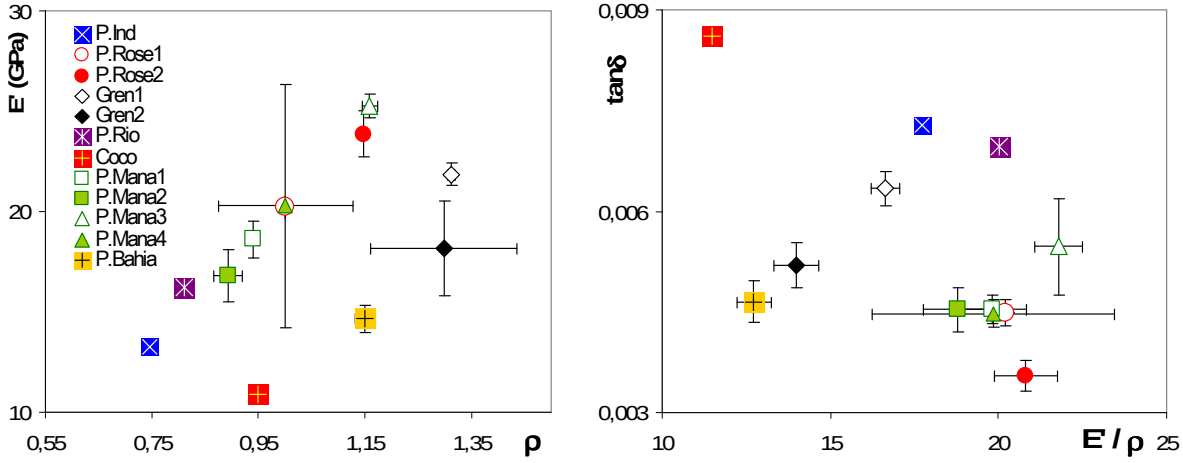


Figure 110: Densité, module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement pour différentes espèces et/ou stocks de Palissandres (*Dalbergia spp.*).

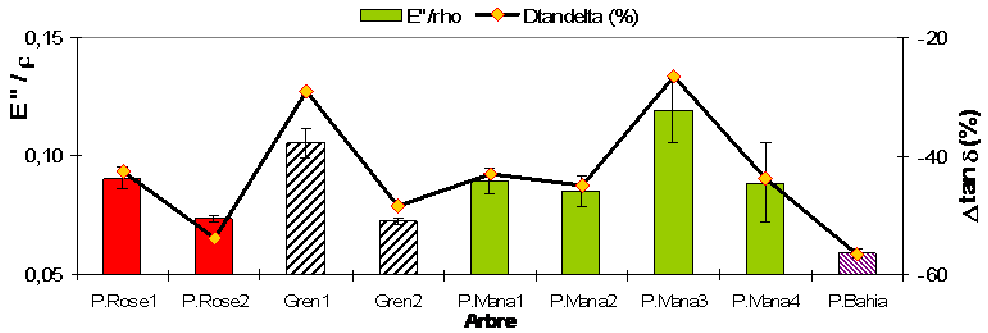


Figure 111: Paramètres d'amortissement intrinsèque E''/ρ et Δtanδ pour différentes espèces et/ou stocks de Palissandres (*Dalbergia spp.*).

Parmi les 4 individus de Palissandre Manary, deux ont des densités et modules proches, et deux sont plus contrastés (plus denses et plus rigides en moyenne). La dispersion intra-arbre semble susceptible de recouper largement ces différences, d'après les écart-types du n° 4. Ce dernier comporte deux positions de duramen qui ont des propriétés très contrastées : densité 0,87 et E = 15GPa contre 1,12 et 26GPa (la plus dense est aussi plus foncée et de moindre teneur en eau). Leurs coefficients d'amortissement sont par contre stables. La gamme de densités et modules des deux Palissandres de Madagascar (Manary et Bois de Rose) se recoupe. De même pour les coefficients d'amortissement, mais il semblerait que le « Bois de Rose / Volombodipona » soit susceptible de présenter de plus faibles amortissements intrinsèques (Figure 111). Les deux stocks de Grenadille sont de densités comparables, mais l'un est à la fois nettement plus rigide, et plus amortissant. Celui-ci est légèrement plus clair (L* =30,5 vs 27,6). Un élargissement de l'échantillon serait utile pour juger du degré effectif de recoupement des amortissements intrinsèques sur ces différentes espèces de *Dalbergia* à priori nettement plus « stables » que les Pal. De Rio ou Indien.

e Feuillus tempérés : Buxus sempervirens (Buis) ; Carpinus betulus (Charme) ; Sorbus domestica (Cormier)

Le Buis étudié comprend 2 stocks d'aspect (couleur, largeur de cernes) différents ; le Charme deux stocks d'aspect semblable ; le Cormier 5 stocks d'aspects contrastés (de très clair à nettement « rouge »). Leurs densités, modules et amortissement sont présentés sur les Figure 112 et Figure 113.

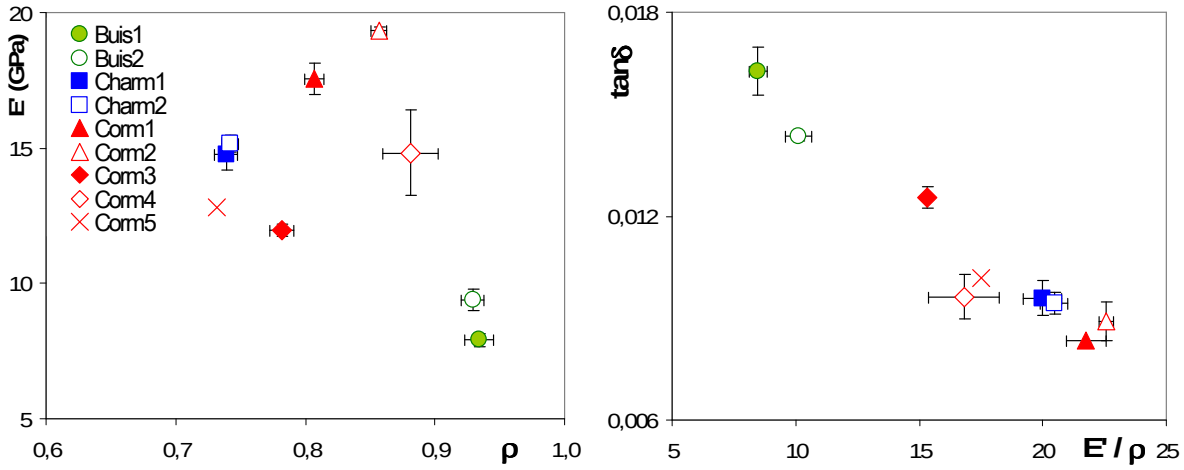


Figure 112: Densité, module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement pour différents stocks de: Buis; Charme; Cormier.

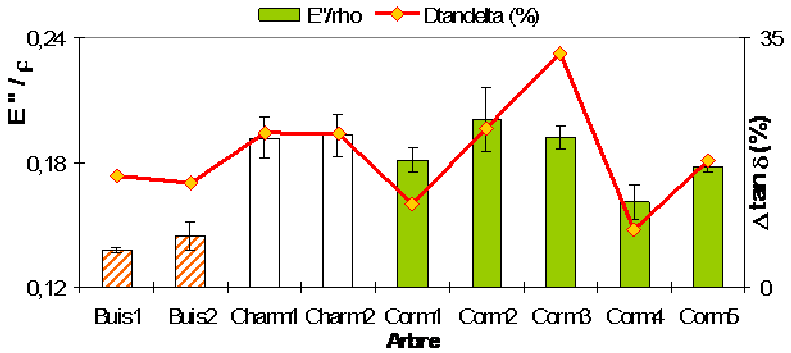


Figure 113: Paramètres d'amortissement intrinsèque E''/ρ et Δtanδ pour des Feuillus tempérés: Buis (2 stocks); Charme (2); Cormier (5).

Les deux stocks de Buis sont différents en terme de module d'élasticité spécifique ; en revanche ils ne sont pas statistiquement différents en terme d'amortissement intrinsèque. Les deux stocks de Charme sont comparables en tous points. Les différents lots de Cormier sont plus contrastés, tant pour leurs densités, que modules spécifiques, et amortissements intrinsèques. La relation à la couleur signalée plus haut n'est pas vraiment uniforme, mais l'individu le moins amortissant (Corm4) est effectivement le plus sombre et le plus « rouge ».

III.b.4.3. **Comparaison des aubiers et duramens**

Les comportements particuliers de nombreuses essences à teneurs marquées en extractibles ont été remarqués plusieurs fois. Les aubiers de ces espèces peuvent représenter les plus proches références de matériel « natif » ayant moins d'extraits, vis-à-vis de ces bois de cœur (anatomie, microstructure, composition chimique primaire les plus proches possible). Néanmoins il n'est pas toujours aisé d'obtenir, à partir de stocks secs existants (a fortiori pour des stocks commerciaux), du matériel comprenant de l'aubier, et surtout de l'aubier non dégradé. L'échantillon de comparaison présenté ici comporte 6 essences, avec pour chacune 1-5 arbres ou stocks pour le duramen, et un avec les deux types de bois à la fois.

a Pour les six essences concernées

Les essences avec aubier et duramen comprennent : deux espèces assez proches de *Pterocarpus* (Leg. Papilionaceae) : *P. soyauxii* et *P. tinctorius* (à taux d'extraits ≥12% et à très faibles amortissements intrinsèques); du Boco et du Coração de Negro (Leg. Caesalpiniaceae à taux d'extraits proches de 10% et à faibles amortissements) ; de l'Omwong (Caesalpiniaceae à faibles taux d'extraits et amortissements quasi-standards) ; et de l'If (Résineux tempéré à duramen coloré très différencié de l'aubier). La comparaison globale des propriétés physico-mécaniques moyennes des aubiers, et des duramens, est présentée sur la Figure 114 sous la forme de valeurs normalisées. Ces données

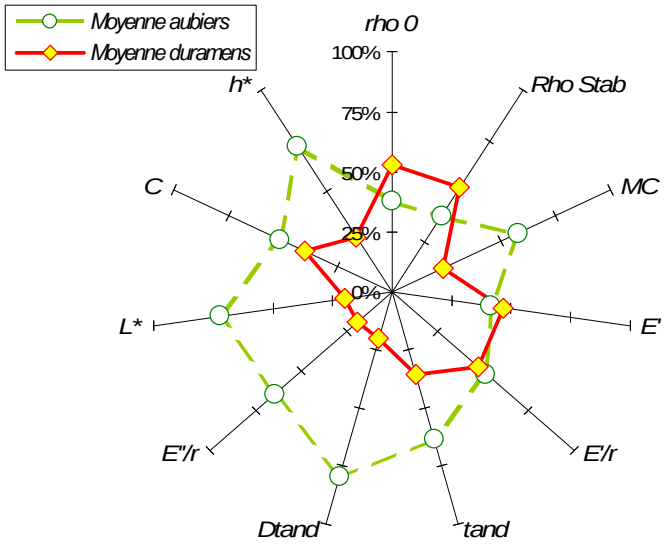


Figure 114: Comparaison entre aubier et duramen des valeurs moyennes de propriétés, sur la base des données moyennes pour un même arbre (valeurs normalisées pour chaque propriété par l'amplitude totale de variation des 6aubiers+6duramens.).

correspondent à celles obtenues sur les deux types de bois, provenant d'un même arbre. De façon moyenne, les aubiers ont par rapport aux duramens : de plus faibles densités; de plus fortes teneurs en eau, paramètres d'amortissement et angles de teinte (et comme on s'y attend de clarté) ; des modules d'Young, module d'élasticité spécifique et chromaticité très faiblement différents. L'amplitude des différences entre aubiers et bois de cœur, pour les 6 essences confondues, est tout particulièrement marquée pour les paramètres d'amortissement intrinsèque $\Delta tan\delta$ et E''/ρ.

On peut observer les allures de ces différences en séparant les différentes essences : dans un premier temps, les modules spécifiques et coefficients d'amortissements des aubiers, et leurs variations par éprouvettes, sont comparés aux tendances moyennes (i.e tous arbres ou stocks confondus) des bois de cœur des mêmes espèces (Figure 115).

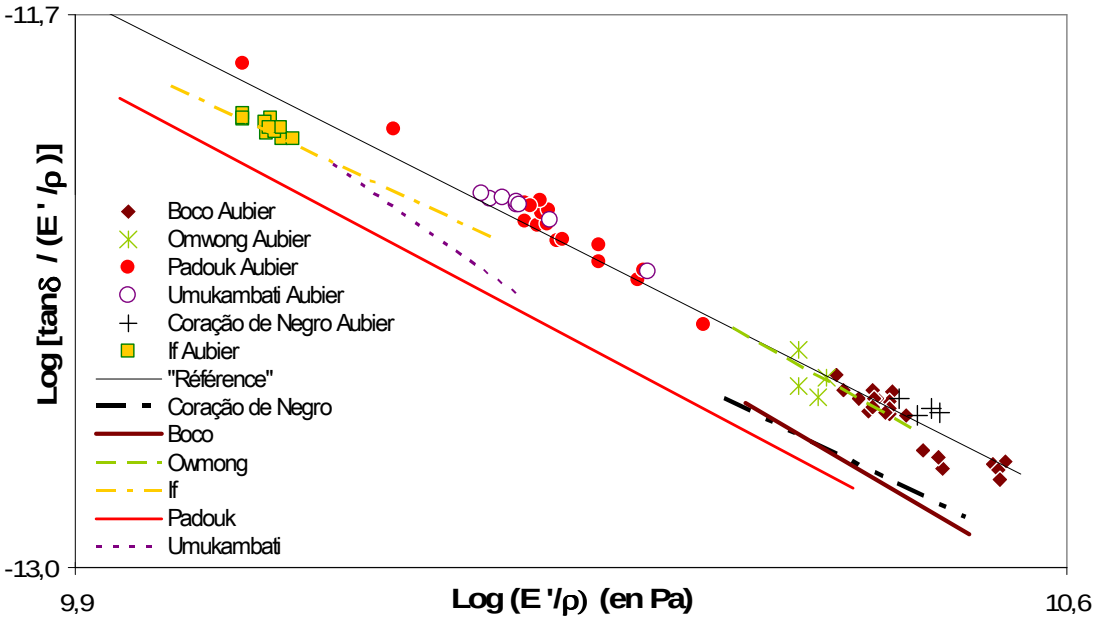


Figure 115: Aubiers et bois de Coeur de 6 espèces: régressions $Log[tan\delta/(E/\rho)]=f[Log(E/\rho)]$ moyennes sur bois de cœur, et variations par éprouvettes d'aubier.

On observe trois cas de figure : i) pour l'Omwong (≤3% d'extraits dans le duramen), l'aubier se superpose à la tendance « bois de cœur » de cette espèce, ainsi qu'à la référence ; ii) pour les *Pterocarpus*, le Coração de Negro et le Boco, les aubiers sont très proches de la référence (voire un peu au dessus sauf pour le Boco), alors que les tendances «duramen» de ces essences y sont très fortement inférieures ; iii) pour l'If, l'aubier est comme dans le premier cas superposé à la tendance « bois de cœur », mais ici ces deux types de bois sont significativement inférieurs à la référence.

Pour une comparaison plus quantitative, on doit s'affranchir des variations entre différents individus de duramen – qui sont comparés à un seul individu pour l'aubier. Dans les graphiques ci-dessous, on compare les moyennes et écart-types des valeurs correspondant aux aubiers et duramen provenant d'un même arbre. La Figure 116 présente ces comparaisons pour la densité (quasi-) anhydre (qui représente mieux que la densité « sec à l'air » les différences liées à la présence de composés secondaires puisqu'on ne prend plus en compte les différences d'hygroscopicité), et pour la teneur en eau à l'équilibre.

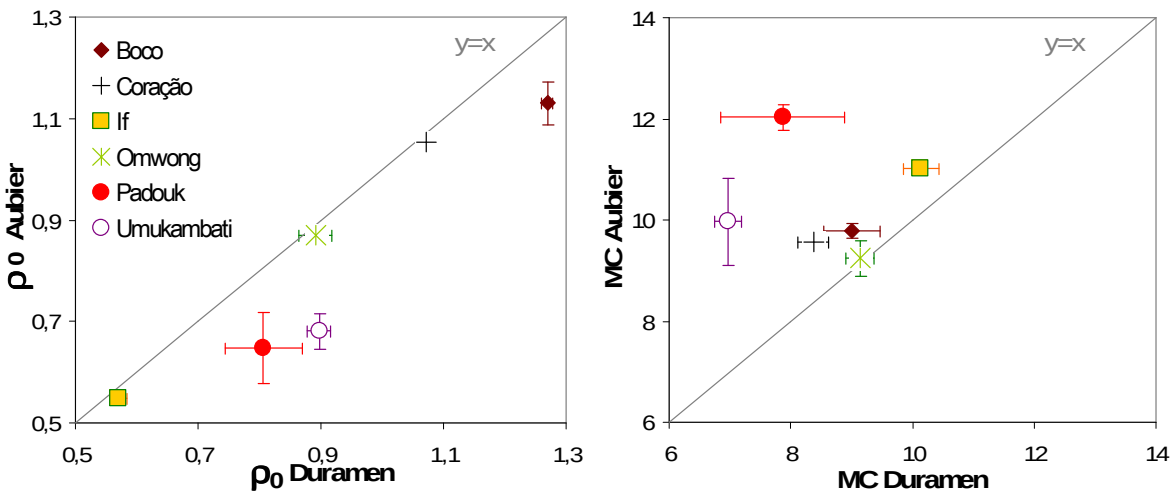


Figure 116: Densité « quasi-anhydre » (à gauche) et teneur en eau (à droite): comparaison des valeurs moyennes par arbre entre aubier et duramen pour les 6 essences concernées.

A cette échelle de comparaison sur un même arbre, les différences de densité entre aubier et duramen sont bien marquées pour le Boco et surtout pour les *Pterocarpus*. La densité du bois de cœur n'est pas beaucoup supérieure à celle de l'aubier pour l'Omwong (ce qui était prévisible vu son faible taux d'extraits) ; pour l'If (ce qui est moins évident dans la mesure où pour cette essence, d'après la littérature les taux d'extraits dans l'aubier restent faibles devant ceux du duramen [Mertoglu-Elmas 2003]) ; et pour le Coração de Negro (même remarque mais basée uniquement sur les données sur bois de cœur de la base du CIRAD). Pour ces deux derniers bois, ces différences modérées sont certainement attribuables aussi aux variations intra-arbre autres que celles des taux d'extraits (cf. ci-dessous pour l'If). En ce qui concerne la teneur en eau à l'équilibre, à part pour l'Omwong (différences entre aubier et duramen non significatives), les MC sont plus élevées dans les aubiers. Cette hygroscopicité plus forte des aubiers est particulièrement marquée (≈1,5 fois les teneurs en eau du duramen) pour les deux *Pterocarpus*.

Pour l'If, le Boco et les *Pterocarpus*, les différences de module d'élasticité spécifique entre aubier et duramen ne sont pas significatives devant les variations entre éprouvettes d'un même type de bois. Ces différences sont significatives pour l'Omwong (E'/ρ aubier ≈0,87*E'/ρ duramen) et pour le Coração (E'/ρ aubier ≈1,16*E'/ρ duramen), mais pour ces deux bois l'échantillon est réduit et on prend en compte d'autres échelles de variations locales.

Les déviations d'amortissement à la référence et le module de perte spécifique des aubiers sont comparés à ceux des bois de cœur des mêmes arbres sur la Figure 117.

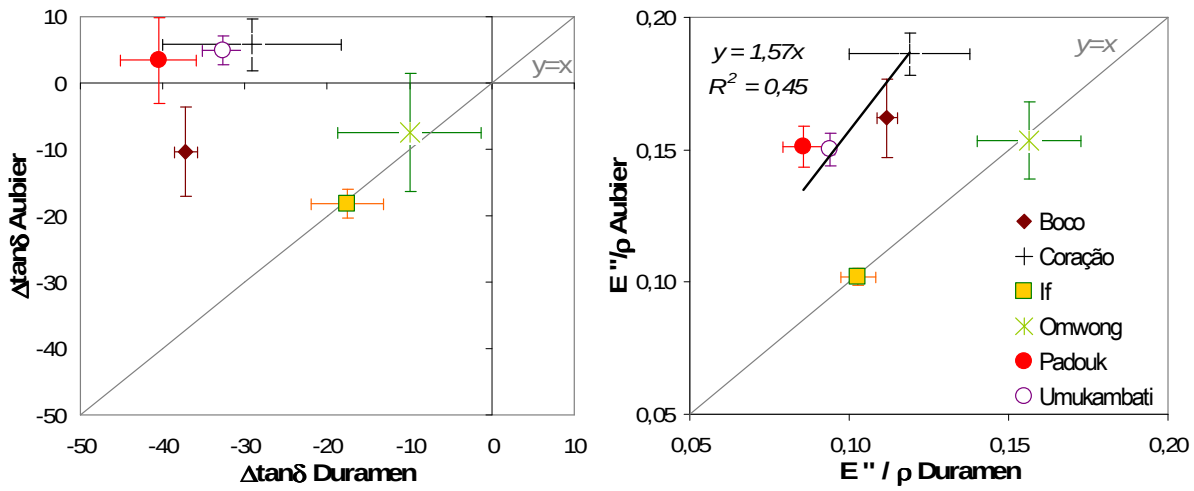


Figure 117: Ecarts d'amortissement à la référence (à gauche) et module de perte spécifique (à droite): comparaison des valeurs moyennes par arbre entre aubier et duramen.

A l'échelle d'un même arbre, on retrouve les cas de figure évoqués plus haut. Les différences d'amortissement intrinsèque entre aubier et duramen ne sont pas significatives pour l'Omwong et pour l'If. Pour ce dernier ces deux types de bois ont des coefficients d'amortissement inférieurs de ≈-20% à la référence. Pour les essences dont le duramen présente des $\Delta tan\delta$ fortement négatifs (≈ -25 à -40% ; Boco, Coração, *Pterocarpus*), les aubiers s'écartent généralement de moins de 10% à la référence pour les valeurs moyennes. Pour ces 4 essences, les modules de perte spécifiques des aubiers sont près de 1,6 fois plus élevés que ceux des bois de cœur correspondants. Les $\Delta tan\delta$ des aubiers des *Pterocarpus* et du Coração de Negro ne sont pas statistiquement différents entre eux, et ces bois semblent légèrement plus amortissants (≈+5%) que le « standard ». Par contre l'aubier de Boco apparaît de façon significative comme moins amortissant que la référence (≈-10% en moyenne sur cet individu, ≈-3% sur un autre stock sans duramen).

Ces comportements contrastés non seulement entre les duramens des différentes essences, mais entre leurs aubiers, suggèrent qu'on ne puisse pas strictu senso considérer ces derniers comme des « bois neutres ». Quelques aspects pouvant être impliqués sont introduits dans la discussion de cette section (p.158).

Enfin, pour l'Omwong et le Coração, les bois de cœur provenaient de distances « aléatoires » à l'aubier (matériel déjà débité). Pour les *Pterocarpus*, l'If et le Boco, et en fonction des dimensions initiales du matériel disponible, nous avons essayé d'avoir une première idée des variations de propriétés rencontrées au niveau de l'interface entre aubier et duramen. Les résultats sur les *Pterocarpus* sont présentés dans le chapitre dédié à l'étude des effets des extractibles sur des espèces de ce genre. Ceux sur If et Boco sont présentés ci-dessous.

b Aubier vers duramen : If (Taxus baccata L.)

Figure 118: Portion d'éprouvette radiale d'If à l'interface aubier/duramen (hauteur 12mm)

Le stock initial comprenait trois planchettes sur quartier, avec chacune ≈30mm d'aubier et autant de duramen. Elles ont été divisées dans leur largeur (R) en trois sections de la largeur de nos éprouvettes (12mm) : une strictement dans l'aubier ; une strictement dans le duramen ; et une à l'interface (c'est-à-dire qui inclut une largeur équivalente de ces deux types de bois, ainsi que la « zone de transition », cf. Figure 118). Des éprouvettes radiales standard

ont été débitées dans l'épaisseur (T) de chaque section. Sur ces spécimens, la moyenne du nombre de cernes annuels dans la largeur de l'éprouvette (12 mm) est de 5,9 pour l'aubier, de 4 pour le bois de cœur, et de 4,6 pour l'interface. Le terme « zone de transition » (*ZT*) semble approprié pour qualifier cette interface aubier-duramen, et on l'adoptera ici. Cependant il a pu en être donné une définition plus étroite : [Hillis 1987] la définit comme une zone, existant pour certaines espèces seulement (dont l'If a historiquement été une des plus tôt décrite, dans les années 1930), apparaissant après abattage plus claire que l'aubier et que le duramen, et de teneur en eau sur bois vert inférieure à l'aubier, mais aussi dans certains cas (If notamment) à celle du duramen ; et de 1-3 cernes de large. Ces caractéristiques varieraient selon la saison pour des essences tempérées. Nous ne connaissons pas les caractéristiques « bois vert » du stock étudié. On peut repérer (Figure 118) une différence de couleur (zone plus « grise » que l'aubier et que le duramen).

La comparaison des propriétés physico-mécaniques entre ces trois localisations adjacentes est présentée sur la Figure 119.

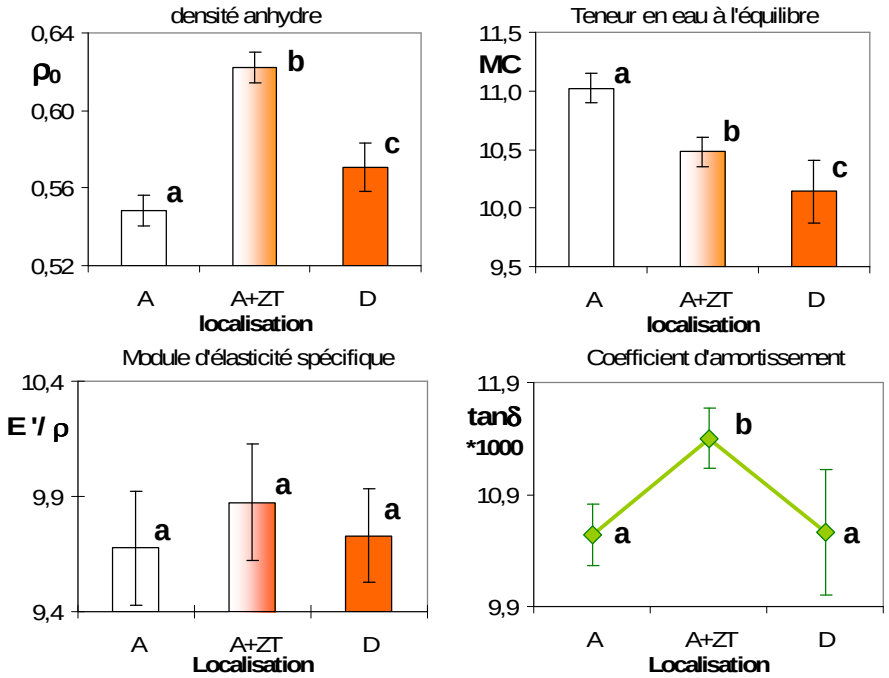


Figure 119: If : Densité anhydre, teneur en eau à l'équilibre, module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement pour: aubier (A), duramen (D), et zone à l'interface aubier/duramen (ZT).

La densité anhydre est significativement plus élevée dans le duramen (0,57) que dans l'aubier (0,55). Mais c'est pour la « zone de transition » qu'elle apparaît la plus forte (0,62). Il ne faut pas oublier les différences de largueur de cernes rencontrées sur l'échantillon considéré : en moyenne 2,03mm dans l'aubier ; 2,63mm pour les éprouvettes incluant la zone de transition ; 3,10mm dans le duramen. Elles pourraient donner une explication de l'amplitude modérée de différence de densité entre aubier et duramen ; et pondérer la forte différence entre zone de transition et duramen strict. Toutefois, si l'on compare cette diminution graduelle des largeurs de cernes entre aubier et duramen, avec le « pic » de densité anhydre des éprouvettes qui comprennent la zone de transition et des quantités comparables d'aubier et de duramen, il semble qu'il y ait bien ici un effet d'augmentation de la densité anhydre au niveau de l'interface aubier-duramen.

La teneur en eau diminue graduellement entre aubier, interface, puis duramen.

Le module spécifique n'est pas significativement différent entre ces trois localisations (même si la moyenne semblerait un peu plus élevée pour les éprouvettes à l'interface). Les coefficients d'amortissement de l'aubier ne sont effectivement pas différents de ceux du duramen, sur les mêmes stocks. Mais paradoxalement, ils sont significativement plus élevés (+8%) dans la « zone de transition ». Cela est manifeste en rapportant ces coefficients au module d'élasticité spécifique (Figure 120).

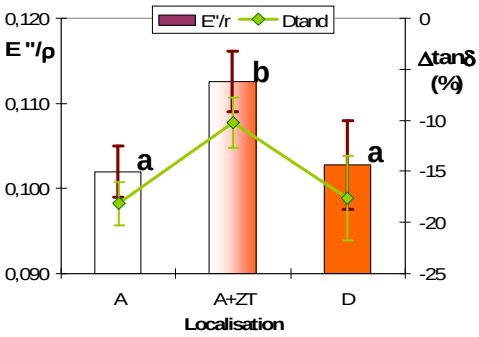


Figure 120: If (Aubier vers duramen): Module de perte spécifique et déviations d'amortissement à la « référence ».

c Aubier vers duramen : Boco (Bocoa Prouaencis Aubl.)

Pour le Boco, la comparaison aubier-duramen globale repose sur : 2 stocks de duramen sans aubier ; 1 d'aubier sans duramen ; et un où aubier et duramen proviennent du même arbre. Pour ce dernier, à partir d'une planchette sur faux quartier comprenant ≈50mm d'aubier et autant de duramen, des éprouvettes ont été tronçonnées régulièrement tous les 5mm (Figure 122a; angle de ≈45° dans la section R*T ; ceci dit compte tenu de la grande homogénéité de ce bois très dense, l'effet de l'anisotropie R-T doit être un tant soit peu réduit). Deux éprouvettes contiennent la transition aubier-duramen (Figure 122b), l'une avec ≈70% d'aubier et l'autre avec ≈15%.

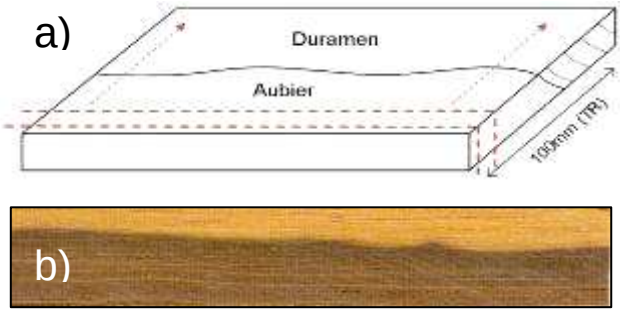


Figure 122: Boco: a) débit successif d'éprouvettes L*TR de l'aubier vers le duramen ; b) portion d'éprouvette sur faux-quartier à l'interface aubier-duramen.

La Figure 121 présente les évolutions de la densité (quasi-) anhydre, de la teneur en eau à l'équilibre, et des paramètres colorimétriques L*, C et h*, depuis l'extérieur de l'aubier vers le duramen (à ≈45mm de la transition).

Sur ces petites distances radiales, la densité anhydre apparaît plus variable dans l'aubier que dans le duramen, où elle est en moyenne plus élevée de 14%. Les éprouvettes contenant la zone de transition sont aussi denses que celles de duramen, alors qu'elles comportent une part d'aubier, ce qui suggère que leur partie « imprégnée » soit plus dense que le reste du duramen. La même remarque

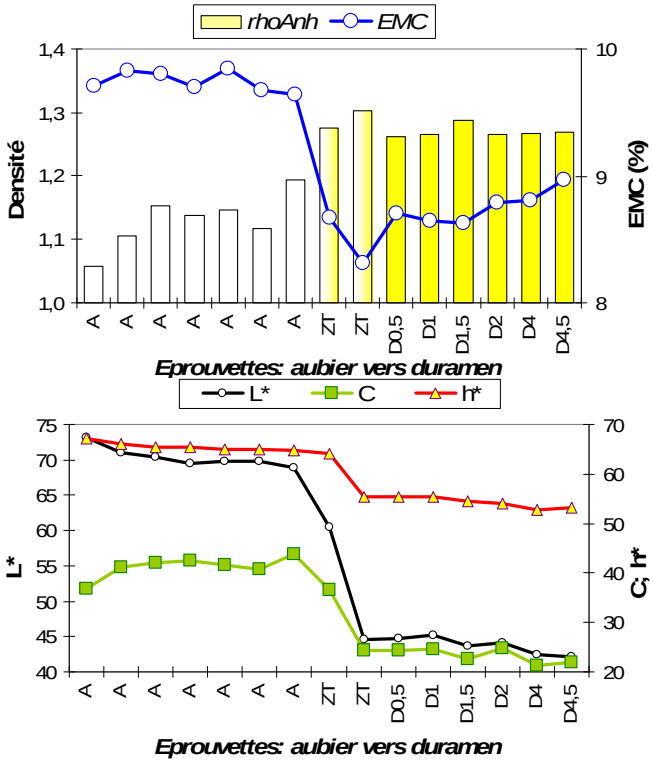


Figure 121: Boco: évolution de la densité anhydre, de la teneur en eau de stabilisation, et de la couleur, entre l'extérieur de l'aubier (A) et le duramen (D) à 45 mm de la zone de transition (ZT).

peut être faite pour les teneurs en eau. L'éprouvette ne contenant que ≈15% d'aubier a une MC nettement plus basse que le duramen situé 5mm plus à l'intérieur et que les suivants.

Sur la base de cet échantillon réduit, il semble que la clarté et l'angle de teinte diminuent, entre l'aubier externe et l'aubier interne (R^2=0,77 & R^2=0,83). Et à nouveau après le saut marqué de la « zone de transition », entre le duramen externe et un peu plus interne (R^2=0,83 et R^2=0,89).

La Figure 123 présente ces évolutions relevées pour les propriétés vibratoires E'/ρ, tanδ, E''/ρ, et Δtanδ.

Les modules d'élasticité spécifiques varient nettement et dans l'aubier, et dans le duramen, où ils seraient en moyenne 5% plus faibles, mais cette différence n'est pas significative devant les variations individuelles par éprouvettes. Les coefficients d'amortissement diminuent brutalement dès qu'une part de zone de transition est comprise. Ceci est encore plus visible en terme de E''/ρ ou de Δtanδ. Compte tenu de la présence d'aubier dans les éprouvettes, on pourrait évoquer que la ZT elle-même serait susceptible d'avoir des amortissements plus faibles que le duramen adjacent. Ceci serait à vérifier sur plus de spécimens, et sur des éprouvettes strictement en plan LT pour limiter les mélanges de types de bois. Le caractère amortissant apparaît ici plus stable dans le duramen, que dans l'aubier où il varie beaucoup (0 à -20%). Sur deux autres pièces de bois initiales d'aubier de Boco, d'un autre stock, on trouvait ce même ordre de variations.

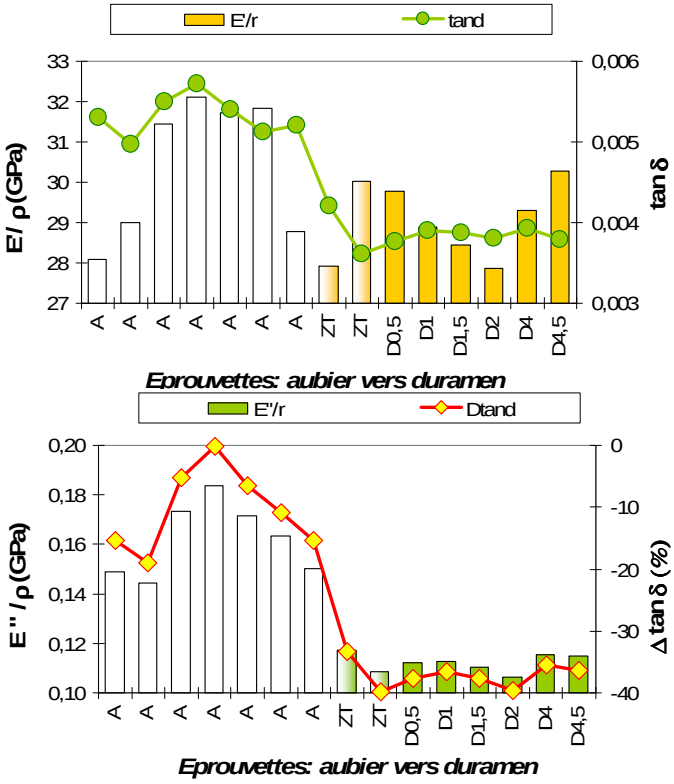


Figure 123: Boco: évolution de E'/ρ, tanδ, E''/ρ et Δtanδ de l'aubier vers le duramen à 45mm de la zone de transition.

d Discussion

D'après cette première approche des différences rencontrées entre aubier et duramen, quelques remarques peuvent être dégagées : i) pour les 5 essences étudiées ayant des taux d'extraits dans le bois de cœur a priori supérieurs à ≈7%, les teneurs en eau de l'aubier sont nettement plus élevées que celles du duramen. Ceci particulièrement pour les deux *Pterocarpus* dont les bois de cœur sont aussi les plus riches en extraits ; ii) le schéma est plus contrasté entre les espèces pour ce qui est de l'amortissement intrinsèque. Ce paramètre apparaît équivalent entre aubier et duramen pour l'espèce à faible taux apparent[32] d'extraits. De même pour l'If qui a plus d'extraits du bois de cœur, mais aubier comme duramen sont alors nettement moins amortissants que la moyenne. Pour les 4 espèces de Légumineuses à taux d'extraits importants dans le bois de cœur, les amortissements des aubiers sont beaucoup

[32] Les taux d'extraits que nous connaissons sur ces espèces correspondent aux composés solubles aux solvants organiques et à l'eau. Il est connu que plusieurs composés secondaires, notamment de nature polyphénolique, sont susceptibles de polymériser, et/ou de s'associer aux composants primaires, et de ne plus être « extractibles » -au sens physique du terme- par ces solvants [Hillis 1968 ; Peng et al 1991 ; Lange&Faix 1999 ; Noda et al 2002].

plus forts que ceux des duramens. Mais pour 3 essences, ces amortissements d'aubiers sont plutôt supérieurs à la tendance, et pour l'autre ils y semblent inférieurs. Soit en bref des comportements contrastés à la fois entre différents types de bois, et entre différentes espèces.

Dans la typologie proposée par [Norimoto et al 1992] des différents traitements chimiques des bois et de leurs effets sur le comportement hygroscopique et/ou viscoélastique, plusieurs facteurs sont à considérer : localisation cellulaire, taille des molécules, comportement plus ou moins hygroscopique, des composés conférés, et type d'interaction avec les composés primaires.

Si, sur l'ensemble des essences étudiées, les différences observées entre leurs bois de cœur peuvent poser question quant aux composés secondaires présents (nature, quantité, localisation cellulaire), on peut se poser les mêmes questions vis-à-vis des aubiers au vu des contrastes –certes relativement plus modérés- observés ici. Effectivement, si les taux d'extractibles sont généralement plus (voire beaucoup plus) élevés dans le duramen que dans l'aubier [Hillis 1968 ; 1987], ils ne sont pas forcément négligeables dans ce type de bois (depuis moins de 1% jusqu'à environ 7-8% d'après [Kuo&Arganbright 1980a ; Hillis 1987 ; Yano 1994 ; Noda et al 2002]). De plus, ces extraits d'aubier peuvent certes être des substances de réserve (sucres et amidon, acides gras) surtout localisés dans les lumens des parenchymes (dans le cas d'une localisation dans les parois, les sucres auraient un effet d'augmentation de l'amortissemement [Obataya et al 1999]). Mais ce peuvent aussi être de nombreux autres types de composés, dont polyphénoliques, et qui peuvent être localisés au sein des parois. [Kuo&Arganbright 1980a] trouvaient sur les Résineux *Sequoia sempervirens* et *Libocedrus decurens*, qu'une très forte proportion des extraits totaux de l'aubier étaient localisés au sein des parois (soit de 1 à 5% rapporté au bois massif). Des observations microscopiques indiquaient que ces composés seraient localisés dans la couche S2 (considérée comme la plus importante dans la détermination des propriétés mécaniques axiales du bois), mais avec une concentration plus faible que pour le bois de cœur [Kuo&Arganbright 1980b]. Ceci a été retrouvé pour le bois de Sapelli (*Entandophragma cylindricum*, Meliaceae) par des observations en microspectrophotométrie UV [Kleist&Bauch 2001]. Pour d'autres espèces, une localisation pariétale de certains des extractibles des aubiers a aussi pu être suggérée par des observations des modifications physiques après extractions [Cooper 1974 ; Taylor 1974].

La localisation des extraits dans les parois est a priori une condition nécessaire pour qu'ils influent sur les coefficients d'amortissement ; ce n'est pas forcément le cas vis-à-vis des teneurs en eau (cf. discussion du §III.b.5.5). Par ailleurs dans le cas des bois de Résineux (uniquement l'If sur notre échantillon), la transformation en bois de cœur s'accompagne souvent d'une fermeture des tori des ponctuations aréolées [Keller 1994], et il semble que ce phénomène, qui limite en lui-même la perméabilité du bois, puisse être renforcé par une forte incrustation des membranes de ces tori par des composés secondaires [Kuo&Arganbright 1981b]

Nous ne connaissons que peu d'études comparatives des propriétés vibratoires entre aubier et duramen. [Yano 1994] montrait que sur le Red Cedar (*Thuja plicata*), 2,6 à 4,8% d'extraits d'aubier (solubles au méthanol) avaient pour effet d'augmenter $\tan\delta$ dans un rapport de +18 à +30% (et la teneur en eau à l'équilibre de +0,6 à +4,1% en valeur absolue). Tandis que 8 à 13% de composés du bois de cœur s'accompagnaient de diminutions relatives de -15 à -37% de $\tan\delta$ (et de MC de -1,5 à -1,9 en absolu ; les MC après extraction restaient de l'ordre de +0,4 à +0,8% absolus sur l'aubier par rapport au duramen). [Noda et al 2002] ont comparé les propriétés de « l'aubier » (en tout cas la partie extérieure non colorée du tronc) et le « duramen » noir du *Diospyros kaki*. En calculant sur leurs données les indicateurs $\Delta\tan\delta$ que nous avons utilisés ici, la portion blanche externe déviait de +34% à la tendance de référence,

pour près de 7% de composés solubles. La partie noire avait un Δtanδ moyen de +13%, avec seulement ≈3,8% de composés solubles, mais les auteurs signalaient que les composés responsables du noircissement étaient issus de la polymérisation de quinones donnant une substance insoluble. Les différences de MC étaient de l'ordre de 1% (absolu).

Cet aspect de solubilité ou d'insolubilité de certains composés secondaires, introduit plus haut, pourrait être intéressant à étudier en regard des propriétés viscoélastiques des bois, et éventuellement de leurs évolutions radiales dans le tronc. Chez le Chêne (*Q. petraea*) et le Châtaignier (*Castanea sativa*), [Peng et al 1991] montrent que les ellagitanins solubles ont une concentration maximum juste après la zone de transition (passage brutal de <2% dans l'aubier à ≈8%), qui diminue ensuite assez rapidement vers le duramen plus interne. En parallèle, la concentration en ellagitanins insolubles augmente de la ZT vers le centre. Ce phénomène est expliqué par les auteurs comme un processus d'oxydation lente, qui pourrait être non-enzymatique, conduisant à la polymérisation de ces composés, ou copolymérisation avec les composants de la paroi. Il semble que puissent s'y superposer des phénomènes de modification/dégradation en d'autres composés ; qui interviendraient assez rapidement, entre le duramen externe et le duramen médian [Dumonceaud 2001]. Ces informations ne concernent certes pas les essences tropicales que nous avons étudiées. Néanmoins, [Peng et al 1991] suggèrent que les phénomènes de polymérisation qu'ils décrivent sont a priori susceptibles d'affecter de nombreux polyphénols facilement oxydables. Parmi les essences étudiées, les *Pterocarpus* et les *Dalbergia* notamment (pour celles pour lesquelles on dispose d'un peu plus de données bibliographiques) contiennent de nombreux polyphénols, certains étant spécifiques au genre voire à des sous-groupes de ses espèces [Braga de Oliveira et al 1970 ; Seshadri 1972 ; Bezuidenhout et al 1987].

Nos échantillonnages de bois de cœur ne sont bien sûr pas suffisants pour dissocier les effets des variations radiales de (micro-) structure de celles éventuelles de composition secondaire. Sur le Padouk, le Macacauba et le Palissandre Manary, le duramen immédiatement adjacent à l'aubier (DExt) a été comparé à du duramen plus interne (13, 24 et 34cm pour le Padouk ; 11cm pour le Macacauba ; 30cm pour le Manary) avec 5 à 31 éprouvettes par localisation. D'après des analyses de variance, le DExt avait pour le Macacauba et le Padouk une densité anhydre plus élevée, et un Δtanδ plus négatif pour le Macacauba et le Manary. Il ne semble pas qu'on puisse en retirer de conclusion sur un échantillon aussi réduit.

Par ailleurs, les essais préliminaires concernant la zone de transition laissent envisager des comportements dépendant des espèces à ce niveau : d'après les données ci-dessus (après prise en compte de la présence d'aubier dans les éprouvettes « *ZT* »), il semble que la densité anhydre soit plus forte à ce niveau que dans le duramen plus interne, et que pour l'If l'amortissement intrinsèque y soit plus élevé que dans le duramen ; et pour le Boco a priori plus faible.

L'élargissement d'une démarche liant déterminations « vibratoires » et chimiques suivant le rayon, sur des espèces contrastées, semblerait intéressant à la fois d'un point de vue fondamental, et dans une optique de caractérisation plus fine des bois en regard de leurs usages.

III.b.5. Relations entre propriétés mesurées et données chimiques et physiques disponibles dans la base de données du CIRAD

D'après les regroupements généraux du chapitre précédent (§III.a), comme par l'examen par espèces ci-dessus, il ressort que bon nombre des essences « à forts contenus en

extractibles » présentent des comportements nettement moins amortissants que la moyenne. Pour certaines essences, la classification en « fortes teneurs en extraits » est assez empirique, ou bien basée sur des données de la littérature, mais ces dernières n'ont pas toujours été obtenues suivant les mêmes protocoles et sont donc difficilement comparables de façon quantitative. Par contre, pour un certain nombre d'espèces, l'on dispose de données de composition chimique qui ont été déterminées au CIRAD, suivant un protocole normalisé. Celles-ci incluent non seulement les composés secondaires, mais aussi bien sûr les composés primaires, dont il semblerait aberrant de négliger *a priori* l'influence de leurs proportions respectives.

Concernant les taux d'extractibles, ces données ont été utilisées comme critères de présélection pour certaines espèces. Le choix de ce critère était basé sur l'hypothèse à tester que les résultats de la littérature concernant l'effets de ces composés sur une diminution des coefficients d'amortissement [Matsunaga et al 1996à 2000 ; Yano et al 1994&1995], obtenus sur un petit nombre d'essences, puissent être élargis (ou pas !) à de plus nombreuses espèces. Il s'agit d'une hypothèse assez forte, dans la mesure où certains extraits ont été trouvés au contraire comme augmentant l'amortissement (comme les sucres de la Canne de Provence [Obataya et al 1999] ou les extractibles de l'aubier de Red Cedar *Thuja plicata* [Yano 1994]).

Cependant, des données chimiques ne sont disponibles que pour environs un tiers des essences étudiées. Lors de la présélection des bois, l'on s'était également appuyé sur des indicateurs physiques « de second ordre » mais disponibles pour plus d'espèces: faibles points de saturation des fibres (*Psf*), et retraits volumiques particulièrement faibles par rapport à la densité des bois considérés (rapport *RB/D12*). Ces caractéristiques ont pu être reliées, dans la littérature [Wangaard&Granados 1967 ; Chafe 1987 ; Hernàndez 1989 ; Choong&Achmadi 1991 ; Arévalo-Fuentes 2002 ; Nzokou&Kamden 2004], aux taux d'extractibles, et de surcroît impliquent *a priori* une localisation pariétale de ces composés. Ici aussi, une « généralisation » est une hypothèse forte, dans la mesure où pour certains bois les extractibles peuvent jouer un rôle inverse (Noyer d'Amérique *Juglans nigra* par exemple [Cooper 1974]. De plus les mécanismes impliqués peuvent être fort différents.

Aux espèces présélectionnées sur critères chimiques et/ou physiques, d'autres essences se sont ajoutées, dont le choix avait été indépendant de ces critères. Dans cette section, les données de propriétés vibratoires qui ont été mesurées dans ce travail sont mises en relation avec toutes les données de composition chimique, de *Psf* et de *RB/D12* disponibles, soit de façon moyenne par espèce, soit sur les mêmes arbres.

III.b.5.1. **Relations entre propriétés vibratoires et physiques mesurées, et composition chimique moyenne[33].**

Les données de composition chimique, disponibles dans la base du CIRAD, que nous avons retenues ici comprennent : les taux d'extraits à l'alcool-benzène (*AB*), puis à l'eau chaude (*E*, obtenus sur bois extraits à l'AB), les taux de lignine de Klason (obtenus sur bois extraits à l'AB puis rapportés au bois brut), de « cellulose corrigée » (même remarque) et de cendres. Les taux d'hémicelluloses ont été déduits du total.

On peut faire 3 remarques quant à l'exploitation de ces données en relation avec les résultats de nos essais :

i) Premièrement, il s'agit bien sûr de données moyennes par essence, ou au mieux sur le même arbre (même N° CTFT pour les stocks provenant du CIRAD). Il est connu que les

[33] Pour cette thématique, une partie du travail a été effectuée en collaboration avec Jana Dlouha, dans le cadre de son stage de fin d'études d'Ingénieur et DEA [Brémaud et al 2004c ; Dlouha 2005].

taux d'extraits notamment peuvent varier de façon importante à la fois dans le tronc, et entre différents individus. Pour ce dernier point, on en aura un ordre de grandeur ci-dessous pour quelques espèces. Cependant, compte tenu de l'éventail important de teneurs en extraits sur les essences étudiés (<3% et jusqu'à + de 25%), on peut considérer que ces données moyennes restent des indicateurs valides.

ii) Compte tenu de cette importante étendue de variation des taux d'extraits entre les essences étudiées, les proportions de composés principaux sur bois bruts, quoique correspondant au cas réel, sont difficiles à comparer. On utilisera d'une part ces taux sur bois bruts (C_{tot}, L_{tot}, HC_{tot} : pourcentage de cellulose, lignine, hémicellulose du total) ; d'autre part les proportions rapportées aux seuls composés principaux après déduction des extraits et des cendres (C_{CP}, L_{CP}, H_{CP}), soit par exemple pour la cellulose :

$$C_{CP} = C_{tot} \times \frac{100}{100 - (AB + E + Cendres)}$$

iii) Dans le protocole d'analyses suivi au CIRAD, la première étape est l'extraction alcool-benzène, toutes les autres se faisant à partir de bois ayant subi cette extraction. Les extraits à l'eau chaude représentent donc en fait les composés résiduels, non solubles dans ces solvants organiques. Ces données ne sont pas comparables avec certaines de la littérature, où l'extraction à l'eau chaude est effectuée en parallèle (par exemple les résultats de [Matsunaga et al 1996] concernant le Pernambouc, où les extraits aqueux étaient trouvés responsables du très faible amortissement de ce bois). Ci-dessous on utilisera aussi un taux d'extrait global *AB+E*.

a Données moyennes par espèce

Parmi les bois étudiés, des données moyennes de composition sont disponibles pour 20 espèces dont 18 de Feuillus tropicaux, et 2 de Résineux. Les corrélations entre teneurs en extraits, proportions de composés principaux, et propriétés physico-mécaniques mesurées au cours de notre travail sont présentées sur le Tableau 21 ; elles ne prennent pas en compte les deux espèces de Pins, leurs types de composés secondaires étant *a priori* fort différents chimiquement. Ils sont par contre représentés en parallèle dans les graphiques suivants.

Tableau 21: Matrice de corrélations entre propriétés physico-mécaniques mesurées, et données de composition chimiques disponibles dans la base de données du CIRAD : moyennes pour 18 essences.
AB : taux d'extraits Alcool-benzène ; E : taux d'extraits à l'eau chaude ; C : Cellulose ; L : Lignine ; HC : Hémicelluloses (données déduites du total) ; indice « tot » : pourcentage sur bois brut ; indice « cp » : proportion rapportée aux seuls composés principaux.

N= 18sps	ρstab	E'	E'/ρ	tanδ	E"/ρ	Δtanδ	MC	gVol	αVol	AB	E	AB+E	Ctot	Ltot	Hctot	Ccp	Lcp	HCcp
ρstab	1	***	*	*(-)	_	_	_	*	***	_	**(-)	_	_	*	_	_	*	_
E'	**0,87**	1	***	**(-)	_	_	_	*	***	_	**(-)	_	_	**	_	_	*	_
E'/ρ	*0,50*	**0,82**	1	***(-)	_	_	_	_	10%	_	**(-)	_	_	*	_	_	_	_
tanδ	*-0,52*	**-0,69**	**-0,80**	1	_	***	**	_	_	10%(-)	***	_	_	_	_	_	*(-)	_

E"/ρ	-0,11	0,04	0,21	0,33	1	***	**	10%	_	***(-)	_	***(-)	*	_	10%	_	_	_
Δtanδ	-0,35	-0,35	-0,29	0,75	0,87	1	***	_	_	***(-)	10%	**(-)	_	_	*	_	*(-)	_
MC	-0,19	-0,13	-0,15	0,60	0,62	0,74	1	*	_	**(-)	10%	*(-)	*	_	_	_	_	_
gVol	0,57	0,56	0,28	0,06	0,44	0,34	0,58	1	***	*(-)	_	**(-)	10%	*	_	_	_	_
αVol	0,80	0,76	0,42	-0,26	0,21	0,01	0,15	0,87	1	_	_	*(-)	_	**	_	_	_	_
AB	0,06	-0,04	-0,05	-0,43	-0,77	-0,75	-0,68	-0,59	-0,36	1	_	***	**(-)	10%(-)	10%(-)	_	_	_
E	-0,69	-0,64	-0,63	0,78	0,09	0,46	0,42	-0,11	-0,39	-0,27	1	_	_	*(-)	_	_	*(-)	10%
AB+E	-0,18	-0,27	-0,27	-0,17	-0,76	-0,62	-0,55	-0,64	-0,51	0,94	0,08	1	**(-)	**(-)	_	_	_	_
Ctot	0,15	0,30	0,33	0,03	0,55	0,39	0,51	0,47	0,33	-0,61	-0,20	-0,70	1	*	_	***	_	*(-)
Ltot	0,52	0,59	0,48	-0,34	0,21	-0,03	0,09	0,47	0,60	-0,44	-0,53	-0,64	0,50	1	_	_	***	*(-)
Hctot	-0,19	-0,26	-0,18	0,38	0,45	0,52	0,22	0,19	0,05	-0,44	0,35	-0,33	-0,29	-0,26	1	**(-)	**(-)	***
Ccp	-0,05	0,07	0,12	-0,02	0,07	0,03	0,24	0,02	-0,09	0,02	-0,09	-0,01	0,71	0,02	-0,71	1	_	***(-)
Lcp	0,51	0,51	0,35	-0,54	-0,36	-0,54	-0,33	0,07	0,34	0,19	-0,59	-0,01	0,06	0,77	-0,62	0,01	1	**(-)
HCcp	-0,30	-0,39	-0,32	0,37	0,19	0,33	0,04	-0,06	-0,16	-0,14	0,45	0,02	-0,57	-0,53	0,93	-0,75	-0,67	1

Les relations les plus manifestes concernent un lien négatif entre teneurs en extraits à l'Alcool-Benzène et « amortissement intrinsèque », que ce soit en terme de module de perte spécifique (Figure 125), ou d'écarts des coefficients d'amortissement à la tendance de « référence » (Figure 124). Ces taux sont aussi liés négativement à la teneur en eau et gonflement partiel. Les extraits à l'eau chaude n'ont pas d'influence sur ces paramètres (Figure 126), et les taux d'extraits totaux présentent des relations d'intensité plus faibles que les taux *AB*. Les relations apparentes entre extraits à l'eau chaude et densité et module d'élasticité (-) et coefficient d'amortissement (+) sont un artefact d'échantillonnage, la seule essence ayant des taux *E* très élevés étant le Fromager (voir Figure 126).

Sur la base de ces données moyennes et pour cet échantillon, les proportions de composés primaires n'apparaissent que peu ou pas liées aux propriétés mécaniques mesurées. Compte tenu du jeu de données, on se gardera bien d'évoquer une absence d'influence, mais seulement que manifestement les éventuels effets de leurs variations inter-spécifiques sont petits devant ceux des variations de taux d'extraits pour les bois considérés.

Sur ce sous échantillon de 18 essences pour lesquelles l'on dispose de données chimiques, les variations interspécifiques de paramètres colorimétriques ne sont que peu ou pas corrélées aux variations de propriétés physiques (sauf toujours une liaison négative entre clarté et densité d'une part ; et négative entre clarté et surtout chromaticité, et paramètres de gonflement). Elles n'apparaissent pas non plus franchement liées aux données chimiques (sauf une corrélation positive entre « rouge » a* et teneur en extraits alcool-benzène, mais qu'il semble délicat d'extrapoler compte tenu de la taille réduite de l'échantillon et de la présence de bois particulièrement « rouges » tels Padouk, Satiné…).

Les relations entre taux d'extraits et caractère intrinsèquement plus ou moins amortissant sont représentées sur les graphiques ci-dessous, avec les libellés des essences considérées (ces libellés sont toujours les mêmes que précédemment, voir Tableau 10).

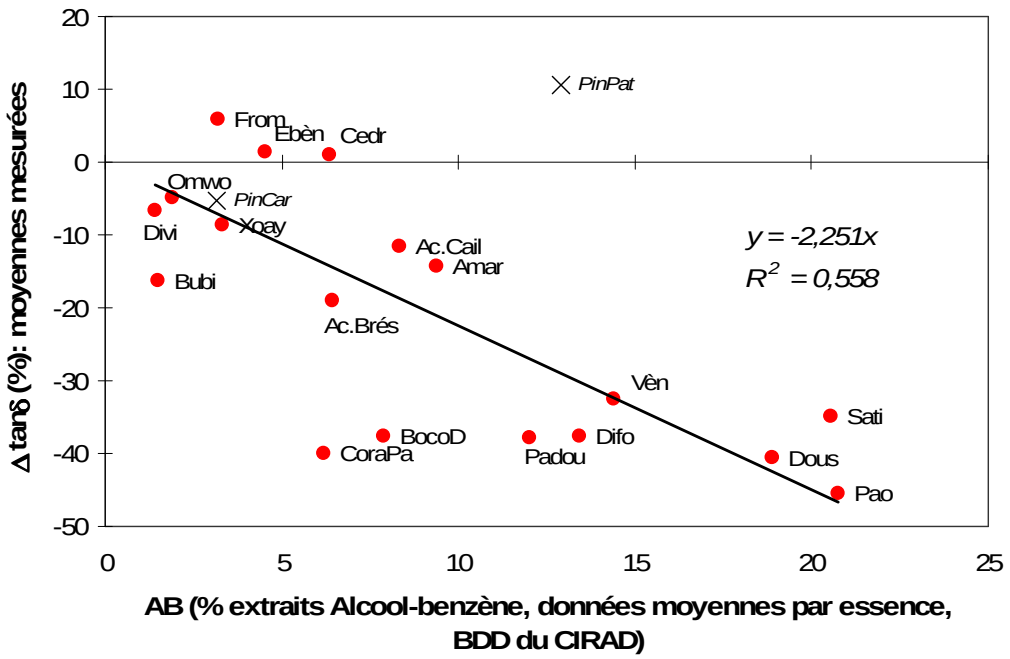


Figure 124: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance "bois moyens » (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de taux d'extraits Alcool-Benzène dans la base de données du CIRAD. ● : essences de feuillus prises en compte dans la régression ; × : Résineux exclu de la régression.

Les taux d'extraits Alcool-Benzène moyens par espèce paraissent expliquer plus de la moitié des écarts d'amortissement à la tendance « de référence » (soit au final, des variations résiduelles d'amortissement non expliquées par le module d'élasticité spécifique). Il s'agit donc bien d'une relation relativement forte, mais qui apparaît déjà, même sur ce nombre limité d'espèces, ne pas être vraiment systématique : ou tout du moins l'effet des extraits n'apparaît pas d'ordre strictement quantitatif. Effectivement, on peut remarquer que pour des taux *AB* du même ordre de grandeur, on a encore des bois de comportement très contrastés. Par exemple, le Cédro apparaît d'amortissement « standard », les Acajous Cailcédrat et du Brésil et l'Amarante d'amortissements intrinsèques modérément faibles (-10 à -20%), et le Boco et le Coração de Negro particulièrement faiblement amortissants (≈ -40%), alors que leurs teneurs en extraits sont proches (≈6-9%). Inversement, les bois les plus faiblement amortissants ont bien tous des taux *AB* supérieurs à 5%, mais pour ces bois de Δtanδ de l'ordre de -40%, les taux d'extraits rencontrés vont de 6 à plus de 20%. Les bois à faibles taux d'extraits restent d'amortissements peu différents du « cas standard ». On peut par ailleurs remarquer que pour le Pin Patula, contenant d'après les données moyennes plus de 10% de composés solubles dans ces solvants, on a, au contraire des bois de feuillus tropicaux étudiés, un comportement plus amortissant que la moyenne ; qui est encore plus flagrant en

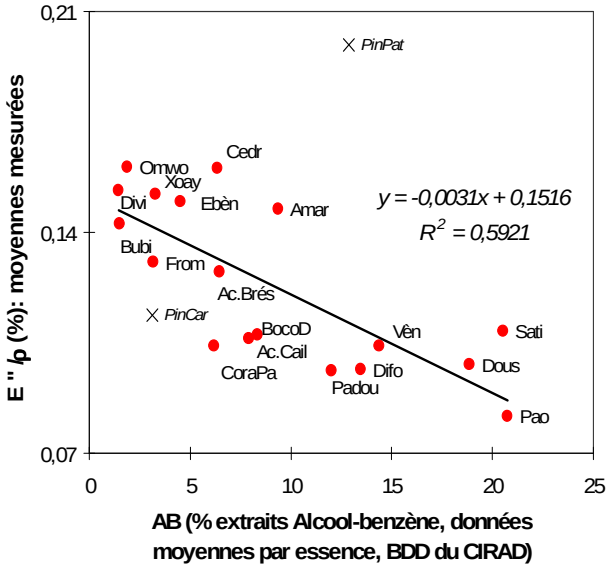


Figure 125: Module de perte spécifique et taux d'extraits Alcool-Benzène (moyenne des mesures et moyennes dans la BDD du CIRAD). Symboles : cf. Figure 124.

terme de module de perte spécifique (bois à la fois rigide et proportionnellement amortissant) (Figure 125).

En ce qui concerne les taux d'extraits à l'eau chaude (Figure 126), comme on l'a signalé, il s'agira surtout des composés résiduels de l'extraction AB. On voit que sur la plupart des bois étudiés la gamme de variation pour les taux de ces composés reste réduite : généralement inférieure à 5%. L'exception est le Fromager, avec plus de 10%, mais sur cette espèce tout du moins ce taux élevé est accompagné d'un amortissement intrinsèque plutôt supérieur à la tendance « de référence ». Pour ce dernier bois, pourrait-on effectuer un rapprochement avec la Canne de Provence [Obataya et al 1999], pour laquelle ce type de comportement en lien avec des extraits hydrosolubles était dû à des sucres ?

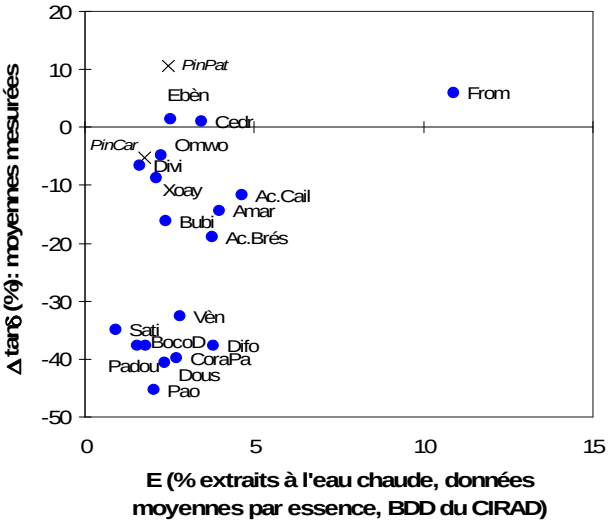


Figure 126: Δtanδ et taux d'extraits à l'eau chaude (moyennes par essences). Symboles : cf. Figure 124.

b Données moyennes par arbre

La dispersion résiduelle non négligeable, et l'aspect non systématique, dans les relations entre taux d'extraits à l'alcool-benzène et les paramètres d'amortissement intrinsèque, peut être due non seulement à des différences entre espèces de composition et/ou de localisation de ces composés, mais aussi aux variations entre individus par rapport aux données moyennes par essences ci-dessus. Pour certains des bois provenant des stocks du CIRAD, on dispose de données chimiques obtenues sur le même arbre (=N°CTFT). Ceci concerne 12 essences et 18 individus en tout. Les relations entre *AB* moyen par arbre et $\Delta tan\delta$ et E''/ρ que nous avons mesurés sont présentées sur les Figure 127 et Figure 128.

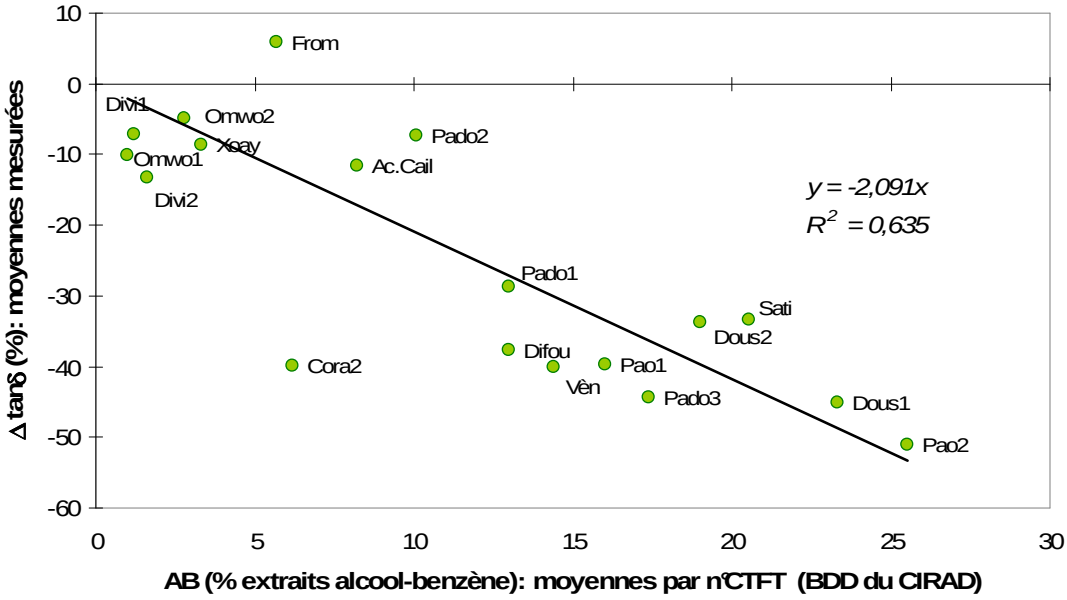


Figure 127: $\Delta tan\delta$ et taux d'extraits *AB*: données obtenues sur les mêmes arbres/N°CTFT (moyennes par individus).

Par rapport à l'analyse en lien aux données moyennes par essences, la dispersion apparaît réduite. Il semble toutefois délicat de statuer sur le fait que les données correspondent mieux aux mêmes matériaux-bois (la variabilité intra-arbre des taux d'extraits n'est toujours pas prise en compte), ou bien que cette diminution de la dispersion est due au fait que moins d'essences sont considérées. On retrouve toujours le fait que le Coração soit intrinsèquement très faiblement amortissant, pour un taux *AB* modéré. Pour les essences où on a des données pour 2 ou 3 individus, pour les bois à faibles taux d'extraits les différences d'amortissement intrinsèque entre 2 arbres sont peu marquées. Pour les espèces à forts *AB*, les individus les plus riches en extraits sont effectivement les moins amortissants (pour le Padouk, le Doussié, le Pao Rosa).

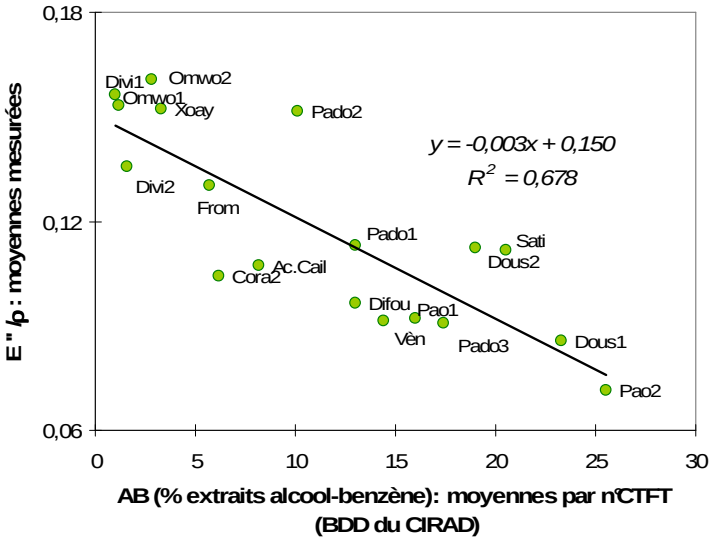


Figure 128: *E''/ρ* et taux d'extraits *AB*: données obtenues sur les mêmes arbres/N°CTFT (moyennes par individus).

III.b.5.2. **Amortissement en fonction du module spécifique et du taux d'extraits alcool-benzène ; moyennes par essence.**

Les relations ci-dessus entre taux d'extraits à l'Alcool-Benzène, et amortissement intrinsèque, ne sont certes pas systématiques pour les différentes essences étudiées. Elles permettent toutefois d'expliquer entre 50 et 70% des variations résiduelles de coefficients d'amortissement, non expliquées par le module d'élasticité spécifique. Dans une optique fondamentale il faudra bien sûr dans le futur élucider les différences entre espèces, les types de composés et les mécanismes impliqués. Mais dans un premier temps, il semble que la prise en compte de ces deux indicateurs (l'un mécanique, l'autre chimique), puisse donner une bonne première idée du comportement plus ou moins amortissant, dans le cadre d'une recherche exploratoire d'essences adaptées à une fonction « acoustique » donnée. Dans cette optique il semble plus réaliste de prendre en compte les données moyennes par espèces, même si elles sont bien sûr moins précises que par arbre. Sur les 18 essences ci-dessus, une régression multiple avec le coefficient d'amortissement $tan\delta$ comme variable dépendante, et prenant comme variables explicatives module d'élasticité spécifique E'/ρ et taux d'extraits *AB*, présente un coefficient de corrélation multiple R=0,93, et un coefficient de détermination multiple ajusté R^2=0,85. L'équation de cette régression multiple est :

$$tan\delta=17,15-0,4288*(E'/\rho) -0,2006*(AB)$$

avec $tan\delta$ en ‰, E'/ρ en GPa et *AB* en %. Les coefficients β pour les deux variables explicatives sont : -0,826 pour E'/ρ, et -0,474 pour *AB*.

La comparaison des valeurs prédites par cette équation, avec les valeurs mesurées, est présentée sur la Figure 129. Les 18 essences considérées sont relativement bien réparties autour de la droite « prédiction = mesure ». Environs la moitié de ces bois sont compris dans l'intervalle de confiance à 95% de la « prédiction », et seulement 3 s'en éloignent franchement.

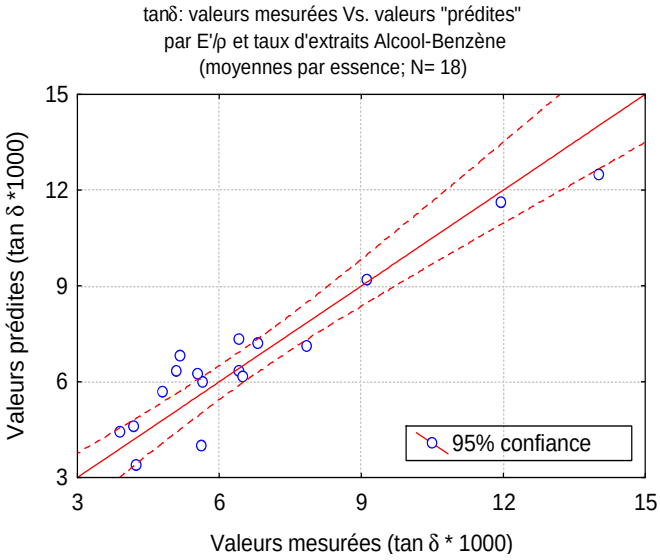


Figure 129: Amortissement: valeurs moyennes mesurées par essence, vs. valeurs "prédites" par régression multiple avec module d'élasticité spécifique et taux d'extraits Alcool-Benzène comme variables explicatives. Moyennes sur 18 essences.

Mais l'inconvénient évident de cette régression multiple est qu'elle ne prend pas en compte la relation de forme puissance entre coefficients d'amortissement et module spécifique. Une prédiction plus rigoureuse, basée sur les relations entre écarts à la tendance globale et taux d'extraits, donnerait :

$$\tan\delta = [10^{A} \times (E'/\rho)^{-B}] \times (1 - C \times AB/100)$$

Avec les constantes A et B correspondant à la tendance globale (A=4,89 ; B=0,68) pour E'/ρ en Pa ; et 2,09≤C≤2,25 d'après les régressions précédentes par arbres, ou par essences. Cette estimation est comparée à la précédente, et à celle ne prenant en compte que E'/ρ, sur la Figure 130.

