



HAL
open science

Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française

Agnès Burgers

► **To cite this version:**

Agnès Burgers. Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université Montpellier, 2016. Français. NNT : 2016MONT014 . tel-01635883

HAL Id: tel-01635883

<https://theses.hal.science/tel-01635883>

Submitted on 15 Nov 2017

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

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



THÈSE

Pour obtenir le grade de
Docteur

Délivré par l'Université de Montpellier

Préparée au sein de l'école doctorale
Information, Structures, Systèmes
Et de l'unité de recherche UMR5508 (LMGC)
Spécialité: Mécanique et génie civil

Présentée par Agnès Burgers

Caractérisations physico-mécaniques
de bois "sans défauts" pour la
conception mécanique : application
aux pins de la région
méditerranéenne française

Soutenue le 02/12/2016 devant le jury composé de

| | | | |
|-----------------------|-------|---------------------------|---------------|
| M. Frédéric DUBOIS | Pr. | Université de Limoges | Rapporteur |
| M. Robert COLLET | M.C. | ENSAM Cluny | Rapporteur |
| Mme Christine DELISÉE | Pr. | Bordeaux Sciences Agro | Examinateur |
| M. Laurent BLERON | Pr. | Université de Lorraine | Examinateur |
| M. Emmanuel LE CLÉZIO | Pr. | Université de Montpellier | Examinateur |
| M. Rémy MARCHAL | Pr. | CIRAD | Directeur |
| M. Marc VINCHES | Pr. | École des Mines d'Alès | Co-directeur |
| M. Cédric MONTERO | M.C. | Université de Montpellier | Encadrant |
| M. Olivier ARNOULD | M.C. | Université de Montpellier | Membre invité |
| M. Loïc BRANCHERIAU | C. R. | CIRAD | Membre invité |



This work has been carried out thanks to the support of the LabEx NUMEV project Digital and Hardware Solutions and Modeling for the Environment and Life Sciences (n° ANR-10-LABX-20) funded by the «Investissements d’Avenir» French Government program, managed by the French National Research Agency (ANR), along with the support of the École des Mines d’Alès.



The experiments forming the body of this thesis have been conducted in CIRAD and IES (Institut d’Électronique et des Systèmes) laboratories as well as the LMGC (Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil).



“The cure for boredom is curiosity. There is no cure for curiosity.”

Ellen Parr

Remerciements

SI l'on s'y sent parfois un peu comme seul sur un radeau, la thèse est loin d'être une course en solitaire. La longueur de ces lignes en témoigne. Cette thèse n'aurait pas eu le même le visage sans tout ce bel entourage.

De A... À l'origine de cette aventure, je remercie Marc Vinches de m'avoir soufflé l'idée d'aller jeter un œil du côté de la recherche et de m'avoir accompagnée tout au long de ces trois années en tant que directeur de thèse. Je remercie également Rémy Marchal d'avoir accepté la codirection de ce travail en dépit d'un emploi du temps déjà bien chargé. Je suis reconnaissante des heures que tous deux m'ont accordées malgré leurs importantes responsabilités respectives.

...à Z, Je remercie cordialement messieurs Robert Collet et Frédéric Dubois d'avoir accepté de rapporter mon travail ainsi que pour leurs observations et profitables conseils. Je remercie également les autres membres du jury de thèse, Christine Délisée, Laurent Bléron, Emmanuel Le Clézio, Olivier Arnould, Loïc Brancheriau d'avoir prêté une oreille attentive à mon exposé et pour les riches échanges qui ont suivi.

en passant par toutes les lettres de l'alphabet. Je pense que je n'oublierai jamais ma première visite au laboratoire, pour rencontrer Joseph Gril et Bernard Thibaut (mon « parrain de thèse », en considération de l'aide précieuse qu'il m'aura apporté jusqu'au dernier caractère). Ce fut pour moi la découverte du monde de la recherche sur le bois, à travers deux hommes passionnés et passionnants. Je les remercie de faire partager leurs savoirs et leurs qualités humaines.

À mes collègues et amis de cette belle équipe bois, Delphine, Carole, Sandrine, Iris, Anna, Olivier, Cédric, Tancrède, Pierre, Bruno, Bernard, Joseph, j'adresse un chaleureux merci pour leur disponibilité, leur bienveillance, et leurs conseils avisés. Je garderai un souvenir heureux de nos nombreux échanges scientifiques et moments partagés à la pause déjeuné.

Je dois évidemment adresser des remerciements particuliers à Cédric Montéro, qui a su endosser le rôle « d'encadrant de proximité », et m'épauler tout au long de ce parcours. Merci pour ton soutien, ta patience, et ta persévérance dans les tâches administratives ! En outre, merci de m'avoir fortement encouragée à finir cette thèse en trois ans. Tu avais bien raison, ce n'est jamais terminé, si on ne décide pas fermement d'y mettre un point final.

Je remercie également l'ensemble des collègues du LMGC et de l'IES pour les moments agréables et les nombreux échanges, avec une pensée particulière pour Gille Camp, toujours prêt à rendre service ; Chantal Romano, qui sait prendre soin des étudiants ; et Yannick Sussmuth pour les dépannages informatiques à toute heure, avec bonne humeur.

J'adresse des remerciements amicaux aux collègues du Cirad, Daniel, Sylvain, Jean, Patrick, Marie-France, Loïc, qui m'ont accueillie et accompagnée pour une part considérable de mes essais expérimentaux. Merci Daniel d'avoir accepté que j'envahisse un peu ton bureau, et de m'avoir transmis tes conseils utiles d'expérimentateur expérimenté, et bien plus encore.

Je remercie par ailleurs mes collègues de l'École des Mines d'Alès, pour nos échanges sur le volet pédagogique de mon travail, sujet chronophage pour la thèse mais qui me tient toujours très à cœur.

Je tiens à remercier aussi tous les professionnels que j'ai rencontrés, scieurs, charpentiers, forestiers, artisans, ingénieurs, chercheurs, pour le temps et le bois qu'ils m'ont offerts.

Une pensée pour mes chers « compagnons de galère », amis thésards, post-docs ou stagiaires croisés sur les flots. Merci pour l'entraide et les fous rires. Avec une mention spéciale pour la pétillante réunio-cévenole, la rollerwoman drôle et intrépide, le sympathique plongeur voyageur, le footballeur marocain toujours serviable et souriant et le surprenant romancier qui a plus d'un tour dans son sac.

Enfin merci de mille feu à celle qui a été là du premier jour, jusqu'au dernier : ma petite sœur de thèse, avec qui ces trois années auront scellé une amitié.

Puisqu'il n'y a pas que le travail dans la vie, je remercie affectueusement ma formidable famille et mes non moins formidables amis de toutes part et de tout bord (de la vallée, farfadets, voyageuse occitane, de Bélugou, ouvriers de têtes, de la vie c'est maintenant, voltigeurs, volleurs, de la yes attitude...), de me l'avoir rappelé.

Je remercie Emmanuel, pour le soleil.

J'en profite pour remercier aussi les arbres, pour l'ombre, le bois et pour l'inspiration.

Enfin, je dédie ce travail à ma mère, qui m'a appris à donner sans compter.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Introduction | 3 |
| 1 Contexte et enjeux | 7 |
| 1.1 Matériaux pour la conception mécanique | 9 |
| 1.1.1 Les classes de propriétés et de matériaux | 9 |
| 1.1.2 Les procédures de sélection | 11 |
| 1.1.3 L'essor des composites à fibres et la place des bois | 13 |
| 1.2 Bois d'œuvre et bois « sans défauts » | 14 |
| 1.2.1 Bois « sans défauts » des résineux | 14 |
| 1.2.2 Le bois pour l'ingénieur mécanicien | 17 |
| 1.3 Les pins : un groupe d'espèces important | 19 |
| 1.4 Contours et objectifs du travail de thèse | 21 |
| 2 La démarche employée | 23 |
| 2.1 Matériel végétal et préparation des échantillons | 26 |
| 2.1.1 Matériel végétal | 26 |
| 2.1.2 Préparation des échantillons | 27 |
| 2.2 Mesures des propriétés élastiques | 28 |
| 2.2.1 Méthode Bing© | 28 |
| 2.2.1.1 Mode opératoire | 29 |
| 2.2.1.2 Principe et analyse | 30 |
| 2.2.2 Méthode ultra-sonore par contact direct | 32 |
| 2.2.2.1 Mode opératoire | 32 |
| 2.2.2.2 Principe et analyse | 34 |
| 2.2.3 Méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) | 37 |
| 2.2.3.1 Mode opératoire | 37 |
| Mesure des fréquences propres | 38 |
| Identification inverse | 39 |
| 2.2.3.2 Principe et analyse | 40 |
| Problème direct | 40 |
| Problème inverse | 42 |
| 2.2.4 Essai de rupture en compression axiale | 42 |
| 2.2.4.1 Mode opératoire | 42 |
| 2.2.4.2 Principe et analyse | 43 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 2.3 | Mesures des propriétés hygroscopiques | 45 |
| 2.3.1 | Variations de masse et dimensions en fonction de l'humidité relative . . | 45 |
| 2.3.1.1 | Mode opératoire | 45 |
| 2.3.1.2 | Principe et analyse | 47 |
| 2.3.2 | État saturé | 48 |
| 2.3.3 | État anhydre | 49 |
| 2.3.4 | Calculs des retraits, PSF et infra-densité | 50 |
| 2.3.4.1 | Retraits totaux | 50 |
| 2.3.4.2 | Coefficients de retraits | 51 |
| 2.3.4.3 | PSF | 51 |
| 2.3.4.4 | Infra-densité | 52 |
| 2.4 | Mesure de spectrométrie proche infrarouge (NIRS) | 52 |
| 2.4.1 | Mode opératoire | 53 |
| 2.4.2 | Principe et analyse | 54 |
| 2.4.2.1 | Prétraitement des données spectrales | 55 |
| 2.4.2.2 | Méthode PLS | 55 |
| 2.5 | Indicateurs proposés pour construire les modèles prédictifs | 58 |
| 2.5.1 | Densité | 58 |
| 2.5.2 | Module spécifique longitudinal | 59 |
| 2.5.3 | Largeur de cernes | 59 |
| 2.5.4 | Indicateur de la chimie | 59 |
| 2.6 | Méthodes statistiques | 59 |
| 2.6.1 | Statistiques descriptives | 59 |
| 2.6.2 | Élaboration des modèles prédictifs | 60 |
| 2.6.3 | Logiciels utilisés | 61 |
| 2.6.4 | Méthodes de sous-échantillonnage | 61 |
| 3 | Résultats et Discussion | 63 |
| 3.1 | Description statistique | 65 |
| 3.1.1 | Description générale | 65 |
| 3.1.2 | Relations entre variables | 72 |
| 3.1.3 | Influence de la densité sur les constantes élastiques | 78 |
| 3.2 | Modèles prédictifs de propriétés | 83 |
| 3.2.1 | Prédictions par indicateurs physico-mécaniques | 83 |
| 3.2.2 | Prédictions par spectrométrie proche infrarouge | 87 |
| 3.2.3 | Prédictions par modèles combinés | 92 |
| 3.2.4 | Conclusion pour ce chapitre | 96 |
| | Conclusion et perspectives | 99 |
| | Contexte et Enjeux | 101 |
| | La caractérisation des bois « sans défauts » | 101 |
| | À propos des modèles prédictifs | 102 |
| | Extension du cadre scientifique | 103 |
| | Vers le transfert industriel | 103 |
| | Bibliographie | 105 |

Introduction

Dans un contexte mondial de développement durable, la substitution de matières premières fossiles utilisées par notre industrie, par des matières premières renouvelables issues de la biomasse est un enjeu fort. Cet axe de développement répond à plusieurs défis environnementaux : contribuer à réduire notre dépendance aux ressources fossiles dont les réserves s'amenuisent ; participer à la réduction des gaz à effet de serre (notamment par une fabrication moins énergivore et pour la biomasse végétale, par le stockage de carbone prélevé par le végétal dans le stock de CO₂ atmosphérique (Lippke *et al.*, 2010) ; et diminuer la part des déchets non renouvelables produits.

Cet enjeu planétaire fait écho au contexte forestier français, dont la ressource abondante et en forte croissance depuis 50 ans (d'après l'Institut National de l'information Géographique et forestière) est très nettement sous valorisée (rapport de l'Agreste Foyer-Bénos, 2012).

Les matériaux de structure (bâtiment, construction mécanique, emballage, etc.) représentent en tonnage la plus grande part des enjeux de substitution de matériaux « énergivores » par des matériaux biosourcés (Sathre et O' Connor, 2010). Pour ces usages non alimentaires, les bois apparaissent comme la principale source de biomasse utilisable et leur disponibilité potentielle est très grande dans les forêts françaises (Alexandre *et al.*, 2012).

Il faut préciser que les bois présentent un atout non négligeable : dans l'arbre, ce sont déjà des matériaux de structure. Résultat d'une optimisation naturelle de longue durée, leur construction sophistiquée combine les approches les plus modernes des matériaux : composite à fibres nano-structurés, matériau cellulaire anisotrope très léger, à matrice polymérique « dopée » par de petites molécules bioactives. De plus, ils stockent 50% de leur masse en carbone.

Lors de la déconstruction du bois, à partir de l'arbre, pour obtenir des composants utiles à la mise au point de matériaux biosourcés, il y a une « cascade » d'étapes offrant différentes sorties : profilés bois (y compris des feuilles de bois), copeaux ou plaquettes, fibres, nano-fibres de cellulose, polymères 3D comme la lignine, sucres élémentaires, méthane, etc.

À chaque étape, les déchets (ou coproduits) peuvent alimenter l'étape suivante et le produit principal comme les déchets peuvent in fine, être utilisés comme source d'énergie (Werner *et al.*, 2010). La première étape (utilisation de profilés bois pour concevoir des éléments de structure) est celle qui permet à la fois la plus grande efficacité en matière de réduction de gaz à effet de serre, la plus grande valeur ajoutée et la plus forte création d'emplois.

La substitution de matériaux à fort coût énergétique et émission de carbone fossile par des matériaux à faible coût énergétique et capacité de stockage du carbone atmosphérique est la manière la plus efficace de réduire notre empreinte carbone en valorisant la biomasse. Cette efficacité est d'autant plus grande que les bois issus des arbres sont utilisés avec la meilleure efficacité énergétique possible, c'est-à-dire sous forme de bois massif (directement ou par assemblages de pièces de bois massif).

La construction est le premier utilisateur, en tonnage, de bois massif, ce qui justifie l'investissement scientifique majeur des mécaniciens du bois sur ces thématiques. En gardant la logique, de valorisation « en cascade », il apparaît qu'au sein des bois massifs, les pièces de bois « sans défauts », pouvant être utilisées en génie mécanique en substitution à d'autres matériaux comme les métaux et les polymères, pourraient apporter une plus forte valeur ajoutée encore.

Un enjeu pour l'avenir est donc de trier, qualifier et tracer des pièces de bois proche du « sans défauts », pour que les bois puissent prendre leur place au milieu du paysage des matériaux pour la conception mécanique.

Chapitre 1

Contexte et enjeux

1.1 Matériaux pour la conception mécanique

La construction mécanique regroupe de nombreuses activités de production de machines et d'objets aussi divers que des véhicules, de l'électroménager ou des jouets. Elle est à différencier du génie civil, cousin très proche du génie mécanique, qui concerne plutôt les ouvrages (ponts, passerelles) et constructions de bâtiments.

Dans les derniers siècles, les bois et les métaux étaient les matériaux de base de la construction mécanique. Aujourd'hui, les polymères et les matériaux composites sont de plus en plus présents alors que les bois sont de plus en plus discrets.

1.1.1 Les classes de propriétés et de matériaux

À ce jour, le nombre de matériaux disponibles pour le concepteur est considérable, estimé à près de 60 000 (Bréchet *et al.*, 1997). On parle d'hyper-choix de matériaux et le bon choix d'un matériau pour la conception mécanique est devenu une discipline scientifique à part entière, bénéficiant des avancées de l'informatique : bases de données et logiciels de conception (Chen *et al.*, 2013). Lors de son choix, le concepteur doit prendre en compte des propriétés physiques et mécaniques (telles que la masse volumique, la dureté, le module d'élasticité ou la résistance au fluage, etc.) auxquelles viennent s'ajouter des critères technologiques liés à l'environnement de la pièce et son aptitude à la mise œuvre (usinabilité, assemblage), des critères économiques ainsi que des critères environnementaux (analyse de cycle de vie, empreinte carbone, etc.). Ces classes de propriétés des matériaux sont résumées dans le tableau de la figure 1.1 (Ashby et Jones, 2013).

| | |
|--|--|
| Propriétés économiques et environnementales | Coût et disponibilité Recyclabilité Durabilité Empreinte carbone |
| Propriétés physiques générales | Masse volumique |
| Propriétés mécaniques | Module d'élasticité Limite d'élasticité, résistance à la traction Dureté Ténacité Résistance à la fatigue Résistance au fluage Pouvoir amortissant |
| Propriétés thermiques | Conductivité thermique Capacité calorifique spécifique Coefficient de dilatation thermique |
| Propriétés électriques et magnétiques | Résistivité Constante diélectrique Perméabilité magnétique |
| Interaction avec l'environnement | Oxydation Corrosion Usure |
| Aptitude à la mise en œuvre | Facilité de mise en forme Assemblage Finition |
| Propriétés esthétiques | Couleur Texture Toucher |

FIGURE 1.1 – Classes de propriétés de matériaux, d'après Ashby et Jones (2013)

La plupart des propriétés physiques des matériaux dépendent fortement des liaisons inter-atomiques, qui conditionnent la structure de la matière. En fonction du type de liaisons présentes dans les matériaux, il est possible de proposer une classification de ces derniers.

Ainsi les matériaux disponibles pour la conception mécanique peuvent être organisés en quatre grandes familles (Ashby, 2005) :

- les métaux et alliages (qui sont à ce jour les plus fréquemment utilisés dans la réalisation de composants industriels) ;
- les polymères et élastomères ;
- les verres et céramiques ;
- et enfin les « hybrides », qui englobent à la fois les matériaux composites, qui associent des éléments des deux classes (tels que les polymères renforcés par fibre de verre ou de carbone), mais aussi les matériaux naturels, difficiles à classer.

Les bois comme les autres matériaux directement issus du vivant (os, cuir) sont classés dans les matériaux « hybrides ». Néanmoins, les bois constituent une grande classe bien définie tant par la provenance du matériau (les arbres) que par un ensemble de caractères spécifiques. Tous les bois sont constitués à plus de 95% par trois composés seulement : carbone (50% environ), oxygène et hydrogène. Ce sont tous des matériaux cellulaires (Gibson, 2012; Sjölund *et al.*, 2015), constitués de trois types de cellules de base : des éléments de vaisseau (« tuyauterie » pour la conduction de la sève brute des racines vers les feuilles), des éléments de soutien qui assurent la résistance mécanique et des cellules de parenchyme gérant dans l'arbre des fonctions

de régulation, de stockage de nutriments et de protection contre les agressions extérieures. Les éléments de soutien sont des cellules très élancées (rapport longueur sur diamètre de l'ordre de 100) à parois plus ou moins épaisses. Cela confère un caractère anisotrope à ce matériau cellulaire comme dans le cas des nids d'abeille (Gibson et Ashby, 1987).

Les parois de ces cellules sont toujours des composites à fibres, où les fibres appelées microfibrilles sont des nano-cristaux de cellulose et la matrice un mélange de polysaccharides (hémicelluloses) et de polyphénols (lignines) qui sont des polymères hydrocarbonés. Cette paroi des cellules est donc aussi un matériau très anisotrope. L'angle que font, en moyenne, les microfibrilles de cellulose dans la partie la plus épaisse de la paroi (couche S2), avec la direction longitudinale de la cellule est appelé *AMF* (figure 1.2). Il est le paramètre principal pour caractériser l'anisotropie à cette échelle (Donaldson, 2008).

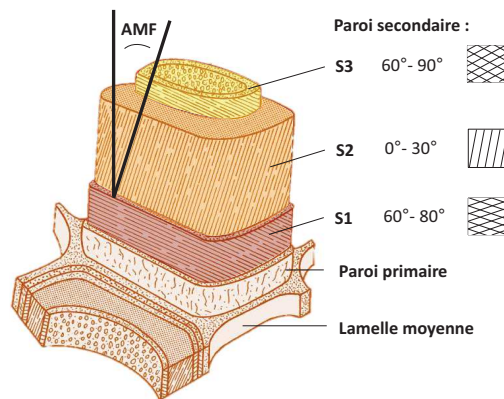


FIGURE 1.2 – Représentation schématique des différentes couches constituant la paroi, précisant l'orientation des microfibrilles

Enfin tous les bois contiennent des quantités faibles (quelques %) de petites molécules très diverses qui sont susceptibles de modifier profondément certaines propriétés du matériau : comportement hygroscopique, amortissement, couleur, résistance aux agressions biologiques. Malgré cette unité fondamentale, il y a aussi un hyper-choix au sein des bois qui résulte de leur origine comme matériau de construction d'êtres vivants. L'organisation au niveau de la microstructure (anatomie) ainsi que la composition chimique dépendent à la fois du code génétique de l'arbre et de l'environnement de l'arbre au moment où la couche de bois (cerne) est fabriquée.

La difficulté pour caractériser les bois, comme pour tous les matériaux du vivant d'ailleurs, provient de cette origine « non contrôlée » par un processus de synthèse unique et homogène. Il faut donc établir la fiche technique du matériau « a posteriori » à partir de connaissances disponibles (espèce, origine, etc.) et de mesures adaptées.

1.1.2 Les procédures de sélection

Face à la diversité des matériaux disponibles, le concepteur ne peut pas en tout état de cause, être omniscient. Pour l'aider à trouver le matériau le mieux adapté à chaque composant, en tenant compte de l'ensemble des paramètres inhérents à sa conception, il dispose d'outils dédiés.

Dans les dernières décennies, des progrès considérables ont été faits en matière de sélection de matériaux pour la conception d'éléments de structure (Ashby *et al.*, 2004; Jahan *et al.*, 2010). Des procédures de choix systématiques ont été créées ainsi que des logiciels d'analyse, associés à des bases de données. (Bréchet *et al.*, 1997; Camargo, 2012).

Compte tenu de la complexité du problème, la sélection des matériaux doit se faire de manière itérative. À chaque étape de la conception, les besoins se précisent et avec eux la définition des critères de sélection des matériaux. Les outils disponibles pour choisir ces derniers évoluent en conséquence.

La principale méthode de sélection des matériaux repose sur la création d'indices de performance. Ces indices permettent, pour un besoin donné, de construire une combinaison de propriétés traduisant la performance du matériau. Par exemple, si le concepteur cherche le matériau le plus léger pour une pièce sollicitée en traction, devant avoir une rigidité donnée, il construira l'indicateur E/ρ (module d'élasticité sur la densité).

Bien entendu, le principe peut s'appliquer à des problématiques plus complexes. Il existe pour cela des méthodes, utilisées par les logiciels de sélection, pour gérer des problèmes multi-contraintes (méthode des équations couplées), et/ou des problèmes multi-objectifs (Bréchet *et al.*, 1997).

Les indices de performance peuvent être représentés graphiquement sur une carte de sélection (figure 1.3).

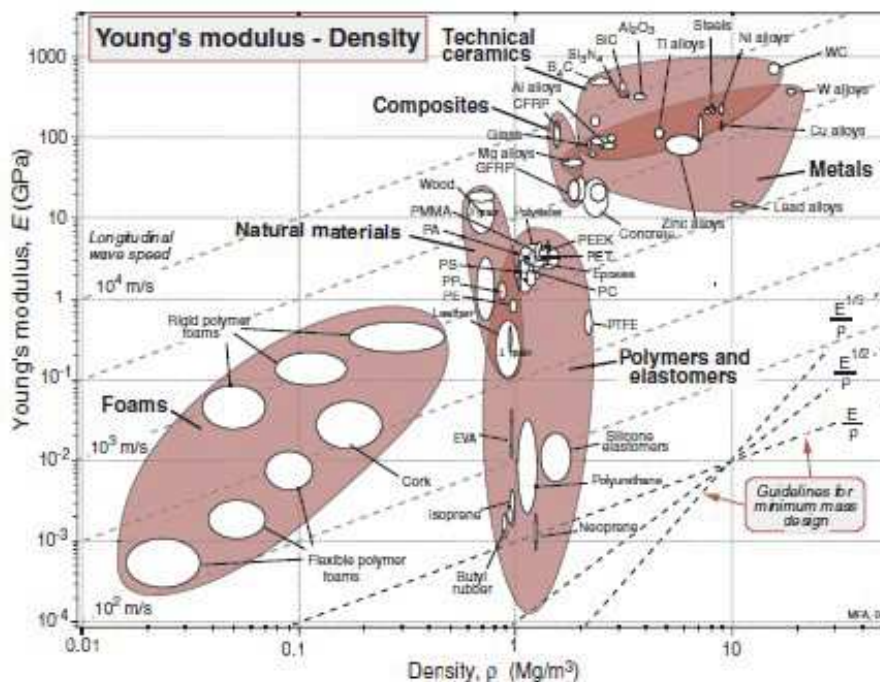


FIGURE 1.3 – Carte de sélection de matériaux en fonction du module d'élasticité et la densité, d'après Ashby et Jones (2013)

Sur cette carte, sont représentés les matériaux en fonction des propriétés étudiées (ici le module d'élasticité et la densité, en coordonnées logarithmique). Sont également tracées, des lignes d'« équiperformances » correspondant aux indicateurs retenus. Il est alors possible de comparer

visuellement les grandes familles de matériaux.

On peut noter que selon les critères retenus ici, les bois sont bien placés, et à densité égale, ne possèdent pas de concurrent.

Ce processus de sélection repose forcément sur les données disponibles sur les matériaux. Leur fiabilité et leur précision sont essentielles, et à chaque étape de la conception, elles doivent être de plus en plus précises.

Un des freins à l'utilisation des bois dans la conception mécanique réside dans le manque de données précises. Pourtant, d'un point de vue technique, les bois présentent des atouts compétitifs.

1.1.3 L'essor des composites à fibres et la place des bois

Les composites à fibres, notamment d'origine végétale, sont de plus en plus utilisés dans la réalisation de composants pour le transport (Bodros *et al.*, 2007), la fabrication d'éoliennes (Chen *et al.*, 2013) ou de bateaux à voile (Le Duigou *et al.*, 2009). Très souvent la technologie utilisée est la réalisation de plaques ou coques multicouches, en variant les paramètres d'anisotropie et d'épaisseur entre couches et en n'hésitant pas à combiner des matières différentes pour chaque pli. L'utilisation de logiciels de conception permet de « jongler » avec l'hyperchoix de matériaux de base, pour optimiser les composants.

Sur le plan technique, les bois sont des matériaux anisotropes qui s'avèrent tout à fait compétitifs, vis à vis des composites à fibre, lorsqu'ils figurent dans un logiciel de sélection comme CES (Ashby *et al.*, 2004; Laurent *et al.*, 2010). Ce sont les plus légers des matériaux de structure avec des densités variant de 0,1 à 1,3 pour des modules d'élasticité longitudinale pouvant atteindre 40 MPa (dans les cas de forte densité et d'anisotropie maximale de la paroi cellulaire). Ils peuvent être produits sous forme de feuilles d'épaisseur variable, de manière classique par les industries du tranchage et du déroulage. On peut citer l'exemple du LVL (laminated veneer lumber) réalisé à partir de placages déroulés (Hata *et al.*, 2001), qui est en plein essor sur le marché de la construction et le contreplaqué qui reste un produit technique haut de gamme, encore utilisé dans l'aéronautique et les transports.

Cependant, malgré leurs qualités techniques, il faut constater que les bois sont rarement retenus dans les choix finaux. Ce constat est probablement lié à divers facteurs, on peut citer : la garantie d'approvisionnement, les procédés associés (usinage), la variabilité des propriétés ou encore la connaissance du matériau par les concepteurs.

Pour encourager l'utilisation des bois en conception mécanique, un des enjeux est donc de trier, qualifier et tracer les pièces de bois. Cela suppose un certain nombre de travaux de fonds sur les liens entre genèse et structure du bois dans l'arbre et les liens entre structure (aux différentes échelles) et propriétés technologiques du matériau. Cela implique aussi de réaliser des campagnes de mesures importantes sur les bois, en complément de ce qui se fait actuellement sur le bois d'œuvre pour ses applications en génie civil.

1.2 Bois d'œuvre et bois « sans défauts »

Après l'abattage, il faut déconstruire l'arbre par des opérations de débit nommées tronçonnage, fendage, sciage, déroulage ou tranchage et fraisage. Les produits de cette déconstruction constituent le bois d'œuvre (rondins, planches, poutres, placages, etc.).

En grandes dimensions (plusieurs mètres dans la plus grande direction), les pièces de bois d'œuvre comportent toujours la trace des ramifications (branches) de l'arbre sous forme de nœuds associés à des perturbations locales de l'organisation anisotrope du bois. Du point de vue du comportement mécanique de la pièce de bois d'œuvre, ce sont des défauts qui peuvent diminuer très fortement la résistance de la pièce.

Par contre, sur des longueurs plus ou moins réduites, entre les zones de branchaison (ou dans la partie externe des troncs après élagage des branches pendant la vie de l'arbre), il est possible de produire des pièces de bois dites « sans défauts » où les propriétés intrinsèques du bois sont conservées. Ce sont ces « bois sans défauts » qui sont destinés à la construction mécanique et qui doivent être caractérisés pour cet usage.

A l'inverse, en génie civil, on utilise souvent des pièces de grandes dimensions et la caractérisation de ces bois « en dimension d'emploi » est essentiellement axée sur la prise en compte des « défauts » (Roblot, 2010; Viguié, 2015).

1.2.1 Bois « sans défauts » des résineux

Chez les résineux (gymnospermes) la microstructure (plan ligneux) du bois est relativement simple et régulière. De nombreux ouvrages sont consacrés à la description détaillée de l'anatomie des principaux bois résineux utilisés. On relèvera que près de 90% du bois des résineux, est constitué par les trachéides, qui sont des cellules très allongées de 1mm à 8mm et de section presque rectangulaire de l'ordre de 25 à $75\mu\text{m}$.

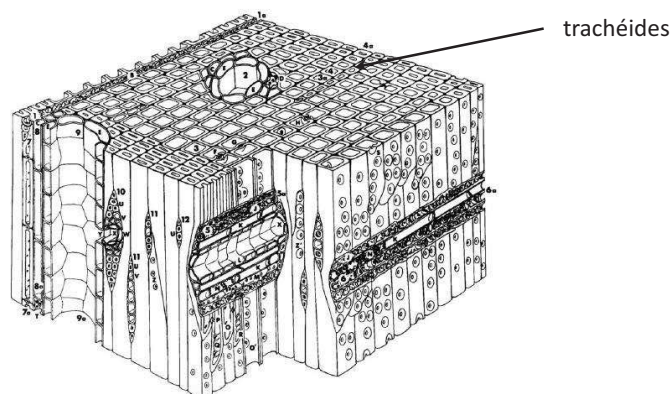


FIGURE 1.4 – Diagramme schématique d'un bloc de bois de pin d'après Howard et Manwiller, dans Siau (1984)

Il faut préciser que les cellules de bois sont formées dans l'assise cambiale (aussi appelée cam-

bium), en périphérie de la tige, permettant son accroissement en diamètre.

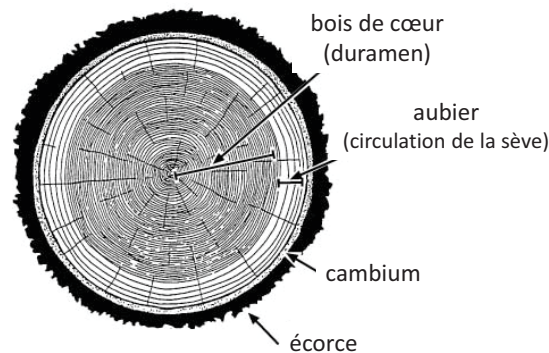


FIGURE 1.5 – Représentation schématique d'une coupe de bois

En climat tempéré, où croît la grande majorité des résineux, le cambium est inactif en hiver. Son activité reprend au début de la saison de végétation par la formation de bois de printemps (dit bois initial) caractérisé par des cellules avec un grand lumen, pour conduire la sève. Elle se poursuit par la formation d'un bois d'été (dit bois final), constitué de cellules à parois plus épaisses. L'ensemble de la production d'une année est un cerne de largeur variable (fonction de l'âge de l'arbre et des conditions de milieu) qui s'apparente beaucoup à un matériau bicouche composé d'une couche très poreuse (de faible densité) et d'une couche compacte (de forte densité) disposées en parallèle. La largeur respective des deux couches ainsi que le rapport de densité entre le bois final et le bois initial (généralement de l'ordre de 2 à 4) sont des paramètres souvent regardés par les forestiers, en plus de la largeur de cerne elle-même (Polge, 1963; Franceschini *et al.*, 2013). Une pièce de bois résineux composée de plusieurs cernes a l'apparence d'un multicouche plus ou moins périodique (figure 1.6).

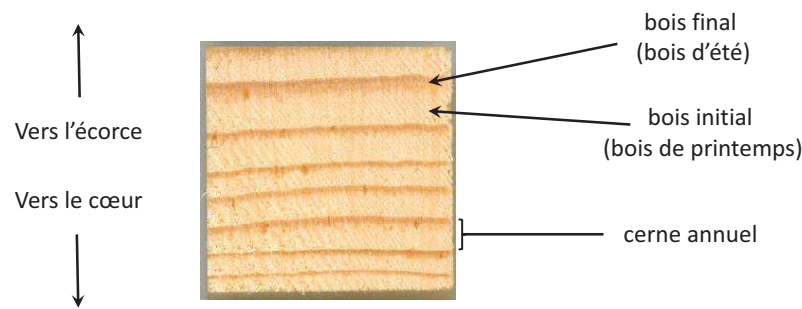


FIGURE 1.6 – Section de 20 mm × 20 mm, d'une éprouvette de pin à crochets

On peut considérer le plan ligneux comme un schéma de construction de la géométrie et de la chimie des différentes cellules. À cette définition standard viennent s'ajouter des variations « quantitatives » pour adapter la genèse du bois aux conditions de croissance (milieu, aléas, sylviculture). Au cours de la formation du bois, plusieurs paramètres peuvent varier, on notera en particulier :

- le nombre de cellules produites lors la division cellulaire, pendant une période de croissance (du bois initial et du bois final) ;
- la proportion de chaque type cellulaire lors de la différenciation ;
- l'expansion en diamètre et en longueurs des cellules ;
- l'épaisseur de la paroi des trachéïdes ;
- l'angle des microfibrilles (*AMF*) ;
- et enfin la composition chimique de la paroi cellulaire et notamment de la matrice.

L'arbre va adapter les mécanismes de croissance en fonction des circonstances environnementales afin de produire le bois le plus approprié à ses besoins. Ce phénomène peut induire une forte variation des propriétés du bois, d'un individu à l'autre, mais également au cours de la vie d'un même individu (Gutiérrez Oliva *et al.*, 2006). Par exemple il est connu que dans son jeune âge, l'arbre produit un bois de type différent appelé « bois juvénile », qui se caractérise, entre autres, par des cernes plus larges, une densité plus faible et un *AMF* plus élevé (Lachenbruch *et al.*, 2011).

Par ailleurs, afin de maintenir leur verticalité, les arbres sont capables de se redresser. Pour cela, ils peuvent adopter différentes stratégies telles que la formation de manière asymétrique d'un bois de type différent, appelé bois de compression chez les résineux (Fournier *et al.*, 2013). Ce bois de compression se caractérise aussi par un cerne généralement plus large, une plus forte densité, une valeur élevée de l'*AMF* (35 à 50°) et une composition chimique différente de la matrice dans la paroi cellulaire (Gardiner *et al.*, 2014).

D'une façon générale, ces paramètres (largeur de cerne, densité, *AMF* et composition chimique de la paroi) sont les variables d'ajustement dans le plan ligneux pour adapter la genèse du

bois dans le cerne aux conditions du moment. Ils ont bien entendu une influence prononcée sur les propriétés physiques et mécaniques du bois (Zhang, 1995; Leonardon *et al.*, 2010; Moore *et al.*, 2015).

1.2.2 Le bois pour l'ingénieur mécanicien

Les bois sont utilisés depuis les origines de l'humanité, notamment comme matériaux de structure (Thelandersson et Larsen, 2003). Ils restent massivement utilisés dans la construction et l'habitat et se maintiennent dans quelques secteurs de la construction mécanique (transports notamment).

Dans les usages structurels on s'intéresse en premier lieu au comportement mécanique du matériau. Les premières étapes de la conception se font dans le domaine élastique de ce comportement, afin de déterminer déformations et contraintes dans les pièces avant d'examiner les risques d'endommagement dans les zones critiques.

Les variations dimensionnelles des matériaux en raison de variations de paramètres physiques de l'environnement, comme la température et l'humidité, sont aussi des paramètres clés pour la conception.

Le bois est considéré, en première approximation, comme un matériau orthotrope (Guitard, 1987) possédant trois plans de symétrie naturels déterminés par les directions de croissance de l'arbre en hauteur (direction longitudinale L), et en diamètre (direction radiale R). La troisième direction du repère orthonormé correspond à la tangente aux cernes annuels (direction tangentielle T). Cela définit les trois plans de référence du bois (figure 1.7 : RT (transversale, perpendiculaire à L), LT et LR (parallèles, respectivement perpendiculaires à R et T)).

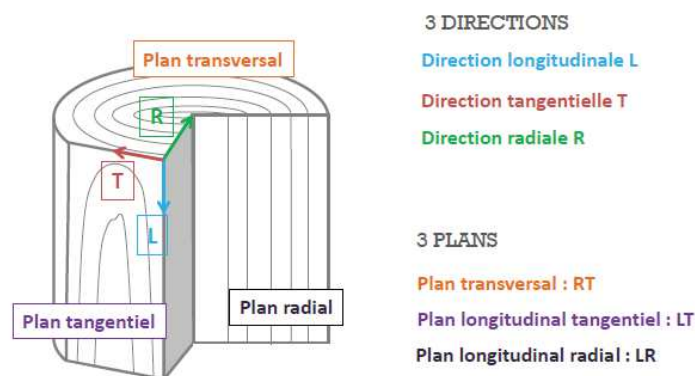


FIGURE 1.7 – Représentation schématique des plans de référence du bois, en fonction de ses trois directions principales, extraite du cours d'anatomie de Marie-Christine Trouy

En élasticité linéaire (qui décrit bien le comportement du bois en petites déformations), le comportement élastique d'un matériau est caractérisé par son tenseur des complaisances élas-

tiques (S), qui relie l'état des déformations à l'état des contraintes (loi de Hooke). Ce tenseur, généralement noté sous forme matricielle, dans laquelle chaque composante peut être exprimée en fonctions de grandeurs techniques (module d'élasticité, module de cisaillement et coefficient de Poisson).

Pour les matériaux isotropes 3 paramètres (un module d'élasticité, un module de cisaillement et un coefficient de Poisson) suffisent pour calculer la relation entre contrainte et déformation. Pour un matériau orthotrope, il faut neuf constantes indépendantes pour définir le comportement élastique : 3 modules élastiques dans les 3 directions de référence, ainsi que les 3 modules de cisaillement (GLR, GLT et GTR), définissant la diagonale de la matrice (1.1), auxquels il faut ajouter 3 termes non diagonaux permettant de calculer, avec les 3 modules élastiques, les 6 coefficients de Poisson.

$$(S) = \begin{pmatrix} \frac{1}{E_R} & \frac{-\nu_{TR}}{E_T} & \frac{-\nu_{LR}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & \frac{-\nu_{LT}}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-\nu_{RL}}{E_R} & \frac{-\nu_{TL}}{E_T} & \frac{1}{E_L} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{TL}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RL}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} \end{pmatrix}, \quad (1.1)$$

avec les trois conditions :

$$\frac{\nu_{TR}}{E_T} = \frac{\nu_{RT}}{E_R} \quad ; \quad \frac{\nu_{LR}}{E_L} = \frac{\nu_{RL}}{E_R} \quad ; \quad \frac{\nu_{LT}}{E_L} = \frac{\nu_{TL}}{E_T}$$

Dans beaucoup d'usages traditionnels (y compris en construction mécanique, comme le charonnage) le bois est utilisé en pièces élancées dans la direction L et le seul module élastique longitudinal est suffisant pour le dimensionnement, associé à un critère de rupture dans la même direction. La plupart des bases de données sur le bois (Tropix : Paradis *et al.*, 2015; Kretschmann et Green, 1999) se contentent de cette seule constante élastique et de deux résistances dans la direction axiale, en compression et en flexion (les deux valeurs étant extrêmement bien corrélées, la résistance en flexion valant sensiblement le double de la résistance en compression). Toutefois, cela n'est plus suffisant pour la conception de pièces plus complexes (Thelandersson et Larsen, 2003).

Daniel Guitard (Guitard, 1987), en compilant toutes les données de la littérature avait proposé des régressions en partant de la densité seule, avec des fonctions puissances pour les feuillus et des fonctions linéaires pour les résineux. Ces « modèles de Guitard » (Guitard et El Amri, 1987) restent la seule référence opérationnelle face à un bois dont on connaît la densité. Mais l'incertitude sur les 9 coefficients reste grande et elle limite la capacité à valoriser au mieux les pièces de bois au sein d'une espèce, en conception mécanique. Des outils nouveaux permettent aujourd'hui des mesures non destructives sur les matériaux tant du point de vue physique (tomographie RX) que mécanique (utilisation de vibrations ou d'ondes ultrasonores). La tomographie RX (Freyburger *et al.*, 2009; Svedström *et al.*, 2012) donne accès à la largeur de cerne, à la densité et à ses variations. Les méthodes vibratoires ou ultrasonores donnent accès

au module spécifique (rapport entre le module élastique longitudinal et la densité) qui est très bien corrélé à l'AMF (Cave, 1968) et peut être considéré comme un bon descripteur de cet angle, paramètre clé de l'anisotropie du bois.

La caractérisation chimique du bois massif reste compliquée, mais des outils comme la spectrométrie de surface en proche infrarouge par exemple, restituent un spectre d'absorption qui dépend beaucoup de la chimie du bois (Zahri *et al.*, 2008; da Silva *et al.*, 2013). On peut imaginer que, complétant les modèles de Guitard, pour un groupe d'espèces suffisamment homogène en termes de chimie et de structure, l'ajout de descripteurs de la chimie et de l'anisotropie devrait permettre d'améliorer la prédiction des propriétés physiques et mécaniques de pièces de bois.

1.3 Les pins : un groupe d'espèces important

Les pins font tous partie du genre *Pinus*, un des genres les plus importants chez les résineux (plus de 100 espèces ont été décrites). Le genre *Pinus* est l'un des plus répandus dans l'hémisphère Nord (figure 1.8). Sa répartition naturelle se limite principalement à cet hémisphère à l'exception d'une population de *P. Merkusii* située juste au sud de l'équateur à Sumatra (Critchfield et Little, 1966).

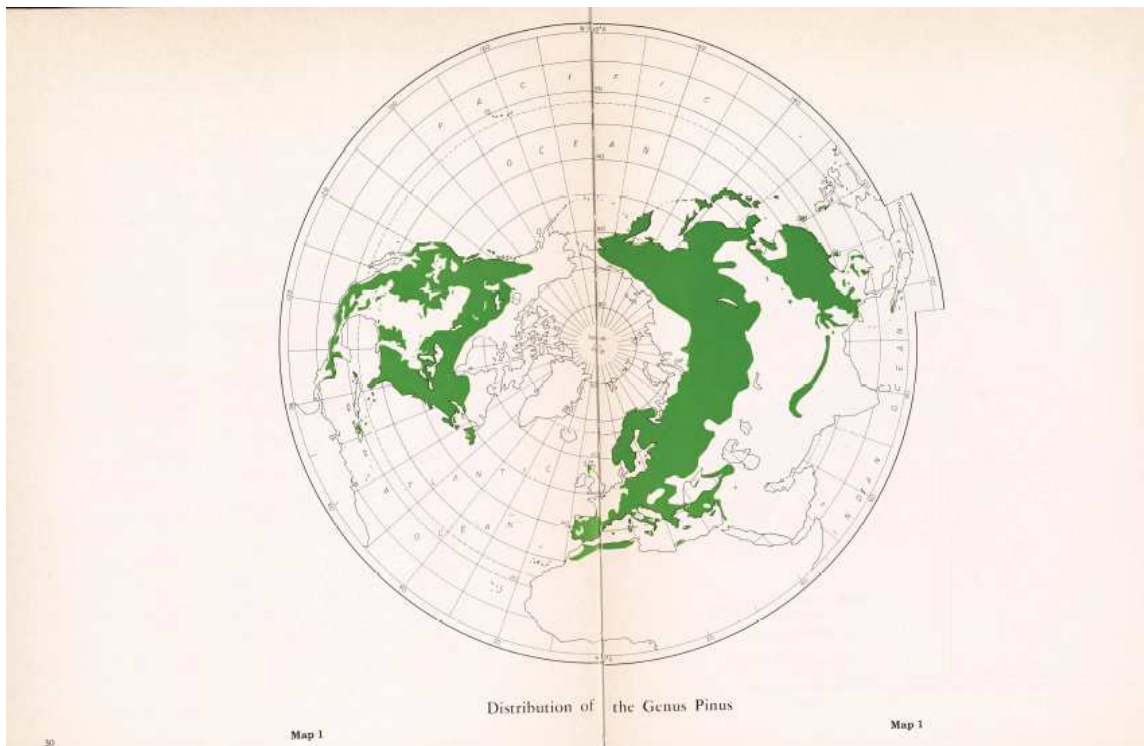


FIGURE 1.8 – Répartition géographique naturelle du genre *Pinus* dans le Monde d'après Critchfield et Little (1966)

Présents dans les zones boréales et tempérées de tous les continents (Koch, 1972), les pins sont aujourd'hui massivement utilisés en plantation (Brown, 2000; Riou-Nivert, 2015), y compris

en limite de zone tropicale.

En France, les pins sont présents sur l'ensemble du territoire. La carte (figure 1.9) établie par l'Institut National de l'information Géographique et forestière (IGN) à partir de données d'inventaires réalisés entre 2005 et 2012, matérialise le volume de bois sur pied en forêt dite « de production », pour toutes les espèces du genre *Pinus*, par parcelles imaginaires de 20 km de coté (400 km²).

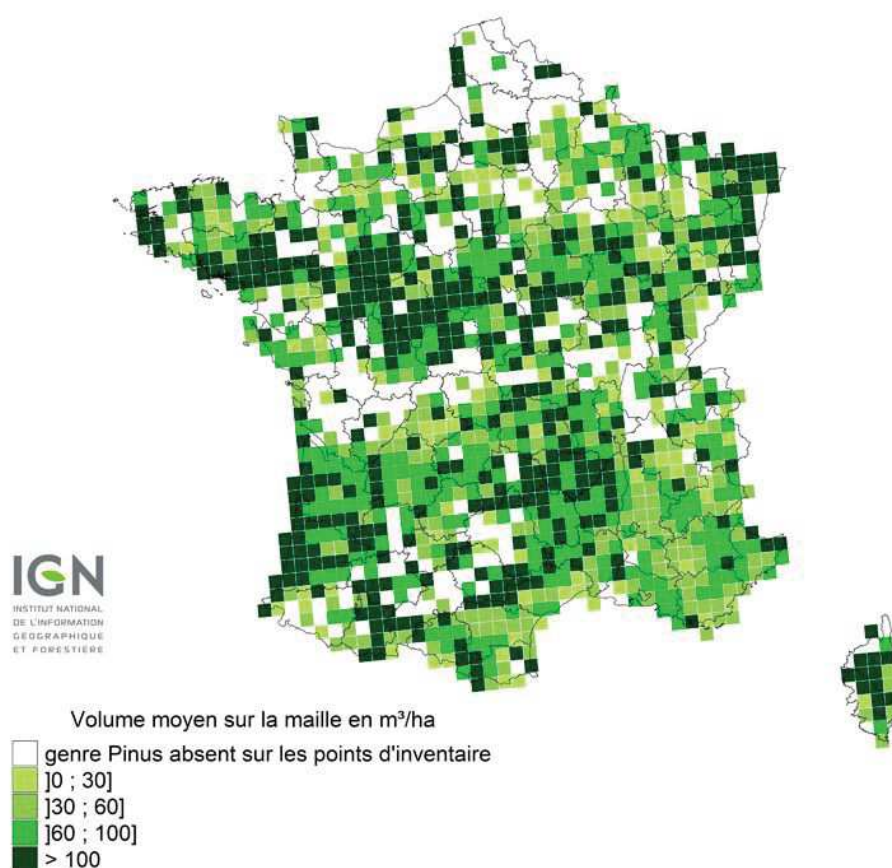


FIGURE 1.9 – Répartition géographique du volume de pins en France, IGN

La forêt française comprend une dizaine d'espèces dont certaines, (notamment le pin sylvestre et le pin maritime qui totalisent 76 % du volume des pins, cf. figure 1.10), représentent une ressource majeure.

Selon les statistiques de l'IGN¹, cette ressource représente un volume total de pins sur pied de 363 millions de m³ :

- Sur 892 millions de m³ (tous résineux confondus) soit 40 % des résineux sur pied ;
- Sur 2 518 millions de m³ (toutes essences confondues) soit 15 % des bois sur pied.

En région Languedoc Roussillon (L.-R.), avec un volume de 36 millions de m³, les pins représentent 58 % des résineux et 30 % des bois sur pied, toutes essences confondues, soit 10% de

1. campagnes de relevés entre 2005 et 2012

la ressource nationale en pins. Ils constituent la première ressource forestière disponible de la région.

On peut noter que six espèces de pins sont particulièrement bien représentées en France et en région L.-R. Leur répartition en volume sur ces deux territoires est illustrée sur la figure 1.10).

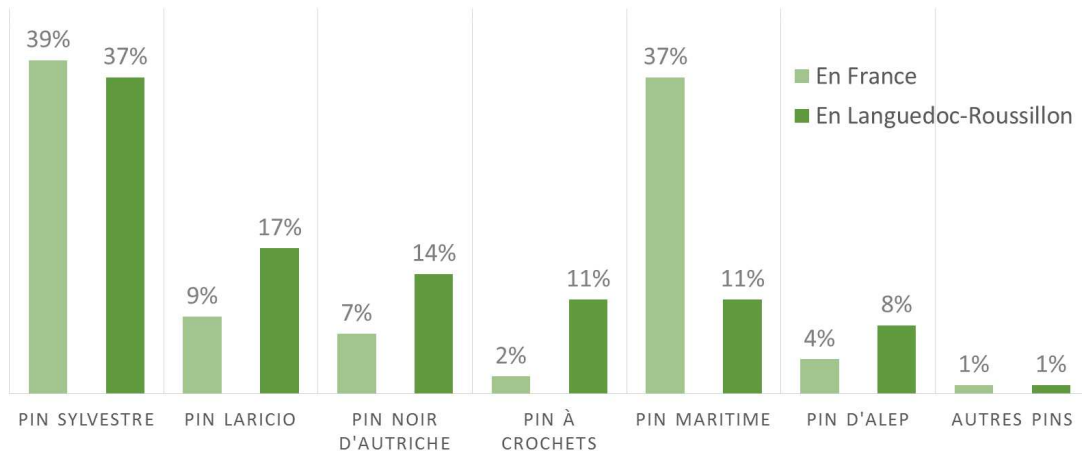


FIGURE 1.10 – Répartition du volume de Pins par essence en France et en Languedoc-Roussillon

Ces espèces appartiennent toutes à la section *Pinus*, et sont réparties dans les deux sous-section :

- Sous-section *Pinus* dans laquelle sont classés le pin sylvestre, le pin noir d'Autriche, le pin Laricio et le pin à crochet ;
- Sous-section *Pinaster* dans laquelle sont classés le pin maritime et le pin d'Alep.