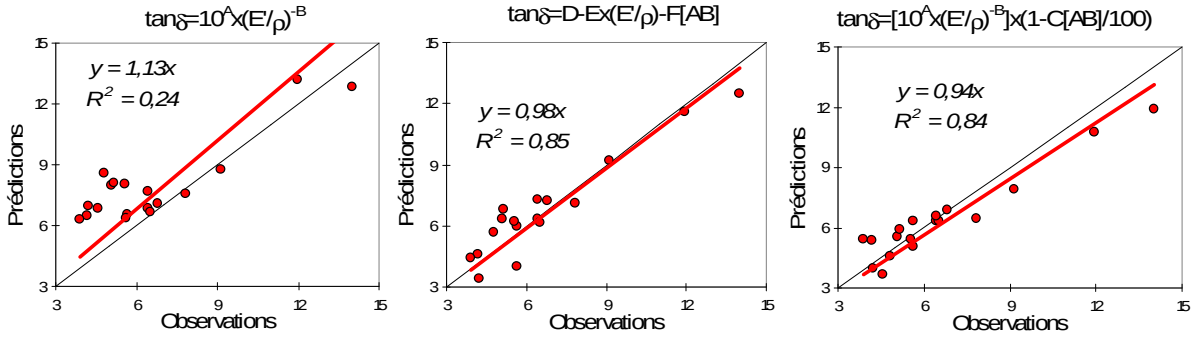


Figure 130: tanδ: valeurs observées vs. valeurs « prédites » : uniquement par E'/ρ (loi puissance) ; par E'/ρ et AB (régréssion linéaire) ; par E'/ρ (loi puissance) et AB (linéaire). Moyennes sur 18 essences.

Dans les deux cas, la prise en compte simultanée des taux d'extraits et du module spécifique augmente grandement la qualité de représentation du coefficient d'amortissement. Le nombre d'essences est cependant limité ; on peut notamment remarquer que ce jeu de données manque de bois d'amortissements supérieurs à 7-8‰. Un élargissement de l'échantillon pourra être intéressant dans le futur. En parallèle, on pourra tester ces régressions en présélectionnant d'après leurs « prédictions » d'autres espèces à partir de la base de données du CIRAD.

III.b.5.3. **Déduction de l'effet massique des extraits sur densité, modules spécifiques et relation aux cœfficients d'amortissement.**

D'après les données moyennes par essences, ou à fortiori par arbre, présentées ci-dessus, ou bien d'après les critères plus globaux adoptés dans l'analyse au niveau général sur de petites pièces de bois, les teneurs en extraits apparaissent manifestement des déterminants importants du comportement plus ou moins amortissant, à l'échelle inter- ou intra- spécifique, pour les essences étudiées. Cependant, les critères de comportement « standard » en terme d'amortissement (module de perte spécifique ou écarts statistiques aux bois « standards ») font appel aux relations entre module d'élasticité spécifique (présupposé comme indicateur des angles de microfibrilles) et coefficients d'amortissement. Pour les essences étudiées, l'effet proprement massique des extraits (3% à + de 25% de la masse totale) est loin d'être négligeable.

Dans le chapitre précédent (cf §III.a.2.1), on avait introduit un correctif concernant les teneurs en eau, afin de les rapporter aux seuls composés primaires d'après :

$MC_{corrigée} = MC_{apparente} / (1- [X]/100)$

où *[X]* est le taux d'extraits sur bois natif anhydre (en %).

On peut de même apporter un correctif à la densité (qui se répercutera par suite sur les modules spécifiques), tel que le proposait par exemple [Hernandez 1989] :

$$\rho_{0corrigée} = \frac{M_{Ocorr}}{V_0} = \frac{M_{0apparente}}{V_0} \times (1 - [X]/100) = \rho_{0apparente}(1 - [X]/100)$$

Cependant, les extractibles n'apportent pas qu'une contribution massique, mais aussi volumique, pour ceux qui sont localisés au sein des parois. Afin de prendre en compte cette contribution au volume, [Chafe 1987] proposait, dans le cadre d'une étude sur l'influence des extractibles sur les retraits de séchage de plusieurs espèces d'Eucalyptus, une « extraction mathématique », se basant sur différentes données expérimentales de la littérature et moyennant certaines hypothèses. Reprenons ces hypothèses :

a) entre 63% et 75% des extractibles seraient localisés dans les parois cellulaires (d'après les résultats de [Tarkow & Kruger 1961] et de [Kuo & Arganbright 1980a] sur *Sequoia sempervirens* et *Libocedrus decurens*). On assumera une valeur moyenne approchée de 70%.

b) la masse volumique des extractibles serait de l'ordre de 1,4g/cm^3 (d'après les mêmes auteurs : de 1,23 à 1,44 pour des extraits éthanoliques ou aqueux).

c) le départ de 0,888cm^3 d'extraits des parois se traduirait par une diminution de 1cm^3 du volume anhydre du bois [Kuo & Arganbright 1980a]. Ce point n'est pas évident, mais on l'admettra ici.

On fait de plus l'hypothèse (d) que les extractibles ont un comportement hygroscopique « neutre » (i.e. on considère que leur contribution à la masse comme leur contribution absolue au volume du bois reste inchangée entre l'état anhydre et l'état « sec à l'air »). Il s'agit bien sûr d'une hypothèse forte, certains extractibles ayant été trouvés comme plus hygroscopiques que la matière ligneuse elle-même ([Cooper 1974] sur du Noyer d'Amérique *Juglans nigra*).

Toutes ces hypothèses sont d'ailleurs assez fortes et particulièrement entre différentes espèces (même si de ce point de vue l'on se place en fait dans un cas de figure du même type que [Chafe 1987]). Cependant elles restent acceptables compte tenu de la plage de variation importante des teneurs en extraits considérée. Pour cette « extraction mathématique » on

considérera les extraits totaux (*AB+E*). Au final, la contribution (ΔV_{0Xtot}) au volume anhydre d'une masse (*mX*) d'1g d'extraits totaux serait de :

$$\Delta V_{0Xtot} \approx \frac{mX \times \%X_{parois}}{Mvol_{extraits} \times 0{,}888} \approx \frac{1 \times 0{,}7}{1{,}4 \times 0{,}888} \approx 0{,}563 cm^3$$

Pour chaque unité relative de variation de masse anhydre (i.e. correction par le taux d'extraits totaux), le volume anhydre varierait de ≈0,563 unités relatives (au lieu de rester égal à 1 tel que précédemment).

Soit en rapportant à une densité anhydre ρ_{0Corr} après déduction du taux d'extraits *[X]* :

$$\rho_{0Corr} \approx \rho_{0tot}\left(1 - 0{,}563\frac{[X]}{100}\right)$$

En admettant l'hypothèse (d), et connaissant les teneurs en eau de stabilisation et les coefficients de gonflements partiels, on peut extrapoler ceci à une approximation de densité « sec à l'air » corrigée (ρ_{SCorr}) de l'effet massique des composants secondaires.

On peut par suite déduire cet effet purement massique des modules spécifiques de conservation ($\rightarrow E'/\rho_{Corr}$) et de perte ($\rightarrow E''/\rho_{Corr}$) ; et recalculer les écarts ($\rightarrow \Delta tan\delta_{Corr}$) à la tendance globale des relations entre cœfficient d'amortissement et module spécifique (de conservation) sur la base de ces valeurs corrigées (E'/ρ_{Corr}). Ces relations sont représentées (en échelle naturelle) sur la Figure 131 pour les 18 essences pour lesquelles l'on dispose de données chimiques dans la base du CIRAD.

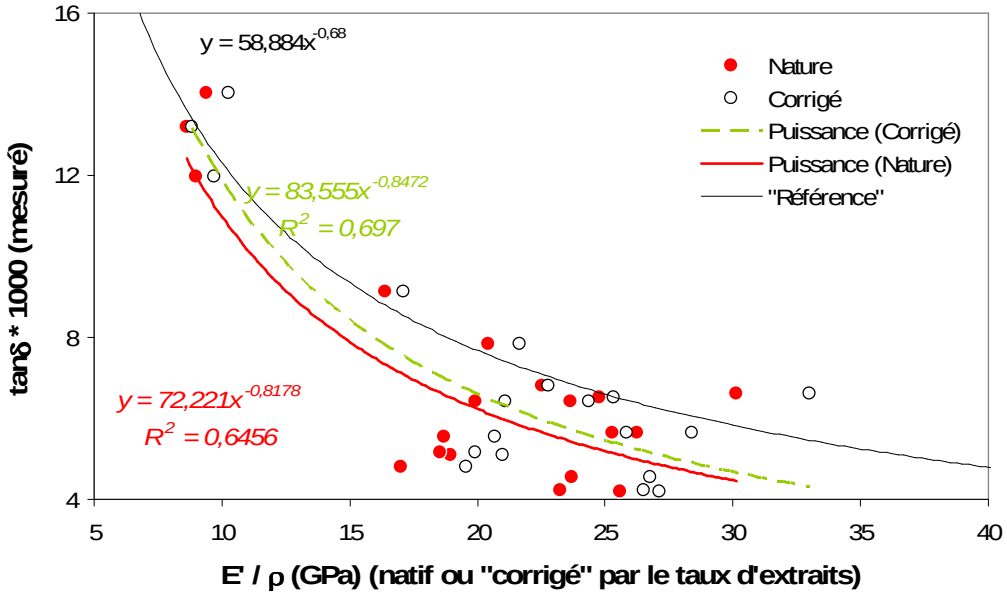


Figure 131: Relations entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique, telles que mesurées, et en déduisant l'effet des extractibles sur la densité (18 essences).

Après déduction de l'effet purement massique des extractibles totaux (AB+E), la dispersion des coefficients d'amortissement en fonction du module d'élasticité spécifique est effectivement un peu réduite (R^2≈0,73 versus ≈0,65 pour les données brutes). La courbe de tendance générale sur ces 18 essences se rapproche aussi un peu de la tendance « de référence ». Les coefficients d'amortissement sont toutefois loin d'être complètement expliqués par ces modules spécifiques « rapportés aux seuls composés principaux », et parmi les 11 essences ayant « à l'état natif » des amortissements franchement inférieurs à la tendance, 8 conservent leur caractéristique d'amortissement anormalement faible après la

déduction de l'effet massique des extraits sur les modules spécifiques. Les corrélations entre propriétés physico-mécaniques et proportions de composés principaux « corrigées » (i. e. on n'admet aux extraits qu'un rôle de composé accessoire « inerte » sauf sa masse et son encombrement stérique), et taux d'extraits, sont présentées sur le Tableau 22.

Tableau 22: Matrice de corrélations entre densité, propriétés vibratoires et teneur en eau corrigées par le taux d'extraits totaux, et : taux d'extraits, et de composés principaux après déduction des extractibles.

n=18sps	ρ_{corr}	E'/ρ_{corr}	E''/ρ_{corr}	$\Delta\tan\delta_{corr}$	MC_{corr}	AB	E	AB+E	Ccp	Lcp	HCcp
ρ_{corr}	1	*					**(-)			*	
E'/ρ_{corr}	0,48	1		10%(-)			**(-)				
E''/ρ_{corr}	-0,08	0,08	1	***		**(-)		**(-)		*(-)	
$\Delta\tan\delta_{corr}$	-0,32	-0,44	0,86	1	*	**(-)	*	*(-)		**(-)	
MC_{corr}	-0,30	-0,35	0,35	0,55	1		*				
AB	-0,06	0,10	-0,71	-0,70	-0,27	1		***			
E	-0,67	-0,64	0,15	0,52	0,54	-0,27	1			*(-)	10%
AB+E	-0,30	-0,12	-0,68	-0,54	-0,09	0,94	0,08	1			
Ccp	-0,05	0,12	0,08	0,03	0,29	0,02	-0,09	-0,01	1		***(-)
Lcp	0,49	0,35	-0,43	-0,58	-0,39	0,19	-0,59	-0,01	0,01	1	**(-)
HCcp	-0,29	-0,32	0,23	0,36	0,04	-0,14	0,45	0,02	-0,75	-0,67	1

Même après déduction de ces effets purement massiques, les taux d'extraits à l'alcool-benzène restent bien corrélés négativement avec les paramètres d'amortissement intrinsèques corrigés (cf. Figure 132). Leur liaison à la teneur en eau corrigée n'est par contre plus significative sur l'échantillon considéré. Les proportions relatives de composés principaux n'ont pas beaucoup plus d'influence que précédemment (sauf une liaison entre proportion de lignine et densité (+), et paramètres d'amortissement intrinsèque (-)).

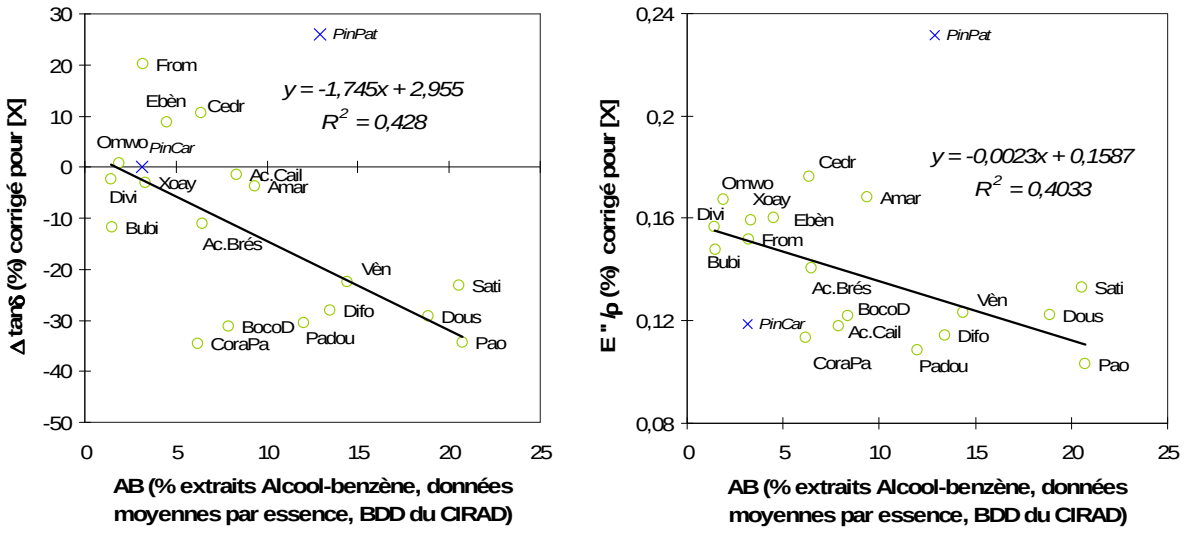


Figure 132: Relation entre teneurs moyennes par essence en extraits à l'Alcool-Benzène, et: écarts de l'amortissement à la tendance globale ; et module de perte spécifique, après déduction de l'effet massique des extractibles sur le module d'élasticité spécifique. Cercles : Feuillus tropicaux ; croix : 2 résineux (Pins) non pris en compte dans la tendance.

En terme de répartition des essences, le schéma général est relativement bien conservé. Le Fromager, et dans une moindre mesure l'Ebène et le Cédro (non forcément représentatif : une seule éprouvette) apparaissent plutôt plus amortissants que la moyenne. Les *Dialium*, le Divida, l'Amarante et l'Acajou Cailcédrat présentent des amortissements en accord avec la tendance de référence après déduction de l'apport massique des extractibles. Pour les essences précédemment repérées pour leurs très faibles amortissements intrinsèques (Coração, Boco, Padouk, Difou, Doussié, Vèn, Satiné, Pao Rosa), elles ressortent encore très nettement comme telles. Ceci semble indiquer de façon assez manifeste que leurs composés secondaires particuliers jouent un rôle de stabilisation « viscoélastique » au sein des parois, notamment si

l'on considère que leurs forts taux d'extraits totaux impliquent des augmentation de module spécifique après « correction » allant jusqu'à plus d'un quart des valeurs brutes.

III.b.5.4. Confrontation des résultats des mesures vibratoires et des indicateurs physiques de présélection : Psf, Retrait/densité.

Le nombre d'essences étudiées pour lesquelles on dispose de données chimiques comparables est relativement limité (18 Feuillus Tropicaux + 2 Résineux non pris en compte). Si l'on étend l'analyse aux indicateurs physiques de second ordre présupposés comme liés aux taux d'extraits au sein des parois cellulaires (Point de saturation des fibres *Psf* et retrait total volumique rapporté à la densité *RB/D12*), des données moyennes par essences sont disponibles pour 42 des espèces étudiées. Les corrélations entre données moyennes par essence de propriétés physico-mécaniques et colorimétriques ici mesurées, et ces indicateurs disponibles dans la base du CIRAD, sont présentées sur le Tableau 23.

Remarque : ces corrélations excluent une essence, le Greenheart, pour laquelle le point de saturation des fibres moyen représenté dans la base du CIRAD apparaissait étrangement haut pour un bois de densité élevée (42% ; mesures comportant peut être du collapse?). Cette essence est toutefois représentée en parallèle des autres sur les graphiques ci-dessous.

Tableau 23: Matrice de corrélations entre propriétés physico-mécaniques mesurées (moyennes par essences), et données moyennes par essence dans la base de données du CIRAD pour le point de saturation des fibres (Psf), et le retrait total volumique rapporté à la densité "sec à l'air" (RB/D12).

n=41sps	ρstab	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ	MC	gVol	αVol	L*	C	h*	Psf	RB/D$_{12}$
ρstab	1	***	*	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)	-	**	***(-)	***(-)	***(-)	***(-)	***(-)
E'	0,87	1	***	***(-)	-	*(-)	*(-)	*	***	***(-)	**(-)	***(-)	**(-)	**(-)
E'/ρ	0,33	0,72	1	***(-)	**	-	-	**	***	-	-	-	-	-
tanδ	-0,63	-0,70	-0,61	1	*	***	***	-	-	***	-	***	***	***
E''/ρ	-0,36	-0,05	0,45	0,37	1	***	***	***	*	***	-	***	***	***
Δtanδ	-0,54	-0,33	0,09	0,69	0,93	1	***	**	-	***	-	***	***	***
MC	-0,52	-0,33	0,02	0,62	0,66	0,76	1	***	-	***	-	***	***	***
gVol	0,12	0,34	0,43	0,13	0,58	0,49	0,62	1	***	-	10%(-)	-	*	**
αVol	0,47	0,64	0,52	-0,19	0,34	0,18	0,19	0,87	1	-	*(-)	-	-	-
L*	-0,83	-0,64	-0,11	0,61	0,62	0,73	0,65	0,14	-0,17	1	**	***	***	***
C	-0,52	-0,42	-0,09	0,03	0,01	0,02	0,04	-0,30	-0,35	0,43	1	10%	-	-
h*	-0,67	-0,54	-0,16	0,55	0,50	0,61	0,54	0,19	-0,04	0,84	0,31	1	***	***
Psf	-0,57	-0,43	-0,08	0,70	0,72	0,85	0,80	0,39	0,04	0,72	-0,05	0,68	1	***
RB/D$_{12}$	-0,70	-0,48	-0,01	0,67	0,74	0,84	0,84	0,43	0,05	0,80	0,06	0,74	0,90	1

Les points de saturation des fibres et retraits totaux/densité moyens par essence sont bien corrélés (-) à la densité, ainsi que (+) à la clarté et à l'angle de teinte. Surtout, ils sont très fortement corrélés (positivement) avec le module de perte spécifique *E''/ρ* et les déviations de l'amortissement *Δtanδ*.

Les relations entre ces deux indicateurs *Psf* et *RB/D12*, et les paramètres d'amortissement intrinsèque *Δtanδ* et *E''/ρ* sont présentées sur les Figure 133, Figure 134 et Figure 135, avec les libellés des essences concernées.

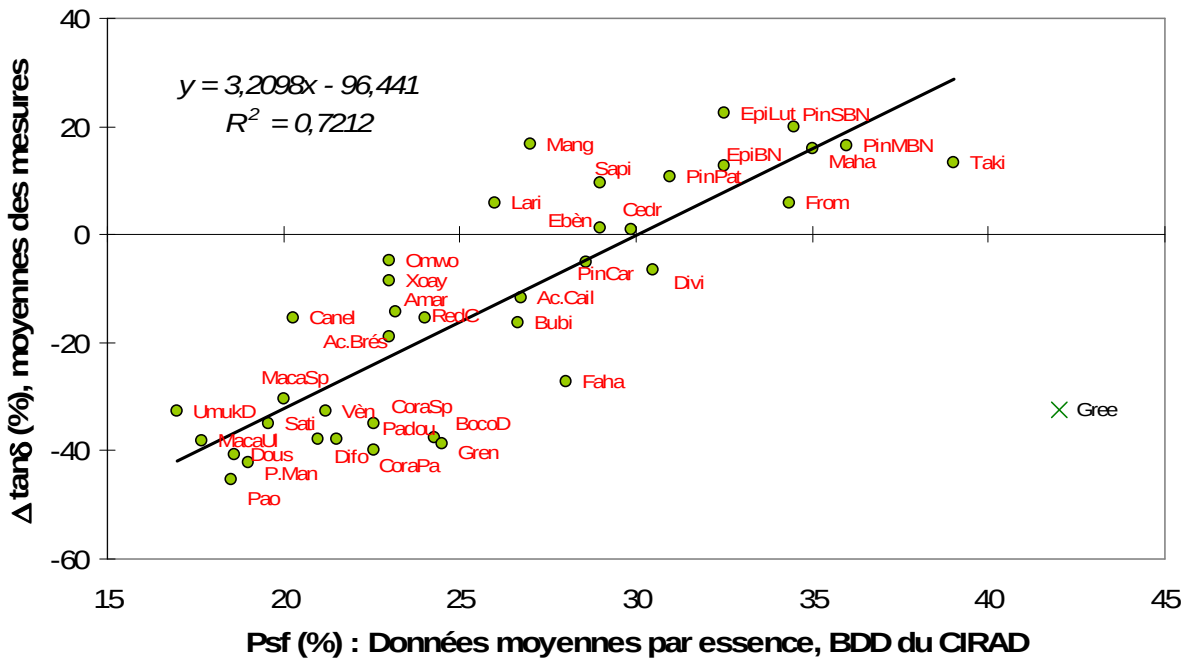


Figure 133: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance « bois moyens » (moyennes mesurées par essence) et données moyennes par espèce de point de saturation des fibres dans la base de données du CIRAD. Ronds pleins : essences prises en compte dans la régression ; croix : Greenheart exclu de la régression.

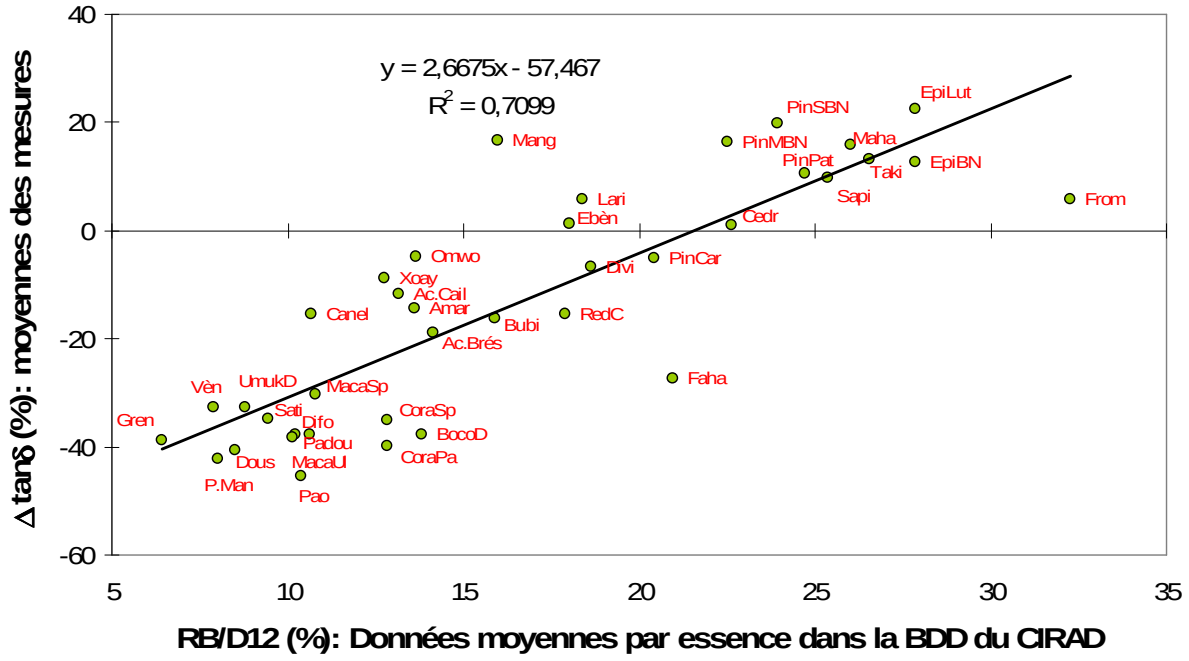


Figure 134: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance "bois moyens » (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de retrait volumique rapporté à la densité (BDD du CIRAD).

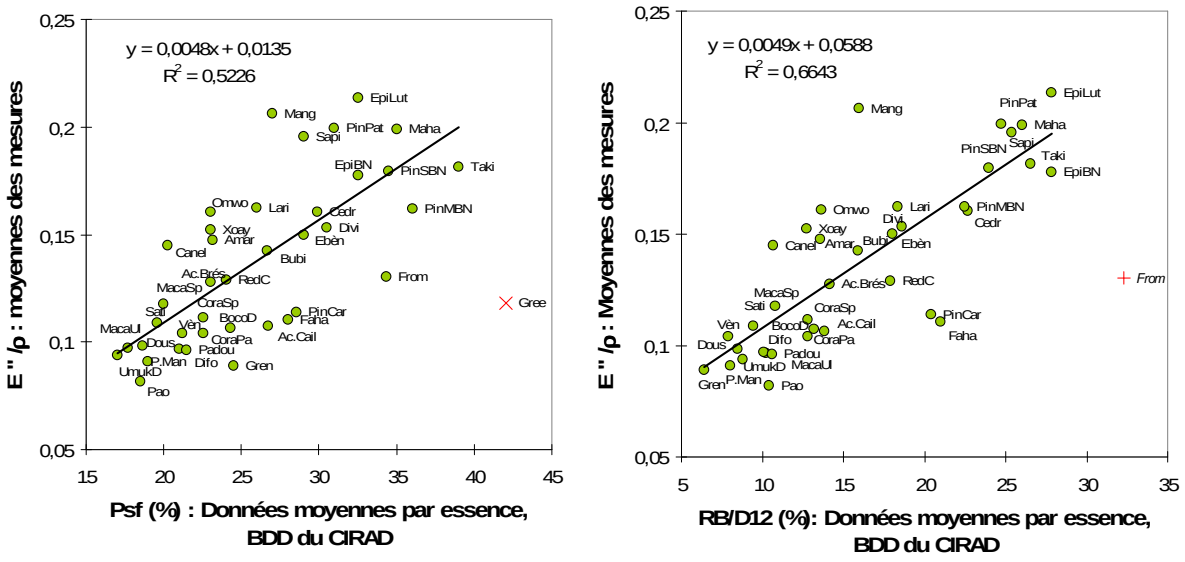


Figure 135: Relation entre module de perte spécifique (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de Psf et de RB/D12 dans la base de données du CIRAD. Ronds pleins : essences prises en compte dans la régression ; croix : essences exclues de la régression.

Ces indicateurs physiques permettent d'expliquer ≈70% des variations d'amortissement non liées au module d'élasticité spécifique.

Les coefficients de détermination obtenus pour les relations au module de perte spécifique sont d'un peu moindre intensité que pour les déviations à la tendance de référence, ce qui s'explique notamment par le fait que sur ce sous échantillon E''/ρ reste bien corrélé à E'/ρ. Les tendances générales et distribution des espèces restent toutefois très comparables à celles entre *Psf* et *RB/D12* et $\Delta tan\delta$.

La dispersion reste non négligeable dans ces relations, et on se gardera de les considérer comme systématiques. Cependant, compte tenu notamment du fait qu'il s'agit de données moyennes par essences, non nécessairement obtenues sur le même matériel, il semble que *Psf* et *RB/D12* puissent effectivement permettre une bonne première sélection pour la recherche globale de bois faiblement amortissants.

Sur les 41 essences ci-dessus, une régression multiple avec le coefficient d'amortissement $tan\delta$ comme variable dépendante, et prenant comme variables explicatives module d'élasticité spécifique E'/ρ et point de saturation des fibres *Psf*, présente un coefficient de corrélation multiple R=0,90, et un coefficient de détermination ajusté R^2=0,79. L'équation de cette régression multiple est :

$$tan\delta=4,76-0,2548*(E'/\rho)+0,2924*(Psf)$$

avec $tan\delta$ en ‰, E'/ρ en GPa et *Psf* en %. Les coefficients β pour les deux variables explicatives sont : -0,559 pour E'/ρ, et 0,654 pour *Psf*.

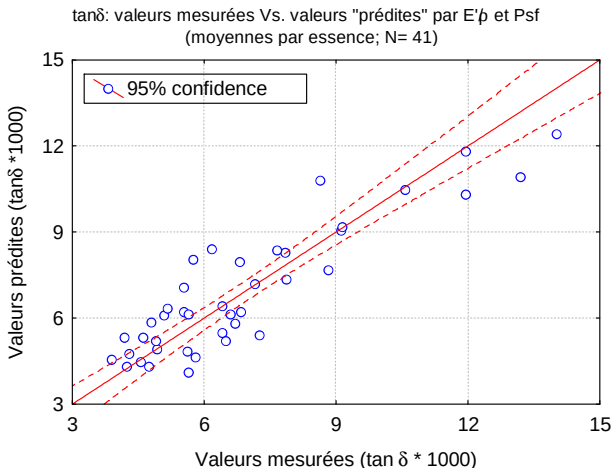


Figure 136: Amortissement: moyennes mesurées par essence, vs valeurs "prédites" par régression multiple avec module d'élasticité spécifique et point de saturation des fibres comme variables explicatives. 41 essences.

La comparaison des valeurs prédites

par cette équation, avec les valeurs mesurées, est présentée sur la Figure 136.

Les individus sont répartis de façon relativement régulière autour de la droite « prédiction = mesure », mais la dispersion résiduelle n'est pas négligeable. Ces « prédictions » sont toutefois bien meilleures qu'en ne considérant que le module spécifique comme variable explicative de l'amortissement.

En remplaçant la variable explicative *Psf* par *RB/D12*, on obtient une régression avec un coefficient de corrélation multiple R=0,90, et un coefficient de détermination ajusté R^2=0,80 (soit très similaire à ci-dessus).

L'équation en est :

$\tan\delta = 8{,}70 - 0{,}2771*(E'/\rho) + 0{,}2473*(RB/D12)$.

Avec $\tan\delta$ en ‰, E'/ρ en GPa et *RB/D12* en %. Les coefficients β pour les deux variables explicatives sont : -0,608 pour E'/ρ, et 0,661 pour *RB/D12*.

Les limitations de ces régressions multiples (relation linéaire au lieu de puissance entre E'/ρ et $\tan\delta$) sont les mêmes qui ont été évoquées au §III.b.5.2. En se basant à nouveau sur la tendance globale de forme puissance, et les régressions simples ci-dessus, on aurait une estimation de la forme :

$$\tan\delta = [10^A \times (E'/\rho)^{-B}] \times [1 + (C \times Psf - D)/100]$$

Avec les constantes A et B correspondant à la tendance globale (A=4,89 ; B=0,68) pour E'/ρ en Pa ; et C≈3,21 et D≈96,44 d'après les régressions ci-dessus. Pour les 41 essences considérées, les différentes estimations de $\tan\delta$ sont comparées sur la Figure 137.

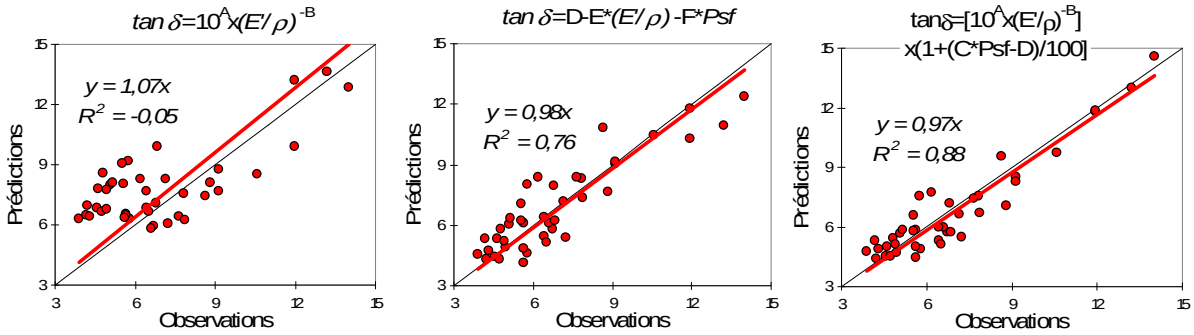


Figure 137: tanδ: valeurs observées vs. Valeurs « prédites » : uniquement par E'/ρ (loi puissance) ; par E'/ρ et Psf (régression linéaire) ; par E'/ρ (loi puissance) et Psf (linéaire). Moyennes sur 41 essences.

La prise en compte de la relation de forme puissance entre E'/ρ et $\tan\delta$ apporte une amélioration significative de la représentation de $\tan\delta$ (R^2=0,88 vs. 0,76). Mais surtout, ces estimations sont beaucoup plus cohérentes avec les observations sur cet échantillon lorsqu'elles incluent également le Psf comme descripteur, que lorsqu'on ne prend en compte que le module spécifique (relation non significative entre prédictions et observations pour une droite de tendance passant par l'origine ; R^2≈0,5 pour une droite ne passant pas par l'origine).

III.b.5.5. **Discussion**

Les jeux de données analysés dans cette section n'ont pas systématiquement été obtenus sur les mêmes matériels par essence pour les déterminations chimiques, physiques, et mécaniques/acoustiques. Toutefois la cohérence des relations obtenues à l'échelle interspécifique suggère qu'il s'agit de relations assez fortes pour outrepasser ce manque de précision.

Il existe de façon globale, sur les Feuillus tropicaux étudiés, une influence marquée des taux d'extraits aux solvants organiques sur la diminution des coefficients d'amortissement, à module spécifique donné. Sur le jeu de données disponible, ceci prime apparemment sur l'influence potentielle de différences inter-spécifiques des proportions de composés primaires. Cependant l'effet de ces extraits n'est pas d'ordre strictement quantitatif : entre différentes espèces, un niveau également faible d'amortissement intrinsèque peut être lié à des taux d'extraits allant d'environ 6 à 25%. A l'intérieur d'une même espèce, d'après les données limitées disponibles, les stocks/arbres plus riches en extractibles apparaissent moins amortissant. Ceci serait à confirmer par des études de variabilité intra-spécifique sur des essences ciblées.

Si ces relations peuvent fournir un bon outil de présélection générale, à une échelle plus fine, il semble que les extraits ne puissent pas être considérés comme « une » entité ayant systématiquement un effet de diminution de l'amortissement proportionnel à leur quantité dans le bois. La nature chimique des extraits particuliers aux différentes espèces semble jouer un rôle important : pour certaines, les composés secondaires apparaissent n'avoir qu'un effet massique, de comportement neutre en regard de l'amortissement (Amarante, Acajou Cailcédrat). Pour d'autres il semblerait qu'après déduction de cet apport purement massique, les coefficients d'amortissements soient supérieurs à la tendance (Ebène, Fromager). Compte tenu du faible échantillonnage de ce type et de l'amplitude réduite de ces écarts d'amortissement, l'implication respective d'extraits ou d'autres facteurs serait à vérifier. Enfin, pour la majorité des espèces tropicales à taux d'extraits supérieurs à ≈5% qui ont été étudiées, on observe de façon marquée une diminution de l'amortissement, indépendamment d'un effet massique sur les modules spécifiques apparents. Les différences inter-spécifiques en termes de localisation cellulaire des extraits ne doivent pas non plus être hâtivement sous estimées : il est probable que l'hypothèse de localisation pariétale de 63-75% des extraits (reprise de [Kuo & Arganbright 1980a] pour des données sur Résineux, que [Chafe 1987] appliquait à des Feuillus) ne soit pas à considérer comme systématique.

Vis-à-vis de ce dernier point, il semble que les indicateurs physiques « de second ordre » que sont le point de saturation des fibres et le rapport entre retrait volumique et densité, puissent apporter une information supplémentaire. Effectivement, ces deux paramètres ne seront affectés par les extraits que dans la mesure où ceux-ci sont localisés au sein des parois. Des nuances sont à apporter cependant : d'une part, celle déjà évoquée quant à l'existence d'extractibles qui ne diminueraient pas, mais augmenteraient, l'hygroscopicité des bois ([Cooper 1974] sur le Noyer d'Amérique *Juglans nigra*). Ces deux types peuvent d'ailleurs être simultanément présents dans un même bois ([Arévalo-Fuentes 2002] sur l'Acajou *Swietenia macrophylla*). On ne doit donc pas surestimer l'efficacité de ces estimateurs. D'autre part, concernant les Psf, une théorie explicative de leur diminution expérimentalement observée pour des bois de forte densité reposait sur la différenciation de l'eau liée totale en deux composantes : l'eau adsorbée au sein des parois proprement dite, et l'eau « capillaire condensée » à l'interface parois-lumen [Cudinov *in* Skaar 1988]. Un simple tapissage des cavités aurait alors potentiellement un effet de diminution des Psf ([Arévalo-Fuentes 2002] signale aussi un effet « imperméabilisant » de certains extraits tapissant les lumen). Mais les extractibles impliqués ne seraient pas en mesure de jouer sur les coefficients d'amortissement. Enfin, en admettant une localisation pariétale des extraits, il est loin d'être évident que les mécanismes impliqués dans une « stabilisation viscoélastique » soient les mêmes que dans le cas des Psf (encombrement plus hygroscopicité propre des extraits) et des retraits volumiques (d'après la littérature, encombrement stérique des parois par ces composés additionnels ; les angles de microfibrilles jouent aussi bien sûr, le critère retrait combinerait alors des liens aux extraits et modules spécifiques). Ceci reste à étudier. Dans un premier

temps, les différences observées entre espèces sur le lien quantité d'extraits – amplitude de déviation des amortissements au cas standard, laissent penser qu'un simple mécanisme d'encombrement des parois n'est pas une explication suffisante.

Bien évidemment, ces quelques analyses qui ont été présentées sont très exploratoires, et il s'agissait d'abord de dégager des tendances, et de repérer les espèces concernées. L'étude des mécanismes impliqués demandera un travail spécifique liant déterminations chimiques, physiques et mécaniques sur des essences ciblées (à la fois un jeu d'essences apparaissant proches, et un jeu d'essences à comportements « viscoélastiques » et à taux d'extraits contrastés).

Pour revenir à une problématique plus applicative : il ne faut bien sûr pas négliger les différences entre espèces (composition phytochimique, localisation histologique) dans les relations présentées ci-dessus. Mais dans le cadre général d'une démarche de choix de matériaux, la prise en compte simultanée du module d'élasticité spécifique d'une part, d'autre part des taux d'extractibles et/ou des points de saturation des fibres ou retraits rapportés à la densité, pour une estimation des coefficients d'amortissement, permet d'améliorer de façon très significative la validité des « prédictions » par rapport à une estimation purement mécanique (Figure 130 & Figure 137). Les équations des estimations obtenues au cours de ce travail sur 18 essences (prédiction « mécanique-chimie ») et 41 essences (« mécanique-physique ») ont ensuite été appliquées sur l'ensemble de la base de données du CIRAD, et nous espérons effectuer prochainement des mesures de vérification[34] sur de « nouvelles » essences ainsi repérées.

III.b.6. Conclusion

Au cours de ce chapitre, on a comparé, du point de vue de leurs propriétés vibratoires, physiques et de couleur, environ 70 essences/types de bois, dont une grande majorité de bois tropicaux mi-lourds à très lourds, et qui pourraient être qualifiés de bois « précieux » ou « semi-précieux ». Certains de ces bois représentent des « standards » pour certaines applications en facture instrumentale Occidentale et une bonne partie de cet échantillon provenait de facteurs expérimentés[35]. D'autres de ces bois, mal connus pour ce domaine d'application, avaient été présélectionnés sur la base d'une démarche « hybride » de choix de matériaux, liant indicateurs mécaniques « classiques » avec des indicateurs physico-chimiques (et éventuellement d'usage des bois en facture d'autres régions du Monde). Cette démarche qui visait à pallier aux très importantes lacunes dans les connaissances actuelles sur la diversité interspécifique des coefficients d'amortissement des vibrations, était basée sur des hypothèses reliant ces paramètres à la microstructure et à la composition chimique des bois, notamment en référence aux effets des métabolites secondaires.

Ces différentes essences ont été comparées et classées, pour les différentes propriétés de façon individuelle ; puis par analyses multivariables pour créer des groupes de similitude, et observer les recoupements effectifs des deux grands groupes ci-dessus (et/ou entre espèces reliées au niveau botanique). Les relations entre les différentes propriétés mesurées ont aussi été analysées au niveau interspécifique (puis pour certaines essences plus représentées, entre différentes pièces de bois ou stocks). Pour 6 essences, les propriétés des bois de cœur ont été comparées à celles des aubiers correspondants. Enfin, les résultats obtenus ont été confrontés aux hypothèses de départ de notre choix de matériaux, et des modèles prédictifs simples

[34] Pour les « prédictions » prenant en compte PSF et RB/D12, une première série de vérification a d'une certaine façon déjà été effectuée, dans la mesure où sur les 41 essences ici prises en compte, moins de la moitié avaient été initialement choisies d'après ces critères.

[35] Je tiens à renouveler ici mes remerciements les plus sincères à : Nelly Poidevin ; Paul Borie ; Eric Fouilhé ; Dominique Chevallier ; Hugo Cuvilliez ; Olivier Pont ; Christian Magdeleine.

peuvent être proposés pour améliorer le repérage de bois en regard de leur comportement plus ou moins amortissant.

De cette étude exploratoire de la diversité des comportements « acoustiques » des bois, et de leurs relations à d'autres paramètres, on peut retenir :

- La moitié des bois étudiés (bois présélectionnés par nos critères « hybrides » et bois tropicaux de facture confondus) ont des coefficients d'amortissement inférieurs à la gamme « Epicéa de résonance » (≈7‰).
- Ces classes de très faibles amortissements ne se recoupent que très peu avec celles de fort module spécifique. On y retrouve par contre la plupart des bois de cœur de Legumineuses[36].
- Sur l'ensemble de la gamme de variation de propriétés vibratoire, on retrouve toutefois la relation entre module d'élasticité spécifique et amortissement. Cette relation à l'échelle interspécifique est qualitativement comparable à celle obtenue à l'échelle de variations locales, et n'explique ici aussi qu'environ la moitié de la variabilité des coefficients d'amortissement.
- Les analyses multivariables dissocient les bois étudiés : premièrement d'après les critères rigidité et densité (dépendant de paramètres de structure et de microstructure), la densité étant aussi liée à de faibles clartés. Le deuxième niveau de séparation concerne la « stabilité » viscoélastique ou hygroscopique (qu'on peut associer à des paramètres de composition chimique), les bois les plus faiblement amortissants étant ici assortis d'une tendance vers le « rouge ». Ce dernier point demanderait à être vérifié sur plus d'essences.
- Parmi les bois tropicaux denses, on peut distinguer : des bois de rigidité moyenne mais dans la gamme extrême de faibles amortissements (type « Dalbergioideae » d'un point de vue botanique, et ceux employés en facture seraient des bois de touches de percussions à clavier, fonds et éclisses de guitares classiques…). Puis des bois dans la même gamme de faibles amortissements, mais un peu plus rigides (type Pernambouc des archets modernes) ; suivis de bois encore peu amortissants mais surtout définis par leur très grande rigidité (type Amourette et bois d'archets baroques). Des bois très rigides et denses peuvent aussi présenter des amortissements intrinsèques moyens à plutôt élevés, mais nous ne connaissons pas d'usages en facture pour les essences concernées.
- Pour environ la moitié des espèces, on retrouve à l'échelle intra-spécifique la relation module spécifique-amortissement de forme puissance, mais avec des valeurs absolues d'amortissement dépendant des essences, et qui peuvent être corrélées aux propriétés physiques et de couleur. Celles qui présentent des amortissements exceptionnellement faibles sont de façon générale caractérisées par des teneurs en extractibles importantes. La contribution massique des extractibles n'est pas responsable du décalage par rapport à ces relations.
- Les bois de cœur en question ont effectivement des amortissements et teneur en eau beaucoup plus faibles que leurs aubiers respectifs. Cependant les propriétés des aubiers varient aussi entre espèces, et on ne peut pas considérer qu'il s'agit de bois tout à fait « neutres ».
- Pour ce qui est de la démarche de choix de matériaux, la confrontation des résultats obtenus avec les indicateurs chimiques (taux d'extraits aux solvants organiques), et

[36] On doit remarquer que le sur-échantillonnage des bois de Legumineuses dans notre travail n'était pas volontaire : il a commencé à se manifester lors de la présélection liée aux taux d'extraits, et il s'est encore nettement accentué en ajoutant les essences tropicales employées en facture instrumentale.

physiques (point de saturation des fibres, retrait volumique spécifique) semblent conforter les hypothèses de départ. La prise en compte simultanée de ces indicateurs, et des relations générales au module spécifique, permet d'obtenir des modèles prédictifs simples qui expliquent sur les essences étudiées de 85 à 90% de la variabilité des coefficients d'amortissement. D'autres essences ont ainsi été repérées et les mesures de vérification sont prévues à court terme.

- Dans une optique plus fondamentale, ces relations ne sont cependant pas systématiques, notamment l'effet des extraits n'apparaît pas strictement quantitatif à l'échelle inter-spécifique. Ceci suggère une dépendance aux types de composés phytochimiques. Dans le futur il sera très intéressant d'élargir l'étude à de plus nombreuses familles botaniques, en lien avec l'analyse des mécanismes impliqués dans cette « stabilisation chimique naturelle ».

Enfin, il ressort clairement, que ce soit pour l'analyse à l'échelle de variations locales sur de petites pièces de bois, ou pour celle à l'échelle de moyennes par espèces, que deux niveaux de déterminants sont superposés : d'une part des paramètres de microstructure et d'orientation qui vont jouer sur le module d'élasticité spécifique et sa relation normale à l'amortissement ; d'autres part des paramètres de composition chimique qui vont influer sur le comportement plus ou moins intrinsèquement « visqueux ». Ces deux niveaux sont étudiés de façon plus quantitative, sur des matériels ciblés sur ces aspects, dans la partie suivante.

PARTIE IV :

RELATIONS ENTRE STRUCTURE ET COMPOSITION CHIMIQUE, ET PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES : ETUDE DE DEUX CAS PARTICULIERS

IV. PARTIE IV : RELATIONS ENTRE STRUCTURE ET COMPOSITION CHIMIQUE, ET PROPRIETES PHYSICO-MECANIQUES : ETUDE DE DEUX CAS PARTICULIERS

La grande diversité qui est observable dans le comportement physico-mécanique des bois est le reflet de la structuration multi échelles de ce matériau d'origine biologique. Dans les analyses multivariables de nos résultats expérimentaux, présentées dans la partie précédente, on retrouvait deux axes de propriétés matérielles : densité et rigidité, associables à des critères de porosité et d'orientation des éléments de renfort du bois ; et « stabilité » (viscoélastique ou hygroscopique) qui peut être reliée à des paramètres de composition chimique.

Pour ce qui concerne les propriétés vibratoires en direction axiale, il est assez généralement admis que l'échelle de structure ayant la plus grande influence est celle des parois cellulaires. D'après les résultats de la littérature –caractérisations expérimentales et analyses par des modèles micromécaniques- l'angle moyen des microfibrilles (AMF) est le premier déterminant du module d'élasticité spécifique, et également des coefficients d'amortissement « en conditions ambiantes » par un phénomène d'entraînement de la matrice viscoélastique par les microfibrilles élastiques [Norimoto et al 1986]. Il serait suivi par les effets –relativement plus faibles devant celui de l'AMF- des proportions relatives de ces microfibrilles cristallines et de la « matrice » viscoélastique de lignines, hémicelluloses et cellulose amorphe.

Les résultats présentés dans la partie précédente semblent confirmer l'importance, suggérée par quelques auteurs, d'un deuxième type de facteur –la composition chimique secondaire- dans la détermination des coefficients d'amortissement.

Dans la première partie de notre travail expérimental, les influences relatives prévisibles de ces différents déterminants étaient approchées « par déduction » à partir des relations macroscopiques observées ; mais cela sans que l'on dispose vraiment de données quantitatives, obtenues sur le même matériel végétal, concernant ces paramètres d'orientation et de composition chimique. Il serait bien sûr un peu ambitieux de prétendre, dans la durée d'une thèse, effectuer l'ensemble des déterminations physico-mécaniques, chimiques et de structure sur 70 essences.

Dans cette partie, deux grands niveaux de déterminants sont étudiés, sur des échantillons de bois ciblés sur ces objectifs. Dans un premier temps, les relations entre propriétés vibratoires et angles de microfibrilles (AMFs) sont étudiées sur une large gamme d'AMF tout en restant sur les mêmes arbres et 3 espèces relativement proches, par la prise en compte de bois normaux et de bois de compression de Résineux. Pour ce matériel, aux variations d'AMF se superposent des variations de structure cellulaire, et de composition chimique primaire.

Dans un deuxième temps, on cherchera à quantifier les effets de certains métabolites secondaires sur les propriétés physico-mécaniques étudiées, pour deux espèces tropicales botaniquement proches (même genre), et en prenant en compte des variations d'orientation des éléments qui sont cette fois à l'échelle mésoscopique.

IV.a. Variations d'angles des microfibrilles, de structure cellulaire et de composition primaire : Bois opposé/juvénile et bois de compression de Résineux

Une grande partie des recherches sur les relations entre microstructure et comportement mécanique du bois a pris comme matériel d'étude des bois de Résineux. D'un point de vue « fondamental », la structure anatomique généralement plus simple de leurs bois (par rapport à ceux de feuillus), et leur épaisseur de parois généralement plus petite, rendent plus robustes les hypothèses souvent adoptées dans des extrapolations entre mesures macroscopiques et estimations de comportement des parois cellulaires.

Jusqu'ici, nous nous sommes surtout penché sur les variations de propriétés à l'échelle inter-spécifique, sur des bois « normaux ». Il ne faut évidemment pas négliger le fait que la variabilité intra-arbre peut recouper de façon significative ces variations entre espèces.

Dans ce chapitre, on veut observer les effets de déterminants « primaires », et on cherche donc à s'affranchir autant que possible des effets potentiels de métabolites secondaires (et de leurs différences qualitatives et/ou quantitatives entre groupes d'essences et/ou arbres). Le choix comme matériel d'étude d'arbres de Résineux avec bois juvénile et bois de compression permet d'avoir une large gamme d'angles de microfibrilles tout en restant sur le même individu. Dans l'absolu, on ne peut pas faire l'hypothèse d'une totale absence (de présence ou d'influence) de métabolites secondaires. Néanmoins on peut considérer que de ce point de vue le matériau sera raisonnablement homogène : d'après [Timell 1982 ; Hillis 1987], les évolutions de taux d'extraits entre bois normal et bois de réaction peuvent aller dans un sens ou l'autre, et sont généralement faibles devant les autres différences de ces bois. Récemment les différences quantitatives de taux d'extraits sur *Pinus taeda* entre ces types de bois étaient aussi trouvées négligeables ou faibles [Yeh et al 2006].

Le premier déterminant que l'on considère ici est l'angle moyen des microfibrilles, qui a précédemment été mesuré sur le même échantillon [Ruelle 2003]. Toutefois, à priori on peut aussi raisonnablement se demander si sur des bois de compression les effets « angles de microfibrilles » ne seront pas un tant soit peu associés à des effets supplémentaires liés à la composition primaire et la structure cellulaire particulière de ces bois. Quelques aspects de ces particularités sont brièvement rappelés ci-dessous. Nous n'avons connaissance que de peu de références présentant des données comparatives des propriétés vibratoires entre bois normal et bois de compression[37] -en fait quasiment rien en ce qui concerne les coefficients d'amortissement. [Norimoto et al 1984] comparent différentes qualités de bois de Résineux, dans une optique de caractérisation de la « ressource » pour des tables d'harmonie de piano, et incluent des « défauts »: des bois de compression modérés ou sévères, et des bois avec poches ou veines de résine. On peut noter que par rapport au reste de notre travail nous n'étudions pas du tout cet échantillon dans une optique potentiellement liée à la facture instrumentale.

IV.a.1. Bois juvénile et bois de compression : brève définition

Ces deux types de « bois particuliers » dans l'arbre présentent certaines caractéristiques similaires et aussi des différences. Par comparaison avec du bois normal adulte, ils présentent notamment des modules d'élasticité axiaux plus faibles et des angles de microfibrilles moyens plus élevés.

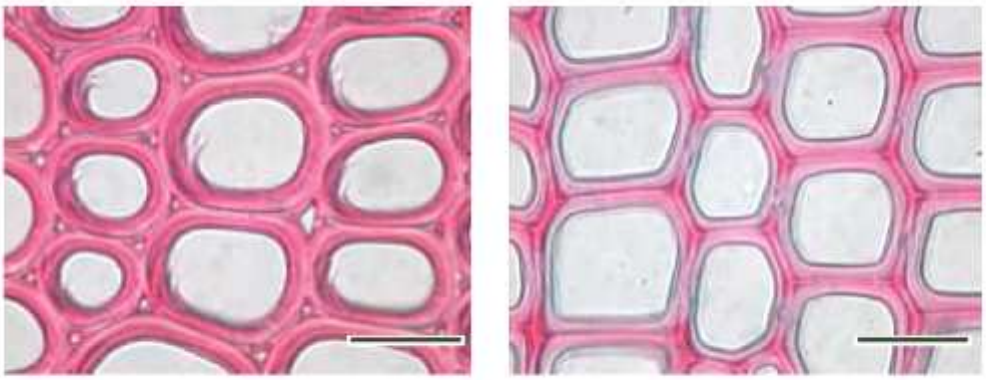
Le bois juvénile est formé pendant les premières années de fonctionnement cambial de chaque unité de croissance. On le retrouvera donc au centre des axes, et dans un arbre adulte

[37] Cependant, ce travail de thèse n'étant pas centré sur la thématique « bois de réaction », il est fort possible que d'éventuelles autres références aient échappé à ma recherche bibliographique.

le cambium produira du bois adulte à la base, et du bois plus juvénile à la cime. Le passage du bois juvénile au bois adulte est progressif, et de durée variable selon les espèces (5-20ans), et le mode de propagation et/ou de traitement sylvicole [Nepveu 1994 ; Donaldson 1996]. Le bois juvénile peut souvent présenter de plus grandes largeurs de cernes, mais ceci n'est pas systématique selon les conditions de couvert forestier. Des marqueurs plus systématiques de ce bois comprennent : angle de microfibrilles et retrait longitudinal plus élevés, et trachéides plus courtes et de plus petites dimensions tangentielles, que dans le bois adulte. Sa densité globale est souvent plus faible, mais avec de moindres contrastes entre bois initial et final [Nepveu 1994]. D'un point de vue de la composition chimique primaire, pour les Résineux le bois juvénile contient moins de cellulose et plus de lignines que le bois adulte, et peu de différences pour les hémicelluloses [Pereira et al 2003].

Le bois de compression est le type de bois de réaction développé par les Gymnospermes (dits Résineux), selon des mécanismes antagonistes aux bois de tension des Angiospermes (dits Feuillus). Ceci dit un Angiosperme « primitif » comme le Buis (*Buxus spp.*) peut adopter une stratégie de redressement de type bois de compression [Yoshizawa et al 1993]. Ces bois remplissent une fonction active dans l'orientation (branches) ou la réorientation verticale (troncs penchés, résistance aux vents dominants) des axes. Dans le cas du bois de compression, on le trouve du côté inférieur des tiges, générateur de forces de compression. La formation de ce type de bois se caractérise par : i) au niveau du cambium, des divisions cellulaires beaucoup plus nombreuses, résultant en des cernes plus larges, des trachéides plus courtes et qui auront des angles de microfibrilles élevés; ii) au niveau de la maturation (lignification des parois secondaires) ces cellules auront tendance à l'élongation longitudinale et, celle ci étant restreinte par l'adhésion aux couches de cellules précédentes, elles se retrouveront en précontrainte de compression.

Les caractéristiques de structure anatomique de ces bois de compression sont généralement : trachéides plus courtes, de section arrondie, à parois plus épaisses, avec un angle très oblique des microfibrilles dans la sous-couche S2. Dans les cas sévères, cette couche S2 peut présenter sur bois « sec » d'importantes fissures hélicoïdales et la couche S3 être totalement absente. L'arrangement des trachéides n'est plus de type « nid d'abeille », mais fait apparaître des vides (méats) intercellulaires (Figure 138 [Ruelle 2003]).



détails de coupes transversales de *Pinus pinaster* colorées à la safranine (à gauche bois de compression, à droite bois normal) (grossissement : 500X, barres d'échelles : 25µm).

Figure 138: Différences d'agencement cellulaire entre bois normal et bois de compression pour un des arbres (Pin Maritime) de l'échantillon étudié [Ruelle 2003].

Du point de vue de la composition chimique, les bois de compression sont beaucoup plus riches en lignines et plus pauvres en cellulose (≈39 et 30% au lieu de ≈30 et 42% pour du bois normal de Résineux, [Timell 1982]). Les lignines présentent aussi des proportions

différentes de leurs unités monomériques et une structure macromoléculaire plus condensée, tandis que la cellulose est moins cristalline. Les hémicelluloses présentent des différences de composition également.

Des marqueurs physico-mécaniques des bois de compression incluent : densité élevée (jusqu'à deux fois plus que le bois normal), retraits longitudinaux élevés, faible module spécifique longitudinal, généralement bois plus « sombre » et plus « rouge ». De façon générale ils représentent plutôt un défaut dans l'utilisation des bois (au contraire de leur rôle utile pour l'arbre).

IV.a.2. Echantillonnage et données déjà disponibles

Le matériel étudié a précédemment fait l'objet de toute une campagne d'essais biomécaniques (sur l'arbre sur pied), mécaniques et physiques (sur bois vert puis sec à l'air, travail de Anne Thibaut au CIRAD, voir aussi [Alméras et al 2005]), et anatomique (anatomie quantitative et angle des microfibrilles, travail de DEA de Julien Ruelle [Ruelle 2003]). Ceci s'inscrivait dans le cadre d'un projet de recherche « Propriétés physiques et mécaniques des bois de réaction » [Gril et al 2003], financé par le Programme Concerté Matériau Bois (DERF/ADEME).

L'avantage évident d'un échantillonnage de cette sorte est de pouvoir mettre en commun une grande quantité d'informations et de propriétés, et nous espérons que les données additionnelles ici présentées pourront être utiles dans l'étude globale. Dans le cadre de notre étude, le premier intérêt est l'existence de données d'angles de microfibrilles notamment, obtenues sur le même matériel que celui ici étudié [Ruelle 2003].

IV.a.2.1. **Matériel**

L'échantillon provient de trois arbres assez jeunes (≤25ans): un Epicéa (*Picea abies* Karst.), un Pin Maritime (*Pinus pinaster* Aiton.) et un Pin Sylvestre (*Pinus sylvestris* L.). Ces arbres avaient été fortement penchés lors de la tempête de 1989, puis se sont redressés, jusqu'en 2001 où ont eu lieu les premières mesures.

Les localisations dans le tronc des éprouvettes étudiées sont présentées sur la Figure 139. Pour les deux Pins, le matériel provient d'un billon par arbre. Pour l'Epicéa, de deux billons : l'un à la base de l'arbre (presque horizontale, avant redressement), l'autre plus haut, après le départ d'une branche verticale qui a pu tenter à un moment de prendre le relais du tronc principal [Bernard Thibaut; communication personnelle].

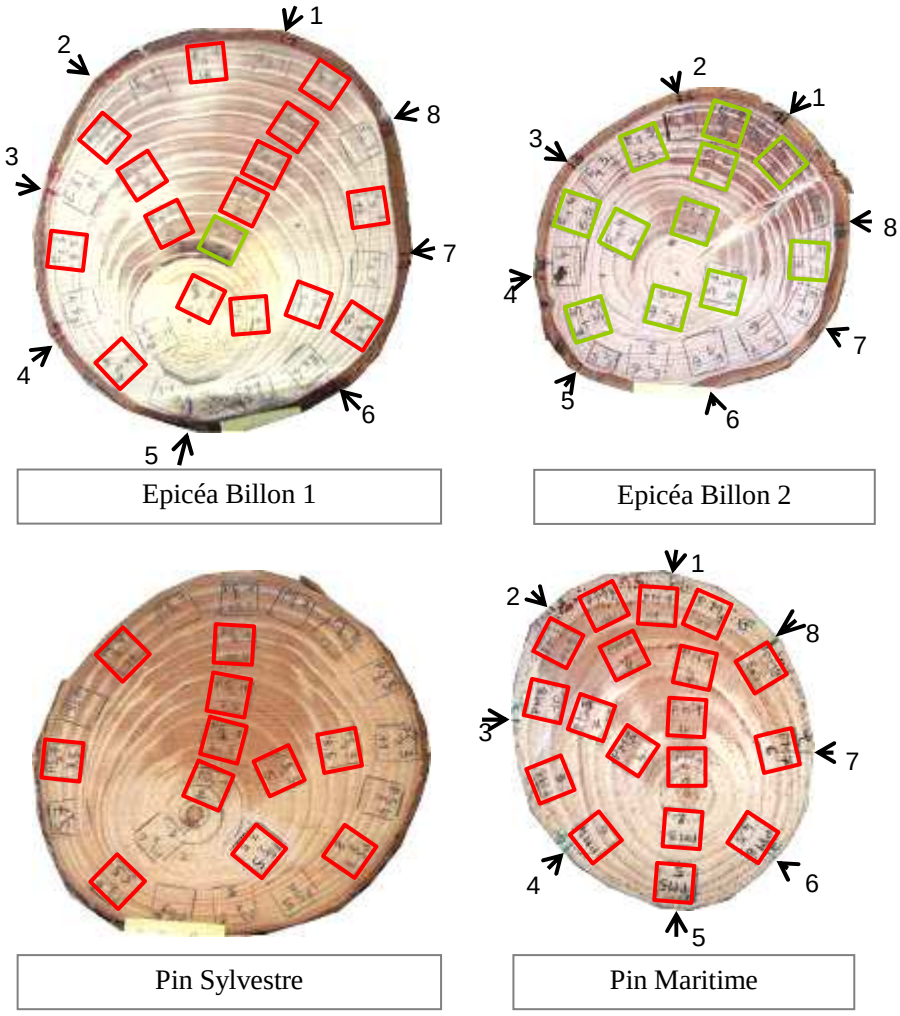


Figure 139: Localisation dans le tronc des carrelets normalisés pour l'étude des propriétés physico-mécaniques [Anne Thibaut, CIRAD]. Encadrés : carrelets repris dans le présent travail. En rouge : données d'angles de microfibrilles existantes [Ruelle 2003], en vert : AMFs non disponibles. Les flèches numérotées désignent les points de mesure des indicateurs de contraintes de croissance sur l'arbre [Gril et al 2003 ; Alméras et al 2005].

Il faut remarquer que cet échantillon ne comprend probablement pas de bois vraiment normal : on a du bois opposé, du bois juvénile, et du bois intermédiaire. On adoptera, pour simplifier, le terme « normal » pour les bois opposés et juvéniles sans bois de compression.

Le matériel initialement prélevé correspondait à des carrelets normalisés pour les essais physico-mécaniques au CIRAD (20*20*360mm, R*T*L). A l'issue de cette première campagne de caractérisation, nous avons préparé, à partir des tronçons restants, des éprouvettes appropriées aux déterminations de module spécifique et d'amortissement par vibrations forcées sans contact. Le schéma de débit est présenté sur la Figure 140.

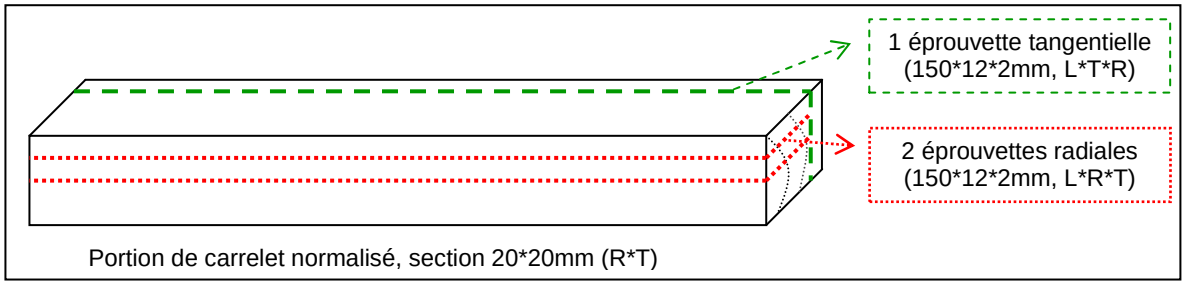


Figure 140: Débit des éprouvettes pour les essais par vibrations forcées à partir des carrelets (n = 56) déjà étudiés.

Compte tenu des grandes largeurs de cernes annuels sur ce matériel, j'ai cherché lors du débit des éprouvettes de section 12*2mm à suivre deux règles de prélèvement : i) les éprouvettes radiales devaient systématiquement comprendre à la fois du bois initial et du bois final (voir p.186) ; ii) lorsque cela était possible, une éprouvette orientée dans le plan LT et ne comprenant qu'un type de bois était aussi débitée.

L'échantillon comprend 56 carrelets – localisations dans les billons, soit après débit 166 « lamelles » dont 112 radiales et 54 tangentielles.

IV.a.2.2. **Données issues de caractérisations antérieures**

Les premières mesures effectuées sur cet échantillon ont été, sur les arbres sur pied, celles des indicateurs de contraintes de croissance[38] (ICC), d'après la méthode du trou unique (cf. [Thibaut & Gril 2003 ; Gril et al 2003 ; Alméras et al 2005] pour la méthode et l'analyse des résultats). Ces mesures avaient été effectuées sur une couronne de 8 points de mesures, ces derniers étant repérés sur la Figure 139. Les billons avaient été prélevés juste au dessous ou juste au dessus de ces couronnes.

Ensuite, à partir des plans de prélèvement illustrés sur la Figure 139, avaient été préparés des carrelets de dimensions normalisées pour les essais physico-mécaniques au CIRAD [sous la responsabilité d'Anne Thibaut]. Ces essais avaient été menés d'abord à l'état vert, puis « sec à l'air » stabilisé. Pour ces deux états, les propriétés étudiées étaient : densité ; module spécifique dynamique ; dureté T et R ; résistance en compression ; ainsi que, après séchage total, les retraits totaux R, T, L, et le point de saturation des fibres.

En parallèle, des caractérisations d'anatomie quantitative, et d'angles de microfibrilles moyens (caractérisés en microscopie optique ; l'avantage de cette méthode est qu'il s'agit d'observations directes), avaient été effectuées sur du matériel immédiatement jumelé en direction axiale [Ruelle 2003].

Dans le cadre de notre travail, l'intérêt scientifique de ce matériel d'étude relève de questionnements sur les déterminants –notamment AMFs- des propriétés du bois « sec », en tant que matériau technologique, et notre approche n'est pas directement biomécanique. A titre informatif, on peut trouver en annexe les variations périphériques des indicateurs de contraintes de croissance qui avaient été relevées au niveau des billons dont provient le matériel d'étude. Les valeurs moyennes d'angles de microfibrilles par essence et type de bois sont présentées sur le Tableau 24.

Tableau 24: Comparaison des valeurs moyennes d'angles de microfibrilles entre échantillons caractéristiques de bois de compression et de bois « normal » sur les 3 arbres : travail de [Ruelle 2003].

	Moyenne BC	Moyenne BN	$\frac{(moyenneC - moyenneN)}{moyenneN}$
Picea abies	31,4	20,2	55,8%
Pinus sylvestris	34,2	23,0	48,8%
Pinus pinaster	44,7	22,48	98,8%
Valeur de la probabilité du test statistique	0,0025		

[Ruelle 2003] relève que les AMFs des échantillons les plus représentatifs des bois de compression sont entre une fois et demie et deux fois plus importants que ceux des bois "normaux" (bois opposé), et que la différence est la plus forte (x2 par rapport à l'Epicéa et au Pin Sylvestre) pour le Pin Maritime (*Pinus pinaster*).

[38] Les ICC correspondent aux déformations longitudinales micrométriques relevées en périphérie de l'arbre lorsque les contraintes résiduelles de maturation sont relâchées par une découpe des zones externes du xylème. Ces ICC donnent une indication du niveau de précontrainte du bois, et sont relevés tout autour du tronc.

Pour l'ensemble des échantillons des deux Pins, et ceux du billon 1 d'Epicéa de la Figure 139, les relations qui étaient relevées entre les angles moyens de microfibrilles et les modules spécifiques ou retraits longitudinaux totaux, sont présentées sur la Figure 141.

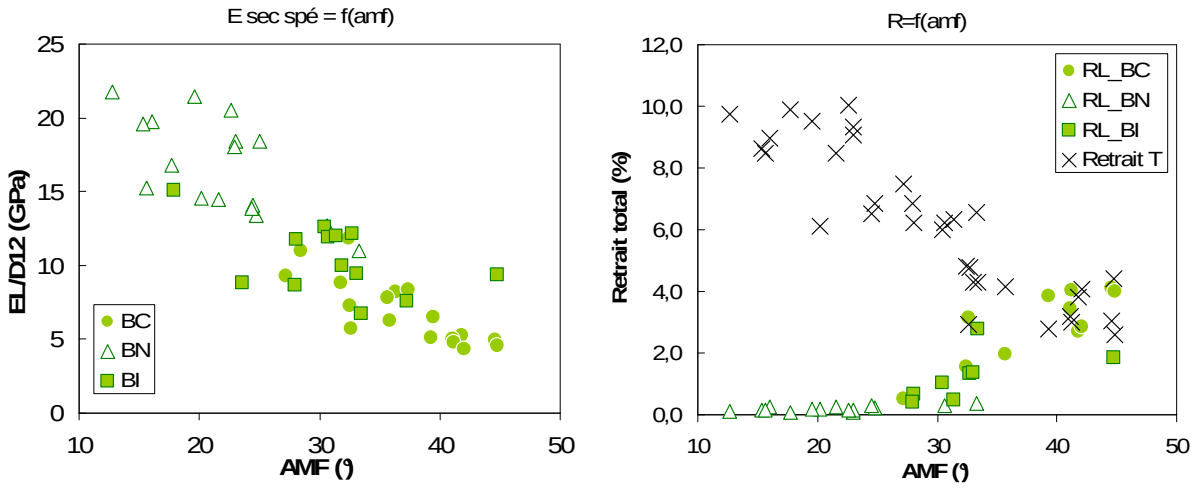


Figure 141: Données antérieures obtenues sur l'échantillon étudié par Anne Thibaut et Julien Ruelle: relation entre angle des microfibrilles et module d'élasticité spécifique "sec à l'air" (à gauche), et retrait total longitudinal (à droite). BC : bois de compression ; BN : bois « normal » ; BI : Bois intermédiaire.

Les résultats alors obtenus sur cet échantillon étaient cohérents avec les données expérimentales, ainsi qu'avec les simulations d'après un modèle de fibre unique, présentées par [Yamamoto et al 2001 ; Gril & Yamamoto 2004].

IV.a.2.3. **Caractérisations effectuées dans la présente étude**

Le protocole suivi au cours de ce travail pour l'étude de ce matériel a été le même que pour toute notre étude (voir p. 48). A partir de ce matériel disponible, et des jeux de données qui lui sont associées, les données supplémentaires obtenues au cours de notre étude concernent : module d'élasticité spécifique dynamique E'/ρ ; coefficient d'amortissement $tan\delta$; ainsi que teneur en eau, gonflement partiel, colorimétrie, sur des pièces de bois petites en épaisseur, et dans des conditions de stabilisation en adsorption (au lieu de désorption à partir du bois vert pour les caractérisations antérieures présentées ci-dessus).

IV.a.3. **Résultats et discussion**

IV.a.3.1. **Vérifications méthodologiques**

Le matériel ici étudié diffère de façon très significative des autres bois étudiés dans notre travail : i) du point de vue des propriétés on atteint les valeurs les plus élevées de coefficients d'amortissement (en valeurs brutes) ; ii) du point de vue de la structure macroscopique, les largueurs de cernes annuels sont beaucoup plus importantes que pour les autres bois, voire proche des dimensions des éprouvettes employées. Sur ce dernier point, j'ai cherché lors du débit radial à toujours inclure à la fois bois initial et bois final, même si l'évolution intra cerne est moins drastique pour les bois de compression que pour les bois « normaux ». Avant d'analyser les résultats sur ce matériel, il semble important d'effectuer quelques vérifications quant à la représentativité des mesures vibratoires effectuées sur cet échantillon « atypique ».

a Densité et module spécifique « secs à l'air » : comparaison des valeurs obtenues sur différentes dimensions et selon différents protocoles de stabilisation

Les résultats de nos mesures de module spécifique dynamique et de densité sur éprouvettes de section 12*2mm stabilisées en adsorption sont comparées sur la Figure 142 à celles obtenues précédemment sur des éprouvettes de section 20*20mm stabilisées en désorption.

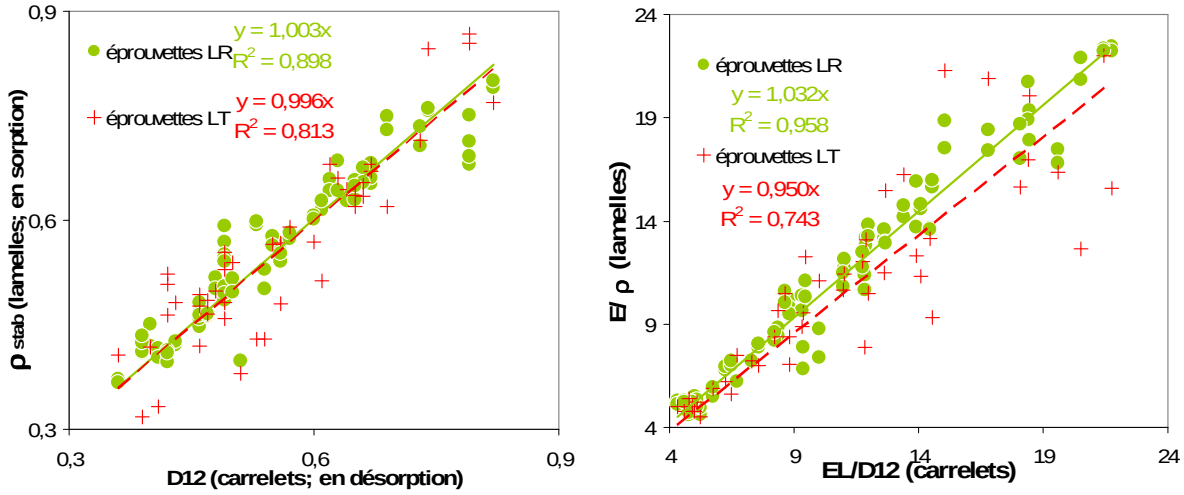


Figure 142: Comparaison des valeurs de densité, et de module spécifique, mesurées sur éprouvettes de petite épaisseur stabilisées en adsorption, et mesurées sur carrelets normalisés en désorption. Une mesure sur carrelet (en abscisse) est associée à trois mesures sur lamelles qui en ont été débitées (en ordonnées ; ronds : éprouvettes radiales ; croix : éprouvettes tangentielles).