Pour les praticiens, les pins ainsi que leur bois se ressemblent beaucoup et il n'est pas toujours aisé de déterminer l'espèce dans un lot mélangé sorti de scierie. C'est donc un choix intéressant, parmi les résineux, pour essayer de caler des méthodes de qualification et construire des modèles de prédiction.

1.4 Contours et objectifs du travail de thèse

L'enjeu de ce travail de thèse est de qualifier par des modèles prédictifs, les pièces de bois de pins « sans défauts » issues des scieries locales, en vue de leur usage éventuel en conception mécanique. Les propriétés visées sont d'une part, les coefficients de la matrice élastique (ou au moins les 6 termes diagonaux), ainsi que les variations dimensionnelles liées aux variations d'humidité de l'air.

Une mesure de résistance à la rupture : la rupture en compression axiale, est ajoutée à ces propriétés, qui qualifient le comportement réversible du bois.

Les indicateurs, a priori représentatifs des processus d'adaptation de la genèse du bois aux conditions environnementales sont la largeur de cerne, la densité, le module spécifique et

des indicateurs construits sur l'analyse du spectre issu de la spectroscopie proche infrarouge (NIRS).

Une des hypothèses à vérifier est que les modèles bâtis sur ces indicateurs seront utilisables tous pins confondus.

La démarche employée

AFIN de caractériser le bois de pins, « sans défauts » et prédire des propriétés à partir d'indicateurs facilement mesurables, des échantillons ont été récoltés sur lesquels a été conduit une série de mesures physico-chimiques et mécaniques. L'objectif recherché n'est pas de réaliser un échantillonnage « représentatif » de l'ensemble de la ressource du bois de pin de la région Languedoc-Roussillon, mais plutôt de balayer la diversité des cas de bois « sans défauts ». Cette partie développe la démarche employée pour répondre à la problématique posée. Elle précise le matériel végétal récolté ainsi que les outils expérimentaux utilisés afin d'une part, de caractériser la diversité des bois « sans défauts » et d'autre part, d'obtenir des variables pour construire les modèles prédictifs.

La figure 2.1 illustre le protocole expérimental général dont les différentes étapes sont décrites dans ce chapitre.

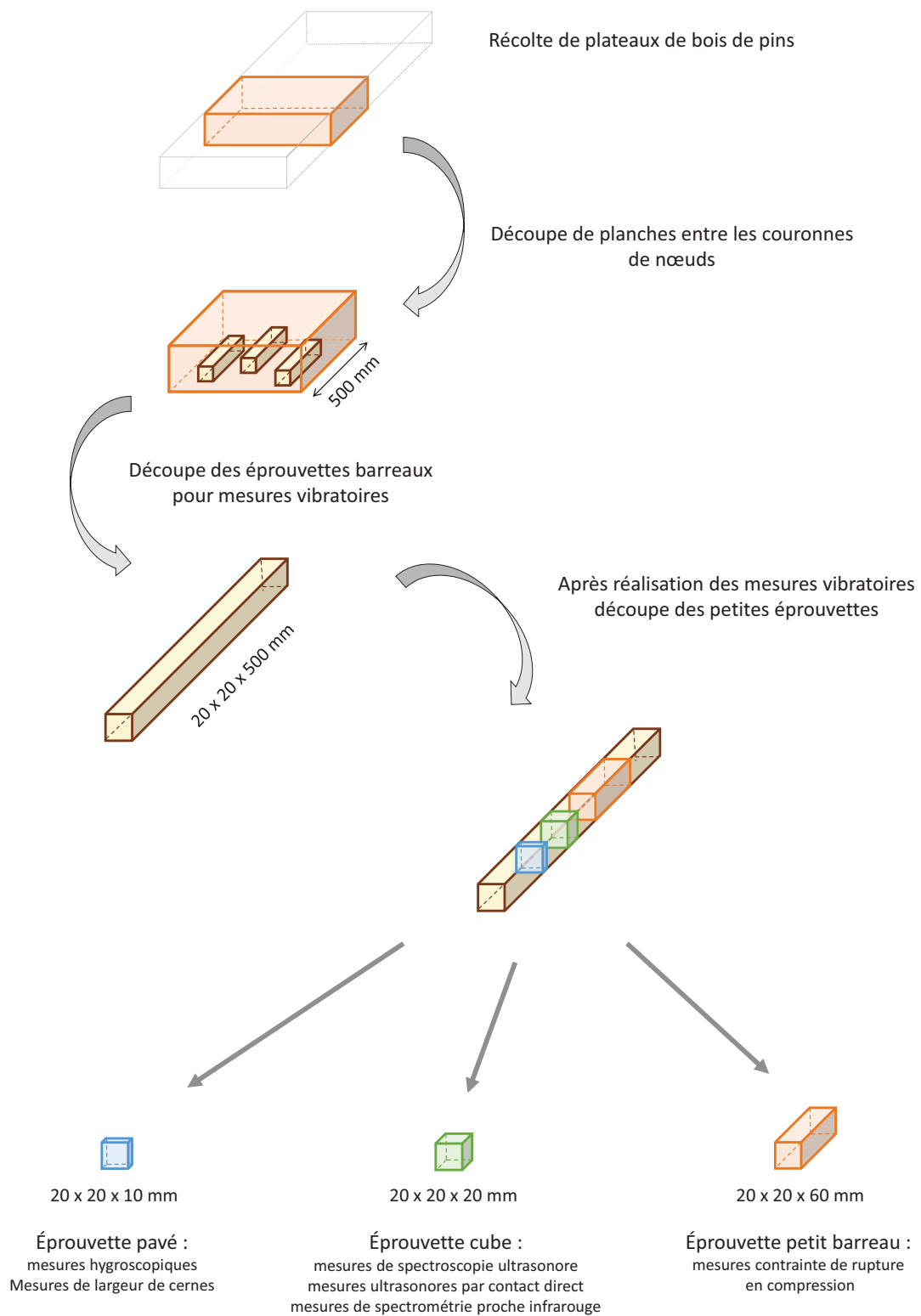


FIGURE 2.1 – Schéma du protocole expérimental général suivi

2.1 Matériel végétal et préparation des échantillons

2.1.1 Matériel végétal

L'étude a été réalisée sur quatre espèces de pins présentes en région Languedoc-Roussillon¹ (L.-R.) : le pin sylvestre (*Pinus sylvestris* L.), le pin laricio (*Pinus nigra* subsp. *laricio* Maire), le pin maritime (*Pinus pinaster* Aiton) et le pin à crochets (*Pinus mungo* subsp. *uncinata* (Ramond ex DC.) Domin). Ce sont avec le pin noir d'Autriche (*Pinus nigra* subsp. *nigra*), les cinq espèces les plus présentes en région. Elles représentent 90 % du volume total des pins sur pied en région L.-R. et 94 % du volume total des pins sur pied en France (Inventaire forestier national, cf. section 1.3, page 19, figure 1.10). L'absence de pin noir d'Autriche dans notre étude n'est pas préjudiciable puisque ce dernier est phylogénétiquement très proche du pin laricio, tous deux étant des sous-espèces de *Pinus nigra*. Au demeurant, bien que le pin noir d'Autriche ait été grandement utilisé en reboisement il y plus d'un siècle, cette espèce est actuellement en forte régression.

Nous avons également envisagé d'ajouter le pin d'Alep (*Pinus halepensis* subsp. *halepensis*) à notre échantillonnage car celui-ci représente 8 % du volume des pins en région. Cependant nous avons rencontré des difficultés pour nous approvisionner en matériel végétal. Bien que présente sur pied, cette ressource est très éparse et n'est pas sciée en L.-R. Nous avons donc finalement renoncé à inclure le pin d'Alep dans notre échantillonnage.

Le pin maritime ainsi qu'une partie du pin laricio de notre étude proviennent de la scierie *Jallès*, située à Bessèges (30), dans les Cévennes. La seconde partie du pin laricio a été fournie par la scierie *Union Forestière Viganaise*, à Avèze (30). Le pin à crochets ainsi que deux plateaux de pin sylvestre sont issus de la scierie de Capcir - Haut Conflent (66), dans les Pyrénées. Enfin, un plateau de pin sylvestre est originaire d'une forêt gérée par l'ONF à Saint-Chély-d'Apcher (48) (table 2.1).

| Espèce | Provenance | | | | Total |
|----------------|---------------|------------|---------------------------|-------------|-----------|
| | Bessèges (30) | Avèze (30) | Saint-Chély-d'Apcher (48) | Capcir (66) | |
| pin à crochets | | | | 10 | 10 |
| pin laricio | 3 | 6 | | | 9 |
| pin maritime | 4 | | | | 4 |
| pin sylvestre | | | 1 | 2 | 3 |
| Total | 7 | 6 | 1 | 12 | 26 |

TABLE 2.1 – Nombre de plateaux récoltés par essence et par provenance

Ces bois ont été récoltés sous forme de plateaux directement en scierie ou par l'intermédiaire du CIRAD. Nous n'avons pas davantage d'informations sur la provenance (station, âge des

1. Pendant la durée de cette étude, commencée en 2013, le découpage administratif de la France a été modifié par une réforme territoriale. La région Languedoc-Roussillon a été regroupée avec la région Midi-Pyrénées afin de former, en juin 2016, la nouvelle région Occitanie - *Pyrénées Méditerranée*.

arbres, etc.).

2.1.2 Préparation des échantillons

Les plateaux ont été débités en tronçons de 50 centimètres, de manière à éviter les principales couronnes de nœuds.

Une coupe perpendiculaire à la direction du fil du bois a été réalisée afin de tracer la position des éprouvettes en forme de barreau, dont la section est orientée suivant les directions radiale et tangentielle, comme illustré sur la figure 2.2.



FIGURE 2.2 – Exemple de tracé d'éprouvettes barreaux sur la section transversale d'une planche de 50 cm de long de pin à crochets

Les éprouvettes désignées « barreaux » ont été pré-débitées au moyen d'une scie à ruban, dans les conditions de stockage (« sec à l'air » selon la norme NF B51-002 (1947) : teneur en eau comprise entre 13 et 17%). Nous ne connaissons pas l'historique des variations hydriques subies par nos plateaux de bois avant leur arrivée dans nos ateliers.

Les pré-débites ont été stockés dans une pièce régulée en température et humidité ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative), pour une durée minimale de trois semaines. Ces conditions permettent d'atteindre un taux d'humidité des bois d'environ 12 % (humidité de référence) et correspondent à celles des pièces climatisées du CIRAD dans lesquelles se situent les dispositifs de mesures. Après cette période de « stabilisation » les éprouvettes ont été mises à dimensions² au moyen d'une raboteuse (figure 2.3a).

2. Les pré-débites et la mise à dimensions finale des barreaux ont été réalisés par Sylvain Lotte, menuisier au CIRAD

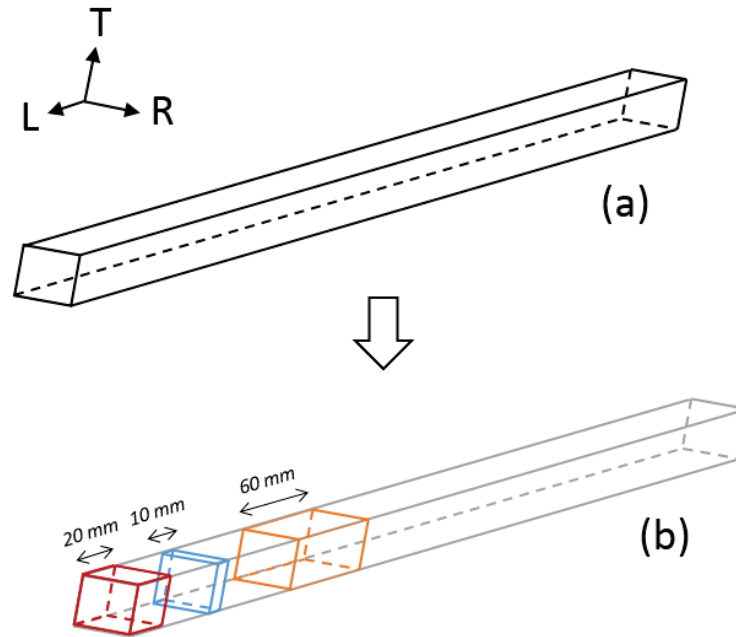


FIGURE 2.3 – (a) Éprouvette barreau de dimensions $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 500\text{ mm}$ (R , T , L) et (b) débits de l'éprouvette cubique de 20 mm de côté, du pavé de dimensions $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ et de l'éprouvette de compression de dimensions $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 60\text{ mm}$

C'est à partir de cette éprouvette « barreau » qu'ont été réalisées les trois autres éprouvettes, débitées à la scie circulaire suivant le schéma de la figure 2.3b, une fois les essais de vibrations libres sur poutre flottante (Méthode Bing©) effectués.

2.2 Mesures des propriétés élastiques

Pour mesurer les propriétés élastiques de notre matériel végétal, nous avons choisi d'utiliser des méthodes non destructives qui offrent comme principal avantage, la possibilité de réaliser plusieurs mesures sur une même éprouvette. Ceci permet de s'affranchir de problèmes de variabilité supplémentaires entre éprouvettes censées représenter le même échantillon.

La première méthode utilisée, appelée Bing©, est facilement reproductible à plus grande échelle (sur planche ou poutre), dans le milieu industriel et permet de donner rapidement une première estimation du comportement élastique de nos échantillons.

2.2.1 Méthode Bing©

(Beam Identification by Non-Destructive Grading)

La méthode Bing© employée, est une méthode vibratoire développée par P.A. Bordonné (1989) et améliorée par H. Baillères et L. Brancheriau (Version 9, Brancheriau *et al.*, 2007), qui est utilisée au CIRAD pour la caractérisation de routine du module d'élasticité longitudinal des

bois. Elle permet également d'obtenir une estimation des modules de cisaillement (G_{LT} et G_{LR}) et de l'amortissement de chaque fréquence de résonance (Brancheriau *et al.*, 2006; Arakami *et al.*, 2007; Brancheriau *et al.*, 2010). Elle repose sur la recherche puis l'interprétation des fréquences propres issues des vibrations naturelles d'une poutre en utilisant les modèles de Bernoulli et/ou de Timoshenko (modèle plus élaboré, prenant en compte le cisaillement).

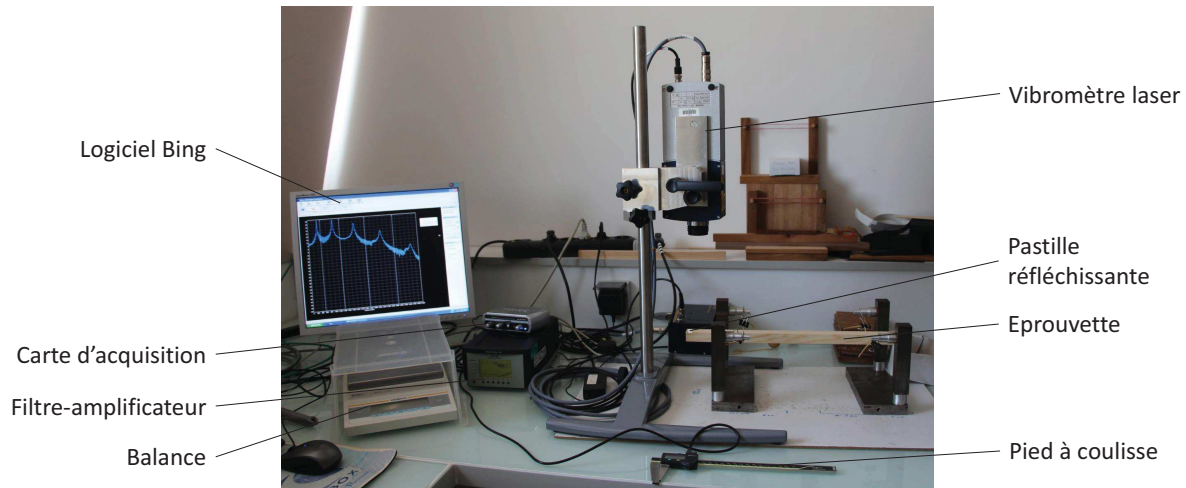


FIGURE 2.4 – Dispositif de mesure Bing©

2.2.1.1 Mode opératoire

Les éprouvettes habituellement utilisées pour cette méthode sont des « barreaux » normalisés de dimensions $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 360\text{ mm}$ (R, T, L). Dans notre étude nous avons utilisé des barreaux de section $20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$ et de longueur allant de 307 mm à 505 mm, en fonction de la longueur « sans défauts » disponible (fil droit et absence de nœud).

- La section de l'éprouvette est mesurée en 3 points pour les deux directions (R et T), à l'aide d'un pied à coulisse (marque Mitutoyo, 500 series ABS CD-20C), de précision $\pm 0.02\text{ mm}$. La longueur de l'éprouvette est mesurée en 4 points à l'aide d'une règle métallique millimétrée.
- La masse de l'échantillon est mesurée au moyen d'une balance (marque Sartorius, modèle BP 3100 S), de précision $\pm 0.01\text{ g}$.
- Une pastille d'adhésif réfléchissant est collée sur une extrémité de l'éprouvette, comme illustré sur la figure 2.4.
- L'éprouvette est positionnée sur deux supports élastiques de faible rigidité, situés approximativement aux nœuds de vibration du premier mode propre en flexion. L'éprouvette doit être placée de manière à ce que le faisceau du laser se réfléchisse sur la pastille adhésive.
- Un choc mécanique est réalisé à l'autre extrémité de l'éprouvette au moyen d'une bille métallique lâchée dans un tube creux faisant office de « rampe de lancement » (figure 2.5) Ce dispositif garantit la répétabilité de la percussion.

- Le vibromètre laser (Polytec IVS-300-VF) mesure l'effet Doppler³, c'est-à-dire le décalage de fréquence entre l'onde émise par le laser et l'onde mesurée en retour. Il permet de calculer la distance entre le laser et le barreau au cours du temps et d'en déduire la vitesse de déplacement du barreau.
- Le signal est amplifié et filtré (amplificateur Brüel et Kjaer, NEXUS type 2692-C) et numérisé (24 bits, 32768 points, fréquence d'échantillonnage = 22 kHz, $\Delta f = 0.67$) par une carte d'acquisition (M-AUDIO Fast Track).
- Afin de retrouver les fréquences propres de l'éprouvette, le signal est analysé par le logiciel Bing© (cf. *Annexe A* page 117).
- L'interface permet d'afficher les pics correspondants aux fréquences propres et de les sélectionner.
- Le programme calcule le module d'élasticité longitudinal et le module de cisaillement à partir des fréquences propres et des masses et dimensions de l'éprouvette préalablement renseignées.

Pour obtenir la valeur des modules de cisaillement G_{LR} et G_{LT} , les étapes précédemment citées (hormis les mesures de masse et dimensions) sont réalisées deux fois, en changeant la position du barreau comme indiqué sur la figure 2.5.

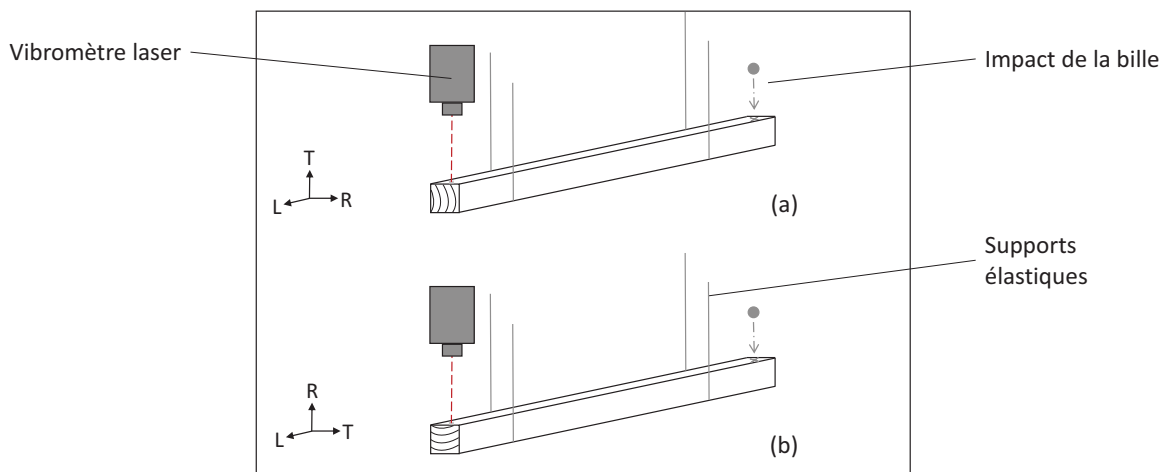


FIGURE 2.5 – Positionnement du barreau pour les mesures de E_L et G_{LT} (a) ou de E_L et G_{LR} (b)

2.2.1.2 Principe et analyse

La percussion de la bille entraîne la propagation d'une vibration mécanique en flexion qui provoque localement une déformation élastique du matériau. Les fréquences de vibration des ondes acoustiques sont liées au module d'élasticité longitudinal E_L ainsi qu'au module de cisaillement G_{LT} (ou G_{LR} suivant le plan de propagation de l'onde, lié à la position du barreau, figure 2.5).

La méthode Bing© s'appuie sur la théorie de vibrations des poutres homogènes orthotropes

3. D'une manière générale, l'effet Doppler désigne le décalage de fréquence d'une onde, observé entre les mesures à l'émission et à la réception, lorsque la distance entre l'émetteur et le récepteur varie au cours du temps.

(Brancheriau, 2011) dont le calcul est développé dans l'Annexe A (page 117).

La détection des premières fréquences propres de l'éprouvette, permet de tracer la droite : $E_X/\rho = y_n - \frac{E_X}{KG_{XY}}x_n$ (figure 2.6) et d'en déduire les valeurs de E_X/ρ et G_{XY} . Les couples (x_n, y_n) sont dépendants de la géométrie de l'éprouvette et de l'ordre n du mode de vibration (cf. détails Annexe A). D'après Brancheriau et Baillères (2002), le résultat est vrai pour les 5 premiers modes propres.

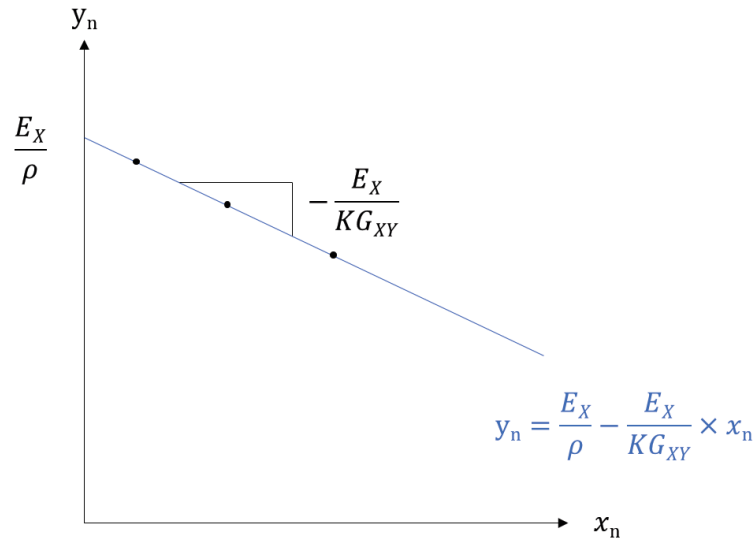


FIGURE 2.6 – Détermination des modules par régression linéaire d'après le modèle de Timoshenko.

La fiabilité du résultat peut être estimée par le coefficient de détermination R^2 .

Limites de validité :

D'après les essais expérimentaux de Bordonné (Bordonné, 1989) et la vérification par simulation numérique de Brancheriau (Brancheriau *et al.*, 2002), la mesure du module longitudinal ne dépend pas de l'élanement, à partir de $L/h > 10$. L'incertitude de mesure est inférieure à 5 %.

En revanche pour ce qui est des modules de cisaillement, l'erreur de mesure reste inférieure à 8 % tant que l'élanement $10 < L/h < 20$, mais au delà, augmente de façon considérable.

De ce fait dans cette étude, une partie des mesures de cisaillement, réalisées sur les barreaux de longueur supérieure à 40 cm, ne peut pas être retenue. La mesure des modules de cisaillement est réalisée par ailleurs au moyen de méthodes ultra-sonores.

En théorie, la valeur du module élastique E_L est identique quelle que soit la position (a) ou (b) du barreau (figure 2.5) pendant la mesure. Dans la pratique, on constate que l'écart entre les deux valeurs mesurées reste inférieur à l'incertitude de la mesure (Brancheriau *et al.*, 2002). Pour l'analyse des résultats, on retiendra la valeur mesurée dans la position (a) car c'est la direction de référence dans la norme d'essai de détermination du module d'élasticité en flexion statique (norme NF B51-016 (1987)).

2.2.2 Méthode ultra-sonore par contact direct

Afin de compléter la caractérisation des propriétés élastiques de nos échantillons, nous avons choisi d'utiliser une méthode ultra-sonore par contact direct. La méthode employée est couramment utilisée pour la caractérisation non destructive des matériaux (Royer (2002), Kohlhauser *et al.* (2009)), y compris du bois (Pellerin et Ross (2002), Bucur (2006)). Elle consiste à mesurer le temps de propagation d'une onde ultra-sonore à travers un échantillon, à l'aide de deux transducteurs piézoélectriques directement en contact avec la surface de celui-ci.