Les valeurs de densité stabilisée à 20°C et 65%HR, comme celles de module spécifique dynamique, sont comparables entre les mesures sur petites éprouvettes stabilisées en adsorption, et celles sur carrelets stabilisés en désorption. Comme on pouvait raisonnablement s'y attendre, les variations entre deux éprouvettes radiales jumelées (en direction tangentielle) sont faibles (coefficient de variation de 2% en moyenne pour la densité, de 4% en moyenne pour le module spécifique). De façon aussi prévisible, les valeurs obtenues sur des éprouvettes en plan tangentiel, et d'épaisseur (2mm en R) petite devant les largeurs de cernes, présentent une dispersion beaucoup plus élevée par rapport aux mesures sur carrelets de 20mm d'épaisseur. Pour les mises en relation de nos mesures avec les angles de microfibrilles précédemment déterminés, on ne prendra en compte pour chaque localisation que les éprouvettes radiales. En revanche, pour l'analyse des relations entre propriétés, lorsque ces éprouvettes tangentielles contiennent effectivement un seul type de bois (initial ou final), cela permettra d'étendre un peu la gamme d'analyse. Par contre, il fallait éliminer celles présentant deux « couches » dans l'épaisseur, à cause d'éventuels effets de structure (comportement de type « bilame »). Pour cela, l'on s'est basé sur les mesures de couleur : une éprouvette a été considérée comme homogène dans l'épaisseur si la différence de clarté entre ses deux faces était inférieure à la variation maximum entre 3 points de mesure sur une face (plus un examen visuel de vérification).

b Comparaison des méthodes de mesure d'amortissement pour des gammes de comportements contrastés

Les valeurs absolues de coefficients d'amortissement des bois de compression sont parmi les plus élevées sur toutes les mesures effectuées dans ce travail. A priori, la précision des mesures est moins bonne pour les matériaux plus amortissants, notamment pour ce qui est de la méthode du décrément logarithmique ; pour la méthode du « facteur de qualité » (Q^{-1})

par largeur de bande à demi-puissance, la résolution devrait au contraire être un peu meilleure (voir §II.b.2.3.d).

Les valeurs mesurées selon ces deux méthodes (3 répétitions chacune pour les 166 éprouvettes de l'échantillon) sont comparées sur la Figure 143, en dissociant deux classes d'amortissement (7-13‰ et 13-19‰), afin de vérifier si on peut considérer que les mesures seront effectivement représentatives, et non biaisées par le type de matériau étudié. Les rapports entre les deux paramètres Q^{-1} et $tan\delta$ sont très proches de l'unité, ceci pour les deux gammes d'amortissement, et la dispersion n'est pas plus élevée pour les bois très amortissants (voire au contraire). On peut donc exploiter indifféremment l'un ou l'autre paramètre, et surtout comparer les différents types de bois avec une incertitude très restreinte quant aux artefacts expérimentaux.

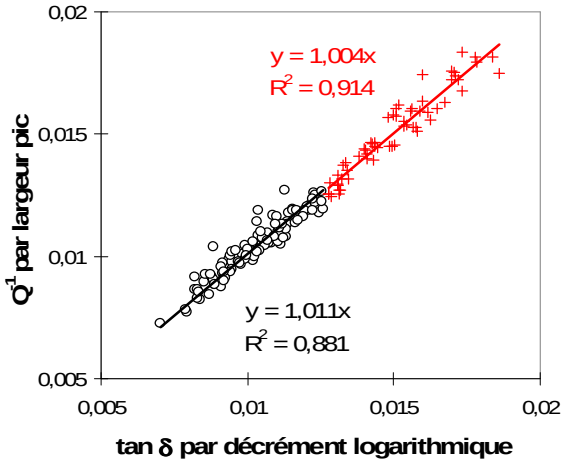


Figure 143: Comparaison des mesures d'amortissement selon la méthode du décrément logarithmique, et celle de largeur de bande à demi puissance, pour deux classes d'amortissement. (moyennes de 3 répétitions pour chaque paramètre)

IV.a.3.2. **Marqueurs physiques macroscopiques**

Les différences de densité (indicateur d'épaisseur de parois), de retraits (indicateurs d'angles de microfibrilles) et de couleur, sont des marqueurs classiques des bois de compression. L' évolution de ces marqueurs entre bois « normal », bois intermédiaire et bois de compression est présentée sur la Figure 144. L'amplitude des différences de densité et de gonflement axial est présentée dans le Tableau 25.

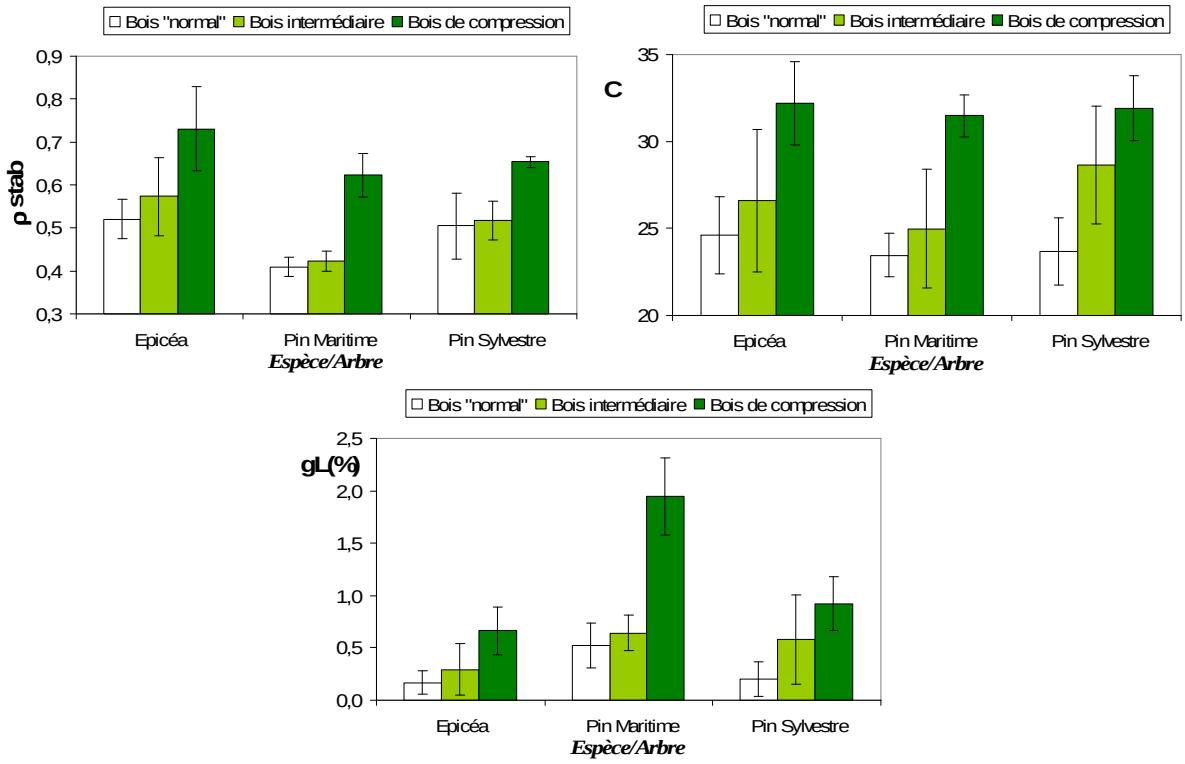


Figure 144: Densité "sec à l'air", Chromaticité C et gonflement partiel longitudinal gL, pour les bois normaux, intermédiaires et de compression des trois espèces.

Tableau 25: Valeurs moyennes de densité et gonflement axial, et amplitudes des différences entre bois de compression et bois normal.

		Densité ρ_{stab}			Gonflement partiel gL (%)		
		BC	BN	(BC-BN)/BN	BC	BN	(BC-BN)/BN
Epicéa	m.	0,73	0,52	+40%	0,67	0,17	+301%
	é.t.	*0,10*	*0,05*		0,23	0,11	
Pin Maritime	m.	0,62	0,41	+52%	1,95	0,52	+272%
	é.t.	*0,05*	*0,02*		0,37	0,21	
Pin Sylvestre	m.	0,65	0,50	+30%	0,93	0,21	+347%
	é.t.	*0,01*	*0,08*		0,25	0,16	

La densité des bois de compression est en moyenne supérieure de 30 à 50% à celle des bois normaux. La plus grande différence est observée pour le Pin Maritime qui a aussi la densité de bois « normal » la plus faible (arbre jeune comprenant certainement surtout du bois juvénile).

Parmi les paramètres colorimétriques, c'est la chromaticité C qui est la plus discriminante entre bois de compression et bois normaux (valeurs supérieures d'un tiers dans les bois de compression). La clarté diminue de -7% à -9% entre bois normaux et de compression, et l'angle de teinte diminue de -16% à -20%.

Le gonflement axial (entre l'état quasi-anhydre et l'état stabilisé à 20°C et 65%HR) du bois « normal » est plus élevé pour le Pin Maritime (arbre le plus jeune de l'échantillon). Les retraits axiaux des bois de compression sont en moyenne 3 fois plus élevés que ceux des bois « normaux » (on peut se rappeler que ces gonflements partiels ne sont pas directement reliables aux retraits ou gonflements totaux).

Ces différentes observations correspondent bien aux différences physiques connues pour les bois de compression. A titre comparatif, les valeurs de gonflement partiel pour les bois d'If et de Buis des chapitres précédents, dont on se demandait s'il pourrait s'agir de bois de compression « léger » non repéré, sont inférieures à 0,5% pour le Buis, et de l'ordre de 0,5-0,7% en moyenne pour l'If étudié, soit entre les bois normaux ci-dessus, et le bois de compression d'Epicéa.

Après ces premières observations physiques, on va s'intéresser surtout aux propriétés vibratoires et à leurs liens aux angles de microfibrilles.

IV.a.3.3. **Relations entre angles des microfibrilles, module spécifique et coefficient d'amortissement**

On peut observer ces relations sur l'ensemble des types de bois, en posant l'hypothèse que seuls les angles de microfibrilles ont une influence. En parallèle on peut les dissocier selon les types de bois (« normal » ou juvénile ; de compression), compte tenu des variations de structure cellulaire et de composition chimique primaire qui sont corrélées à celles d'AMFs dans les bois de compression.

a Tous types de bois confondus

Les relations entre module spécifique dynamique et coefficient d'amortissement (moyennes par localisation initiale jumelée au matériel de détermination des AMFs), et les valeurs d'AMFs mesurées par [Ruelle 2003], sont présentées sur la Figure 145.

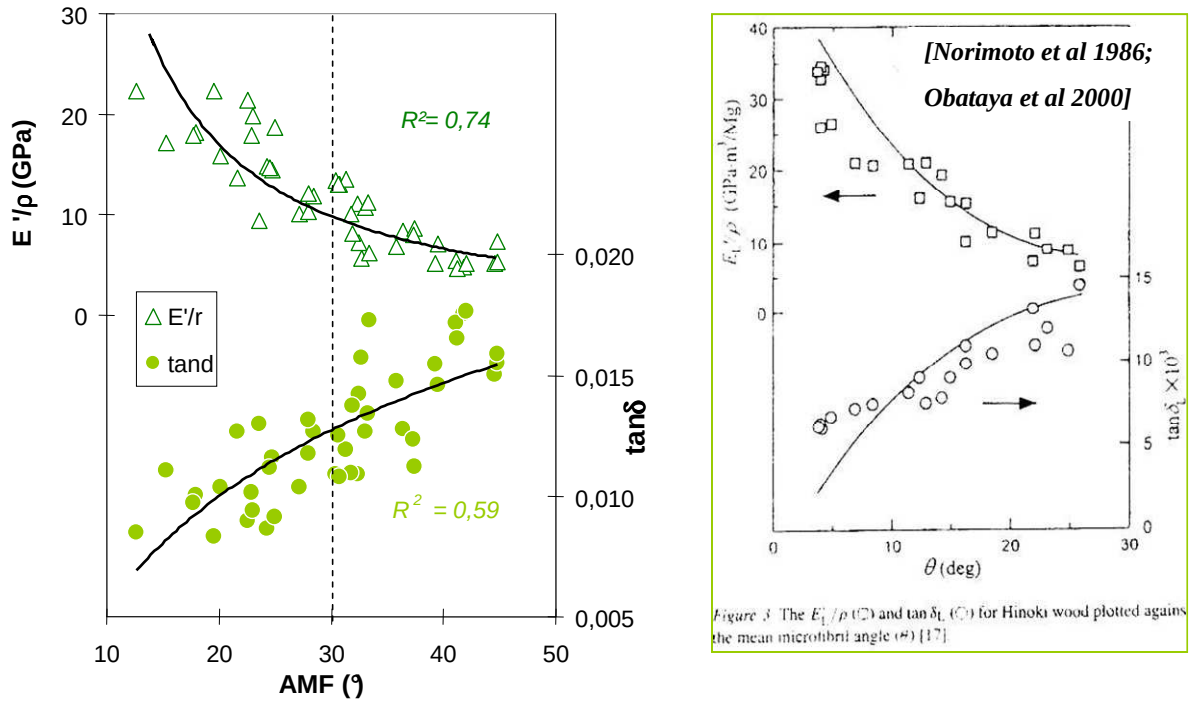


Figure 145: Relation entre angle moyen des microfibrilles, et module d'élasticité spécifique *E'/ρ*, et coefficient d'amortissement *tanδ*, bois "normaux" et bois de compression confondus (à gauche). A droite : résultats de [Norimoto et al 1986 ; repris dans Obataya et al 2000] sur bois de Hinoki avec des AMFs de ≈5-25°.

Sur cette plage de ≈10° à 45° d'angles moyens de microfibrilles, on retrouve bien une relation qualitativement comparable à celle obtenue par [Norimoto et al 1986] sur du Hinoki (*Cryptomeria japonica*), pour des angles maximum moins élevés (≈5° à 25° ; voir Figure 145 droite d'après [Obataya et al 2000]). On peut néanmoins remarquer que : i) la dispersion observée dans la relation tanδ – AMF que nous obtenons reste non négligeable, et nettement supérieure à celle relevée pour E'/ρ ; ii) quoique la gamme d'AMF ici considérée soit nettement plus étendue vers des valeurs élevées (maximum ≈45° versus ≈25° pour les données sur le Hinoki), les valeurs absolues maximales de tanδ ne sont pas beaucoup plus élevées (≈18‰ versus ≈15‰).

En gardant en mémoire que l'angle des microfibrilles n'est que l'un des marqueurs du bois de compression, il semble utile de ré observer ces relations en dissociant les différents types de bois.

b Bois normal, bois intermédiaire, bois de compression

Sur la Figure 146, les relations observées ci-dessus entre propriétés vibratoires et angles moyens de microfibrilles sont représentées en prenant en compte les bois « normaux », intermédiaires, et de compression, pour les trois espèces confondues.

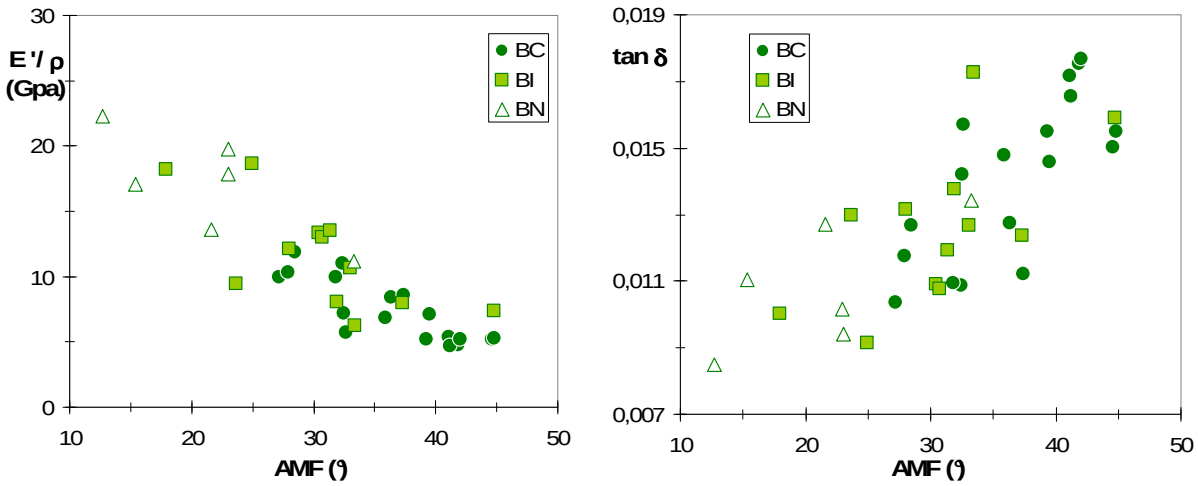


Figure 146: Relations entre angle moyen des microfibrilles, et module d'élasticité spécifique (à gauche), et coefficient d'amortissement (à droite) ; propriétés=moyennes de deux éprouvettes radiales par localisation (codes : voir Figure 141).

A première vue, les bois « normaux » et de compression sont surtout différenciés par leurs gammes respectives d'angles de microfibrilles, et sur ces gammes les dispersions de leurs propriétés mécaniques semblent comparables. Les écarts maximums de propriétés vibratoires entre échantillons ayant des AMFs similaires sont plus élevés pour E'/ρ (variations d'un facteur >2) que pour tanδ (écart maximum relatif ≈1,5). A titre de vérification/comparaison, on peut observer les relations « macroscopiques » entre tanδ et E'/ρ pour ces bois.

IV.a.3.4. **Relation entre module spécifique et amortissement**

Dans un premier temps, on prend en compte les valeurs moyennes par localisation, telles que sur les relations aux AMFs ci-dessus. Puis la gamme peut être légèrement étendue en prenant en compte les variations supplémentaires entre pièces de bois de petite dimension, éprouvettes en plan LT comprises (cf. §IV.a.3.1.a).

a Moyennes par localisation

Les relations entre coefficient d'amortissement et module spécifique, pour les bois de compression, bois intermédiaire et bois « normal », sont présentées sur la Figure 147.

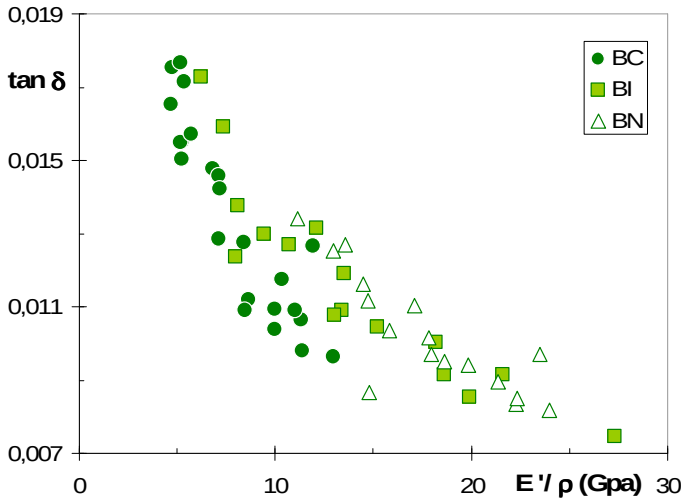


Figure 147: Relations entre tanδ et E'/ρ pour les différents types de bois (codes : voir Figure 141) (moyenne de deux éprouvettes radiales par localisation).

On retrouve bien une allure globale comparable au cas standard, mais les bois « normaux » et les bois de compression ne sont manifestement pas dans la continuité d'une même tendance. Les bois « intermédiaires » dans l'arbre le sont aussi dans ces relations. On peut étendre la gamme de variations en les observant à l'échelle de petites pièces de bois individuelles.

b A l'échelle de pièces de bois de petites dimensions

A ce niveau, on a aussi dissocié les trois espèces. Les valeurs de propriétés vibratoires pour leurs bois « normaux » et de compression sont présentées sur la Figure 148.

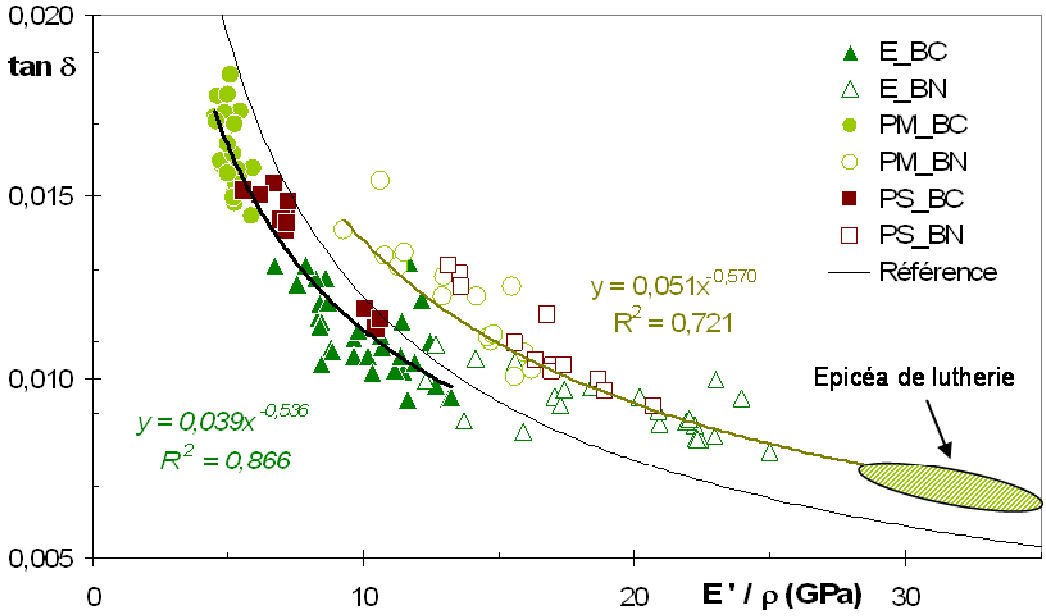


Figure 148: Relations entre module spécifique dynamique et coefficient d'amortissement, pour les bois "normaux/juvéniles" et les bois de compression d'Epicéa (=E) et de Pins (Maritime = PM ; Sylvestre = PS).

Les bois « normaux » des trois espèces suivent une tendance comparable, qui rejoint, si on la prolonge, les valeurs « Epicéa de lutherie » de la littérature [Haines 2000 ; Yano et al 1997], ou de nos quelques données expérimentales. Vers les faibles valeurs de module spécifique, on retrouve le bois juvénile de Pin Maritime bien aligné avec cette tendance « bois normaux », supérieure à celle de référence. Tandis que pour cette même gamme de E'/ρ, les bois de compression présentent des coefficients d'amortissement plus faibles. Les bois de compression des trois essences suivent aussi une tendance commune, un peu décalée vers le bas par rapport à celle de référence. Les valeurs moyennes et écart-types des écarts entre mesures d'amortissement et tendance de référence, des trois types de bois pour les trois espèces, sont présentés sur la Figure 149.

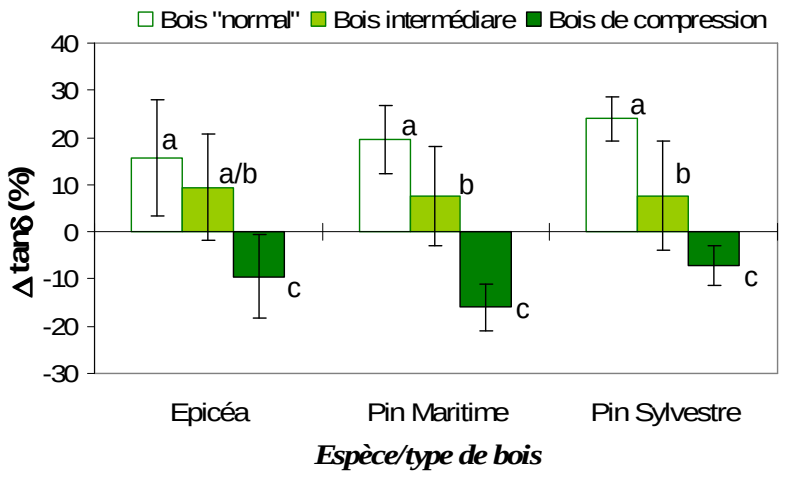


Figure 149: Comparaison des écarts d'amortissement à la référence pour: les trois arbres/espèces, et pour les bois "normaux", intermédiaires, et de compression; a, b, c: groupes non différents au seuil de 5%.

Comme on l'a déjà observé, les bois "normaux" (ici en fait bois juvéniles et "bois opposé") présentent des coefficients d'amortissement nettement supérieurs à la tendance de référence. Ils ne sont ici pas statistiquement différents entre espèces. Les écarts d'amortissement diminuent progressivement entre le bois « normal », le bois intermédiaire, et le bois de compression. On n'observe pas de différence significative (au seuil de 5%) entre les bois de compression des trois espèces/arbres, qui présentent des coefficients d'amortissement inférieurs à la tendance d'environs -7% à -17% en moyennes. Ces valeurs négatives sont significatives ; elles restent cependant relativement modérées par rapport à ce qui était relevé pour les bois tropicaux à contenu important en métabolites secondaires (jusqu'à ≈-55%). Il faut évidemment considérer aussi que cet indicateur « statistique » est « à module spécifique donné ».

La comparaison des valeurs moyennes « brutes » de module spécifique et d'amortissement, et les différences moyennes entre bois de compression et bois « normal », sont résumées sur le Tableau 24.

Tableau 26: Comparaison des valeurs moyennes de module spécifique dynamique, et de coefficient d'amortissement, entre bois de compression (BC) et bois normal (BN) des trois espèces.

		E'/ρ (GPa)			tanδ (‰)		
		BC	BN	(BC-BN)/BN	BC	BN	(BC-BN)/BN
Epicéa	m.	10,08	19,32	-48%	11,19	9,20	+22%
	é.t.	*1,79*	*3,85*		*1,11*	*0,79*	
Pin Maritime	m.	5,14	13,41	-62%	16,29	12,23	+33%
	é.t.	*0,37*	*2,22*		*1,08*	*1,53*	
Pin Sylvestre	m.	7,70	16,57	-53%	13,88	10,95	+27%
	é.t.	*1,685*	*2,311*		*1,43*	*1,31*	

Le module d'élasticité spécifique est environs deux fois plus faible pour les bois de compression que pour les bois « normaux ». Les amplitudes de ces différences pour les trois espèces correspondent aux observations de [Ruelle 2003] concernant les AMFs : la plus grande différence entre bois de compression et bois normal est relevée pour le Pin Maritime.

Pour ce qui est des coefficients d'amortissements, les différences entre ces deux types de bois sont nettement plus modérées : de 22 à 33% en moyennes (soit près de deux fois moins marquées que pour les modules spécifiques); ici aussi la plus grande amplitude est relevée pour le Pin Maritime.

IV.a.3.5. **Effets contrastés du bois de compression sur les modules spécifiques et sur les coefficients d'amortissement.**

Cette observation que l'impact de la présence de bois de compression soit plus marqué pour les modules d'élasticité spécifiques que pour les coefficients d'amortissement, ces derniers apparaissant alors proportionnellement modérés, semble assez paradoxale (d'autant plus pour des bois comportant un plus fort taux de lignine et moins de cellulose cristalline...).

On peut l'envisager sous deux aspects (il s'agit de simples hypothèses):

i) d'une part, on pourrait spéculer sur un lien avec la composition chimique autre que la seule notion globale « lignines » et « hémicelluloses » : peut être leurs compositions particulières en monomères, et leur structure macromoléculaire, dans le cas précis de bois de compression, rendraient moins « visqueuse » l'ensemble de la matrice.

ii) d'autre part, vis-à-vis des déviations aux « standards » des bois à forts taux d'extraits, on s'était posé la question de la représentativité des modules spécifiques apparents par rapport à ceux des composés des parois admis comme structurels (i.e. contribution des extraits à la densité). Dans le cas présent, on ne peux pas totalement ignorer un effet probable de différences de la densité de la matière ligneuse (les lignines sont à priori moins denses que la cellulose, surtout cristalline). Cependant, les ordres de grandeurs de ces différences de densité de la matière ligneuse relevées dans la littérature (1,427 pour le bois de compression versus 1,474 pour le bois normal d'après [Timell 1982]) ne sont pas suffisants pour expliquer les écarts assez importants observés ci-dessus.

En revanche, il semble que l'on puisse raisonnablement se poser la question des effets des caractéristiques microstructurales –autres que les AMFs élevés- des bois de compression (cf. [Yoshizawa et al 1982 ; Keller 1994 ; Barnett & Jeronimidis 2003] et Figure 150 concernant ces caractéristiques dans un cas sévère) sur le module d'élasticité spécifique apparent.

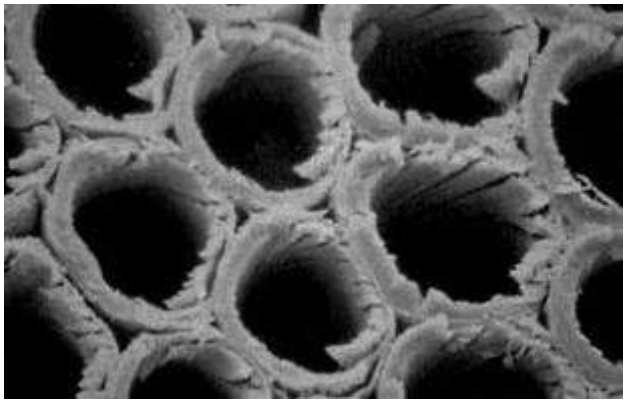


Figure 150: Bois de compression sévère chez *Pinus radiata*. La sous-couche S3 est absente et la sous-couche S2 présente d'importantes fissures sur bois sec. [Barnett & Jeronimidis 2003].

D'une part, la plus grande épaisseur de paroi de ces bois fait que les représentations de type « double paroi » ne sont plus strictement applicables [Gril & Yamamoto 2004]. De plus, les différentes « perturbations » de la structure jouent certainement un rôle, à priori de diminution, sur les modules « macroscopiques ». On peut se demander notamment quels seraient les effets respectifs des fentes hélicoïdales souvent rencontrées dans la sous couche S2 modifiée des bois de compression ; ou bien des méats intercellulaires faisant que les cellules ne sont que partiellement jointives. Par ailleurs, l'absence de la couche S3 est une caractéristique courante des bois de compression. Si, dans du bois normal, son influence sur les propriétés en direction longitudinale est petite devant celle de la couche S2, son absence pourrait avoir des conséquences sur ces propriétés, la couche S2 n'étant plus restreinte par ce « renfort latéral » du côté des lumens.

En tout état de cause, il semblerait que ces différents niveaux de perturbation de la structure se répercutent de façon plus marquée sur le module d'élasticité spécifique

macroscopique, tandis que le coefficient d'amortissement serait moins sensible à ces aspects structurels.

IV.a.3.6. **Comparaison globale des bois de compression et des bois normaux**

Les différences entre les moyennes par type de bois des propriétés physico-mécaniques, colorimétriques, et des angles moyens de microfibrilles sont résumées sur la Figure 151. En parallèle, on pourra trouver en annexe les matrices de corrélation entre ces paramètres, et avec la distance à la moëlle, pour l'ensemble des bois, ainsi que séparément pour les bois « normaux » et les bois de compression.

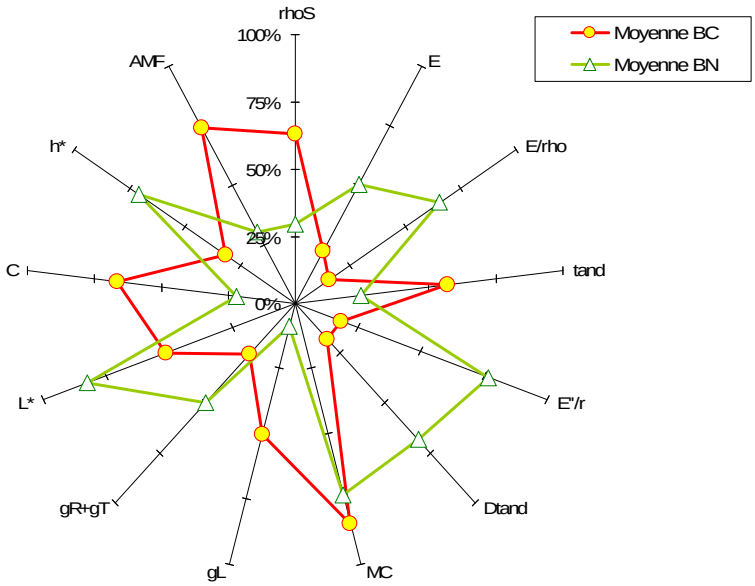


Figure 151: Bois "normaux" et bois de compression: comparaison des valeurs moyennes normalisées pour les propriétés physiques, mécaniques, colorimétriques, et les angles de microfibrilles.

On retrouve les marqueurs classiques des bois de compression : densité, AMF, retrait axial, chromaticité plus élevée et bois plus « rouge » ; module d'élasticité, module spécifique, retraits transverses et clarté plus faibles, que pour les « bois normaux ». La teneur en eau est peu différente entre ces deux types de bois (écart de 0,4% absolu en moyenne). Comme on l'a remarqué plus haut, l'amplitude des différences d'amortissement est plus faible que celles de module spécifique. Par suite, parmi les plus grandes amplitudes de différences, on trouve le module de perte spécifique E''/ρ, et l'écart « statistique » d'amortissement à la référence.

La densité augmente avec la distance à la moëlle, ce aussi bien de façon globale, que pour les bois « normaux » ou de compression pris de façon isolée. Le module spécifique augmente aussi avec la distance à la moëlle pour les bois normaux, mais pas pour les bois de compression. Il pourrait être intéressant –sur des arbres plus âgés- de se pencher plus sur les éventuelles différences de propriétés physico-mécaniques entre bois de compression juvénile, et bois de compression adulte. Notamment dans la mesure où il semble qu'ils puissent présenter des différences significatives de morphologie des trachéides, d'AMFs, de cristallinité... [Yeh et al 2006].

La couleur est très liée aux propriétés physico-mécaniques sur l'ensemble des bois, ce qui est logique puisqu'elle correspond à un « marqueur » des bois de compression. A l'intérieur des types de bois, pour les « bois normaux » elle reste bien liée avec les écarts d'amortissement (+ avec la clarté et l'angle de teinte, - avec la chromaticité), mais pour les bois de compression on garde surtout des liens à la clarté (+ avec le module d'élasticité spécifique).

IV.a.4. **Bilan provisoire**

Le travail exploratoire qui a été présenté dans ce chapitre a permis d'ajouter de nouveaux paramètres à un jeu de données déjà important qui existait sur le matériel d'étude. Notamment, il semble que les données de coefficients d'amortissement incluant des bois de compression soient assez nouvelles, dans la mesure où la grande majorité des études concernant ce paramètre ne s'étaient pas penchées sur ce type de bois.

En ce qui concerne les paramètres physiques (densité, retraits/gonflements, couleur), les données ici obtenues sont cohérentes avec ce qui est connu pour des bois « normaux » (opposés ou juvéniles) et de compression.

En revanche, la prise en compte simultanée du module d'élasticité spécifique, et du coefficient d'amortissement, en lien avec les variations d'angles de microfibrilles, laisse envisager un comportement vibratoire a priori atypique des bois de compression. On peut en retenir les quelques observations et pistes de réflexion suivantes :

- De façon qualitative, on retrouve bien des évolutions cohérentes avec la littérature : diminution du module d'élasticité spécifique, et augmentation du coefficient d'amortissement, avec l'augmentation des angles de microfibrilles moyens.
- Cependant, les relations entre coefficients d'amortissement et modules spécifiques font ressortir qu'à l'effet des AMFs proprement dit, se superpose un effet 'bois de compression' en tant que tel. Ces bois présentent, à module spécifique donné, des coefficients d'amortissement plus faibles. L'amplitude de ces différences d'amortissement intrinsèque reste toutefois modérée devant celles qui avaient été observées pour des bois tropicaux à forts taux d'extraits.
- On ne peut pour le moment que formuler des hypothèses quant à l'effet 'bois de compression' sur les relations amortissement-module spécifique : i) influence des variations dans la composition chimique primaire (même si le sens des différences observées semble à première vue paradoxal de ce point de vue) ? Ou bien de la composition secondaire sous-estimée ? ii) Effet de diminution des modules spécifiques apparents par la superposition des caractéristiques structurelles autres qu'AMFs des bois de compression (épaisseur des parois, fissurations, absence de S3) ? Dans ce cas, ceci conforterait une hypothèse de plus grande indépendance de l'amortissement, que de la rigidité, vis-à-vis des échelles de structure supérieures aux AMFs.
- Dans le futur, la confrontation de ces données expérimentales avec des modélisations micromécaniques adaptées aux épaisseurs de parois considérées, et aux différents niveaux de complexité structurale de ces bois de compression, pourrait être très intéressante et éclairante.
- On peut aussi envisager que ces données de coefficients d'amortissement puissent apporter de nouvelles informations dans une optique biomécanique ; cela demanderait d'étendre les types d'essais effectués (ici sur bois sec) à des mesures sur bois vert.

Enfin, ces résultats suggèrent aussi qu'il faille rester prudent dans les extrapolations entre mesures physico-mécaniques macroscopiques, et estimation des déterminants microstructuraux et chimiques potentiels, lorsque des types de bois très contrastés sont comparés. Dans cette optique, pour confirmer les effets importants de diminution d'amortissement –à module spécifique donné- qu'on a précédemment observés pour les duramens de bois tropicaux à forts taux d'extraits, il semble qu'il soit utile de faire varier ces teneurs en extraits tout en restant sur le même matériel en terme de composition chimique primaire et de microstructure.

IV.b. Effet des extractibles et prise en compte du contre-fil : bois d'espèces de Pterocarpus (Leguminosae, Papilionaceae) Africaines.

Les résultats qui ont été présentés dans la partie sur la variabilité interspécifique des propriétés vibratoires confirmaient que de nombreux bois tropicaux à forts taux d'extraits – dont une forte proportion de Leguminosae dans notre travail- peuvent présenter des coefficients d'amortissement « anormalement » faibles. Il apparaissait que les effets de ces métabolites secondaires se superposaient à ceux plus connus des variations d'orientation des éléments du bois. Il ressortait aussi que ces effets semblaient dépendre des espèces. Cependant, nous ne disposions pas de données quantitatives obtenues sur les mêmes pièces de bois que pour les caractérisations physico-mécaniques.

Dans le chapitre précédent, la prise en compte de bois normaux, juvéniles et de compression a permis d'aborder les relations entre angles de microfibrilles, module spécifique et amortissement sur une plage expérimentale étendue. Les différences de composition chimique et de structure anatomique allant de pair avec les forts AMFs des bois de compression impliquaient la superposition de ces effets à ceux de l'orientation proprement dite. Ceci suggère aussi qu'il faille s'affranchir au maximum des variations des déterminants primaires pour étudier les effets des composés secondaires.

Dans ce chapitre, on cherche à observer les modifications de propriétés physico-mécaniques et « acoustiques » lorsque les contenus en extractibles varient ; tout en restant le plus possible sur un matériel par ailleurs similaire[39], et en conservant une plage étendue de variation du module d'élasticité macroscopique. Ici, on a choisi d'effectuer les caractérisations sur les mêmes pièces de bois, dans leur état natif puis après qu'elles aient subi différents types d'extraction. Pour ce qui est des variations d'élasticité, on s'appuiera sur des variations locales d'orientation mésoscopique, par débits parallèles axiaux sur des bois contrefilés. Par rapport à ce qui avait été discuté dans la partie précédente, on peut rappeler quelques points importants dans la détermination de la démarche suivie :

i) Les effets des extraits sur les propriétés hygroscopiques et d'amortissement dépendront de leur localisation cellulaire, de leur interaction avec les composants primaires de la matière ligneuse, et de leur nature chimique [Norimoto et al 1992]. L'utilisation de différents systèmes de solvants peut en apporter une première idée [Morgan & Orsler 1969 ; Arévalo-Fuentes 2002].

ii) Dans une optique qui peut être liée à ce dernier point, les effets observés précédemment apparaissaient dépendants des espèces. Il semble que pour avoir une première idée de cet aspect, il soit intéressant de se pencher sur un niveau « élémentaire » de distance phylogénétique. Ici nous avons choisi de rester sur un même genre botanique, et d'appliquer le même protocole d'étude et d'extraction aux bois de coeur de deux de ses espèces. En parallèle, on pourra comparer les propriétés à l'état natif avec une troisième espèce, et des aubiers.

Le choix du genre *Pterocarpus* comme matériel d'étude a été basé sur plusieurs critères. D'une part, bon nombre de ses espèces sont connues –scientifiquement et/ou empiriquement- pour leurs importantes teneurs en extractibles, leur bonne stabilité dimensionnelle, durabilité biologique, usages médicinaux, pouvoir colorant... D'autre part

[39] On doit signaler que notre échantillonnage a eu pour but, dans cette première étape, d'obtenir des groupes aussi identiques que possible, et présentant chacun une large gamme de variation d'orientation. Cet échantillon n'est bien sur pas adapté à l'étude de la variabilité intra-spécifique.

elles sont souvent rencontrées en facture instrumentale à travers le monde ; et certaines données de la littérature, ainsi que nos premiers essais, indiquaient de très faibles valeurs de coefficients d'amortissement. Quelques unes des informations ayant motivé ce choix sont un peu plus décrites ci-dessous.

Deux campagnes expérimentales ont été menées ; une première pour vérifier l'implication des métabolites secondaires dans le comportement physico-mécanique des deux espèces retenues : *Pterocarpus soyauxii* Taub. (Padouk d'Afrique) et *Pterocarpus erinaceus* Poir. (Vèn).

Puis, des extractions par différents solvants ont été effectuées, sur des matériels jumelés, en prenant en compte les variations locales d'orientation obtenues par débit axial en petites dimensions sur des bois contrefilés. Les variations de propriétés physiques, colorimétriques et mécaniques-acoustiques sont mises en relation, et comparées pour les deux essences et les différents solvants.

IV.b.1. Raisons de choix du matériel, description et définitions

IV.b.1.1. Usages en facture, distribution et disponibilité

Le genre *Pterocarpus* est pan – tropical et comporte 20 espèces reconnues, dont 5 en Asie/Malaisie (endémiques), 11 en Afrique et 6 en Amérique Latine (dont 2 présentes sur ces deux derniers continents) ; si l'on considère le centre de spéciation comme la région comptant le plus d'espèces, ce serait alors l'Afrique de l'Ouest [Rojo 1972].

Parmi ces espèces, une importante proportion est utilisée en facture instrumentale, que ce soit à l'échelle locale en facture traditionnelle, et/ou à l'échelle internationale de façon traditionnelle ou plus récente. Ces usages en facture concernent en premier les idiophones et les cordophones, et les espèces Africaines et Asiatiques. Le bois de Santal Rouge (*Pterocarpus santalinus* L. ; Inde et Asie du Sud) est le bois de choix pour les manches et éclisses de Shamisens Japonais [entretiens avec plusieurs luthiers Japonais, traductions K. Motegi et H. Komoda], même si l'implication acoustique des propriétés matérielles pour ces parties n'est pas forcément éclaircie. Cette espèce étant listée dans l'annexe II de la CITES [UNEP-WCMC 2005], un problème d'approvisionnement notable se pose. [Rujinirun et al 2005] proposent des espèces de *Pterocarpus* natives de Thaïlande comme substituts aux espèces de *Dalbergia* et d'*Artocarpus* traditionnellement employées pour le xylophone Ranad. L'importance du genre en facture traditionnelle est particulièrement marquée en Afrique Centrale et de l'Ouest. [Dechamps 1972a & 1973], dans son excellente étude des bois employés dans les tambours à fente et les xylophones d'Afrique Centrale, montrait que la proportion d'emploi d'espèces de *Pterocarpus* augmentait drastiquement lorsque l'instrument avait une fonction prioritairement « acoustique » (i. e. par rapport à des instruments à fonction plus décorative ou cultuelle pour les tambours à fente, ou à des instruments moins « pérennes » comme les xylophones à touches libres). Le choix de *P. soyauxii* Taub. devenait même sensiblement exclusif pour les tambours à fente destinés à la transmission des messages. Additionnellement, [Carrington 1976] remarquait que cette exclusivité de choix n'était plus retrouvée lorsque ces instruments n'assuraient plus une fonction de télécommunications. Le bois de *P. soyauxii* est (était ?) aussi utilisé pour des corps sonores tels que des sonnailles de chiens de chasse au Gabon [Raponda-Walker & Sillans 1961]. *P. erinaceus* Poir. est le bois de choix pour les manches de Kora au Burkina-Faso [Gweltas Simon, communication personnelle]. Il est très apprécié pour les différents types de xylophones de sa zone de répartition phytogéographique (par exemple pour les xylophones Lobi [Branger 1993]).

A l'échelle internationale, le bois de *P. soyauxii* est aujourd'hui largement utilisé pour les percussions à claviers de musiques « occidentales », en parallèle ou en substitution au Palissandre du Honduras (*Dalbergia stevensonii*) qui est l'espèce la plus prisée pour les marimbas d'orchestre [Holz 1996a, b ; Hase 1987]. Il est aussi de plus en plus souvent employé pour les fonds et éclisses de guitares [LMI 2006 ; Maderas Barber 2006]. D'autres *Pterocarpus* sont proposés pour des fonds et éclisses de guitare : le Narra (*P. indicus*), avec certification FSC, par [LMI 2006] ; le Vèn (ou « Palissandre du Sénégal ») est signalé aussi par [Jordan 1987]. En terme de date d'introduction en facture « occidentale », il est délicat de statuer mais il semble bien qu'elle soit nettement plus récente que pour le genre *Dalbergia* par exemple; l'utilisation de « bois de corail » par des archetiers de la deuxième moitié du XVIIIè siècle a pu être relevée dans les archives [Poidevin 2004], mais il est délicat de dire s'il s'agit effectivement du Padouk d'Afrique, dont c'est l'une des dénominations courantes, ou bien d'une autre espèce. Une citation d'emploi décoratif en piano date des années 1830, accompagné par une autre espèce, Asiatique, l'Amboine (ou Narra ou Palissandre de Nouvelle Guinée, *P. indicus*) [Viaux-Locquin 1997].

Dans une vue assez générale, il apparaît que les usages en facture de plusieurs *Pterocarpus* concernent des parties où l'on retrouve souvent des *Dalbergia*. D'après les données que nous avons pu collecter jusqu'ici, il semblerait que les espèces de *Pterocarpus* Africaines soient relativement plus présentes en facture traditionnelle locale que leurs « cousines » Asiatiques et beaucoup plus que les espèces d'Amérique Latine[40]. En dehors de la non - exhaustivité de l'information récoltée, il se pourrait que les espèces de ce genre prennent en Afrique le pas devant celles du genre *Dalbergia* (beaucoup plus utilisé en Asie et en Amérique Latine) et *Platymiscium* (très utilisé en xylophones en Amérique Centrale [Kaptain 1991 ; Salazar Salvatierra 1994]). Il est intéressant de remarquer que ces trois genres sont phylogénétiquement très proches, au point d'avoir été regroupés dans un groupe monophylétique de Légumineuses « Dalbergioidées » [Lavin et al 2001]. En terme de caractéristiques des bois, cette proximité phylogénétique peut s'exprimer aux niveaux anatomique et phytochimique /chémotaxonomique. Pour ce qui est des caractéristiques anatomiques, ce groupe tendrait à présenter des rayons plutôt étroits (1-2 cellules) et courts (moins de 15-20 cellules). Les autres caractères, tels que parenchyme horizontal étagé, parenchyme axial principalement paratrachéal avec la présence occasionnelle de parenchyme apotrachéal diffus, se retrouvent dans bon nombre d'autres Légumineuses non comprises dans ce groupe [Lavin et al 2001].

Dans la partie précédente, on avait aussi pu remarquer que les espèces de ces genres échantillonnées dans notre travail présentaient une assez bonne proximité dans les analyses multivariables basées sur les propriétés physico-mécaniques et acoustiques que nous avons mesurées.

En terme de disponibilité, les trois genres ci-dessus ont au moins une de leurs espèces listée sur les annexes de la CITES [UNEP-WCMC 2005]. Les problèmes d'approvisionnement actuels ou prévisibles à moyen terme pour plusieurs espèces de *Dalbergia* sont bien connus. Le Santal rouge, autrefois largement exporté comme bois de teinture [Cardon 2006] et d'ébénisterie [Viaux-Locquin 1997; Dechamps 1992], est aujourd'hui bien plus difficile à obtenir, comme on l'a signalé. Par contre, la disponibilité du Padouk d'Afrique est relativement bonne, l'espèce étant assez largement distribuée en Afrique Centrale et de l'Ouest (Figure 152). Au Gabon, les exports en grumes (diamètre

[40] 3 des 4 espèces décrites par [Détienne et Jacquet 1983] ont un bois relativement léger et « blancheâtre » ; il semble qu'un *P.sp* et le *P.acapulcensis (ex vernalis, cf* [Rojo 1974]*)* soient eux denses, colorés, et peu hygroscopiques [Wangaard & Granados 1967 ; Hernandez 1989].

minimal d'exploitation 70cm) ont presque doublés entre 1997 et 2000-2003 (120 000m^3) ; au Cameroun, où l'exportation en grûmes est interdite, 6500m^3 de sciages étaient exportés en 2003. L'arbre peut atteindre 50m de haut et 140-200cm de diamètre. D'autres espèces peuvent parfois être commercialisées sous le même nom de Padouk d'Afrique : *P. osun* Craib (Sud-Nigéria et Cameroun) ; *P. tessmannii* Harms (Guinée Equatoriale, Gabon, RD Congo) ; *P. tinctorius* Welw. (RD Congo et Angola). Par ailleurs, la propagation de *P. soyauxii* par semis ou bouture s'avère simple et avec un fort taux de réussite. Cet arbre à croissance relativement rapide, fixateur d'azote et demandeur de lumière pourrait aussi être utile à des fins d'agroforesterie [paragraphe largement résumé de Jansen 2005]. Le bois de *P.erinaceus* (Vèn) semble être moins connu et commercialisé en France. Il n'est pas cité dans la « Nomenclature générale des bois tropicaux » [ATIBT 1975]. L'arbre peut atteindre 12-15m de haut, avec un tronc droit cylindrique, jusqu'à 1m de diamètre. C'est un arbre de savanes, sa distribution s'étendant du Sénégal et du Mali au Cameroun et à la République de Centrafrique [Arbonnier 2004].

Figure 152 : Distribution de *Pterocarpus soyauxii* Taub. [Jansen 2005]

IV.b.1.2. Caractéristiques physico-mécaniques et chimiques et matériel disponible

Du fait des nombreux usages et propriétés des bois de *Pterocarpus*, l'on dispose d'une quantité raisonnable d'information, particulièrement sur le Padouk, en ce qui concerne les propriétés physico-mécaniques (a) et la composition en métabolites secondaires (b).

Pour ce qui est des propriétés « acoustiques », en plus des observations d'usages en facture notées ci-dessus, les données de [Chaigne & Doutaut 1997 ; Harjono & Dunlop 1998 ; Haines 2000 ; Rujinirun et al 2005] montrent aussi le caractère faiblement amortissant du bois de plusieurs espèces de ce genre (respectivement *P. soyauxii*, *P. indicus*, *P. dalbergioides* et *P. spp.* originaires de Thaïlande). [Yano 1994] évoque, sans plus de précisions dans cet article, un effet « anti-amortissant » des composés du bois de cœur de *P. santalinus*. Cependant, l'influence des composés secondaires sur les propriétés vibratoires des espèces de *Pterocarpus* échantillonnées n'a jusqu'ici pas été étudiée.

a Localisation inter-propriétés dans la base de données du CIRAD

Quatre espèces de *Pterocarpus* sont représentées dans la base de données de propriétés technologiques du CIRAD : *P. erinaceus* Poir. (« Vèn ») ; *P. soyauxii* Taub. (« Padouk ») ; *P. tinctorius* Welw. (« Umukambati ») pour les espèces Africaines, et *P. officinalis* Jacq. provenant de Guyane Française. Des données de composition chimique globale ne sont disponibles que pour le Padouk et le Vèn. Une espèce extérieure au genre (« Divida » : *Scorodophloeus zenkerii* Harms. LEG, Caesalpiniaceae) a aussi été sélectionnée pour présenter des proportions de composés primaires aussi identiques que possible au Padouk (cellulose/hémicelluloses/lignines = 49/34/17 versus 49/36/15 pour le Padouk), mais de très faibles taux d'extraits (alcool-benzène + eau chaude ≤3%).

Padouk, Vèn et Umukambati présentent des modules d'élasticités entre moyens et relativement inférieurs à la moyenne des essences de la base (Figure 153 a).

Par contre, ces espèces ont parmi les plus faibles retraits volumiques de la base pour leur gamme de densité (Figure 153 b), ainsi que des points de saturation des fibres très bas

(17-22% ; Figure 153 c). Par comparaison, *P. officinalis* présente un module spécifique plutôt plus élevé que la moyenne et ses retraits volumiques et point de saturation des fibres correspondent aux « bois moyens – normaux » de la base, tandis que le Divida reste dans la gamme moyenne de module d'Young et a des retraits et psf légèrement supérieurs à la moyenne. En raison des propriétés physiques très différentes des 3 autres *Pterocarpus* et du manque de matériel (la seule planchette obtenue était légère et blanchâtre[41]), *P. officinalis* n'a pas été retenu.

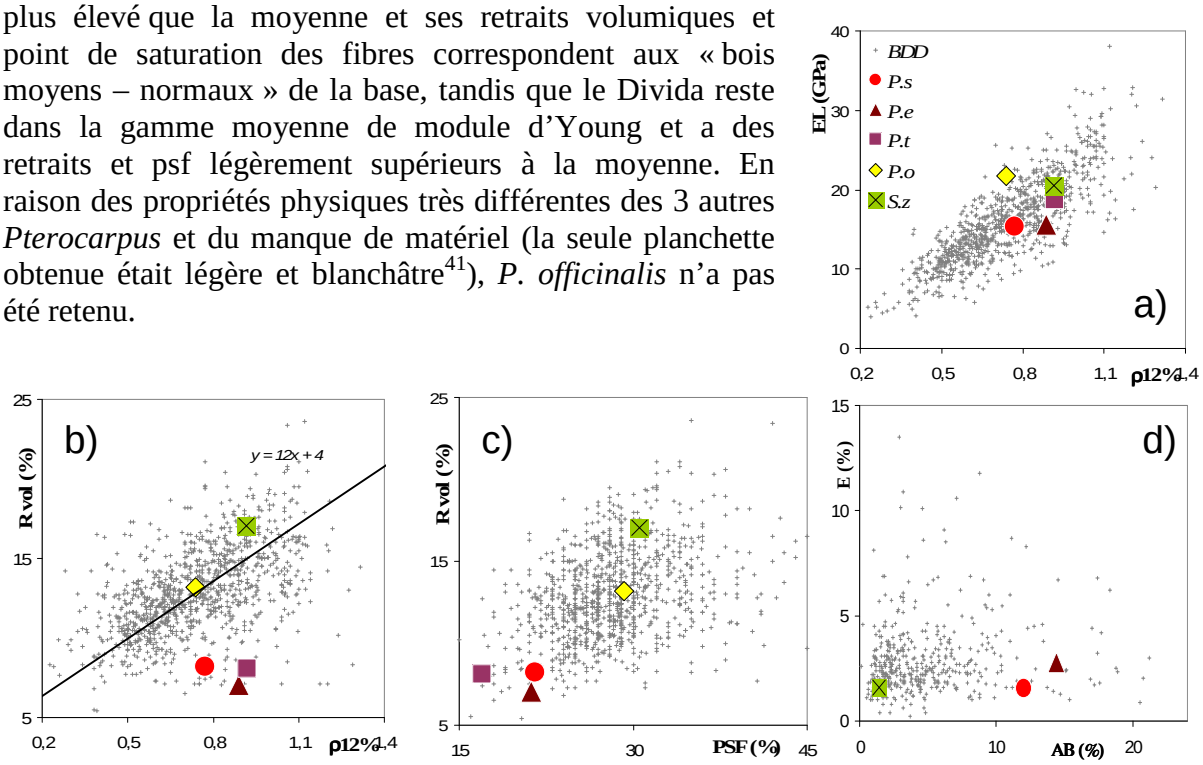


Figure 153 : Propriétés physico-mécaniques et taux d'extraits des espèces de *Pterocarpus* représentées dans la base de données du CIRAD (+ Divida) : a) Module d'Youg axial en fonction de la densité ; b) Retrait volumique total en fonction de la densité, et b) en fonction du point de saturation des fibres ; d) taux d'extraits à l'eau chaude, et à l'alcool-benzène. Légende : initiales Genre espèce (G.e).

Le Padouk et le Vèn présentent des taux d'extractibles relativement importants (13,5 et 17% respectivement, Figure 153) dont la majorité est soluble dans les solvants organiques, et très peu dans l'eau chaude. Les informations disponibles sur les types de composés rencontrés sont présentées ci-dessous.

Du fait que l'on disposait à la fois de relativement plus d'information et de matériel, pour ces deux dernières essences, ce seront celles qui feront l'objet de l'étude des modifications suite à différentes extractions. L'Umukambati et le Divida seront étudiés à titre de comparatif entre bois non extraits.

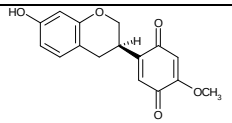
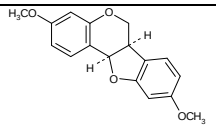
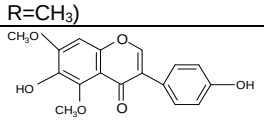
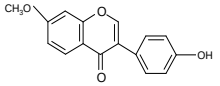
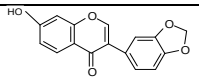
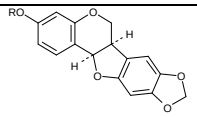
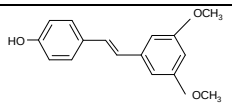
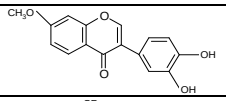
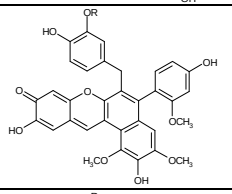
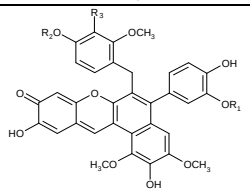
b Composition en métabolites secondaires du bois de cœur

L'étude de la composition chimique secondaire des bois de *Pterocarpus* a débuté au XIXè siècle [Seshadri 1972], mais il semble que la caractérisation soit encore loin d'être complète. Pour ces bois, aux recherches fondamentales en phytochimie [Seshadri 1972 ; Bezuidenhoudt et al 1987] ont pu s'ajouter des recherches liées aux propriétés de durabilité [Déon et al 1980 & 1988 ; Kusuma et al 2005], à l'utilisation comme bois tinctoriaux [Cardon 2003&2006 ; Surowiec et al 2004 ; Popoola 2000], ainsi qu'à des aspects pharmacologiques [Maurya et al 2004]. Cependant il semble que les espèces Asiatiques (*P. santalinus*, *P.indicus*, *P.marsupium* notamment) aient bénéficié de relativement plus de recherches phytochimiques. On dispose toutefois d'un bon nombre d'information pour le Padouk, mais moins pour le Vèn et l'Umukambati.

[41] Ces caractéristiques de bois clair sont aussi signalées par [Détienne & Jacquet 1983]. Il est fort possible que d'autres « variétés » ou provenances de *P. officinalis* se rapprochent plus des autres espèces (sous son nom vernaculaire Moutouchi en Guyane, il peut présenter un bois de coeur plus ou moins intensément veiné de rouge)

Les données récoltées sont récapitulées dans le Tableau 27, inspiré de [Surowiec et al 2004] et complété par d'autres références. Le bois de cœur de Padouk contient notamment des composés polyphénoliques du groupe des isoflavonoïdes, tels que des pterocarpanes, une isoflavane quinone, des isoflavanes et les biflavonoïdes santaline et santarubine (structures dimériques associant isoflavonoïde-flavonoïde) [Seshadri 1972 ; Jansen 2005 ; Cardon 2006].

Tableau 27 : Composés secondaires du bois de cœur connus pour *Pterocarpus soyauxii* Taub. et *P. erinaceus* Poir. D'après la référence [1]: Surowiec et al 2004; complété par les références [2]: Déon et al 1980 ; [3]: Jansen 2005; [4]: Cardon 2003&2006. Autres espèces où le composé a été identifié : Ind : *P. indicus* Willd. ; Sant : *P. santalinus* L. ; Mars : *P.marsupium* Roxb. ; Tinct : *P. tinctorius* Welw.

Composé		*P. soyauxii*	*P. erinaceus*	Autres espèces	*Références*
Angolensine		-	+	Ind	*1*
Claussequinone		+	?		*3, 4*
Deoxysantaline		+	-	Ind, sant	*1*
Formonetine		+	-	Ind	*3, 4*
Homopterocarpine		+	-	Ind, sant	*1, 2*
Maackiaine	(cf Pterocarpine avec R=CH_3)	+	-	Ind, sant	*1,4*
Muningin		-	+	Ind	*1*
Prunetin		+	+	Ind	*2, 3, 4*
Pseudobaptigenin		-	+		*1*
Pterocarpin (R=H)		+	-	Ind, sant	*1, 3, 4*
Pterostilbène		+	?		*2*
Santal		+	-	Ind, sant, mars, tinct	*1, 2*
Santaline A, B, C (A : R=H)		+ (A)	-	Ind, sant, tinct	*1, 3, 4*
Santarubine A, B (A : R_1, R_2= CH_3 ; R_3=H. B : R_2= CH_3 ; R_1, R_3=H)		+	-	?	*3, 4*
Tectorigenine 7-méthyl		-	+		*1*
Vestitol		+	?		*3*
Mucronulatol		+	?		*3*

En ce qui concerne *P. erinaceus*, et a fortiori *P. tinctorius*, il importe de signaler que ces espèces ont fait l'objet de beaucoup moins d'études phytochimiques que *P. santalinus*, *P. indicus* et *P. soyauxii* notamment. En conséquence, il est très possible que des composés non listés dans le tableau ci-dessus soient en fait présents dans le bois de ces espèces. Par contre, l'absence du santal et des santalines dans le bois de *P. erinaceus* semble confirmée, ainsi que leur présence dans le bois de *P. tinctorius* [Surowiec et al 2004].

Les deux espèces destinées à l'étude des effets de l'extraction pourraient à priori contenir certains composés caractéristiques communs (comme la prunétine) – ou tout du moins appartenant à des familles chimiques proches. Certaines différences semblent avérées comme l'absence du santal et de la santaline dans le bois de Vèn et d'autres différences sont probables mais non strictement vérifiées. [Surowiec et al 2004] obtenaient, sur 16 composés caractéristiques repérables en UV – visible des *Pterocarpus*, 6 composés présents chez le Vèn (plutôt extractibles par un mélange de méthanol et d'eau) et 5 chez le Padouk (plutôt extractibles soit par le méthanol pur ou par la diméthylformamide pure, mais non par un mélange avec de l'eau), dont un seul commun. D'après le même protocole, seulement deux de ces composés étaient retrouvés dans le bois d'Umukambati : santal et santalines communs au Padouk.

IV.b.1.3. **Contre-fil : brève définition**

La quantification directe des paramètres de contre-fil, qui demanderait des essais de fendage radial (a priori sur des dimensions supérieures à nos pièces de bois initiales compte tenu des largeurs des bandes de contre-fil prévisibles sur les espèces étudiées), ou des coupes anatomiques LT successives réalisées de façon systématique [Détienne 1979], n'était pas l'objet de ce travail. Il semble cependant utile de décrire brièvement ce type de fil de bois, autant pour introduire les résultats présentés ci-dessous sur des essences de *Pterocarpus* très contrefilées, que par la fréquence d'observation sur les bois tropicaux. D'après [Kribs 1950, cité dans Hernandez & Almeida 2003], l'étude anatomique de 258 feuillus tropicaux faisait ressortir que 75% d'entre eux avaient tendance à présenter du contre-fil. Celui-ci est formé par un alignement des cellules nouvellement formées en spirales qui changent à la fois d'angle et de direction de façon répétée et plus ou moins régulière (Figure 154) [Hernandez & Almeida 2003 ; Weddel 1961 ; Beals & Davis 1977]. Dans le cas d'espèces de *Daniellia*, ces changements sont synchrones des accroissements annuels [Détienne 1979]. Le contre-fil pourrait présenter un avantage adaptatif. Dans le plan radial, les alternances de bandes présentant différents angles et directions incidentes des fibres donnent lieu, en raison des différences de réflexion et d'absorption de la lumière, à une figure couramment appelée « rubanée » souvent appréciée pour son aspect esthétique. Le contre-fil peut cependant poser des problèmes au cours de la transformation, que ce soit au séchage (risques de déformations ou de fissuration), ou à l'usinage (arrachage des fibres notamment rendant parfois délicate l'obtention de bons états de surface) [Weddel 1961]. Sans que nous ayons toutefois effectué une recherche bibliographique approfondie sur le sujet, il semblerait que le nombre d'études ciblées sur

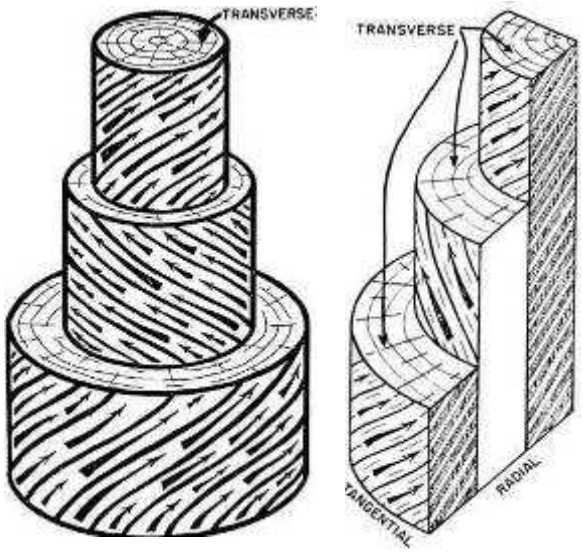


Figure 154 : Représentation schématique du contre-fil, et illustration des différences de réfraction/absorbtion de la lumière dans le plan LR.

l'influence de cette caractéristique sur les propriétés physiques et mécaniques des bois soit relativement réduit par rapport à la fréquence à laquelle ce phénomène est rencontré. Pour l'Utile (*Entandrophragma utile*) et le Greenheart (*Ocotea rodiaei*), [Weddel 1961] trouvait que la présence de contre-fil se traduisait par une diminution du module de rupture en flexion et dans une un peu moindre mesure du module d'élasticité, d'autant plus marquée que l'angle maximum de déviation était élevé. Cet effet était toutefois plus modéré que pour une simple rotation de fil uniforme de même amplitude. [Hernandez & Almeida 2003] rapportent une diminution de la résistance au cisaillement LT avec l'augmentation de l'angle maximum de déviation pour trois essences Amazoniennes. Dans une étude [Ohta et al 1984] des propriétés vibratoires de touches de marimba « industrielles » faites d'une essence (*Betula schmidtii* Regel) présentant des déviations et distorsions importantes d'orientation du fil, mais non contrefilée au sens propre du terme, des éprouvettes avaient été débitées en suivant un angle de fil en plan LT de 0 à 15° (témoins) et d'autres parallèlement à l'orientation axiale globale quelle que soit l'orientation locale (≈conditions de fabrication en usine). Pour les premières, la relation entre angle de fil, module d'Young et facteur d'amortissement suivait l'évolution prévisible pour les rotations considérées, tandis que les relations étaient peu claires pour celles débitées « aléatoirement ». La combinaison des angles mesurés en plan LR et LT permettait de mieux expliquer les variations de module et un peu mieux celles d'amortissement. Compte tenu des fortes hétérogénéités qu'il implique, une étude spécifique de l'effet du contre-fil sur le comportement vibratoire de pièces de bois de dimensions plus importantes que celles de nos éprouvettes (c'est-à-dire plus grandes devant la longueur d'onde du contre-fil) serait certainement intéressante à mener dans le futur.

IV.b.2. Considérations méthodologiques pour l'étude de l'influence des composés secondaires sur les propriétés physico-mécaniques

Dans un premier temps, une approche d'ordre qualitatif a été adoptée, où les comportements vibratoires des différentes espèces et localisations radiales, aubier et duramen, étaient comparés en prenant en compte les informations existantes sur leur composition.

En ce qui concerne l'étude quantitative de l'influence des extractibles sur les propriétés du bois, plusieurs démarches expérimentales peuvent être envisagées, qui présentent bien sur leurs avantages et leurs inconvénients. Un résumé de ces démarches possibles est présenté ci-dessous. Il est vraisemblable qu'aucune d'entre elles ne soit totalement exempte de limitations et dans l'idéal la confrontation d'études suivant les différents protocoles sur un même matériel serait certainement la démarche la plus exempte de biais, mais en même temps extrêmement lourde en terme d'échantillonnage et d'expérimentation.

Une approche couramment suivie, et qui a été adoptée dans ce travail, consiste à mesurer les propriétés du bois dans son état « natif », puis après que tout ou partie des ses composés secondaires aient été retirés de sa structure par extraction dans différents solvants. Cette démarche semble cohérente avec une définition des extractibles comme de « composés de poids moléculaires faibles devant ceux des macromolécules constitutives, qui peuvent assez facilement être extraits du bois dans une large gamme de solvants polaires et apolaires[42] » [Hillis 1987 ; Nzokou & Kamden 2004 ; Amusant 2003]. Elle a été adoptée dans une assez grande proportion des études concernant l'influence des composés secondaires sur les propriétés hygroscopiques [Wangaard & Granados 1967 ; Cooper 1974 ; Choong &

[42] Cette définition peut être limitée aux composés solubles dans les solvants organiques, ou inclure également ceux solubles dans l'eau [Hillis 1987 ; Arévalo Fuentes 2002]. Nous adoptons ici le second point de vue.

Achmadi 1991 ; Nzokou & Kamden 2004] et mécaniques [Yano 1994 ; Yano et al 1995 ; Sugiyama et al 1994 ; Matsunaga et al 1996 ; Ajuong & Breeze 1997 ; Obataya et al 1999] des bois. Selon les types d'essais, les propriétés sur bois natif et extrait peuvent être déterminées sur la même pièce de bois (éprouvette ou matériel broyé), ou bien sur matériel jumelé (pour des essais de durabilité par exemple [Déon & Schwartz 1988]).

Cette démarche présente pour notre étude certains avantages, notamment du fait que les différences de propriétés en fonction des contenus en extraits sont observées sur la même pièce de bois, mais il faut toutefois signaler certaines de ses limitations. Tout d'abord, il n'est pas évident d'obtenir une extraction complète sur matériel solide. Cette limitation peut cependant s'appliquer de façon plus générale aux extractions par solvants organiques de composés secondaires sur broyats ; dans la mesure ou il peut exister des interactions fortes notamment entre polyphénols et lignines, ces polyphénols n'étant séparables que par des traitements plus sévères comme une extraction alcaline [Lange & Faix 1999 ; Hillis 1988]. Dans le cas des espèces de *Pterocarpus* étudiées, il semble qu'une extraction alcaline (au Na_2CO_3) ne fasse pas ressortir de composés, ni de quantités de ceux-ci, non extractibles par des solvants organiques (Méthanol et Diméthylformamide, [Surowiec et al 2004]).

L'autre limitation, soulevée notamment par [Arévalo Fuentes 2002 ; Mantanis et al 1994] et évoquée par [Matsunaga et al 1999], concerne le problème de l'effet potentiel du processus d'extraction en lui-même sur la microstructure et les propriétés du bois. Dans le cadre d'études concernant les retraits de séchage, des retraits anormaux, liés à du collapse, ont pu être observés sur des bois ayant subi différentes méthodes d'extraction incluant un étuvage [Choong & Achmadi 1991]. Ceci semble être lié à un effet plastifiant des extractibles pour des températures et humidités élevées, ceux-ci diminuant alors la résistance des parois cellulaires aux fortes pressions capillaires rencontrées dans ces conditions de séchage. Ceci dit, en ce qui concerne notre protocole, les températures appliquées ne dépassent guère 60°C, et une attention particulière a été portée à la progressivité et à la « lenteur » de transition entre les conditions d'extraction, l'état sec à l'air et l'état quasi-anhydre (précautions expérimentales décrites p211). Par ailleurs, lors de précédentes séries d'essais sur les retraits après extraction du Padouk, nous n'avions observé aucun retrait anormal ou phénomène de collapse sur cette essence[43] [Gérard et al 2003 ; travail de stage de T. M'Bang 2003]. En dehors d'éventuels effets de collapse, [Mantanis et al 1994] avaient remarqué après extraction une diminution de l'énergie d'activation de gonflement, qui représente l'énergie nécessaire à la rupture des liaisons hydrogènes entre composants du bois. Ces auteurs en déduisaient que les parois après extraction sont dans un état moins solidement lié : soit que les extraits jouent un certain rôle structurel, soit que les solvants eux-mêmes aient un effet, soit les deux à la fois.

Une démarche d'étude alternative, adoptée notamment par [Minato et al 1997 ; Matsunaga et al 1999 & 2000 ; Sakai et al 1999] pour l'effet de composés secondaires sur les propriétés vibratoires et hygroscopiques, consiste en la ré-injection d'extraits dans un bois supposé « neutre » et l'observation des modifications de propriétés induites par ce traitement. Cette méthode s'apparente à un « traitement chimique naturel » et présente l'avantage de pouvoir mieux maîtriser les quantités de composés dans le bois, ainsi que de pouvoir plus facilement positionner l'effet de ces composés par rapport aux typologies et analyses rhéologiques développées quant à des modifications chimiques « artificielles » des bois [Norimoto et al 1992]. Toutefois, ici encore, des limitations peuvent être rencontrées. D'une

[43] Des phénomènes de fissuration au retrait ont par contre pu être observés sur d'autres essences au cours de séries d'essais préliminaires moins bien contrôlées, où l'évaporation très rapide des solvants après extraction n'était pas suffisamment limitée par le protocole expérimental.

part, les procédés d'imprégnation font que, pour des quantités modérées d'extraits conférés, ceux-ci seront surtout concentrés à proximité de la surface des éprouvettes. [Matsunaga et al 1999] obtenaient sur de l'Epicéa[44], pour une imprégnation sous évacuation par une solution aqueuse d'Haematoxyline, une pénétration d'environs 0,2mm par rapport à la surface pour 7,6% de gain de masse; et pour 25% de gain de masse, le centre de l'éprouvette de 2mm n'était pas imprégné tandis que les lumens proches de la surface commençaient nettement à être remplis. La non-modification de la zone correspondant à la « fibre neutre » n'a probablement qu'une influence très modérée sur les propriétés vibratoires globales mesurées. Par contre, une imprégnation forte des parois cellulaires dans une zone proche de la surface est susceptible de fausser les relations 'teneur en extraits globale – propriétés vibratoires' vis-à-vis de ce qui serait observable sur des bois naturellement – et plus ou moins uniformément – imprégnés. Par ailleurs, les réserves à adopter quant à l'effet intrinsèque des procédés d'extraction sur les propriétés des bois peuvent être extrapolées aux effets intrinsèques des procédés d'imprégnation. Dans le cas du travail qui vient d'être cité, ceux-ci sont probablement négligeables (imprégnation d'une solution aqueuse à température ambiante). Par contre, l'imprégnation de phénols simples et de composés naturels polycycliques en solution dans le méthanol peut se traduire non pas par un gain, mais une perte de masse du bois imprégné, attribuable au départ des composés secondaires initialement présents dans le bois « neutre » d'Epicéa [Sakai et al 1999]. Ceci pose aussi bien sûr la question de l'existence de « bois neutres », ainsi que de l'influence respective des composés retirés et conférés, dans les modifications de propriétés observées.

Enfin, l'étude du déterminisme des propriétés du bois au niveau des composés extractibles peut être effectuée par corrélations entre les propriétés mesurées sur bois non modifié, et teneurs en extraits déterminées sur du matériel broyé jumelé [Hernandez 1989 ; Arévalo Fuentes 2002 ; Rhoonia 2005]. L'avantage est que le matériau d'étude ne subit aucune modification et les éventuels artefacts liés aux méthodes d'extraction ou d'imprégnation sont ainsi évités. Cependant, cette approche statistique demande un échantillonnage intra- et inter – arbre important. De plus, le nombre de paramètres susceptibles d'entrer en compte dans les relations amortissement/module spécifique demanderait toute une batterie de déterminations anatomiques, microstructurales et chimiques. Cette démarche demande en tout cas un travail de thèse à part entière même pour un nombre modéré d'essences.

Au final, nous avons suivi la démarche de mesures sur bois natifs et après extraction, qui nous a semblé permettre une observation plus ciblée sur les extraits, en travaillant sur les mêmes pièces de bois, donc à structure et composition primaire théoriquement « fixées ». Afin de s'affranchir autant que possible des artefacts potentiels des méthodes d'extraction, certaines précautions expérimentales ont été prises vis à vis des conditions de séchage, de température et pression, d'élimination des solvants... Ces précautions sont décrites p.211 dans le protocole de mesures avant et après extraction.

Pour finir, l'effet des extraits sur les propriétés physico-mécaniques des bois peut dépendre autant de leur localisation dans la structure cellulaire (i.e. imprégnation des parois cellulaires, simple tapissage, ou remplissage des lumens), que de leur nature chimique, à l'instar des typologies développées pour les modifications chimiques par [Norimoto et al 1992]. Un simple tapissage des lumens peut avoir un effet imperméabilisant vis-à-vis de la sorption par les parois [Arévalo Fuentes 2002] ; en addition, un remplissage des lumen peut jouer sur les relations entre densité et propriétés (retraits/gonflements ou module d'élasticité).

[44] Il faut noter que l'Epicéa n'est pas une essence réputée facile à imprégner.

Par contre, seuls les extraits localisés au sein des parois pourront influer sur les coefficients de retrait/gonflement ou sur les propriétés viscoélastiques.

L'utilisation d'une séquence de solvants de différentes polarités et poids moléculaires peut permettre d'obtenir une première information quant à la localisation cellulaire des extraits [Morgan & Orsler 1969], tout en étant aussi plus ou moins sélective sur les types de composés visés. Cette méthodologie a été adoptée dans certaines études concernant les propriétés physico-mécaniques [Hernàndez 1989 ; Ajuong & Breeze 1997 ; Arévalo Fuentes 2002 ; Nzokou & Kamden 2004] ou de durabilité [Déon & Schwartz 1988]. A notre connaissance elle n'a pas encore été appliquée à l'étude des relations entre extraits et coefficients d'amortissement.

IV.b.3. Matériel et méthodes spécifiques

Les résultats présentés dans ce chapitre concernent trois niveaux d'observations. Tout d'abord, la comparaison des propriétés vibratoires entre les trois espèces de *Pterocarpus* (bois de coeur, plus aubier pour 2 d'entre elles) et la « référence » Divida. Puis, pour deux essences (*P. soyauxii* et *P. erinaceus*) on a vérifié le rôle des extractibles dans les propriétés observées, par une extraction « généraliste ». Enfin, on a étudié les modifications de propriétés physico-mécaniques provoquées par l'extraction dans différents solvants sur des éprouvettes présentant une gamme relativement étendue d'angles de fil locaux. Le nombre de pièces de bois initiales est progressivement restreint entre ces trois niveaux, tandis que le nombre d'éprouvettes d'une même origine est augmenté. Pour le premier point, les essais suivent le protocole général déjà présenté. Pour les 2ème et 3ème, les protocoles d'extractions et les étapes supplémentaires de mesures physiques et mécaniques, sont présentées ci-dessous.

Il convient de remarquer que, comme pour les autres espèces, l'échantillonnage effectué ne permet pas d'évaluer la variabilité intra-spécifique, le gros de l'échantillonnage ayant été porté sur l'obtention de variations de module et d'amortissement à composition et structure aussi proche que possible, pour étudier l'effet de l'extraction.

IV.b.3.1. **Matériel**

Ce matériel était inclus dans la partie « résultats généraux », mais ici il est nécessaire d'expliciter plus la composition de l'échantillon, ainsi que les caractéristiques de prélèvement.

a Echantillonnage

Pour *Pterocarpus soyauxii* (Padouk), l'échantillon provient de 5 arbres. 3 d'entre eux (représentés par une ou deux éprouvettes normalisées de bois de cœur) ont fait l'objet de séries d'essais au CIRAD et l'on dispose de données moyennes par arbre (=n° ESSEM du CTFT) pour les propriétés technologiques et la composition chimique. L'un d'eux (libellé Ps4 ci-dessous) présente manifestement une duraminisation atypique (bois plus léger et plus clair que la « normale » pour l'espèce). Ces spécimens seront surtout à titre comparatif. Les deux autres arbres proviennent de stocks n'ayant pas été étudiés (pas de n° CTFT). Le matériel destiné aux mesures comparatives état natif/bois extraits provient de ces deux derniers arbres.

Pour *Pterocarpus erinaceus* (Vèn), seul 1 N° CTFT a pu être obtenu, pour lequel on a échantillonné du duramen médian (pas d'aubier disponible). Par comparaison au Padouk, ce stock présente à la fois un contre-fil moins marqué, des orientations « globales » peu repérables, et des variations de couleur bien visibles sur 12mm en radial.

Pterocarpus tinctorius (Umukambati): seul 1 N° CTFT a pu être obtenu, sous la forme d'un plateau de ≈40mm d'épaisseur, comprenant aubier et duramen. Ce spécimen présente un bois à la fois ondé et contrefilé.

Scorodophloeus zenkerii (Divida): deux n° CTFT, duramen seulement. Bois jaune paille avec des marbrures marron fines et occasionnelles.

Pour ces quatre espèces, le Tableau 28 récapitule les n° CTFT (le cas échéant), les provenances, les types de bois disponibles (aubier/duramen), ainsi que les libellés qui leurs seront attribués dans la suite.

Tableau 28 : Echantillonnage des trois espèces de *Pterocarpus* et de Divida.

Espèce	N°CTFT	Provenance	Libellé	Duramen	Aubier
Pterocarpus erinaceus Poir. (Vèn)	06906	Sénégal	V	+	
Pterocarpus soyauxii Taub. (Padouk)	-	Cameroun	P1	+	+
	-	Cameroun	P2	+	
	10028	Cameroun	Ps3	+	
	10306	Centrafrique	Ps4	+	
	10360	Gabon	Ps5	+	
Pterocarpus tinctorius Welw. (Umukambati)	29409	Burundi	U	+	+
Scorodophloeus zenkerii Harms. (Divida)	05317	Congo	D1	+	
	05318	Congo	D2	+	

Les données physiques, mécaniques et chimiques moyennes disponibles dans la base de données du CIRAD sur les arbres d'où proviennent les éprouvettes (n° CTFT), ainsi que les données moyennes et écart type pour *P. soyauxii*, sont présentées en annexe.

b Prélèvement

Pour les premières séries d'essais, le matériel initial a été prélevé sous forme de carrelets normalisés (20*20*360mm, R*L*T) pour les spécimens destinés seulement à la comparaison entre bois natifs : V, Ps3 et D1 (n=2 duramen) ; Ps4, Ps5 et D2 (n=1 duramen) ; U (n= 1 duramen externe + 1 aubier).

Pour ceux destinés à cette comparaison, puis à la première série d'extraction généraliste, les carrelets mesuraient (25*25*450mm, R*L*T)[45]. Ils ont ensuite été redébités en éprouvettes petites en épaisseur dans deux tronçons successifs en direction L. Ceci concerne le Vèn (n=2 duramen médian) et l'arbre 1 de Padouk.

Pour ce dernier, des carrelets ont été débités sur un même rayon (Figure 155): dans l'aubier (n=2), dans le duramen immédiatement adjacent à l'aubier (n=3 distribués tangentiellement autour du rayon principal), puis à des distances de 13, 24 et 34 cm de l'aubier (n=1 pour chaque distance).

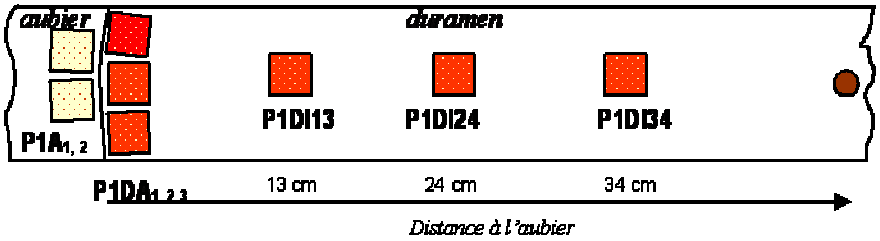


Figure 155 : Padouk arbre 1 : prélèvement des carrelets à différentes distances radiales et libellés.

L'ensemble de ces spécimens a suivi le protocole général : mesures par vibrations libres de poutres flottantes sur carrelets ; re-débits ; mesures physiques, colorimétriques et par vibrations forcées sans contact sur lamelles.

[45] Ces dimensions non normalisées ont été dictées par des contraintes d'usinage dans l'optique d'obtenir au moins 10 éprouvettes « lamelles » par carrelet initial. L'élancement reste toutefois inchangé (L/h=18).

Pour la deuxième série d'essais avec extraction (Padouk arbre 2 et Vèn), un autre type de prélèvement a été adopté, dans l'optique d'obtenir un nombre important d'éprouvettes « lamelles » de duraminisation homogène et avec une gamme étendue d'angles de fil/modules d'Young spécifiques.

Pour le Padouk, une série de planches parallèles « sur dosse » (12*90*100mm, R*L*T) a été débitée depuis la « zone de transition » avec l'aubier, jusqu'au duramen interne (Figure 156). Parmi cette série, deux planches adjacentes de duramen médian (distance à l'aubier : 12 et 14 cm) ont été sélectionnées pour présenter à la fois une duraminisation la plus uniforme possible et des orientations de fil bien marquées et contrastées sur les faces L-T. Pour le Vèn, moins de matériel était disponible, et le plateau initial était sur faux quartier, aussi une seule planche bien orientée de duramen médian a pu être obtenue.

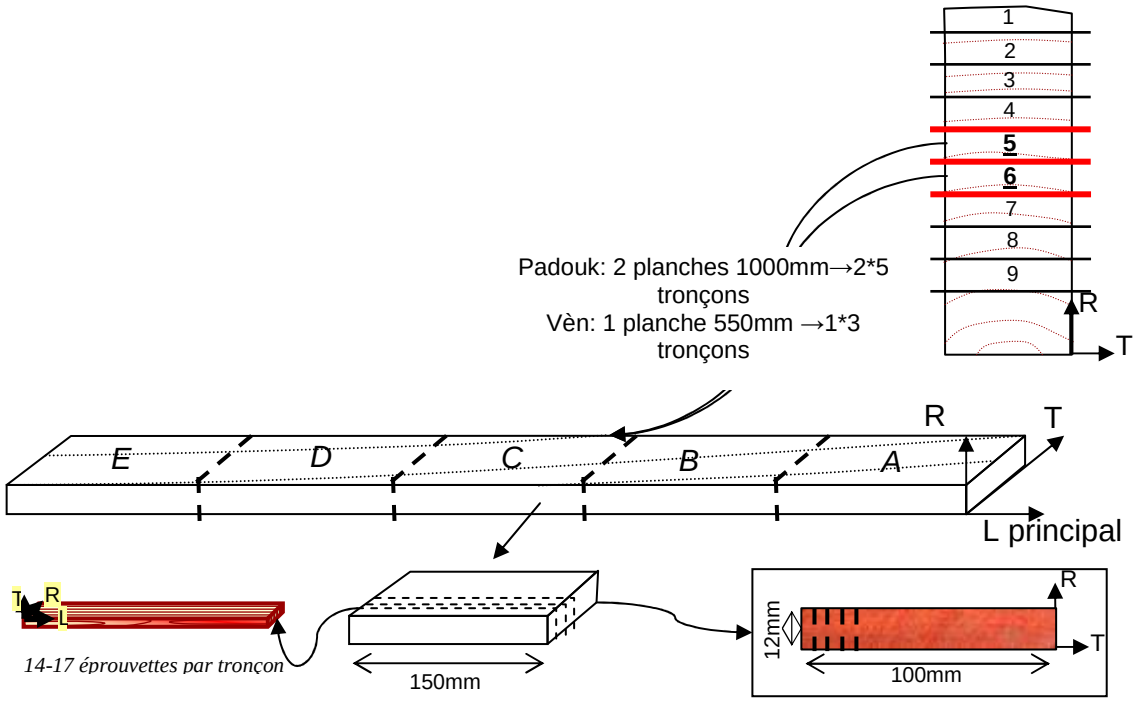


Figure 156 : Schéma de débit pour l'obtention d'un échantillon de lamelles à duraminisation homogène et variations locales d'orientation du fil. Encart : courbure en section transverse.

Chacune de ces planches a été débitée en tronçons de 150mm de long ; ceux-ci sont numérotés P5A→E et P6A→E pour le Padouk et VA→C pour le Vèn. A partir de chaque tronçon, 14 à 17 éprouvettes (12*2*150mm, L*R*T) ont été débitées parallèlement au champ LR qui correspond à la direction axiale principale de l'arbre. Les diamètres étant importants, la courbure observable en section transverse sur les planches utilisées est faible ; on peut raisonnablement considérer que les éprouvettes qui en ont été débitées présentent une bonne orientation Radiale – Tangentielle dans leur section.

Pour le Padouk, les orientations globales de fil dans le plan LT ont été relevés avant débit (voir ci-dessous §IV.b.3.2.a). Ensuite l'ensemble de ces éprouvettes a suivi le protocole général de mesures sur lamelles, à l'issue duquel ont été créés 6 groupes jumelés par espèce, sur la base des propriétés vibratoires mesurées (voir ci-dessous §IV.b.3.2.c).

La composition globale de l'échantillon avec les nombres d'éprouvettes de type carrelet et de type lamelles et les traitements qui leur seront appliqués, est résumée sur le Tableau 29.

Tableau 29 : Composition globale de l'échantillon « *Pterocarpus* ». Type de bois : A : aubier ; DA : duramen adjacent à l'aubier ; DM : duramen médian ; DI : duramen interne ; D : duramen de localisation radiale mal connue. Traitement : N : natif ; X1 : extraction généraliste ; X2 : extraction par différents solvants.

Espèce	Libellé arbre	Ntotal pièces initiales	Types de bois	Ntotal carrelets	Ntotal lamelles	Traitement
Pterocarpus erinaceus (Vèn)	V	5	DM	4	81	N+X1+X2
Pterocarpus soyauxii (Padouk)	P1	8	A, DA, DM, DI	8	89	N+X1
	P2	2	DM	0	158	N+X2
	Ps3	2	D	2	8	N
	Ps4	1	D	1	4	N
	Ps5	1	D	1	4	N
Pterocarpus tinctorius (Umukambati)	U	2	A, DA	2	15	N
Scorodophloeus zenkerii (Divida)	D1	2	D	2	8	N
	D2	1	D	1	6	N

IV.b.3.2. **Méthodes**

Ne sont décrites ici que les étapes expérimentales spécifiques à l'étude de l'effet de l'extraction et à la prise en compte du contre-fil. Quand on parlera de « protocole général », il s'agit de celui présenté p49. Par ailleurs, certains points expérimentaux ne concernent qu'une partie de l'échantillon de ce chapitre, qui a été étudié lors de la deuxième série d'essais : extraction séquentielle sur groupes jumelés et prise en compte de variations locales de fil.

a Relevé des angles de fil (pour le Padouk de la deuxième série d'essais uniquement)

Le Vèn échantillonné présente un contre-fil assez modéré et il n'était pas possible de repérer d'orientation prédominante dans le plan LT. En revanche, pour l'arbre 2 de Padouk, en raison du contre-fil prononcé de cette espèce et de cet arbre, le type de débit présenté ci-dessus (Figure 156) a permis d'obtenir des éprouvettes présentant des orientations repérables bien contrastées. Les orientations globales visibles dans le plan LT ont été relevées pour chaque tronçon, sur les faces supérieure et inférieure, et à partir de chaque côté (= champs LR correspondant au débit de la première, et dernière, éprouvette de chaque tronçon) dans le cas où cette orientation varie un peu tangentiellement. Ces relevés ont été lissés entre les deux côtés LR pour estimer les orientations de chaque éprouvette[46]. L'angle moyen entre les faces LT supérieures et inférieures (= champs des éprouvettes) a été pondéré par la largeur de bande visible en LR. Ces relevés sont présentés sur la Figure 157.

[46] Des tentatives ont été faites pour un repérage plus systématique des orientations globales, par analyse d'image sur les faces LT des tronçons initiaux en spécifiant les dimensions relatives des épaisseurs d'éprouvettes (h éprouvette dans le plan LT = 2mm + épaisseur trait de scie ≈2,8mm). Mais l'angle de teinte uniforme et la chromaticité élevée du Padouk rendaient cette démarche peu applicable.

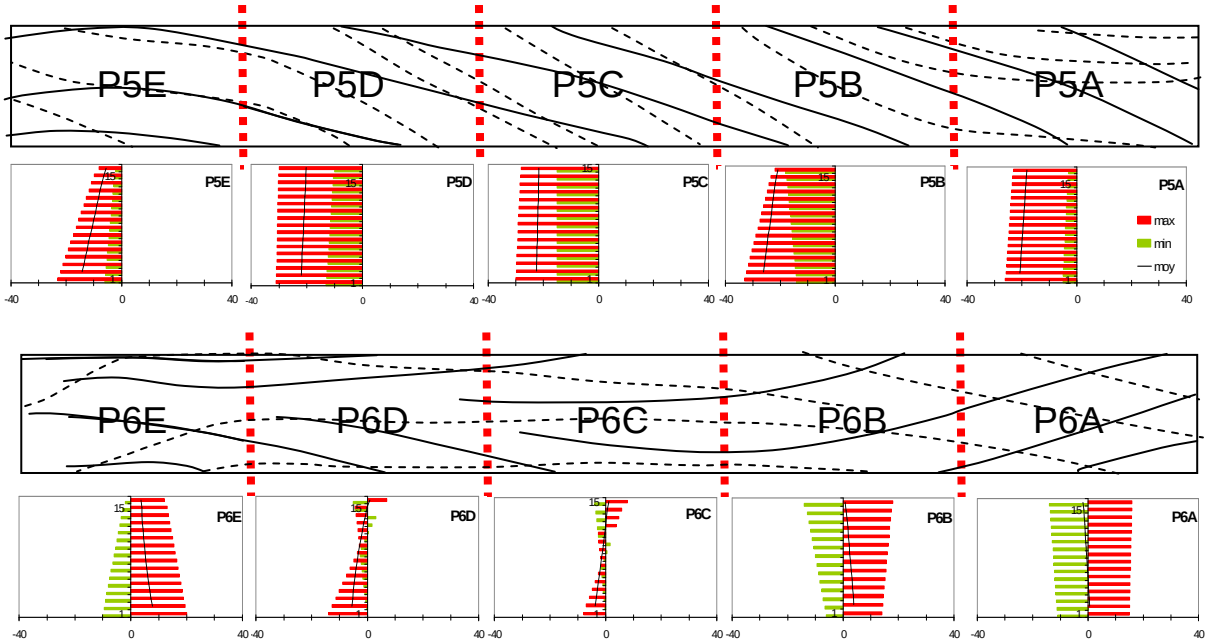


Figure 157 : Orientations globales repérables sur les faces LT supérieures (—) et inférieures (---) des planches initiales (P5 et P6) de l'arbre 2 de Padouk. Les diagrammes en barres correspondent aux angles approchés pour les éprouvettes débitées de chaque tronçon de planche initiale.

Bien entendu, ces relevés sont à titre indicatif ; pour obtenir des valeurs plus exactes il faudrait effectuer des essais de fendage radial, ou bien des coupes anatomiques LT successives. Il faut aussi remarquer que ces orientations visibles correspondent aux vaisseaux, dont on sait que les files peuvent suivre des trajectoires assez sinueuses. Sur cet échantillon donné, d'après des observations anatomiques préliminaires, les fibres semblent bien suivre la même orientation générale en LT que les files de vaisseaux. Ces observations demanderaient bien sûr une étude plus systématique, mais il ne semble pas aberrant que les réorientations périodiques au niveau du cambium concernent les différents types de cellules axiales.

Malgré le caractère approximatif de ces relevés d'orientations, on peut estimer la gamme d'angles LT maximum à 5-40° (Figure 158 gauche). L'angle maximum sur un champ n'a cependant que peu de sens puisque la réorientation des cellules est à priori progressive. Les angles moyens ont pu être calculés soit en pondérant par la largeur de bande repérable en plan LR, soit en effectuant une intégrale entre les deux faces (Figure 158 droite).

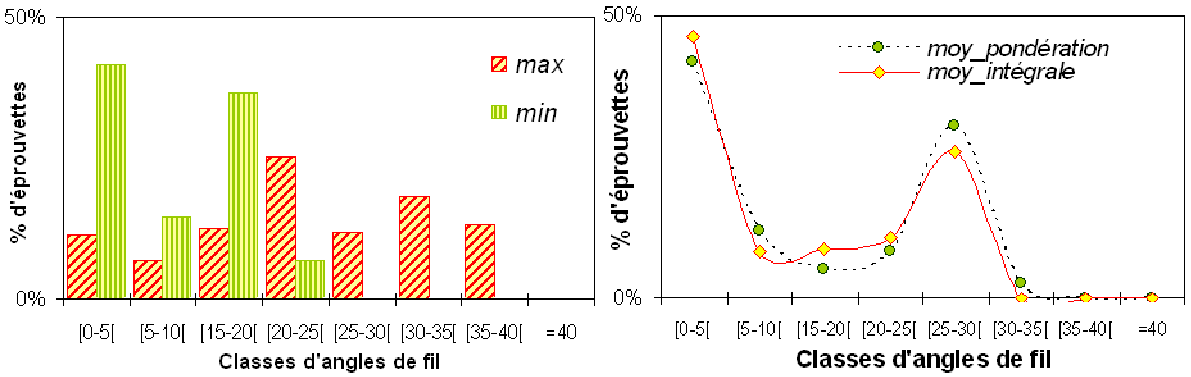


Figure 158 : Distribution des valeurs absolues d'angles de fil apparents pour l'ensemble des éprouvettes de cet échantillon de Padouk (n=158). A gauche : angles minimaux et maximaux relevés sur les champs LT ; à droite : moyenne par éprouvette soit pondérée par la largeur de bande visible en plan LR, soit par intégrale.

Pour des angles différents entre les deux champs LT, mais de même direction, l'éprouvette présentera une déviation moyenne de fil proportionnellement importante (surtout

la planche supérieure P5 sur la Figure 157; groupe d'orientations moyennes de 20-30° sur la Figure 158). Lorsque les orientations sont effectivement croisées, il existera une zone « bien orientée » vers le centre de la largeur LR de l'éprouvette (surtout planche P6 et groupe d'angles moyens ≤10°).

b Protocole de mesures physico-mécaniques avant et après extraction

Ce protocole concerne surtout des aspects de conditionnement et de précautions expérimentales. Il a été sensiblement identique pour les deux campagnes d'essais avec extraction.

Les éprouvettes suivent d'abord toutes le protocole général dans leur état natif. Elles sont ensuite séchées jusqu'à un état « quasi-anhydre » (48h en étuve sèche à 60°C) et leurs masses et dimensions sont re-mesurées. Elles sont ensuite placées, par groupes de 6-8 d'une même localisation, dans des cartouches de cellulose, puis extraites en extracteurs de Soxhlet avec les solvants considérées (cf ci-dessous §d). Puis rincées, séchées, restabilisées, avant de suivre à nouveau le même protocole général de mesures (Figure 159). Les précautions prises sont décrites ci-dessous.

Les températures de séchages et d'extraction ne dépassent pas ≈65°C (sauf pour l'extraction à l'eau chaude bien sur). En fin d'extraction, les éprouvettes ne sont pas laissées sécher à l'air libre. Effectivement, l'évaporation rapide d'une partie des solvants volatils peut provoquer des fissurations de séchage ; de plus le retrait rapide de la surface risque de faire un effet barrière et de bloquer des solvants au cœur du bois. Il semble aussi que certains solvants aient tendance à rester « associés » au bois dans des proportions non négligeables et nécessitent d'être « extraits » eux-mêmes [Ashton 1974]. Les éprouvettes sont rincées à température ambiante plusieurs fois dans de l'éthanol, puis dans de l'eau. Pour la deuxième série d'essais, les masses et dimensions des éprouvettes saturées d'eau ont été mesurées. Elles sont ensuite mises à sécher en conditions ambiantes, entre deux épaisseurs de papier absorbant régulièrement humidifié pendant 1-2 jours. Après ≈1 semaine de séchage à 20°C et 65% HR, les éprouvettes « sèches à l'air » sont séchées à 60°C pendant 48h en dessiccateur, puis re-stabilisées à 20°C et 65% HR pendant 3 semaines avant d'appliquer à nouveau le protocole général de mesures.

Les étapes expérimentales suivies sont schématisées sur la Figure 159. N.B. : Les extractions sur aubier n'ont pas été effectuées, mais nous espérons les réaliser sur le matériel déjà étudié.

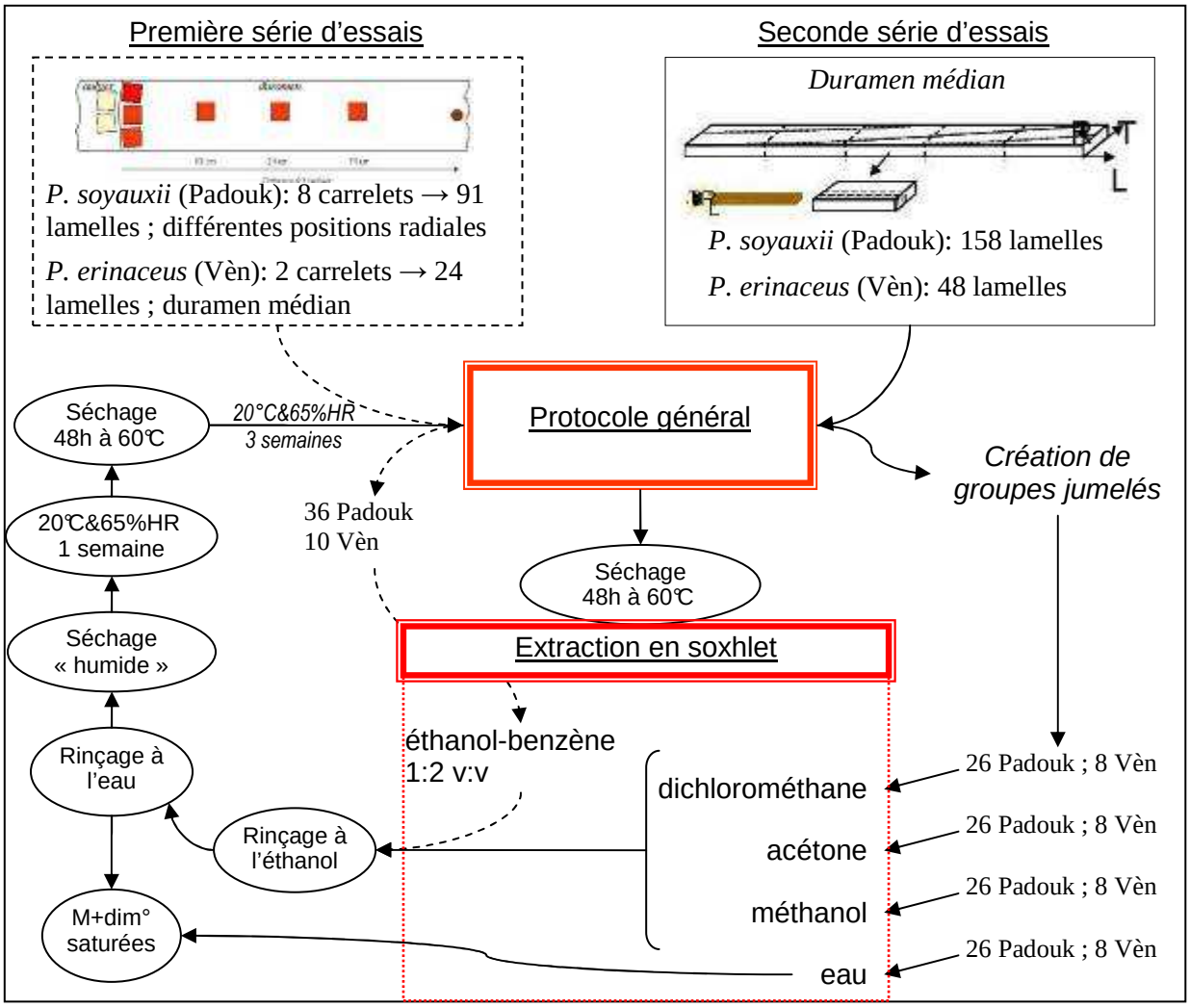


Figure 159 : Etapes expérimentales suivies pour les bois étudiés avant et après extraction

Pour la deuxième série d'essais, les extractions par différents solvants ont été effectuées en parallèle, sur des groupes jumelés sur la base de leurs propriétés à l'état natif. La définition de ces groupes est donnée ci-dessous.

c Création de groupes jumelés (pour la deuxième série d'essais)

L'objectif recherché était de disposer de groupes de microstructure et de composition chimique primaire et secondaire aussi identiques que possible, tout en conservant une bonne plage de variation de module spécifique et d'amortissement, celle-ci étant identique entre les groupes. Ceci pour pouvoir effectivement comparer les modifications de propriétés physico-mécaniques provoquées par les extractions par différents solvants, sans incertitude quant à la contribution de la variabilité du matériel natif dans les variations observées entre bois extraits.

Pour ce qui est de l'homogénéité du stock, on s'est appuyé sur le type de débit présenté plus haut : toutes les éprouvettes proviennent d'une même localisation radiale (Figure 160 en haut). Après les premières mesures sur bois natif, l'ensemble des éprouvettes de chaque espèce (158 pour le Padouk, 48 pour le Vèn) ont été re-classées par ordre croissant de module spécifique E'/ρ ; puis des classes de E'/ρ ont été définies toutes les 6 éprouvettes dans cet ordre. Pour chacune de ces classes, les 6 éprouvettes ont été tirées de façon aléatoire et distribuées chacune dans un des 6 groupes à créer. Et ainsi de suite jusqu'à la dernière classe de E'/ρ (26 classes pour le Padouk, 8 pour le Vèn ; Figure 160 en bas).

Ce classement a été vérifié en appliquant la même démarche, mais par un classement sur la base des coefficients d'amortissement.

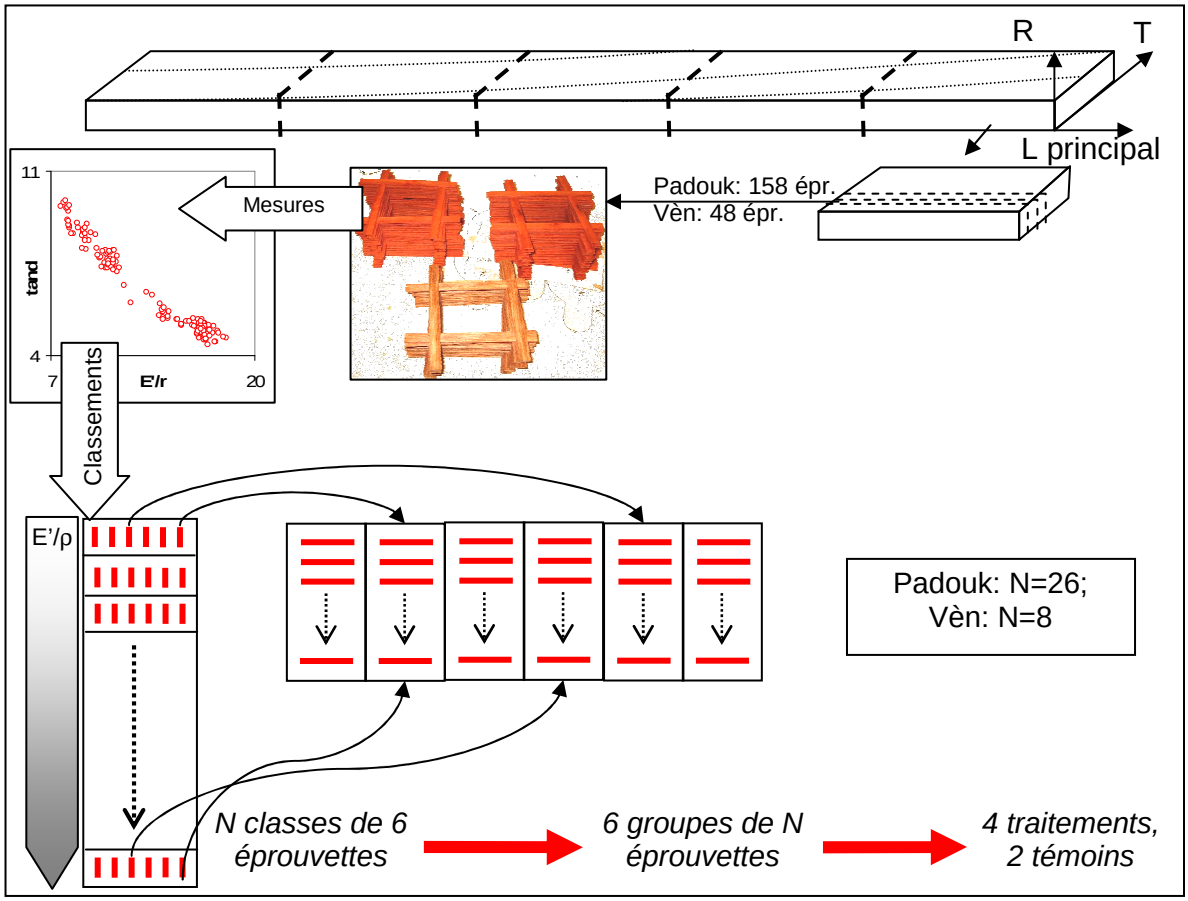


Figure 160 : Principe de préparation de groupes jumelés ayant une duraminisation homogène et des gammes étendues et identiques entre groupes de module d'Young spécifique.

Le choix de 6 groupes correspond : aux 4 types d'extractions effectuées ; à un groupe témoin qui subit toutes les étapes supplémentaires de conditionnement et de séchage, mais pas d'extraction ; enfin le 6ème était initialement destiné à une 5ème extraction par solvant très apolaire qui n'a pas encore été effectuée et il a donc servi de témoin aussi.

En plus de cette démarche de classement des propriétés mécaniques et de redistribution aléatoire dans les groupes, on a aussi vérifié que les régressions entre amortissement tanδ et module spécifique E'/ρ étaient aussi proches que possibles entre les différents groupes. Au final, ces groupes sont identiques au seuil α de 1‰.

d Protocoles d'extraction

Les solvants d'extraction à choisir peuvent dépendre de deux facteurs : types de composés visés et localisation cellulaire de ceux-ci. La sélectivité dépendra également des durées d'extraction; à priori plus elles seront longues et moins l'extraction sera sélective – mais plus elle sera complète. Dans notre cas il semblait important d'obtenir une extraction aussi complète que possible, aussi l'extraction a été poursuivie jusqu'à ce que les éluants soient nettement moins colorés, ou bien pour un temps équivalent lorsque les extraits apparaissaient dès le départ peu ou pas colorés. Après une première série d'extraction « généraliste », une deuxième série d'essais utilisant une séquence de solvants a permis une certaine sélectivité (quoique vraisemblablement non totale, les différents solvants étant appliqués en parallèle).

- Extraction « généraliste » alcool-benzène

Cette extraction a été appliquée pour différentes positions radiales de duramen de Padouk et un premier lot de duramen médian de Vèn.

Du point de vue des composés, l'extraction alcool-benzène doit dissoudre les tannins, les huiles essentielles, certains principes colorants, les gommes et les résines, mais non les graisses solubles dans l'éther [Savard 1959]. Le benzène est un solvant non polaire qui n'est sensément pas capable de pénétrer les parois cellulaires et qui extrait les composés des lumens, tandis que l'éthanol est un bon agent gonflant, capable de provoquer un gonflement équivalent à ≈83% de celui obtenu avec l'eau [Mantanis et al 1994b ; Nzokou & Kamden 2004] et pourra ainsi retirer des substances des parois, telles que tanins condensés, flavonoïdes et autres composés phénoliques. Le mélange éthanol-benzène (1 :2, V :V) qui a été employé doit ainsi retirer un spectre large de composés des lumens et des parois ; c'est aussi un des systèmes de solvants les plus souvent employés dans la littérature et dans la base du CIRAD.

Les éprouvettes ont été extraites en extracteurs de Soxhlet jusqu'à ce que la coloration des éluants diminue, sinon pour ≈24h, plus les temps de trempage à température ambiante entre deux phases d'extraction avec renouvellement. Le rinçage à l'éthanol, puis à l'eau, a été effectué à température et pression ambiantes par renouvellement des solvants (au moins 6 fois pour chaque) et agitation occasionnelle.

- Extraction par solvants de polarités croissantes sur groupes jumelés

Pour les groupes jumelés de duramen médian présentés ci-dessus, des extractions par différents solvants ont été effectuées sur 4 groupes de chaque espèce. Chaque groupe a été soumis à une extraction par un seul solvant. Ceci limite la sélectivité dans la mesure où le contenu des lumens n'aura pas été enlevé avant les extractions par solvants plus polaires, mais il aurait été très long et peut être risqué de multiplier les cycles extraction /séchage /stabilisation /séchage /extraction sur un même lot d'éprouvettes.

Le choix des solvants s'est fait à la fois d'après la littérature et d'après des essais antérieurs que nous avions effectués sur du Padouk provenant du même stock sans N° CTFT du CIRAD. Quelques remarques sur ce choix sont présentées en annexe. Les solvants effectivement employés ont été dichlorométhane; acétone ; méthanol ; eau chaude. Leurs propriétés sont résumées dans le Tableau 30.

Tableau 30 : Propriétés physico-chimiques des solvants employés.

Solvant	Constante diélectrique	Poids moléculaire	Point d'ébullition (°C)
Dichlorométhane	9,1	84,9	39
Acétone	20,7	58,1	56
Méthanol	32,6	32,0	65
Eau	78,5	18,0	100

Toutes les extractions ont été conduites en extracteurs de Soxhlet ; la température des solvants arrivant au contact des éprouvettes est donc forcément inférieure au point d'ébullition. On peut cependant penser que les solvants ont pour ces extractions en Soxhlet un pouvoir gonflant plus important qu'à température ambiante [Mantanis et al 1995a]. Par ailleurs il est plus que probable que l'extraction à l'eau chaude ne concerne pas seulement les extractibles, mais aie un effet de dépolymérisation partielle des hémicelluloses [Mantanis et al 1994a & 1995a ; Obataya communication personnelle].

Le rinçage à l'éthanol a été effectué en alternant renouvellement des solvants et agitation occasionnelle à température et pression ambiante. De même pour le rinçage à l'eau mais en alternant avec 3 cycles de 20minutes de lessivage à une pression de 40mbar. A l'issue

de la dernière « imprégnation » d'eau sous vide, les masses et dimensions saturées ont été mesurées.

- Evaluation des rendements d'extraction

Les quantités d'extraits retirées sont évaluées pour toutes les extractions par la variation de masse anhydre mesurée avant (M_{0nat}) et après (M_{0ext}) extraction. Pour chaque éprouvette, la perte de masse anhydre PM_0 est exprimée en % selon :

$$PM_0 = 100 \times \frac{M_{0nat} - M_{0ext}}{M_{0nat}}$$

Pour les extractions au dichlorométhane, à l'acétone et au méthanol, les résidus ont été pesés après évaporation sous vide des solvants. Ces résidus présentent une consistance très visqueuse et une coloration intense, rouge brique pour le Padouk et bordeaux-noir pour le Vèn. Les quantités de résidus sont rapportées à la masse anhydre nature pour chaque lot d'éprouvettes (6-8) extraites dans le même Soxhlet, selon :

$$\%résidus = 100 \times \frac{M_{résidus}}{\sum_{1}^{6-8} M_{0nat}}$$

Ces % de résidus sont probablement légèrement surestimés dans la mesure où l'évaporation sous vide n'a pas été suivie d'un séchage à 103°C, le but étant de ne pas dégrader les extraits, dans l'optique d'éventuelles analyses chimiques ultérieures.

Les pourcentages de pertes de masse et les résidus ramenés en % de la masse anhydre initiale, sont présentés au §IV.b.7.1 pour les différents échantillons et solvants.

Remarque quant aux temps d'extraction : pour les extractions à l'acétone et au méthanol sur le Padouk, les solvants continuaient à être colorés après 30h d'extraction. D'après un test effectué en renouvelant le solvant du ballon, 6h d'extraction supplémentaires n'extraient que ≈0,1% de composés en plus, bien que les solvants renouvelés restent toujours d'une coloration orangée transparente. Pour ce qui est de l'extraction généraliste, des extractions éthanol-toluène de Padouk sur des géométries différentes (20*20*10mm R*T*L) montraient un rapport de près de ½ entre 16h d'extraction et 32h [M'Bang 2003]. D'après ces observations, il semblerait qu'une extraction de ≈30h permette une extraction assez complète.

IV.b.4. Observations sur bois natifs

Ces observations préliminaires concernent deux aspects : d'une part, évaluer les variations locales de propriétés entre pièces de bois de petites dimensions, pour des bois plus ou moins fortement contrefilés lors du débit selon l'axe principal de l'arbre (ou de la pièce de bois initiale). D'autre part, comparer les propriétés vibratoires des bois de coeur des trois espèces de *Pterocarpus* échantillonnée, des aubiers de deux d'entre elles et du bois de coeur du « bois clair de référence » Divida ; ainsi que leurs recoupements éventuels entre différentes localisations ou arbre dans la mesure autorisée par notre échantillon.

IV.b.4.1. **Variations locales de propriétés**

Pour cet échantillon avec bois contrefilés, on a suivi deux modes de prélèvement : d'une part re-débits de lamelles petites en épaisseur T, à partir de carrelets normalisés sur lesquels on avait déjà mesuré la densité et le module d'Young spécifique. D'autre part le débit présenté au §IV.b.3.1.b dont le but était justement d'obtenir des variations locales ; mais pour lequel nous ne disposons pas de mesures « de référence » suivant le protocole de caractérisation suivi au CIRAD.

a Densité « sec à l'air »

Les variations de densité stabilisée (à 20°C et 65%HR) entre plusieurs lamelles issues d'un même carrelet sont mises en relation avec la densité mesurée sur le même carrelet avant débit sur la Figure 161. La dispersion apparaît non négligeable, cependant : i) de façon globale on retrouve bien un rapport très proche de l'unité entre les différentes « lamelles » et les carrelets initiaux ; ii) les coefficients de variations entre différentes lamelles issus d'un même carrelets sont ≤7,5% (soit proches ou inférieurs à l'erreur de mesure sur ces dimensions). Par comparaison avec les re-débits de bois de résineux du chapitre précédent, les coefficients de variation relevés ici sont supérieurs à ceux entre lamelles radiales jumelées en T pour les résineux (3% en moyenne vs. 1,4%), mais bien inférieurs aux coefficients de variations incluant débits radiaux et tangentiels de résineux (moyenne 5%, max 19%).

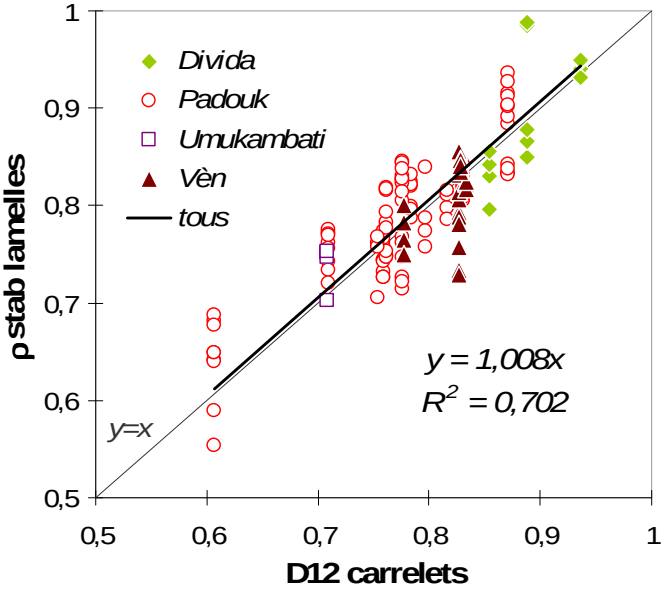


Figure 161 : Densités mesurées sur plusieurs lamelles petites en épaisseur, comparées à la densité des carrelets initiaux dont elles sont issues (à un point en abscisse correspondent plusieurs points en ordonnée).

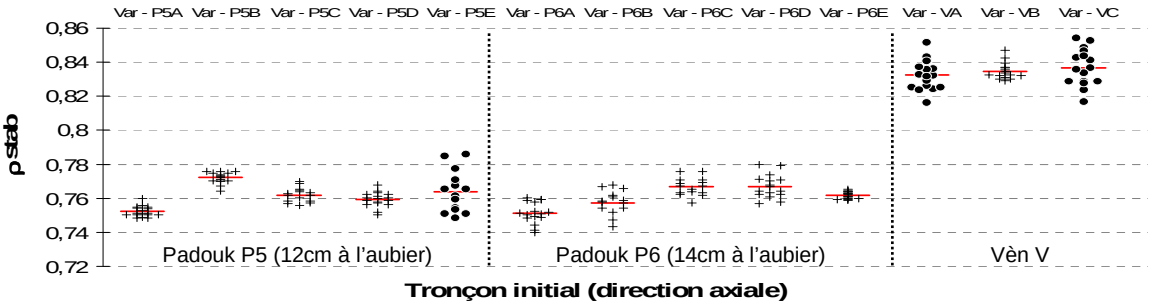


Figure 162 : Variations locales de densité sec à l'air, débits sur planches de duramen médian de Padouk et de Vèn. ● : variations significatives, + : variations de l'ordre de l'erreur de mesure.

En ce qui concerne les débits à partir de planches, les variations tangentielles sont généralement de l'ordre de l'erreur de mesure (≈3,3% ; Figure 162) sur le Padouk et un peu plus visibles sur le Vèn. Les variations sont un peu plus marquées en direction axiale.

b Module d'élasticité spécifique

Les variations de module spécifique entre différentes petites éprouvettes issues d'un même carrelet initial sont présentées sur la Figure 163 pour les débits à partir de carrelets (i. e. éprouvettes jumelles sur 20 ou 25mm en direction T et le cas échéant[47] sur 2 tronçons de 150mm en direction axiale) et sur la Figure 164 pour celles provenant de planches sur dosse (i. e. variations sur 90mm en T et sur 3 ou 5 tronçons de 150mm en direction axiale).

[47] Certaines éprouvettes normalisées (carrelets) ont été re-débitées en deux tronçons pour préparer plus d'éprouvettes lamelles. On peut trouver en annexe les variations carrelet par carrelet, pour ceux avec un, ou deux tronçons axiaux.

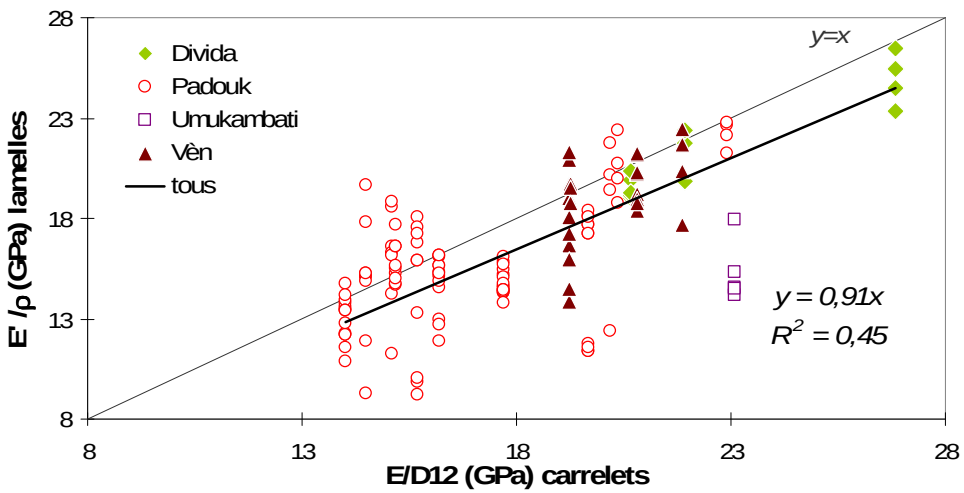


Figure 163 : Variations de module spécifique entre différentes éprouvettes « lamelles » issues d'un même carrelet initial. En abscisse : valeurs sur les carrelets, reliées chacune à plusieurs valeurs en ordonnée.

En considérant de façon globale les lamelles jumelées en T et en L, les variations entre éprouvettes de petites dimensions provenant d'un même carrelet sont importantes : coefficient de variation de 10% en moyenne et jusqu'à 23%. Soit des étendues/moyenne de 28% en moyenne et jusqu'à 70%. Ces variations sont du même ordre de grandeur que ce qui était relevé pour les résineux en incluant des débits tangentiels à l'échelle intra-cerne et beaucoup plus élevés que pour des éprouvettes radiales jumelées de résineux. On peut cependant remarquer que ce sont surtout les variations entre différents tronçons axiaux qui déterminent ce fort degré de variations (voir Figure 164 et annexe). De façon générale, les valeurs sur carrelets de 20*20mm de section sont en moyenne 10% plus élevées que sur la moyenne des éprouvettes de section 12*2 qui en proviennent.

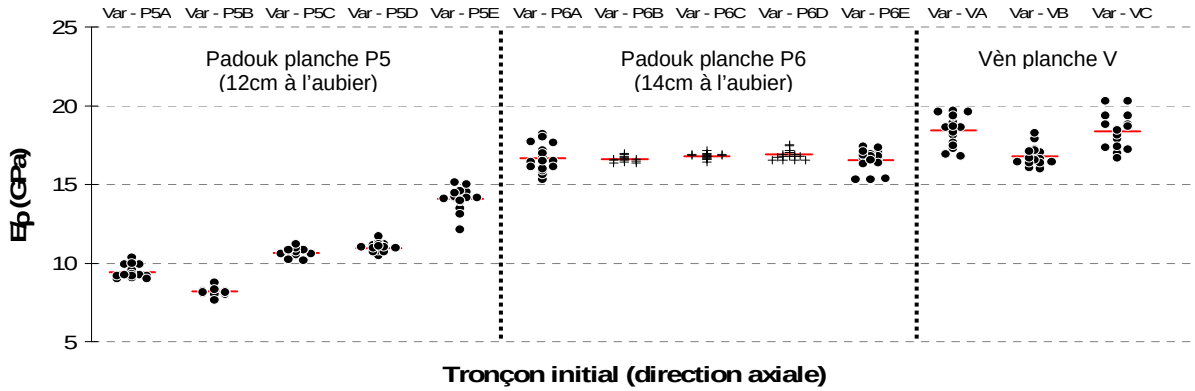


Figure 164 : Variations locales de module spécifique pour du duramen médian de Padouk et de Vèn. Chaque groupe : variations tangentielles sur 90mm ; entre groupes : en direction axiale. ● & + : voir (Figure 162).

On voit ici qu'en fait les variations tangentielles restent modérées (le rapport étendue/moyenne est ≤22% autant sur 20-25mm pour les carrelets ci-dessus que sur 90-100mm pour les tronçons de planche). Les variations de module spécifiques observées entre différents tronçons en direction axiale sont nettement plus marquées, dans les cas des pièces présentant des déviations importantes de fil. Pour le Padouk, la gamme de variation observée sur deux bandes successives de contre-fil croisé ou non (Figure 164) est très importante : 7 à 18GPa, soit une étendue du même ordre de grandeur qu'entre toutes les éprouvettes provenant de différentes positions radiales de l'aubier au duramen interne et supérieure à celle entre moyennes de différents arbres. L'étendue totale de variation sur le Vèn de cette série est plus réduite : de 16 à 21GPa environ.

c Coefficient d'amortissement en fonction du module spécifique

Ces relations sont présentées sur la Figure 165 pour les deux stocks de Padouk et de Vèn destinés aux deux séries d'extraction, en dissociant les différentes pièces initiales : carrelets pour la 1ère série (croix et tirets sur les graphiques) et tronçons axiaux de planches pour la 2ème série (ronds et triangles pour les Padouk, carrés et losanges pour le Vèn.

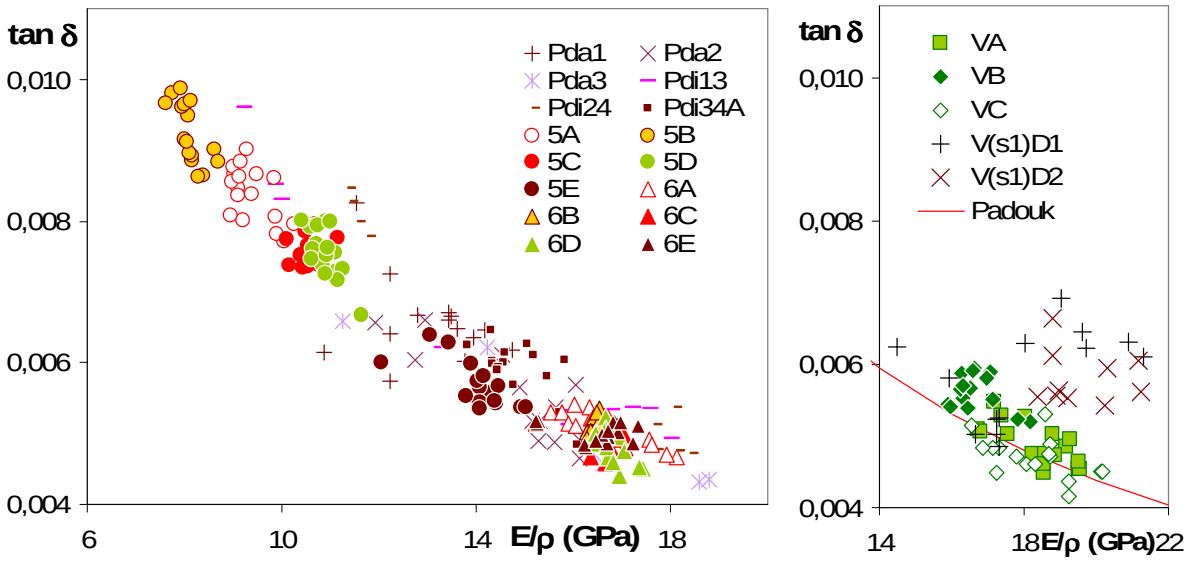


Figure 165 : Relation entre module d'élasticité spécifiques et coefficient d'amortissement pour les différentes pièces de bois initiales de Padouk (à gauche ; arbres 1 et 2) et de Vèn (à droite) destinées à l'extraction.

Pour le Padouk, du fait des importantes variations locales de module spécifique (≈7-19 GPa), les valeurs de coefficients d'amortissement sont également très contrastées (≈4‰ à 10‰). La relation entre ces deux propriétés reste par contre assez stable et les valeurs correspondant aux différentes pièces de bois initiales se recoupent assez bien même pour différentes positions radiales et deux arbres différents. Pour le Vèn, les variations de module spécifique sont beaucoup plus modérées (≈14-22GPa). Sur une même position radiale (planche V de la 2ème série) les coefficients d'amortissement tanδ suivent une évolution comparable à celle du Padouk. En revanche, sur différentes localisations du même arbre (carrelets de la 1ère série) tanδ présente des variations locales apparemment peu dépendantes de celles de E'/ρ.

La représentation (Figure 166) des variations locales du module de perte spécifique *E''/ρ (≈E/ρ * tanδ)* montre pour le Padouk une certaine stabilité : il existe des regroupements significatifs entre différentes pièces de bois initiales, mais ces regroupements se chevauchent ; par ailleurs les variations locales observées sont souvent proches ou inférieures à l'erreur relative de mesure cumulée (≈7%+7%).

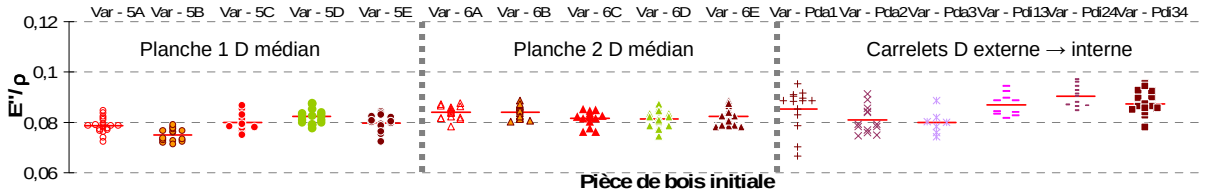


Figure 166 : Variations locales de module de perte spécifique E''/r pour les échantillons de duramen de Padouk à contre-fil marqué.

Compte tenu de cette relative stabilité, on peut définir sur cet échantillon une régression entre amortissement et module spécifique (Figure 167), à laquelle pourront être

comparés les autres spécimens de duramen de Padouk, de Vèn et d'Umukambati (dans le paragraphe suivant), puis les variations après extraction.

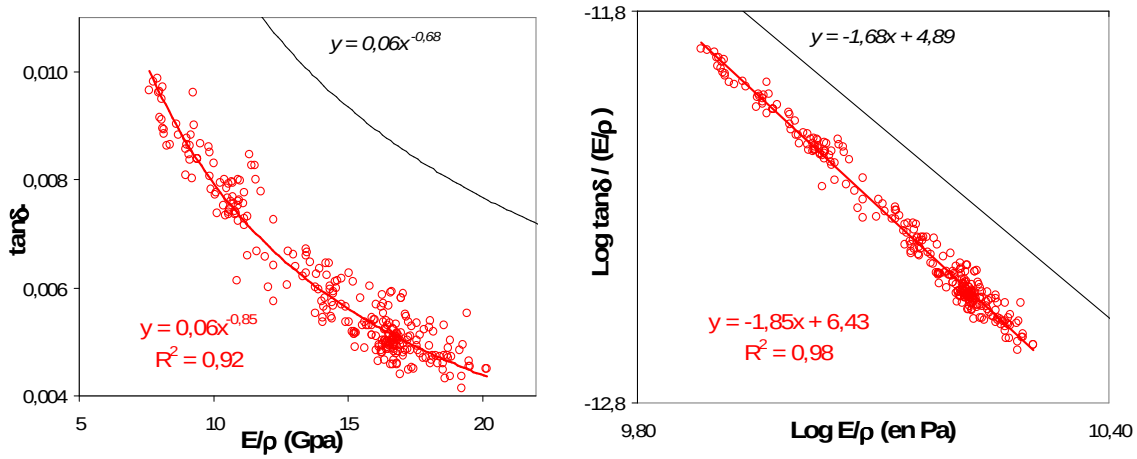


Figure 167 : Régressions sur amortissement et module spécifique pour le duramen de Padouk échantillonné.

Comme on avait déjà pu le remarquer sur différentes essences, la pente (en log, ou l'exposant en linéaire) de cette relation se rapproche de -2 et est un peu supérieure à la tendance « de référence » qui concorde entre les données de [Ono & Norimoto 1983] et celles sur les bois « relativement neutres » de notre échantillon global. Les valeurs d'amortissement, à module spécifique donné, sont de 30 à 50% plus faibles que sur des bois « neutres » (avec toujours la réserve sur la notion de bois neutres…).

d Relation entre angle de fil moyen, module spécifique et coefficient d'amortissement (Padouk de la deuxième série)

Pour le Padouk de la deuxième série d'essais, les relations entre angle de fil moyen relevé et module spécifique et coefficient d'amortissement sont présentées ci-dessous (Figure 168), pour les éprouvettes issues des différents tronçons longitudinaux des deux planches initiales.

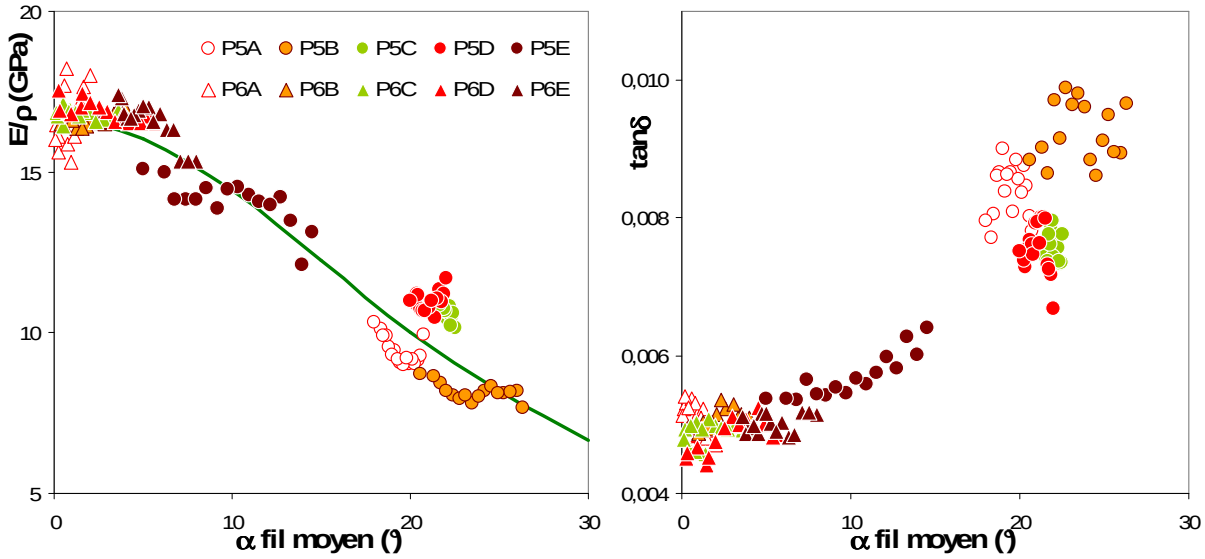


Figure 168 : Relation entre angle de fil moyen relevé et E'/ρ (à gauche ; trait plein : évolution calculée) et tanδ (à droite), pour les différents tronçons présentés sur la Figure 157 (p210).

Les tendances générales apparaissent cohérentes : diminution du module spécifique et augmentation de l'amortissement, avec l'angle de fil moyen ; ces deux propriétés restent assez

stables pour les spécimens où le fil est croisé (c'est à dire qu'il existe une zone « bien orientée » au sein de l'éprouvette : la plupart des tronçons 'P6' ci-dessus). Les écarts maximum entre deux spécimens d'angle de fil similaire sont du même ordre pour E'/ρ et pour tanδ (variation max d'un facteur ≈1,4). Pour tanδ, ces écarts sont aussi du même ordre que ce que l'on relevait au chapitre précédent en fonction de l'angle des microfibrilles. Pour E'/ρ, les écarts ici observés sont plus modérés que vis-à-vis de l'AMF pour les bois de résineux normaux/de compression. Toutefois, pour les forts angles de fil, le fait qu'on relève des écarts systématiques par tronçon rappelle qu'il s'agit de relevés assez approximatifs. Le rapport entre les valeurs maximales et minimales de E'/ρ comme de tanδ est de l'ordre de 2,3 pour cette gamme d'orientations 0°-25°. Ce rapport est comparable à celui obtenu pour le coefficient d'amortissement bois normaux/bois de compression sur une gamme d'angles de microfibrilles de 10° à 45°. Il est deux fois plus faible que le rapport entre E'/ρ le plus élevé et le plus faible entre bois normaux et de compression de résineux.

Pour ce qui est du module spécifique, l'évolution des valeurs mesurées en fonction de l'angle de fil moyen relevé concorde bien avec celle qui peut être calculée (trait plein sur la Figure 168) pour une rotation uniforme de fil de même amplitude, selon :

$$E_\theta \approx E_L \frac{(1+\tan_\theta^2)^2}{1+\tan_\theta^2(\frac{E_L}{G_{LT}}-2\upsilon_{LT})+\tan_\theta^4(\frac{E_L}{E_T})}$$

Avec : θ angle de fil moyen en radians ;

E_L : pris ici comme la valeur moyenne sur les tronçons à orientations croisées (≈centre de l'éprouvette « bien orienté ») : ≈12,77GPa.

E_L/G_{LT} : ratio E_L/module de cisaillement LT: moyenne des mesures par vibrations libres sur carrelets de Padouk à contre-fil marqué : ≈8,41.

υ_{LT} : coefficient de Poisson LT : d'après le modèle de [Guitard & El Amri 1987] pour un bois de densité anhydre ρ_0≈0,73 et teneur en eau à l'équilibre MC≈9,05% (moyenne des mesures sur cet échantillon) : ≈0,456.

E_T : idem : ≈1,37GPa.

Enfin, on peut remarquer que les valeurs maximales de module spécifique relevées ici ne sont pas très élevées : de l'ordre de 16-18GPa. Pour cet ordre de grandeur, on retrouvait sur les résineux (hors bois de compression) des angles de microfibrilles de ≈15°-25°. Cependant ces modules spécifiques doivent en fait correspondre à des valeurs un peu plus élevées si l'on déduit l'apport massique des extraits.

IV.b.4.2. **Comparaison des propriétés vibratoires entre espèces, stocks et localisations**

Dans un premier temps, on peut comparer les différentes localisations et arbres de Padouk à la régression « bois de coeur » présentée ci-dessus (Figure 169).

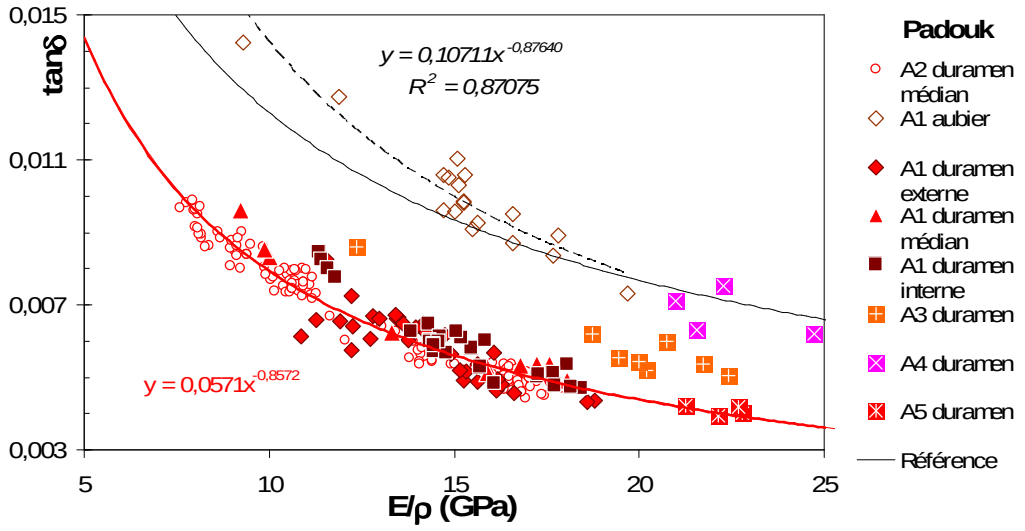


Figure 169 : Relations entre coefficients d'amortissement et module d'élasticité spécifique pour les différents échantillons de Padouk. Courbe en trait plein épais: régression « bois de cœur normal de Padouk » ; courbe en tirets : régression sur l'aubier.

Comme on l'avait remarqué dans la partie précédente, l'aubier suit une tendance similaire au bois de coeur, mais avec des valeurs d'amortissement plutôt supérieures à la référence. On peut aussi remarquer que le duramen de l'arbre 4 (Ps4) a un comportement plus proche de celui de l'aubier ; ce bois présente une duraminisation atypique par rapport à l'espèce : bois assez léger (≈0,55), clair, rosé (L* = 51 vs 38-46 pour les autres ; h* inférieur de 2° ; teneur en eau supérieure de 0,6% absolu). L'arbre 3 est intermédiaire et l'arbre 5 est dans la continuité des duramens des arbres 1 et 2.

Dans cette représentation, il n'est guère possible de repérer de différences entre les différentes localisations radiales de l'arbre 1. Les valeurs moyennes et écart types de module de perte spécifique sur ces différentes localisations, et sur les différents arbres, sont présentées sur la Figure 170.

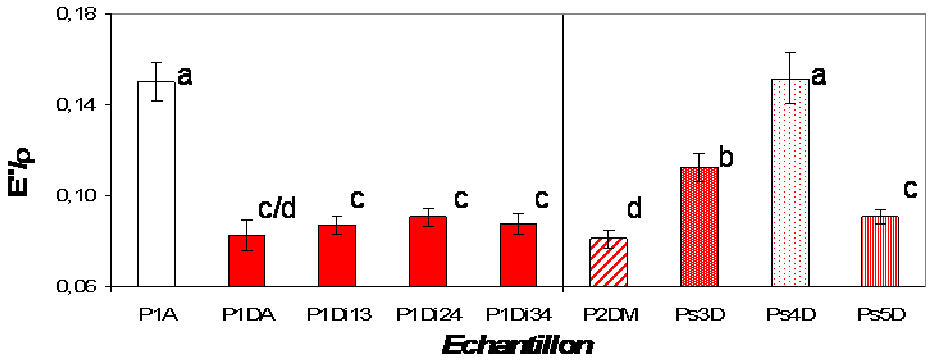


Figure 170 : Valeurs moyennes et écart types de module de perte spécifique E''/ρ, pour : aubier et différentes distances radiales de duramen sur un arbre (à gauche) ; duramen de différents arbres (à droite). a, b, c, d : groupes non différents au seuil de 0,05. Les groupes c et d correspondent à la régression « bois de cœur » adoptée plus haut.

Les différentes positions radiales de duramen ne sont pas significativement différentes sur cet échantillon (même si la moyenne de E''/ρ du duramen adjacent à l'aubier semblerait légèrement plus basse). L'aubier de l'arbre 1 et le duramen de l'arbre 4 semblent équivalents. Les modules spécifiques de perte sont du même ordre entre les duramens des arbres 1, 2 et 5. On peut aussi comparer cette tendance « bois de coeur moyen de Padouk » aux autres espèces (Figure 171 & Figure 172).

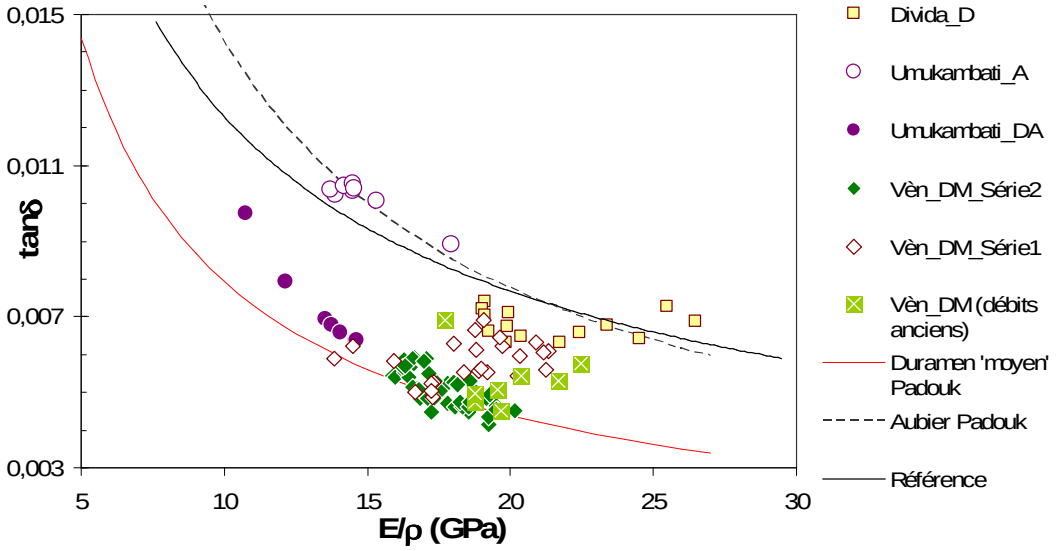


Figure 171 : Relations entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique, pour différents échantillons de duramen de Vèn ; duramen de Divida et duramen/aubier d'Umukambati.