2.2.2.1 Mode opératoire

Les éprouvettes utilisées pour cette méthode sont des cubes orientés suivant les trois directions principales (R, T, L) de 20 mm de côté. Le dispositif est situé dans une salle climatisée avec température de consigne, mais non réglée précisément en température et hygrométrie. Pendant la période de mesure, la température et l'humidité ont été relevées deux fois par jour, à l'aide d'un enregistreur de température et d'humidité (marque HOBO, modèle LCD H14-001) de précision $\pm 0.02^\circ C$ et $\pm 2.5\%$. L'ambiance au cours d'une journée est considérée stable car les variations observées sont restées inférieures à $0.5^\circ C$ et 1 % HR. Au cours des deux semaines de mesure, l'ambiance a varié de 23.4 à $22.7^\circ C$ et de 52 % à 56 % d'humidité relative. Afin de conditionner les échantillons à l'ambiance de la pièce, ils y ont été placés quatre semaines avant le début des mesures.

Les mesures ont été réalisées en deux étapes. La première a consisté à mesurer la vitesse de propagation d'une onde longitudinale (figure 2.8), aussi appelée onde de compression, dans les trois directions principales (R, T, L) sur l'ensemble des échantillons. La seconde étape a consisté à mesurer la vitesse de propagation d'une onde transverse, aussi appelée onde de cisaillement, sur un sous-échantillonnage de 120 individus (cf. Méthodes de sous-échantillonnage, section 2.6.4, page 61). Le mode opératoire utilisé pour mesurer la vitesse de propagation des ondes longitudinales est le suivant :

- L'éprouvette est pesée au moyen d'une balance (marque Ohaus, modèle Scout Pro SPU 123), de précision $\pm 0.001\text{ g}$.
- Les trois dimensions de l'éprouvette sont mesurées en 4 points, aux angles du cube, avec un pied à coulisse (Mitutoyo, 500 series ABS CD-20C), de précision $\pm 0.02\text{ mm}$.
- Des transducteurs à large bande de 800 kHz (Physical Acoustics Corporation, R80 α SN AA58, courbe de réponse en *Annexe B*, page 121) convertissant l'énergie électrique en énergie acoustique dans la gamme des ultrasons, sont disposés de part et d'autre de l'échantillon en contact avec la surface du bois, comme cela est visible sur la figure 2.7. Une goutte de miel est utilisée comme couplant.
- Un signal électrique de 700 mV créé par un générateur de signal (Thurlby Thandar Instruments, modèle TGP110 10MHz), et amplifié 100 fois à l'aide d'un amplificateur linéaire (FLC Electronics, A800) est envoyé au premier transducteur.
- Le signal reçu par le second transducteur est récupéré au moyen d'une carte d'acquisition oscilloscope (PicoScope 32 24 – fréquence d'échantillonnage : 10 MHz – 12 bits) fonctionnant sur un ordinateur avec le logiciel *PicoScope 6* de Pico Technology.
- Le temps de vol de l'onde t_i , est mesuré à l'aide du programme *Ultrasound Transmission Velocity* (développé par Loïc Brancheriau, CIRAD), permettant de détecter le début

du signal reçu.

- Le temps de vol de l'onde « à vide » t_0 , est mesuré en plaçant les transducteurs directement en contact l'un contre l'autre.
- La vitesse de propagation de l'onde suivant la direction i ($i = R, L$ ou T) est calculée en divisant la distance parcourue par l'onde d_i par son temps de vol τ_i .

$$V_i = \frac{d_i}{\tau_i} \quad , \quad (2.1)$$

avec :

$\tau_i = t_i - t_0$ soit, la différence entre le temps de vol mesuré sur l'échantillon et le temps de vol à vide.

L'erreur de mesure des temps de vol Δt est de $\pm 0.1 \mu s$ (car la fréquence d'échantillonnage de l'oscilloscope = 10 MHz). Ce qui fait une erreur totale $\Delta \tau$ de $\pm 0.2 \mu s$ sur le temps de vol (pour un temps de vol moyen mesuré dans la direction longitudinale de $3.86 \mu s$).

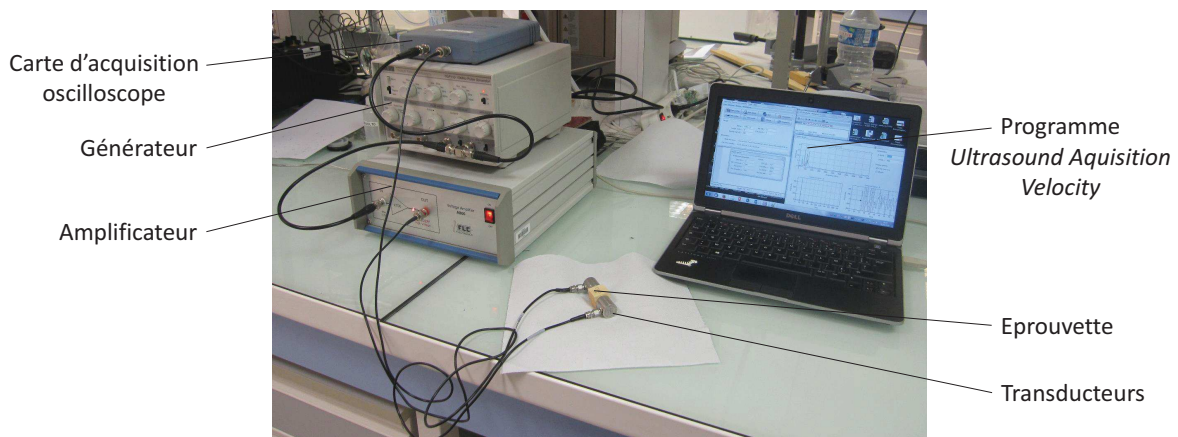


FIGURE 2.7 – Dispositif de mesure ultra-sonore par contact direct – Ondes de compression

Le mode opératoire employé pour mesurer la vitesse de propagation des ondes de cisaillement est semblable à celui des ondes longitudinales, à l'exception des transducteurs utilisés et du programme de détection du départ de l'onde. Les transducteurs sont remplacés par des transducteurs à ultrasons d'onde de cisaillement polarisée, à large bande de 0.5 MHz (Olympus, Panametrics Videoscan V151). Le programme de détection du départ de l'onde ne peut pas être utilisé car la mesure des ondes de cisaillement est bruitée par la présence d'échos d'ondes et d'ondes de compression. Le temps de vol de l'onde est mesuré graphiquement directement sur l'écran du logiciel Picoscope. Le début de l'onde n'étant pas toujours facile à repérer, nous avons choisi de prendre le premier pic comme point de repère. Afin d'obtenir les trois modules de cisaillement, la mesure a été réalisée suivant trois plans (LT, LR et RT), comme illustré sur la figure 2.8.

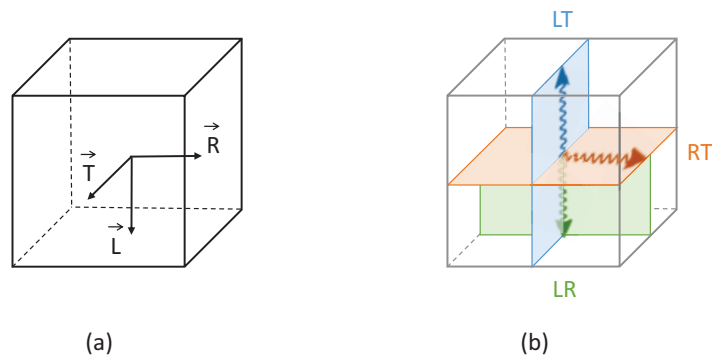


FIGURE 2.8 – Propagation des ondes de compression dans les direction R , T et L (a) et des ondes de cisaillement dans les plans LT , LR et RT (b)

Pour la mesure suivant le plan RT , le signal reçu est amplifié de 40 dB au moyen d'un amplificateur large bande (Physical Acoustics Corporation, AE2A), comme cela est visible sur la figure 2.9. Il faut noter que l'amplificateur crée un déphasage du signal. Le premier pic observé devient positif.

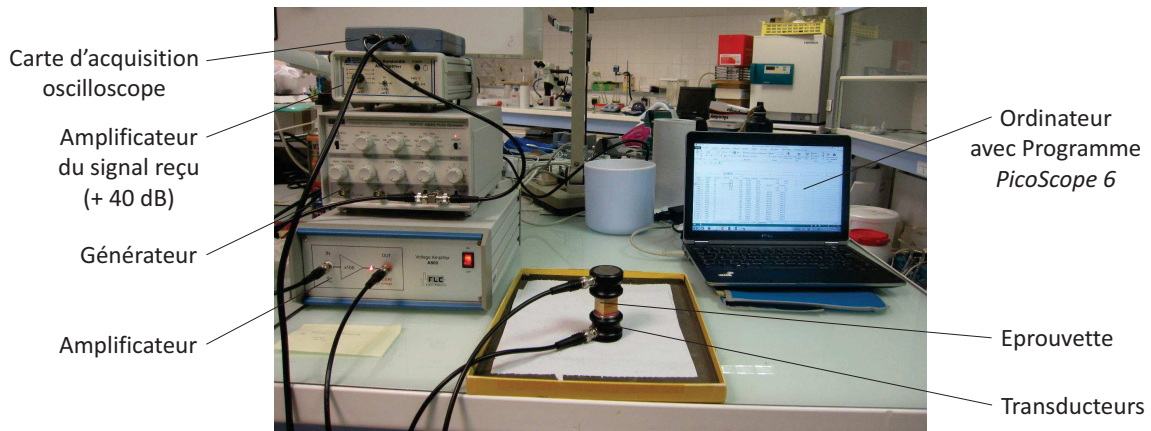


FIGURE 2.9 – Dispositif de mesure ultra-sonore par contact direct – Ondes de cisaillement

2.2.2.2 Principe et analyse

À partir de la vitesse de propagation de l'onde mesurée et de la masse volumique ρ de l'échantillon, une estimation des coefficients de rigidité élastique est donnée par l'équation suivante :

$$C_{ii} = \rho \times V_i^2 \quad , \quad (2.2)$$

avec :

- C_{ii} : coefficient de rigidité élastique dans la direction i ,
- ρ : la masse volumique,
- V_i : la vitesse de propagation de l'onde dans la direction i .

À partir de ces valeurs des coefficients de rigidité C_{ii} on peut estimer la valeur des modules d'élasticité E_i . Par simple inversion de la matrice des complaisances élastiques (équation 1.1, page 18), on obtient les équations suivantes :

$$C_{RR} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}}{E_T E_L} \right) , \quad (2.3)$$

$$C_{TT} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1 - \nu_{LR}\nu_{RL}}{E_L E_R} \right) , \quad (2.4)$$

$$C_{LL} = \frac{1}{\Delta} \left(\frac{1 - \nu_{RT}\nu_{TR}}{E_R E_T} \right) , \quad (2.5)$$

avec :

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{TL}\nu_{LT} - \nu_{LR}\nu_{RL} - 2\nu_{TR}\nu_{LT}\nu_{RL}}{E_R E_T E_L} ,$$

- C_{ii} : coefficient de rigidité élastique dans la direction i ,
- E_i : module d'élasticité dans la direction i ,
- ν_{ij} : coefficient de Poisson pour une contrainte dans la direction i entraînant une élongation transversale dans la direction j .

Ce qui donne les équations :

$$E_R = \frac{C_{RR}\Lambda}{1 - \nu_{TL}\nu_{LT}} , \quad (2.6)$$

$$E_T = \frac{C_{TT}\Lambda}{1 - \nu_{LR}\nu_{RL}} , \quad (2.7)$$

$$E_L = \frac{C_{LL}\Lambda}{1 - \nu_{RT}\nu_{TR}} , \quad (2.8)$$

en posant :

$$\Lambda = 1 - \nu_{RT}\nu_{TR} - \nu_{TL}\nu_{LT} - \nu_{LR}\nu_{RL} - 2\nu_{TR}\nu_{LT}\nu_{RL} .$$

La mesure des coefficients de Poisson n'étant pas réalisée par cette étude, le calcul des modules élastiques à partir des mesures des coefficients de rigidité impose d'utiliser les valeurs de la littérature. Nous prendrons les coefficients proposés par Guitard et El Amri (1987) (calculés en fonction de la densité de l'éprouvette) afin de pouvoir comparer les modules obtenus ici avec ceux obtenus par la méthode RUS.

Les modules d'élasticité ainsi calculés sont supérieurs aux modules estimés par des méthodes vibratoires (comme Bing©) ou mesurés par des méthodes statiques. En effet, il a été montré dans une étude menée par Haines *et al.* (1996) sur la comparaison de différentes méthodes d'estimation du module d'élasticité de bois d'épicéa et de sapin pectiné, que les méthodes basées sur le temps de parcours d'une onde ultra-sonore avaient tendance à surestimer la valeur du module. Cette variation serait attribuée au comportement viscoélastique du bois. La méthode par ultrason utilise des impulsions plus courtes et de plus hautes fréquences qui, d'après une étude menée par Ferry (1961) sur du caoutchouc, se déplaceraient plus vite dans un milieu viscoélastique. Cette hypothèse est confirmée par un modèle viscoélastique complexe proposé par Kolsky (1963), ainsi qu'expérimentalement, comme dans l'étude menée sur le Vasa par Vorobyev *et al.* (2015).

Une autre cause de la surestimation du module d'élasticité par mesure ultra-sonore avancée par Haines serait l'hétérogénéité du bois. Dans la direction longitudinale, l'onde ultra-sonore peut se déplacer plus rapidement dans le bois final, plus dense et plus rigide que le bois de printemps.

Par ailleurs la méthode de lecture du temps de vol utilisée peut-être discutée. En effet, pour cette mesure des propriétés élastiques par ultrasons, on fait l'hypothèse que le matériau bois est non dispersif. Or ce n'est pas tout à fait le cas, et dans un milieu dispersif, la vitesse de propagation d'une onde dépend de sa fréquence. Le paquet d'ondes du signal envoyé, est constitué d'ondes de fréquences différentes, qui ne se déplacent donc pas à la même vitesse dans le milieu. En choisissant de prendre le temps de vol du début du paquet d'ondes (ou premier pic pour les ondes de cisaillement), nous mesurons la vitesse de phase de l'onde la plus rapide.

Un moyen couramment utilisé par les acousticiens pour mesurer le temps de vol est de réaliser une intercorrélation du signal mesuré avec un signal de référence (mesuré à vide ou dans un matériau connu) (Max et Lacoume, 2004). Cette méthode permet de mesurer la vitesse groupe, c'est à dire la vitesse de déplacement du paquet d'ondes. Toutefois l'intercorrélation est difficile à effectuer lorsque le signal est bruité, ce qui est notre cas pour les ondes de cisaillement. La méthode de détection du début du pic utilisée par le programme *Ultrasound Transmission Velocity* est basée sur la méthode du seuil (*Threshold criterion*), décrite dans l'article d'Arciniegas *et al.* (2015).

De la même manière que pour les ondes longitudinales, une estimation du module de cisaillement est calculée avec l'équation suivante :

$$G_{ij} = \rho \times V_{ij}^2 \quad , \quad (2.9)$$

avec :

- G_{ij} : le module de cisaillement dans le plan ij , les ondes se propageant dans la direction i ,
- ρ : la masse volumique,
- V_{ij} : la vitesse de propagation de l'onde dans la direction i , polarisée suivant j .

La mesure a été réalisée de manière à calculer G_{LT} , G_{LR} et G_{RT} . Le matériau bois étant considéré orthotrope, on a donc théoriquement les égalités suivantes :

$$G_{LT} = G_{TL} \quad , \quad (2.10)$$

$$G_{LR} = G_{RL} \quad , \quad (2.11)$$

$$G_{RT} = G_{TR} \quad . \quad (2.12)$$

Dans la pratique, on observe dans un même plan, une différence parfois notable, entre la vitesse de propagation d'une onde suivant la direction dans laquelle elle se propage. La méthode couramment employée est de retenir la moyenne des deux valeurs mesurées. Par économie de temps, dans cette étude la mesure n'a été réalisée que dans une seule des deux directions (comme indiqué sur la figure 2.8).

2.2.3 Méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS)

La méthode ultra-sonore par contact direct ne permettant pas d'accéder aux termes non diagonaux de la matrice d'élasticité, nous avons choisi de compléter nos mesures par une méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore. Cette méthode consiste à mettre en résonance une éprouvette de dimensions connues, mesurer ses fréquences propres puis identifier ses constantes élastiques par une méthode inverse. Le dispositif RUS employé ici, a été développé par Roberto Longo (Longo *et al.*, 2012), dans le cadre d'une collaboration entre l'*Institut d'Électronique des Systèmes (IES)* et le *Laboratoire de Mécanique et de Génie Civil (LMGC)*, afin de déterminer le tenseur d'élasticité d'un échantillon de bois de forme cubique.

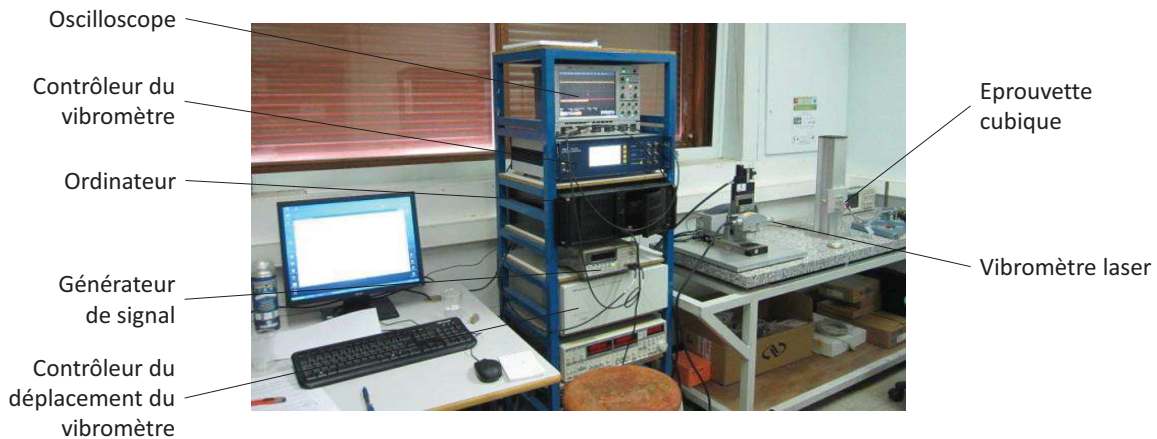


FIGURE 2.10 – Dispositif de spectroscopie par résonance ultrasonore

2.2.3.1 Mode opératoire

La méthode RUS se réalise en deux étapes : une première partie « mesure », suivie d'une partie « identification inverse ».

Mesure des fréquences propres

Les éprouvettes utilisées pour cette méthode sont identiques à celles utilisées pour la mesure ultra-sonore par contact direct. Ce sont des cubes orientés suivant les trois directions principales (R, T, L), de 20 mm de côté. L'identification inverse des constantes élastiques nécessite de réaliser la mesure sur au moins deux faces du cube : une orientée dans le plan RT et une autre dans le plan TL.

Le dispositif est situé dans une salle climatisée avec température de consigne mais non régulée précisément en température et hygrométrie. Pour cette raison, une double pesée, avant et après la mesure de chaque face, est réalisée afin d'évaluer les éventuelles variations de teneur en eau au cours de l'expérience.

- L'éprouvette est pesée au moyen d'une balance (marque Precisa, modèle XB1220M), de précision $\pm 0.001 g$.
- Les trois dimensions de l'éprouvette sont mesurées en 4 points, aux angles du cube, avec un pied à coulisse (Mitutoyo, 500 series ABS CD-20C), de précision $\pm 0.02 mm$.
- La face RT du cube à scanner est recouverte d'un papier adhésif réfléchissant.
- Le cube est positionné sur une mousse de polymère, face au laser, de manière à ce que l'un de ses angles supérieurs soit en contact avec un transducteur piézo-électrique (Olympus, C133 RM, 2.25 MHz) comme cela est visible sur la figure 2.11. (Le choix de la position de l'excitation dans un coin du cube correspond à la position la plus efficace pour exciter le maximum de modes.) Une goutte de miel sert de couplant entre le bois et le transducteur.



FIGURE 2.11 – Positionnement de l'échantillon de bois, face au laser et contre le transducteur piézo-électrique

- Un signal multi harmonique ($10 kHz \rightarrow 180 kHz$) est envoyé en continu au transducteur piézo-électrique au moyen d'un générateur de signal (Agilent, 3325DA, signal généré avec le logiciel Matlab©).
- Au lancement du programme d'acquisition (Logiciel Labview©), le vibromètre laser (Polytec, OFV-505) scanne la face (40×40 points) de l'échantillon dont les coordonnées

extrêmes ont été préalablement précisées, et mesure en chaque point le déplacement du cube en fonction du temps.

- Le signal obtenu est traité au moyen d'un algorithme de transformée de Fourier rapide (FFT) afin d'obtenir en chaque point, un spectre de l'amplitude du déplacement en fonction de la fréquence, qui permettra de retrouver les fréquences de résonance de l'éprouvette. (figure 2.12)
- Les étapes précédemment citées (hormis les mesures de dimensions) sont reproduites pour la face TL.
- Enfin, l'éprouvette est pesée une dernière fois afin d'estimer la variation de teneur en eau au cours de l'expérience. En cas de variation, la moyenne des trois valeurs (avant la mesure sur la première face, entre les deux mesures et après la mesure sur la seconde face) est retenue.

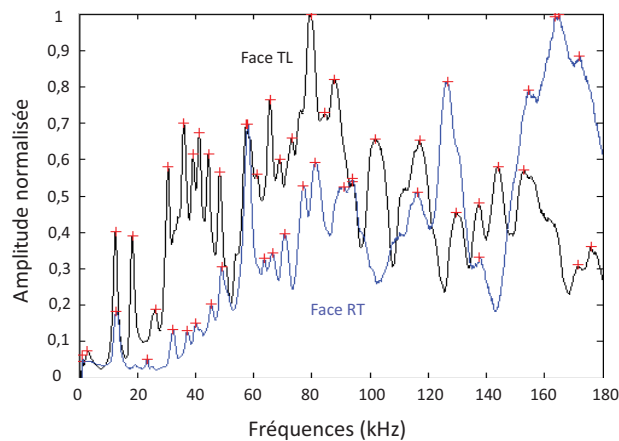


FIGURE 2.12 – Spectres de l'amplitude du déplacement en fonction de la fréquence, obtenus par la spectroscopie de deux faces (RT et TL) d'une éprouvette

Identification inverse

L'identification inverse est réalisée au moyen d'un programme développé par Olivier Arnould et Stéphane Pagano du *LMGC* sur le logiciel Matlab©.

- À partir de la moyenne des spectres mesurés aux quatre coins de chaque face (position où le risque d'avoir un nœud de vibration est le plus faible), les fréquences de résonances correspondant aux pics sont identifiées (croix rouges sur la figure 2.12).
- La cartographie des déplacements hors plan (la déformée modale) de la face mesurée par le vibromètre laser est affichée pour chaque fréquence de résonance à priori identifiée. Les images acquises ont préalablement été filtrées (figure 2.13), en gommant les points aberrants (procédure Matlab *medfilt3*) et en réduisant le bruit (convolution avec une fenêtre en forme de disque).

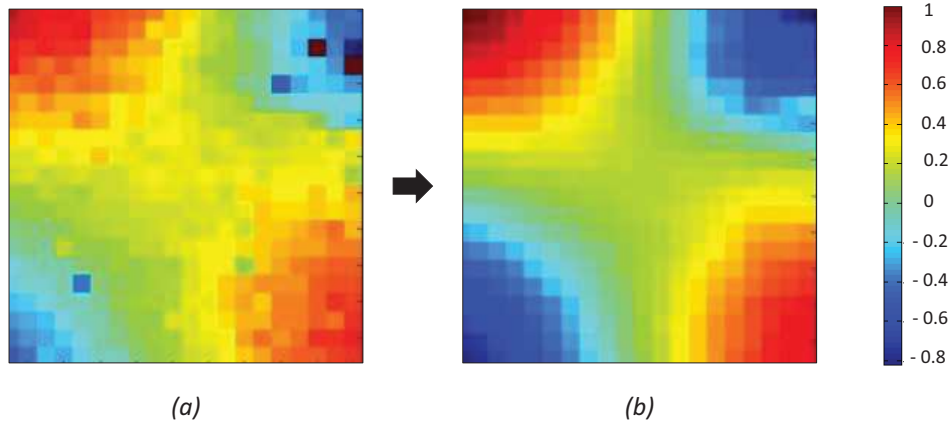


FIGURE 2.13 – Exemple de cartographie de l’amplitude et du sens des déplacements hors plan normalisé, pour une fréquence de 13 kHz, avant (a) et après filtrage (b)

- Une recherche automatique permet de trouver les modes théoriques, estimés par le modèle de Guitard (Guitard, 1987), les plus proches des modes mesurés, en fréquence et en allure sur les 2 faces mesurées.
- Le problème inverse est résolu par un algorithme qui modifie les valeurs initiales des C_{ij} afin de minimiser l’erreur en fréquence et en amplitude entre les modes mesurés et les modes théoriques associés (calculés par le problème direct).

2.2.3.2 Principe et analyse

Problème direct

Pour identifier les modes mesurés, on les compare aux modes calculés avec une matrice d’élasticité théorique dont les composantes C_{ij} sont estimées par le modèle de Guitard, basé sur la masse volumique de l’échantillon. À partir de bases de données de mesures des complaisances élastiques de diverses essences, Daniel Guitard a élaboré des modèles prévisionnels du comportement élastique tridimensionnel pour les bois de feuillus ou résineux (Guitard et El Amri, 1987). Ces modèles sont valables pour des bois dont la teneur en eau est voisine de 12%.

Le « résineux standard » est calculé pour une masse volumique de 0.45 g/cm^3 , à partir duquel une correction linéaire en fonction de la masse volumique est proposée. Cette correction a été ajustée par Guitard et Amri, pour des masses volumiques comprises entre 0.26 et 0.59 g/cm^3 . Certains spécimens de notre échantillonnage sont en dehors de ce domaine de validité. Toutefois ce modèle est ici seulement utilisé comme point de départ pour initialiser l’identification.

Il est possible de calculer la sensibilité relative d’un mode i à une constante élastique $e_j \in [E_R, E_T, E_L, G_{TL}, G_{RL}, G_{RT}, \nu_{RT}, \nu_{LR}, \nu_{LT}]$ en faisant très légèrement varier cette dernière d’une valeur Δ_{e_j} et en calculant la variation de fréquence Δ_{f_i} induite :

$$\Delta_{ij} = \frac{\frac{\Delta_{f_i}}{f_i}}{\frac{\Delta_{e_j}}{e_j}}, \quad (2.13)$$

avec :

- f_i , la fréquence du mode i ,
- $\frac{\Delta e_j}{e_j}$ pris égal à 0.01 pour éviter des permutations de modes.

En observant les cartes de sensibilité (figure 2.14), on peut constater que les modes mesurés sont très peu sensibles au module d'élasticité longitudinal E_L . Ceci est l'effet du comportement anisotrope du bois, qui est beaucoup plus rigide dans la direction longitudinale que dans les deux autres. Ainsi les modes propres sensibles à E_L se trouvent à des fréquences beaucoup plus hautes. Il est difficile de mesurer les modes de plus hautes fréquences car ils sont nombreux et se superposent.

Ce problème pourrait certainement être solutionné en changeant la forme de l'éprouvette cubique par une éprouvette en forme de barreau, dont la longueur dans la direction L serait plus grande que dans les autres directions R et T , afin que les modes propres sensibles à E_L aient une fréquence comparable à ceux qui sont sensibles à E_R et E_T et entrent dans la gamme des fréquences mesurées.

Nous avons pallié cette insuffisance en remplaçant dès le départ de l'identification, la valeur du module élastique longitudinal donnée par le modèle Guitard par celle obtenue par la mesure de Bing© (cf. section 2.2.1, page 28). Cette valeur de module élastique longitudinal est figée pour l'identification inverse de la matrice finale.

De même on constate sur la figure 2.14, une très faible sensibilité (voire aucune) des modes mesurés aux coefficients de Poisson (en particulier ν_{LR} et ν_{LT}). Nous n'avons pas pu résoudre cette difficulté dans le cadre de la thèse et nous avons pris les valeurs des coefficients de Poisson estimés par les formules empiriques de Guitard et fixes pendant toute la phase d'identification. Nous n'avons donc pas pu répondre à l'objectif initial de mesurer les termes non-diagonaux de la matrice.

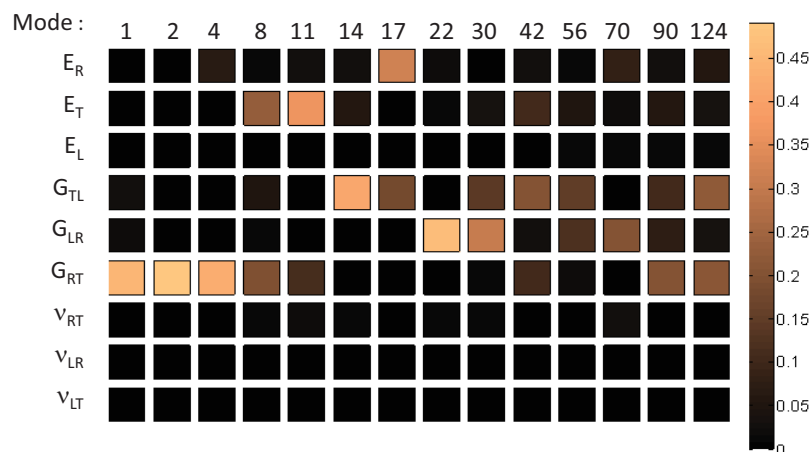


FIGURE 2.14 – Matrice des sensibilités des modes mesurés sur une éprouvette de pin maritime

Problème inverse

L'algorithme utilisé (procédure Matlab, *lsqnonlin*) minimise l'erreur Δ_{mt} entre les fréquences de résonance mesurées (m) et les fréquences de résonance théoriques calculées (t) ainsi que l'erreur X entre l'allure des déformées modales mesurées et celles calculées associées⁴, modulée par un coefficient de pondération p :

$$\Delta_{mt} = \frac{\sum_i |f_m^i - f_c^i t|}{f_m^i} + p \sum_{i,j} (1 - X_{ij}) \quad , \quad (2.14)$$

avec :

- i , l'indice du mode,
- j , la face mesurée $\in [RT, TL]$,
- le coefficient de pondération p arbitrairement calculé pour que l'erreur en fréquence ait 5 fois plus de poids que celle en déformée modale.

Le principal inconvénient du dispositif RUS employé est la durée de la mesure. Malgré les améliorations qui ont été menées pendant la thèse, la durée actuelle de la mesure et du traitement est encore de plus d'une demi-journée de travail par éprouvette. (Une heure par face est nécessaire pour l'acquisition des données et plus de deux heures pour l'identification inverse.) Cette contrainte nous a conduits à réaliser la mesure seulement sur un sous-échantillonnage de 20 individus représentatifs de la variabilité de notre échantillon (cf. Méthodes de sous-échantillonnage, section 2.6.4, page 61).

2.2.4 Essai de rupture en compression axiale

Afin d'obtenir une estimation de la limite d'élasticité, une mesure de la résistance à la rupture en compression longitudinale a été réalisée. La méthode employée est normalisée (norme NF B51-007 (1985)) et utilisée en routine par le CIRAD.

2.2.4.1 Mode opératoire

Les éprouvettes de dimensions $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ (R, T, L), qui ont préalablement été stabilisées dans une pièce régulée en température et humidité ($20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ et $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative) pendant 3 semaines, sont soumises à un essai quasi-statique de compression axiale au moyen d'une machine d'essai universelle (Adamel Lhomargy, modèle DY36) équipée d'une cellule de force de 100 kN et de plateaux rotulés. La procédure est décrite dans la norme NF B51-007 (1985).

- La masse de l'éprouvette est mesurée au moyen d'une balance (Sartorius, modèle SIWSBBP-1-06-H), de précision $\pm 0.001 \text{ g}$.

4. Le détail du calcul de l'erreur entre l'allure des déformées modales mesurées et celles calculées associées, est exposé dans l'article *Elastic characterization of a large density range of wood by Resonant Ultrasound Spectroscopy (RUS) : A comprehensive study* de Longo et al, actuellement en cours de rédaction, qui devrait paraître en 2017.

- Les dimensions de l'éprouvette sont mesurées, à l'aide d'un pied à coulisse (Mitutoyo, 500 series ABS CD-20C), de précision $\pm 0.02 \text{ mm}$.
- L'éprouvette est placée au centre du plateau inférieur de la machine d'essai. (figure 2.15)
- L'essai commence dès la mise en contact du plateau supérieur avec l'éprouvette. Un cycle de chargement jusqu'à 400 N puis déchargement à 200 N, est effectué trois fois, successivement afin de réaliser une étape « d'accommodation ». Pendant l'essai, la vitesse de déplacement de la machine reste constante, fixée à 0.010 mm/s, de manière à ce que la durée totale de l'essai (jusqu'à atteindre la charge maximale) soit comprise entre 120 et 180 secondes.
- L'essai se termine à la rupture de l'échantillon.

La charge maximale obtenue divisée par la section transversale de l'éprouvette permet d'obtenir la contrainte de rupture en compression axiale.

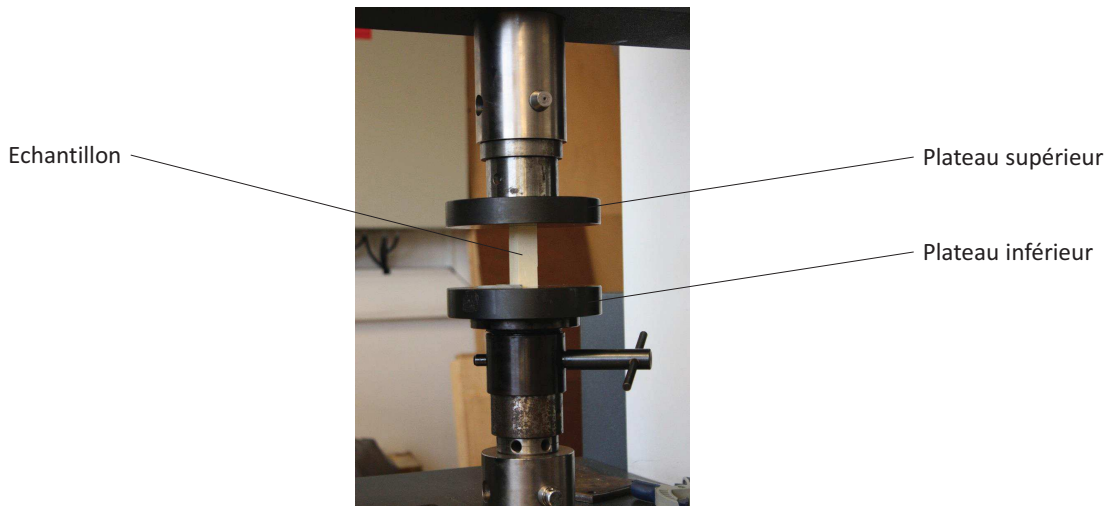


FIGURE 2.15 – Essai quasi-statique de compression axiale

2.2.4.2 Principe et analyse

Le programme d'acquisition de la machine d'essai permet d'obtenir une courbe de la force F appliquée en fonction du déplacement de la cellule de force Δ_L (figure 2.16). En divisant la force par la surface S de l'éprouvette et le déplacement Δ_L par la longueur de l'échantillon L , on peut tracer la courbe de contrainte-déformation.

La contrainte de rupture en compression σ_r correspond à la contrainte maximale atteinte (figure 2.17).

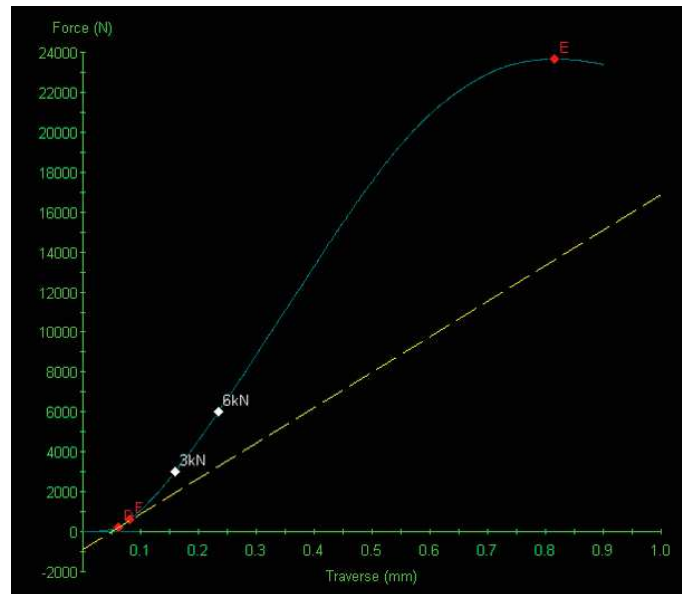


FIGURE 2.16 – Exemple de courbe de force en fonction du déplacement pour un échantillon de pin laricio ($\sigma_r = 59.3 \text{ MPa}$)

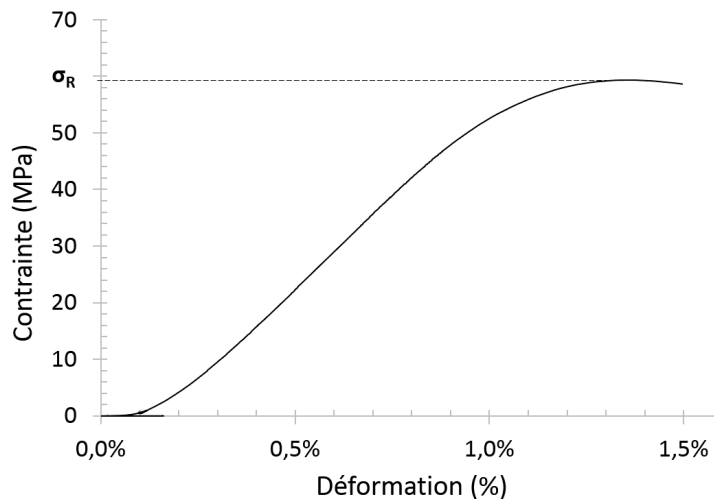


FIGURE 2.17 – Courbe contrainte-déformation pour un échantillon de pin laricio ($\sigma_r = 59.3 \text{ MPa}$)

Il faut rester critique vis à vis de la valeur de contrainte maximale ainsi obtenue. Malgré toutes les précautions prises dans la réalisation des éprouvettes, et le cycle d'accommodation du contact plateau/éprouvette réalisé, la surface en contact avec la presse n'est jamais parfaitement lisse et il subsiste des défauts de répartition de charge.

L'amélioration de la répartition des efforts sur la surface de l'éprouvette serait possible par la mise en place de dispositifs de chargement avec boîte à sable (Boulay et De Larrard, 1993; Boulay, 1996) ou avec un système de peigne (Kotsovos, 1983).

Toutefois l'essai réalisé ici, conformément à la norme NF B51-007 (1985), offre une valeur indicative pour chaque éprouvette permettant d'effectuer notre étude.

2.3 Mesures des propriétés hygroscopiques

Une série de mesures a été réalisée afin de caractériser le comportement hygroscopique des essences de pins étudiées et surtout dans le but d'examiner la possibilité de prédire ces propriétés importantes pour la conception d'éléments en bois.

2.3.1 Variations de masse et dimensions en fonction de l'humidité relative

Un dispositif de mesure a été mis en place afin de déterminer les variations de masse et dimensions de nos échantillons, en fonction de l'humidité relative de l'ambiance dans laquelle ils sont stabilisés. Les mesures réalisées à température constante, permettent également d'identifier un isotherme de sorption pour chaque échantillon. Le protocole expérimental détaillé ci-dessous est proche de celui qui est observé au CIRAD, car il a été élaboré avec les bons conseils de Daniel Guibal.

2.3.1.1 Mode opératoire

Les éprouvettes utilisées dans ce dispositif, sont des « pavés » de dimensions $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ (R, T, L). Avant de commencer les mesures, les arêtes des éprouvettes sont ébavurées, en les ponçant légèrement avec du papier de verre à faible grain, de manière à éviter que d'éventuels petits éclats de bois ne viennent fausser le relevé des dimensions durant l'expérience. Un repère circulaire est ensuite inscrit à l'encre, au centre d'une face du plan RL et au centre d'une face du plan TL (figure 2.18). Ces inscriptions, du même diamètre que celui de la touche plate du comparateur utilisé pour la mesure des dimensions, serviront de point repère pour positionner l'échantillon.

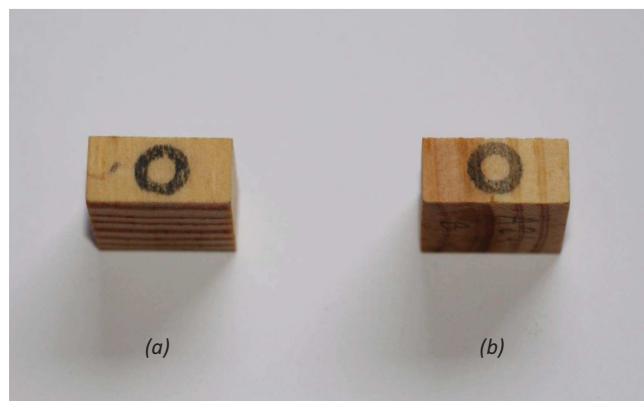


FIGURE 2.18 – Exemples de repères circulaires réalisés à l'encre sur une face du plan TL (a) et une face du plan RL (b), de chaque éprouvette

- Les éprouvettes de bois sont placées dans une enceinte climatique (Mettler, HPP110) réglée en température à $25^{\circ}\text{C} \pm 0.1^{\circ}\text{C}$ et en humidité relative de l'air à $65\% \pm 0.5\%$, jusqu'à ce que la masse soit considérée stable (environ une semaine pour des éprouvettes

de pin de telles dimensions). Pour cela, des éprouvettes témoins ont été pesées chaque 24 heures afin de vérifier un critère de stabilisation.

- Une éprouvette est sortie de l’enceinte climatique, afin d’être pesée au moyen d’une balance (Mettler, ME204) de précision $\pm 0.001\text{ g}$ (figure 2.20). Chaque éprouvette est sortie individuellement par les passe-bras afin de maintenir les conditions climatiques à l’intérieur de l’enceinte pendant toute la durée de la mesure. Simultanément à l’acquisition de la masse, une photographie est réalisée par la caméra (Marque μeye , UI-5480, 5 mégapixels).⁵
- Les dimensions dans les directions R et T de l’éprouvette sont mesurées à l’aide d’un comparateur (Mitutoyo, Absolute Digital Metric Indicator 543-460B ID-C150B), de précision $\pm 0.02\text{ mm}$ équipé d’une touche plate de diamètre 5 mm (figure 2.21).
- L’éprouvette est replacée dans l’enceinte climatique.

Les étapes précédemment énoncées sont répétées pour chaque palier d’humidité relative. Tout en maintenant une température de 25° C , nous avons réalisé un cycle de désorption-sorption avec les paliers suivants : 65 %, 50 %, 35 %, 20 %, 35 %, 50 %, 65 %, 80 %, 65 % et 50 % d’humidité relative.

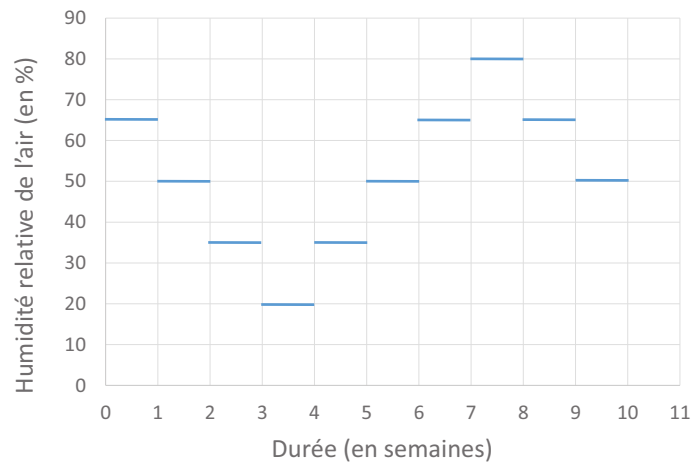


FIGURE 2.19 – Paliers d’humidité relative réalisés pour une température constante de 25° C

5. Les photographies des échantillons ont été réalisées dans le but de développer une méthode de mesures des dimensions par analyse d’image. Les principaux objectifs visés sont de permettre la mesure des retraits sur des éprouvettes mal orientées, ainsi que la correction de la courbure des cernes qui influe particulièrement sur la mesure des retraits tangentiels. Au jour de la publication de ce manuscrit, la méthode est en cours de développement. Elle n’a donc pas été utilisée dans le cadre de ce travail.

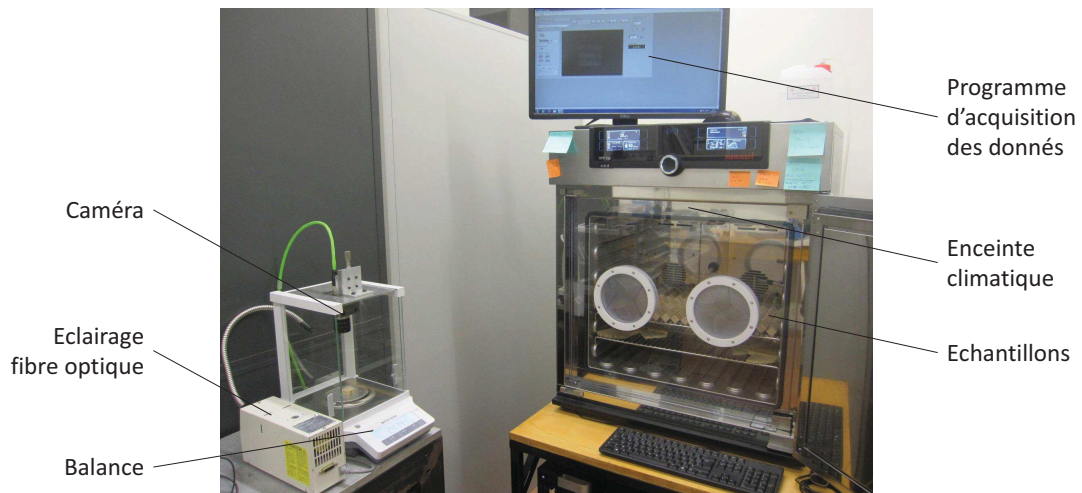


FIGURE 2.20 – Dispositif de mesure des variations dimensionnelles et de la masse en fonction de l'humidité relative

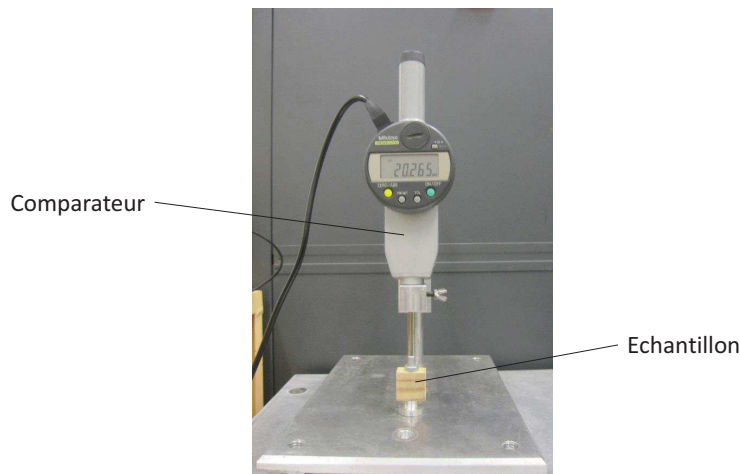


FIGURE 2.21 – Comparateur utilisé pour la mesure des dimensions dans les directions R et T

2.3.1.2 Principe et analyse

La mesure de la masse après stabilisation dans une ambiance donnée (température de 25° C et HR % donnée) permet, par différence avec la masse anhydre M_0 (mesure précisée dans la section 2.3.3), de connaître la masse d'eau qui était présente dans l'éprouvette et de calculer la teneur en eau w de l'éprouvette par la relation suivante :

$$w = \frac{M_w - M_0}{M_0} \quad , \quad (2.15)$$

avec :

— w la teneur en eau (en %),

- M_w la masse à la teneur en eau w ,
- M_0 la masse à l'état anhydre.

La représentation des teneurs en eau ainsi calculées, en fonction de l'humidité relative de l'air à température constante permet de tracer un isotherme de sorption.

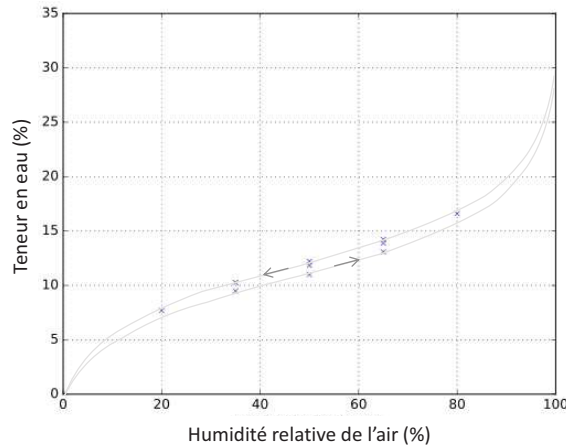


FIGURE 2.22 – Exemple d'un isotherme de sorption à 25°C

On note la présence d'une hystérèse entre les courbes d'absorption et de désorption.

2.3.2 État saturé

Pour atteindre l'état saturé, les éprouvettes sont trempées dans l'eau distillée pendant 48 heures, au cours desquelles elles subissent deux cycles de « dépression-pression » permettant de parfaire la saturation. Les éprouvettes ainsi conditionnées sont pesées et leur volume est mesuré par le principe de la poussée d'Archimède.

Le mode opératoire employé est le suivant :

- La balance électronique (Sartorius, modèle LC 620 S) de précision $\pm 0.001 g$, est équipée d'un dispositif de détermination de masses volumiques (Sartorius, YDK01) comme cela est visible sur la figure 2.23, et est ensuite tarée.
- L'éprouvette saturée est sortie de l'eau distillée dans laquelle elle était stockée, « essuyée » avec un chiffon humide de manière à enlever l'excédent d'eau puis déposée sur le plateau supérieur (figure 2.23a) afin d'obtenir sa masse M_{sat} . Une tare de la balance est à nouveau réalisée avec l'échantillon.
- L'éprouvette est déposée sur le plateau inférieur situé dans le bécber d'eau distillée (figure 2.23b). De cette manière, la masse M_{ve} du volume d'eau équivalent au volume de l'échantillon de bois est mesurée, par le principe d'Archimède. (La balance affiche en réalité $-M_{ve}$)

En admettant que la masse volumique de l'eau est $1 g/cm^3$, la valeur du volume saturé V_{sat} (en cm^3) est égale à la valeur de la masse du volume d'eau M_{ve} (en g).