Le bois de Vèn semble avoir –pour un seul arbre- une plus grande dispersion des coefficients d'amortissement à module spécifique donné. Une majorité de ses spécimens est proche de la tendance « duramen Padouk », mais une partie est nettement plus amortissante. Sur le graphique ci-dessus nous avons dissocié des éprouvettes provenant de certains carrelets qui avaient été débités il y a plus de 20 ans, mais celles-ci se recoupent avec les autres récemment préparées. Pour simplifier la comparaison, les valeurs moyennes et écarts-types de module de perte spécifique des différentes espèces et types de bois sont présentés sur la Figure 172.

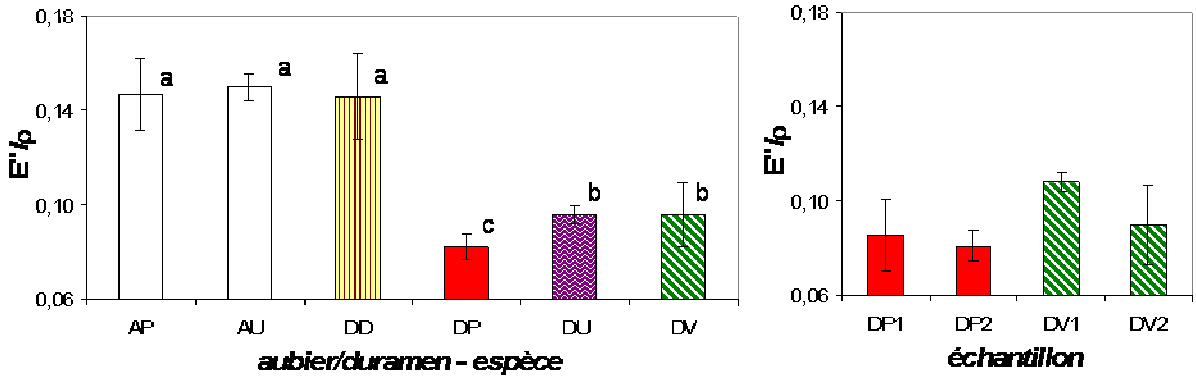


Figure 172 : Valeurs moyennes et écart types de module de perte spécifique E''/ρ, pour le duramen de Padouk (DP), Vèn (DV), Umukambati (DU) et Divida (DD) et aubier de Padouk (AP) et d'Umukambati (AU). (a, b, c) :groupes non différents au seuil de 0,05. A droite : les indices 1 et 2 correspondent aux échantillons de duramen de Padouk et de Vèn étudiés lors de la 1ère et 2ème série d'essais avec extractions, respectivement.

Pour le Padouk, ces moyennes ne prennent pas en compte le duramen « bizarre » de l'arbre 4. Les aubiers de Padouk et d'Umukambati ont des modules de perte équivalents entre eux et avec le « bois clair » de Divida. A première vue, le duramen de Padouk a des E''/ρ moyens un peu plus faibles que ceux de Vèn et d'Umukambati. Cependant, l'échantillon n'est pas suffisant –surtout pour ces deux dernières espèces- pour en retirer de conclusion plus générale. Notamment, pour pouvoir mettre en relation valeurs d'amortissement « intrinsèque » et composition qualitative en métabolites secondaires, il faudrait disposer des données chimiques exactes sur ces arbres/spécimens. Enfin, d'après la Figure 172 à droite, on peut remarquer que les échantillons étudiés lors de la première et de la deuxième série d'extraction sont légèrement différents pour chaque espèce. Les différences entre moyennes

sont plus importantes pour le Vèn, alors qu'il s'agît d'un seul arbre, que pour le Padouk (2 arbres différents).

IV.b.5. Rendements d'extraction pour les différents solvants et échantillons

Les résultats des modifications physico-mécaniques provoquées par l'extraction de métabolites secondaires sont présentés séparément selon qu'il s'agisse d'une extraction « généraliste », ou par différents solvants. Cependant, il nous semble intéressant de comparer les quantités d'extractibles retirées pour ces deux séries d'essais et pour les différents stocks de matériel étudiés.

Les pertes de masses anhydres et les pourcentages de résidus le cas échéants, obtenus pour les différentes extractions (première et deuxième série d'essais) sont présentés sur le Tableau 31 et résumés sur la Figure 173.

Tableau 31 : Pertes de masses anhydres après extraction par différents solvants (A-B : éthanol benzène (1:2) ; DichloM : dichlorométhane ; Ace : acétone). DE : Duramen externe ; DM : médian ; DI : interne.

Essence	Solvants	localisation radiale	durée extraction (h)	*n*	PM_0 % moy	et	CV%	%résidus moy
Padouk	A-B	DE	≈24	*19*	13,87	5,95	43	
		DM	≈24	*10*	11,35	1,97	17	
		DI	≈24	*6*	11,55	3,45	30	
	DichloM	DM	20	*26*	3,12	0,49	16	3,14
	Ace	DM	≥30	*26*	8,76	0,66	8	11,18
	MethOH	DM	≥30	*26*	13,38	0,63	5	14,70
	Eau	DM	20	*26*	0,60	0,24	39	
Vèn	A-B	DM	≈24	*10*	17,92	4,33	24	
	DichloM	DM	18	*8*	10,87	0,95	9	11,46
	Ace	DM	27	*8*	20,46	0,78	4	22,73
	MethOH	DM	27	*8*	20,05	0,69	3	22,29
	Eau	DM	20	*8*	1,64	0,37	23	

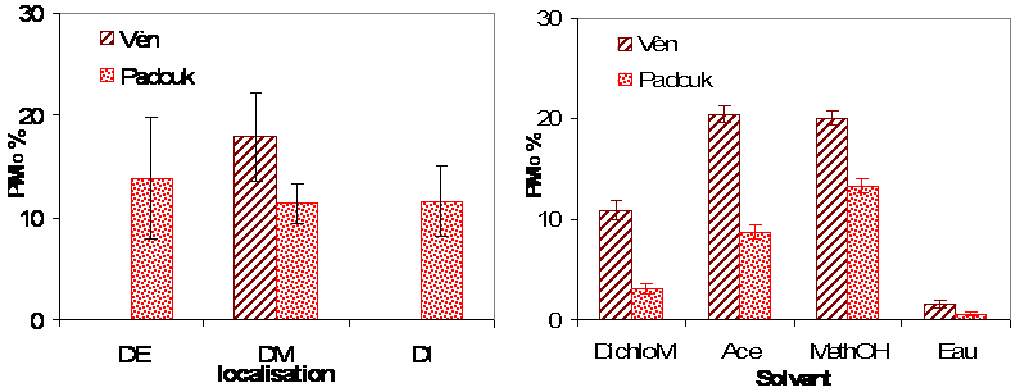


Figure 173 : % de pertes de masse anhydre après extraction : à l'éthanol benzène (à gauche), duramen médian de Vèn et différentes positions radiales de duramen de Padouk (DE : Duramen externe ; DM : médian ; DI : interne); par différents solvants en parallèle (à droite), duramen médian de Padouk et de Vèn.

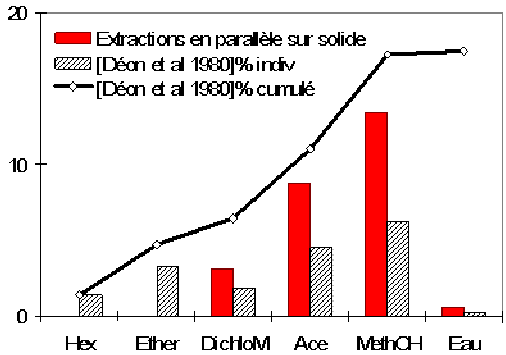
Les rendements de l'extraction alcool-benzène sont plus faibles que l'extraction au MéthOH et présentent des coefficients de variations bien plus importants, ces deux points pouvant être attribués aux différences d'échantillons, comme à la durée d'extraction plus courte. Les quantités extraites du duramen adjacent à l'aubier (Padouk) semblent légèrement supérieures à celles retirées du duramen médian ou interne, mais cette différence n'est pas

significative compte tenu des CV importants. Les quantités extraites sont systématiquement plus importantes pour le Vèn que pour le Padouk, pour tous les solvants. Pour les extractions en parallèle, le solvant le plus « efficace » est le méthanol, qui extrait vraisemblablement une grande majorité des composés présents. Pour le Vèn, l'extraction acétonique a une égale efficacité, tandis que sur le Padouk elle est d'environs 65% de celle au MéthOH. L'extraction au dichlorométhane touche aussi beaucoup plus de composés du Vèn (près de 11%) que du Padouk (≈3%). L'extraction à l'eau chaude est très peu efficace. Elle touche cependant un petit peu plus de composés du Vèn (≈1,6%) que du Padouk (0,6%). Les rendements élevés pour le méthanol semblent indiquer que ce solvant récupère à la fois une grande part des composés des parois et de ceux des lumens. Cependant il est probable que pour ces extractions en parallèle il y ait des composés très apolaires résiduels dans les lumens. Par ailleurs comme on l'a déjà signalé il est probable que l'on n'extraie jamais la stricte totalité des composés, notamment des parois et surtout par extraction sur solide.

Pour ce qui est du Padouk, on peut comparer ces rendements obtenus en parallèle sur matériel solide avec les données de [Déon et al 1980 ; Déon et Schwartz 1988] pour des extractions en série sur matériel broyé (Tableau 32 et figure).

Tableau 32 : Rendements d'extraction obtenus sur du duramen de Padouk par solvants successifs en série d'après [Déon et al 1980&1988] : extraction en soxhlet sur broyats. Et comparaison des rendements que nous obtenons par extraction en parallèle sur matériel solide.

Extractions en série de [Déon et al 1980]			Comparaison avec nos extractions en parallèle
Solvant	%cumulé (mesuré)	%individuel (calculé)	
hexane	1,4	1,4	
éther éthylique	4,68	3,28	
dichlorométhane	6,48	1,80	
acétone	10,98	4,50	
méthanol	17,23	6,25	
eau	17,44	0,21	



En incluant les extractions à l'hexane et à l'eau chaude de ces auteurs, le rapport de composés récupérés par les solvants apolaires et polaires était de 37-63. Le solvant le moins polaire que nous ayons employé, le dichlorométhane, ne semble pas capable de récupérer les fractions d'extraits les plus apolaires. D'après la comparaison des rendements que nous obtenons avec l'évolution de pourcentages cumulés de ces auteurs et compte tenu du matériel végétal forcément différent et de l'extraction supplémentaire à l'éther dans cette référence, acétone et méthanol semblent bien extraire une bonne part des composés retrouvés pour des extractions par solvants moins polaires.

IV.b.6. Effet d'une extraction généraliste sur les propriétés vibratoires (première série d'essai)

L'objectif de cette première série d'essai était d'abord de vérifier l'implication des métabolites secondaires dans les propriétés physico-mécaniques particulières du Padouk et du Vèn (faibles amortissements, faible hygroscopicité). Le système de solvant était l'éthanol benzène (1 :2 V :V). Pour le Padouk, l'échantillon étudié natif puis extrait comprenait du bois de coeur adjacent à l'aubier, du duramen médian et interne. Pour le Vèn l'échantillon était très réduit : 10 éprouvettes de duramen médian.

Les relations entre variations de coefficient d'amortissement tanδ et perte de masse anhydre, pour ces 4 types de bois, sont présentées sur la Figure 174.

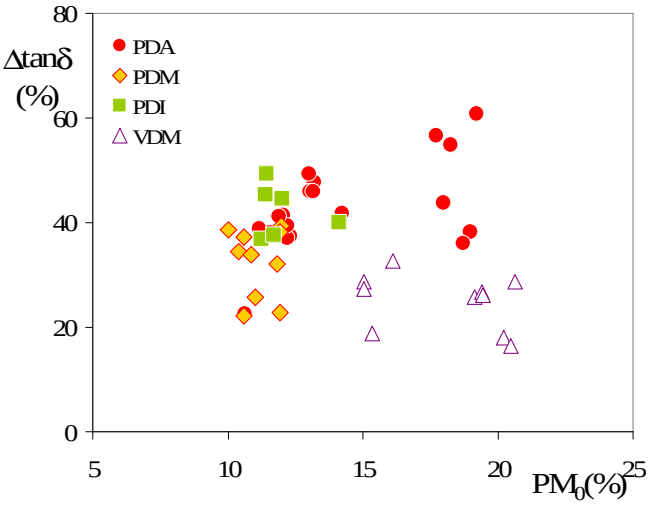


Figure 174 : Variation de tanδ en fonction de la perte de masse anhydre après extraction AB. Symboles pleins : duramen Padouk ; triangles ouvert : duramen Vèn.

De façon générale, l'extraction s'était traduite par une nette augmentation des coefficients d'amortissements : de +15 à +60%, pour des pertes de masse de ≈10 à 20%.

Comme on l'a vu au §IV.b.5, la perte de masse anhydre était la plus importante pour le Vèn. Cependant ce fort rendement d'extraction se traduisait par une augmentation plus modérée du coefficient d'amortissement que celle relevée pour le duramen de Padouk considéré de façon globale. Parmi les différentes localisations radiales de celui-ci, aucune tendance manifeste n'était observée : les variations d'amortissement étaient statistiquement similaires entre duramen adjacent à l'aubier et duramen interne, tandis que les variations sur le duramen médian étaient comparables à celles du Vèn, mais pour des pertes de masse inférieures de ≈40% en moyenne à celles du Vèn. Ceci dit les coefficients de variations assez importants pour chaque groupe suggèrent aussi que l'extraction n'était pas forcément homogène (effet des temps d'extraction ? du matériel lui-même ?).

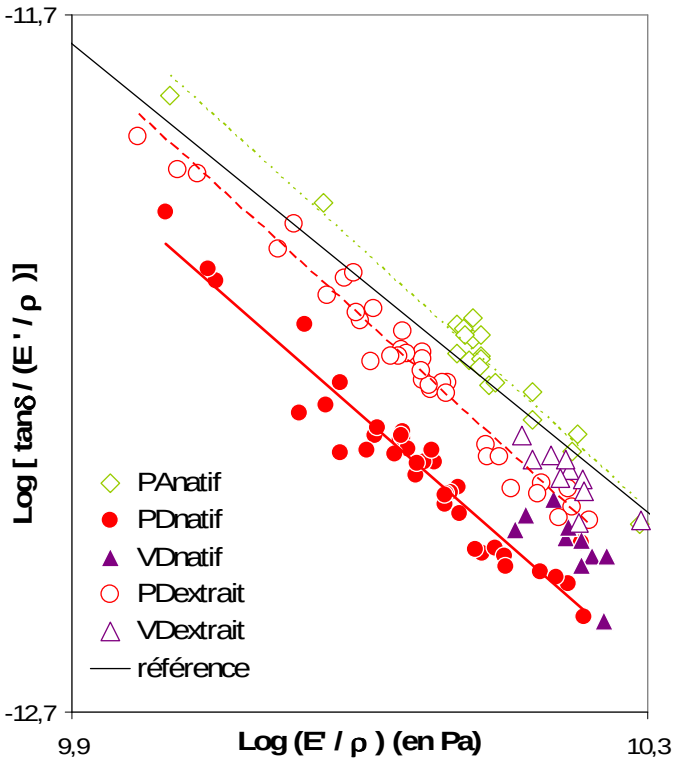


Figure 175 : Représentation en échelle logarithmique des amortissements et modules spécifique des duramens de Padouk et de Vèn natif puis extraits et de l'aubier de Padouk.

Sur la Figure 175, on compare les tendances de propriétés vibratoires de ces échantillons de duramen de Padouk (de façon globale puisque les différences entre localisations ne sont ici pas significatives) et de Vèn, dans leur état natif puis extrait, avec celles de l'aubier de Padouk et avec la tendance de référence.

Pour le Padouk, les régressions entre tanδ/(E'/ρ) et E'/ρ en échelle logarithmique sont bien parallèles entre l'aubier, le duramen natif et le duramen extrait. Après extraction, le fort décalage du duramen vers de faibles valeurs d'amortissement est très nettement réduit, mais sans atteindre les valeurs de l'aubier. Cette régression « duramen extrait » se rapproche de la tendance de référence pour les valeurs faibles de E'/ρ, mais en reste assez éloignée pour les valeurs plus élevées de module spécifique (pente plus aigue).

Pour le Padouk les importantes variations locales permettaient d'observer ces relations sur une bonne étendue de module spécifique. En ce qui concerne le Vèn qui était échantillonné, on constate que ses valeurs d'amortissement « intrinsèque » à l'état natif étaient en fait intermédiaires entre le duramen natif et le duramen extrait de Padouk, mais plutôt plus proches du duramen de Padouk extrait. Ce petit échantillon de duramen de Vèn est après extraction plus proche de la référence que ne l'est le duramen de Padouk extrait, pour cette gamme de E'/ρ.

Si l'on relie ces observations aux pertes de masse relativement plus fortes obtenues sur ces spécimens de Vèn que sur le Padouk considéré, ceci pourrait suggérer que pour l'échantillon de Vèn qui était alors étudié, une bonne proportion des composés extractibles : i) soit étaient localisés dans les lumens ; i) soit étaient de par leur nature moins « actifs » sur la diminution des coefficients d'amortissement que ceux du stock de Padouk étudié. En tout état de cause, ce stock de Vèn présentait (cf. p 222) des modules de perte spécifiques significativement plus élevés que celui qui sera étudié dans la deuxième série d'essai –alors que les deux proviennent de duramen médian d'un même arbre. Ceci mériterait d'être approfondi par des études de variabilité, surtout si l'on considère en parallèle que les différentes localisations radiales du Padouk étudié dans cette section ne sont pas significativement différentes entre elles et ne le sont que faiblement avec deux autres arbres de l'échantillon.

En parallèle, cette extraction « généraliste » se traduisait également par une augmentation de la teneur en eau à l'équilibre, qui devenait alors similaire à celle de l'aubier de Padouk. Pour le Padouk, des mesures de retraits totaux sur bois natif puis extrait avaient aussi été effectuées. Celles-ci indiquaient que l'augmentation globale du retrait volumique après extraction résultait de deux effets superposés : diminution du volume anhydre et augmentation de la teneur en eau à proximité du Psf, le volume « quasi-saturé » n'étant sensiblement pas affecté [M'Bang 2003 ; Brémaud et al 2004a].

Cette première série d'essais avait permis de vérifier que les composés extractibles du bois de coeur du Padouk (et d'un petit échantillon de Vèn) étaient bien responsables de leurs faibles valeurs d'amortissement et suggérait que des différences qualitatives pouvaient exister entre les deux espèces – ne serait-ce qu'en terme du rapport entre quantité d'extraits retirés et amplitude de modification de l'amortissement. A partir de ces premières observations, le protocole de la deuxième série d'essai a été établi, avec entre autres pour objectifs : d'appliquer plusieurs types d'extraction tout en maîtrisant mieux l'homogénéité des rendements pour chacun ; de prendre un peu plus en compte les modifications physiques accompagnant celles des propriétés vibratoires, en restant sur les mêmes pièces de bois.

IV.b.7. Effets d'une extraction séquentielle sur les propriétés physico-mécaniques (deuxième série d'essais)

Cette deuxième série d'essais s'est focalisée sur l'observation des modifications de propriétés suite aux extractions par quatre solvants (dichlorométhane, acétone, méthanol, eau chaude) sur du matériel de composition native aussi homogène que possible. Pour le Padouk, on dispose aussi d'une gamme étendue d'angle de fil à l'échelle locale (cf § IV.b.7.3.d).

Dans un premier temps, on observe les tendances globales de modifications physico-mécaniques provoquées par les différents traitements pour les deux essences. Puis on examinera des caractéristiques physiques (volume, teneur en eau et couleur) et leurs variations en tant qu'indicateurs des types de modifications provoquées au sein du bois. Les variations

de propriétés vibratoires suite aux extractions seront envisagées en relation avec ces indicateurs, ainsi que comparées aux gammes de valeurs à l'état natif (liées aux orientations).

IV.b.7.1. **Observation globale des modifications physico-mécaniques provoquées par les extractions**

Dans cette première approche, on considère les effets des 4 traitements sur les différentes propriétés mesurées (physiques, colorimétriques, vibratoires) en les comparant. Les résultats obtenus sur le Vèn et sur le Padouk sont présentés en parallèle.

a Propriétés des bois natifs et extraits

Les valeurs moyennes et écart-types de densité 'sec à l'air', de teneur en eau, de gonflement partiel volumique et des paramètres colorimétriques L*a*b*, ainsi que les valeurs moyennes et étendues de variations (minimum et maximum) de module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement sont présentés sur le Tableau 33, pour les bois de Padouk et de Vèn à l'état natif (158 et 48 spécimens) et après les quatre types d'extraction (N=26 chacune pour le Padouk, 8 pour le Vèn). Toutes les propriétés sont présentées « brutes », telles que mesurées : on verra plus loin que des correctifs peuvent être nécessaires pour les comparaisons bois extrait/bois natif.

Tableau 33 : Valeurs moyennes et écart-types (ou minimum et maximum pour modules et coefficient d'amortissement) des propriétés physico-mécaniques des bois de Padouk et de Vèn dans leur état natif puis après les 4 types d'extraction. Les abréviations correspondent à celles déjà employées.

		ρs		E' (Gpa)			E'/ρ (Gpa)			tanδ (‰)			MC (%)		gVol (%)		L*	a*	b*
		m	et	m	min	max	m	min	max	m	min	max	m	et	m	et	m	m	m
Padouk	N	0,76	0,01	10,2	5,8	13,4	13,5	7,6	18,1	6,4	4,4	9,9	7,84	0,16	3,5	0,5	45,7	30,5	33,3
	Dic	0,75	0,01	10,0	5,5	13,1	13,3	7,4	17,8	7,5	5,4	11,2	8,15	0,16	3,5	0,4	46,8	30,6	32,5
	Ace	0,71	0,01	9,4	5,3	12,7	13,3	7,3	18,0	8,6	6,0	12,8	8,75	0,15	3,6	0,4	48,6	30,9	33,8
	Met	0,70	0,01	9,2	4,9	12,2	13,3	7,0	17,5	10,1	7,0	15,2	9,89	0,31	4,2	0,4	55,6	28,7	34,1
	Eau	0,76	0,01	9,8	5,7	12,8	12,9	7,4	17,1	7,3	5,3	10,8	7,85	0,13	3,1	0,4	41,7	29,3	30,1
Vèn	N	0,83	0,01	14,8	13,1	16,7	17,8	15,9	20,2	5,1	4,1	5,9	6,47	0,12	3,3	0,4	51,9	18,1	25,6
	Dic	0,78	0,01	14,5	13,0	16,3	18,6	16,7	20,8	6,4	5,8	7,3	8,13	0,49	3,2	0,3	56,9	16,1	25,8
	Ace	0,72	0,01	13,3	11,9	14,3	18,5	16,6	20,0	7,6	6,7	8,7	9,52	0,09	4,1	0,5	57,4	15,6	26,2
	Met	0,72	0,01	13,1	11,8	15,2	18,1	16,3	20,7	8,6	7,4	10,4	10,15	0,09	4,2	0,2	58,8	14,9	25,6
	Eau	0,83	0,01	14,3	13,2	15,6	17,2	15,8	18,9	6,5	5,6	7,5	6,84	0,14	2,5	0,5	50,9	18,1	25,0

Comme on l'avait déjà souligné, le contre-fil plus marqué du Padouk étudié se traduit par une gamme plus étendue des propriétés vibratoires. Les valeurs minimales d'amortissement à l'état natif sont un peu inférieures pour le Vèn (qui a aussi des valeurs max de module spécifique plus élevées). Après les extractions les plus efficaces, ce bois a par contre des amortissements min un peu plus élevés que ceux du Padouk. La teneur en eau du bois natif est nettement plus faible pour le Vèn ; après extraction les deux bois deviennent comparables : MC de l'ordre de ≈10% (écart-type assez important sur le Padouk).

Après l'extraction la plus efficace (Ace pour le Vèn, Met pour le Padouk), les densités de ces deux bois sont proches. Le Padouk même extrait reste plus « rouge » que le Vèn natif.

b Corrélations entre perte de masse et variations physico-mécaniques

Les matrices de corrélations entre perte de masse anhydre et variations de propriétés sont présentées sur le Tableau 34 pour le Padouk et sur le Tableau 35 pour le Vèn. Ces corrélations sont à l'échelle des éprouvettes (=pièces de bois de petites dimensions) et recouvrent pour chaque espèce les 4 traitements (le nombre d'éprouvettes est identique pour chaque traitement : 26 pour le Padouk et 8 pour le Vèn).

Tableau 34 : Padouk, toutes extractions confondues : matrice des corrélations entre perte de masse (PM_0 , exprimée en valeurs positives), variations (Δ) de propriétés physico-mécaniques (extrait – natif)/natif et angle de fil. V : volume. Souligné : relation expliquant au moins 75% des variations observées ; italique : au moins 50%.

N=104	PM_0	ΔV_0	ΔVs	Δρs	ΔE'/ρ	ΔE'	Δtanδ	ΔE"/ρ	ΔMC	ΔgL	ΔgRT	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔC	Δh*	αfil
PM_0	1	***(-)	***(-)	***(-)	**	***(-)	***	***	***	_	***	***	10% (-)	***	***	***	_
ΔV_0	**-0,87**	1	***	***	**(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	_	***(-)	***(-)	**	***(-)	**(-)	***(-)	_
ΔVs	**-0,89**	**0,92**	1	***	***(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	_	***(-)	***(-)	*	***(-)	***(-)	***(-)	10%
Δρs	**-0,99**	*0,82*	*0,82*	1	**(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	_	***(-)	***(-)	_	***(-)	***(-)	***(-)	_
ΔE'/ρ	0,30	-0,31	-0,47	-0,26	1	***	*	***	_	_	_	**	_	**	*	**	***(-)
ΔE'	-0,67	0,51	0,39	0,70	0,50	1	***(-)	***(-)	***(-)	_	***(-)	***(-)	_	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)
Δtanδ	**0,89**	*-0,82*	*-0,84*	*-0,86*	0,21	-0,62	1	***	***	_	***	***	**(-)	***	*	***	_
ΔE"/ρ	**0,91**	**-0,87**	**-0,90**	*-0,86*	0,40	-0,48	**0,97**	1	***	_	***	***	**(-)	***	**	***	_
ΔMC	*0,72*	*-0,71*	-0,68	-0,65	-0,08	-0,64	*0,78*	*0,72*	1	_	***	***	***(-)	**	_	***	**
ΔgL	0,08	-0,06	-0,10	-0,07	0,05	-0,03	0,15	0,14	0,12	1	_	_	_	_	_	_	_
ΔgRT	0,46	-0,70	-0,38	-0,45	-0,11	-0,49	0,42	0,43	0,48	-0,11	1	***	*(-)	0,181	_	***	**
ΔL*	**0,92**	**-0,88**	**-0,88**	**-0,89**	0,26	-0,60	*0,84*	*0,86*	*0,73*	0,10	0,47	1	_	***	***	***	_
Δa*	-0,19	0,29	0,25	0,13	0,03	0,14	-0,31	-0,29	-0,47	-0,15	-0,24	-0,14	1	***	***	_	_
Δb*	0,63	-0,52	-0,58	-0,64	0,30	-0,35	0,48	0,52	0,26	-0,03	0,18	*0,74*	0,47	1	***	***	_
ΔC	0,41	-0,29	-0,34	-0,43	0,24	-0,21	0,24	0,28	0,02	-0,08	0,04	0,51	*0,74*	**0,94**	1	***	_
Δh*	*0,84*	*-0,78*	*-0,81*	*-0,81*	0,32	-0,49	*0,75*	*0,78*	0,61	0,08	0,36	**0,92**	-0,14	*0,80*	0,55	1	_
αfil	0,01	0,01	0,17	-0,03	*-0,84*	-0,64	0,08	-0,09	0,25	-0,01	0,29	-0,02	-0,04	-0,11	-0,10	-0,09	1

Tableau 35 : Vèn, toutes extractions confondues : matrice des corrélations entre perte de masse (PM_0 , exprimée en valeurs positives) et variations de propriétés physico-mécaniques (extrait – natif)/natif.

N=32	PM_0	ΔV_0	ΔVs	Δρs	ΔE'/ρ	ΔE'	Δtanδ	ΔE"/ρ	ΔMC	ΔgL	ΔgRT	ΔL*	Δa*	Δb*	ΔC	Δh*
PM_0	1	***(-)	***(-)	***(-)	***	***(-)	***	***	***	*	***	***	***(-)			***
ΔV_0	**-0,97**	1	***	***	***(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)	***			***(-)
ΔVs	**-0,96**	**0,97**	1	***	***(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)	***			***(-)
Δρs	**-0,99**	**0,94**	**0,92**	1	***(-)	***	***(-)	***(-)	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)	***			***(-)
ΔE'/ρ	*0,77*	-0,71	-0,68	*-0,78*	1	*(-)	*	***	***		***	***	**(-)	*		***
ΔE'	**-0,90**	**0,88**	*0,86*	**0,90**	-0,44	1	***(-)	***(-)	***(-)	*(-)	***(-)	***(-)	***			***(-)
Δtanδ	*0,80*	*-0,85*	*-0,85*	*-0,76*	0,37	*-0,85*	1	***	***	**	***	*	***(-)		*(-)	***
ΔE"/ρ	**0,90**	**-0,93**	**-0,92**	**-0,87**	0,56	*-0,86*	**0,98**	1	***	**	***	**	***(-)		*(-)	***
ΔMC	*0,85*	**-0,88**	**-0,90**	*-0,80*	0,57	*-0,75*	*0,86*	**0,90**	1	*	***	**	***(-)		*(-)	***
ΔgL	0,39	-0,45	-0,36	-0,39	0,17	-0,43	0,52	0,51	0,38	1	**		***(-)	*(-)	***(-)	10%
ΔgRT	*0,76*	*-0,83*	-0,68	*-0,77*	0,62	-0,68	0,66	*0,75*	0,64	0,50	1	***	***(-)			***
ΔL*	*0,79*	*-0,71*	-0,67	*-0,81*	*0,76*	-0,64	0,40	0,54	0,53	0,17	0,63	1	***(-)	***		***
Δa*	*-0,80*	*0,80*	*0,76*	*0,79*	-0,53	*0,75*	*-0,72*	*-0,77*	*-0,76*	-0,61	-0,70	-0,59	1		***	***(-)
Δb*	0,23	-0,14	-0,15	-0,26	0,39	-0,12	-0,13	-0,02	-0,01	-0,44	0,11	0,56	0,28	1	***	*
ΔC	-0,20	0,26	0,24	0,16	0,05	0,26	-0,43	-0,37	-0,36	-0,62	-0,24	0,15	0,68	**0,89**	1	
Δh*	**0,92**	**-0,87**	*-0,83*	**-0,93**	*0,75*	*-0,81*	0,62	*0,74*	*0,74*	0,30	*0,75*	**0,92**	*-0,78*	0,38	-0,07	1

Remarque : les corrélations ci-dessus correspondent aux données « brutes », telles que mesurées. On verra que dans certains cas il est nécessaire d'appliquer des correctifs. Ici seule la variation de teneur en eau a été corrigée, ses variations n'ayant pas de sens physique sans correctif (cf p. 233).

De façon générale, la perte de masse anhydre (i.e. rendement d'extraction) est bien corrélée avec sensiblement toutes les variations de propriétés pour les deux espèces : - avec volume, densité, module d'Young, angle de teinte ; + avec module d'élasticité spécifique, coefficient d'amortissement et module de perte spécifique, + avec teneur en eau, gonflement transverse, clarté et angle de teinte.

On peut remarquer quelques points sur lesquels nous allons revenir:

i) les variations d'amortissement sont bien liées (+) à celles de la teneur en eau et (-) du volume anhydre.

ii) dans le cas du Padouk la perte de masse en elle seule n'explique en fait que <10% des variations de module spécifique, qui sont en revanche très liées à l'angle de fil ; tandis que

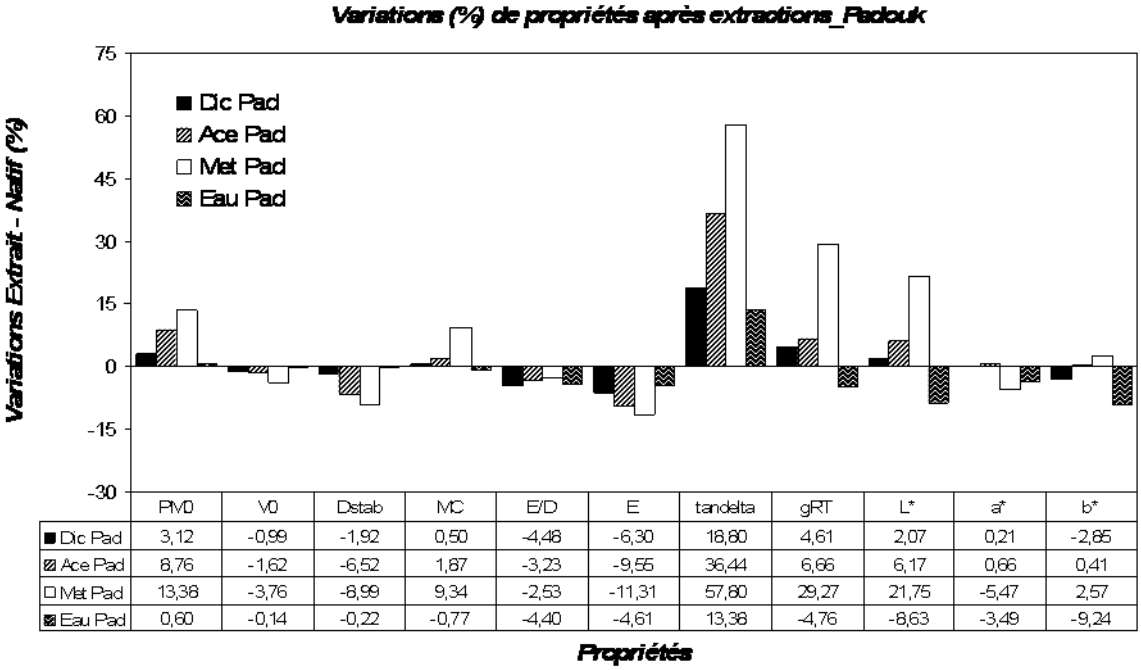
pour le Vèn qui a moins de variations d'orientation les modifications de E'/ρ sont bien liées à la perte de masse. L'angle de fil n'est pas lié aux variations d'amortissement.

iii) l'augmentation du gonflement transverse est plus liée à la diminution de volume anhydre qu'à l'augmentation de la teneur en eau ou de la perte de masse.

iv) la perte de masse se répercute sur les paramètres colorimétriques de façons différentes entre les deux espèces. De même pour les liens entre variations d'amortissement et de couleur.

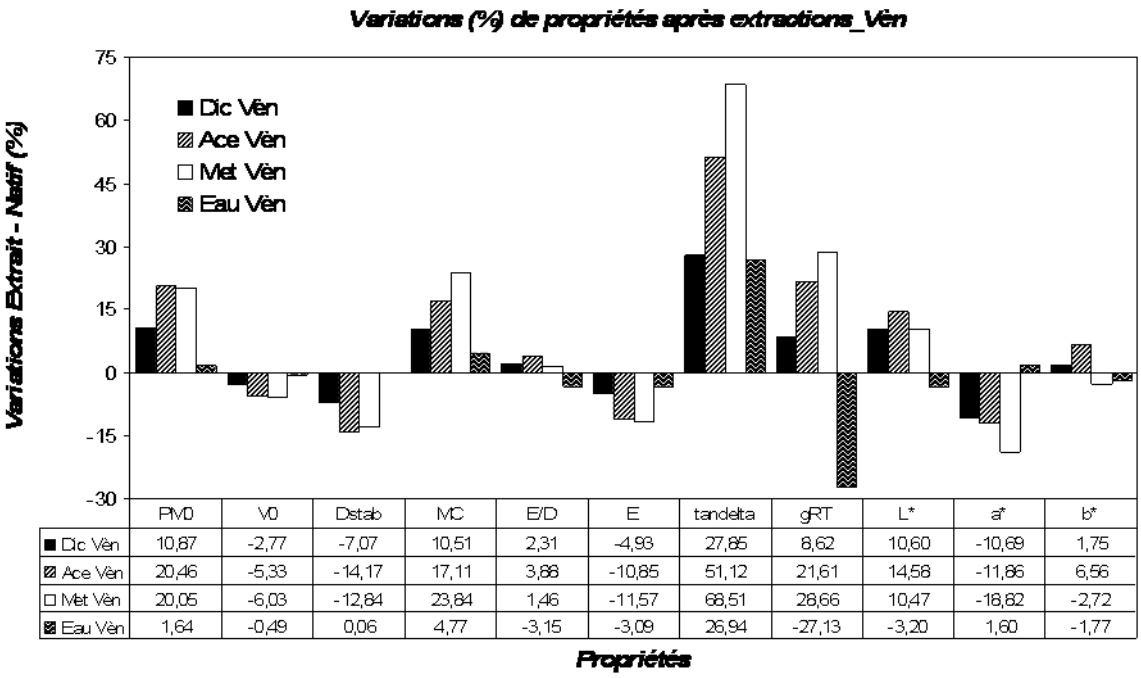
c « Signatures » de modifications physico-mécaniques des différents solvants

Suite à ces premières observations, on peut observer l'amplitude effective des variations de propriétés, selon le solvant appliqué et les propriétés considérées. Les valeurs moyennes de ces variations sont présentées sur la Figure 176 pour le Padouk et sur la Figure 177 pour le Vèn.



	PM0	V0	Dstab	MC	E/D	E	tandelta	gRT	L*	a*	b*
Dic Pad	3,12	-0,99	-1,92	0,50	-4,48	-6,30	18,80	4,61	2,07	0,21	-2,85
Ace Pad	8,76	-1,62	-6,52	1,87	-3,23	-9,55	36,44	6,66	6,17	0,66	0,41
Met Pad	13,38	-3,76	-8,99	9,34	-2,53	-11,31	57,80	29,27	21,75	-5,47	2,57
Eau Pad	0,60	-0,14	-0,22	-0,77	-4,40	-4,61	13,38	-4,76	-8,63	-3,49	-9,24

Figure 176 : Padouk : valeurs moyennes de modifications physico-mécaniques après différentes extractions, exprimées en % (extrait-natif)/natif.



	PMO	VO	Dstab	MC	E/D	E	tandelta	gRT	L*	a*	b*
Dic Vèn	10,87	-2,77	-7,07	10,51	2,31	-4,93	27,85	8,62	10,60	-10,69	1,75
Ace Vèn	20,46	-5,33	-14,17	17,11	3,88	-10,85	51,12	21,61	14,58	-11,86	6,56
Met Vèn	20,05	-6,03	-12,84	23,84	1,46	-11,57	68,51	28,66	10,47	-18,82	-2,72
Eau Vèn	1,64	-0,49	0,06	4,77	-3,15	-3,09	26,94	-27,13	-3,20	1,60	-1,77

Figure 177 : Vèn : valeurs moyennes de modifications physico-mécaniques après différentes extractions, exprimées en % (extrait-natif)/natif.

Comme on pouvait assez raisonnablement s'y attendre d'après les rendements d'extractions déjà présentés (p.223) et les corrélations ci-dessus avec la perte de masse, les plus importantes modifications sont provoquées par l'extraction au méthanol. Cependant, pour le Vèn, les rendements d'extraction au méthanol sont du même ordre que ceux à l'acétone. Les modifications observées sur ce bois sont aussi généralement plus fortes que pour le Padouk (rendements maximum plus élevés aussi). Les plus fortes amplitudes de variation des propriétés après extraction concernent les coefficients d'amortissement, puis les gonflements transverses (quoique le bruit expérimental soit assez élevé dans le cadre de notre protocole), puis encore : la clarté et un peu la teneur en eau pour le Padouk ; la teneur en eau et l'indicateur des rouges a* pour le Vèn. Le traitement à l'eau chaude a de très faibles rendements massiques, surtout pour le Padouk, mais provoque néanmoins : une nette augmentation des coefficients d'amortissement, une diminution du module d'Young, du module spécifique et du gonflement transverse, et un certain assombrissement.

Ces modifications sont étudiées ci-dessous pour les différentes propriétés en commençant par les paramètres physiques, en observant en parallèle les différents traitements et les deux espèces.

IV.b.7.2. **Modifications physiques**

Parmi celles-ci, on s'intéressera surtout : aux variations de volume anhydre, de teneur en eau et de paramètres colorimétriques.

a Perte de masse et variation de volume anhydre

La perte de masse anhydre ne donne qu'une information quantitative, sur les extraits totaux retirés par chaque solvant. L'observation simultanée des variations de volume anhydre permet d'avoir une première idée du départ d'extraits des parois cellulaires, ceci étant important pour la compréhension des modifications de propriétés mécaniques. A priori, seule l'extraction des extraits initialement localisés au sein des parois peut se traduire par une diminution de ces volumes anhydres. Ces variations sont présentées sur la Figure 178, exprimées en % (extrait-natif)/natif, pour les moyennes de chaque groupe 'espèce/solvant'.

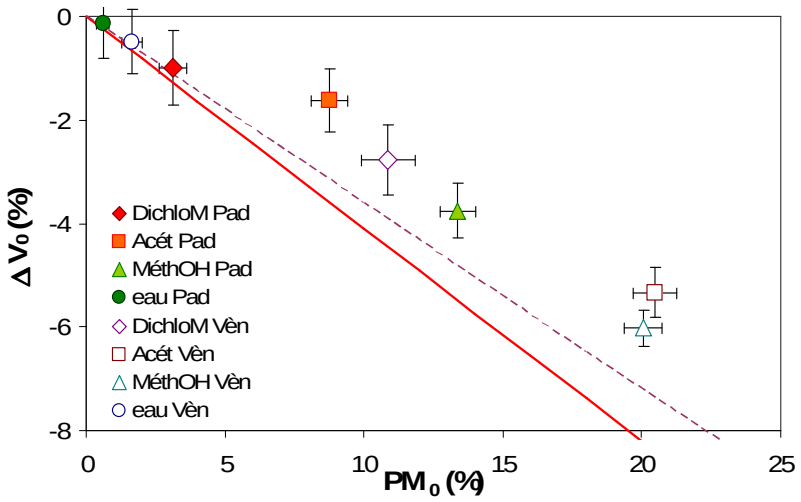


Figure 178 : Diminutions (en %) de volume anhydre en fonction de la perte de masse pour les différentes extractions : valeurs moyennes par groupe. Symboles pleins : Padouk, symboles ouverts : Vèn. Losanges : dichlorométhane ; carrés : acétone ; triangles : méthanol ; ronds : eau chaude. Droites : « gonflements » inverses, ou retraits qui seraient observés pour une diminution de teneur en eau équivalente à la perte de masse. Trait plein : Padouk ; tirets : Vèn.

A part pour l'eau chaude sur le Padouk, toutes les extractions se traduisent par un certain degré de diminution de volume anhydre. L'acétone semble avoir un impact moins marqué que le méthanol, que ce soit pour le Padouk où les rendements d'extractions sont différents d'un facteur ≈1,5, où pour le Vèn où les rendements sont comparables.

Sur la figure ci-dessus, on a également représenté des « gonflements inverses », soit les retraits qui seraient observés pour une diminution de teneur en eau équivalente à la perte de masse, d'après les coefficients de gonflements moyens à l'état natif pour ces deux essences. On voit que pour les extractions ayant un rendement supérieur à 5% les diminutions de volume anhydre après extraction sont plus faibles que s'il s'était agit d'un départ d'eau. Ceci n'est pas très surprenant dans la mesure où : i) les extraits ont a priori une densité supérieure à celle de l'eau ; ii) les extractions étant appliquées en parallèle, il est probable que même les solvants comme acétone et méthanol récupèrent des composés des lumens ne participant pas au volume macroscopique.

Pour avoir une première idée de la proportion de composés des parois retirés par rapport au rendement global de chaque extraction, on peut reprendre l'expression qu'on avait employée dans la partie précédente (pour la correction des densités) :

$$\Delta V_{0Xt} = \frac{mXtot \times \%X_{parois}}{Mvol_{extraits} \times (V_{extraits} / \Delta V_0)}$$

Où : ΔV_{0Xt} : diminution (en cm^3) du volume anhydre macroscopique suite à une extraction ;

mX_{tot} : masse totale (en g) d'extraits retirés ;

$\%X_{parois}$: proportion d'extractibles pariétaux sur l'ensemble retiré par un traitement ;

$Mvol_{extraits}$: masse volumique des extraits ;

$(V_{extraits}/\Delta V_0)$: ratio entre volume d'extraits pariétaux retirés et diminution du volume anhydre macroscopique.

Les trois derniers paramètres sont des inconnues. [Chafe 1987] adoptait 0,63 pour $\%X_{parois}$; 1,4g/cm^3 pour $Mvol_{extrait}$; 0,888 pour $(V_{extraits}/\Delta V_0)$. Ces données correspondaient aux moyennes d'après les résultats expérimentaux de [Kuo & Arganbright 1980a] sur deux

résineux ; les gammes de variations de ces paramètres trouvées par ces auteurs étaient : 0,46 à 0,84 ($\%X_{parois}$) ; 1,23 à 1,44g/cm^3 ($Mvol_{extrait}$) ; 0,858 à 1,025 ($V_{extraits}/\Delta V_0$).

L'hypothèse que le départ d'une unité de volume d'extraits se traduise par plus d'une unité de diminution de volume anhydre implique à priori une contraction des lumens. Sur la Figure 179, les données individuelles que nous obtenons sont comparées à des estimations avec le ratio ci-dessus égal à 0,888 ou bien à 1 (≈les dimensions des cavités restent constantes).

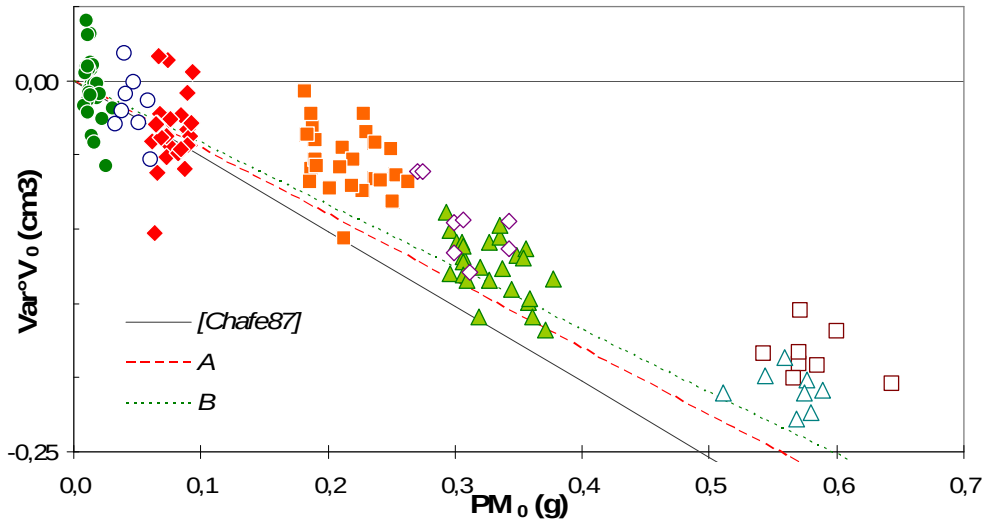
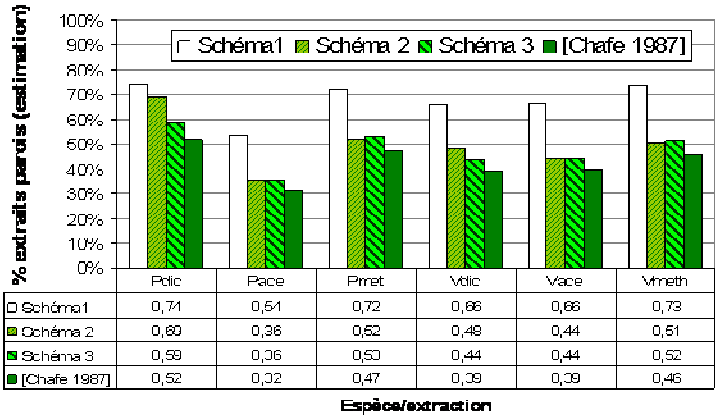


Figure 179 : Diminution absolue de volume anhydre (en cm3) en fonction de la perte de masse absolue (en g). Symboles : cf. Figure 178. Droites : calculs d'après l'expression ci-dessus et les jeux de paramètres de [Chafe 1987] ($\%X_{parois}$:0,63 ; $Mvol_{extrait}$: 1,4 ; $(V_{extraits}/\Delta V_0)$: 0,888), puis (A&B) en fixant ($V_{extraits}/\Delta V_0$) à 1 et (B) en fixant $Mvol_{extrait}$ à 1,5.

L'estimation d'après le jeu de paramètres retenu par [Chafe 1987] donne des variations de volume plus importantes que ce que nous obtenons (sauf pour les extractions ayant un faible rendement, mais pour celles-ci le bruit expérimental est non négligeable). En fixant le ratio 'volume d'extraits retirés/ diminution de volume macroscopique' à l'unité, on est en accord avec les plus fortes diminutions observées pour le Padouk extrait au méthanol – mais pas pour la même extraction sur le Vèn. Afin d'obtenir une première estimation des proportions moyennes de composés des parois retirés pour chaque extraction, on a ajusté les paramètres de l'expression précédente à chaque groupe espèce/solvant (en minimisant la somme des carrés des écarts entre calcul et données expérimentales sur toutes les éprouvettes de chaque groupe).

On a appliqué cette démarche selon quatre « schémas » ou hypothèses (Figure 180) : 1) on ne connaît réellement ni $\%X_{parois}$ ni $Mvol_{extrait}$ ni $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ et ces 3 paramètres ont été ajustés aux données ; 2) On fixe $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ à l'unité et on ajuste $\%X_{parois}$ et $Mvol_{extrait}$; 3) idem mais en fixant $Mvol_{extrait}$ à 1,4 ; 4) : on adopte les données employées par [Chafe 1987] pour $Mvol_{extrait}$ et $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ et on ajuste seulement



	Pdic	Pace	Pmet	Vdic	Vace	Vmeth
Schéma1	0,74	0,54	0,72	0,66	0,66	0,73
Schéma 2	0,60	0,36	0,52	0,49	0,44	0,51
Schéma 3	0,59	0,36	0,50	0,44	0,44	0,52
[Chafe 1987]	0,52	0,32	0,47	0,39	0,39	0,46

Figure 180 : estimation des proportions d'extraits retirés des parois pour chaque extraction selon différentes hypothèses (voir texte).

la proportion d'extraits dans les parois. Les variations (calculées) de masse volumique des extraits (schémas 1 et 2) et de ratio $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ (schéma 1) qui accompagnent ces estimations sont présentées sur la Figure 181.

Pour le schéma 1, il ne semble pas forcément aberrant que les masses volumiques d'extraits calculées soient assez élevées (autour de 1,6). Nous n'avons pas de données expérimentales ou chimiques sur ces paramètres. En revanche, il semble que ce schéma estime des ratios $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ peut être trop élevés (impliquant une expansion notable des lumens). Il semble préférable d'observer les estimations du schéma 2 ou 3. Cependant le schéma 2 estime des densités d'extraits pour l'extraction au dichlorométhane très supérieures à celles pour les autres solvants...

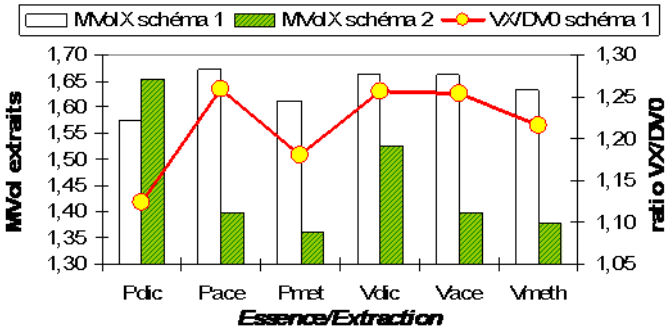


Figure 181 : Variations de $Mvol_{extrait}$ et $(V_{extraits}/\Delta V_0)$ estimées d'après les schémas 1 et 2 ci-dessus.

D'après celles-ci, l'acétone récupèrerait proportionnellement moins de composés des parois que le méthanol (prévisible) mais aussi que le dichlorométhane. Nous n'avons pas de données sur le pouvoir gonflant du dichlorométhane. D'après [Mantanis et al 1994b], le dichloroéthane a un pouvoir gonflant moindre que celui de l'acétone, mais non négligeable.

Les proportions récupérées des parois par le méthanol apparaissent du même ordre de grandeur pour les deux espèces – même si le rendement global est bien plus élevé pour le Vèn. Le dichlorométhane semble toucher plus de composés des parois pour le Padouk (mais avec un faible rendement global) que pour le Vèn. Et inversement pour l'Acétone (qui a aussi un rendement plus de deux fois plus élevé pour le Vèn).

Les extractions à l'eau chaude n'ont pas été inclues en raison des faibles quantités retirées et du bruit expérimental important sur ces petites variations. Sur le Vèn elles sembleraient toucher des proportions parois/lumen proches de celles du méthanol.

Enfin, à titre de vérification, on a aussi observé le volume saturé (après le dernier rinçage à l'eau par imprégnation à une pression de 40mBar). Celui-ci n'est pas significativement différent entre les différents traitements. Ceci correspond bien à ce que l'on attendait en théorie [Chafe 1987] ; dans l'état complètement saturé, les parois cellulaires de bois à faibles taux d'extraits contiendraient ≈25% d'espace libre [Hillis 1987]. A l'état anhydre ces espaces libres seraient très faibles, de 1,5-3,3% [Saranpää 2003], ce qui justifie d'observer le volume anhydre comme indicateur d'encombrement des parois.

b Teneurs en eau

L'effet des extractibles sur l'hygroscopicité des bois est un fait connu [Wangaard & Granados 1967 ; Hernandez 1989 ; Cooper 1974 ; Choong & Achmadi 1991 ; Arévalo-Fuentes 2002 ; Nzokou & Kamden 2004]. Les deux premières références de cette liste incluaient une espèce Latino-américaine de *Pterocarpus* dans leurs essais. De même, notre première série d'essais indiquait un bon lien entre extraits et teneur en eau à l'équilibre.

Les variations relatives (i.e. en % de %) de teneurs en eau à l'équilibre (à 20°C et 65% HR) en fonction des pertes de masse pour les 4 extractions et les 2 espèces sont présentées sur la Figure 182.

Ces variations relatives correspondent à $\Delta MC = 100 * \frac{MC_{ext}(\%) - MC_{nat}(\%)}{MC_{nat}(\%)}$. Les teneurs en eau étant définies par rapport à la masse anhydre, les variations apparentes (Figure 182 à gauche) d'après cette expression n'ont que peu de sens puisque la masse anhydre diminue après extraction. Nous appliquons un correctif correspondant : aux teneurs en extraits maximum évaluées, pour les MC_{nat} ; aux teneurs en extraits résiduelles par rapport à l'extraction la plus efficace pour les MC après extraction (MC_{ext}).

Soit : MC_{nat} corrigé = MC/(1-e_m) où e_m = proportion moyenne d'extraits pour l'extraction la plus efficace (MéthOH pour le Padouk, Acétone pour le Vèn) ;

et : MC_{ext} corrigé = MC/(1-(e_m- $e_{épr}$) où $e_{épr}$ = perte de masse mesurée sur l'éprouvette pour l'extraction considérée. Les variations de teneurs en eau à l'équilibre prenant en compte ce correctif sont rapportées aux pertes de masses après extraction à droite de la Figure 182 (variations relatives en %/%) et de la Figure 183 (variations absolues en %). Ce sont les valeurs corrigées que nous utiliserons par la suite.

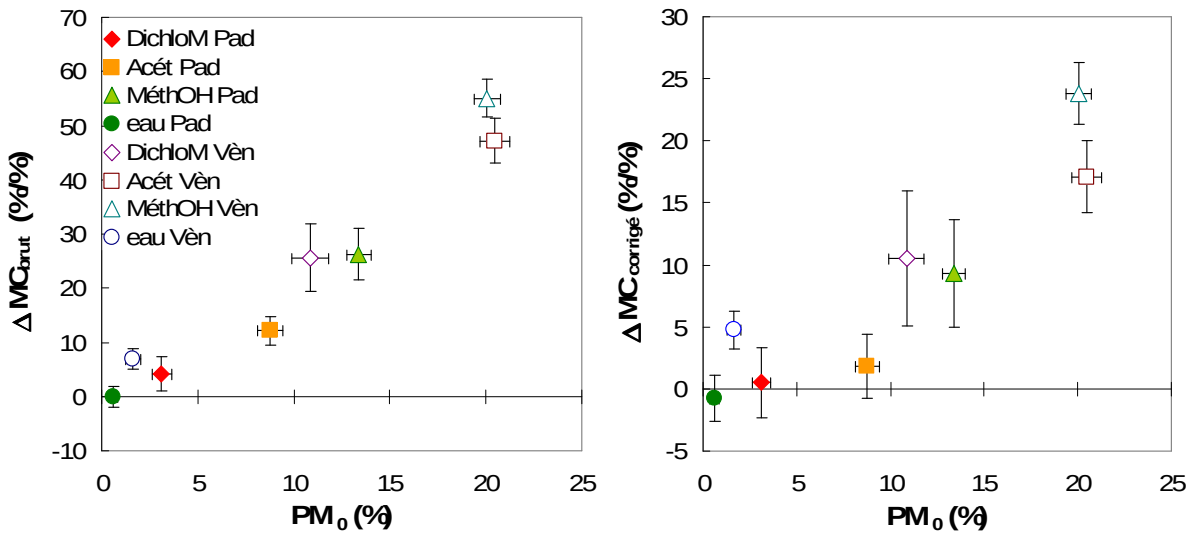


Figure 182 : Rendements d'extraction et variations relatives de teneur en eau « sec à l'air » (stabilisé à 20°C et 65%HR) pour les différents solvants sur Padouk et Vèn. A gauche : variation apparente de teneur en eau ; à droite : variations de teneurs en eau corrigées par les teneurs en extraits.

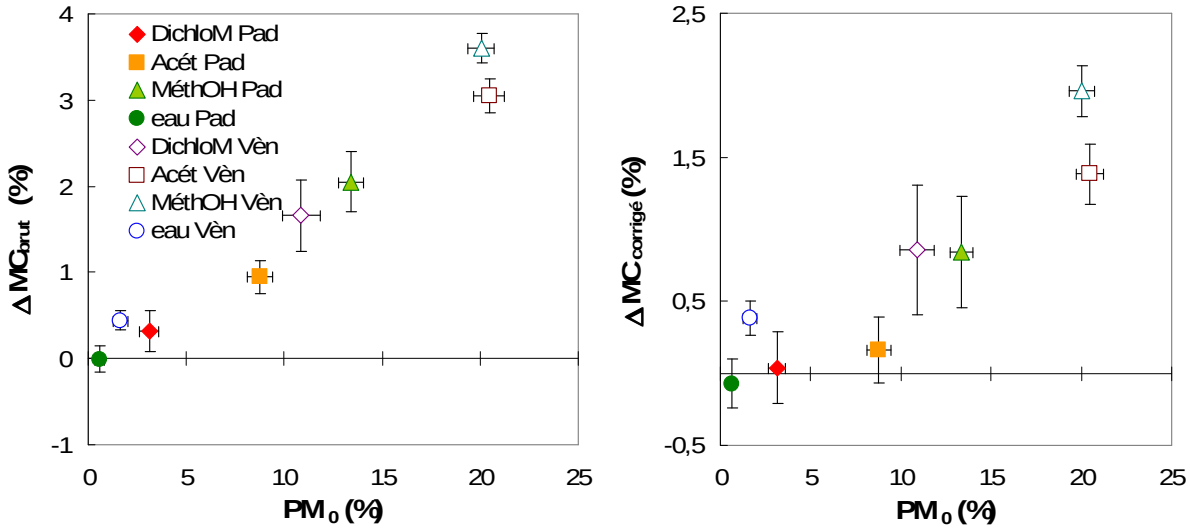


Figure 183 : Rendements d'extraction et variations absolues de teneur en eau « sec à l'air » A gauche : variation apparente de teneur en eau ; à droite : variations de teneurs en eau corrigées par les teneurs en extraits.

Ci-dessus, on a présenté à la fois les variations relatives et absolues. Les deux critères auront leur intérêt. Si l'on s'intéresse surtout aux modifications de propriétés physico-mécaniques éventuellement associées à des différences de MC, il est préférable de prendre en compte les variations absolues. En revanche, à fin de comparaison effective des traitements sur les deux espèces, on considérera plutôt les variations relatives qu'absolues, dans la mesure où leurs valeurs moyennes de teneurs en eau à l'état natif sont différentes autant en données « brutes » (6,5% pour le Vèn vs 7,8% pour le Padouk) que corrigées par les taux d'extraits (8,1% vs 9,0%). Pour cette comparaison il est aussi utile d'observer en parallèle la relation entre variations relatives de teneur en eau et celles de volume anhydre (Figure 184).

Pour le Padouk, les variations de MC corrigées sont petites sauf pour le méthanol. Les extractions à l'eau chaude (rendement moyen 0,6%) et au dichlorométhane n'ont pas d'effet significatif sur la teneur en eau. L'acétone n'a un effet que très modéré (≈+2%) bien qu'elle retire près de 9% d'extraits. Pour ces trois solvants ayant peu d'effets, les variations de volume anhydre indiquent que d'assez faibles quantités de composés ont été retirés des parois. Le méthanol a un effet plus marqué : près de +10% en relatif (de l'ordre de 0,9% en absolu), pour une efficacité d'extraction ≈1,5 fois supérieure à l'acétone mais qui touche manifestement plus de composés des parois.

Les augmentations de teneur en eau sont plus marquées pour le Vèn, pour les 4 traitements appliqués et y compris pour des valeurs de PM_0 et ΔV_0 dans la même gamme. L'extraction au dichlorométhane provoque une augmentation relative entre équivalente et légèrement supérieure à l'extraction méthanolique sur le Padouk, pour des pertes de masse et diminutions de volume anhydre pourtant plus faibles. Les extractions à l'acétone et au méthanol sur le Vèn ont des répercussions sur les MC d'amplitude significativement différentes : ≈+17% vs ≈+24%, pour des rendements massiques équivalents. Ceci pourrait être en partie attribué au fait que l'acétone semble retirer une plus faibles proportion d'extractibles pariétaux, mais peut être en plus à la nature de ces extraits.

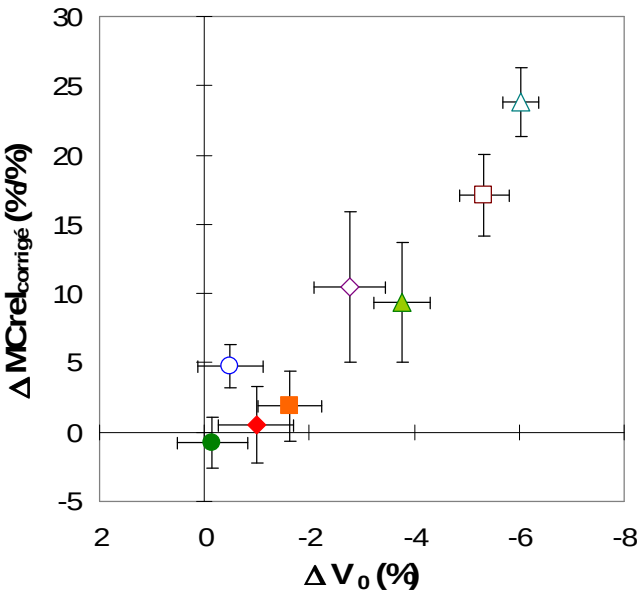


Figure 184 : Variation de teneur en eau et de volume anhydre pour les différents traitements sur Vèn et Padouk.

Pour le Vèn, l'extraction à l'eau chaude à un effet significatif d'augmentation de MC (près de +5% relatif et +0,4% absolu) bien que son rendement massique soit faible (par comparaison à Acétone/Padouk par exemple). L'extraction à l'eau chaude doit avoir un certain effet sur les hémicelluloses. Mais il n'y a pas de raison pour que cet effet soit différent entre les deux espèces. Par conséquent, il semble plausible que certains composés solubles à l'eau, qui seraient présents dans le Vèn mais pas dans le Padouk, aient un effet de diminution de l'hygroscopicité dans cette plage expérimentale. Sur le Padouk MC' semblerait un peu diminuée par le traitement à l'eau chaude, mais la faible amplitude de variation et les écartypes rendent délicat de l'interpréter : cet effet est significatif au seuil de 0,05 mais pas de 0,01.

Enfin, le fait que l'extraction à l'acétone et au méthanol, sur le Vèn, n'aient pas les mêmes répercussions ni en terme de diminution de volume anhydre, ni en terme

d'augmentation de la teneur en eau, alors que leurs rendements sont similaires, suggère qu'aucune de ces deux extractions n'ait été complètement exhaustive. Par ailleurs, on peut remarquer que la teneur en eau apparente (i.e. non corrigée) est équivalente (≈10,2%) entre le Padouk et le Vèn ayant subi l'extraction au méthanol. Les échantillons de Vèn extraits à l'acétone (MCbrute ≈9,5%) contiennent donc encore des extraits « hydrofuges ».

c Couleur

Les deux espèces étudiées étant bien connues (surtout le Padouk !) pour leur forte coloration « rouge » liée à leurs composés secondaires[48], il semble naturel d'observer les variations de couleur après extraction comme indicateurs potentiels. Les variations relatives relevées pour les espèces après les 4 traitements sont présentées sur la Figure 185 (paramètres L*a*b* en coordonnées cartésiennes) et sur la Figure 186 (paramètres L*Ch* en coordonnées polaires).

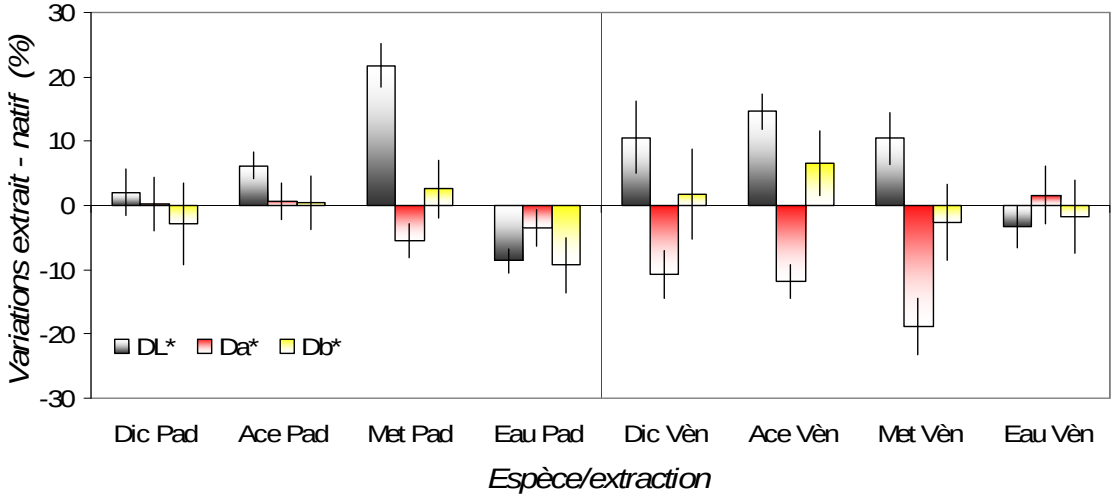


Figure 185 : Variations des paramètres colorimétriques L* (clarté), a* (rouge) et b* (jaune) après les différentes extractions, pour le Padouk (à gauche, indice P) et pour le Vèn (à droite, indice V).

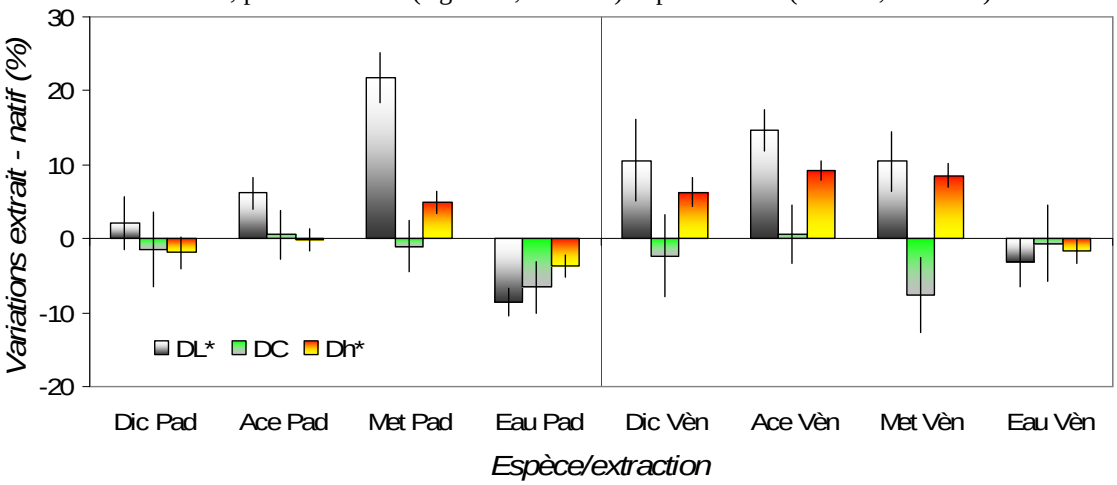


Figure 186 : Variations des paramètres colorimétriques L* (clarté), C (saturation) et h* (angle de teinte) après les différentes extractions, pour le Padouk (à gauche, indice P) et pour le Vèn (à droite, indice V).

[48] Ici on peut émettre une remarque : sur *P. santalinus*, l'aubier blanchâtre est bien différencié du duramen rouge pourpre (d'où son nom Japonais de Kooki « bouche rouge » en rapport à l'aspect des flaschis sur ces arbres), mais des extractions d'aubier donnaient apparemment des liqueurs rouge profond et contenant les colorants Santaline A & B qu'on retrouve dans le bois de coeur de cette espèce ainsi que du Padouk [Kumar & Seshadri 1974]. Le lien coloration macroscopique – composés colorants ne semble peut être pas si systématique : quantités présentes ? Interactions et localisations cellulaires ? Transformations chimiques ?

Pour le Padouk, les extractions au dichlorométhane et à l'acétone n'ont que de petits effets sur la couleur : légère augmentation de la clarté. Le dichlorométhane semble diminuer un peu le jaune (pas le rouge). L'acétone n'a d'effet que sur la clarté. L'extraction au Méthanol a elle un effet important d'augmentation de la clarté (≈+23%), mais ne provoque qu'une assez faible diminution de la couleur rouge (a*) ou augmentation de l'angle de teinte (h*). En général, les éprouvettes restent très « rouges » après extraction, indiquant qu'une certaine fraction des composés colorés n'ont pas pu être extraits, même si les essais d'augmentation de temps d'extraction ne donnaient pas de rendements supérieurs.

Pour le Vèn, l'augmentation de clarté et de h* et la diminution de a* sont bien repérables pour les trois solvants organiques. Les variations de L* ne suivent pas les rendements d'extraction : amplitude comparable entre Dichl et MetOH, plus forte pour Ace. Les variations de h* suivent en revanche assez bien le schéma de solubilité. Les extractions au Dichlorométhane et à l'acétone s'accompagnent d'une certaine augmentation du « jaune » b* (≈l'angle de teinte devient plus proche de la majorité des bois). La légère diminution de b* pour l'extraction au méthanol pourrait correspondre aux observations de [Popoola 2000] sur la même essence et le même solvant, où l'extrait total pouvait être fractionné par cristallisation en une fraction « rouge » visible prédominante et une fraction secondaire de composés ayant des absorptions UV-visible correspondant à une couleur « jaune » transmise. Enfin, on peut remarquer les différences d'effet de l'acétone et du méthanol, pour des rendements pourtant équivalents : Ace joue plus sur la clarté et autant sur h*, mais n'a pas d'effet sur la saturation ; MeOH augmente moins la clarté mais diminue franchement la saturation, ce en diminuant surtout le 'rouge' mais aussi un peu le 'jaune'. Ces différences pourraient être reliées à ce que l'on a déjà observé pour le volume anhydre et la teneur en eau : différences de composés touchés ? De leur localisation cellulaire ?

En ce qui concerne le traitement à l'eau chaude, bien que son rendement massique soit très faible, son effet sur le Padouk se manifeste par une diminution de la clarté (amplitude supérieure à l'augmentation par Ace) et de l'angle de teinte (presque équivalente à la diminution par MeOH). Ceci pourrait s'interpréter par une migration et redistribution des extractibles à la surface[49] en lien avec la température relativement élevée, sans extraction proprement dite. Une tendance similaire est observée pour le Vèn, mais avec de moindres amplitudes de variations. Pour les extractions à l'eau chaude, les éluants étaient incolores, mais légèrement troubles.

IV.b.7.3. **Modifications des propriétés vibratoires après extraction par différents solvants**

Dans la comparaison globale des effets des extractions (p229), on voyait que les plus grandes amplitudes de variations de propriétés concernaient les coefficients d'amortissement. Les modules spécifiques étaient comparativement très peu modifiés. Ici on commence par observer plus en détail les modifications relatives d'amortissement, puis les relations observées entre ces coefficients et le module spécifique sur les bois ayant subi les différents traitements et enfin les variations de module spécifique.

a Coefficients d'amortissement

Les variations relatives (moyennes et écart-types par groupes espèce/solvant) de coefficient d'amortissement tanδ sont comparées aux pertes de masse anhydre et aux

[49] On pourrait alors relier cela avec le léger effet possible de diminution de la teneur en eau pour le traitement à l'eau chaude sur le Padouk ?

diminutions de volume anhydre (indicateur du « désencombrement » des parois) sur la Figure 187.