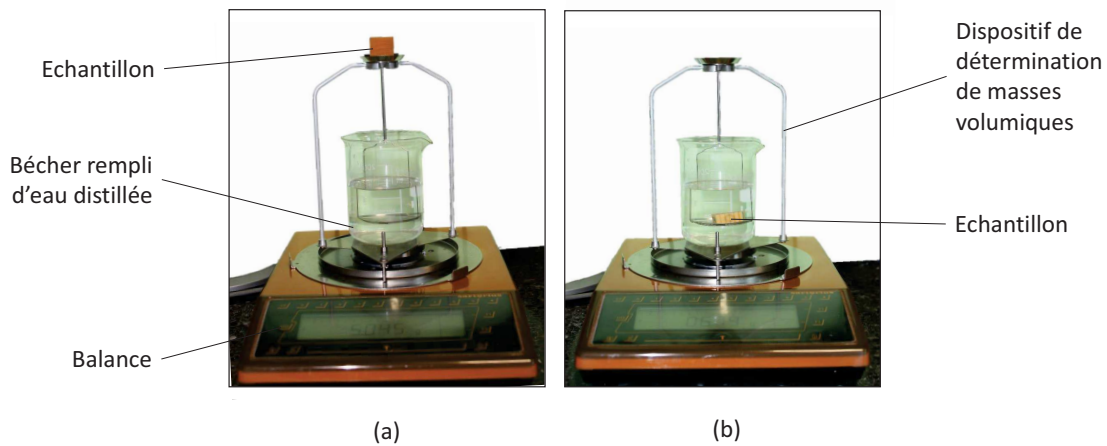


FIGURE 2.23 – Dispositif de mesure de la masse (a) et du volume saturé (b)

- Les dimensions suivant les directions R et T de l'éprouvette à l'état saturé, sont également mesurées avec le comparateur utilisé pour la mesure des dimensions de l'échantillon aux différentes ambiances (cf. section 2.3.1, page 45).

À l'état saturé, la mesure de la masse ne nous intéresse pas particulièrement. En revanche les mesures de dimensions sont indispensables pour les calculs des retraits totaux, de l'infra-densité et du point de saturation des fibres (PSF) que nous verrons ci-après.

2.3.3 État anhydre

L'étape de mesure de masse et dimensions à l'état anhydre est réalisée en dernier car le processus de séchage n'est pas neutre pour le bois et peut causer des dommages (fente ou collapse). Pour atteindre un état anhydre, les éprouvettes ont séjourné dans une étuve sèche à 103°C pendant 48 heures.

Le protocole expérimental de la mesure de la masse et des dimensions est identique à celui utilisé pour les mesures aux différentes ambiances (cf. section 2.3.1, page 45). Il faut seulement prendre la précaution de faire refroidir l'éprouvette dans un dessiccateur avant de la mesurer, au risque sinon, de fausser la mesure à cause de la dilatation thermique des équipements.

À partir de la mesure de la masse anhydre M_0 , la teneur en eau de l'éprouvette aux différentes ambiances, est calculée par la relation 2.15.

La définition de l'état anhydre après séchage à 103°C, jusqu'à masse constante, est conventionnelle mais peut être discutée. Ce traitement, que l'on pourrait qualifier d'« agressif » pour les éprouvettes de bois, peut causer la perte d'éléments secondaires, tels que la résine, dans le cas des pins. Ce phénomène a pour conséquence de diminuer quelque peu la valeur de la masse anhydre mesurée.

Par ailleurs, de légers dommages structurels, tels que l'apparition de petites fissures de séchage, entraînent quant à eux, la surestimation des dimensions de l'éprouvette à l'état anhydre. Cette

erreur de mesure est préjudiciable pour le calcul du PSF (qui est alors sur-estimé) et des retraits totaux (sous-estimés).

Nous avons rencontré ce cas de figure sur un bon nombre de nos éprouvettes. Ce désagrément nous a conduit à prendre la décision de ne pas utiliser les dimensions mesurées à l'état anhydre pour le calcul du PSF et des retraits. Nous avons toutefois calculé les dimensions de l'éprouvette à l'état anhydre, par régression linéaire des dimensions mesurées aux différentes conditions d'humidité (figure 2.24), ce qui permet de quantifier l'augmentation de surface causée par les micro-fentes de séchage.

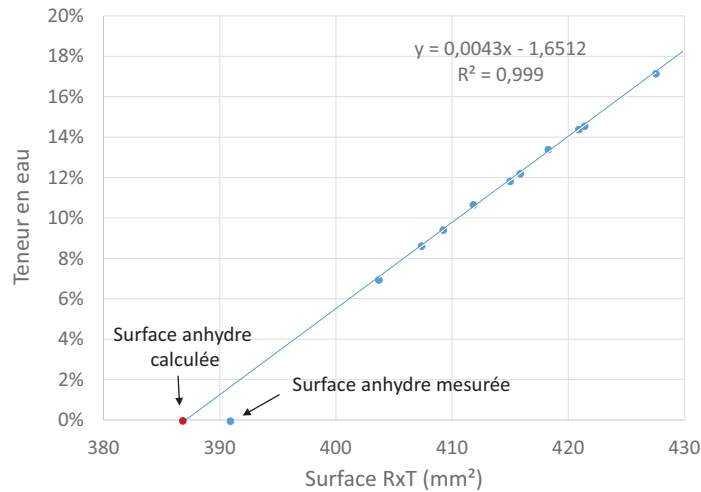


FIGURE 2.24 – Exemple de régression linéaire pour estimer les dimensions de l'éprouvette à l'état anhydre

2.3.4 Calculs des retraits, PSF et infra-densité

À partir des mesures de dimensions précédemment décrites, les retraits, le point de saturation des fibres et l'infra-densité peuvent être calculés.

2.3.4.1 Retraits totaux

Les retraits totaux, radial (R_R) et tangentiel (R_T) sont calculés comme suit :

$$R_R = \frac{d_{Rs} - d_{Ra}}{d_{Rs}} \quad , \quad (2.16)$$

avec :

- R_R le retrait radial de l'éprouvette (en %),
- d_{Rs} la dimension radiale de l'éprouvette à l'état saturé,
- d_{Ra} la dimension radiale de l'éprouvette à l'état anhydre.

$$R_T = \frac{d_{Ts} - d_{Ta}}{d_{Ts}} \quad , \quad (2.17)$$

avec :

- R_T le retrait tangentiel de l'éprouvette (en %),

- d_{Ts} la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état saturé,
- d_{Ta} la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état anhydre.

Le retrait longitudinal n'a pas été mesuré dans cette étude. Il peut-être estimé à 0.2% pour du bois normal, ce qui est très faible devant les retraits radial et tangentiel.

Le retrait total surfacique (R_S) peut être calculé selon la formule suivante :

$$R_S = \frac{d_{Rs} \times d_{Ts} - d_{Ra} \times d_{Ta}}{d_{Rs} \times d_{Ts}} , \quad (2.18)$$

avec :

- d_{Rs} la dimension radiale de l'éprouvette à l'état saturé,
- d_{Ts} la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état saturé,
- d_{Ra} la dimension radiale de l'éprouvette à l'état anhydre,
- d_{Ta} la dimension tangentielle de l'éprouvette à l'état anhydre.

2.3.4.2 Coefficients de retraits

L'évolution des dimensions du bois en fonction de sa teneur en eau étant considérée linéaire, entre le point de saturation des fibres et l'état anhydre, on peut calculer des coefficients de retrait α_R , α_T et α_S . Ces coefficients correspondent à la pente de la régression linéaire des déformations mesurées en fonction des teneurs en eau correspondantes.

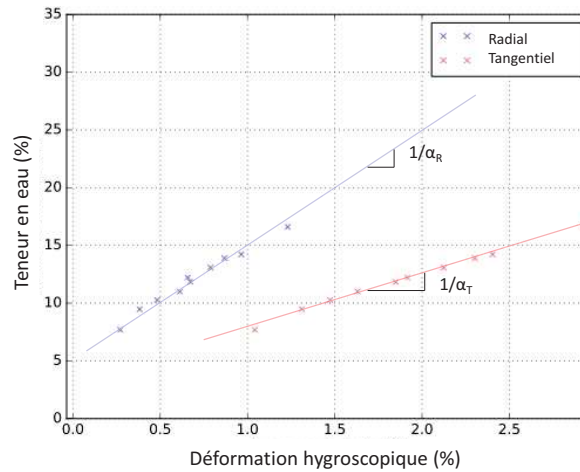


FIGURE 2.25 – Exemple de régression linéaire de la teneur en eau d'une éprouvette en fonction de sa déformation suivant les directions radiale et tangentielle

Le coefficient de retrait longitudinal étant très faible, le coefficient de retrait volumique est quasiment identique au retrait surfacique (α_S).

2.3.4.3 PSF

Le point de saturation des fibres est déterminé en utilisant la fonction linéaire reliant les différences entre la surface de l'éprouvette à l'état saturé et les surfaces de l'éprouvette aux

humidités correspondantes (Chong, 1969). Le PSF correspond à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression (figure 2.26).

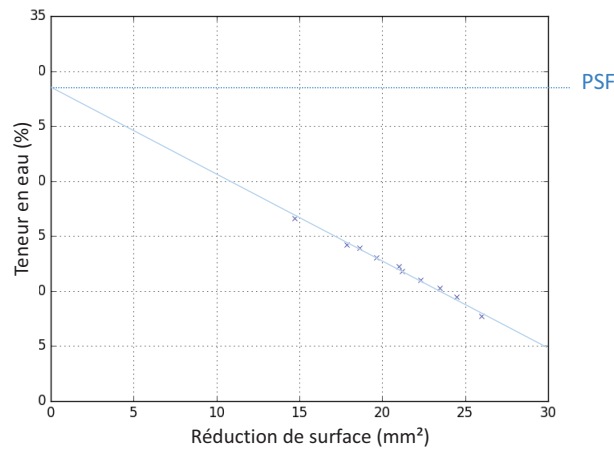


FIGURE 2.26 – Exemple de régression linéaire de la teneur en eau d'une éprouvette en fonction de sa réduction de surface pour la détermination du PSF

Cette définition du PSF peut être discutée car elle suppose que la relation entre teneur en eau et dimension reste linéaire.

2.3.4.4 Infra-densité

L'infra-densité aussi appelée la densité basale (en kg/m^3), est définie par le rapport entre la masse anhydre de l'éprouvette (obtenue après séchage à $103^\circ C$) et son volume saturé, mesuré selon le principe d'Archimède.

$$ID = \frac{M_a}{V_s} \quad , \quad (2.19)$$

avec :

- M_a masse anhydre de l'éprouvette (kg),
- V_s volume saturé de l'éprouvette (m^3).

L'infra-densité est une grandeur utilisée par les forestiers, car multipliée par un volume de bois vert elle permet de connaître la masse sèche.

2.4 Mesure de spectrométrie proche infrarouge (NIRS)

La composition chimique du bois influe sur son comportement physico-chimique, et en particulier sur son comportement hygroscopique. C'est pourquoi nous avons réalisé une mesure de spectrométrie proche infrarouge (SPIR ou NIRS en anglais), afin de pouvoir ajouter un indicateur de la chimie dans nos modèles prédictifs.

Couramment utilisée dans l'industrie agroalimentaire, la spectrométrie proche infrarouge est à ce jour connue dans le domaine du bois pour ses qualités prédictives. Elle est employée pour déterminer la composition chimique du bois, notamment la teneur en lignine, qui intéresse l'industrie papetière (Yeh *et al.*, 2004). Au delà de la composition chimique, elle est également de plus en plus utilisée dans le but de prédire directement des propriétés physiques ou mécaniques (Hoffmeyer et Pedersen, 1995; Schimleck *et al.*, 2003; Kelley *et al.*, 2004; Chiu *et al.*, 2013), et même la provenance des bois (Sandak *et al.*, 2011).

La spectrométrie proche infrarouge est une méthode non destructive, de mesure de l'absorption de la lumière proche infrarouge par un échantillon.

2.4.1 Mode opératoire

La mesure de NIRS est très sensible à la teneur en eau des éprouvettes, c'est pourquoi ces dernières sont préalablement stabilisées dans une pièce régulée en température et humidité ($20^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ et $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative) pendant 3 semaines.

- Avant de commencer les mesures, le spectromètre proche infrarouge à transformée de Fourier (Brucker, modèle Vector 22/N1, longueurs d'onde 800 – 2850 nm) est calibré à l'aide d'une référence en or fritté.
- La masse de l'éprouvette est mesurée au moyen d'une balance (Sartorius, modèle SIWSBBP-1-06-H), de précision $\pm 0.001\text{ g}$. (Cette étape n'est pas obligatoire mais elle permet de retrouver quelle était la teneur en eau exacte de l'éprouvette pendant l'expérience, si nécessaire.)
- L'éprouvette est posée sur la cellule de mesure du spectromètre, sur le plan RT comme illustré sur la figure 2.27.
- Le spectre des absorbances de chaque longueur d'onde est enregistré par le logiciel d'acquisition *OPUS 5.5* (figure 2.28)



FIGURE 2.27 – Dispositif de mesure de spectrométrie proche infrarouge

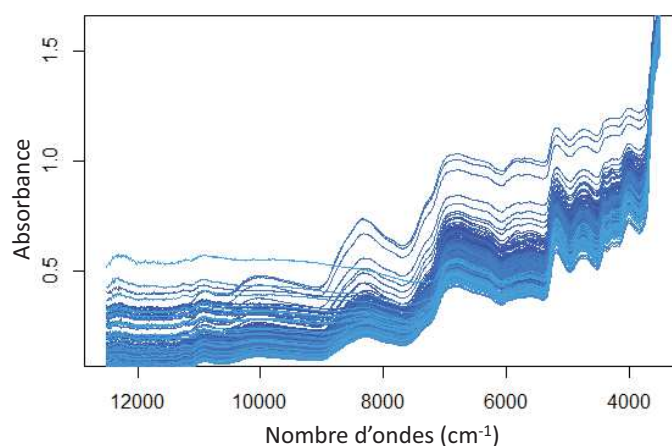


FIGURE 2.28 – Spectres des absorbances en fonction du nombre d'ondes pour l'ensemble des échantillons mesurés

2.4.2 Principe et analyse

La NIRS est une mesure de l'intensité d'absorption de la lumière proche infrarouge par l'échantillon, en fonction de la longueur d'onde. Il y a absorption de l'énergie lumineuse quand la fréquence de la radiation qui vient frapper une liaison chimique est égale à la fréquence de vibration de cette liaison. On peut donc relier une longueur d'onde à une liaison donnée. Par exemple la longueur d'onde 1900 nm correspond à la liaison H-OH de la molécule d'eau. La quantité d'énergie lumineuse absorbée suit la loi de Beer-Lambert : l'absorbance est proportionnelle à la concentration du constituant.

Dans notre cas, nous ne cherchons pas à quantifier la présence d'un constituant en particulier, nous utilisons le spectre obtenu, comme signature chimique de l'échantillon pour construire nos modèles prédictifs. Nous traitons les données obtenues par des outils statistiques multivariés, couramment utilisés en chimiométrie⁶ (Naes *et al.*, 2004).

La démarche employée consiste à bâtir un modèle mathématique associant les spectres infrarouges aux variables issues de mesures physiques (tels les coefficients de retrait), que l'on souhaite prédire par la suite.

L'étape préliminaire, avant de pouvoir utiliser des méthodes statistiques, est de discrétiser les spectres (qui sont des signaux continus), par un processus de numérisation donnant une valeur spectrale pour chaque longueur d'onde. Cette étape se résume à écrire chaque spectre comme un vecteur dans « l'espace des longueurs d'onde ». Ce qui permet de représenter l'ensemble des spectres de NIRS dans une matrice des absorbances (figure 2.29). Par ailleurs les variables physiques que l'on souhaite associer sont également écrites sous la forme d'un vecteur, nommé vecteur de référence. (Les variables x_{ij} sont appelées « variables explicatives » et les variables y_i « variables dépendantes ».)

6. La chimiométrie est définie comme la science de l'application et du développement de méthodes mathématiques et statistiques de traitement des données pour la caractérisation, la modélisation et la compréhension de systèmes réactionnels ou d'échantillons physico-chimiques complexes (d'après le Laboratoire de Spectrochimie Infrarouge et Raman).

$$\begin{array}{ccc}
 & p \text{ variables (= longueurs d'ondes)} & 1 \text{ variable (= mesure de référence)} \\
 X_{ij} = & \begin{array}{c} \left(\begin{array}{ccc} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & & \vdots \\ \vdots & \text{matrice} & \vdots \\ \vdots & \text{des} & \vdots \\ \vdots & \text{absorbances} & \vdots \\ \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{array} \right) & Y_i = \begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} y_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ y_n \end{array} \right) \\ \text{n échantillons} \end{array}
 \end{array}
 \end{array}$$

FIGURE 2.29 – Représentation d’une matrice des absorbances et d’un vecteur de référence

Afin de réduire le bruit de mesure, les données spectrales doivent être prétraitées par lissage et dérivation.

2.4.2.1 Prétraitement des données spectrales

On peut observer sur la figure 2.28 la présence d’une déviation de l’intensité sur les spectres. Ce signal parasite est appelé ligne de base. Il peut être la conséquence de la diffusion d’un rayonnement infrarouge causé par les hétérogénéités ou les impuretés de l’échantillon ou tout simplement de la lumière extérieure (Mazet, 2005). La dérivation permet de corriger la ligne de base (Bertrand et Dufour, 2000). Pour résumer, la dérivée première permet de la rendre constante et la dérivée seconde de la supprimer. L’inconvénient de la dérivée seconde est qu’elle amplifie le bruit. Toutefois un lissage des données effectué à posteriori permet de le réduire. La méthode souvent évoquée pour lisser et dériver les spectres est l’algorithme de Savitzky-Golay (Savitzky et Golay, 1964). Cette méthode consiste à considérer un intervalle de n points sur lequel on effectue une régression pour déterminer le polynôme de degré i minimisant l’erreur au sens des moindres carrés. L’algorithme fait glisser l’intervalle de 1 point et recommence la procédure (de la même manière que pour la méthode des moyennes glissantes). La difficulté de la méthode est de choisir le degré du polynôme utilisé pour effectuer la régression sur chaque intervalle, ainsi que la taille de l’intervalle, de manière à ce qu’il représente bien l’information souhaitée mais pas le bruit de la mesure. La bibliographie est malheureusement assez confuse sur ce sujet.

Dans cette étude, nous avons fait le choix d’utiliser une approche plus simple mais robuste, en dérivant par la méthode du gradient (Rade, 2013) et en lissant par la méthode des moyennes glissantes.

2.4.2.2 Méthode PLS

La méthode prédictive employée pour traiter les données est la régression des moindres carrés partiels, couramment nommée par son abréviation anglaise, régression PLS (Partial Least

Squares). C'est la méthode la plus couramment utilisée dans les analyses spectrométriques (Bertrand, 2005).

De la même manière que pour une régression en composantes principales, la méthode consiste à remplacer la matrice des données prédictives X comprenant n lignes et p colonnes, par une nouvelle matrice, issue de X , que nous désignerons par T , comprenant le même nombre de lignes (observations) que X , mais un nombre de colonnes k très inférieur à p . L'objectif étant de réduire la colinéarité des mesures. La spécificité de la régression PLS réside dans le fait que les colonnes de la matrice T sont construites par combinaisons linéaires des variables d'origine p , de manière à maximiser la variance de la variable à prédire y . Pour résumer, la méthode vise à effectuer une double modélisation de manière que X et y soient conjointement prédits à partir de T .

La procédure PLS est itérative, et à chaque étape de l'itération, l'algorithme produit une nouvelle composante, appelée « variable latente » (t_k). Le choix du nombre final de composantes correspond à la recherche de minimisation de l'erreur de prédiction. Pour ce faire, on emploie une méthode de validation croisée. La méthode utilisée a consisté à diviser les données en 10 lots aléatoires et utiliser 9 lots pour construire le modèle et le 10^{ème} pour le valider. La procédure est reproduite dix fois en permutant les lots, de manière à ce que chaque lot serve à la vérification du modèle créé par les 9 autres. On examine graphiquement l'évolution de l'erreur résiduelle des lots de validations avec l'indicateur RMSECV (Root Mean Square Error of Cross Validation = la racine de la moyenne des carrés de l'erreur de validation croisée), en fonction du nombre de variables latentes retenues dans le modèle prédictif (figure 2.30), et on retient le nombre de composantes correspondant à l'erreur la plus faible.

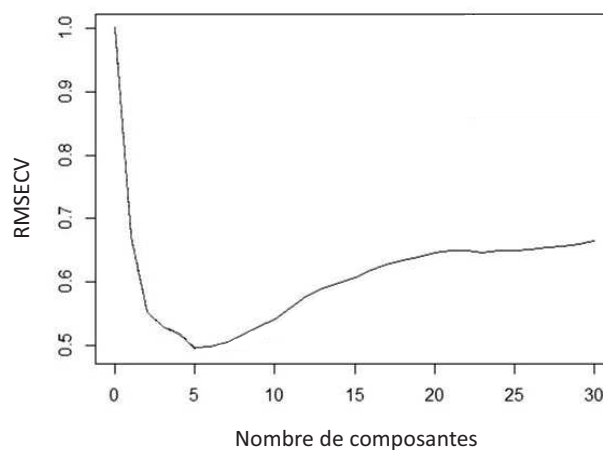


FIGURE 2.30 – Évolution de l'erreur RMSECV en fonction du nombre de variables latentes retenues dans le modèle PLS, pour la prédiction de la variable "coefficient de retrait radial"

Lorsque le modèle est construit, on peut juger de sa qualité en commençant par observer graphiquement la régression des variables mesurés en fonction de leur valeur prédite par le modèle (figure 2.31). Les points doivent être bien répartis autour de la droite $y = x$.

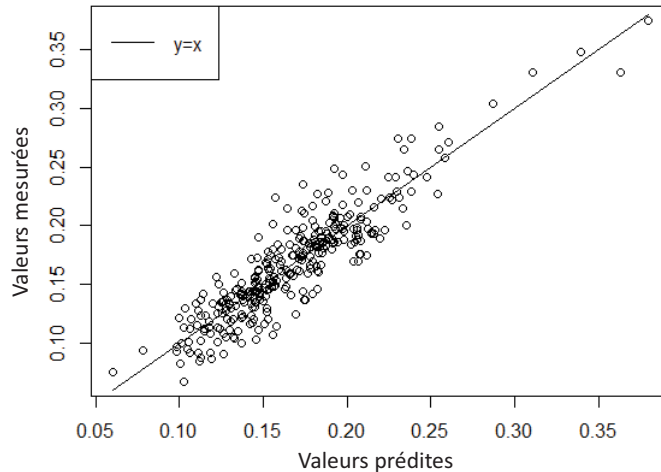


FIGURE 2.31 – Représentation graphique de la régression des coefficients de retrait radial mesurés (en % par% de w) en fonction de leur valeur prédite par le modèle

On vérifie la valeur du coefficient de détermination R^2 ainsi que sa significativité au moyen d'un test de Fisher (p-value < 0.05).

On observe ensuite les résidus du modèle (figure 2.32). Les résidus correspondent aux écarts observés entre les valeurs théoriques calculées d'après le modèle et les valeurs mesurées. Ceux-ci doivent être normalement distribués et ne doivent pas montrer un comportement linéaire.

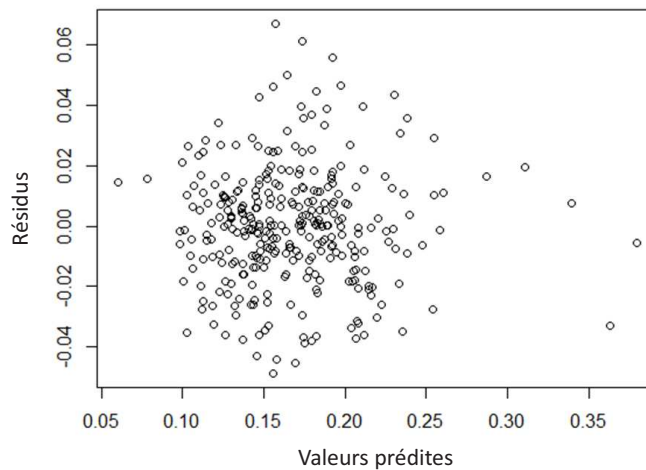


FIGURE 2.32 – Distribution des résidus pour la prédiction de la variable "coefficient de retrait radial"

L'écart-type des résidus (RSE) représente l'écart-type de l'erreur de calibration, c'est à dire l'erreur du modèle. En prenant $\pm 2 \times RSE$, on a un ordre de grandeur de la qualité de l'intervalle de prédiction d'une valeur individuelle à 95 %.

Le prétraitement des données spectrales ainsi que la réalisation des modèles de prédiction selon la méthode PLS et leur vérification ont été réalisés avec le logiciel de traitement des données et d'analyse statistiques *R*, par l'utilisation d'un script développé par Loïc Brancheriau du CIRAD, utilisant le package *PLS* (Bjorn-Helge et Wehrens, 2007).

2.5 Indicateurs proposés pour construire les modèles prédictifs

Dans la perspective de construire des modèles prédictifs du comportement physico-mécanique du bois transposables dans le milieu industriel, nous avons mesuré quatre indicateurs des mécanismes de formation du bois dans l'arbre (cf. section 1.2.1, page 14), à savoir : la densité, le module spécifique, la largeur de cernes et un indicateur de la chimie. Ces indicateurs ont été choisis parce qu'ils sont considérés comme facilement mesurables dans un contexte industriel.

2.5.1 Densité

La densité a été mesurée à plusieurs reprises, sur nos éprouvettes de géométries différentes. Elle est déterminée par le rapport entre la masse et le volume de l'éprouvette et exprimée en gramme par centimètre cube (g/cm^3) ou par kilogramme par mètre cube (kg/m^3) pour une humidité donnée.

On peut vérifier que les différentes mesures réalisées sont bien corrélées (figure 2.33).

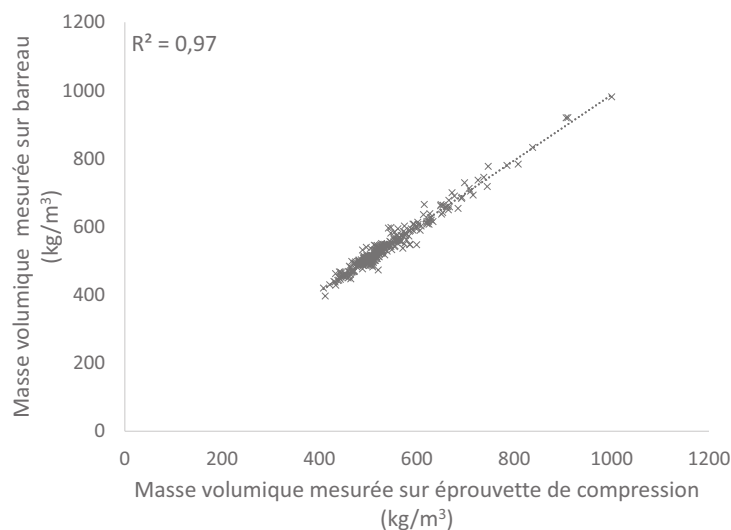


FIGURE 2.33 – Masse volumique (kg/m^3) des éprouvettes barreaux en fonction de la masse volumique (kg/m^3) des éprouvettes de compression correspondantes

Dans la suite de cette étude nous utiliserons la valeur de la densité mesurée sur les éprouvettes barreaux, stabilisées dans une pièce régulée à $20^{\circ}C \pm 2^{\circ}C$ et $65\% \pm 5\%$ d'humidité relative (teneur en eau proche de 12 %).

La densité (ou masse volumique ρ) caractérise la quantité de matière dans la pièce de bois, c'est un bon indicateur de l'épaisseur de la paroi cellulaire.

2.5.2 Module spécifique longitudinal

Le module spécifique désigne le rapport du module élastique et de la masse volumique. Il est obtenu directement par la mesure vibratoire Bing© puisqu'il est égal au carré de la vitesse de propagation du son dans l'éprouvette.

Le module spécifique est un indicateur de l'angle des microfibrilles.

2.5.3 Largeur de cernes

La largeur moyenne des cernes de chaque spécimen a été mesurée sur les éprouvettes utilisées pour les mesures hygroscopiques ($20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, R, T, L). Elle a été calculée en divisant la longueur de l'éprouvette, stabilisée à 25°C et 50 % (teneur en eau d'environ 12 %), dans la direction R mesurée à l'aide du comparateur, par le nombre de cernes visibles, comptés manuellement.

La largeur de cerne est un indicateur de la division cellulaire et de l'expansion radiale des cellules.

2.5.4 Indicateur de la chimie

Comme nous l'avons vu précédemment, la composition chimique du bois influe, entre autres, sur son comportement physico-mécanique. Nous avons choisi de réaliser des mesures de spectrométrie proche infrarouge dans le but d'améliorer nos modèles prédictifs. Pour ce faire, nous avons utilisé les valeurs prédites par les modèles NIRS, comme des variables prédictives de nos modèles.

2.6 Méthodes statistiques

2.6.1 Statistiques descriptives

Les données obtenues à la suite des essais physiques et mécaniques décrits précédemment, ont été traitées au moyen d'outils statistiques « classiques ».

Une première analyse descriptive mono-variable est réalisée en utilisant des grandeurs de positions (minimum, maximum, moyenne, médiane, premier et troisième quartile), ainsi que des grandeurs de dispersions telles que l'écart type (s) et le coefficient de variation (CV), dont les définitions sont rappelées ci-dessous :

$$s = \sqrt{\frac{\sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad , \quad (2.20)$$

avec :

n , la taille de l'échantillon,

\bar{x} , la moyenne de l'échantillon,

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100 \quad , \quad (2.21)$$

avec :

s , l'écart type de l'échantillon,

\bar{x} , la moyenne de l'échantillon.

Ces informations sont résumées, pour chaque espèce étudiée, sous forme de tableaux et de représentations graphiques, nommées diagrammes en « boîte à moustaches » (également couramment appelées par la dénomination anglaise « Box plot »).

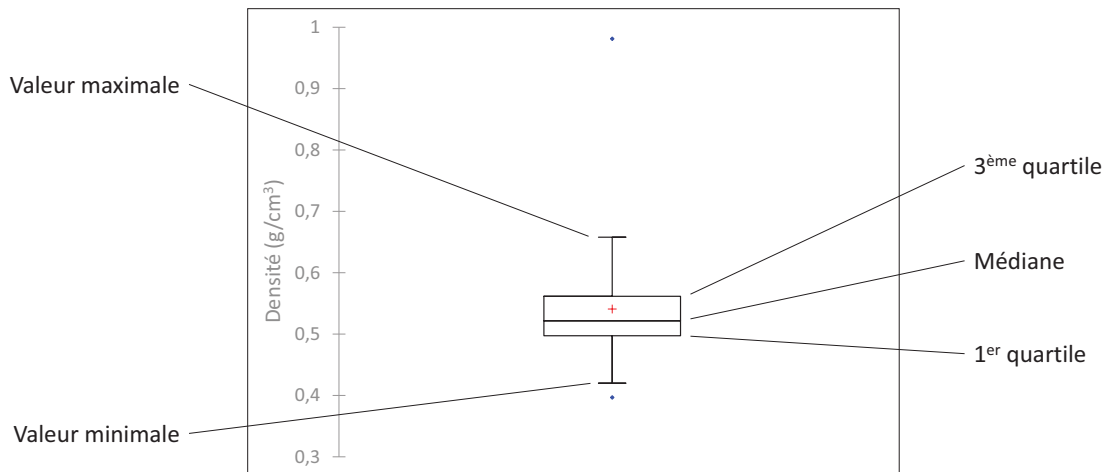


FIGURE 2.34 – Exemple de diagramme « boîte à moustaches » réalisé avec le logiciel XLSTAT, résumant les principales grandeurs de position de la variable étudiée (ici la densité de l'ensemble de notre échantillonnage, mesurée sur les éprouvettes barreaux)

Le logiciel XLSTAT représente la moyenne par un point (petite croix rouge sur la figure 2.34). Des points peuvent être exclus de la boîte à moustache (points bleus sur la figure 2.34), car ils sont considérés comme « suspect » par le logiciel. Un point est considéré comme « suspect » s'il est éloigné de la boîte de plus de 1,5 fois la distance entre le 1^{er} et le 3^{ème} quartile. Dans notre exemple, ces points que l'on qualifierait davantage de points « hors-norme » que de points « suspects », représentent un spécimen particulièrement dense, et un spécimen de densité plutôt faible par rapport à notre échantillon.

2.6.2 Élaboration des modèles prédictifs

La construction des modèles prédictifs a été réalisée par des régressions linéaires multiples. L'objectif visé est de choisir parmi les variables explicatives (x), la combinaison qui explique le mieux la variabilité de la propriété à prédire (y). Pour ce faire, il a été utilisé la méthode de régression pas à pas (stepwise). Cette méthode itérative commence par inclure dans le modèle, la variable x qui présente le meilleur coefficient de détermination R^2 avec la variable y à prédire. Puis à chaque itération, est ajoutée la variable qui contribue le plus à améliorer le coefficient de détermination de la régression. À l'inverse une variable peut être retirée du modèle si sa contribution est évaluée trop faible. Le choix de l'ajout ou du retrait d'une variable

x dépend de l'impact de cette action sur la réduction de la variabilité résiduelle (c'est à dire l'erreur de prédiction), dont la significativité est déterminée par un test de Fisher (p-value < 0.05). Ainsi la régression pas à pas permet de construire le modèle qui explique le mieux la variabilité de y , en utilisant le plus petit nombre de variables explicatives x .

2.6.3 Logiciels utilisés

Les logiciels utilisés pour la réalisation des statistiques descriptives de cette étude et l'élaboration des modèles prédictifs sont le logiciel libre de traitement des données et d'analyse statistiques *R* et le logiciel *XLSAT* de *Microsoft*.

2.6.4 Méthodes de sous-échantillonnage

Certaines mesures, dont la durée de réalisation est importante, ont nécessité la création de sous-échantillons. Pour ce faire, deux procédures d'échantillonnage ont été employées dans cette étude. L'objectif de ces procédures est de sélectionner, à partir de l'échantillon global sur lequel ont été préalablement mesurées des variables, un sous-échantillon qui soit au mieux représentatif de l'échantillon initial.

La première méthode, dite « méthode graphique », consiste à choisir deux variables pour lesquelles on souhaite maximiser la variabilité dans le sous-échantillonnage et à les représenter une en fonction de l'autre, en nuages de points. La droite de régression est tracée. L'opérateur peut alors choisir visuellement, des points qui sont le mieux répartis pour représenter la variabilité de l'échantillon global.

Cette méthode a été utilisée pour réaliser le sous-échantillonnage des éprouvettes pour la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS). Pour chaque espèce a été tracé un nuage de points représentant le module élastique en fonction de la densité, dans lequel ont été choisi cinq individus.

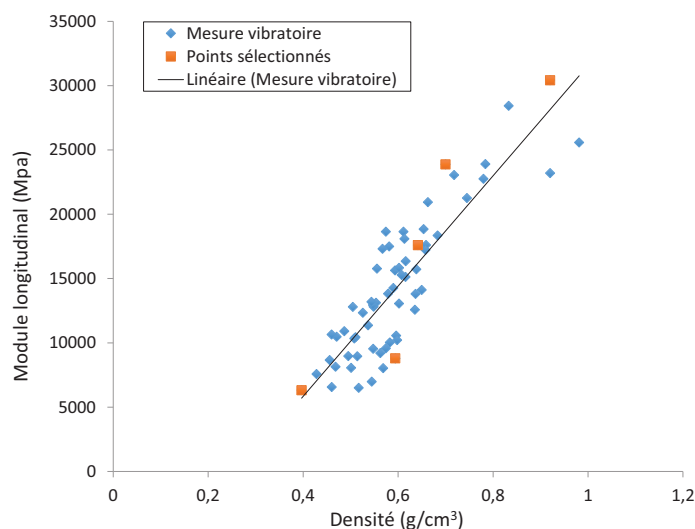


FIGURE 2.35 – Exemple de réalisation d'un sous-échantillon de pin laricio

La méthode a l'avantage d'être simple et rapide. Elle permet à l'opérateur de changer facilement un des individus retenus si ce dernier présente un défaut quelconque (comme une forte courbure de cerne) pouvant altérer la mesure à réaliser. Outre le fait qu'elle repose sur les compétences d'observation de l'opérateur, son principal inconvénient est qu'elle est limitée à deux variables.

La seconde méthode utilisée, plus élaborée, consiste à mettre au point un algorithme de calcul permettant d'utiliser plusieurs variables pour créer le sous-échantillon. Le critère adopté est une distribution la plus uniforme possible, de façon à obtenir un sous-échantillon représentatif de l'ensemble de l'étendue des variables choisies. Dans notre étude, les variables retenues sont la masse volumique, le module élastique longitudinal et le module spécifique. La distance entre deux individus est définie comme la distance euclidienne dans l'espace de ces variables centrées réduites. La procédure consiste à exclure pas à pas les individus dont la distance à l'individu le plus proche est la plus petite. L'algorithme utilisé a été développé spécifiquement pour cet usage, par Tancrede Alméras, du LMGC.

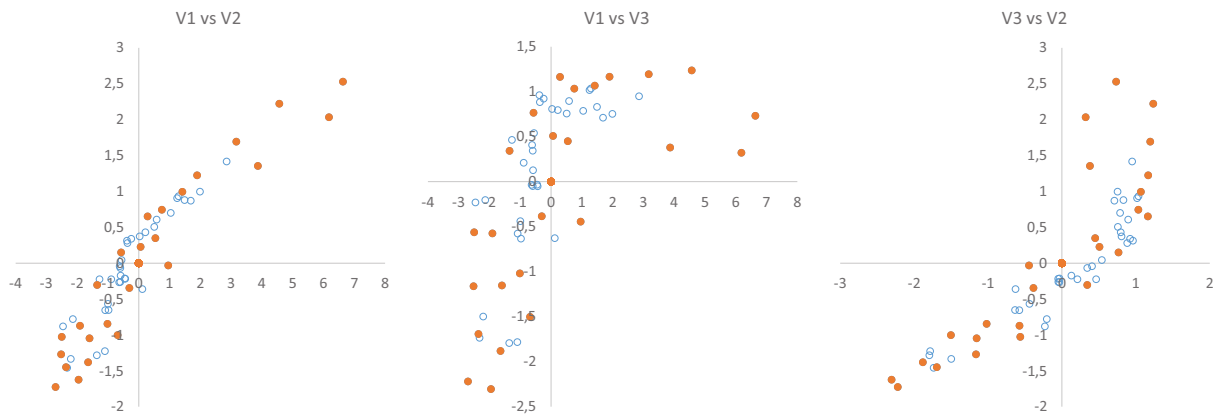


FIGURE 2.36 – Exemple de réalisation d'un sous-échantillon de *pin laricio* avec un algorithme, en fonction de 3 variables centrées réduites : $V1$ = masse volumique, $V2$ = module élastique longitudinal et $V3$ = module spécifique

Ainsi pour chaque essence, 25 spécimens ont été choisis de manière à représenter au mieux la variabilité de l'échantillonnage, en fonction des trois critères : masse volumique, module élastique longitudinal et module spécifique.

À ces 25 spécimens ont été ajoutés les 5 spécimens choisis graphiquement pour la mesure de spectroscopie par résonance ultra-sonore afin de constituer un sous-échantillonnage de 30 éprouvettes par espèce pour la mesure des cisaillements par contact direct, soit un total de 120 éprouvettes.

Chapitre 3

Résultats et Discussion

3.1 Description statistique

Les principaux résultats obtenus à partir des mesures détaillées au chapitre précédent sont exposés dans la présente section.

3.1.1 Description générale

L'ensemble des résultats de mesures est présenté sous forme de tableaux dans lesquels figurent les statistiques de base (minimum, maximum, moyenne, médiane, écart-type et coefficients de variation). Pour les principales variables ces informations sont également résumées, par essence, au moyen de diagrammes boîtes à moustache (figure 3.1 et figure 3.2).

Un complément sur les statistiques descriptives est disponible dans l'*Annexe C* (page 125).

La codification des variables utilisée est donnée ci-dessous :

- D : densité (g/cm^3)
- LC : largeur de cerne moyenne (mm)
- $E.L.b$: Module d'élasticité longitudinal (MPa) mesuré par la méthode vibratoire Bing© ;
- $G.TL.b$: Module de cisaillement TL (MPa) mesuré par la méthode vibratoire Bing© ;
- $G.RL.b$: Module de cisaillement RL (MPa) mesuré par la méthode vibratoire Bing© ;
- MS : Module spécifique longitudinal ($\text{MPa}/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ ou $10^6\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$) mesuré par la méthode vibratoire Bing© ;
- $E.L.cc$: Module d'élasticité longitudinal (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $E.R.cc$: Module d'élasticité radial (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $E.T.cc$: Module d'élasticité tangentiel (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $G.LR.cc$: Module de cisaillement LR (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $G.LT.cc$: Module de cisaillement LT (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $G.RT.cc$: Module de cisaillement RT (MPa) mesuré par méthode ultra-sonore par contact direct ;
- $E.R.rus$: Module d'élasticité radial (MPa) mesuré par la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) ;
- $E.T.rus$: Module d'élasticité tangentiel (MPa) mesuré par la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) ;
- $G.LR.rus$: Module de cisaillement LR (MPa) mesuré par la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) ;
- $G.LT.rus$: Module de cisaillement LT (MPa) mesuré par la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) ;
- $G.RT.rus$: Module de cisaillement RT (MPa) mesuré par la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS) ;
- CR : Contrainte de rupture en compression (MPa) ;
- R_R : Retrait radial total (%) ;
- R_T : Retrait tangentiel total (%) ;
- R_S : Retrait surfacique total (%) ;

- α_R : Coefficient de retrait radial (%/% de teneur en eau) ;
- α_T : Coefficient de retrait tangentiel (%/% de teneur en eau) ;
- α_S : Coefficient de retrait surfacique (%/% de teneur en eau) ;
- PSF : Point de saturation des fibres (%) ;
- ID : infra-densité (g/cm³).

Dans les figures de ce chapitre les quatre espèces de pin étudiées sont chacune désignées par une lettre :

- C : pin à crochets ;
- L : pin laricio ;
- M : pin maritime ;
- S : pin sylvestre.

| Variable | Moyenne | Ecart type | C.V. | Min | Médiane | Max | Effectif |
|---------------------|---------|------------|------|-------|---------|-------|----------|
| D | 0,541 | 0,077 | 14% | 0,397 | 0,522 | 0,981 | 318 |
| LC | 3,1 | 2,4 | 79% | 0,4 | 2,5 | 13,5 | 318 |
| MS | 21,7 | 5,0 | 23% | 10,2 | 22,0 | 34,1 | 315 |
| $E.L.b$ | 11935 | 3914 | 33% | 5071 | 11449 | 30414 | 314 |
| $G.TL.b$ | 1000 | 247 | 25% | 446 | 953 | 2061 | 313 |
| $G.RL.b$ | 1169 | 360 | 31% | 514 | 1103 | 2957 | 313 |
| $E.R.cc$ | 2648 | 396 | 15% | 1752 | 2609 | 4269 | 313 |
| $E.T.cc$ | 1682 | 473 | 28% | 703 | 1571 | 3942 | 313 |
| $E.L.cc$ | 14943 | 4306 | 29% | 7283 | 14317 | 32185 | 313 |
| $G.LR.cc$ | 1023 | 152 | 15% | 711 | 1024 | 1453 | 120 |
| $G.LT.cc$ | 861 | 157 | 18% | 555 | 845 | 1392 | 120 |
| $G.RT.cc$ | 124 | 51 | 41% | 45 | 115 | 259 | 119 |
| $E.R.rus$ | 1508 | 564 | 37% | 710 | 1360 | 2770 | 17 |
| $E.T.rus$ | 1132 | 532 | 47% | 570 | 880 | 2840 | 17 |
| $G.LR.rus$ | 1245 | 180 | 14% | 930 | 1250 | 1630 | 21 |
| $G.LT.rus$ | 1042 | 213 | 20% | 780 | 930 | 1660 | 19 |
| $G.RT.rus$ | 110 | 55 | 50% | 65 | 90 | 295 | 21 |
| CR | 41,9 | 9,4 | 22% | 21,1 | 40,6 | 78,9 | 313 |
| R_R | 0,046 | 0,014 | 30% | 0,017 | 0,044 | 0,099 | 313 |
| R_T | 0,099 | 0,015 | 16% | 0,049 | 0,101 | 0,144 | 313 |
| R_s | 0,150 | 0,028 | 19% | 0,067 | 0,150 | 0,260 | 313 |
| α_R | 0,17 | 0,05 | 28% | 0,07 | 0,16 | 0,37 | 313 |
| α_T | 0,33 | 0,05 | 15% | 0,17 | 0,33 | 0,51 | 313 |
| α_T/α_R | 2,06 | 0,44 | 21% | 1,29 | 1,99 | 3,47 | 313 |
| α_S | 0,50 | 0,09 | 18% | 0,24 | 0,49 | 0,88 | 313 |
| PSF | 0,30 | 0,02 | 5% | 0,24 | 0,30 | 0,36 | 313 |
| ID | 0,433 | 0,058 | 13% | 0,325 | 0,421 | 0,745 | 313 |

TABLE 3.1 – Tableau récapitulatif des principaux résultats, toutes essences confondues

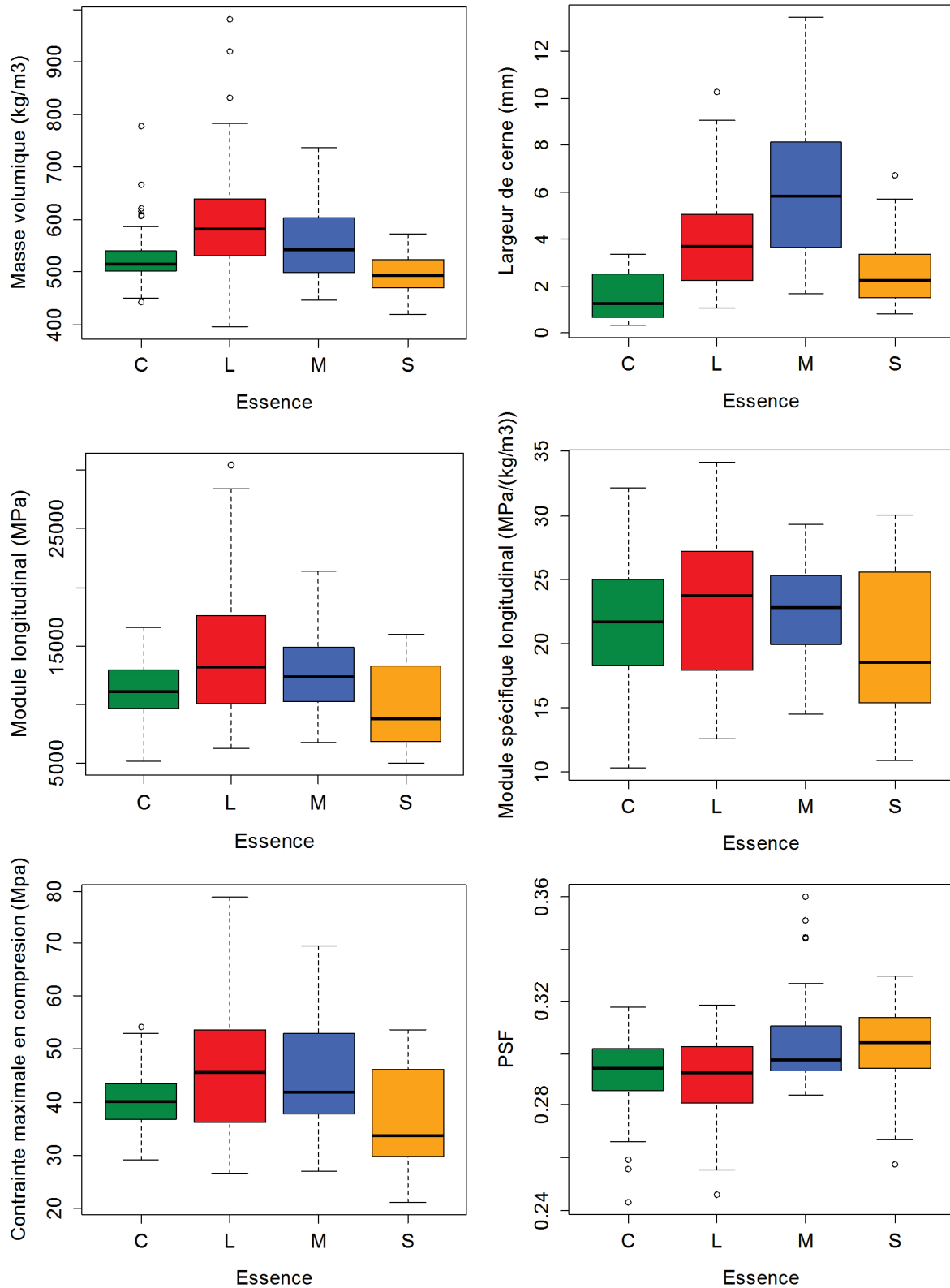


FIGURE 3.1 – Représentation graphique des principales variables par diagrammes en boîte à moustache, pour chaque essence : pin à crochets (C), pin laricio (L), pin maritime (M) et pin sylvestre (S)

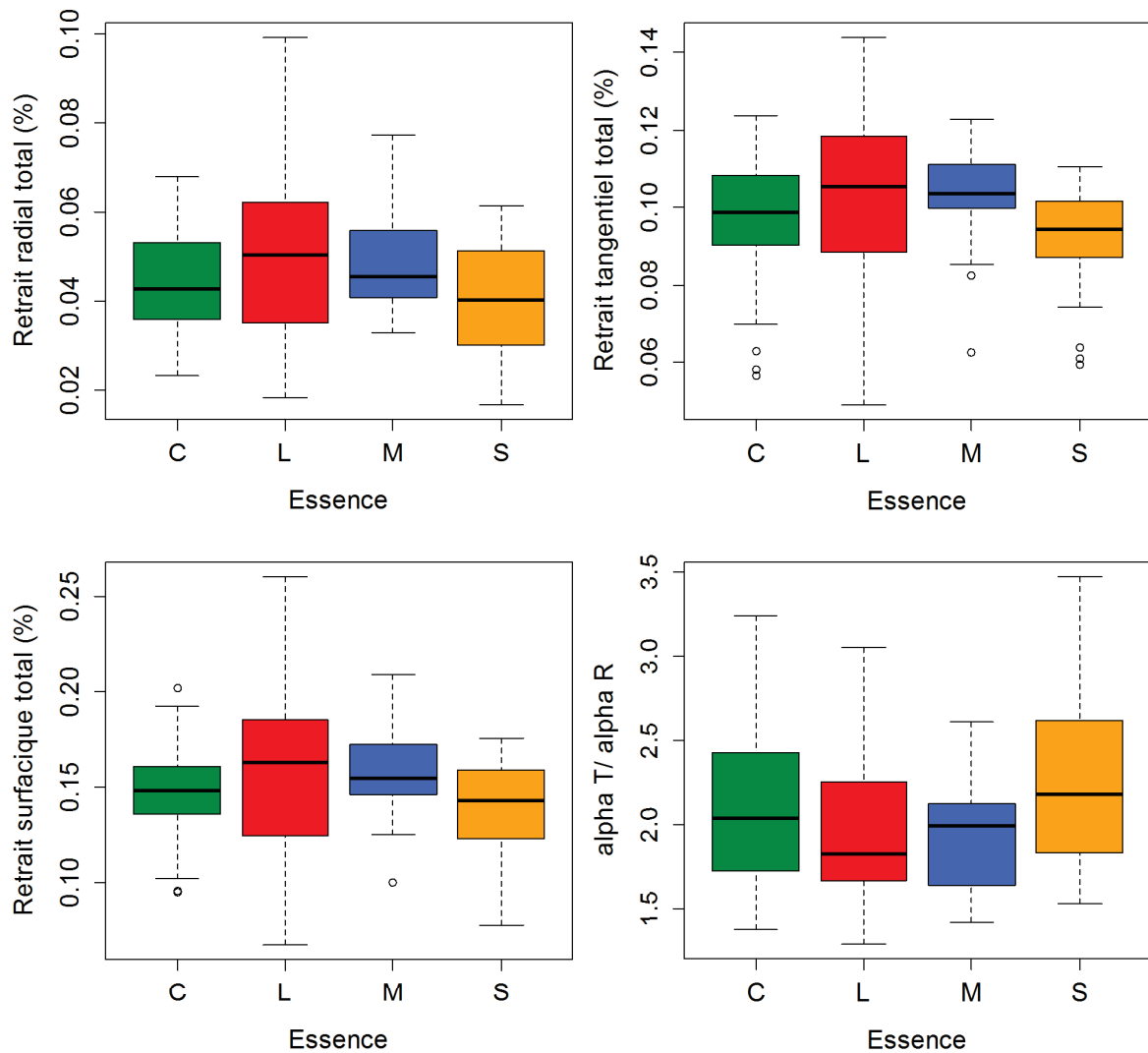


FIGURE 3.2 – Représentation graphique des principales variables par diagrammes en boîte à moustache, pour chaque essence : pin à crochets (C), pin laricio (L), pin maritime (M) et pin sylvestre (S)

On observe dans la table 3.1 que la densité de notre échantillon s'étend sur une large plage de 0.397 g/cm^3 à 0.981 g/cm^3 avec une valeur moyenne de 0.541 g/cm^3 , cohérente avec les valeurs généralement rencontrées pour les bois de pin. Les diagrammes en boîtes à moustache de la masse volumique sur la figure 3.1, permettent d'observer que la valeur maximale de 0.981 g/cm^3 correspond à un spécimen de pin laricio particulièrement dense et que hormis quelques exceptions, la densité de notre échantillon se situe principalement entre 0.4 g/cm^3 et 0.8 g/cm^3 .