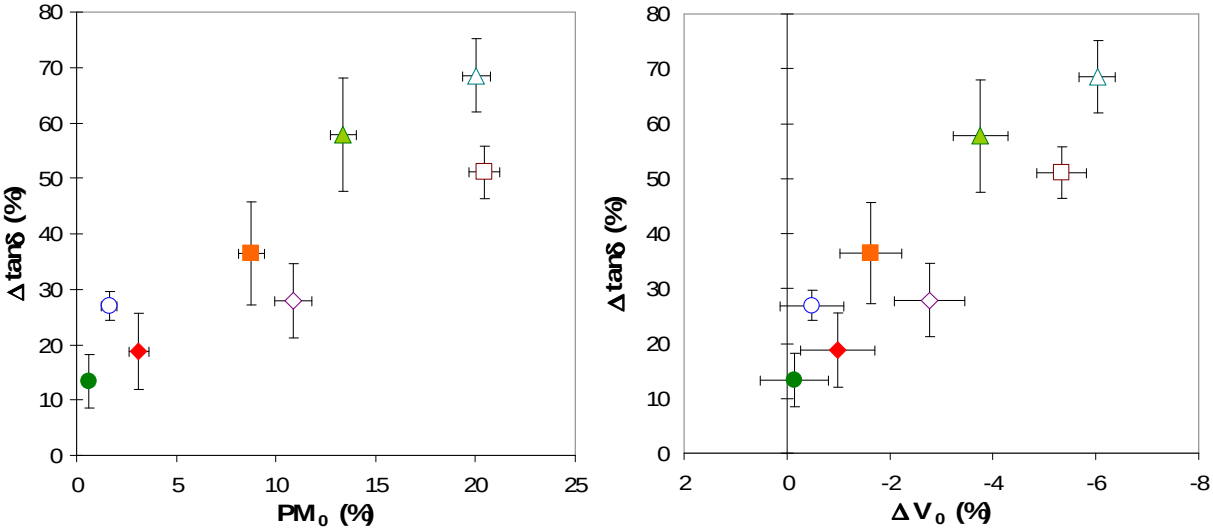


Figure 187 : Variations relatives du coefficient d'amortissement en fonction de la perte de masse anhydre (à gauche) et de la diminution de volume anhydre (à droite). Symboles : voir Figure 178.

Toutes les extractions se traduisent par une augmentation significative des coefficients d'amortissement, même celles ayant de faibles rendements. A l'intérieur de chaque groupe espèce/solvant, aucune relation n'est observable entre perte de masse ou diminution de volume anhydre et Δtanδ, ce qui semble logique puisque les extractions visaient à être les plus complètes possible. Les plus fortes modifications sont obtenues pour le méthanol, pour les deux espèces : 58±10% pour le Padouk (perte de masse ≈13%, diminution de volume anhydre ≈3,8%) et 68±7% pour le Vèn (PM_0≈20%, ΔV_0≈6%). A titre de comparaison, [Yano et al 1995 ; Yano 1994] obtenaient après extraction au MeOH des variations de ≈+86% (≈18% de perte de masse) sur du Palissandre de Rio (*Dalbergia nigra*), de ≈+22% (≈11% PM_0) sur du Palissandre Indien (*D. latifolia*) et de +15 à +37% (PM_0 8-13%) sur du Red Cedar (*Thuja plicata*), pour des diminutions de volume anhydre de ≈5,2%, 3,7%, 1-2% respectivement.

Pour les extractions aux solvants organiques, sur le Padouk tanδ semble augmenter presque linéairement avec la perte de masse entre Dichl et MeOH. Pour le Vèn ce n'est pas le cas, l'acétone ayant un moindre effet que MeOH à rendement égal, mais qui semble au moins partiellement lié à ce qu'elle touche moins d'extraits au sein des parois d'après les diminutions de volume anhydre. Si l'on imagine une tendance commune aux trois solvants pour Δtanδ en fonction de PM_0 ou de ΔV_0, les modifications d'amortissement, à perte de masse et diminution de volume anhydre données, seraient inférieures sur le Vèn que sur le Padouk.

L'extraction à l'eau chaude se traduit par une augmentation de tanδ de ≈13% sur le Padouk, alors qu'elle ne récupère que très peu de composés. On a déjà évoqué que ce traitement doit probablement avoir un effet (dépolymérisation partielle ?) sur les hémicelluloses. Ici encore, comme pour les teneurs en eau, l'effet est beaucoup plus marqué sur le Vèn : on peut donc penser qu'en plus d'un effet commun aux deux espèces et lié à la température de traitement, des composés hydrosolubles du Vèn jouent un rôle anti-amortissant. On peut remarquer que la valeur de Δtanδ pour l'eau chaude est proche de celle pour Dichl ; a priori, on pourrait déduire la variation observée sur le Padouk et considérer que l'augmentation de tanδ due aux extraits à l'eau du Vèn serait de l'ordre de 13%.

Sur ces deux espèces de *Pterocarpus*, les quantités et les répercussions des extraits solubles à l'eau sont très différentes de ce que trouvaient [Matsunaga et al 1996] sur le

Pernambouc, où l'extraction à l'eau chaude avait un rendement (jusqu'à près de 25%) supérieur à l'alcool-benzène et provoquait de très fortes augmentations de l'amortissement.

Par ailleurs, on a vu ci-dessus que la teneur en eau était généralement augmentée après extraction, et ce de façon dépendante de l'espèce et du solvant. On peut envisager le lien entre modifications de MC et celles de tanδ (Figure 188) sous deux angles : d'une part, influence des variations de teneur en eau en elles-mêmes sur l'amortissement ; d'autre part effets respectifs des extraits sur ces deux aspects de comportement du bois.

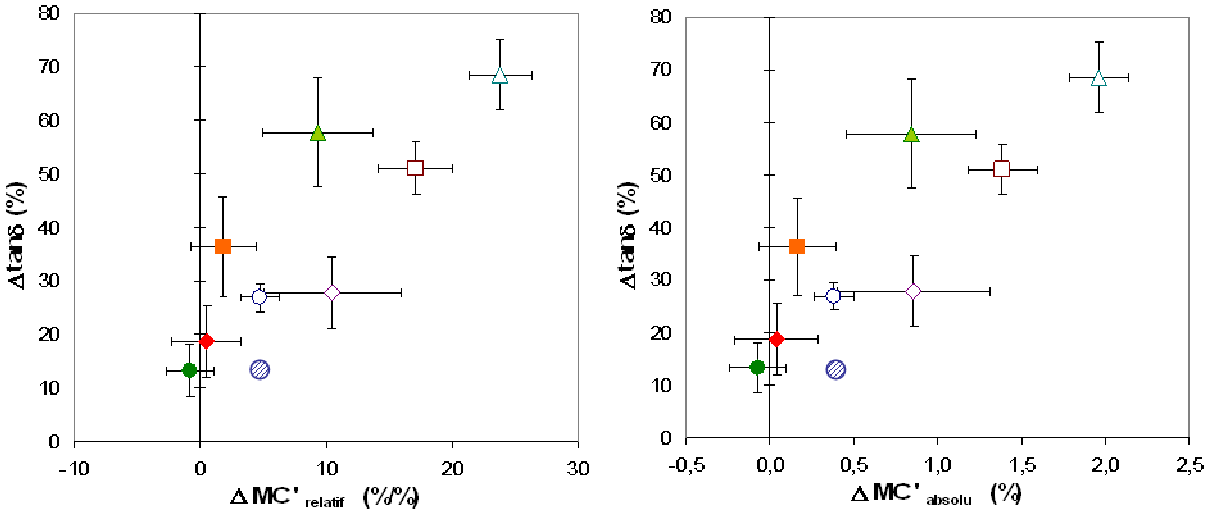


Figure 188 : Comparaison des variations d'amortissement et des variations de teneur en eau : relatives (à gauche) et absolues (à droite) pour les différents traitements sur les deux espèces. (rond hachuré : Δtanδ de Vèn/eau chaude moins Padouk/eau chaude)

On voit que pour le Padouk, les extractions au Dichl et à l'Ace ainsi que le traitement à l'eau chaude se traduisent par de nettes augmentations de tanδ sans que la teneur en eau soit franchement augmentée (≈+0,2% absolu pour l'acétone). L'extraction au MeOH qui se traduit par une augmentation d'amortissement de ≈60% en moyenne est accompagnée d'une augmentation relative de teneur en eau de ≈10% (soit ≤1% absolu). Pour ce qui est du Vèn, chacun des traitements sont suivis d'augmentations plus marquée de MC'. En revanche, les augmentations de tanδ sont moins fortes que pour le Padouk, sauf pour MeOH.

On peut comparer les variations que nous observons aux évolutions de tanδ en fonction de la teneur en eau présentées par [Obataya et al 1998] pour de l'Epicéa. Pour le Vèn, dont la teneur en eau « apparente » (i.e. non corrigée par les taux d'extraits) passe de ≈6,5% à ≈10,1% entre l'état natif et après extraction au méthanol, le coefficient d'amortissement augmenterait de ≈+15%. Pour le Padouk, entre 7,8% et 9,9% de teneur en eau, on s'attendrait à une variation de ≈+8% de tanδ. Ces auteurs trouvaient un minimum de tanδ entre 5-7% de teneur en eau (proche de la gamme native du Vèn). Pour de l'Epicéa imprégné d'haematoxyline (composé secondaire de certaines Caesalpiniaceae, hydrosoluble) ce minimum avait des valeurs absolues plus faibles mais qui augmentaient un peu plus vite avec l'augmentation de teneur en eau [Obataya et al 2001]. On peut aussi remarquer que les variations seraient plus modérées en considérant les MC corrigées. En tout état de cause, les variations de MC relevées ne pourraient expliquer au plus que 13% (Padouk) ou 20% (Vèn) des variations d'amortissement observées après l'extraction au méthanol.

Il serait intéressant dans le futur d'étendre ces essais à différentes conditions d'humidité relative.

Au final, il apparaît que les extractions sur ces deux espèces ont des répercussions différentes : pour le Padouk, un effet important sur les coefficients d'amortissement et plus

modéré sur les teneurs en eau ; pour le Vèn, un effet plus fort (et observé pour tous les solvants) sur les teneurs en eau, mais accompagné de modifications moins importantes de tanδ – sauf pour l'extraction au méthanol.

On peut représenter (Figure 189) ces variations de propriétés en regard des proportions d'extraits pariétaux estimées au §IV.b.7.2.a : ici on prend l'hypothèse que le départ d'une unité de volume d'extraits se traduit par une diminution d'une unité du volume macroscopique et que les extraits ont tous une masse volumique de 1,4g/cm3.

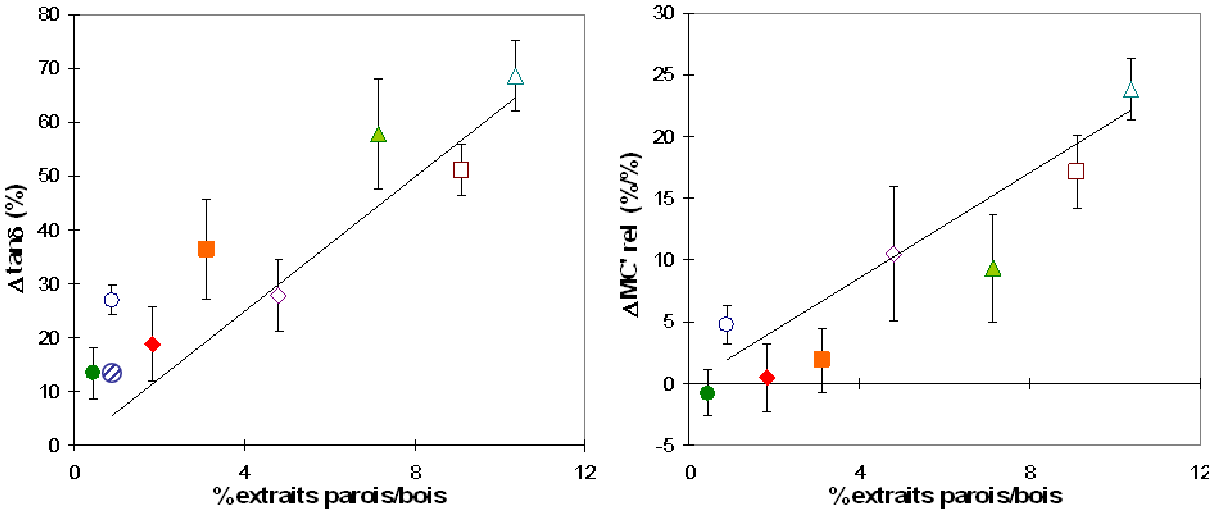


Figure 189 : Relations entre variations d'amortissement (à gauche) ou de teneur en eau (à droite) et proportion estimée d'extraits des parois retirés du bois (d'après les hypothèses du schéma 3 du §IV.b.7.2.a). (rond hachuré : Δtanδ de Vèn/eau chaude moins Padouk/eau chaude). Droite : tendance globale sur le Vèn (en imposant 0 comme ordonnée à l'origine).

Il est important de garder en mémoire que ces proportions d'extraits retirés des parois ne sont que des estimations ; cependant, il semble que l'on puisse en dégager des tendances réalistes. Les extraits du Padouk semblent bien, à quantité donnée, avoir un effet plus marqué sur le coefficient d'amortissement, et moins marqué sur la teneur en eau, que ceux du Vèn. Les différences entre différents solvants sur une même espèce sont moins marquées, mais on ne trouve pas une simple relation systématique quantité - effet. On peut se questionner sur : les effets de différents types de composés ? Des effets de « seuil » quand aux quantités présentes dans les parois et les effets sur tanδ ou MC ? Ceci serait à approfondir par des études chimiques et par l'application de différents temps d'extraction pour chaque solvant.

b Relations entre amortissement et module spécifique suite aux différents traitements

D'après les modifications relevées ci-dessus, les extractibles des deux espèces de *Pterocarpus* étudiées ont une contribution importante dans les coefficients d'amortissement de leurs bois natifs. Ces contributions doivent s'ajouter aux variations « primaires » telles qu'orientation des éléments. On peut en avoir une première visualisation via les relations entre coefficients d'amortissement et module d'élasticité spécifique, qui sont présentées sur la Figure 190 et le Tableau 36 pour le Padouk et sur la Figure 191 et le Tableau 37 pour le Vèn.

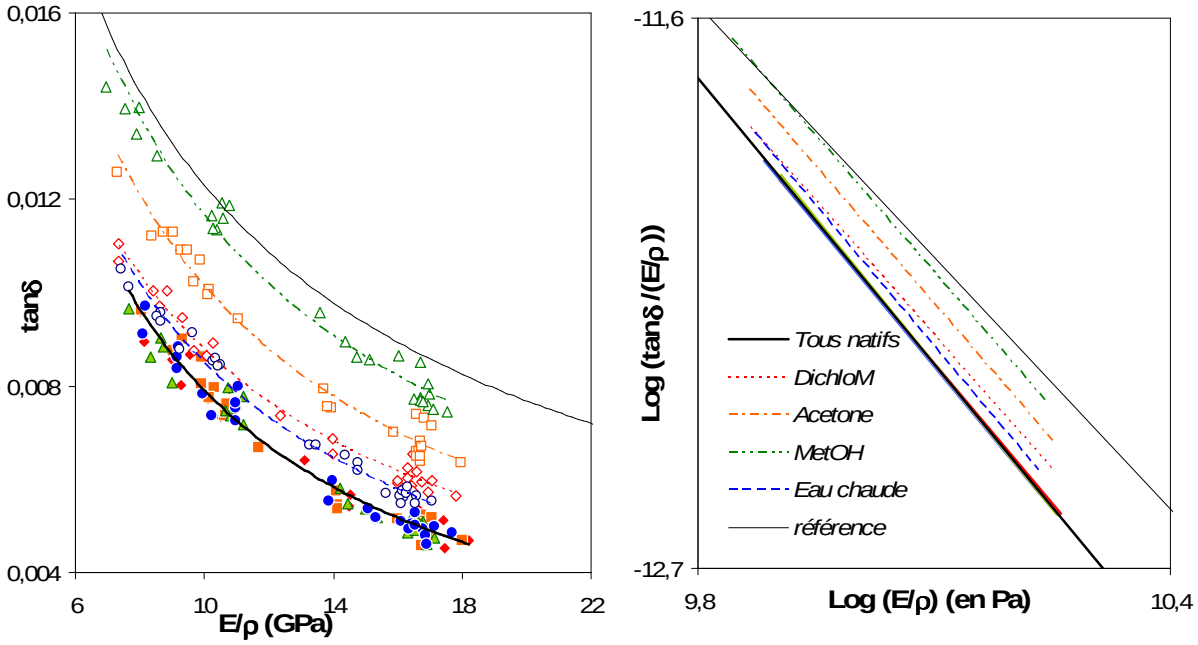


Figure 190 : Relations entre coefficients d'amortissement et module spécifique pour le duramen de Padouk natif (trait et symboles plein) et extrait (symboles ouverts et régressions en pointillés). Losanges: dichlorométhane ; carrés: acétone ; triangles: méthanol ; ronds: eau chaude.

Tableau 36 : Equations des régressions en échelle logarithmique obtenues sur : l'ensemble de cet échantillon de Padouk natif; et sur chaque groupe jumelé (C à F) dans son état natif puis après extraction.

Groupe	Traitement	PM_0 (%)	Log [tanδ/(E/ρ)]=*f*[Log(E/ρ)] (E/ρ en Pa)	R^2
tout	Nat	_	y = -1,90x + 6,93	0,99
C	Nat	_	y = -1,87x + 6,55	1,00
C	Dic	3,12	y = -1,79x + 5,88	0,99
D	Nat	_	y = -1,94x + 7,31	0,99
D	Ace	8,76	y = -1,82x + 6,23	0,98
E	Nat	_	y = -1,89x + 6,81	0,99
E	Met	13,38	y = -1,82x + 6,28	0,99
F	Nat	_	y = -1,92x + 7,13	0,99
F	eau	0,60	y = -1,87x + 6,64	0,99

Sur le Padouk, les régressions entre tanδ et E'/ρ sont de forme très semblables entre chaque groupe dans son état natif et le même après extraction, et les données sur bois extraits sont décalées vers des valeurs supérieures d'amortissement en restant sensiblement parallèles à la tendance 'bois natif'. Pour l'extraction la plus efficace, au méthanol, l'on se rapproche de la tendance de référence 'bois standards'. Toutefois, d'une part les valeurs de tanδ restent un peu inférieures à cette tendance, d'autre part la pente reste aussi un peu plus élevée. Pour le premier point, on peut évoquer le fait que le bois extrait contient encore manifestement des composés secondaires résiduels qui n'ont pas pu être retirés, comme le suggèrent notamment les mesures colorimétriques (le bois reste bien plus « rouge » que la moyenne, ou même que le Vèn natif).

Par ailleurs, sur les graphiques, on a représentés les différents groupes jumellés dans leur état natif. On peut repérer qu'après extraction le module spécifique varie très peu devant ce qui est observé pour tanδ, mais est tout de même un peu modifié : les valeurs maximales apparaissent diminuées pour les traitements à l'eau chaude et au dichlorométhane (pas par l'acétone ou le méthanol) et les valeurs minimales sont toutes un peu diminuées. Pour chaque

groupe pris séparément, les pentes (en échelle Log) sont aussi un peu diminuées entre l'état natif et après extraction (de 2,5 à 6% environ).

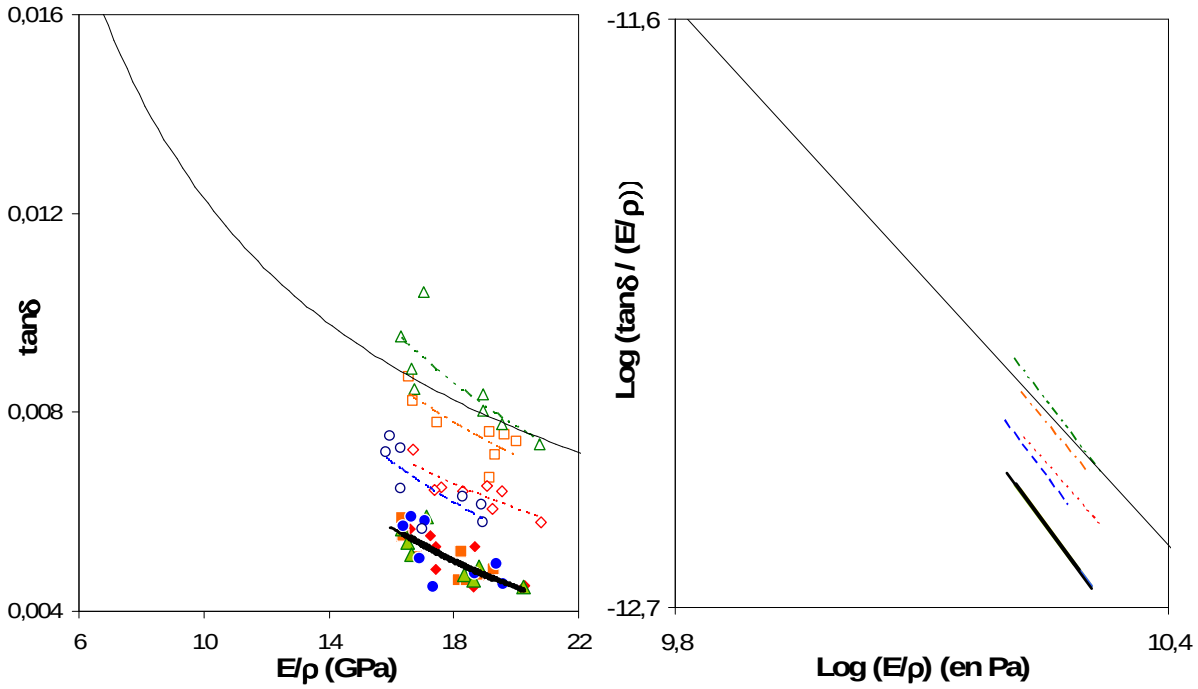


Figure 191 : Relations entre coefficients d'amortissement et module spécifique pour le duramen de Vèn nature (trait et symboles plein) et extraits par différents solvants (symboles ouverts et régressions en pointillés).

Tableau 37 : Equations des régressions en échelle logarithmique obtenues sur : l'ensemble de cet échantillon de Vèn natif; et sur chaque groupe jumelé (C à F) dans son état natif puis après extraction.

Groupe	Traitement	PM_0 (%)	Log [tanδ/(E/ρ)]=*f*[Log(E/ρ)] (E/ρ en Pa)	R^2
tout	Nat	_	y = -2,09x + 8,83	0,84
C	Nat	_	y = -2,09x + 8,85	0,85
C	Dic	10,87	y = -1,75x + 5,52	0,93
D	Nat	_	y = -2,10x + 8,96	0,87
D	Ace	20,46	y = -1,85x + 6,65	0,89
E	Nat	_	y = -2,07x + 8,65	0,90
E	Met	20,05	y = -2,02x + 8,37	0,88
F	Nat	_	y = -2,08x + 8,81	0,77
F	eau	1,64	y = -2,06x + 8,62	0,81

Pour le Vèn, compte tenu de la gamme plus réduite de module spécifique (fil plus homogène que le Padouk) et du moindre nombre de spécimens par groupe/traitement, il semble plus délicat de comparer les régressions. Elles restent cependant de forme raisonnablement similaire. On peut repérer que pour l'extraction au méthanol, les coefficients d'amortissement rejoignent ou même dépassent la tendance de référence.

Suite à l'extraction à l'eau chaude, les modules spécifiques max comme min sont diminués. Pour les groupes soumis aux extractions par solvants organiques, les modules minimaux ne semblent pas vraiment affectés et les E'/ρ maximaux ont tendance à être augmentés.

Au final, les relations restent très comparables dans leur forme et l'impact de l'extraction est surtout manifeste sur les coefficients d'amortissement. Cependant des variations modérées de module spécifique peuvent être repérées ; leurs amplitudes beaucoup plus faibles demandent à ce qu'elles soient observées séparément.

c Module d'élasticité spécifique

Les variations relatives de module spécifique après extraction sont présentées sur la Figure 192, pour toutes les éprouvettes de Padouk et de Vèn, en fonction de la perte de masse anhydre.

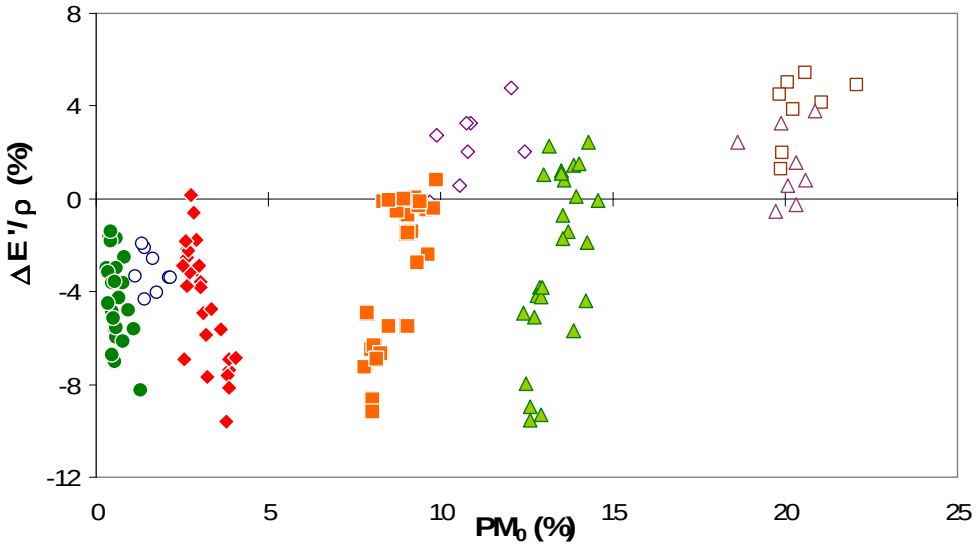


Figure 192 : Variations relatives de E'/ρ après extraction en fonction de la perte de masse anhydre. Symboles pleins : Padouk, symboles ouverts : Vèn. Losanges : dichlorométhane ; carrés : acétone ; triangles : méthanol ; ronds : eau chaude.

Pour le Vèn, les variations observées sont assez homogènes pour chaque traitement. Le traitement à l'eau chaude provoque une diminution de E'/ρ de -2 à -4% pour peu de perte de masse (on peut comme précédemment penser à un effet sur les hémicelluloses en lien avec la température proche de 100°C). Les extractions aux solvants organiques se traduisent par une augmentation du module spécifique apparent, en lien avec la diminution de la densité mais de moindre intensité. Ces augmentations sont un peu plus élevées pour l'acétone que pour le dichlorométhane (perte de masse près de 2 fois plus importante). Par contre l'extraction au méthanol provoque moins d'augmentation que l'acétone pour une perte de masse égale.

Pour le Padouk, on observe une grande disparité d'effet dans chaque groupe pour des pertes de masse pourtant assez homogènes : pour les extractions à l'acétone et au méthanol, E'/ρ peut être augmenté de quelques % pour certaines éprouvettes et diminué de près de 10% pour d'autres. Dans la section précédente il semblait que E'/ρ augmente un peu pour les valeurs natives les plus fortes et diminue pour les valeurs les plus faibles.

On peut cependant remarquer que les évolutions présentées ci-dessus prennent en compte les valeurs brutes de module spécifique, telles qu'elles sont effectivement mesurées sur le matériau natif ou « modifié ». On voit aussi que lorsque le module spécifique augmente, c'est de façon assez modérée par rapport aux diminutions de densité (jusqu'à près de -9% pour le Padouk/MeOH et de -14% pour le Vèn/Acet).

Dans un premier temps, on peut corriger les E'/ρ à l'état natif par les variations de densité relevées, selon :

$$\left(\frac{E'}{\rho}\right)_{corr} = \left(\frac{E'}{\rho}\right)_{mes} \times \frac{\rho_{mes}}{\rho_X}$$

Où : indice '*mes*': valeurs brutes mesurées ;

ρ_X : densité mesurée sur bois extrait.

On peut ensuite comparer (Figure 193) les relations entre amortissement et E'/ρ entre : l'état natif après déduction de la contribution des extraits à la densité (ici on prend en compte l'extraction ayant le plus d'effet sur l'amortissement pour les deux espèces : méthanol); les bois après extraction chimique réelle.

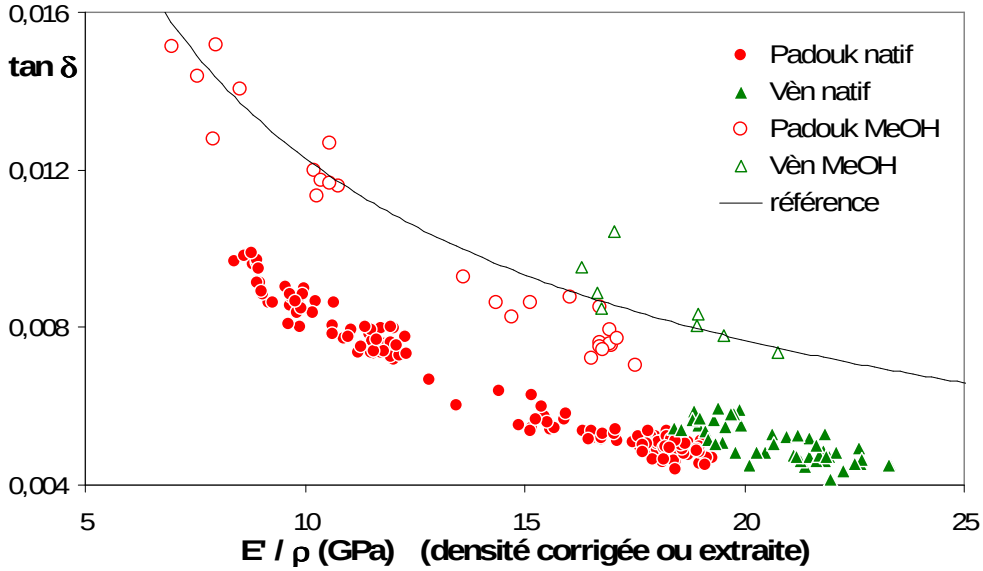


Figure 193 : Relations entre tanδ et E'/ρ pour : les bois dans leurs état natif après correction de E'/ρ pour la contribution des extraits à la densité ; les bois après l'extraction chimique « réelle » ayant le plus d'effet (méthanol).

Pour ce qui concerne le module spécifique lui-même, on peut remarquer que : les gammes de module spécifique après extraction chimique sont peu différentes de celles à l'état natif et sans correction ; elles sont nettement inférieures à ce qui serait prévisible en corrigeant les valeurs brutes à l'état natif par la densité extraite. Les valeurs maximales à l'état natif après correction de l'apport massique des extraits restent relativement faibles, surtout pour le Padouk.

Pour ce qui est des relations au coefficient d'amortissement, on voit que : après déduction de l'effet massique des extraits, le Vèn natif n'est plus dans la continuité de la tendance Padouk, mais un peu au dessus. Par ailleurs après extraction « réelle » il devient plus cohérent avec la tendance de référence (voire un peu au dessus) que le Padouk, dont la plupart des spécimens restent un peu au dessous de cette tendance.

d Relation entre angle de fil et effet de l'extraction

Les variations de module spécifique présentées ci-dessus semblaient d'amplitude différente pour les spécimens ayant des E'/ρ natifs élevés, ou faibles. Sur la Figure 155, sont représentées les variations relatives de E'/ρ corrigé (par les variations de densité), en fonction du module spécifique natif (corrigé par la densité extraite).

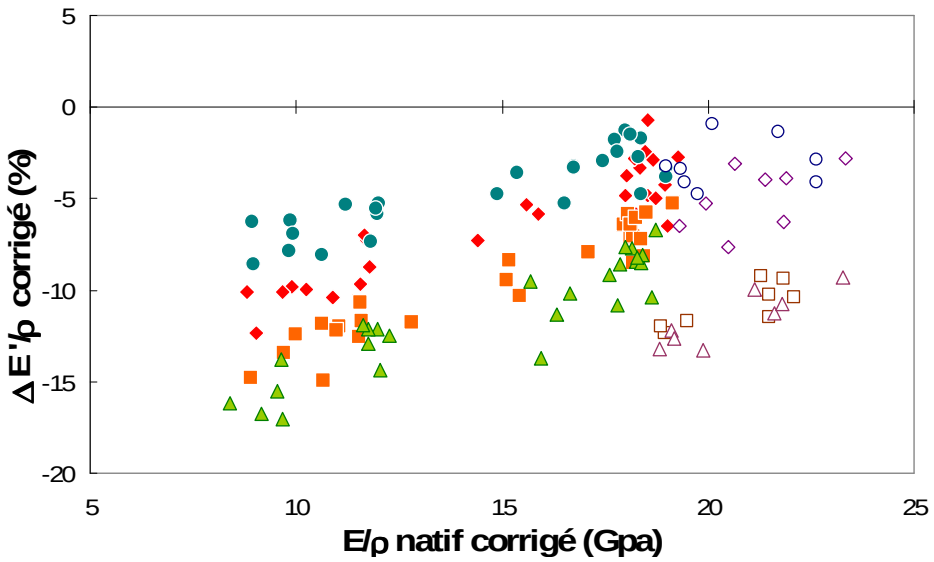


Figure 194 : variations relatives de module spécifique (corrigées par la densité extraite) en fonction du module spécifique natif (corrigé par la densité extraite).

Une fois déduit l'effet de l'extraction sur la densité, E'/ρ apparaît diminuer en fonction de la quantité d'extraits retirés et la diminution relative est d'autant plus importante que le module spécifique initial est faible. En revanche, la variation absolue est assez constante. Pour ce qui concerne le Padouk, on peut observer ces variations relatives, ainsi que celles du coefficient d'amortissement pour comparaison, en fonction de l'angle de fil moyen (Figure 195).

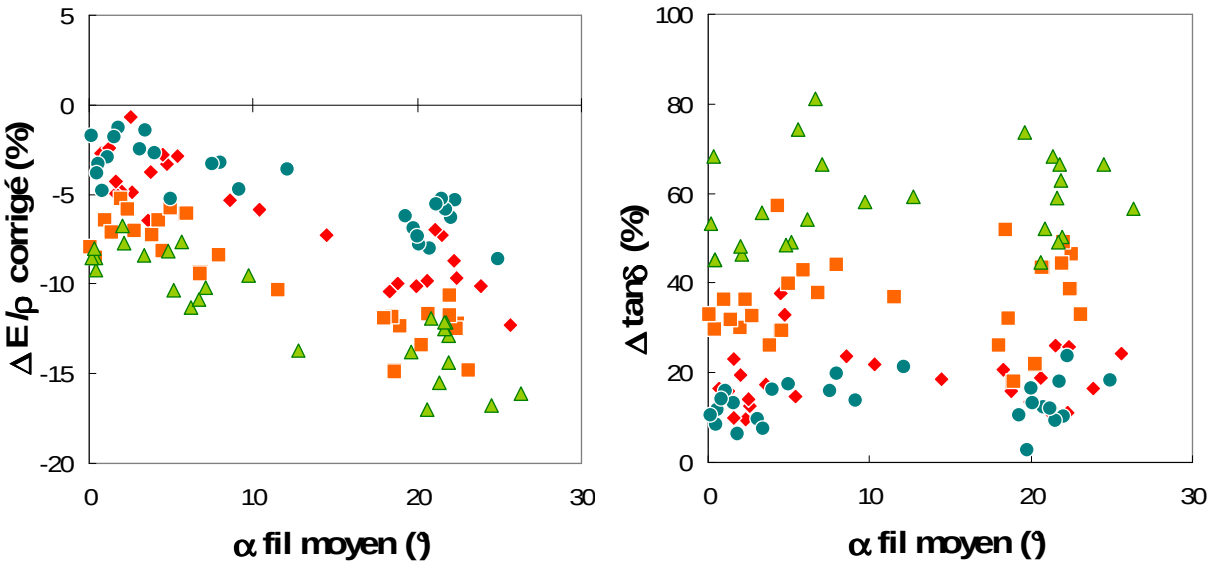


Figure 195 : Variations relatives après extraction : du module spécifique (corrigé par la densité extraite, à gauche) et de l'amortissement, en fonction de l'angle de fil approché.

La diminution relative de module spécifique est plus importante pour les spécimens ayant des angles de fil élevés, mais par contre les variations absolues (extrait-natif) sont assez indépendantes de l'angle de fil (≈-1,5GPa après extraction au méthanol). Pour le coefficient d'amortissement au contraire les variations relatives ne dépendant que de l'effet de l'extraction, mais les variations absolues augmentent avec l'angle de fil, et ce d'autant plus que l'extraction est efficace.

En tout état de cause, le fait que le module spécifique diminue (une fois déduit l'effet sur la densité elle-même) suggère que la matrice soit fragilisée après extraction. Soit que les extraits eux-mêmes jouent un rôle rigidifiant au sein du bois natif, soit que leur départ et/ou le

procédé d'extraction aient provoqué une certaine désorganisation au sein des parois. Bien sûr la teneur en eau a été augmentée en parallèle, mais dans la plage expérimentale considérée, il semble que cela ne serait pas en mesure d'expliquer plus de quelques % de diminution de E'/ρ.

IV.b.7.4. **Discussion**

Dans leur état natif, les bois des deux espèces de *Pterocarpus* étudiées présentent certaines différences de propriétés physiques : le Vèn a une densité plus élevée, une teneur en eau à l'équilibre plus faible, et un bois plus clair et moins « rouge » que le Padouk. Les gammes de module spécifique ne se recoupent qu'en partie (pour le Padouk des angles de fil importants sont pris en compte), mais les relations entre E'/ρ et coefficient d'amortissement se démarquent peu. Cependant, le Vèn contient plus d'extractibles (≈20% vs ≈13% pour le Padouk) et si l'on déduit leur contribution à la densité du module spécifique apparent, les coefficients d'amortissement, à E'/ρ corrigé donné, sont un peu supérieurs pour le Vèn. Il apparaît que la densité de ces deux bois est comparable si l'on retire les extractibles.

En plus des différences de rendements maximaux d'extraction, les solubilités vis-à-vis des différents solvants sont assez contrastées entre les deux espèces, de même que les effets de « désencombrement » du volume anhydre desquels on peut estimer des proportions de composés pariétaux. Le Vèn contient beaucoup plus de composés solubles au dichlorométhane et à l'acétone que le Padouk. Il semble que le premier de ces solvants atteigne proportionnellement plus de composés des parois sur le Padouk, et le second moins sur le Padouk, que sur le Vèn. Le méthanol atteindrait des proportions égales d'extraits des parois pour les deux espèces (on pourrait l'estimer à un peu plus de 50%), soit au final un taux d'extractibles pariétaux par rapport au bois massif de l'ordre de 7% pour le Padouk et 10% pour le Vèn. Le fait que l'acétone touche proportionnellement moins de composés au sein des parois que le méthanol était assez prévisible, ce solvant étant moins polaire et ayant un moindre pouvoir gonflant (52-84% de celui de l'eau vs 82-98% de celui de l'eau selon les espèces de bois [Mantanis et al 1994b]). En revanche, les diminutions de volume anhydre comme les modifications de coefficient d'amortissement indiquent manifestement que le dichlorométhane a retiré des composés des parois, alors que ce solvant assez apolaire a pu être considéré comme incapable de pénétrer les parois [Arévalo-Fuentes 2002].

Sur le Padouk, l'extraction à l'eau chaude a un très faible rendement et il est probable que son effet soit plutôt assimilable à un traitement hygrothermique, qui serait susceptible d'entraîner une dépolymérisation partielle des hémicelluloses [Mantanis et al 1994a]. Le fait que ce traitement entraîne un assombrissement et une augmentation de la couleur « rouge » de la surface suggère qu'à cette température proche de 100°C, des composés colorés aient pu migrer et être redistribués vers la surface des éprouvettes. [Ajuong & Breeze 1997] proposaient aussi, pour du Doussié (*Afzelia africana*) extrait au toluène (point d'ébullition 117°C) que des composés secondaires aient pu être redistribués vers la surface des parois cellulaires. Sur le Vèn, la solubilité à l'eau chaude est un peu plus notable que sur le Padouk et concerne des composés apparemment incolores, mais on retrouve un assombrissement et un « rougissement ». Il semble plausible que plusieurs phénomènes soient alors superposés : dégradation possible des hémicelluloses, redistribution de composés colorés, extraction de composés hydrosolubles incolores. De façon générale la solubilité à l'eau chaude est faible sur ces bois qualifiés en teinturerie de 'bois rouges insolubles' [Cardon 2003 & 2006 ; Surowiec et al 2004].

En ce qui concerne les modifications de propriétés physico-mécaniques, l'importance de l'effet de l'extraction est dans l'ordre $\Delta\tan\delta >> \Delta(E'/\rho) \geq \Delta MC'$ pour le Padouk et $\Delta\tan\delta >> \Delta MC' \geq \Delta(E'/\rho)$ pour le Vèn (variations relatives et corrigées par les taux d'extraits).

Quoique E'/ρ soit bien moins affecté que tanδ, il ne semble pas inintéressant de se poser quelques questions sur ses variations. L'effet de diminution du module d'élasticité spécifique –une fois déduites les variations de densité- semble plus directement lié aux quantités d'extractibles retirées que ce qui est relevé pour l'augmentation du coefficient d'amortissement (dont les amplitudes de modification sont aussi beaucoup plus importantes). Le fait que E'/ρ diminue peut être interprété de différentes façons. D'une part, on pourrait évoquer un effet des procédés d'extraction eux-mêmes. Pour le traitement à l'eau chaude c'est vraisemblablement le cas, cependant, pour les extractions aux solvants organiques les températures appliquées sont plus modérées. [Mantanis et al 1994a] relevaient que l'énergie d'activation de gonflement –qui représente surtout l'énergie nécessaire à la rupture des liaisons hydrogène entre composants du bois- était diminuée par l'extraction, indiquant que le réseau de liaisons H au sein des parois avait été 'désorganisé'. Ce phénomène peut être imputable au départ des extraits proprement dit (ceux-ci renforceraient le réseau de liaisons faibles au sein du bois natif), ou possiblement à un effet intrinsèque des solvants. Cette deuxième hypothèse n'est pas à ignorer, mais les diminutions de E'/ρ ne dépendraient alors que du solvant appliqué, et pas des différences de rendements entre les deux espèces comme nous l'observons ici. Si l'on admet l'estimation que ces bois contiendraient ≈7% et ≈10% de composés secondaires dans les parois, il semble que leur départ ne soit pas négligeable vis-à-vis des 'vides' ainsi laissés. Il serait intéressant d'effectuer des vérifications en extrayant des aubiers, dont les taux d'extraits, sans être nuls, sont bien plus faibles. Par ailleurs, il ne semble pas aberrant que les extraits puissent jouer un certain rôle rigidifiant au sein des parois. Il a été reporté que certains extractibles peuvent exercer un effet, petit devant les autres déterminants primaires, mais observable, de renforcement du bois [Luxford 1931 ; Arévalo-Fuentes 2002]. [Bariska & Pizzi 1986 et Pizzi & Cameron 1986] proposaient que les tanins (de type proanthocyanidines) puissent être considérés comme des composés structurels du bois, jouant le rôle de 'ressorts' dans les plantes « ressuscitantes » résistantes à la sécheresse, et améliorant la résistance des parois même pour une application artificielle. [Ajuong & Breeze 1997] suggèrent que des composés polyphénoliques polaires de relativement faible poids moléculaire (tels qu' épiafzéléchine pour leur matériel) puissent être liés de façon covalente avec les polymères de la parois (hémicelluloses et/ou cellulose) via leur chaîne latérale contenant des résidus de sucres. Ici, nous ne savons pas si les composés polyphénoliques de *Pterocarpus soyauxii* et *P. erinaceus* sont sous forme glycosylée ; [Bezuidenhoudt et al 1987] signalent des glycosides de flavonols sur *P. marsupium* mais pas sur *P. soyauxii*. De toute façon des composés liés de façon covalente n'auraient a priori pas pu être extraits aux solvants organiques dans nos conditions expérimentales. Par ailleurs l'imprégnation d'hématoxyline ou de catéchine (en solution dans l'eau froide) se traduisait par une plus faible diminution de module spécifique que ce qui aurait été attendu par le gain de masse, voire par une légère augmentation, alors qu'on ne peut guère penser à la formation de liaisons covalentes dans ces conditions [Sakai et al 1999].

Enfin, [Yano et al 1995] trouvaient, sur les Palissandres de Rio et Indien (*Dalbergia nigra* et *D. latifolia*), que le module spécifique apparent en direction axiale augmentait après extraction en raison de la diminution de densité, mais diminuait systématiquement en direction transverse. Les variations relatives de coefficient d'amortissement ne dépendaient pas de l'orientation. Sur nos essais, le fait que la diminution relative de module spécifique augmente avec l'angle de fil et que l'augmentation relative de tanδ en soit indépendante, semble rejoindre les résultats de ces auteurs. Si les extractibles participent effectivement à un renforcement de la cohésion de la matrice et/ou d'un réseau de liaisons faibles perpendiculaire aux microfibrilles de cellulose, il semblerait logique que leur effet soit plus marqué à mesure

que l'on passe d'une orientation axiale vers transverse. Dans ce dernier cas E'/ρ serait alors aussi plus sensible aux augmentations de teneur en eau provoquées par l'extraction.

L'effet de l'extraction est beaucoup plus marqué sur l'augmentation du coefficient d'amortissement, que sur la réduction du module spécifique (après correction pour la diminution de densité): amplitudes de variations relatives supérieures d'un facteur 6 au moins pour les spécimens avec peu ou pas d'angle de fil. Le fait que l'effet des extractibles soit beaucoup plus important sur tanδ que sur E'/ρ semble logique. Pour un hypothétique angle nul de microfibrilles et de fil, la rigidité de la « matrice » n'entrerait théoriquement pas en compte dans la détermination du module macroscopique. Des différences de rigidité de la matrice et/ou d'association aux microfibrilles seraient de plus en plus sensibles pour des orientations tendant vers transverse (ce qui semble vérifié sur nos résultats), mais dans la plage considérée ici leurs effets resteraient petits devant le « renfort » des microfibrilles. Par contre, le coefficient d'amortissement du bois – pour une orientation donnée - dépend du comportement plus ou moins visqueux de la « matrice » (hémicellulose + lignines + composés additionnels éventuels) et/ou de son association aux microfibrilles limitant le glissement des chaînes moléculaires.

D'après les résultats obtenus, les variations de tanδ sont aussi moins directement liées aux quantités extraites et dépendent plus de l'espèce et des solvants appliqués. Si l'on met en relation (cf. Figure 189 p. 240) les variations relatives de tanδ, ou de teneur en eau à l'équilibre (MC' corrigée par les taux d'extraits), avec les estimations que nous avons faites de proportions de composés pariétaux par rapport au bois massif, les différences de réaction du Padouk et du Vèn sont manifestes[50].

Sur le Padouk, les extraits sont plus « efficaces » (à quantité donnée) pour réduire l'amortissement, mais moins sur la teneur en eau. Pour le Vèn c'est le contraire : les extractibles ont un effet plus marqué sur la diminution de MC', mais moins sur tanδ proportionnellement à leur quantité (plus importante). De plus, MC' étant plus augmentée après extraction sur le Vèn, on peut penser que les augmentations de tanδ relèvent d'un double effet des extraits : intrinsèque sur l'amortissement, et *via* leur effet sur MC'.

Sur le Vèn, les extraits les plus efficaces (toujours rapporté à leur proportion dans les parois) sur tanδ comme sur MC' sont ceux au méthanol et presque autant au dichlorométhane; ceux à l'acétone le sont visiblement moins.

Sur le Padouk, des quantités modérées ont un effet notable sur l'amortissement. Pour le dichlorométhane, environs 2% d'extraits pariétaux estimés par rapport au bois provoquent une variation de tanδ de ≈20%. Cet ordre de grandeur quantité/effet correspond à ce que [Matsunaga et al 1999] obtenaient par imprégnation d'épicéa par de l'hématoxyline. Pour l'acétone le rapport est du même ordre mais avec des quantités un peu supérieure (≈3% d'extraits estimés des parois et ≈+36% de Δtanδ). Ceci correspond aussi à ce qui était obtenu avec de l'hématoxyline [Minato et al 1997]. Ces deux extractions ne provoquent quasiment pas de variations de MC'. En revanche, l'extraction au méthanol a un plus fort rendement mais le ratio quantité/Δtanδ est plus faible ; elle provoque aussi une augmentation significative de MC' (mais moindre que la tendance 'Vèn').

Ces effets contrastés peuvent être interprétés selon différentes hypothèses en lien avec : caractère plus ou moins hydrophobe ou hydrophile des extraits ; encombrement par la taille et/ou la quantité des molécules ; éventuellement rigidité propre des molécules.

[50] A noter que ceci ne va pas dans le sens d'un effet important des procédés d'extraction en eux-mêmes.

[Sakai et al 1999 et Matsunaga et al 2000], pour le coefficient d'amortissement en lien avec hématoxyline et extractibles du Pernambouc, [Ajuong & Breeze 1997] pour le fluage sur le Doussié[51], suggéraient que des composés ayant un nombre important de groupes hydroxyles puissent, à des humidités modérées, former plusieurs liaisons faibles entre composés de la matrice ou cellulose et restreindre le glissement entre molécules. Ceci concorderait avec un des cas de figure des modèles de traitements chimiques de [Norimoto et al 1992 ; Akitsu et al 1998]. D'après ces schémas, des composés très hydrophobes n'auraient en revanche qu'un effet d'encombrement, susceptible de limiter l'espace libre pour l'eau ainsi que les retraits/gonflements, mais pas le nombre de sites de sorption ni le glissement des chaînes polymériques – voire au contraire en provoquant un écartement et en réduisant leur réseau de liaisons faibles.

De ce dernier point de vue, un « excès » d'extractibles susceptibles de diminuer l'amortissement pourrait en fait avoir un effet proportionnellement plus faible sur tanδ – mais diminuerait d'autant la teneur en eau pour des humidités relatives modérées.

Pour revenir à l'aspect hydrophile des extraits, [Sakai et al 1999] trouvaient qu'une imprégnation de catéchine –qui a pourtant plusieurs groupes hydroxyles- ne se traduisait que par une très faible diminution de tanδ (≤5%) tout en conférant une certaine efficacité anti-gonflement. Ces auteurs suggéraient que la rigidité propre des molécules et/ou leur schéma d'hydroxylation puisse jouer un rôle important. [Minato et al 1997] faisaient l'hypothèse que des composés dérivés de chromanes (braziline et protosappanine B du Pernambouc, hématoxyline d'espèces d'*Haematoxylon*) devraient avoir un effet important de diminution de l'amortissement. Des chromanes de type braziline ne semblent pas se trouver dans les *Pterocarpus*, mais la santaline est un pigment chromane dimérique, qui semble être présent chez *P. soyauxii* mais pas chez *P. erinaceus* [Surowiec et al 2004]. Par ailleurs, la braziline et l'hématoxyline contiennent un cycle condensé « supplémentaire » (au lieu d'une liaison simple pour d'autres molécules proches) qui pourrait conférer une certaine rigidité. Ce type de structure se retrouve dans les pterocarpanes (mais il s'agit alors d'un hétérocycle) [Seshadri 1972] retrouvés dans le Padouk, mais qui n'ont apparemment pas été signalés dans le Vèn jusqu'à présent. Les deux espèces contiennent différentes isoflavones (présentes dans l'une ou dans l'autre ou dans les deux). A ce niveau, on est confronté à une difficulté d'interprétation, du fait que la composition en composés secondaires du bois de coeur de *Pterocarpus erinaceus* a manifestement été moins étudiée que pour *P. soyauxii*. Des études supplémentaires en collaboration avec des chimistes seront sûrement intéressantes.

Enfin, on remarquait que l'amortissement du Padouk même après l'extraction la plus efficace ne rejoignait pas ni la tendance de référence, ni celle du Vèn extrait ; en parallèle le bois restait nettement « rouge ». Il semble donc que sur cette espèce des composés secondaires soient très fortement liés à la matière ligneuse. Peut être aussi s'agirait-il des « dimères » de type santaline/santarubine.

Pour ce qui est de l'extraction à l'eau chaude et de l'effet contrasté qu'elle a sur le Padouk et le Vèn, on peut faire quelques hypothèses. Compte tenu du très faible rendement (≈0,6%) sur le Padouk, il semblerait que l'augmentation notable de tanδ (≈+13%) puisse raisonnablement être en grande partie attribuée à un effet probable de dégradation des hémicelluloses. Dans ce cas on pourrait s'attendre à ce que des sucres ainsi libérés (mais manifestement peu ou pas extraits) augmentent la teneur en eau [Obataya & Norimoto 1999], ce qui n'est pas le cas (la teneur en eau semble en fait être très légèrement diminuée : ≈-

[51] Ces différents travaux concernent des extractibles d'espèces de Caesalpiniaceae, Leg. D'après nos résultats expérimentaux sur une autre espèce de Doussié (*Afzelia bipendensis*), c'est un des bois ayant les plus faibles amortissements intrinsèques de notre échantillonnage.

0,7%). On pourrait spéculer sur un effet additionnel d'imperméabilisation de la surface (des éprouvettes et/ou des parois) par des extraits ayant été redistribués. La plus forte augmentation de tanδ (≈+27%) sur le Vèn (rendement un peu supérieur ≈1,6%) suggèrerait un effet additionnel lié à des composés hydrosolubles, incolores, et a priori « anti-amortissants ». Ceux-ci seraient aussi peut être capables de diminuer la teneur en eau dans ces conditions expérimentales (à moins que l'aspect 'sucres' ne soit moins masqué par un effet de migration/imperméabilisation des surfaces : les augmentations de couleur de la surface sont bien plus faibles que sur le Padouk).

Toutes ces hypothèses seraient intéressantes à explorer plus avant par des essais en différentes conditions d'humidité relative. Il serait aussi intéressant d'appliquer, pour chaque solvant, différents temps d'extraction pour essayer de plus dissocier composés des lumens et des parois et observer les liens quantité d'extraits - effets sur les propriétés. Des analyses chimiques des résidus et des observations de localisation histologique seraient évidemment très utiles.

IV.b.8. Conclusion et perspectives

Au cours de ce chapitre, on s'est intéressé aux liens entre composés secondaires du bois de coeur et comportement vibratoire élémentaire (module d'Young spécifique et coefficient d'amortissement dans la gamme de fréquences 200-400Hz) sur des espèces de Papilionaceae (Leg.) Africaines. Dans l'optique d'obtenir un début de compréhension de la diversité interspécifique relevée pour les propriétés vibratoires et physiques affectées par les métabolites secondaires, nous avions choisi de travailler sur un niveau « élémentaire » de biodiversité, soit sur des espèces du même genre botanique. Le genre *Pterocarpus* dont nous avons étudié des espèces a été empiriquement choisi pour des fonctions « acoustiques » dans la plupart de ses zones de répartition phytogéographique ; il est aussi phylogénétiquement proche d'autres genres tropicaux importants en facture instrumentale.

A travers la comparaison des bois de coeur (et des aubiers pour deux espèces) dans leur état natif, puis après qu'ils aient été extraits par différents solvants sur les deux espèces *P. soyauxii* (Padouk) et *P. erinaceus* (Vèn), on a pu repérer des tendances communes d'effets des extractibles, ainsi que de nettes différences entre essences à une échelle plus fine. On peut en résumer les points suivants et les pistes de recherche qu'ils suggèrent:

- Les bois de coeur des espèces de *Pterocarpus* étudiées présentent des coefficients d'amortissement extrêmement faibles et en parallèle des teneurs en eau à l'équilibre très faibles aussi. Ces caractéristiques sont dues à leurs extractibles. Il semblerait que le Padouk soit susceptible d'être proportionnellement moins amortissant que le Vèn et l'Umukambati (à module des parois donné), mais ceci demanderait à être approfondi par un élargissement de l'échantillonnage intra-spécifique. La comparaison avec d'autres espèces du genre serait aussi intéressante.
- La très forte influence des métabolites secondaires de ces espèces sur une réduction du caractère visqueux (dans les conditions hygrothermiques et de fréquence considérées) est évidente. Elle n'est cependant pas d'ordre strictement quantitatif : les rapports entre quantité d'extraits (même rapportée à ceux localisés dans les parois) et effet sont différents non seulement selon l'espèce, mais aussi selon la fraction de composés retirés par différents solvants. De faibles quantités (2-3%) sont capables de diminuer de façon déjà significative l'amortissement. Les rapports quantité/effet seraient intéressants à approfondir par des extractions selon différents temps pour chaque solvant. On peut penser qu'il existe des effets de seuil minimal, ou au contraire de « saturation », pour que les métabolites secondaires puissent avoir une influence marquée.

- Sur ces deux espèces, les extraits les plus efficaces sur l'amortissement – à quantité donnée – le sont relativement moins sur la diminution d'hygroscopicité. Les composés du Vèn semblent nettement plus hydrophobisants que ceux du Padouk mais moins « anti-amortissants ». Les variations de coefficients d'amortissement après extraction ne sont pas directement imputables aux variations de teneurs en eau. Des essais en différentes conditions d'humidité sont à prévoir et pourraient être très éclairants. Dans une optique complémentaire, l'étude de la dépendance de ces effets à la température serait utile non seulement d'un point de vue fondamental mais aussi en regard de l'aptitude au cintrage par exemple. De même un élargissement de la gamme de fréquence serait très intéressant.
- D'après les données disponibles dans la littérature sur la nature chimique des composés retrouvés dans les espèces étudiées, il semble qu'on puisse envisager des débuts d'hypothèses sur les mécanismes impliqués. La rigidité propre des molécules pourrait avoir un rôle non négligeable en addition du caractère plus ou moins hydrophile et de la capacité à établir un réseau de liaisons faibles renforçant la matrice et/ou l'associant aux microfibrilles de cellulose. On se heurte ici à un manque de connaissances phytochimiques complètes et il faut envisager d'approfondir ces aspects en collaboration avec des chimistes.
- Il semblerait qu'un effet de renforcement tel qu'évoqué ci-dessus puisse aussi être légèrement sensible sur le module d'élasticité, et ce d'autant plus que les orientations (angles de microfibrilles ou ici angle de fil) s'éloigneraient de la direction axiale. Par ailleurs, dans nos essais par vibrations forcées d'éprouvettes de petites dimensions, l'effet du contre-fil était réduit à celui de l'angle de fil local. En vibrations naturelles il est probable que le contre-fil ait des répercussions propres sur la réponse acoustique et il serait intéressant d'étudier cet aspect mal connu.
- Au final, ces résultats confirment d'une part l'hypothèse – mise en avant sur quelques autres espèces par certains auteurs et confirmée par les relations que nous obtenions entre nos essais sur de nombreuses espèces et leurs taux d'extraits connus – que les métabolites secondaires de certains bois tropicaux jouent un rôle majeur dans la détermination de faibles amortissements. D'autre part, ils montrent aussi que ces effets sont très dépendants de l'espèce et de la nature des composés présents, même pour des bois proches au niveau phylogénétique et phytochimique. L'application d'une démarche similaire à de plus nombreuses espèces (y compris de genres et familles différents) devrait permettre de mieux appréhender cet aspect.
- D'un point de vue plus applicatif, on peut penser qu'à terme une meilleure compréhension de ces phénomènes puisse orienter mieux le repérage de bois vis-à-vis de propriétés ciblées. Une autre perspective probablement moins lointaine concernerait des possibilités « d'amélioration » de bois intéressants mais peu stables ou « trop » amortissants par un traitement avec des extraits de Padouk notamment, bois commercial beaucoup moins rare et menacé que le Pernambouc ou les *Haematoxylon* et pour lequel on pourrait par exemple penser à recycler les déchets de scierie.

IV.c. Conclusion de la partie IV

Cette partie se proposait d'explorer les effets de deux niveaux de déterminants, primaires et secondaires, sur les propriétés vibratoires élémentaires des bois, en prenant en compte des matériels d'étude ciblés sur ces thématiques : résineux contenant du bois de compression, puis feuillus tropicaux d'un genre repéré pour ses taux d'extraits élevés, très faibles amortissements et forte stabilité.

Les résultats obtenus ont d'une part permis de confirmer des tendances générales admises, ainsi que de conforter des hypothèses moins bien documentées. Ils font aussi ressortir des effets additionnels qui sont loin d'être négligeables et qui sont liés au type de bois et/ou à l'espèce.

On retrouve bien l'importance prépondérante des phénomènes d'orientation des éléments de renfort (angle des microfibrilles à l'échelle microscopique, angle de fil à l'échelle mésoscopique) dans la détermination du module d'élasticité spécifique et du coefficient d'amortissement. Ces phénomènes se traduisent par des relations entre ces deux propriétés dont la forme générale reste comparable entre les différents bois.

D'autres effets se superposent à ces premiers déterminants, en modifiant les valeurs absolues d'amortissement ou de module ou des deux – avec un impact plus marqué sur l'amortissement.

Dans le cas des bois de résineux, ces effets additionnels peuvent être imputables à d'autres déterminants « primaires » : composition en macromolécules principales et/ou caractéristiques de structure cellulaire ? Ils se traduisent par un effet « bois de compression » dans lequel le coefficient d'amortissement apparaît plus faible – à module spécifique donné – que pour des bois « normaux » (juvéniles/opposés). Ceci n'est pas dépendant de l'espèce pour les trois Pinaceae tempérées étudiées. Cet effet est toutefois d'amplitude modérée par rapport à ce qui a pu être relevé quant à l'effet de certains composés secondaires.

Sur les feuillus tropicaux étudiés (Leguminosae), les déterminants primaires (composition en macromolécules et structure cellulaire) ont été fixés autant que possible, et la variation « artificielle » des contenus en métabolites secondaires du bois de coeur a montré qu'ils peuvent jouer un rôle prépondérant sur l'amortissement intrinsèque (i.e. à orientation donnée). Ces déterminants « secondaires » jouent aussi sur les propriétés hygroscopiques, et pourraient avoir un léger effet de rigidification de la matière ligneuse. Ces effets sont eux dépendants de l'espèce et de la composition phytochimique, même à un niveau élémentaire de biodiversité.

Dans le futur il serait intéressant d'approfondir ces résultats par la confrontation avec des modèles micromécaniques et/ou rhéologiques d'une part ; et bien sûr d'autre part en menant des campagnes expérimentales couvrant une plus grande plage de conditions (hygrothermiques, fréquences) et incluant des analyses chimiques.

L'élargissement de ces démarches à de plus nombreuses espèces est aussi à prévoir. En parallèle, il faudra approfondir l'étude de l'importance relative des propriétés physico-mécaniques considérées dans la détermination de la « qualité » d'instruments finis et/ou dans l'aptitude à la mise en oeuvre, ainsi que les gammes de valeurs « acceptables » ou « optimales » en adéquation avec le résultat désiré.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

V. CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ce travail de thèse se proposait d'explorer certains aspects de la diversité des bois utilisés ou utilisables dans la facture d'instruments de musique selon deux approches complémentaires : d'une part, un essai de caractérisation de la diversité effectivement rencontrée (dans les usages et dans les propriétés matérielles des bois) ; d'autre part, une recherche des origines possibles de la diversité de comportement des bois au niveau de déterminants microstructuraux et chimiques –notamment métabolites secondaires.

Le choix de la thématique « diversité des bois » était motivé en grande partie par deux aspects : bon nombre des essences « standard » actuellement employées, y compris à « grande » échelle dans le domaine de la facture instrumentale artisanale ou (semi-) industrielle, sont loin d'avoir été caractérisées pour leurs propriétés technologiques/acoustiques, même pour des paramètres relativement simples. Par ailleurs, particulièrement en ce qui concerne les bois tropicaux, des problèmes d'approvisionnement se posent ou risquent de se poser à relativement court terme, que ce soit sur l'espèce elle-même, ou bien sur les quantités et/ou qualités disponibles. En parallèle, on ne dispose que de très peu d'information sur la diversité de bois qui pourraient être applicables à ce domaine.

Les objectifs de notre travail ont donc été :

-de mettre en place des outils : de gestion de l'information existante d'une part ; de caractérisation systématique de paramètres « acoustiques » élémentaires qui puissent être comparés avec les quelques données existantes, d'autre part;

-de contribuer à apporter des données sur certains bois actuellement employés ;

-de définir des critères de présélection qui puissent permettre de s'appuyer sur des données technologiques plus généralement accessibles, pour avoir une première estimation de la gamme de comportement « acoustique » prévisible pour une espèce ;

-d'approfondir la compréhension des facteurs d'influence des propriétés vibratoires et physiques étudiées, cela à la fois en lien avec l'objectif précédent, et dans une optique plus fondamentale de relations entre microstructure, composition chimique, et comportement.

En ce qui concerne les outils, une base de données spécifique a été développée, qui relie espèce botanique et usage en facture instrumentale et permet le lien avec des bases de données de propriétés technologiques –lorsque celles-ci sont disponibles pour l'espèce. Cet outil a commencé à être implémenté avec des informations liées aux factures traditionnelles des zones tropicales mais demande à être plus alimenté.

Compte tenu du manque de données important en ce qui concerne les coefficients d'amortissement des vibrations notamment, il a été choisi de mettre l'accent sur le nombre d'espèces étudiées d'une part, sur la caractérisation systématique d'un jeu « élémentaire » de paramètres d'autre part. Celui-ci comprend : densité anhydre et sec à l'air ; module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement en direction axiale dans la gamme de fréquences 200-600Hz ; teneur en eau à l'équilibre ; indications de gonflement partiel ; paramètres colorimétriques CIELab et CIELCh.

Pour remplir ces objectifs, à partir d'une méthode de mesures vibratoires dont le principe est éprouvé (vibrations forcées sans contact de poutres libre-libre), un travail d'optimisation de l'interfaçage (grâce au travail d'Y. ElKaïm) a abouti à un banc de mesures vibratoires fiable, précis (erreur ≤5% sur les coefficients d'amortissement) et répondant aux

impératifs de caractérisation systématique (temps de mesure, acquisition et sauvegarde de l'ordre de la minute).

L'ensemble de paramètres ci-dessus a été appliqué à un échantillonnage comprenant une soixantaine d'espèces, en majorité de feuillus tropicaux. Une moitié provenait de facteurs d'instruments. L'autre moitié avait été sélectionnée d'après les données disponibles sur des critères mécaniques (module d'élasticité spécifique et densité contrastés, 11 espèces) ou sur des critères physico-chimiques pour 18 espèces (taux d'extraits, point de saturation des fibres et retrait rapporté à la densité). Ces derniers critères étaient basés sur des hypothèses en lien avec les effets respectifs possibles des métabolites secondaires sur le comportement viscoélastique d'une part, hygroscopique d'autre part.

Des aubiers sains ont été inclus pour 6 essences et des bois normaux/de compression de résineux ont aussi été étudiés pour répondre à l'objectif 'compréhension des déterminants'.

L'analyse des résultats obtenus à l'échelle de pièces de bois de petites dimensions (12*2*150mm, R*T*L, effectif ≈1400) confirme la relation forte connue entre module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement. Cette relation n'explique cependant qu'un peu moins de la moitié de la variabilité effectivement observée sur ce dernier paramètre. Les feuillus tropicaux à taux d'extraits élevés se dissocient en une relation de même forme, mais ayant des amortissement intrinsèques inférieurs d'un tiers en moyenne aux « bois normaux ». Ceci est accompagné de plus faibles teneurs en eau que la normale, sans toutefois que ce dernier point soit responsable des variations d'amortissement. L'effet « extractibles » n'est cependant pas strictement systématique et la variabilité intra-groupe reste observable.

A l'échelle des moyennes par essences, on retrouve ces observations : conservation de la relation globale module spécifique et amortissement, mais qui n'explique toujours pas plus de ≈50% de la variabilité des coefficients d'amortissements. Ces derniers peuvent par contre avoir des relations additionnelles avec les propriétés physiques et la couleur. La moitié des bois étudiés (sélectionnés sur critères physico-chimiques ou bien par des facteurs) présentent des coefficients d'amortissement inférieurs à la gamme « Epicéa de résonance » ($\tan\delta \approx 7‰$), pour des gammes de module spécifique qui y sont en général inférieurs.

Les différentes essences/types de bois (i.e. espèce + aubier/duramen ou bois normal/de compression) ont été regroupées par analyses multivariables (ACP et CAH). Le premier niveau de dissociation concerne : rigidité et densité associables à la porosité et la microstructure (les faibles densités étant aussi associées à de fortes clartés). Le deuxième niveau concerne la « stabilité » viscoélastique ou hygroscopique (associable à des critères de composition chimique), assortie ici d'une tendance vers le « rouge » pour les bois les moins amortissants. Parmi les bois tropicaux denses, on peut distinguer : des bois de rigidité moyenne mais dans la gamme extrême de faibles amortissements (type « Dalbergioideae » d'un point de vue botanique, et ceux employés en facture seraient des bois de touches de percussions à clavier, fonds et éclisses de guitares classiques…). Puis des bois dans la même gamme de faibles amortissements, mais un peu plus rigides (type Pernambouc des archets modernes) ; suivis de bois encore peu amortissants mais surtout définis par leur très grande rigidité (type Amourette et bois d'archets baroques). Des bois très rigides et denses peuvent aussi présenter des amortissements intrinsèques moyens à plutôt élevés, mais nous ne connaissons pas d'usages en facture pour les essences concernées.

Pour les espèces dont le duramen présente de forts taux d'extraits et de très faibles amortissements et teneurs en eau, les aubiers se démarquent bien, en étant plus proche de bois

« normaux ». Cependant les aubiers varient aussi entre espèces et ne peuvent être considérés comme des bois strictement neutres.

La comparaison des résultats obtenus avec les hypothèses de départ quant aux indicateurs physico-chimiques de présélection montre une bonne concordance, non seulement pour les espèces effectivement choisies selon ces critères, mais pour celles choisies indépendamment. La combinaison de la relation normale entre amortissement et module spécifique d'une part et du taux d'extraits alcool-benzène, ou du point de saturation des fibres d'autre part, permet d'obtenir des modèles prédictifs simples qui expliquent, sur les essences étudiées (18 pour la chimie, 42 pour le Psf) entre 85 et 90% de la variabilité interspécifique de l'amortissement.

A une échelle plus fine l'effet n'est cependant pas systématique entre espèces et suggère une dépendance aux composés phytochimiques impliqués.

Pour ce qui concerne l'étude des déterminants microstructuraux et chimiques, la comparaison de bois de compression et de bois juvénile/opposé de résineux fait d'abord ressortir des tendances connues : augmentation du retrait longitudinal et de l'amortissement, diminution du module spécifique, avec l'augmentation d'angle de microfibrilles. Les évolutions de densité et de couleur sont aussi cohérentes avec les caractéristiques connues de ces bois. En revanche, la confrontation des modules spécifiques et coefficients d'amortissement suggère qu'un effet propre 'bois de compression' s'ajoute, qui s'exprime par des coefficients d'amortissement –à module spécifique donné- plus faibles que pour le bois normal. Cet effet pourrait traduire une influence de la composition macromoléculaire différente et/ou de la structure cellulaire, particulières aux bois de compression. Il reste toutefois modéré devant ce qui est observé pour des composés secondaires de bois tropicaux.

L'étude quantitative de l'effet des extractibles du bois de coeur sur les propriétés physico-mécaniques montre une dépendance aux composés caractéristiques de l'espèce, même pour un niveau « élémentaire » de biodiversité (deux espèces du même genre *Pterocarpus*, Papilionaceae, Leguminosae). Les composés les plus efficaces sur une réduction du coefficient d'amortissement le sont moins sur la réduction de la teneur en eau, et inversement. Ceci pourrait traduire un premier mécanisme d'action : caractère plus ou moins hydrophile et capacité à établir un réseau de liaisons faibles renforçant la matrice viscoélastique et/ou limitant le glissement moléculaire vis-à-vis des microfibrilles élastiques. La confrontation aux données chimiques disponibles pourrait aussi suggérer un deuxième mécanisme possible lié à la rigidité intrinsèque des molécules, mais ceci demandera à être vérifié.

Perspectives

Les outils mis en place et les résultats obtenus fournissent en l'état actuel des choses de bonnes bases pour aider à une diversification des bois appuyée sur critères acoustiques/physiques. Ils proposent aussi plusieurs pistes de recherche à approfondir, tant sur le plan applicatif que fondamental.

Sur le plan fondamental, nos résultats ont confirmé un effet important des métabolites secondaires sur le comportement élémentaire viscoélastique et hygroscopique d'un bon nombre de bois de feuillus tropicaux. Les variations de propriétés vibratoires, physiques et de couleur après extraction par différents solvants sur les deux espèces de *Pterocarpus* étudiées permettent de formuler des hypothèses quant aux mécanismes qui pourraient être impliqués.

Ces hypothèses demandent manifestement une démarche d'analyses chimiques sur les composés concernés. Un autre point important concernerait l'observation microscopique de leur localisation cellulaire : histochimie dans un premier temps ; des observations en microspectrophotométrie seraient aussi intéressantes pour une observation plus fine de la distribution au sein des parois cellulaires.

Sur des espèces ciblées, il serait aussi intéressant d'approfondir l'étude de la variabilité intra-spécifique, y compris intra-arbre (variations le long du rayon). En parallèle, l'application de la même démarche à des aubiers serait très intéressante : on a vu qu'ils n'étaient pas vraiment « neutres ».

Evidemment, le jeu de paramètres que nous avons étudié reste élémentaire : de prochaines étapes devraient prendre en compte des gammes de fréquences, ainsi que de conditions d'humidité, plus étendues. Ceci autant pour la compréhension des mécanismes liant chimie et comportement hygro-viscoélastique, que dans l'optique des usages en intruments.

De façon similaire, des essais mécaniques en fonction de la température seraient intéressants, et pourraient apporter une information sur l'aptitude au cintrage par exemple. Un autre aspect concernerait l'effet de traitements thermiques sur ces bois particuliers : lors d'essais préliminaires pour la définition du protocole « normalisé » adopté dans ce travail, il semblait qu'à des températures relativement modérées (≤103°C), certains extractibles puissent « fondre » et peut être se polymériser en refroidissant et on peut envisager qu'ils auraient un effet différent après ce traitement. Cela pourrait rejoindre certaines techniques traditionnelles de factures instrumentales Africaines, Moyen-Orientales...

Enfin, on a vu que les effets « fins » des extractibles sur les propriétés qui ont été étudiées sont différents, ne serait-ce que pour deux espèces d'un même genre botanique. Les pistes évoquées ci-dessus devront se pencher sur de plus nombreuses espèces : d'un même genre pour poursuivre la démarche engagée d'une part ; de genres et surtout de familles botaniques différents d'autre part. On pourrait envisager qu'un lien à la chemotaxonomie ne soit pas tout à fait étranger à la forte proportion de choix empirique de certaines familles (Leguminosae, Moraceae par exemple) pour des fonctions « acoustiques » demandant *a priori* de faibles coefficients d'amortissement. Il faudrait aussi se pencher plus sur certains feuillus tempérés et Méditerranéens : certains essais d'usage en facture (xylophones, archets par N. Poidevin) suggèrent que des espèces de Leguminosae croissant en Europe puissent être intéressantes. Des essais sont prévus à court terme.

En parallèle, on a vu sur les bois de compression que les facteurs d'influence « primaires » des propriétés vibratoires ne pourraient être strictement réduits à l'effet de l'angle moyen des microfibrilles. Il faudrait approfondir l'étude de l'effet de variations de la composition macromoléculaire, du taux de cristallinité, d'une part. D'autre part et ceci concernerait aussi les points précédents, il serait à terme utile de confronter les effets superposés des phénomènes d'orientation (fil et/ou microfibrilles) et de composition chimique à des modèles micromécaniques et/ou rhéologiques adaptés.

Vis-à-vis des usages et choix des bois en facture instrumentale, un travail de fond reste à faire sur la perception du matériau, d'abord par le facteur (ceci autant sur le choix initial, que sur l'appréciation de l'aptitude à la fabrication, puis sur le résultat) et bien sûr par les musiciens. Une toute première approche en a été faite grâce à la collaboration avec Nelly Poidevin et, en parallèle, des séries d'essais sur archets finis effectuées au LAUM au Mans (N. Dauchez et un groupe d'étudiants). Ces questions interdisciplinaires primordiales seront à approfondir: comment passer de la perception à une objectivation physique ? Comment qualifier l'adéquation matériau – fonction ? Les tentatives de réponse devront impliquer d'une

part des relations à la structure, d'autre part des aspects psychosensoriels, mais aussi la prise en compte de paramètres d'aptitude à la mise en oeuvre.

Par ailleurs l'exemple des différents modèles d'archets (destinés à l'interprétation de différents styles musicaux : « Moderne », Baroque, Renaissance, Médiévaux) indique bien qu'il n'existe pas de solution optimale unique ni en terme de structure ni de choix de matériau, mais que l'adéquation matériau/structure/fonction doive être adaptée à un contexte culturel, musical et technique. Ces aspects pourraient être élargis, tout en gardant le lien aux espèces de bois et à leurs propriétés, *via* une analyse sur la base de données que nous avons commencée. Celle-ci demande bien sûr à être implémentée, à la fois en terme de types d'instruments, d'aires géoculturelles, de critères de choix décrits, et bien sûr de propriétés matérielles pour les essences représentées.

En ce qui concerne ce dernier point, le banc de mesures vibratoires qui a été développé dans une optique de caractérisation systématique devrait bien sûr être maintenant appliqué à cet objectif. Les critères de présélection que nous avons testés semblent assez fiables et devraient aussi permettre un bon repérage d'essences candidates. Sur cet aspect, des essences qui n'ont pas été présentées dans ce mémoire ont déjà été présélectionnées et des pièces de bois ont été fournies à Nelly Poidevin qui en a réalisé des archets – moyennant dans certains cas des adaptations de structures vis-à-vis des variations de module d'élasticité et/ou de densité. Parmi celles-ci, plusieurs semblent avoir donné de très bons résultats. La démarche demande à être étendue à de plus nombreuses essences, qualités dans l'essence, et bien sûr à d'autres parties d'instruments.

Par ailleurs, les corrélations entre propriétés qui commençaient à se dessiner à l'intérieur des espèces les plus échantillonnées mériteraient d'être approfondies : on peut par exemple envisager qu'au sein d'une espèce donnée, des caractérisations « de surface » et rapides comme la colorimétrie ou des spectroscopies puissent servir d'indicateurs de qualité. Ceci demanderait bien sûr un étalonnage spécifique préalable.

Dans une optique de valorisation, la diversification d'essences appropriées à la facture pourrait fournir un débouché « haut de gamme » à des bois « secondaires » ou mal connus.

On pourrait aussi envisager à terme de « recycler » deux types de déchets de scierie : des aubiers sains rejetés mais ayant de bonnes propriétés élastiques, des sciures ou chutes de bois de coeur à extractibles actifs sur l'amortissement et/ou la teneur en eau, tels que pour le Padouk qui est une essence commerciale relativement abondante, en traitant les premiers avec les extraits des seconds.

Pour finir, dans une vue plus globale, il semble que les aspects scientifiques et techniques impliqués dans la vaste thématique « diversité des bois et instruments de musique » regroupent à l'échelle mondiale une certaine communauté –certes relativement peu nombreuse mais bien existante- et il pourrait être intéressant d'établir ou de renforcer les liens, particulièrement à l'échelle internationale et avec les pays de zones tropicales. Les échanges entre milieu artisanal et scientifique sont nécessaires pour avancer dans ce domaine, de même que des collaborations avec des spécialistes des différentes disciplines concernées.

BIBLIOGRAPHIE ;
TABLES DES ILLUSTRATIONS ;
ANNEXES

VI. BIBLIOGRAPHIE

ABCP and Chuwa, S., 2000. African Blackwood Conservation Project (ABCP). The Woodwind Quarterly, (21): 25-38.

Ajuong, E.A. and Breese, M., 1997. The role of extractives on short-term creep in compression parallel to the grain of Pai wood (*Afzelia africana* Smith). Wood and Fiber Science, 29(2): 161-170.

Akitsu, H., Gril, J. and Norimoto, M., 1998. Acoustical properties of chemically modified wood in longitudinal and radial direction. In: M. Fioravanti and L. Uzielli (Editors), COST Action E8 worskshop on Mechanical performance of non-standard wood. Faculty of Agriculture, University of Florence, Florence, Italy, pp. 164-173.

Alméras, T., Thibaut, A. and Gril, J., 2005. Effect of circumferential heterogeneity of wood maturation strain, modulus of elasticity and radial growth on the regulation of stem orientation in trees. Trees, 19: 457-467.

Amusant, N., 2003. Durabilité naturelle et couleur des bois de Guyane: mesure, variabilité, déterminisme chimique. Application à *Dicorynia guianensis* (Angélique), *Sextonia rubra* (Grignon), *Eperua falcata* (Wapa) et *Eperua grandiflora* (Wapa courbaril). Doctorat, Sciences forestières et sciences du bois, ENGREF, Kourou, 246 pp.

Angyalossy, V., Amano, E. and Segala Alves, E., 2005. Madeiras utilizadas na fabricação de arcos para instruments de corda: Aspectos anatômicos. Acta Botanica Brasilica, 19(4): 819-834.

Arbonnier, M., 2004. Trees, shrubs and lianas of West African dry zones. CIRAD-MARGRAF-MNHN, 573 pp.

Arévalo Fuentes, R.L., 2002. Influence des composantes secondaires et de la structure anatomique sur les propriétés physico-mécaniques du bois d'Acajou (*Swietenia macrophylla* King). PhD, Département des sciences du bois et de la forêt/ Faculté de foresterie et de géomatique, Université Laval, Québec, 145 pp.

Ashby, M.F., 1992. Materials selection in mechanical design. Pergamon Press, Oxford, UK, 311 pp.

Ashton, H.E., 1974. Removal of Solvent from swollen wood. Wood Science, 6(4): 368-374.

ATIBT, 1975. Nomenclature générale des bois tropicaux, Nogent sur Marne, France, 289 pp.

Barber, M., 2006, Maderas Barber, http://www.maderasbarber.com

Bardet, S., 2001. Comportement thermoviscoélastique transverse du bois humide. Application à une essence tropicale dense: *Bocoa prouaencis* Aubl. Doctorat, Mécanique, Université MontpellierII, Montpellier, 226 pp.

Bariska, M. and Pizzi, A., 1986. The interaction of polyflavonoid tannins with wood cell walls. Holzforschung, 40(5): 299-302.

Barnett, J.R. and Jeronimidis, G., 2003a. Reaction wood. In: J.R. Barnett and G. Jeronimidis (Editors), Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing, CRC Press, pp. 118-136.

Barnett, J.R. and Jeronimidis, G. (Editors), 2003b. Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing, CRC Press, 226 pp.

Basu, R. and Mukherjee, P.K., 1998. Plants accustomed with musical instruments of the 'Bedomajhis' of Purulia. Advances in Plant Science, 11(1): 321-323.

Beals, H.O. and Davis, T.C., 1977. Figure in Wood-An Illustrated Review. Bulletin 486, Alabama Agricultural experiment station, pp.

Bertrand, D., 1997. Musique carnatique et facture instrumentale: analyse et évolution du jeu de la Vina et de sa lutherie au XXème siècle en Inde du Sud. Doctorat, Musicologie, Paris IV, Paris, 792 pp.

Besnainou, C., 1995. From wood mechanical measurements to composite materials for musical instruments: new technology for instrument makers. Material Research Society Bulletin: 34-36.

Besnainou, C., 2000. Introduction to the use of composite material in musical instruments. Catgut Acoustical Society Journal, 4(2 (series II)): 9-10.

Bezuidenhoudt, B.C.B., Brandt, V.E. and Ferreira, D., 1987. Flavonoid analogs from *Pterocarpus* species. Phytochemistry, 26(2): 531-535.

Bordonné, P.A., 1989. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibrations naturelles. Doctorat, Sciences du Bois, Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, 109 pp.

Braga de Oliveira, A., Gottlieb, O.R., Ollis, W.D. and Toledo Rizzini, C., 1970. Quimiossistematica e Filogenia. II. [1] - Uma correlação Filogenética dos Generôs *Dalbergia* e *Machaerium*. Anais da Academia Basileira de Ciências, 42: 159-160.

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

Brancheriau, L., Bailleres, H., Detienne, P., Kronland, R. and Metzger, B., 2006. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. Annals of Forest Science, 63: 73-81.

Brandily, M., 1974. Instruments de musique et musiciens instrumentistes chez les Teda du Tibesti, 82. Musée Royal de l'Afrique Centrale. Annales Série in-8° Sciences Humaines, Tervuren, Belgique, 247 pp.

Branger, D., 1993. Le xylophone à résonateurs multiples des Lobi. In: M. Fiéloux, J. Lombard and J.-M. Kambou-Ferrand (Editors), Images d'Afrique et sciences sociales: les pays Lobi, Birifor et Dagara (Burkina Faso, Côte d'Ivoire et Ghana), Ouagadougou, Burkina-Faso, pp. 460-469.

Brémaud, I., 2001. Propriétés déterminant l'utilisation des Bois en facture instrumentale selon leur fonction dans les Instruments: Application à la recherche d'essences de substitution. DEA, Sciences du Bois, ENGREF, nancy, 27+14 pp.

Brémaud, I., Dlouha, J., Thévenon, M.-F. and Gril, J., 2004a. Vibrational properties, shrinkage and color of a selection of tropical woods with high extractives content, III International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Vila Real, Portugal.

Brémaud, I. and Gril, J., 2005. Etude du « Vieillissement » du bois dans les instruments de musique dans une optique de conservation préventive:Effet de l'âge du matériau et des contraintes mécaniques et hygrothermiques appliquées en conditions de conservation ou de jeu. 1er rapport d'étape: Validation d'un dispositif de mesure des propriétés viscoélastiques et essais d'applicabilité aux bois, LMGC/Cité de la Musique/LMT-Cachan/LAM, Montpellier, pp. 14.

Brémaud, I., Minato, K., Gérard, J. and Thibaut, B., 2004b. Effect of extractives on vibrational properties and shrinkage of African Padauk (Pterocarpus soyauxii Taub.), III International Conference of the European Society for Wood Mechanics, Vila Real, Portugal.

Brillard, F., 2002. Etude du son produit par une touche de xylophone. DEA Sciences du Bois-ENSTIB/LERMAB, Sciences du Bois, Université Henri Poincaré -Nancy1, Nancy, 28 pp.

Bucur, V., 1995. Acoustics of wood. CRC Press, Boca Raton, 284 pp.

Cai, Z., Hunt, M.O., Fridley, K.J. and Rosowsky, D., 1997. New technique for evaluating damping of longitudinal free vibration in Wood-based materials. Journal of Testing and Evaluation, 25(4): 456-460.

Caillez, F. and Guéneau, P., 1972. Analyse en composantes principales des propriétés technologiques des bois malgaches. Cahiers scientifiques publiés sous les auspices du Centre Technique Forestier Tropical, (2): 51.

Cardon, D., 2003. Le Monde des Teintures Naturelles. Belin, Paris, 584pp.

Cardon, D., 2006. Natural dyes. Archetype Books (sous presse), London.

Carranza Gaytan, B., 2003. Evaluacion de cuatro maderas tropicales de México para la elaboracion de Acesorios de Violin. Tésis de Licenciatura en Lauderia, Lauderia, Escuela de lauderia, CONACULTA, INBA (Instituto Nacional de Bellas Artes), Santiago de Querétaro, 92 pp.

Carrington, J.F., 1976. Wooden drums for inter village telephony in Central Africa. Journal of the Institute of Wood Science, 7: 10-14.

Chafe, C., 1987. Collapse, volumetric shrinkage, specific gravity and extractives in Eucalyptus and others species. Part II: The influence of wood extractives. Wood Science and Technology, 21(1): 27-41.

Chaigne, A. and Doutaut, V., 1997. Numerical simulations of xylophones. I. Time-domain modeling of the vibrating bars. Journal of the Acoustical Society of America, 101(1): 539-557.

Chichignoud, M., Déon, G., Détienne, P., Parant, B. and Vantomme, P., 1990. Atlas des Bois Tropicaux d'Amérique Latine. CTFT & OIBT (Organisation Internationale des Bois Tropicaux et Centre Technique Forestier tropical), ATIBT (Association Technique Internationale des Bois Tropicaux), 218 pp.

Choong, E.T. and Achmadi, S.S., 1991. Effect of extractives on moisture sorption and shrinkage in tropical woods. Wood and Fiber Science, 23(2): 185-196.

Clair, B., 2001. Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Doctorat, Sciences Forestières et du Bois, ENGREF, Montpellier, 165 pp.

Coiffier, C. and Orliac, C., 2000. *Vitex* et *Intsia*: Bois d'oeuvre d'exception pour la statuaire de Nouvelle-Guinée et du Vanuatu. Techne, (11): 33-37.

Colombel, V.d., 1990. Instruments de musique et relations interethniques dans les monts du Mandara. In: D. Barreteau and H. Tourneux (Editors), Colloque MEGA-TCHAD. ORSTOM, Paris, pp. 183-212.

COMURNAT, 2001. Bois précieux- Les enjeux de 2002. Profession Musique, (1): 15.

Cooper, G.A., 1974. The effect of Black Walnut extractives on sorption, shrinkage and swelling. Wood Science, 6(4): 380-388.

Crowe, P.R., 1995. Des tambours à fente au Vanuatu. Percussions, (39): 24-32.

Curie, P., 1989. Etude Provisoire des relations entre qualité acoustique d'un bois en percussion et caractéristiques de résonance mesurées en laboratoire, Centre Technique Forestier Tropical, Nogent sur Marne, pp. 9.

Curtis, J., 1993. Sustainability: an issue confronting luthiers (from his 1992 Convention lecture). American Lutherie, (3): 40-45.

Dauchez, N., Génevaux, J.-M. and Brémaud, I., 2006. Qualité des archets de violons et instabilité de type flambement, CFA-Congrès Français d'Acoustique.

David, B., 1999. Caractérisations acoustiques de structures vibrantes par mise en atmosphère raréfiée. Méthodes d'estimation relatives aux fréquences et amortissements des modes propres. Applications en acoustique musicale. Doctorat, Acoustique, Université Paris 6, Paris, 233 pp.

Dechamps, R., 1972. Note préliminaire concernant l'identification anatomique des espèces de bois utilisées dans la fabrication des tambours à fente de l'Afrique Centrale. Africa Tervuren, XVIII(1): 15-18.

Dechamps, R., 1973. Note préliminaire concernant l'identification anatomique des espèces de bois utilisées dans la fabrication des xylophones de l'Afrique Centrale. Africa-Tervuren, XIX(3): 61-66.

Dechamps, R., 1992. 251 bois d'ébénisterie, sculpture, marqueterie et tournage. A l'usage des antiquaires, restaurateurs, marqueteurs. Documentation économique, Vol.8. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique, 190 pp.

Delune, L., 1977. Le bois dans les industries de la musique. Revue Forestière française, XXIX(2): 1977.

Déon, G., Caillez, F. and Blanc, N., 1976. Etude de l'aptitude des essences tropicales à l'emploi en traverses de chemin de fer à partir de résultats d'essais en laboratoire. Bois et Forêts des Tropiques, (167): 55-79.

Déon, G., Chadenson, M. and Hauteville, M., 1980. Influence des extraits naturels du bois sur sa résistance à la pourriture. Bois et Forêts des Tropiques, (191): 75-90.

Déon, G. and Schwartz, r., 1988. Résistance naturelle des bois tropicaux aux attaques biologiques. Bull. Soc. bot. Fr., Actualités Botaniques, 135(3): 37-48.

Détienne, P., 1979. Contrefil à rythme annuel dans les Faro, *Daniellia* sp. pl. Bois et Forêts des Tropiques, (183): 67-71.

Détienne, P. and Jacquet, P., 1983. Atlas d'identification des bois de l'Amazonie et des régions voisines. CTFT, Nogent sur Marne, France, 640 pp.

Dlouha, J., 2005. Propriétés acoustiques et retraits de séchage de bois tropicaux à fortes teneurs en extraits *(en Tchèque, Résumé en Anglais).* Master, MZLU, Brno, Rép. Tchèque, 85 pp.

Donaldson, L.A., 1996. Effect of physiological age and site on microfibril angle in *Pinus radiata*. IAWA Journal, 17(4): 421-429.

Douau, D., 1986. Evaluation des propriétés acoustiques, mécaniques et structurelles des bois de tables d'harmonie de guitare; leur influence sur le timbre de l'intrument. Thèse 3ème cycle, Acoustique, Université du Maine, 137 pp.

Dumonceaud, O., 2001. Petits bois naturellement durables dans des usages extérieurs en vue de limiter l'emploi des traitements par les pesticides: problèmes posés par l'utilisation du Châtaignier (*Castanea sativa* Mill.) et intérêts d'un traitement de type friture à basse température. Doctorat, Sciences Forestières et du Bois, ENGREF, Montpellier, France, 214 pp.

Faligand, M., 1993. "Le" tambour du Burundi (Adaptation de la Brochure du Centre de Civilisation Burundaise). Percussions, 29: 5-6.

Faligand, M., 1994. Un xylophone Madinda (traduction et adaptation de la brochure "Guide for the making of a selection of Ugandan musical Instruments, Kampala 1972). Percussions, 35: 7-9.

Fletcher, N.H. and Rossing, T.D., 1998. The physics of musical instruments. Springer Verlag, New-York, 756 pp.

Gabriel, A., 1993. Les tambours d'Ambrym. Percussions, 31: 21-30.

Gansemans, J., 1988. Les instruments de musique du Rwanda. Etude ethnomusicologique. Series A, Vol 16. Leuven University Press., 339 pp.

Gérard, J., 1991. Gutta Percha Ironwood et Lancewood. Trois nouveaux bois précieux nord-Australiens. Un exemple de sélection technologique et de promotion d'essences secondaires tropicales. Bois et Forêts des Tropiques, (228): 63-73.

Gérard, J. et al., 2003. Les métabolites secondaires et leurs conséquences sur les propriétés physiques des bois tropicaux: études préliminaires. In: P. Gerardin (Editor), 6èmes Journées Scientifiques de la Forêt et du Bois. GIS Bois Construction Environnement, ARBOLOR, Epinal.

Gomes, R., 1993. Brazilian tonewoods. American Lutherie, (33): 9-11.

Gril, J., 1987. Une modélisation du comportement hygro-rhéologique du bois à partir de sa microstructure. Doctorat, Sciences Physiques, Université Paris 6, Paris, 268 pp.

Gril, J., 1997. Couplages et blocages en rhéologie du bois. HDR, Mécanique, Université Montpellier II, Montpellier, 88 pp.

Gril, J., 2000. Bois et instruments de musique: le regard du mécanicien. Revue des Composites et des Matériaux Avancés, 10(3): 253-560.

Gril, J. et al., 2003. Propriétés physiques et mécaniques des bois de réaction, Convention DERF-UMII-INRA n°61.45.47/00, pp. 162.

Gril, J. and Yamamoto, H., 2004. Cell-wall modelling as a tool to study physical and mechanical properties of wood, Wood Fibre Cell Walls: Methods to study their formation, structure and properties, Cost Action E20, pp. 71-84.

Guiscafre, J. and Sales, C., 1977. Possibilité de collage en mélange de plusieurs espèces Africaines de "Bois rouges". Bois et Forêts des Tropiques, (175): 15-34.

Guitard, D. and El Amri, F., 1987. Modèles prévisonnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. Annales des Sciences Forestières, 44(3): 335-348.

Guridi Gomez, L.I. and Garcia Lopez, Y.A., 1996. Las maderas en los instrumentos musicales de cuerda de Paracho, Michoacan, Mexico. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo, Mexico, 45 pp.

Haines, D.W., 2000. The essential mechanical properties of wood prepared for musical instruments. Catgut Acoustical Society Journal, 4(2 (series II)): 20-32.

Harjono, R.D. and Dunlop, J.I., 1998. Acoustic properties of some Australian and Indonesian woods. Catgut Acoustical Society Journal, 3(5 (series II)).

Hase, N., 1987. A comparison between acoustic physical factors of Honduras rosewood for marimbas and xylohones and a sensory evaluation of these instruments. Mokuzai Gakkaishi, 33(10): 762-768.

Hearmon, R.F.S., 1958. The influence of shear and rotary inertia on the free flexural vibration of wooden beams. British Journal of Applied Physics, 9: 381-388.

Hernàndez, R., 1989. Influence des composantes secondaires et du contrefil sur les propriétés physico-mécaniques de bois tropicaux. Ph.D. Thesis, Département des Sciences du Bois, Université Laval, Québec.

Hernàndez, R. and Almeida, G., 2003. Effects of wood density and interlocked grain on the shear strength of three Amazonian tropical hardwoods. Wood and Fiber Science, 35(2): 154-166.

Hillis, W.E., 1968. Chemical Aspects of Heartwood Formation. Wood Science and Technology, 2: 241-259.

Hillis, W.E., 1987. Heartwood and Tree Exudates. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, Berlin, 268 pp.

Holz, D., 1996a. Acoustically important properties of xylophone-bar materials: can tropical woods be replaced by European species? Acustica united with Acta Acustica, 82: 878-884.

Holz, D., 1996b. Comments on "Chemical treatment of wood for musical instruments" [J. Acoust. Soc. Am. 96,3380-3391 (1994)]. Journal of the Acoustical Society of America, 99(3): 1795-1796.

Holz, D., 1996c. Tropical hardwoods used in musical instruments - can we substitute them by temperate zone species? Holzforschung, 50(2): 121-129.

Homo-Lechner, C., 1996. Sons et instruments de musique au Moyen Age. Archéologie musicale dans l'Europe du VIIe au XIVe siècles. Editions Errance, Paris, 143 pp.

Hori, R. et al., 2002. The importance of seasonal differences in the cellulose microfibril angle in softwoods in determining acoustic properties. Journal of Materials Science, 37: 4279-4284.

Hornbostel, E.M.V. and Sachs, C., 1961. Classification of Musical Instruments -Translated from the original german (1914) by Anthony Baines and Klaus P. Wachsmann. Galpin Society Journal, 14: 3-29.

Hunt, D.G. and Balsan, E., 1996. Why Old fiddles sound sweeter? Nature, (379): 681.

Hunt, D.G. and Gril, J., 1996. Evidence of a physical ageing phenomenon in wood. Journal of Material Science Letters, 15: 80-82.

Hutchins, C.M., 1993. The effect of relating the tailpiece frequency to that of other violin modes. Catgut Acoustical Society Journal, 2(3 (series II)): 5-8.

IPT, 1984. Madeira Nacional para Instrumentos Musicais. Informações Internas (Instituto de Pesquisas Tecnologicas do Estado de São Paulo), (98): 1-2.

Jain, S.K., 1965. Wooden musical instruments of the Gonds of Central India. Ethnomusicology, 9: 39-42.

Janin, G., 1994. Colorimétrie: principe de la mesure de la couleur. Application au bois. In: P. Jodin (Editor), Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, pp. 380-399.

Jansen, P.C.M., 2005. *Pterocarpus soyauxii* Taub. In: P.C.M. Jansen and D. Cardon (Editors), PROTA: Ressources Végétales de l'Afrique Tropicale. Volume 3: Colorants et tanins. Fondation PROTA/Backhuys Publishers/ CTA, Wageningen, Pays-Bas, pp. 238.

Jenkins, M., Oldfield, S. and Aylett, T., 2002. International trade in African Blackwood. Fauna & Flora International, Cambridge, UK, 32 pp.

Jodin, P. (Editor), 1994. Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, 433 pp.

Jordan, J., 1987. African Rosewood. American Lutherie, 9: 338-342.

Kaptain, L., 1991. Maderas que cantan. Gobierno del estado de Chiapas. Instituto chiapaneco de cultura., Tuxtla Gutierrez, Chiapas, Mexico, 226 pp.

Keller, R., 1994. La Constitution du Bois. In: P. Jodin (Editor), Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, pp. 13-51.

Kleist, G. and Bauch, J., 2001. Cellular UV Microspectrophotometric Investigation of Sapelli Heartwood (*Entandophragma cylindricum* Sprague) from Natural Provenances in Africa. Holzforschung, 55(2): 117-122.

Kubojima, Y., Okano, T. and Ohta, M., 1997. Effect of annual ring widths on structural and vibrational properties of wood. Mokuzai gakkaishi, 43(8): 634-641.

Kumar, N. and Seshadri, T.R., 1974. Chemical components of *Pterocarpus santalinus* sapwood. Current Science, 43(19): 611-612.

Kuo, M.L. and Arganbright, D.G., 1980a. Cellular distribution of extractives in Redwood and Incense Cedar. Part I. Radial varaiation in cell-wall extractive content. Holzforschung, 34(1): 17-22.

Kuo, M.L. and Arganbright, D.G., 1980b. Cellular distribution of extractives in Redwood and Incense Cedar. Part II. Microscopic observation of the location of cell wall and cell cavity extractives. Holzforschung, 34(2): 41-47.

Kusuma, I.W., Azuma, M., Darma, T., Itoh, K. and Tachibana, S., 2005. Isolation and identification of anti-fungal compounds from Amboyna wood. Holzforschung, 59: 170-172.

Lambourg, C., 1997. Modèle temporel pour la simulation numérique de plaques vibrantes. Application à la synthèse sonore. Doctorat, Acoustique, Université du Maine, 299 pp.

Lange, W. and Faix, O., 1999. Lignin-polyphenol interaction in Azobe (*Lophira alata*) heartwood. A study on milled wood lignin (MWL) and klason residues. Holzforschung, 53(5): 519-524.

Lavin, M. et al., 2001. The Dalbergioid legumes (Fabaceae): Delimitation of a Pantropical monophyletic clade. American Journal of Botany, 88(3): 503–533.

Lavondès, A., 1986. Les Arts. In: A. Lavondès (Editor), La vie quotidienne dans la Polynésie d'autrefois; Encyclopédie de la Polynésie, Vol 5. C. Gleizal; Multipress, Papeete, PYF, pp. 89-110.

Lévy-Bossy, R., 2002. Instruments de musique de Polynésie. Pacific Evenements, Tahiti, 60 pp.

LMI, 2006, Luthier Mercantile International. Tonewoods, supplies and tools, http://www.lmii.com

Luxford, R.F., 1931. Effects of extractives on the strength of wood. Journal of Agricultural Research, 42(12): 801-826.

M'Bang, T., 2003. Rôle des extractibles dans la stabilité dimensionnelle des bois tropicaux. Rapport de stage en sylviculture tropicale - chimie du bois au Cirad-forêt de Montpellier - France, Ecole national supérieure polytechnique, Yaoundé, Cameroun; CIRAD, pp. 23.

Mabberley, D.J., 2000. The Plant Book. A portable dictionary of Vascular Plants. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 858 pp.

Mantanis, G.I., Young, R.A. and Rowell, R.M., 1994a. Swelling of wood. Part 1. Swelling in water. Wood Science and Technology, 28(5): 119-134.

Mantanis, G.I., Young, R.A. and Rowell, R.M., 1994b. Swelling of wood. Part II. Swelling in organic liquids. Holzforschung, 48(6): 480-490.

Mantanis, G.I., Young, R.A. and Rowell, R.M., 1995. Swelling of wood. Part III. Effect of temperature and extractives on rate and maximum swelling. Holzforschung, 49(3): 239-248.

Martinez betancourt, J.I., Corral Barrero, c. and Poltronieri, J., 1995. La Flora Cubana y los instrumentos de la musica popular tradicional. Revista del Jardin Botanico Nacional, Cuba, XVI: 73-76.

Matsunaga, M. and Minato, K., 1998. Physical and mechanical properties required for violin bow materials II: Comparison of the processing properties and durability between Pernambuco and substitutable wood species. Journal of Wood Science, 44: 142-146.

Matsunaga, M., Minato, K. and Nakatsubo, F., 1999. Vibrational properties changes of spruce wood by impregnation with water soluble extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.). Journal of Wood Science, 45: 470-474.

Matsunaga, M., Obataya, E., Minato, K. and Nakatsubo, F., 2000. Working mechanism of adsorbed water on the vibrational properties of wood impregnated with extractives of pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng.). Journal of Wood Science, 46: 122-129.

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

Maurya, R. et al., 2004. Constituents of *Pterocarpus marsupium*: an ayurvedic crude drug. phytochemistry, 65(7): 915-920.

Mc Intyre, M.E. and Woodhouse, J., 1984. On measuring wood properties, Part I. Journal of the Catgut Acoustical Society, (42): 11-15.

Mc Intyre, M.E. and Woodhouse, J., 1985. On measuring wood properties, part II. Journal of the Catgut Acoustical Society, (43): 18-25.

Mc Intyre, M.E. and Woodhouse, J., 1986. On measuring wood properties, part III. Journal of the Catgut Acoustical Society, (45): 14-23.

Merlin, M. and VanRavenswaay, D., 1990. The History of Human Impact on the Genus *Santalum* in Hawai‘i, USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. PSW-122., pp.

Mertoglu-Elmas, G., 2003. Chemical components of heartwood and sapwood of common Yew (*Taxus baccata* L.). Journal of Environmental Biology, 24(4): 489-492.

Minato, K., Sakai, K., Matsunaga, M. and Nakatsubo, F., 1997. The vibrational properties of wood impregnated with extractives of some species of Leguminosae (Preliminary report). Mokuzai Gakkaishi, 43(12): 1035-1037.

Montaigne, J.M., 2000. Le trafiq du Brésil. Navigateurs Normands, Bois-Rouge et cannibales pendant la Renaissance. ASI Communication, Rouen, France, 48 pp.

Morgan, J.W.W. and Orsler, R.J., 1969. The interaction of wood with organic solvants. part II. Its significance for extractive location. Holzforschung, 23(2): 48-51.

Nakao, T., Okano, T. and Asano, I., 1985. Theoretical and experimental analysis of flexural vibration of the viscoelastic Timoshenko beam. Journal of Applied Mechanics, 52: 728-731.

Nepveu, G., 1994. Variabilité. In: P. Jodin (Editor), Le Bois Matériau d'Ingénierie. ARBOLOR, Nancy, pp. 127-199.

Nishino, Y. et al., 1998. Colorimetry of wood specimens from French Guiana. Journal of Wood Science, 44(1): 3-8.

Noda, E., Aoki, T. and Minato, K., 2002. Physical and chemical characteristics of the blackened portion of Japanese Persimmon (*Diospyros kaki*). Journal of Wood Science, 48: 245-249.

Norimoto, M., Gril, J. and Rowell, R.M., 1992. Rheological properties of chemically modified wood: relationship between dimensional and creep stability. Wood and Fiber Science, 24(1): 25-35.

Norimoto, M., Ono, T. and Watanabe, Y., 1984. Selection of wood used for piano soundboards *(en Japonais; Résumé, figures et légendes en Anglais).* Journal of the Society of Rheology, Japan, 12(3): 115-119.

Norimoto, M., Tanaka, F., Ohogama, T. and Ikimune, R., 1986. Specific Dynamic Young's Modulus and Internal Friction of Wood in the Longitudinal direction *(en Japonais; Traduction Joseph Gril).* Wood Research and Technical Notes, (22): 53-65.

Normand, D., 1988. A propos des Bois de Rose de Madagascar. Bois et Forêts des Tropiques, (217): 89-94.

Normand, D. and Paquis, J., 1976. Manuel d'identification des bois commerciaux. Tome 2. Afrique guinéo-congolaise. CTFT, Nogent sur Marne, 335 pp.

Normand, D., Sallenave, P. and Rothe, P.L., 1960. Les Ebènes dans le monde. Bois et Forêts des Tropiques, (72): 15-22.

Nzokou, P. and Kamden, D.P., 2004. Influence of wood extractives on moisture sorption and wettability of Red Oak (*Quercus rubra*), Black Cherry (*Prunus serotina*), and Red Pine (*Pinus resinosa*). Wood and Fiber Science, 36(4): 483-492.

Obataya, E., Minato, K. and Tomita, B., 2001. Influence of moisture content on the vibrational properties of hematoxylin-impregnated wood. Journal of Wood Science, 47: 317-321.

Obataya, E. and Norimoto, M., 1999. Acoustic properties of a reed (*Arundo donax* L.) used for the vibrating plate of a clarinet. Journal of the Acoustical Society of America, 106(2): 1106-1110.

Obataya, E., Norimoto, M. and Gril, J., 1998. The effects of adsorbed water on dynamic mechanical properties of wood. Polymer, 39(14): 3059-3064.

Obataya, E., Ono, T. and Norimoto, M., 2000. Vibrational properties of wood along the grain. Journal of Materials Science, 35: 2993-3001.

Obataya, E., Umezawa, T., Nakatsubo, F. and Norimoto, M., 1999. The effects of water-soluble extractives on the acoustic properties of reed (*Arundo donax* L.). Holzforschung, 53(1): 63-67.

Ohta, M., Okano, T. and Asano, I., 1984. Vibrational properties of marimba soundboards related with its grain orietaion and density variation, Pacific rim regional wood anatomy conference, Tsukuba, Japan, pp. 25-27.

Omeja, P., Obua, J. and Cunningham, A.B., 2005. Demand and supply of wood for drum making in central Uganda. International Forestry Review, 7(1): 21-26.

Ono, T. and Kataoka, A., 1979. The frequency dependance of the dynamic Young's modulus and internal friction of wood used for the soundboard of musical Instruments II. The dependance of the Young's modulus and internal friction on frequency, and the mechanical frequency dispersion *(texte en japonais; résumé, figures et tableaux en Anglais)*. Mokuzai Gakkaishi, 25(8): 535-542.

Ono, T. and Norimoto, M., 1983. Study on Young's modulus and internal friction of wood in relation to the evaluation of wood for musical instruments. Japanese Journal of Applied Physics, 22(4): 611-614.

Ono, T. and Norimoto, M., 1984. On physical criteria for the selection of wood for soundboards of musical instruments. Rheologica Acta, 23: 652-656.

Ono, T. and Norimoto, M., 1985. Anisotropy of dynamic Young's Modulus and internal fricton in wood. Japanese Journal of Applied Physics, 24(8): 960-964.

Pearson, F.G.O. and Webster, C., 1956 (reprinted 1967). Timbers used in the musical instruments Industry - Asurvey, Forest products research Laboratory, Ministry of Technology, Princes Risborough, Aylesbury, Bucks, pp. 47.

Peng, S., Scalbert, A. and Monties, B., 1991. Insoluble Ellagitannins in *Castanea sativa* and *Quercus petraea* Woods. Phytochemistry, 30(3): 775-778.

Pennington, C.W., 1963. The Tarahumar of Mexico. Their Environment and material culture. University of Utah Press, Salt Lake City, Utah, USA, 267 pp.

Pepper, H., 1953. Notes sur une sanza d'Afrique Equatoriale, Institut d'études Centrafricaines, Section Ethnologie Musicale, Brazzaville, pp. 13.

Pereira, H., Graça, J. and Rodrigues, J.C., 2003. Wood chemistry in relation to quality. In: J.R. Barnett and G. Jeronimidis (Editors), Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing, CRC Press, pp. 53-86.

Pizzi, A. and Cameron, F.A., 1986. Flavonoids tannins-structural wood components for drought resistance mechanisms of plants. Wood Science and Technology, 20(2): 119-124.

Poidevin, N., 2004. Brève histoire de l'archet. Texte non encore publié.

Popoola, A.V., 2000. Dyeability of Cellulose Fibers Usign Dyestuff from African Rosewood (*Pterocarpus erinaceous*). Journal of Applied Polymer Science, 77: 746-751.

Qassim Hassan, S., 1980. Les Instruments de Musique en Irak et leur rôle dans la société traditionnelle. Mouton Editeur. Editions de l'Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, 258 pp.

Quintanar Isaias, A. and Paz Pérez Olvera, C.d.l., 1994. El uso de las maderas en los instrumentos musicales. Contactos - Revista de Educacion en ciencias basicas e ingenieria, 3(6): 7-15.

Raponda-Walker, A. and Sillans, R., 1961. Les Plantes utiles du Gabon. Essai d'inventaire et de concordance des noms vernaculaires et scientifiques des plantes spontannées et introduites. Description des espèces, propriétés, utilisations économiques, ethnographiques et artistiques. Paul Lechevalier, Paris, France, 600 pp.

Read, M., 1993. Ebonies and rosewoods: requiem or revival? FFPS- Fauna and Flora Preservation Society, London, 16 pp.

Record, S.J. and Hess, R.W., 1949. Timbers of the New World. Yale University Press, New Haven, 640 pp.

Richter, H.G. and Dallwitz, M.J., 2000 onwards, Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, and Spanish. Version: 18th October 2002., http://biodiversity.uno.edu/delta/

Rijsdijk, J.F. and Laming, P.B., 1994. Physical and related Properties of 145 Timbers. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/Boston/London, 380 pp.

Rojo, J.P., 1972. *Pterocarpus* (Leguminosae - Papilionaceae) Revised for the world. Phanerogamarum Monographiae, Tomus V. Verlag von J. Cramer, 119 pp.

Rondon Rangel, J.A., 1993. Aspectos forestales de las artesanias del Estado Merida. Revista Forestal Venezolana, XXVII(37): 85-106.

Roohnia, M., 2005. Study on some factors affecting acoustic coefficient and damping properties of wood using Non destructive tests. PhD, Wood Science, Islamic Azad University - Campus of Science and Researches, Tehran, Iran, 129 pp.

Rowe, J.W. and Conner, A., 1979. Extractives in Eastern Hardwoods-A Review, Forest Products Laboratory, Forest Service, U.S. Department of Agriculture, Madison, Wisconsin, USA, pp. 72.

Ruelle, J., 2003. Anatomie comparative bois normal/bois de réaction et observation des relations structure/propriétés du bois de six espèces d'angiospermes de forêt tropicale humide et de trois espèces de gymnospermes de zone tempérée. DEA, Sciences du Bois, ENGREF, Nancy, 31 pp.

Rujinirun, C., Phinyocheep, P., Prachyabrued, W. and Laemsak, N., 2005. Chemical treatment of wood for musical instruments. Part I: acoustically important properties of wood for the Ranad (Thai traditional xylophone). Wood Science and Technology, 39(1): 77-85.

Sakai, K., Masahiro, M., Minato, K. and Nakatsubo, F., 1999. Effects of impregnation of simple phenolics and natural polycyclic compounds on physical properties of wood. Journal of Wood Science, 45: 227-232.

Salazar Salvatierra, R., 1994. Instrumentos Musicales del Folclor Costarricense. Editorial Technologica de Costa Rica, Cartago, Costa Rica, 228 pp.

Sali, S. and Kopac, J., 1998. The influence of the different machining processes on the acoustic properties of wooden resonant boards. Catgut Acoustical Society Journal, 3(5 (series II)): 15-20.

Salivas, P., 1997. Le Tuntui, Tambour de bois Jivaro. Percussions, 51: 35-43.

Saranpää, P., 2003. Wood density and growth. In: J.R. Barnett and G. Jeronimidis (Editors), Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing, CRC Press, pp. 87-117.

Sasaki, T., Norimoto, M., Yamada, T. and Rowell, R.M., 1988. Effect of moisture on the acoustical properties of wood *(en Japonais; résumé, figures et tableaux en Anglais)*. Mokuzai Gakkaishi, 34(10): 794-803.

Savard, J., 1959. Analyse chimique des bois tropicaux. CTFT.

Seshadri, T.R., 1972. Polyphenols of *Pterocarpus* and *Dalbergia* woods. Phytochemistry, 11(3): 881-898.

Shirazi, N., Setar construction. An Iranian musical instrument. Part Publication & Distribution, Téhéran, Iran, 119 pp.

Simon, G., Instruments migrateurs, http://instrumig.free.fr/

Skaar, C., 1988. Wood-Water Relations. Springer Series in Wood Science. Springer-Verlag, 279 pp.

Sugiyama, M., Matsunaga, M., Minato, K. and Norimoto, M., 1994. Physical and mechanical properties of Pernambuco (*Guilandina echinata* Spreng) used for violin bows. Mokuzai Gakkaishi, 40(9): 905-910.

Surowiec, I., Nowik, W. and Trojanowicz, M., 2004. Indentification of "insoluble" red dyewoods by high performance liquid chromatography-photodiode array detection (HPLC-PDA) fingerprinting. Journal of Separation Science, 27: 209-216.

Tarkow, H. and Kreuger, J., 1961. Distribution of hot-water soluble material in cell walls and cavities of Redwood. Forest Products Journal, 11(5): 228-229.

Taylor, F.W., 1974. Effects of extraction on the volume dimensions and specific gravity of solid wood blocks. Wood Science, 6(4): 396-404.

Thaman, R.R., 1992. Batiri kei baravi: The ethnobotany of Pacific island coastal plants. Atoll Research Bulletin. National Museum of Natural History; Smithsonian Institution, Washington DC, USA, 63 pp.

Thibaut, B. and Gril, J., 2003. Growth stresses. In: J.R. Barnett and G. Jeronimidis (Editors), Wood quality and its biological basis. Blackwell Publishing, CRC Press, pp. 137-156.

Timell, T.E., 1982. Recent progress in the chemistry and topochemistry of compression wood. Wood Science and Technology, 16: 83-122.

UNEP-WCMC, 2005, UNEP-WCMC Species Database: CITES-Listed Species, http://sea.unep-wcmc.org/isdb/CITES/Taxonomy

Vaiedelich, S., 1995. Matériaux composites et bois de Pernambouc. Essai de caractérisation. Rapport de stage de DESS, Chimie Appliquée, Université de Toulon, Toulon, 39 pp.

Vendries, C., 1999. Instruments à cordes et musiciens dans l'empire Romain. L' Harmattan, Paris, 417 pp.

Viaux-Locquin, J., 1997. Les bois d'ébénisterie dans le mobilier français. Léonce Laget, Paris, 226 pp.

Vitalis-Brun, A. and Mariaux, A., 1982. Séparation anatomique de bois de Sapotacées par des méthodes d'analyse multidimensionnelle. Bois et Forêts des Tropiques, (196): 59-71.

Von Robinson, N., 1993. Alternative lutherie woods list. American Lutherie, (35): 30-33.

Voskuil, D., 1995. Rethinking the fingerboard material. Catgut Acoustical Society Journal, 2(8 (series II)): 23-24.

Wangaard, F.F. and Granados, L.A., 1967. The effect of extractives on water-vapor sorption by wood. Wood Science and Technology, 1(3): 253-277.

Watanabe, U. and Norimoto, M., 1996. Shrinkage and elasticity of normal and compression woods in conifers. Mokuzai Gakkaishi, 42(7): 651-658.

Weddell, E., 1961. Influence of interlocked grains on the bending strength of timber, with particular reference to utile and geenheart. Journal of the Institute of Wood Science, 7: 56-72.

Wegst, U.G.K. and Ashby, M.F., 1996. Alternative woods for violin bows. BVMA- British Violin Making Assocaition Newsletter, (5): 7-14.

Wheatley, J.I., 1992. A guide to common trees of Vanuatu. With Lists of their Traditional uses & ni-Vanuatu names. Illustrated by M. Tebbs & S. Seoule.*(Informations communiquées par P. Caballion, IRD Nouméa).* Department of Forestry, Vanuatu, 307 pp.

Yamamoto, H., Sassus, F., Ninomiya, M. and Gril, J., 2001. A model of anisotropic swelling and shrinking process of wood. Part 2: A simulation of shrinking wood. Wood Science and Technology, 35: 167-181.

Yano, H., 1994. The changes in the acoustic properties of Western Red Cedar due to methanol extraction. Holzforschung, 48(6): 491-495.

Yano, H., Furuta, Y. and Nakagawa, H., 1997. Materials for guitar back plate made from sustainable forest ressources. Journal of the Acoustical Society of America, 101(2): 1112-1119.

Yano, H., Kajita, H. and Minato, K., 1994. Chemical treatment of wood for musical instruments. Journal of the Acoustical Society of America, 96(6): 3380-3391.

Yano, H., Kyou, K., Furuta, Y. and Kajita, H., 1995. Acoustic properties of Brazilian Rosewood used for guitar back plate *(en Japonais, résumé, tableaux et figures en Anglais)*. Mokuzai Gakkaishi, 41(1): 17-24.

Yano, H. and Minato, K., 1992. Improvement of the acoustic and hygroscopic properties of wood by a chemical treatment and application to the violin parts. Journal of the Acoustical Society of America, 92(3): 1222-1227.

Yeh, T.-F., Braun, j.L., Goldfarb, B., Chang, H.-m. and Kadla, J.F., 2006. Morphological and chemical variations between juvenile wood, mature wood, and compression wood of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). Holzforschung, 60(1): 1-8.

Yoshizawa, N., Itoh, T. and Shimaji, K., 1982. Variation in features of Compression wood among Gymnosperms. Bulletin of the Utsunomiya University Forests, 18: 45-64.

Yoshizawa, N., Satoh, M., Yokota, S. and Idei, T., 1993. Formation and structure of reaction wood in *Buxus microphylla* var. *insularis* Nakai. Wood Science and Technology, 27: 1-10.

VII. TABLE DES FIGURES

Figure 1 : A : structure cellulaire d'un résineux ; B : organisation de la paroi cellulaire d'une fibre ou trachéide ; C : représentation schématique simplifiée de la matière ligneuse..... 9
Figure 2 : Anisotropie : contribution imbriquée des différentes échelles de structure..... 10
Figure 3 : L'eau dans le bois : (à gauche) représentation schématique du passage du bois saturé à anhydre (en noir : eau libre dans les cavités/lumens ; en gris : eau liée à la matière des parois). (À droite) isothermes de sorption/désorption (domaine hygroscopique). 11
Figure 4 : Expressions du facteur de perte : dans le domaine temporel (à gauche) via le décrément logarithmique λ ; dans le domaine fréquentiel (à droite) via la largeur de pic à demi-puissance (facteur de qualité Q). 14
Figure 5 : Module de conservation et coefficient d'amortissement en fonction de la fréquence : évolution apparente (symboles vides) et corrigée pour l'influence du cisaillement et de l'inertie de rotation (symboles pleins). [Ono & Kataoka 1979] 14
Figure 7 : Evolution des propriétés vibratoires avec la teneur en eau hors équilibre. (à gauche) Variations de $\tan\delta$, E'/ρ (module de conservation spécifique) et de la teneur en eau entre 0 et près de 30% [Sasaki et al 1988]. (à droite) Variations de décrément logarithmique λ lors du passage d'une humidité relative de 35% à 81% (à 20°C), en adsorption puis en désorption (d'après [Gril 1997]). 15
Figure 8 : Vue schématisée des interactions entre paramètres de conception pouvant entrer en jeu, vis à vis des parties d'instrument en bois..... 16
Figure 10 : Tambour à fente d'Afrique Centrale, non ornementé, destiné à la transmission de messages : Illustration d'après [Déchamp 1972] et vue en section d'après [Carrington 1976]..... 19
Figure 11 : Forme « standard » de l'archet moderne..... 21
Figure 12 : Un des (le ?) plus ancien archet Européen ayant été retrouvé (époque Viking, fouilles archéologiques à Dublin). La baguette est en Cornouiller. Illustration de [Homo-Lechner 1996]. 22
Figure 13 : Evolution des formes d'archets de violon avant la forme « moderne ». Reconstitutions par Nelly Poidevin. 22
Figure 14 : Relations entre les différentes tables de données. Encadré en trait plein : partie centrale de la base opérationnelle ; en pointillé : mise en relation avec la base de données de propriétés technologiques de bois tropicaux du CIRAD. Les autres tables sont prévisionnelles (assez peu ou pas implémentées à l'heure actuelle). 29
Figure 15 : Formulaire « Bois » et sous formulaire « Appellations ». Deux liens au formulaire « instrument » permettent soit de consulter les parties dans lesquelles ce bois est utilisé, soit d'ajouter une occurrence de cette espèce en facture..... 30
Figure 16 : Formulaire « Instrument » et sous formulaire « Partie-Bois »..... 30
Figure 17 : Proportion d'association bois/partie pour différentes familles botaniques, pour les 4 familles organologiques, dans l'état actuel d'implémentation (sur ce graphique on a trié uniquement les parties ayant une fonction structurelle). 32
Figure 19 : Vue schématisée de la relation entre module d'élasticité des parois cellulaires et angle des microfibrilles selon l'état de la matrice [Gril 2000]. 37
Figure 20 : (à gauche) relation entre coefficient d'amortissement et angle moyen des microfibrilles sur du Hinoki (Chamaecyparis obtusa, un Résineux) [Norimoto et al 1986] ; (à droite) relation entre $\tan\delta/(E'/\rho)$ et E'/ρ, en échelle logarithmique, pour 30 espèces de feuillus (ronds pleins) et 25 de résineux (ronds ouverts) [Ono & Norimoto 1984]..... 37
Figure 21 : Coefficient d'amortissement en fonction du module d'élasticité spécifique, pour quelques matériaux ligneux « archétypes » en facture instrumentale, et comparaison aux relations standard de [Ono & Norimoto 1983&1984 ; Norimoto et al 1986]..... 38
Figure 22 : Effectifs des types de bois échantillonnés par grands groupes (à gauche), et par famille botanique (à droite, les libellés correspondent aux 4 premières lettres de la famille, pour les familles représentées par plus d'un type de bois)..... 45
Figure 23 : Schéma général du protocole d'essais suivi, et données obtenues 49
Figure 24 : Chariot de débit pour la préparation des éprouvettes de 2mm d'épaisseur. 51
Figure 25 : Contrecollage de pièces initiales de faibles dimensions..... 51
Figure 28 : Exsudation d'extraits lors du chauffage à 103°C (épaisseur de la face LT représentée≈2mm). 53
Figure 29 : Teneurs en eau (%) résiduelles après un séchage de 48h à 60°C (par comparaison avec un séchage à 103°C) pour un échantillon de densités anhydres et de teneurs en eau « sec à l'air » contrastées..... 53
Figure 30 : Distribution des teneurs en eau « sec à l'air » stabilisées observées sur l'ensemble de notre échantillon : a) par types de bois (n≈70) ; b) pour toutes les éprouvettes (n≈1400). 54

Figure 32 : Positionnement des éprouvettes « lamelles » entre les faces de mesure d'un comparateur sur socle (à gauche) ou d'un pied à coulisse. *57*
Figure 36 : Détermination de E/ρ et de E/KG$_{(TL\ ou\ RL)}$ par régression linéaire suivant le modèle de Timoshenko. *65*
Figure 37 : Schéma du dispositif de mesures vibratoires sans contact par vibrations forcées utilisé à l'Université Préfecturale de Kyoto. *67*
Figure 39 : Première version du montage développé au LMGC : le balayage en fréquence, le relevé des fréquences de résonance et des facteurs de qualité sont toujours manuels. L'acquisition et la sauvegarde des décroissances sont faites directement sur PC via une carte d'acquisition « National Instrument » et un programme sous Labview. *69*
Figure 40 : Version finale du dispositif de mesures vibratoires développé au LMGC (par Y. Elkaïm) : Le balayage en fréquence est piloté depuis le PC, la fréquence de résonance, la largeur de bande, le facteur de qualité et le coefficient d'amortissement sont automatiquement mesurés/calculés et sauvegardés. Différents réglages permettent de s'adapter à des bois de comportement très différents. *71*
Figure 41 : Commandes et visualisations pour la détection de la 1ère fréquence de résonance (on peut remarquer une légère détection du 2cd mode, malgré le positionnement du capteur au centre de l'éprouvette ; même en plaçant le capteur en regard d'un ventre du second mode, nous n'avons pas réussi dans l'état actuel des choses à obtenir d'amplitudes suffisantes pour être rigoureusement exploitables). *72*
Figure 42 : Visualisations, indicateurs et commandes pour l'acquisition et la sauvegarde de la fréquence de résonance et du facteur de qualité *72*
Figure 43 : Résolution relative sur la détermination du facteur de qualité Q^{-1} en fonction : de la fréquence de résonance fr et du facteur de qualité de l'éprouvette, et de la durée d'acquisition (Fréquence d'échantillonnage de 50kHz). Les portions de courbes en tirets gris correspondent à des couples de valeurs Q^{-1}/fr irréalistes pour le premier mode de flexion avec nos dimensions d'éprouvettes et pour l'échantillonnage de bois étudié en direction axiale. *73*
Figure 44 : Acquisition et traitement des décroissances, calcul du décrément logarithmique, et comparaison avec le facteur de qualité. *74*
Figure 45 : Relevé visuel du pic de résonance sur une éprouvette de Charme (Carpinus betulus, Q^{-1}≈0,010), pour chaque graduation d'amplitude matérialisée à l'écran de l'oscilloscope, et erreur générée sur la largeur de bande Δf mesurée *77*
Figure 46 : Incertitude relative calculée pour un décrément logarithmique « hypothétique » mesuré sur deux périodes seulement, en fonction : de l'amortissement du matériau étudié, de l'ordre n de la 2ème période prise en compte, de la résolution r du capteur, et de l'amplitude de déplacement initiale A_0. ..... *77*
Figure 47 : Distribution des paramètres de réponse des éprouvettes ayant un effet sur la précision des mesures des paramètres d'amortissement, pour toutes les éprouvettes de notre échantillon. f_R ; fréquence de résonance ; r^2→tanδ : coefficient de détermination relevé pour les calculs de tanδ par décrément logarithmique. *78*
Figure 49 : Comparaison des coefficient de variation de tanδ entre répétitions : lors de la mise en place de la méthode au LMGC (L1), par rapport au dispositif initial. N : nombre de périodes prises en compte dans la détermination du décrément logarithmique. *80*
Figure 50 : Distribution des coefficients de variations (%) entre répétitions pour les paramètres mesurés, selon les différents dispositifs expérimentaux. *81*
Figure 54 : Comparaison des mesures de module spécifiques obtenues : par vibrations libres sur barreaux normalisés ; par vibrations forcées sur des éprouvettes de taille réduite débitées du barreau initial. En X : calcul suivant le modèle de Timoshenko, pour les éprouvettes normalisées ; en Y : calcul suivant le modèle de Bernouilli, pour les éprouvettes normalisées, et pour les éprouvettes de vibrations forcées. Barres d'erreur X : précision de la mesure (≤5%), barre d'erreur Y : variations observées en vibrations forcées entre 3-5 éprouvettes redébitées de l'éprouvette initiale. *84*
Figure 55 : Comparaison des mesures de tanδ obtenues : par vibrations libres sur barreaux normalisés ; par vibrations forcées sur des éprouvettes de taille réduite débitées du barreau initial. Barres d'erreur Y : Coefficient de variation entre 3-6 répétitions par vibrations libres. Barres d'erreur X : (à gauche) CV moyen pour 3-6 répétitions et 3-5 éprouvettes (≈répétabilité); (à droite) CV observé entre les différentes éprouvettes redébitées de l'éprouvette initiale (≈variations locales de propriétés). *85*
Figure 56 : Relation entre déphasage (à 300Hz), et facteur d'amortissement mesuré par vibrations de poutre libre-libre, pour l'échantillonnage de bois présenté au §II (en rouge), et en incluant une éprouvette « de référence » en aluminium (en vert, données de facteur d'amortissement : CES Selector). Barres d'erreurs : X variations entre 4 éprouvettes jumelées en T; Y : CV entre répétitions sur une éprouvette jumelée en L. *85*
Figure 57 : Relation entre module d'élasticité et densité « sec à l'air » sur l'ensembles des essais effectués par vibrations forcées, tous types de bois confondus. *89*
Figure 58 : Relation entre module d'élasticité et densité « sec à l'air » pour : les bois « normaux » et de droit fil, et pour les sous-échantillons présentant du bois de compression avéré (résineux), ou du fil changeant (feuillus). *90*

Figure 59 : Densité et module d'Young longitudinal : courbes de tendances et dispersion sur : nos essais sur bois de résineux et de feuillus normaux et de droit fil (à gauche ; un point = une éprouvette) ; et sur les ≈ 3000 séries d'essais sur feuillus et résineux de la base de données du CIRAD (à droite ; un point = un essais, moyenne de 10 éprouvettes). 90
Figure 61 : Module spécifique longitudinal et densité « sec à l'air » pour les différents types de bois étudiés : « Bois normal » de résineux et feuillus à bois de droit fil (à gauche) ; Bois de compression avéré, bois à fil changeant et bois à teneurs en extraits élevées (à droite). 91
Figure 63 : Relations entre module spécifique, et coefficient d'amortissement, pour l'ensemble de nos essais (tous types de bois confondus). A gauche : en échelle linéaire ; à droite : en échelle logarithmique (E/ρ exprimé en Pa). En tirets : régression sur nos essais. En traits pleins : régressions de [Ono&Norimoto 1983&1984]... 94
Figure 64 : Relations entre tanδ et E/ρ pour les bois de feuillus (N=1155), et les bois de résineux (N=252), de notre échantillon. Echelles linéaire (à gauche) et logarithmique (à droite). Traits pleins fins : régressions citées. 95
Figure 65 : Relations entre tanδ et E/ρ pour les sous-groupes de bois susceptibles de présenter des orientations méso- ou microscopiques différentes. A gauche : bois « normaux » et de droit fil (triangles pleins : duramen d'If); à droite : bois à fil changeant et bois de compression avéré. 96
Figure 66 : Relations entre tanδ et E/ρ pour les bois de feuillus classés par gammes de teneurs en extraits [X]. [X] « faible-moyenne » : ≤8% ; « importante-très importante » :8~30% (d'après les données moyennes ou estimations disponibles sur l'arbre, à défaut sur l'espèce). Losanges pleins : groupuscules atypiques pour chaque classe, non pris en compte dans les régressions globales 98
Figure 67 : Relations entre E/ρ et tanδ pour : les résineux -hors bois de compression et bois à teneurs en extraits marquées; les feuillus ayant de faibles teneurs en extraits [X]≤4~5% (d'après les données moyennes ou estimations disponibles sur l'arbre, à défaut sur l'espèce). 99
Figure 68 : Modules spécifiques de perte (E''/ρ) et de conservation (E'/ρ) pour l'ensemble de notre échantillon (à gauche) et pour les bois de résineux et de feuillus (à droite). 102
Figure 69 Distribution des E'/ρ et E''/ρ sur l'ensemble de l'échantillon (barres avec motifs), et en excluant (barres unies) les deux forts sous échantillons de résineux avec bois de compression et/ou juvénile (§IV.a) et de Padouk d'Afrique avec forts angles de fil locaux (§IV.b). 103
Figure 70 : Modules spécifiques de perte (E''/ρ) et de conservation (E'/ρ) pour les différents types de bois étudiés : a) Résineux : Bois normal, bois de compression et If ; b) Feuillus : bois de droit fil et bois contrefilés ou ondés ; c) Bois supposés « normaux » : sans bois de réaction ni forte teneur en extraits manifestes et projection de peuplier probablement de tension; d) Bois à teneurs en extraits : modérées, et (très) importante (cf. Figure 66). 103
Figure 71 : Gammes de E''/ρ selon les types de bois (R : résineux, BC : bois de compression, BN : Bois normal ; F : feuillus à gammes de teneurs en extraits (%) : XF ≤4,5 ; 4,5< XM≤7,5 ; 7,5<XI≤15 et XTI >15). a→e : groupes différents au seuil de 0,05. En gras : moyenne ; trait fin : médiane ; boites : 1er au 3ème quartile..... 105
Figure 73 : Relation entre teneur en eau apparente et coefficient d'amortissement (à gauche) et module de perte spécifique (à droite). 107
Figure 74 : Amortissement, et module de perte spécifique en fonction de la teneur en eau apparente, pour les bois de feuillus groupés par gammes de teneurs en extraits (F&M : « faible à moyenne » ≤8%; XI&XTI: « Importante - très importante » 8% à + de 20%). 108
Figure 76 : Distribution des teneurs en eau « apparentes » (à gauche) et corrigées par le taux d'extrait (à droite), pour les groupes de [X] faibles - moyens (≤8%) et (très) importants (>8%). Ne sont représentés que les bois pour lesquels les données ou estimations de teneurs en extraits sont les plus fiables. 109
Figure 77 : Amortissement, et module de perte spécifique, comparés à la teneur en eau corrigée par le taux d'extraits. 109
Figure 78 : Densité « sec à l'air » et gonflement volumique partiel (anhydre vers sec à l'air), pour les feuillus à taux d'extraits « faibles à moyens » (≤8% ; F&M) et « importants à très importants » (>8% ; XI & XTI). A gauche : gonflements partiels ; à droite : coefficients de gonflement (α = g/MC, en %/%). 110
Figure 79 : Relation entre module d'Young spécifique, et gonflement « transverse moins longitudinal ». A gauche : gonflement partiel ; à droite : coefficient de gonflement (α = g/MC, en %/%). 111
Figure 81 : Relations entre Luminance L et densité (à gauche) et teneur en eau (à droite) « sec à l'air »; courbe de tendance sur l'ensemble et représentation des types de bois (F&M et XI&XTI : voir figures précédentes ; RBN : Bois Normaux de résineux, RBC de compression). 112*
Figure 82 : Relation entre luminance et coefficient d'amortissement (à gauche) et module de perte spécifique (à droite) ; courbe de tendance sur l'ensemble et représentation des types de bois (légende : voir Figure 81)..... 112
Figure 84: Distribution des types de bois étudiés par gammes de densité (à gauche) et de module d'Young dynamique axial (à droite). Courbe : fréquences (%) pour les ≈1000 espèces de la base de données du CIRAD. 120

Figure 85: Distribution des types de bois étudiés par gammes de module spécifique dynamique (à gauche) et de coefficients d'amortissement (à droite). *121*
Figure 86: Couples de valeurs E'/ρ – tanδ, classés par ordre croissant de E'/ρ, pour les bois de feuillus tropicaux. *122*
Figure 87: Couples de valeurs E'/ρ – tanδ, classés par ordre croissant de E'/ρ, pour les bois de feuillus tempérés et de résineux. *123*
Figure 88: Distribution des types de bois étudiés : (à gauche) par gammes d'écarts des coefficients d'amortissement mesurés par rapport aux relations « bois normaux » ; (à droite) par gammes de module de perte spécifique. *123*
Figure 89 & Tableau 14: Teneur en eau à l'équilibre « sec à l'air » et gonflement partiel volumique entre l'état anhydre et sec à l'air : Distribution par gammes de valeurs fixées, et répartition des types de bois en 5 classes. *125*
Figure 90: Paramètres colorimétriques CIELab pour les bois de feuillus tropicaux, classés par ordre décroissant de luminance. *126*
Figure 91: Paramètres CIELab par ordre décroissant de luminance, pour les bois de feuillus tempérés et résineux. *127*
Figure 92: Paramètres colorimétriques CIELCh (coordonnées polaires) classés par ordre décroissant de luminance, pour les bois de feuillus tropicaux (en haut), et de feuillus tempérés et résineux (en bas). *127*
Figure 93 & Tableau 15: Luminance (ou clarté) L et angle de teinte h* (en °) : Distribution par gammes spécifiées, et répartition des types de bois en 5 classes.* *128*
Figure 94: Distribution des classes de densité pour les "bois foncés" (classes I, II & III de L, voir Figure 93) et les"bois blancs" (classes IV & V de luminance).* *130*
Figure 96: Représentation des individus sur le premier plan principal (ACP sur propriétés mécaniques, physiques et couleur). Libellés : voir Tableau 10. ..... *133*
Figure 97: ACP sur densité, module d'élasticité spécifique et écarts du coefficient d'amortissement aux "bois standards". a) : Cercle des corrélations (Facteurs 1&2) ; b) : Représentation des individus dans le premier plan principal. En italique : Bois dont les regroupements ont été le plus modifiés par rapport à une analyse prenant en compte propriétés hygroscopiques et couleur (plus flèches indiquant leurs localisations antérieures). *135*
Figure 98: Arbre de classification hiérarchique ascendante (« CAH » ; méthode de Ward) des types de bois prenant en compte comme variables: densité, module d'élasticité spécifique, déviation du coefficient d'amortissement aux « bois normaux » *138*
Figure 99: Relation entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique pour les bois de Résineux. A gauche en échelle linéaire, à droite en échelle logarihmique. La « référence » correspond toujours à la tendance globale cohérente entre nos essais et les résultats de [Ono & Norimoto 1983]. *142*
Figure 100: E'/ρ et tanδ pour les bois de Feuillus tempérés. *143*
Figure 101: E'/ρ et tanδ pour divers bois de Feuillus tropicaux peu reliés botaniquement et/ou peu échantillonnés. *143*
Figure 102: E'/ρ et tanδ pour des bois de Moraceae. *144*
Figure 103: E'/ρ et tanδ pour les bois de cœur de Leguminosae : Caesalpiniaceae. *145*
Figure 104: E'/ρ et tanδ pour les bois de cœur de Leguminosae : Papilionaceae. *146*
Figure 105: Droites de régression Log[tanδ/(E/ρ)]=f[Log(E/ρ)]. *147*
Figure 106: Densité et propriétés vibratoires pour des échantillons provenant de 4 arbres de Doussié (Afzelia bipendensis Harms.). *148*
Figure 107: Densité et propriétés vibratoires pour des échantillons provenant de 6 arbres de Cèdre Cannelle (Licaria cayennensis Kosterm.) *149*
Figure 108: Densité et propriétés vibratoires pour 3 espèces de Caesalpiniaceae à faibles taux d'extraits : Dialium cochinchinense (Xoay, 1 indiv.), D. pachyphyllum (Omwong, 2 inds.), Scorodophloeus zenkerii (Divida, 2 inds.) *149*
Figure 109: Densité et propriétés vibratoires pour les Swartzia (Caesalpiniaceae) : Pao Rosa (S. fistuloides, Afrique) et Coração de Negro (S. panacoco : Cora1&2 ; S. sp à cœur noir : Cora2&3 ; Amérique Latine). *150*
Figure 110: Densité, module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement pour différentes espèces et/ou stocks de Palissandres (Dalbergia spp.). *150*
Figure 111: Paramètres d'amortissement intrinsèque E''/ρ et Δtanδ pour différentes espèces et/ou stocks de Palissandres (Dalbergia spp.). *151*
Figure 112: Densité, module d'Young, module spécifique et coefficient d'amortissement pour différents stocks de: Buis; Charme; Cormier. *151*
Figure 113: Paramètres d'amortissement intrinsèque E''/ρ et Δtanδ pour des Feuillus tempérés: Buis (2 stocks); Charme (2); Cormier (5). *152*
Figure 115: Aubiers et bois de Coeur de 6 espèces: régressions Log[tanδ/(E/ρ)]=f[Log(E/ρ)] moyennes sur bois de cœur, et variations par éprouvettes d'aubier. *153*

Figure 116: Densité « quasi-anhydre » (à gauche) et teneur en eau (à droite): comparaison des valeurs moyennes par arbre entre aubier et duramen pour les 6 essences concernées..... 154
Figure 117: Ecarts d'amortissement à la référence (à gauche) et module de perte spécifique (à droite): comparaison des valeurs moyennes par arbre entre aubier et duramen. 155
Figure 119: If : Densité anhydre, teneur en eau à l'équilibre, module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement pour: aubier (A), duramen (D), et zone à l'interface aubier/duramen (ZT)..... 156
Figure 124: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance "bois moyens » (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de taux d'extraits Alcool-Benzène dans la base de données du CIRAD. ● : essences de feuillus prises en compte dans la régression ; × : Résineux exclu de la régression. ... 164
Figure 127: Δtanδ et taux d'extraits AB: données obtenues sur les mêmes arbres/N°CTFT (moyennes par individus)..... 165
Figure 130: tanδ: valeurs observées vs. valeurs « prédites » : uniquement par E'/ρ (loi puissance) ; par E'/ρ et AB (régréssion linéaire) ; par E'/ρ (loi puissance) et AB (linéaire). Moyennes sur 18 essences..... 167
Figure 131: Relations entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique, telles que mesurées, et en déduisant l'effet des extractibles sur la densité (18 essences)..... 169
Figure 132: Relation entre teneurs moyennes par essence en extraits à l'Alcool-Benzène, et: écarts de l'amortissement à la tendance globale ; et module de perte spécifique, après déduction de l'effet massique des extractibles sur le module d'élasticité spécifique. Cercles : Feuillus tropicaux ; croix : 2 résineux (Pins) non pris en compte dans la tendance. 170
Figure 133: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance « bois moyens » (moyennes mesurées par essence) et données moyennes par espèce de point de saturation des fibres dans la base de données du CIRAD. Ronds pleins : essences prises en compte dans la régression ; croix : Greenheart exclu de la régression..... 172
Figure 134: Relation entre déviation des coefficients d'amortissement à la tendance "bois moyens » (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de retrait volumique rapporté à la densité (BDD du CIRAD)... 172
Figure 135: Relation entre module de perte spécifique (moyennes par essence) et données moyennes par espèce de Psf et de RB/D12 dans la base de données du CIRAD. Ronds pleins : essences prises en compte dans la régression ; croix : essences exclues de la régression..... 173
Figure 137: tanδ: valeurs observées vs. Valeurs « prédites » : uniquement par E'/ρ (loi puissance) ; par E'/ρ et Psf (régréssion linéaire) ; par E'/ρ (loi puissance) et Psf (linéaire). Moyennes sur 41 essences..... 174
Figure 138: Différences d'agencement cellulaire entre bois normal et bois de compression pour un des arbres (Pin Maritime) de l'échantillon étudié [Ruelle 2003]..... 181
Figure 139: Localisation dans le tronc des carrelets normalisés pour l'étude des propriétés physico-mécaniques [Anne Thibaut, CIRAD]. Encadrés : carrelets repris dans le présent travail. En rouge : données d'angles de microfibrilles existantes [Ruelle 2003], en vert : AMFs non disponibles. Les flèches numérotées désignent les points de mesure des indicateurs de contraintes de croissance sur l'arbre [Gril et al 2003 ; Alméras et al 2005]. 183
Figure 140: Débit des éprouvettes pour les essais par vibrations forcées à partir des carrelets (n = 56) déjà étudiés. 183
Figure 141: Données antérieures obtenues sur l'échantillon étudié par Anne Thibaut et Julien Ruelle: relation entre angle des microfibrilles et module d'élasticité spécifique "sec à l'air" (à gauche), et retrait total longitudinal (à droite). BC : bois de compression ; BN : bois « normal » ; BI : Bois intermédiaire. 185
Figure 142: Comparaison des valeurs de densité, et de module spécifique, mesurées sur éprouvettes de petite épaisseur stabilisées en adsorption, et mesurées sur carrelets normalisés en désorption. Une mesure sur carrelet (en abscisse) est associée à trois mesures sur lamelles qui en ont été débitées (en ordonnées ; ronds : éprouvettes radiales ; croix : éprouvettes tangentielles)..... 186
Figure 144: Densité "sec à l'air", Chromaticité C et gonflement partiel longitudinal gL, pour les bois normaux, intermédiaires et de compression des trois espèces..... 187
Figure 145: Relation entre angle moyen des microfibrilles, et module d'élasticité spécifique E'/ρ, et coefficient d'amortissement tanδ, bois "normaux" et bois de compression confondus (à gauche). A droite : résultats de [Norimoto et al 1986 ; repris dans Obataya et al 2000] sur bois de Hinoki avec des AMFs de ≈5-25°. 189
Figure 146: Relations entre angle moyen des microfibrilles, et module d'élasticité spécifique (à gauche), et coefficient d'amortissement (à droite) ; propriétés=moyennes de deux éprouvettes radiales par localisation (codes : voir Figure 141). 190
Figure 147: Relations entre tanδ et E'/ρ pour les différents types de bois (codes : voir Figure 141) (moyenne de deux éprouvettes radiales par localisation)..... 190
Figure 148: Relations entre module spécifique dynamique et coefficient d'amortissement, pour les bois "normaux/juvéniles" et les bois de compression d'Epicéa (=E) et de Pins (Maritime = PM ; Sylvestre = PS).191
Figure 149: Comparaison des écarts d'amortissement à la référence pour: les trois arbres/espèces, et pour les bois "normaux", intermédiaires, et de compression; a, b, c: groupes non différents au seuil de 5%. 192

Figure 151: Bois "normaux" et bois de compression: comparaison des valeurs moyennes normalisées pour les propriétés physiques, mécaniques, colorimétriques, et les angles de microfibrilles. *194*
Figure 155 : Padouk arbre 1 : prélèvement des carrelets à différentes distances radiales et libellés. *207*
Figure 156 : Schéma de débit pour l'obtention d'un échantillon de lamelles à duraminisation homogène et variations locales d'orientation du fil. Encart : courbure en section transverse. *208*
Figure 157 : Orientations globales repérables sur les faces LT supérieures (—) et inférieures (---) des planches initiales (P5 et P6) de l'arbre 2 de Padouk. Les diagrammes en barres correspondent aux angles approchés pour les éprouvettes débitées de chaque tronçon de planche initiale. *210*
Figure 158 : Distribution des valeurs absolues d'angles de fil apparents pour l'ensemble des éprouvettes de cet échantillon de Padouk (n=158). A gauche : angles minimaux et maximaux relevés sur les champs LT ; à droite : moyenne par éprouvette soit pondérée par la largeur de bande visible en plan LR, soit par intégrale. *210*
Figure 159 : Etapes expérimentales suivies pour les bois étudiés avant et après extraction *212*
Figure 160 : Principe de préparation de groupes jumelés ayant une duraminisation homogène et des gammes étendues et identiques entre groupes de module d'Young spécifique. *213*
Figure 162 : Variations locales de densité sec à l'air, débits sur planches de duramen médian de Padouk et de Vèn. ● : variations significatives, + : variations de l'ordre de l'erreur de mesure. *216*
Figure 163 : Variations de module spécifique entre différentes éprouvettes « lamelles » issues d'un même carrelet initial. En abscisse : valeurs sur les carrelets, reliées chacune à plusieurs valeurs en ordonnée. *217*
Figure 164 : Variations locales de module spécifique pour du duramen médian de Padouk et de Vèn. Chaque groupe : variations tangentielles sur 90mm ; entre groupes : en direction axiale. ● & + : voir (Figure 162). . *217*
Figure 165 : Relation entre module d'élasticité spécifiques et coefficient d'amortissement pour les différentes pièces de bois initiales de Padouk (à gauche ; arbres 1 et 2) et de Vèn (à droite) destinées à l'extraction. *218*
Figure 166 : Variations locales de module de perte spécifique E''/r pour les échantillons de duramen de Padouk à contre-fil marqué. *218*
Figure 167 : Régressions sur amortissement et module spécifique pour le duramen de Padouk échantillonné. *219*
Figure 168 : Relation entre angle de fil moyen relevé et E'/ρ (à gauche ; trait plein : évolution calculée) et tanδ (à droite), pour les différents tronçons présentés sur la Figure 157 (p208). *219*
Figure 169 : Relations entre coefficients d'amortissement et module d'élasticité spécifique pour les différents échantillons de Padouk. Courbe en trait plein épais: régression « bois de cœur normal de Padouk » ; courbe en tirets : régression sur l'aubier. *221*
Figure 170 : Valeurs moyennes et écart types de module de perte spécifique E''/ρ, pour : aubier et différentes distances radiales de duramen sur un arbre (à gauche) ; duramen de différents arbres (à droite). a, b, c, d : groupes non différents au seuil de 0,05. Les groupes c et d correspondent à la régression « bois de cœur » adoptée plus haut. *221*
Figure 171 : Relations entre coefficient d'amortissement et module d'élasticité spécifique, pour différents échantillons de duramen de Vèn ; duramen de Divida et duramen/aubier d'Umukambati. *222*
Figure 172 : Valeurs moyennes et écart types de module de perte spécifique E''/ρ, pour le duramen de Padouk (DP), Vèn (DV), Umukambati (DU) et Divida (DD) et aubier de Padouk (AP) et d'Umukambati (AU). (a, b, c) :groupes non différents au seuil de 0,05. A droite : les indices 1 et 2 correspondent aux échantillons de duramen de Padouk et de Vèn étudiés lors de la 1ère et 2ème série d'essais avec extractions, respectivement. ... *222*
Figure 173 : % de pertes de masse anhydre après extraction : à l'éthanol benzène (à gauche), duramen médian de Vèn et différentes positions radiales de duramen de Padouk (DE : Duramen externe ; DM : médian ; DI : interne); par différents solvants en parallèle (à droite), duramen médian de Padouk et de Vèn. *223*
Figure 176 : Padouk : valeurs moyennes de modifications physico-mécaniques après différentes extractions, exprimées en % (extrait-natif)/natif. *229*
Figure 177 : Vèn : valeurs moyennes de modifications physico-mécaniques après différentes extractions, exprimées en % (extrait-natif)/natif. *230*
Figure 178 : Diminutions (en %) de volume anhydre en fonction de la perte de masse pour les différentes extractions : valeurs moyennes par groupe. Symboles pleins : Padouk, symboles ouverts : Vèn. Losanges : dichlorométhane ; carrés : acétone ; triangles : méthanol ; ronds : eau chaude. Droites : « gonflements » inverses, ou retraits qui seraient observés pour une diminution de teneur en eau équivalente à la perte de masse. Trait plein : Padouk ; tirets : Vèn. *231*
Figure 179 : Diminution absolue de volume anhydre (en cm3) en fonction de la perte de masse absolue (en g). Symboles : cf. Figure 178. Droites : calculs d'après l'expression ci-dessus et les jeux de paramètres de [Chafe 1987] (%X_{parois} :0,63 ; $Mvol_{extrait}$: 1,4 ; ($V_{extraits}/\Delta V_0$) : 0,888), puis (A&B) en fixant ($V_{extraits}/\Delta V_0$) à 1 et (B) en fixant $Mvol_{extrait}$ à 1,5. ..... *232*
Figure 182 : Rendements d'extraction et variations relatives de teneur en eau « sec à l'air » (stabilisé à 20°C et 65%HR) pour les différents solvants sur Padouk et Vèn. A gauche : variation apparente de teneur en eau ; à droite : variations de teneurs en eau corrigées par les teneurs en extraits. *234*

Figure 183 : Rendements d'extraction et variations absolues de teneur en eau « sec à l'air » A gauche : variation apparente de teneur en eau ; à droite : variations de teneurs en eau corrigées par les teneurs en extraits. *234*
Figure 185 : Variations des paramètres colorimétriques L (clarté), a* (rouge) et b* (jaune) après les différentes extractions, pour le Padouk (à gauche, indice P) et pour le Vèn (à droite, indice V).* *236*
Figure 186 : Variations des paramètres colorimétriques L (clarté), C (saturation) et h* (angle de teinte) après les différentes extractions, pour le Padouk (à gauche, indice P) et pour le Vèn (à droite, indice V).* *236*
Figure 187 : Variations relatives du coefficient d'amortissement en fonction de la perte de masse anhydre (à gauche) et de la diminution de volume anhydre (à droite). Symboles : voir Figure 178. ..... *238*
Figure 188 : Comparaison des variations d'amortissement et des variations de teneur en eau : relatives (à gauche) et absolues (à droite) pour les différents traitements sur les deux espèces. (rond hachuré : $\Delta\tan\delta$ de Vèn/eau chaude moins Padouk/eau chaude) *239*
Figure 189 : Relations entre variations d'amortissement (à gauche) ou de teneur en eau (à droite) et proportion estimée d'extraits des parois retirés du bois (d'après les hypothèses du schéma 3 du §IV.b.7.2.a). (rond hachuré : $\Delta\tan\delta$ de Vèn/eau chaude moins Padouk/eau chaude). Droite : tendance globale sur le Vèn (en imposant 0 comme ordonnée à l'origine). *240*
Figure 190 : Relations entre coefficients d'amortissement et module spécifique pour le duramen de Padouk natif (trait et symboles plein) et extrait (symboles ouverts et régressions en pointillés). Losanges: dichlorométhane ; carrés: acétone ; triangles: méthanol ; ronds: eau chaude. *241*
Figure 191 : Relations entre coefficients d'amortissement et module spécifique pour le duramen de Vèn nature (trait et symboles plein) et extraits par différents solvants (symboles ouverts et régressions en pointillés). *242*
Figure 192 : Variations relatives de E'/ρ après extraction en fonction de la perte de masse anhydre. Symboles pleins : Padouk, symboles ouverts : Vèn. Losanges : dichlorométhane ; carrés : acétone ; triangles : méthanol ; ronds : eau chaude. *243*
Figure 193 : Relations entre $\tan\delta$ et E'/ρ pour : les bois dans leurs état natif après correction de E'/ρ pour la contribution des extraits à la densité ; les bois après l'extraction chimique « réelle » ayant le plus d'effet (méthanol). *244*
Figure 194 : variations relatives de module spécifique (corrigées par la densité extraite) en fonction du module spécifique natif (corrigé par la densité extraite). *245*
Figure 195 : Variations relatives après extraction : du module spécifique (corrigé par la densité extraite, à gauche) et de l'amortissement, en fonction de l'angle de fil approché. *245*
Figure 196: Variations périphériques des indicateurs de contraintes de croissance (ICC) et des retraits longitudinaux. Les valeurs sont normées (valeurs expérimentales divisées par le maximum sur l'arbre). Les points cerclés de rouge correspondent à du bois de réaction ; cerclés de noir à du bois « normal » (opposé). [Ruelle 2003]. *291*
Figure 197 : Variations de module spécifique entre différentes éprouvettes issues d'un même carrelet initial. ● : étendue de variation significative ; + : étendue de variation de l'ordre de l'erreur de mesure. *294*

VIII. LISTE DES TABLEAUX :

Tableau 1 : Propriétés vibratoires moyennes de bois « archétypes » en facture d'instruments à cordes occidentaux, d'après [Bucur 1995 ; Yano et al 1995 & 1997 ; Matsunaga et al 1996 ; Haines 2000]. Indice L : direction axiale ; indice R : direction radiale. Gammes de fréquences entre 200 et 700 Hz. E et E'/ρ en GPa, tanδ en ‰. 21
Tableau 2 : Résumé des nombres d'occurrences bois/partie d'instrument pour les 4 familles organologiques. 31
Tableau 3 : Résumé de l'échantillonnage inter-spécifique : Espèces, effectifs, types de bois, critères de choix et fournisseurs (Codes : voir texte). Les séparations de lignes correspondent (traits pleins) aux passages Résineux/Feuillus Tempérés/Tropicaux, ou bien (pointillés) regroupent les espèces d'un même genre. 46
Tableau 4 : Variations absolues prévisibles entre les dimensions des éprouvettes lamelles séchées 48h à 60°C, et leurs dimensions strictement anhydres. 58
Tableau 5 : Récapitulatif des mesures effectuées avec les différents dispositifs 80
Tableau 6 : Matrice de corrélation entre densité, module, module spécifique et amortissement. En gras : corrélation significative au seuil de 0,001. 88
Tableau 7 : Paramètres des régressions $\tan\delta = 10^{A}.(E/\rho)^{-B}$ *obtenues sur notre échantillonnage. [X]~teneur en extraits ; BC°~Bois de compression. Gamme de fréquences : 200-600Hz. Les coefficients de détermination* R^2 *sont exprimés pour les représentations en échelle linéaire (en gras), et logarithmique (en italique).* 101
Tableau 8 : Paramètres des régressions $Log[\tan\delta/(E/\rho)] = -(1+B)*Log(E/\rho)+A$ *obtenues dans la gamme de fréquence 200-700 Hz par [Ono&Norimoto 1983, 84, 85]. Les coefficients de détermination* R^2 *sont exprimés pour les représentations en échelle Log uniquement.* 101
Tableau 9 : Matrice des corrélations entre propriétés physiques et vibratoires mesurées. MC : teneur en eau à l'équilibre ; g : gonflement partiel entre l'état anhydre et MC ; α *: coefficients de gonflement (g/MC) ; L* : Luminance. En gras : valeurs significatives au seuil de 0,001.* 106
*Tableau 10: Valeurs moyennes (m) des propriétés vibratoires et physiques (et coefficients de variation (cv) le cas échéant), pour les différentes espèces et types de bois. Les données sont présentées par ordre alphabétique de nom botanique, sauf pour les bois mal ou non identifiés qui sont en fin de tableau. « A/D/BR » : type de bois : A= Aubier, D= Duramen de bois normal, BC : Bois de compression manifeste, BT= Bois de tension probable ; Dp= éprouvettes poncées ; * : un arbre est isolé du stock pour la comparaison de différents types de bois. Libellé : abréviation utilisée dans la suite. N = effectif (ép : comptage des éprouvettes ; pi : comptage des pièces de bois initiales). Les séparations de lignes marquent soit le passage entre résineux/feuillus tempérés/feuillus tropicaux ; soit regroupent les espèces d'un même genre ; ou les types de bois d'une même espèce.* 117
Tableau 11: Répartition des types de bois en 5 classes de densité et de module d'Young (partitionnement univarié). Les libellés correspondent à ceux donnés dans le Tableau 10. 120
Tableau 12: Répartition des types de bois en 5 classes de E'/ρ, et de tanδ. Italique: Leguminosae. 121
Tableau 13: Répartition des bois en 5 classes selon les écarts de tanδ à la tendance globale; et selon E''/ρ. 124
Figure 89 & Tableau 14: Teneur en eau à l'équilibre « sec à l'air » et gonflement partiel volumique entre l'état anhydre et sec à l'air : Distribution par gammes de valeurs fixées, et répartition des types de bois en 5 classes. 125
Figure 93 & Tableau 15: Luminance (ou clarté) L et angle de teinte h* (en °) : Distribution par gammes spécifiées, et répartition des types de bois en 5 classes.* 128
Tableau 16: Matrice des corrélations entre propriétés mécaniques, physiques et colorimétriques sur tous les types de bois. ***En gras*** *: relation expliquant plus de 50% de la variabilité ; en italique : relation expliquant plus de 25% des variations observées.* 129
Tableau 17: Matrice de corrélations pour les "bois foncés". 131
Tableau 18: Matrice de corrélations pour les « bois clairs ». 131
Tableau 19: Exemple de regroupement des types de bois par CAH : la partition des classes correspond au niveau illustré par la droite en pointillé sur la (Figure 98). Les données en regard des propriétés correspondent aux barycentres des classes sur la propriété considérée (données centrées-réduites). 139
Tableau 20: Paramètres des régressions entre amortissement et module spécifique 147
Tableau 21: Matrice de corrélations entre propriétés physico-mécaniques mesurées, et données de composition chimiques disponibles dans la base de données du CIRAD : moyennes pour 18 essences. 162
Tableau 22: Matrice de corrélations entre densité, propriétés vibratoires et teneur en eau corrigées par le taux d'extraits totaux, et : taux d'extraits, et de composés principaux après déduction des extractibles. 170
Tableau 23: Matrice de corrélations entre propriétés physico-mécaniques mesurées (moyennes par essences), et données moyennes par essence dans la base de données du CIRAD pour le point de saturation des fibres (Psf), et le retrait total volumique rapporté à la densité "sec à l'air" (RB/D12). 171
Tableau 24: Comparaison des valeurs moyennes d'angles de microfibrilles entre échantillons caractéristiques de bois de compression et de bois « normal » sur les 3 arbres : travail de [Ruelle 2003]. 184

Tableau 25: Valeurs moyennes de densité et gonflement axial, et amplitudes des différences entre bois de compression et bois normal. _____ *188*
Tableau 26: Comparaison des valeurs moyennes de module spécifique dynamique, et de coefficient d'amortissement, entre bois de compression (BC) et bois normal (BN) des trois espèces. _____ *192*
Tableau 27 : Composés secondaires du bois de cœur connus pour Pterocarpus soyauxii Taub. et P. erinaceus Poir. D'après la référence [1]: Surowiec et al 2004; complété par les références [2]: Déon et al 1980 ; [3]: Jansen 2005; [4]: Cardon 2003&2006. Autres espèces où le composé a été identifié : Ind : P. indicus Willd. ; Sant : P. santalinus L. ; Mars : P.marsupium Roxb. ; Tinct : P. tinctorius Welw. _____ *201*
Tableau 28 : Echantillonnage des trois espèces de Pterocarpus et de Divida. _____ *207*
Tableau 29 : Composition globale de l'échantillon « Pterocarpus ». Type de bois : A : aubier ; DA : duramen adjacent à l'aubier ; DM : duramen médian ; DI : duramen interne ; D : duramen de localisation radiale mal connue. Traitement : N : natif ; X1 : extraction généraliste ; X2 : extraction par différents solvants. _____ *209*
Tableau 30 : Propriétés physico-chimiques des solvants employés. _____ *214*
Tableau 31 : Pertes de masses anhydres après extraction par différents solvants (A-B : éthanol benzène (1:2) ; DichloM : dichlorométhane ; Ace : acétone). DE : Duramen externe ; DM : médian ; DI : interne. _____ *223*
Tableau 32 : Rendements d'extraction obtenus sur du duramen de Padouk par solvants successifs en série d'après [Déon et al 1980&1988] : extraction en soxhlet sur broyats. Et comparaison des rendements que nous obtenons par extraction en parallèle sur matériel solide. _____ *224*
Tableau 33 : Valeurs moyennes et écart-types (ou minimum et maximum pour modules et coefficient d'amortissement) des propriétés physico-mécaniques des bois de Padouk et de Vèn dans leur état natif puis après les 4 types d'extraction. Les abréviations correspondent à celles déjà employées. _____ *227*
Tableau 34 : Padouk, toutes extractions confondues : matrice des corrélations entre perte de masse (PM_0 , exprimée en valeurs positives), variations (Δ) de propriétés physico-mécaniques (extrait – natif)/natif et angle de fil. V : volume. Souligné : relation expliquant au moins 75% des variations observées ; italique : au moins 50%. _____ *228*
Tableau 35 : Vèn, toutes extractions confondues : matrice des corrélations entre perte de masse (PM_0 , exprimée en valeurs positives) et variations de propriétés physico-mécaniques (extrait – natif)/natif. _____ *228*
Tableau 36 : Equations des régressions en échelle logarithmique obtenues sur : l'ensemble de cet échantillon de Padouk natif; et sur chaque groupe jumelé (C à F) dans son état natif puis après extraction. _____ *241*
Tableau 37 : Equations des régressions en échelle logarithmique obtenues sur : l'ensemble de cet échantillon de Vèn natif; et sur chaque groupe jumelé (C à F) dans son état natif puis après extraction. _____ *242*
Tableau 38: Afzelia bipendensis Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *285*
Tableau 39: Bocoa prouaencis Aubl. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *285*
Tableau 40: Brosimum guianense (Aubl.) Huber (MORACEAE). _____ *286*
Tableau 41: Brosimum rubescens Taub. (MORACEAE). _____ *286*
Tableau 42: Caesalpinia echinata Lam. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *286*
Tableau 43: Dalbergia melanoxylon Guill. et Perr. (LEG. PAPILIONACEAE). _____ *287*
Tableau 44: Dalbergia sp. (LEG. PAPILIONACEAE). _____ *287*
Tableau 45: Dialium pachyphyllum Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *287*
Tableau 46: Licaria cayenensis Kosterm. (LAURACEAE). _____ *288*
Tableau 47: Picea abies Karst. (PINACEAE). _____ *288*
Tableau 48: Pterocarpus soyauxii Taub. (LEG. PAPILIONACEAE). _____ *288*
Tableau 49: Pterocarpus erinaceus Harms. (LEG. PAPILIONACEAE). _____ *289*
Tableau 50: Scorodophloeus zenkeri Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *289*
Tableau 51: Sorbus domestica L. (ROSACEAE). _____ *289*
Tableau 52: Swartzia fistuloides Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *290*
Tableau 53: Swartzia panacoco Cowan ou S.spp. (LEG. CAESALPINIACEAE). _____ *290*
Tableau 54: Taxus baccata L. (TAXACEAE). _____ *290*
Tableau 55: Corrélations pour l'ensemble des bois (valeurs moyennes par localisation) _____ *292*
Tableau 56: Corrélations pour les bois de compression (valeurs moyennes par localisation) _____ *292*
Tableau 57: Corrélations pour les bois "normaux" (valeurs moyennes par localisation) _____ *292*
Tableau 58 : Propriétés des arbres étudiés d'après la base de données du CIRAD. Ds : Densité « sec à l'air » ; psf : point de saturation des fibres ; RV : retrait volumique total (%) ; αV : coefficient de retrait volumique (en % par %), E : module d'Young axial ; C : cellulose corrigée, LK : Lignine de Klason ; HC ?: Hémicelluloses (estimées à partir du bilan) ; AB : extraits alcool-benzène ; E : extraits à l'eau chaude. _____ *293*

IX. ANNEXES

IX.a. Annexe: Matrices de corrélations entre propriétés vibratoires et physiques, à l'échelle de l'éprouvette, pour les différentes essences suffisamment échantillonnées.

Tableau 38: *Afzelia bipendensis* Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE).
Duramen de Doussié, 4 arbres, 12 éprouvettes (après tri des non représentatives)

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,857**	**0,727**	0,040	**0,566**	0,468	**-0,680**	0,027	0,257	0,054	0,174	0,091
E'	**0,857**	1	**0,976**	-0,004	**0,703**	**0,564**	**-0,736**	0,096	0,352	0,247	0,499	0,204
E'/ρ	**0,727**	**0,976**	1	-0,048	**0,683**	0,536	**-0,688**	0,138	0,380	0,308	**0,587**	0,227
tanδ	0,040	-0,004	-0,048	1	**0,696**	**0,817**	-0,377	-0,475	-0,341	-0,093	0,044	0,153
E''/ρ	**0,566**	**0,703**	**0,683**	**0,696**	1	**0,983**	**-0,773**	-0,255	0,018	0,141	0,439	0,267
Δtanδ%	0,468	**0,564**	0,536	**0,817**	**0,983**	1	**-0,719**	-0,326	-0,072	0,089	0,361	0,253
MC	**-0,680**	**-0,736**	**-0,688**	-0,377	**-0,773**	**-0,719**	1	0,319	-0,040	-0,100	-0,471	-0,202
g Vol	0,027	0,096	0,138	-0,475	-0,255	-0,326	0,319	1	**0,932**	-0,306	-0,383	**-0,598**
αVol	0,257	0,352	0,380	-0,341	0,018	-0,072	-0,040	**0,932**	1	-0,316	-0,249	**-0,579**
L*	0,054	0,247	0,308	-0,093	0,141	0,089	-0,100	-0,306	-0,316	1	**0,827**	**0,919**
C	0,174	0,499	**0,587**	0,044	0,439	0,361	-0,471	-0,383	-0,249	**0,827**	1	**0,772**
h*	0,091	0,204	0,227	0,153	0,267	0,253	-0,202	**-0,598**	**-0,579**	**0,919**	**0,772**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 39: *Bocoa prouaencis* Aubl. (LEG. CAESALPINIACEAE).
Duramen de Boco, 3 stocks, 33 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,648**	**0,522**	**-0,429**	-0,024	-0,253	**0,382**	0,092	**-0,387**	**0,462**	**0,568**	0,254
E'	**0,648**	1	**0,988**	**-0,819**	0,043	**-0,424**	0,169	0,038	-0,162	**0,413**	**0,432**	**0,369**
E'/ρ	**0,522**	**0,988**	1	**-0,830**	0,056	**-0,421**	0,102	0,015	-0,106	**0,356**	**0,356**	**0,349**
tanδ	**-0,429**	**-0,819**	**-0,830**	1	**0,506**	**0,853**	0,135	0,027	-0,080	-0,102	-0,163	-0,064
E''/ρ	-0,024	0,043	0,056	**0,506**	1	**0,882**	0,323	0,036	-0,282	0,290	0,169	**0,378**
Δtanδ%	-0,253	**-0,424**	**-0,421**	**0,853**	**0,882**	1	0,261	0,030	-0,215	0,110	0,003	0,187
MC	**0,382**	0,169	0,102	0,135	0,323	0,261	1	**0,598**	-0,156	**0,804**	**0,831**	**0,593**
g Vol	0,092	0,038	0,015	0,027	0,036	0,030	**0,598**	1	**0,659**	**0,434**	**0,417**	0,213
αVol	**-0,387**	-0,162	-0,106	-0,080	-0,282	-0,215	-0,156	**0,659**	1	-0,153	-0,233	-0,173
L*	**0,462**	**0,413**	**0,356**	-0,102	0,290	0,110	**0,804**	**0,434**	-0,153	1	**0,941**	**0,865**
C	**0,568**	**0,432**	**0,356**	-0,163	0,169	0,003	**0,831**	**0,417**	-0,233	**0,941**	1	**0,728**
h*	0,254	**0,369**	**0,349**	-0,064	**0,378**	0,187	**0,593**	0,213	-0,173	**0,865**	**0,728**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 40: *Brosimum guianense* (Aubl.) Huber (MORACEAE).

Duramen d'Amourette, 9 stocks, 43 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,460**	-0,029	-0,077	-0,115	-0,104	**-0,594**	-0,189	0,192	**-0,803**	**-0,797**	**-0,700**
E'	**0,460**	1	**0,873**	**-0,615**	0,051	-0,218	-0,073	0,217	0,270	**-0,326**	**-0,425**	0,066
E'/ρ	-0,029	**0,873**	1	**-0,645**	0,131	-0,179	0,242	**0,354**	0,204	0,082	-0,034	**0,468**
tanδ	-0,077	**-0,615**	**-0,645**	1	**0,670**	**0,865**	-0,190	**-0,384**	-0,205	0,108	0,168	-0,214
E''/ρ	-0,115	0,051	0,131	**0,670**	1	**0,952**	-0,020	-0,127	-0,029	0,212	0,168	0,184
Δtanδ%	-0,104	-0,218	-0,179	**0,865**	**0,952**	1	-0,096	-0,242	-0,100	0,184	0,179	0,034
MC	**-0,594**	-0,073	0,242	-0,190	-0,020	-0,096	1	**0,454**	-0,087	**0,525**	**0,431**	**0,668**
g Vol	-0,189	0,217	**0,354**	**-0,384**	-0,127	-0,242	**0,454**	1	**0,790**	0,236	0,198	**0,413**
αVol	0,192	0,270	0,204	-0,205	-0,029	-0,100	-0,087	**0,790**	1	-0,076	-0,114	0,050
L*	**-0,803**	**-0,326**	0,082	0,108	0,212	0,184	**0,525**	0,236	-0,076	1	**0,951**	**0,809**
C	**-0,797**	**-0,425**	-0,034	0,168	0,168	0,179	**0,431**	0,198	-0,114	**0,951**	1	**0,665**
h*	**-0,700**	0,066	**0,468**	-0,214	0,184	0,034	**0,668**	**0,413**	0,050	**0,809**	**0,665**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 41: *Brosimum rubescens* Taub. (MORACEAE).

Duramen de Satiné, 1 arbre, 16 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	-0,455	**-0,860**	**-0,738**	**-0,859**	**-0,846**	**-0,965**	**-0,872**	**0,521**	**-0,832**	**-0,976**	**-0,926**
E'	-0,455	1	**0,845**	0,457	**0,717**	**0,670**	**0,593**	0,462	-0,394	**0,690**	**0,518**	0,488
E'/ρ	**-0,860**	**0,845**	1	**0,696**	**0,922**	**0,887**	**0,914**	**0,776**	**-0,552**	**0,900**	**0,879**	**0,841**
tanδ	**-0,738**	0,457	**0,696**	1	**0,918**	**0,948**	**0,797**	**0,836**	-0,150	**0,623**	**0,761**	**0,674**
E''/ρ	**-0,859**	**0,717**	**0,922**	**0,918**	1	**0,996**	**0,920**	**0,863**	-0,386	**0,830**	**0,880**	**0,823**
Δtanδ%	**-0,846**	**0,670**	**0,887**	**0,948**	**0,996**	1	**0,908**	**0,870**	-0,341	**0,797**	**0,868**	**0,803**
MC	**-0,965**	**0,593**	**0,914**	**0,797**	**0,920**	**0,908**	1	**0,906**	**-0,499**	**0,843**	**0,972**	**0,878**
g Vol	**-0,872**	0,462	**0,776**	**0,836**	**0,863**	**0,870**	**0,906**	1	-0,091	**0,609**	**0,920**	**0,692**
αVol	**0,521**	-0,394	**-0,552**	-0,150	-0,386	-0,341	**-0,499**	-0,091	1	**-0,751**	-0,426	**-0,686**
L*	**-0,832**	**0,690**	**0,900**	**0,623**	**0,830**	**0,797**	**0,843**	**0,609**	**-0,751**	1	**0,814**	**0,899**
C	**-0,976**	**0,518**	**0,879**	**0,761**	**0,880**	**0,868**	**0,972**	**0,920**	-0,426	**0,814**	1	**0,862**
h*	**-0,926**	0,488	**0,841**	**0,674**	**0,823**	**0,803**	**0,878**	**0,692**	**-0,686**	**0,899**	**0,862**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 42: *Caesalpinia echinata* Lam. (LEG. CAESALPINIACEAE).

Duramen de Pernambouc, 8 stocks, 55 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,719**	0,189	0,096	**0,311**	0,248	**-0,350**	0,233	**0,466**	**-0,767**	**-0,609**	**-0,719**
E'	**0,719**	1	**0,816**	**-0,386**	0,249	0,009	-0,203	0,140	**0,288**	**-0,395**	**-0,316**	**-0,332**
E'/ρ	0,189	**0,816**	1	**-0,637**	0,086	-0,202	0,000	-0,007	0,016	0,087	0,054	0,121
tanδ	0,096	**-0,386**	**-0,637**	1	**0,704**	**0,879**	**0,283**	**0,301**	0,045	-0,229	-0,096	-0,151
E''/ρ	**0,311**	0,249	0,086	**0,704**	1	**0,958**	**0,388**	**0,414**	0,091	-0,232	-0,106	-0,110
Δtanδ%	0,248	0,009	-0,202	**0,879**	**0,958**	1	**0,376**	**0,400**	0,079	-0,249	-0,113	-0,137
MC	**-0,350**	-0,203	0,000	**0,283**	**0,388**	**0,376**	1	0,205	**-0,439**	**0,377**	0,256	**0,456**
g Vol	0,233	0,140	-0,007	**0,301**	**0,414**	**0,400**	0,205	1	**0,779**	**-0,343**	-0,176	**-0,271**
αVol	**0,466**	**0,288**	0,016	0,045	0,091	0,079	**-0,439**	**0,779**	1	**-0,556**	**-0,346**	**-0,545**
L*	**-0,767**	**-0,395**	0,087	-0,229	-0,232	-0,249	**0,377**	**-0,343**	**-0,556**	1	**0,761**	**0,852**
C	**-0,609**	**-0,316**	0,054	-0,096	-0,106	-0,113	0,256	-0,176	**-0,346**	**0,761**	1	**0,673**
h*	**-0,719**	**-0,332**	0,121	-0,151	-0,110	-0,137	**0,456**	**-0,271**	**-0,545**	**0,852**	**0,673**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 43: *Dalbergia melanoxylon* Guill. et Perr. (LEG. PAPILIONACEAE).
Duramen de Grenadille, 2 stocks, 11 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,696**	-0,596	-0,405	-0,561	-0,526	0,086	**-0,774**	**-0,636**	**-0,843**	**-0,904**	**-0,850**
E'	**0,696**	1	0,154	0,277	0,179	0,210	**0,691**	-0,567	**-0,848**	-0,249	-0,416	-0,358
E'/ρ	-0,596	0,154	1	**0,847**	**0,969**	**0,952**	**0,671**	0,463	-0,125	**0,899**	**0,812**	**0,754**
tanδ	-0,405	0,277	**0,847**	1	**0,949**	**0,968**	0,410	0,467	-0,050	**0,740**	**0,624**	**0,768**
E''/ρ	-0,561	0,179	**0,969**	**0,949**	1	**0,998**	0,549	0,518	-0,064	**0,878**	**0,782**	**0,814**
Δtanδ%	-0,526	0,210	**0,952**	**0,968**	**0,998**	1	0,533	0,504	-0,069	**0,853**	**0,750**	**0,806**
MC	0,086	**0,691**	**0,671**	0,410	0,549	0,533	1	-0,227	**-0,746**	0,349	0,185	-0,002
g Vol	**-0,774**	-0,567	0,463	0,467	0,518	0,504	-0,227	1	0,575	**0,756**	**0,796**	**0,759**
αVol	**-0,636**	**-0,848**	-0,125	-0,050	-0,064	-0,069	**-0,746**	0,575	1	0,225	0,302	0,466
L*	**-0,843**	-0,249	**0,899**	**0,740**	**0,878**	**0,853**	0,349	**0,756**	0,225	1	**0,968**	**0,887**
C	**-0,904**	-0,416	**0,812**	**0,624**	**0,782**	**0,750**	0,185	**0,796**	0,302	**0,968**	1	**0,884**
h*	**-0,850**	-0,358	**0,754**	**0,768**	**0,814**	**0,806**	-0,002	**0,759**	0,466	**0,887**	**0,884**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 44: *Dalbergia sp.* (LEG. PAPILIONACEAE).
Duramen de Palissandre Manary, 4 arbres, 44 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,963**	**0,840**	**0,445**	**0,863**	**0,803**	-0,283	**0,413**	**0,733**	-0,292	0,044	**0,308**
E'	**0,963**	1	**0,953**	**0,308**	**0,848**	**0,758**	-0,237	**0,490**	**0,759**	-0,231	0,061	0,291
E'/ρ	**0,840**	**0,953**	1	0,143	**0,770**	**0,657**	-0,200	**0,504**	**0,716**	-0,161	0,052	0,248
tanδ	**0,445**	**0,308**	0,143	1	**0,740**	**0,839**	**-0,618**	-0,218	0,275	-0,225	**-0,394**	0,033
E''/ρ	**0,863**	**0,848**	**0,770**	**0,740**	1	**0,987**	**-0,540**	0,195	**0,664**	-0,261	-0,213	0,191
Δtanδ%	**0,803**	**0,758**	**0,657**	**0,839**	**0,987**	1	**-0,591**	0,102	**0,602**	-0,266	-0,272	0,159
MC	-0,283	-0,237	-0,200	**-0,618**	**-0,540**	**-0,591**	1	**0,457**	-0,257	0,249	**0,629**	0,264
g Vol	**0,413**	**0,490**	**0,504**	-0,218	0,195	0,102	**0,457**	1	**0,718**	0,063	**0,325**	0,173
αVol	**0,733**	**0,759**	**0,716**	0,275	**0,664**	**0,602**	-0,257	**0,718**	1	-0,133	-0,066	0,111
L*	-0,292	-0,231	-0,161	-0,225	-0,261	-0,266	0,249	0,063	-0,133	1	-0,003	-0,176
C	0,044	0,061	0,052	**-0,394**	-0,213	-0,272	**0,629**	**0,325**	-0,066	-0,003	1	**0,628**
h*	**0,308**	0,291	0,248	0,033	0,191	0,159	0,264	0,173	0,111	-0,176	**0,628**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 45: *Dialium pachyphyllum* Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE).
Duramen d'Omwong, 2 arbres, 12 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,598**	-0,491	0,558	0,214	0,369	**-0,665**	0,256	0,102	0,065	0,065	0,065
E'	**0,598**	1	0,403	0,037	0,425	0,311	-0,372	-0,303	-0,249	-0,192	-0,192	-0,192
E'/ρ	-0,491	0,403	1	**-0,590**	0,226	-0,075	0,369	**-0,620**	-0,379	-0,268	-0,268	-0,268
tanδ	0,558	0,037	**-0,590**	1	**0,652**	**0,849**	-0,256	0,303	0,147	0,336	0,336	0,336
E''/ρ	0,214	0,425	0,226	**0,652**	1	**0,954**	0,027	-0,206	-0,175	0,178	0,178	0,178
Δtanδ%	0,369	0,311	-0,075	**0,849**	**0,954**	1	-0,084	-0,026	-0,067	0,261	0,261	0,261
MC	**-0,665**	-0,372	0,369	-0,256	0,027	-0,084	1	-0,048	-0,137	0,085	0,085	0,085
g Vol	0,256	-0,303	**-0,620**	0,303	-0,206	-0,026	-0,048	1	**0,788**	-0,108	-0,108	-0,108
αVol	0,102	-0,249	-0,379	0,147	-0,175	-0,067	-0,137	**0,788**	1	-0,397	-0,397	-0,397
L*	0,065	-0,192	-0,268	0,336	0,178	0,261	0,085	-0,108	-0,397	1	**1,000**	**1,000**
C	0,065	-0,192	-0,268	0,336	0,178	0,261	0,085	-0,108	-0,397	**1,000**	1	**1,000**
h*	0,065	-0,192	-0,268	0,336	0,178	0,261	0,085	-0,108	-0,397	**1,000**	**1,000**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 46: *Licaria cayenensis* Kosterm. (LAURACEAE).

Duramen de Cèdre Cannelle, 6 arbres, 16 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,899**	**0,778**	**-0,627**	0,067	-0,214	-0,337	0,243	0,348	0,374	-0,037	0,418
E'	**0,899**	1	**0,974**	**-0,625**	0,255	-0,084	**-0,532**	0,420	**0,587**	0,345	0,056	0,285
E'/ρ	**0,778**	**0,974**	1	**-0,591**	0,318	-0,026	**-0,595**	0,468	**0,657**	0,311	0,106	0,207
tanδ	**-0,627**	**-0,625**	**-0,591**	1	**0,573**	**0,819**	0,311	-0,190	-0,277	-0,127	-0,030	-0,262
E''/ρ	0,067	0,255	0,318	**0,573**	1	**0,939**	-0,236	0,252	0,339	0,206	0,078	-0,054
Δtanδ%	-0,214	-0,084	-0,026	**0,819**	**0,939**	1	-0,036	0,095	0,119	0,095	0,041	-0,142
MC	-0,337	**-0,532**	**-0,595**	0,311	-0,236	-0,036	1	0,023	-0,334	-0,100	0,073	-0,192
g Vol	0,243	0,420	0,468	-0,190	0,252	0,095	0,023	1	**0,934**	0,080	-0,092	0,013
αVol	0,348	**0,587**	**0,657**	-0,277	0,339	0,119	-0,334	**0,934**	1	0,104	-0,100	0,058
L*	0,374	0,345	0,311	-0,127	0,206	0,095	-0,100	0,080	0,104	1	**0,519**	**0,757**
C	-0,037	0,056	0,106	-0,030	0,078	0,041	0,073	-0,092	-0,100	**0,519**	1	-0,103
h*	0,418	0,285	0,207	-0,262	-0,054	-0,142	-0,192	0,013	0,058	**0,757**	-0,103	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 47: *Picea abies* Karst. (PINACEAE).

Duramen d'Epicéa, 7 stocks (fournitures de lutherie), 19 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,682**	0,182	0,208	**0,577**	**0,544**	**-0,915**	**0,577**	**0,597**	0,296	-0,153	0,434
E'	**0,682**	1	**0,842**	**-0,479**	**0,655**	0,220	**-0,596**	**1,000**	**0,992**	**0,624**	-0,260	**0,789**
E'/ρ	0,182	**0,842**	1	**-0,797**	**0,458**	-0,102	-0,134	**0,935**	**0,879**	**0,623**	-0,248	**0,732**
tanδ	0,208	**-0,479**	**-0,797**	1	0,162	**0,675**	-0,337	**-0,887**	**-0,817**	**-0,492**	0,299	**-0,467**
E''/ρ	**0,577**	**0,655**	**0,458**	0,162	1	**0,837**	**-0,656**	0,188	0,201	0,382	-0,046	**0,565**
Δtanδ%	**0,544**	0,220	-0,102	**0,675**	**0,837**	1	**-0,669**	-0,357	-0,308	0,028	0,114	0,172
MC	**-0,915**	**-0,596**	-0,134	-0,337	**-0,656**	**-0,669**	1	-0,181	-0,188	0,246	-0,278	0,185
g Vol	**0,577**	**1,000**	**0,935**	**-0,887**	0,188	-0,357	-0,181	1	**0,997**	**0,702**	**-0,565**	**0,633**
αVol	**0,597**	**0,992**	**0,879**	**-0,817**	0,201	-0,308	-0,188	**0,997**	1	**0,718**	**-0,582**	**0,646**
L*	0,296	**0,624**	**0,623**	**-0,492**	0,382	0,028	0,246	**0,702**	**0,718**	1	**-0,899**	**0,887**
C	-0,153	-0,260	-0,248	0,299	-0,046	0,114	-0,278	**-0,565**	**-0,582**	**-0,899**	1	**-0,629**
h*	0,434	**0,789**	**0,732**	**-0,467**	**0,565**	0,172	0,185	**0,633**	**0,646**	**0,887**	**-0,629**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 48: *Pterocarpus soyauxii* Taub. (LEG. PAPILIONACEAE).

Duramen de Padouk, 5 arbres, 154 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	0,097	**-0,529**	0,059	**-0,511**	**-0,395**	-0,076	0,145	**0,216**	**-0,602**	-0,097	**-0,437**
E'	0,097	1	**0,784**	**-0,503**	**0,249**	0,038	0,009	**-0,499**	**-0,491**	**-0,583**	**-0,673**	**-0,628**
E'/ρ	**-0,529**	**0,784**	1	**-0,394**	**0,596**	**0,353**	0,081	**-0,556**	**-0,604**	-0,107	**-0,549**	**-0,245**
tanδ	0,059	**-0,503**	**-0,394**	1	**0,490**	**0,712**	**0,199**	-0,137	**-0,219**	0,063	**-0,181**	0,156
E''/ρ	**-0,511**	**0,249**	**0,596**	**0,490**	1	**0,961**	**0,252**	**-0,604**	**-0,727**	0,040	**-0,596**	-0,009
Δtanδ%	**-0,395**	0,038	**0,353**	**0,712**	**0,961**	1	**0,268**	**-0,523**	**-0,648**	0,056	**-0,530**	0,048
MC	-0,076	0,009	0,081	**0,199**	**0,252**	**0,268**	1	-0,002	-0,086	0,059	-0,086	0,033
g Vol	0,145	**-0,499**	**-0,556**	-0,137	**-0,604**	**-0,523**	-0,002	1	**0,972**	**0,236**	**0,581**	**0,247**
αVol	**0,216**	**-0,491**	**-0,604**	**-0,219**	**-0,727**	**-0,648**	-0,086	**0,972**	1	**0,245**	**0,654**	**0,269**
L*	**-0,602**	**-0,583**	-0,107	0,063	0,040	0,056	0,059	**0,236**	**0,245**	1	**0,739**	**0,930**
C	-0,097	**-0,673**	**-0,549**	**-0,181**	**-0,596**	**-0,530**	-0,086	**0,581**	**0,654**	**0,739**	1	**0,745**
h*	**-0,437**	**-0,628**	**-0,245**	0,156	-0,009	0,048	0,033	**0,247**	**0,269**	**0,930**	**0,745**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 49: *Pterocarpus erinaceus* Harms. (LEG. PAPILIONACEAE).
Duramen de Vèn, 2 stocks, 78 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,272**	-0,046	-0,037	-0,053	-0,048	**-0,577**	-0,102	**0,279**	-0,148	**-0,247**	**-0,378**
E'	**0,272**	1	**0,948**	-0,001	**0,564**	**0,428**	0,152	-0,179	**-0,318**	0,169	**0,337**	**0,359**
E'/ρ	-0,046	**0,948**	1	0,010	**0,602**	**0,459**	**0,366**	-0,145	**-0,424**	**0,231**	**0,441**	**0,506**
tanδ	-0,037	-0,001	0,010	1	**0,803**	**0,892**	0,214	0,138	0,037	0,126	0,077	0,076
E''/ρ	-0,053	**0,564**	**0,602**	**0,803**	1	**0,986**	**0,383**	0,025	-0,215	**0,227**	**0,314**	**0,355**
Δtanδ%	-0,048	**0,428**	**0,459**	**0,892**	**0,986**	1	**0,348**	0,056	-0,153	0,205	**0,258**	**0,288**
MC	**-0,577**	0,152	**0,366**	0,214	**0,383**	**0,348**	1	**0,479**	-0,061	**0,277**	**0,459**	**0,425**
g Vol	-0,102	-0,179	-0,145	0,138	0,025	0,056	**0,479**	1	**0,825**	-0,040	-0,033	-0,067
αVol	**0,279**	**-0,318**	**-0,424**	0,037	-0,215	-0,153	-0,061	**0,825**	1	**-0,227**	**-0,356**	**-0,411**
L*	-0,148	0,169	**0,231**	0,126	**0,227**	0,205	**0,277**	-0,040	**-0,227**	1	**0,777**	**0,801**
C	**-0,247**	**0,337**	**0,441**	0,077	**0,314**	**0,258**	**0,459**	-0,033	**-0,356**	**0,777**	1	**0,817**
h*	**-0,378**	**0,359**	**0,506**	0,076	**0,355**	**0,288**	**0,425**	-0,067	**-0,411**	**0,801**	**0,817**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 50: *Scorodophloeus zenkeri* Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE).
Duramen de Divida, 2 stocks, 14 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	0,095	**-0,565**	-0,385	**-0,674**	**-0,695**	0,261	-0,401	-0,053	**0,834**	**0,834**	**0,834**
E'	0,095	1	**0,766**	-0,391	**0,576**	0,459	**-0,638**	0,133	0,154	-0,284	-0,284	-0,284
E'/ρ	**-0,565**	**0,766**	1	-0,074	**0,913**	**0,830**	**-0,692**	0,375	0,169	**-0,806**	**-0,806**	**-0,806**
tanδ	-0,385	-0,391	-0,074	1	0,337	0,494	0,474	**0,682**	0,271	-0,516	-0,516	-0,516
E''/ρ	**-0,674**	**0,576**	**0,913**	0,337	1	**0,985**	-0,465	**0,641**	0,280	**-0,963**	**-0,963**	**-0,963**
Δtanδ%	**-0,695**	0,459	**0,830**	0,494	**0,985**	1	-0,344	**0,722**	0,308	**-0,982**	**-0,982**	**-0,982**
MC	0,261	**-0,638**	**-0,692**	0,474	-0,465	-0,344	1	0,027	-0,083	-0,020	-0,020	-0,020
g Vol	-0,401	0,133	0,375	**0,682**	**0,641**	**0,722**	0,027	1	**0,801**	-0,475	-0,475	-0,475
αVol	-0,053	0,154	0,169	0,271	0,280	0,308	-0,083	**0,801**	1	-0,318	-0,318	-0,318
L*	**0,834**	-0,284	**-0,806**	-0,516	**-0,963**	**-0,982**	-0,020	-0,475	-0,318	1	**1,000**	**1,000**
C	**0,834**	-0,284	**-0,806**	-0,516	**-0,963**	**-0,982**	-0,020	-0,475	-0,318	**1,000**	1	**1,000**
h*	**0,834**	-0,284	**-0,806**	-0,516	**-0,963**	**-0,982**	-0,020	-0,475	-0,318	**1,000**	**1,000**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 51: *Sorbus domestica* L. (ROSACEAE).
Duramen de Cormier, 5 stocks, 24 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,454**	0,055	-0,357	-0,373	**-0,479**	**-0,625**	0,152	**0,463**	-0,361	0,338	**-0,841**
E'	**0,454**	1	**0,914**	**-0,796**	0,335	-0,175	-0,279	-0,197	-0,080	-0,032	-0,031	-0,296
E'/ρ	0,055	**0,914**	1	**-0,744**	**0,527**	0,000	-0,027	-0,287	-0,297	0,123	-0,201	0,035
tanδ	-0,357	**-0,796**	**-0,744**	1	0,169	**0,664**	0,011	-0,119	-0,173	0,398	-0,067	0,349
E''/ρ	-0,373	0,335	**0,527**	0,169	1	**0,849**	0,045	**-0,538**	**-0,648**	**0,626**	-0,322	**0,529**
Δtanδ%	**-0,479**	-0,175	0,000	**0,664**	**0,849**	1	0,050	**-0,465**	**-0,580**	**0,675**	-0,265	**0,598**
MC	**-0,625**	-0,279	-0,027	0,011	0,045	0,050	1	0,370	-0,080	-0,180	-0,023	**0,595**
g Vol	0,152	-0,197	-0,287	-0,119	**-0,538**	**-0,465**	0,370	1	**0,886**	**-0,518**	0,370	-0,040
αVol	**0,463**	-0,080	-0,297	-0,173	**-0,648**	**-0,580**	-0,080	**0,886**	1	**-0,525**	**0,455**	-0,345
L*	-0,361	-0,032	0,123	0,398	**0,626**	**0,675**	-0,180	**-0,518**	**-0,525**	1	**-0,744**	0,204
C	0,338	-0,031	-0,201	-0,067	-0,322	-0,265	-0,023	0,370	**0,455**	**-0,744**	1	0,019
h*	**-0,841**	-0,296	0,035	0,349	**0,529**	**0,598**	**0,595**	-0,040	-0,345	0,204	0,019	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 52: *Swartzia fistuloides* Harms. (LEG. CAESALPINIACEAE).

Duramen de Pao Rosa, 2 arbres, 19 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,806**	**0,609**	**0,665**	**0,847**	**0,844**	**0,827**	0,066	-0,023	0,215	**0,632**	**0,886**
E'	**0,806**	1	**0,960**	0,322	**0,859**	**0,771**	**0,851**	0,302	0,197	0,090	**0,474**	**0,823**
E'/ρ	**0,609**	**0,960**	1	0,113	**0,748**	**0,631**	**0,734**	0,367	0,276	0,038	0,349	**0,689**
tanδ	**0,665**	0,322	0,113	1	**0,743**	**0,841**	**0,596**	0,039	-0,007	-0,040	0,362	**0,522**
E''/ρ	**0,847**	**0,859**	**0,748**	**0,743**	1	**0,987**	**0,884**	0,274	0,182	-0,010	**0,470**	**0,804**
Δtanδ%	**0,844**	**0,771**	**0,631**	**0,841**	**0,987**	1	**0,855**	0,229	0,144	-0,019	**0,467**	**0,775**
MC	**0,827**	**0,851**	**0,734**	**0,596**	**0,884**	**0,855**	1	0,111	-0,104	-0,059	**0,602**	**0,749**
g Vol	0,066	0,302	0,367	0,039	0,274	0,229	0,111	1	**0,947**	-0,115	-0,365	0,265
αVol	-0,023	0,197	0,276	-0,007	0,182	0,144	-0,104	**0,947**	1	0,016	-0,403	0,255
L*	0,215	0,090	0,038	-0,040	-0,010	-0,019	-0,059	-0,115	0,016	1	**0,686**	0,366
C	**0,632**	**0,474**	0,349	0,362	**0,470**	**0,467**	**0,602**	-0,365	-0,403	**0,686**	1	**0,703**
h*	**0,886**	**0,823**	**0,689**	**0,522**	**0,804**	**0,775**	**0,749**	0,265	0,255	0,366	**0,703**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 53: *Swartzia panacoco* Cowan ou *S.spp.* (LEG. CAESALPINIACEAE).

Duramen de Coração de Negro, 4 stocks, 54 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	**0,466**	**-0,316**	**-0,497**	**-0,807**	**-0,760**	-0,091	0,011	-0,063	**-0,382**	**-0,346**	-0,263
E'	**0,466**	1	**0,690**	**-0,833**	**-0,317**	**-0,564**	-0,058	0,221	0,224	-0,015	-0,116	-0,070
E'/ρ	**-0,316**	**0,690**	1	**-0,491**	**0,320**	0,012	-0,005	0,211	0,273	**0,286**	0,139	0,133
tanδ	**-0,497**	**-0,833**	**-0,491**	1	**0,662**	**0,862**	0,005	-0,226	-0,225	0,013	0,070	0,051
E''/ρ	**-0,807**	**-0,317**	**0,320**	**0,662**	1	**0,948**	-0,021	-0,078	-0,018	0,262	0,184	0,185
Δtanδ%	**-0,760**	**-0,564**	0,012	**0,862**	**0,948**	1	-0,005	-0,143	-0,103	0,188	0,159	0,149
MC	-0,091	-0,058	-0,005	0,005	-0,021	-0,005	1	**0,797**	**0,425**	**-0,362**	**-0,308**	**-0,480**
g Vol	0,011	0,221	0,211	-0,226	-0,078	-0,143	**0,797**	1	**0,847**	-0,181	-0,162	**-0,331**
αVol	-0,063	0,224	0,273	-0,225	-0,018	-0,103	**0,425**	**0,847**	1	0,024	0,059	-0,112
L*	**-0,382**	-0,015	**0,286**	0,013	0,262	0,188	**-0,362**	-0,181	0,024	1	**0,938**	**0,936**
C	**-0,346**	-0,116	0,139	0,070	0,184	0,159	**-0,308**	-0,162	0,059	**0,938**	1	**0,871**
h*	-0,263	-0,070	0,133	0,051	0,185	0,149	**-0,480**	**-0,331**	-0,112	**0,936**	**0,871**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

Tableau 54: *Taxus baccata* L. (TAXACEAE).

Duramen d'If, 4 stocks, 24 éprouvettes (après tri des non représentatives).

	ρS	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ%	MC	g Vol	αVol	L*	C	h*
ρS	1	0,354	-0,041	-0,310	-0,391	**-0,445**	**-0,583**	0,200	0,292	0,128	**0,768**	**-0,594**
E'	0,354	1	**0,919**	**-0,690**	0,364	-0,003	**-0,697**	**0,406**	**0,603**	0,171	**0,691**	**-0,537**
E'/ρ	-0,041	**0,919**	1	**-0,596**	**0,567**	0,199	**-0,515**	0,365	**0,538**	0,115	**0,428**	-0,341
tanδ	-0,310	**-0,690**	**-0,596**	1	0,314	**0,662**	**0,497**	-0,148	-0,241	0,103	**-0,637**	**0,528**
E''/ρ	-0,391	0,364	**0,567**	0,314	1	**0,919**	-0,116	0,284	0,394	0,205	-0,149	0,092
Δtanδ%	**-0,445**	-0,003	0,199	**0,662**	**0,919**	1	0,122	0,156	0,202	0,204	-0,390	0,296
MC	**-0,583**	**-0,697**	**-0,515**	**0,497**	-0,116	0,122	1	-0,267	**-0,560**	-0,124	**-0,821**	**0,758**
g Vol	0,200	**0,406**	0,365	-0,148	0,284	0,156	-0,267	1	**0,924**	0,232	0,312	-0,162
αVol	0,292	**0,603**	**0,538**	-0,241	0,394	0,202	**-0,560**	**0,924**	1	0,324	**0,475**	-0,324
L*	0,128	0,171	0,115	0,103	0,205	0,204	-0,124	0,232	0,324	1	-0,068	0,282
C	**0,768**	**0,691**	**0,428**	**-0,637**	-0,149	-0,390	**-0,821**	0,312	**0,475**	-0,068	1	**-0,770**
h*	**-0,594**	**-0,537**	-0,341	**0,528**	0,092	0,296	**0,758**	-0,162	-0,324	0,282	**-0,770**	1

En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)

IX.b. Annexe aux bois normaux/de compression de résineux

- Données antérieures concernant les Résineux avec bois de compression : Variations périphériques des indicateurs de contraintes de croissance et des retraits Longitudinaux [Ruelle 2003].

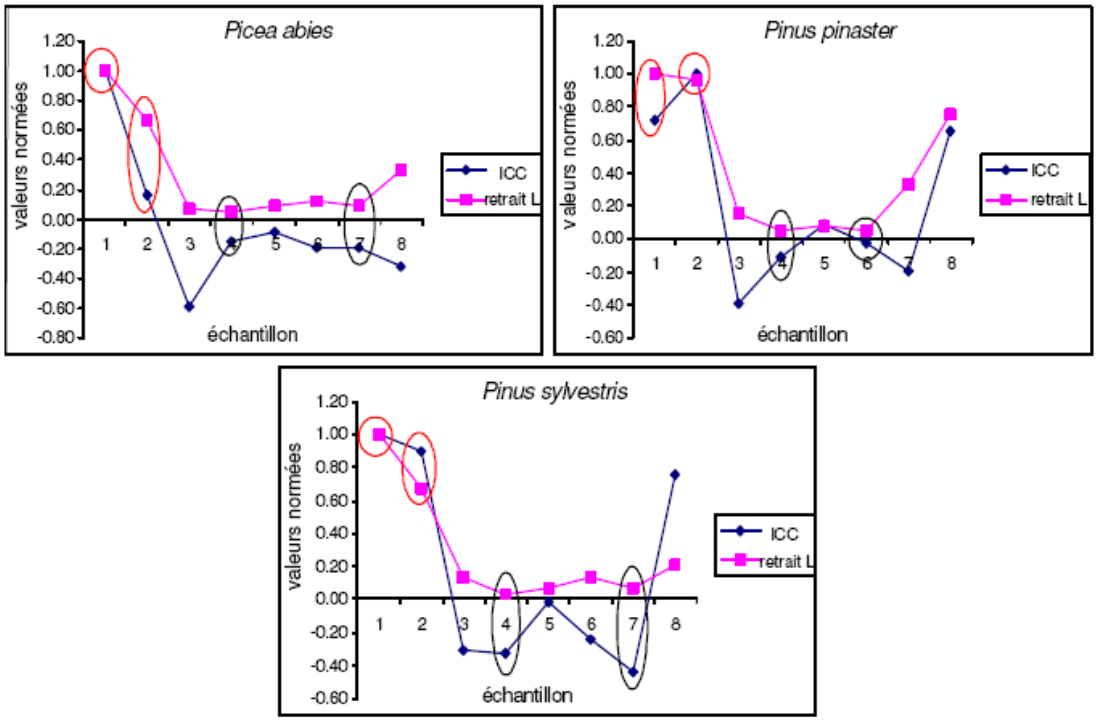


Figure 196: Variations périphériques des indicateurs de contraintes de croissance (ICC) et des retraits longitudinaux. Les valeurs sont normées (valeurs expérimentales divisées par le maximum sur l'arbre). Les points cerclés de rouge correspondent à du bois de réaction ; cerclés de noir à du bois « normal » (opposé). [Ruelle 2003].

- Matrices de corrélations entre propriétés physico-mécaniques et colorimétriques, et angle moyen de microfibrilles et distance à la moëlle pour les bois normaux et de compression de Résineux.

Tableau 55: Corrélations pour l'ensemble des bois (valeurs moyennes par localisation)

N=56 (AMF: N=44)	ρ_{stab}	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ	MC	RL	RR+RT	L*	C	h*	AMF	d moëlle
ρ_{stab}	1	NS	**(-)	NS	***(-)	***(-)	**	**	NS	***(-)	***	***(-)	**	***
E'	0,044	1	***	***(-)	***	***	NS	***(-)	***	***	***(-)	***	***(-)	NS
E'/ρ	-0,378	0,901	1	***(-)	***	***	*(-)	***(-)	***	***	***(-)	***	***(-)	NS
tanδ	0,036	-0,899	-0,861	1	***(-)	***(-)	*	***	***(-)	***(-)	***	***(-)	***	NS
E''/ρ	-0,582	0,747	0,943	-0,728	1	***	**(-)	***(-)	***	***	***(-)	***	***(-)	NS
Δtanδ	-0,733	0,529	0,800	-0,509	0,952	1	**(-)	***(-)	***	***	***(-)	***	***(-)	10%(-)
MC	0,419	-0,122	-0,295	0,312	-0,341	-0,344	1	***	NS	10%(-)	10%	NS	***	**(-)
RL	0,363	-0,709	-0,797	0,810	-0,809	-0,731	0,482	1	***(-)	***(-)	***	***(-)	***	NS
RR+RT	-0,208	0,871	0,895	-0,817	0,809	0,651	-0,209	-0,730	1	***	***(-)	***	***(-)	NS
L*	-0,721	0,517	0,791	-0,554	0,906	0,923	-0,247	-0,689	0,630	1	***(-)	***	***(-)	NS
C	0,760	-0,446	-0,732	0,470	-0,858	-0,894	0,227	0,597	-0,589	-0,948	1	***(-)	***	NS
h*	-0,587	0,574	0,799	-0,590	0,879	0,860	-0,195	-0,630	0,661	0,949	-0,874	1	***	NS
AMF	0,381	-0,641	-0,775	0,784	-0,797	-0,716	0,518	0,836	-0,647	-0,728	0,643	-0,757	1	NS
d moëlle	0,581	0,240	-0,005	-0,173	-0,153	-0,297	0,447	0,224	0,083	-0,200	0,219	-0,029	0,082	1

Tableau 56: Corrélations pour les bois de compression (valeurs moyennes par localisation)

BC (N=17)	ρ_{stab}	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ	MC	RL	RR+RT	L*	C	h*	AMF	d moëlle
ρ_{stab}	1	**	-	*(-)	-	*(-)	-	-	-	-	-	**	-	***
E'	0,62	1	***	***(-)	**	-	-	***(-)	***	*	-	*	***(-)	10%
E'/ρ	0,23	0,90	1	***(-)	***	**	**(-)	***(-)	***	**	-	-	***(-)	-
tanδ	-0,60	-0,96	-0,89	1	*(-)	-	10%	***	***(-)	*(-)	-	*	**	10%(-)
E''/ρ	-0,17	0,64	0,89	-0,60	1	***	***(-)	***(-)	**	**	-	-	***(-)	-
Δtanδ	-0,51	0,27	0,61	-0,20	0,90	1	***(-)	**(-)	-	*	-	-	*(-)	*(-)
MC	0,32	-0,41	-0,71	0,46	-0,84	-0,78	1	**	-	*(-)	-	-	*	-
RL	-0,15	-0,80	-0,91	0,77	-0,88	-0,69	0,72	1	***(-)	**(-)	-	-	***	-
RR+RT	0,36	0,76	0,76	-0,74	0,64	0,39	-0,40	-0,74	1	-	-	-	*(-)	-
L*	-0,02	0,56	0,67	-0,51	0,66	0,53	-0,59	-0,70	0,25	1	10%(-)	-	*(-)	-
C	0,23	0,00	-0,08	-0,11	-0,18	-0,25	0,12	-0,03	0,22	-0,45	1	-	-	-
h*	0,67	0,55	0,36	-0,59	0,10	-0,19	0,11	-0,22	0,34	0,11	0,18	1	10%(-)	**
AMF	-0,23	-0,75	-0,82	0,72	-0,74	-0,52	0,51	0,77	-0,56	-0,56	0,06	-0,44	1	-
d moëlle	0,75	0,47	0,17	-0,45	-0,19	-0,49	0,37	0,04	0,21	-0,11	0,02	0,70	-0,15	1

Tableau 57: Corrélations pour les bois "normaux" (valeurs moyennes par localisation)

BN (N=15)	ρ_{stab}	E'	E'/ρ	tanδ	E''/ρ	Δtanδ	MC	RL	RR+RT	L*	C	h*	AMF	d moëlle
ρ_{stab}	1	***	*	10%(-)	0,1	-	-	10%(-)	***	-	-	-	-	*
E'	0,83	1	***	***(-)	**	-	-	*(-)	***	-	-	-	*(-)	***
E'/ρ	0,61	0,94	1	***(-)	**	-	-	**(-)	***	-	-	-	**(-)	**
tanδ	-0,47	-0,78	-0,86	1	-	-	-	**	**(-)	-	-	-	*	*(-)
E''/ρ	0,48	0,69	0,73	-0,30	1	**	**	-	0,1	*	10%(-)	**	*(-)	**
Δtanδ	0,12	0,10	0,09	0,41	0,75	1	***	-	-	***	**(-)	***	-	-
MC	0,19	0,25	0,23	0,23	0,71	0,83	1	-	-	**	**(-)	*	-	-
RL	-0,45	-0,61	-0,67	0,75	-0,33	0,19	0,22	1	**(-)	-	-	-	**	-
RR+RT	0,79	0,87	0,78	-0,72	0,45	-0,09	0,01	-0,66	1	-	-	-	10%(-)	*
L*	-0,18	0,01	0,11	0,29	0,60	0,77	0,72	0,09	-0,05	1	***(-)	***	-	-
C	0,34	0,13	0,00	-0,35	-0,44	-0,66	-0,68	-0,23	0,14	-0,93	1	**	-	-
h*	0,09	0,27	0,34	0,07	0,76	0,77	0,61	-0,20	0,15	0,89	-0,68	1	-	-
AMF	-0,41	-0,59	-0,67	0,57	-0,59	-0,18	-0,12	0,69	-0,47	-0,15	-0,01	-0,40	1	-
d moëlle	0,62	0,79	0,76	-0,53	0,69	0,27	0,30	-0,23	0,57	0,06	0,07	0,29	-0,26	1

IX.c. Annexe aux matériels, méthodes et variations locales par pièce de bois initiale pour les espèces de Pterocarpus.

- Données disponibles dans la base du CIRAD

Tableau 58 : Propriétés des arbres étudiés d'après la base de données du CIRAD. Ds : Densité « sec à l'air » ; psf : point de saturation des fibres ; RV : retrait volumique total (%) ; αV : coefficient de retrait volumique (en % par %), E : module d'Young axial ; C : cellulose corrigée, LK : Lignine de Klason ; HC ?: Hémicelluloses (estimées à partir du bilan) ; AB : extraits alcool-benzène ; E : extraits à l'eau chaude.

espèce	N° CTFT	Ds	Psf	RV	αV	E (Gpa)	E/Ds (Gpa)	C	LK	HC?	AB	E
Pterocarpus soyauxii	10028	0,80	20	6,9	0,35	14,84	18,55	42,70	32,00	11,30	13,0	1,0
	10306	0,68	24	7,3	0,30	15,81	23,26	41,30	30,60	16,40	10,1	1,6
	10360	0,82	19	8,2	0,43	14,96	18,25	38,40	29,80	14,40	17,4	
	moy sp	**0,75**	**22**	**7,7**	**0,37**	**15,30**	**20,51**	**42,10**	**30,88**	**13,79**	**11,8**	**1,5**
	et sp	**0,07**	**5**	**0,6**	**0,10**	**1,52**	**22,15**	**2,37**	**0,80**		**3,5**	**0,3**
Pterocarpus erinaceus	06906	0,85	28	8,1	0,29	17,27	20,32	36,50	29,90	16,40	14,4	2,8
Pterocarpus tinctorius	29409	0,92	17	8,1	0,48	19	20,36					
Scorodophloeus zenkerii	05317	0,90	33	17,4	0,53	21,17	23,52	51,40	33,20	13,30	1,2	0,9
	05318	0,93	28,00	16,70	0,60	19,95	21,45	44,60	32,60	19,60	1,6	1,6

- Quelques points sur les choix des solvants employés

Le choix des solvants s'est fait à la fois d'après la littérature, et d'après des essais antérieurs que nous avions effectués sur du Padouk provenant du même stock sans N° CTFT du CIRAD. [Déon et al 1980 ; Déon & Schwartz 1988] avaient employé une séquence de solvants successifs (en série) comprenant hexane, éther éthylique, dichlorométhane, acétone, méthanol, eau chaude, sur 6 espèces tropicales incluant le Padouk. [Arévalo Fuentes 2002], sur l'Acajou (*Swietenia macrophylla* King.) appliquait la même séquence, sauf l'extraction à l'éther, et en remplaçant l'hexane (constante diélectrique ε : 1,9) par le cyclohexane (ε : 2,01). Nous avions suivi cette même séquence en série pour des extractions par ultra-sonication de matériel solide de duramen médian de Padouk [Gérard et al 2003]. Les rendements au cyclohexane étaient extrêmement faibles (<0,5%), mais se traduisaient par une augmentation non négligeable de la teneur en eau à l'équilibre (14% en moyenne). Ceci semble rejoindre les résultats d'Arévalo Fuentes sur l'Acajou, où 1,7±0,4% d'extraits au cyclohexane (sur broyats jumelés) avaient un effet marqué d'hydrophobisation du bois. [Déon et al 1980] obtenaient sur matériel broyé de Padouk extrait au Soxhlet des rendements à l'hexane un peu supérieurs aux nôtres (1,4%). Pour la présente étude, nous n'avons finalement pas retenu le cyclohexane, la localisation cellulaire et les faibles quantités d'extraits visés par ce solvant très apolaire n'étant susceptibles de jouer sur les propriétés vibratoires que *via* leur effet sur l'hygroscopicité. En ce qui concerne l'extraction au Dichlorométhane, [Déon et al 1980] trouvaient d'assez faibles rendements (1,8%), mais cette extraction avait été précédée par une extraction à l'éther, plus efficace. Il est vraisemblable que sur cette espèce la sélectivité soit réduite entre ces deux derniers solvants peu ou pas polaires, dans la mesure où ces auteurs retrouvaient dans la fraction éthérée (la seule ayant été analysée) des composés tels que le Santal, qui est également extrait par des solvants fortement polaires tels que le Méthanol ou la Diméthylformamide [Surowiec et al 2004].

- Variations locales de module spécifique pour les différents carrelets initiaux

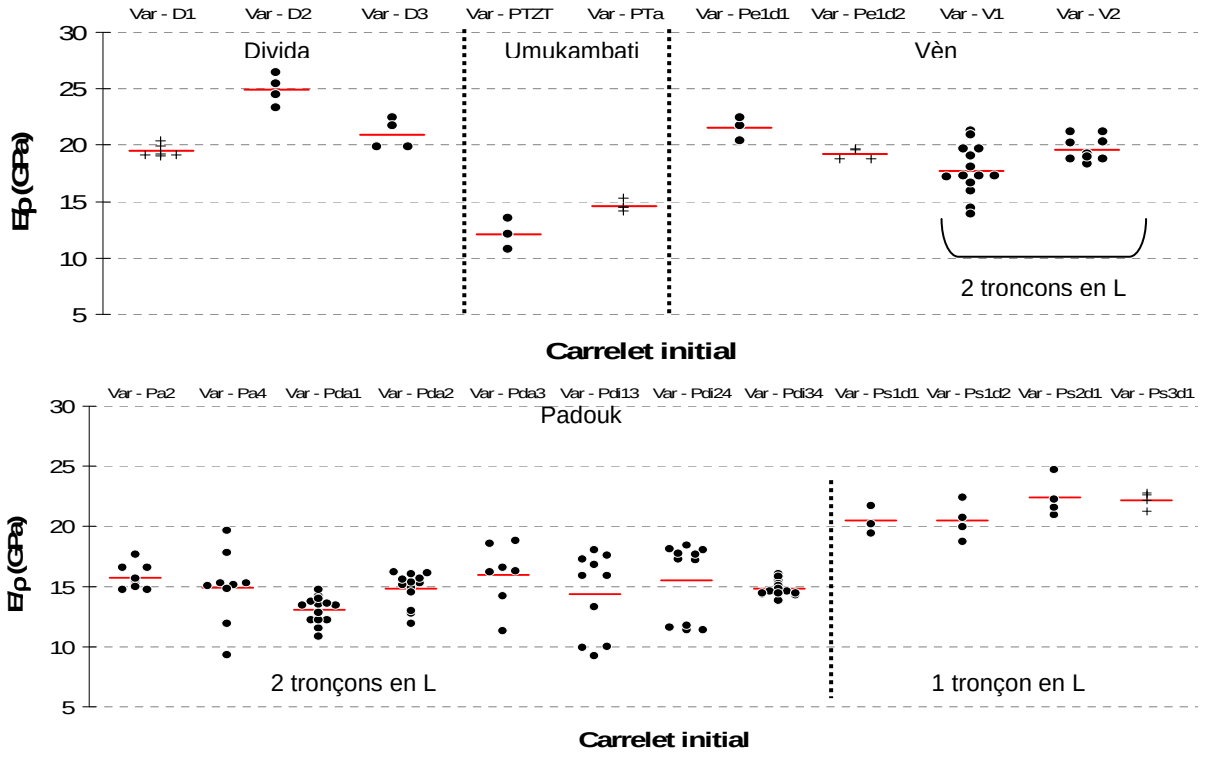


Figure 197 : Variations de module spécifique entre différentes éprouvettes issues d'un même carrelet initial. ● : étendue de variation significative ; + : étendue de variation de l'ordre de l'erreur de mesure.

TITRE : Diversité des bois utilisés ou utilisables en facture d'instruments de musique

RESUME

L'objectif est de mieux connaître les bois, surtout denses et tropicaux, utilisés dans les instruments, et de proposer une aide pour la diversification en lien avec des problèmes d'approvisionnement durable.

Le travail adopte deux approches complémentaires : caractérisation de la diversité des bois utilisés ou utilisables en facture instrumentale (espèces, propriétés vibratoires) ; étude des déterminants microstructuraux et chimiques (extractibles) des propriétés importantes.

Une base de données « espèces ligneuses - usages en facture » est dessinée et a commencé à être implémentée par des informations de factures traditionnelles extra-Européennes.

Les propriétés vibratoires élémentaires (module d'élasticité spécifique et coefficient d'amortissement dans la plage de fréquences 200-600Hz) en direction axiale, la teneur en eau à l'équilibre (à 20°C et 65% HR) et les paramètres de couleur CIELab et CIELCh sont déterminées sur 1400 éprouvettes de petites dimensions couvrant 60 espèces et 70 types de bois, dont 70% de feuillus tropicaux. Une moitié est fournie par des facteurs d'instruments, l'autre est présélectionnée sur des critères liant propriétés mécaniques, chimiques et physiques. Les relations entre propriétés sont analysées et les essences classées en groupes de similitude par analyses multivariables. Les extractibles du bois de coeur sont responsables de très faibles amortissements et teneurs en eau sur la majorité des bois tropicaux étudiés. Des modèles prédictifs simples sont proposés qui expliquent sur les essences étudiées de 85 à 90% de la variabilité observée des coefficients d'amortissement.

Les relations entre propriétés physico-mécaniques et angle des microfibrilles sur des bois normaux et de compression de 3 résineux sont globalement cohérentes avec la littérature mais les bois de compression ont –à module spécifique donné- de plus faibles amortissements que les bois normaux.

Les bois de coeur de deux espèces de Papilionaceae (*Pterocarpus soyauxii* Taub. 'Padouk' et *P. erinaceus* Harms. 'Vèn') sont comparés à l'état natif puis extraits par différents solvants. Les extraits du Padouk sont -à quantités données- plus efficaces que ceux du Vèn pour diminuer l'amortissement et inversement pour la teneur en eau. Des hypothèses sont émises sur les mécanismes possibles.

TITLE in English : Diversity of woods used or usable in musical instrument making

SUMMARY

This work aims at bringing a better knowledge of woods, mainly heavy tropical ones, used in instruments, and some proposals for a diversification in relation with difficulties in sustainable availability. It follows two complementary approaches: characterization of the diversity used or usable in musical instrument making (species, vibrational properties); study of microstructural and chemical (extractives) factors influencing the important properties.

A database "woody species – uses in instruments" is drawn and started to be implemented with information about extra-European traditions in instrument making.

Basic vibrational properties (specific Young's modulus and damping coefficient in the frequency range 200-600Hz) in axial direction, equilibrium moisture content (at 20°C and 65% RH) and colour parameters CIELab and CIELCh are determined on 1400 probes of small dimensions covering 60 species and 70 wood types, including 70% of tropical woods. One half is provided by instrument makers, the other is pre-selected according to criteria linking mechanical, chemical and physical properties. The relationships between properties are analysed and the species are classified into similarity groups by multivariate analysis. Heartwood extractives are responsible for very low damping coefficients and moisture contents for the majority of the tropical woods under study. Simple predictive models are proposed that explain, on studied species, 85-90% of the observed variability in damping coefficients.

Relationships between physico-mechanical properties and microfibril angle on normal and compression wood of 3 softwoods are globally in agreement with the literature but compression woods exhibit – at given specific modulus- lower damping than normal woods.

Heartwoods of two species of Papilionaceae (*Pterocarpus soyauxii* Taub. 'Padauk' et *P. erinaceus* Harms. 'Senegal Rosewood') are compared in their native state and after being extracted in different solvents. The extractives from Padauk are –at given quantities- more efficient in reducing damping than those of Senegal Rosewood and conversely for moisture content. Hypothesis are formulated about possible mechanisms.

MOTS-CLEFS

Bois de coeur, bois tropicaux, coefficient d'amortissement, diversité, extractibles, instruments de musique, propriétés vibratoires, *Pterocarpus*

KEYWORDS

Diversity, extractives, heartwood, musical instruments, *Pterocarpus*, tropical woods, vibration damping, vibrational properties

Laboratoire où a été préparée la thèse : Laboratoire de Mécanique et Génie Civil (LMGC), CNRS UMR 5508, Université Montpellier II, pl. E. Bataillon, 34095 Montpellier Cedex 5. France.