Les valeurs les plus élevées de densité (supérieures à 0.8) sont très rares pour les pins. Des valeurs de ce type sont généralement la traduction d'une présence massive de résine dans le bois (Gérard, 2005). Dans ce cas le retrait, par exemple, est nettement plus faible que pour le bois non résineux possédant le même type de cernes de croissance. Dans notre cas, les

éprouvettes très denses de pin laricio ont à la fois un retrait et un module d'élasticité très élevés (figure 3.3).

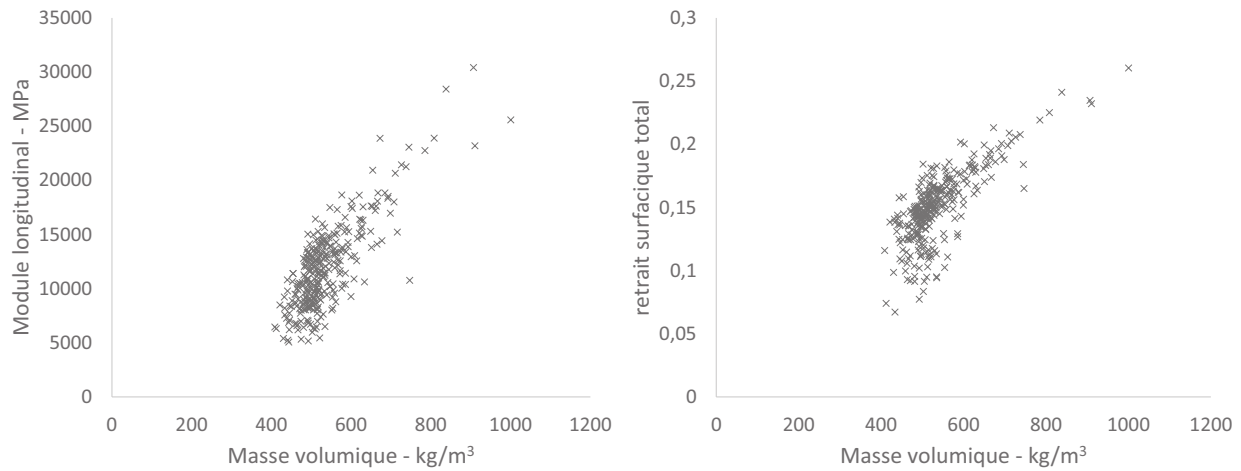


FIGURE 3.3 – Représentations graphiques du module élastique et du retrait surfacique total en fonction de la densité

Ceci n'est pas compatible avec une forte présence de résine qui n'a pas été observée par ailleurs. Nous sommes ici en présence de bois à texture¹ forte (figure 3.4), dont les propriétés sont proches de celles du bois final. Ils doivent donc être considérés comme normaux.

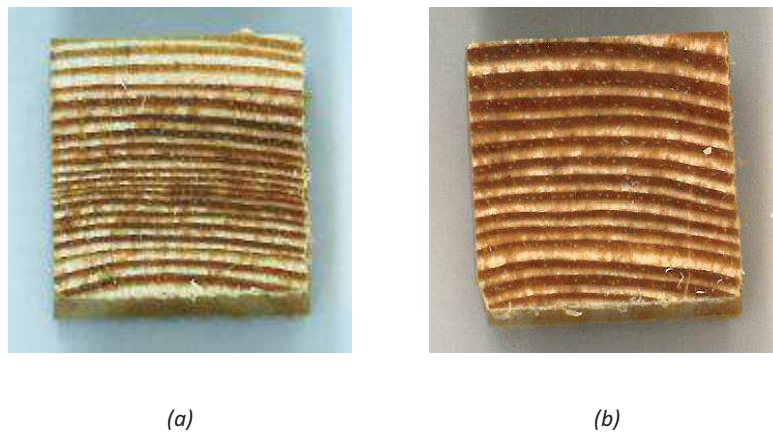


FIGURE 3.4 – Surface du plan RT de deux spécimens de pin laricio (a : plc12 et b : ple03) de densité, module spécifique et retrait élevés, numérisée à l'aide d'un scanner

D'un point de vue plus général, on constate que le pin maritime et surtout le pin laricio

1. La texture d'un bois se définit par la proportion de bois final (ou bois d'été) sur celle de bois initial (ou bois de printemps).

possèdent une plus large distribution de densité que le pin sylvestre et le pin à crochets. Cette information correspond aux données de la littérature (données issues d'études menées par FCBA et le CIRAD communiquées par l'Association pour la Promotion des Emplois du Pin²).

La largeur de cerne présente le plus fort coefficient de variation (79%) et on peut observer sur les diagrammes en boîte à moustache la même tendance que pour la densité. Les pins sylvestre et a fortiori les pins à crochets, possèdent des cernes plus petits et plus réguliers. Outre l'effet « espèce », il faut signaler que ces arbres ont poussé à plus haute altitude.

La plage de variation du module spécifique est comparable aux valeurs recueillies dans la littérature pour des résineux (Brémaud *et al.*, 2011). On constate peu de différence entre les essences de pin dans notre échantillon.

Les variables à prédire étudiées ont un C.V. compris entre 13 et 50 %. On peut relever que le module de cisaillement $G.RT$ présente la plus grande dispersion avec un coefficient de variation de 41 % pour $G.RT.cc$ et 50 % pour $G.RT.rus$. Seul le point de saturation des fibres varie peu.

Il faut aussi noter que la dispersion (C.V.) sur les modules de cisaillement $G.LR$ et $G.LT$ est nettement plus élevée dans les mesures vibratoires (Bing©) que dans les mesures ultra-sonores (par contact ou RUS). Enfin, on peut remarquer que la dispersion est plus grande pour les retraits radiaux que pour les tangentiels, alors qu'elle est plus petite pour les modules comportant la direction radiale ($E.R$, $G.LR$) que pour ceux qui comportent la direction tangentielle ($E.T$, $G.LT$).

Toujours dans la table 3.1, on observe que les valeurs du module élastique longitudinal ($E.L.cc$) obtenues par mesures ultra-sonores par contact direct sont sensiblement supérieures (d'environ 25%) à celle obtenues par mesure vibratoire³ ($E.L.b$). Ce résultat était attendu et confirme les études parues à ce sujet (cf. section 2.2.2.2, page 34).

En revanche les modules élastiques radial ($E.R.cc$) et tangentiel ($E.T.cc$) moyens sont respectivement 76% et 49% plus élevés que les valeurs moyennes $E.R.rus$ et $E.T.rus$ mesurées par RUS. Les mesures par RUS semblent plus proches des valeurs généralement observées sur les résineux (Guitard et El Amri (1987), Dahl (2009)).

Les valeurs moyennes de modules de cisaillements mesurés par les trois méthodes sont assez proches (différences <18%).

Pour ce qui est des autres variables couramment mesurées dans la caractérisation des bois, les moyennes obtenues (table 3.2) sont comparables avec les données sur le pin maritime et le pin sylvestre (figure 3.5) de la base de données du logiciel *Tropix 7* (Paradis *et al.*, 2015).

On note toutefois que notre échantillon de pin sylvestre est plutôt léger par rapport aux données du CIRAD, ce qui semble se répercuter sur le module d'élasticité et la contrainte à la rupture en compression, qui sont plus faibles.

On observe également que nos moyennes de retrait tangentiel sont sensiblement plus élevées

2. L'Association pour la Promotion des Emplois du Pin communique une synthèse de données issues d'études menées par FCBA et le CIRAD sur le site internet <http://www.pinsdefrance.com/points-cles/differences-entre-pins>.

3. Pour mémoire, dans la méthode de spectroscopie par résonance ultra-sonore (RUS), le module n'est pas mesuré. C'est la valeur obtenue par mesure vibratoire ($E.L.b$) qui est utilisée.

(à l'inverse du retrait radial pour le pin sylvestre).

| Variable : | | D | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|-------|---------|-------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 0,524 | 0,041 | 0,004 | 8% | 0,443 | 0,516 | 0,777 | 135 | |
| L | 0,599 | 0,114 | 0,014 | 19% | 0,397 | 0,582 | 0,981 | 64 | |
| M | 0,561 | 0,076 | 0,010 | 14% | 0,447 | 0,542 | 0,737 | 59 | |
| S | 0,496 | 0,038 | 0,005 | 8% | 0,420 | 0,492 | 0,573 | 60 | |

| Variable : | | α_s | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 0,49 | 0,06 | 0,01 | 12% | 0,32 | 0,49 | 0,66 | 133 | |
| L | 0,53 | 0,13 | 0,02 | 25% | 0,24 | 0,55 | 0,88 | 64 | |
| M | 0,51 | 0,07 | 0,01 | 14% | 0,34 | 0,50 | 0,68 | 57 | |
| S | 0,45 | 0,06 | 0,01 | 14% | 0,29 | 0,45 | 0,54 | 59 | |

| Variable : | | R_R | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 4,4% | 1,1% | 0,1% | 24% | 2,3% | 4,3% | 6,8% | 133 | |
| L | 5,1% | 1,8% | 0,2% | 36% | 1,8% | 5,0% | 9,9% | 64 | |
| M | 4,9% | 1,2% | 0,2% | 24% | 3,3% | 4,6% | 7,7% | 57 | |
| S | 4,0% | 1,2% | 0,2% | 30% | 1,7% | 4,0% | 6,1% | 59 | |

| Variable : | | R_T | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|-------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 9,9% | 1,3% | 0,1% | 13% | 5,7% | 9,9% | 12,4% | 133 | |
| L | 10,2% | 2,3% | 0,3% | 23% | 4,9% | 10,6% | 14,4% | 64 | |
| M | 10,4% | 1,1% | 0,1% | 10% | 6,3% | 10,4% | 12,3% | 57 | |
| S | 9,3% | 1,2% | 0,2% | 13% | 5,9% | 9,4% | 11,0% | 59 | |

| Variable : | | CR | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|-------|---------|-------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 40,28 | 5,04 | 0,44 | 13% | 29,00 | 40,03 | 54,12 | 132 | |
| L | 47,23 | 12,42 | 1,55 | 26% | 26,58 | 45,62 | 78,87 | 64 | |
| M | 44,74 | 10,09 | 1,32 | 23% | 26,85 | 41,91 | 69,51 | 58 | |
| S | 37,06 | 9,19 | 1,20 | 25% | 21,12 | 33,66 | 53,61 | 59 | |

| Variable : | | $E.L.b$ | | | | | | | |
|------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|-------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 11198 | 2355 | 203 | 21% | 5171 | 11068 | 16591 | 134 | |
| L | 14423 | 5647 | 711 | 39% | 6312 | 13190 | 30414 | 63 | |
| M | 12893 | 3390 | 441 | 26% | 6767 | 12387 | 21429 | 59 | |
| S | 9959 | 3427 | 450 | 34% | 5071 | 8865 | 15978 | 58 | |

TABLE 3.2 – Tableaux récapitulatifs des résultats des variables couramment mesurées en caractérisation, en fonction de l'essence

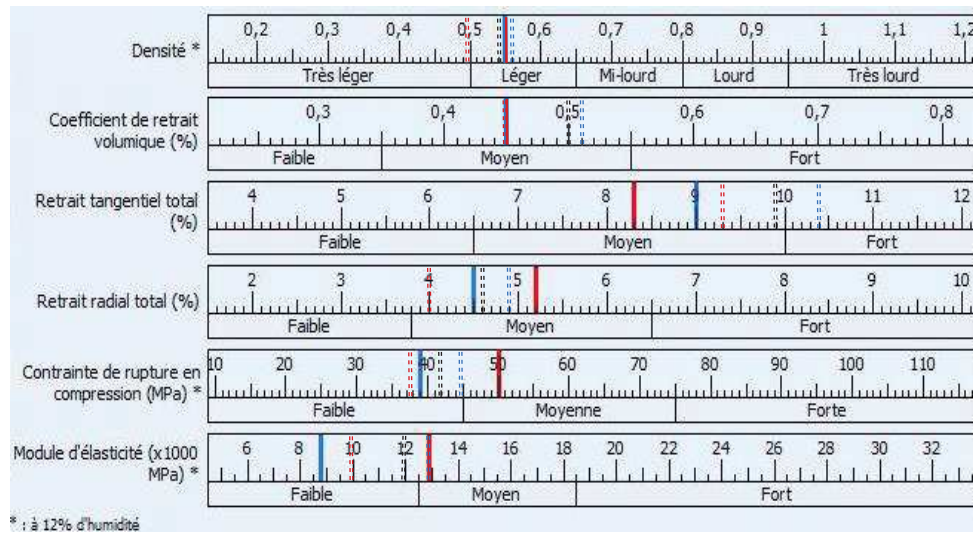


FIGURE 3.5 – Échelles de valeurs extraites de la base de donnée du logiciel *Tropix 7* (Paradis et al., 2015), éditée par le CIRAD, représentant la moyenne de chaque variable mesurée sur le pin maritime (en bleu) et le pin sylvestre (en rouge). Sur ces échelles ont été ajoutées, les valeurs moyennes obtenues dans cette étude (double trait en pointillé, bleu : maritime, rouge : sylvestre, noir : moyenne des quatre espèces étudiées)

Par ailleurs, les valeurs de coefficients de retrait obtenus dans cette étude sont très proches de celles mesurées par Mazet et Nepveu (1991) sur du pin sylvestre. La moyenne de nos mesures est également dans la fourchette donnée par *Les cahiers du CTBA, 1984* pour les pins, à savoir $0.10 < \alpha_R < 0.20$ et $0.20 < \alpha_T < 0.35$, reportée dans l'article de Mazet (1991).

3.1.2 Relations entre variables

La matrice des corrélations (table 3.3) illustre les liens entre chaque variable. En premier lieu, on observe qu'il y a des corrélations significatives, entre les trois indicateurs proposés (densité D , module spécifique MS et largeur de cernes LC) qui vont dans le sens habituel de ce qui est observé chez les résineux : diminution de la densité et du module spécifique avec l'augmentation de la largeur de cerne, généralement imputées à l'effet du bois juvénile (les cernes du bois produit dans le jeune âge des arbres sont généralement plus larges et le bois juvénile est généralement plus léger et possède un plus faible module spécifique en raison d'un angle de microfibrilles plus élevé). Néanmoins, les variations, pourtant très fortes de la largeur de cerne dans notre échantillon, n'expliquent qu'un faible pourcentage des variations de densité (2%) ou de module spécifique (9%).

De même, la largeur de cerne n'explique qu'un faible pourcentage des variations des autres variables. Cette information laisse présager qu'elle n'aura pas un rôle majeur dans les modèles prédictifs des propriétés.

En revanche, on observe que la densité D est significativement corrélée avec l'ensemble des autres variables, hormis le point de saturation des fibres. Le PSF n'est d'ailleurs corrélé avec aucune autre variable (seule une faible corrélation négative avec le rapport α_T/α_R).

Le module spécifique est plutôt bien corrélé avec les propriétés hygroscopiques (hormis le PSF) ainsi qu'avec le module longitudinal et la contrainte à la rupture (CR). En revanche

il est faiblement corrélé avec les propriétés mécaniques des autres directions. En particulier, ses corrélations avec le module E_R et les modules de cisaillements $G.LR$ et $G.RT$ ne sont pas significatives.

| Variables | D | LC | MS | E.L.b | CR | αR | αT | αS | $\alpha T/\alpha R$ | PSF | R_R | R_T | R_S | ID | E.R.cc | E.T.cc | E.L.cc | G.I.R.cc | G.I.T.cc | G.R.T.cc |
|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|------------|------------|------------|---------------------|--------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|----------|----------|----------|
| D | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| LC | -0,151 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| MS | 0,432 | -0,286 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| E.L.b | 0,785 | -0,262 | 0,889 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| CR | 0,842 | -0,276 | 0,769 | 0,935 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| αR | 0,788 | -0,346 | 0,708 | 0,869 | 0,881 | 1 | | | | | | | | | | | | | | |
| αT | 0,703 | -0,268 | 0,557 | 0,711 | 0,688 | 0,683 | 1 | | | | | | | | | | | | | |
| αS | 0,811 | -0,334 | 0,689 | 0,861 | 0,852 | 0,913 | 0,921 | 1 | | | | | | | | | | | | |
| $\alpha T/\alpha R$ | -0,424 | 0,249 | -0,544 | -0,566 | -0,598 | -0,790 | -0,157 | -0,508 | 1 | | | | | | | | | | | |
| PSF | -0,044 | 0,087 | 0,039 | 0,001 | -0,010 | 0,092 | -0,027 | 0,033 | -0,203 | 1 | | | | | | | | | | |
| RR | 0,739 | -0,334 | 0,678 | 0,826 | 0,841 | 0,976 | 0,600 | 0,854 | -0,823 | 0,258 | 1 | | | | | | | | | |
| RT | 0,623 | -0,200 | 0,539 | 0,658 | 0,631 | 0,650 | 0,935 | 0,867 | -0,189 | 0,302 | 0,614 | 1 | | | | | | | | |
| RS | 0,761 | -0,293 | 0,675 | 0,828 | 0,818 | 0,900 | 0,861 | 0,960 | -0,551 | 0,308 | 0,893 | 0,904 | 1 | | | | | | | |
| ID | 0,970 | -0,120 | 0,445 | 0,786 | 0,844 | 0,807 | 0,687 | 0,813 | -0,461 | -0,063 | 0,754 | 0,605 | 0,760 | 1 | | | | | | |
| E.R.cc | 0,640 | 0,235 | -0,082 | 0,282 | 0,352 | 0,281 | 0,331 | 0,334 | -0,037 | 0,120 | 0,272 | 0,338 | 0,346 | 0,668 | 1 | | | | | |
| E.T.cc | 0,826 | 0,019 | 0,466 | 0,728 | 0,784 | 0,749 | 0,428 | 0,638 | -0,602 | -0,001 | 0,733 | 0,373 | 0,615 | 0,842 | 0,584 | 1 | | | | |
| E.L.cc | 0,851 | -0,137 | 0,744 | 0,923 | 0,932 | 0,910 | 0,762 | 0,909 | -0,600 | 0,082 | 0,872 | 0,738 | 0,896 | 0,862 | 0,414 | 0,796 | 1 | | | |
| G.I.R.cc | 0,599 | -0,060 | -0,094 | 0,266 | 0,333 | 0,312 | 0,265 | 0,304 | -0,143 | -0,044 | 0,305 | 0,219 | 0,284 | 0,602 | 0,789 | 0,507 | 0,309 | 1 | | |
| G.I.T.cc | 0,815 | -0,323 | 0,306 | 0,619 | 0,695 | 0,698 | 0,469 | 0,613 | -0,555 | 0,002 | 0,698 | 0,424 | 0,600 | 0,831 | 0,737 | 0,785 | 0,654 | 0,805 | 1 | |
| G.R.T.cc | 0,651 | 0,231 | 0,113 | 0,426 | 0,471 | 0,466 | 0,288 | 0,396 | -0,381 | 0,178 | 0,490 | 0,311 | 0,430 | 0,659 | 0,692 | 0,698 | 0,503 | 0,673 | 0,656 | 1 |

Les valeurs en gras sont différentes de 0 à un niveau de signification $\alpha=0,05$

TABLE 3.3 – Matrice des coefficients de corrélation

Étant donné le nombre important de propriétés à prendre en compte dans notre analyse, nous avons choisi de représenter les corrélations entre variables par la méthode de l'analyse en composantes principales (ACP).

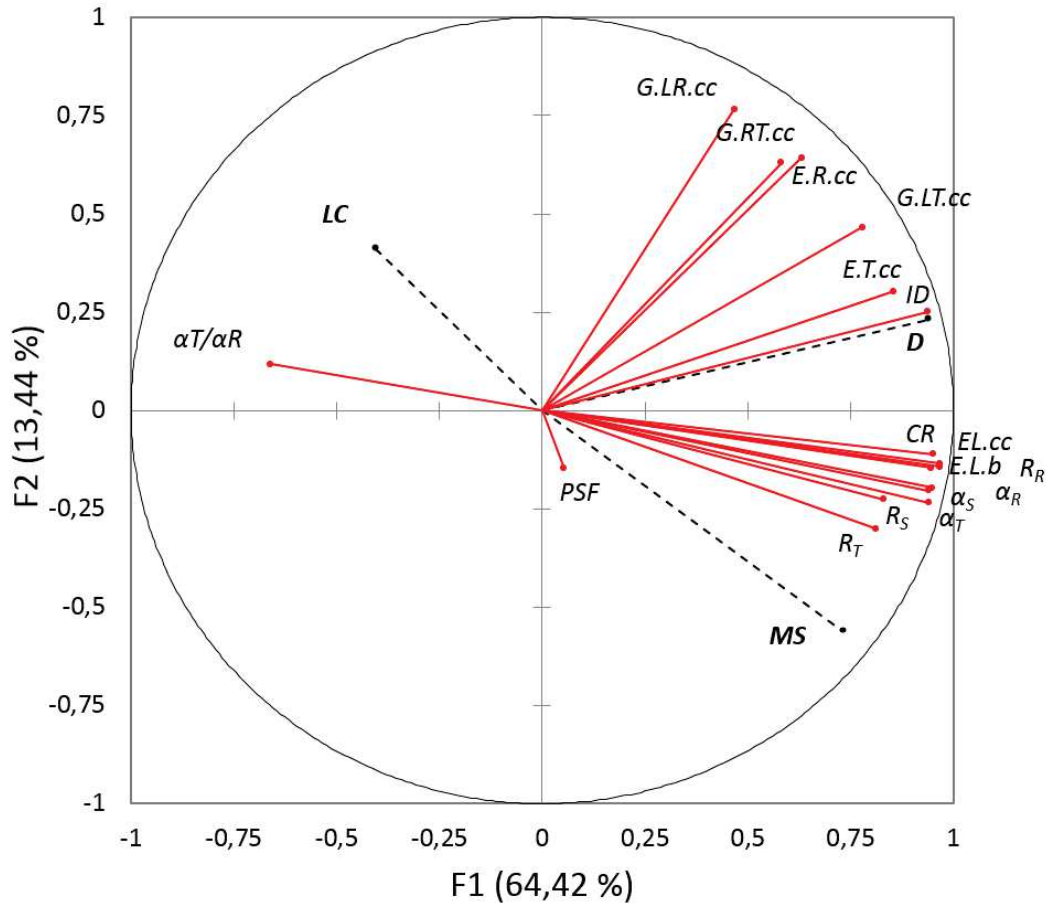


FIGURE 3.6 – Cercle des corrélations de l'analyse en composantes principales des variables mesurées (afin de les démarquer, les indicateurs proposés pour construire les modèles prédictifs : la densité (D), le module spécifique (MS) et la largeur de cornes (LC) sont représentés par les vecteurs en pointillés noirs)

Nous avons retenu les deux premiers axes factoriels ($F1$ et $F2$), représentés sur le cercle des corrélations de la figure 3.6, qui expliquent 78% de la variance totale. Afin de les distinguer plus facilement, les indicateurs proposés pour construire les modèles prédictifs (densité D , module spécifique MS et largeur de cornes LC) sont représentés par les vecteurs en pointillés noirs.

Cette représentation, montre que les trois indicateurs (D , MS et LC) représentent trois pôles d'explication pour les propriétés. La plupart des propriétés mécaniques dans la direction L ou de retrait sont expliquées par le premier axe, soit le couple D/MS . Les propriétés mécaniques non axiales ne dépendent principalement que de D , avec une petite influence de la largeur de corne. Toutefois la largeur de corne se situe loin de la périphérie du cercle. Ceci signifie qu'elle contribue peu à la construction des axes principaux de l'ACP et illustre encore une fois qu'elle

n'expliquera pas beaucoup la variabilité des autres propriétés.

Si on projette les individus sur le plan factoriel F1,F2, (figure 3.7), on observe un ensemble plutôt homogène. Aucun groupe ne se dégage clairement. On remarque tout de même sur la droite, les individus de pin laricio et dans une moindre mesure de pin maritime, contribuant fortement à l'axe F1. Ces points correspondent aux spécimens particulièrement denses, mis en évidence précédemment.

Il semble que la grande plage de variation de densité du pin maritime et surtout du pin laricio donne un poids très fort à la densité.

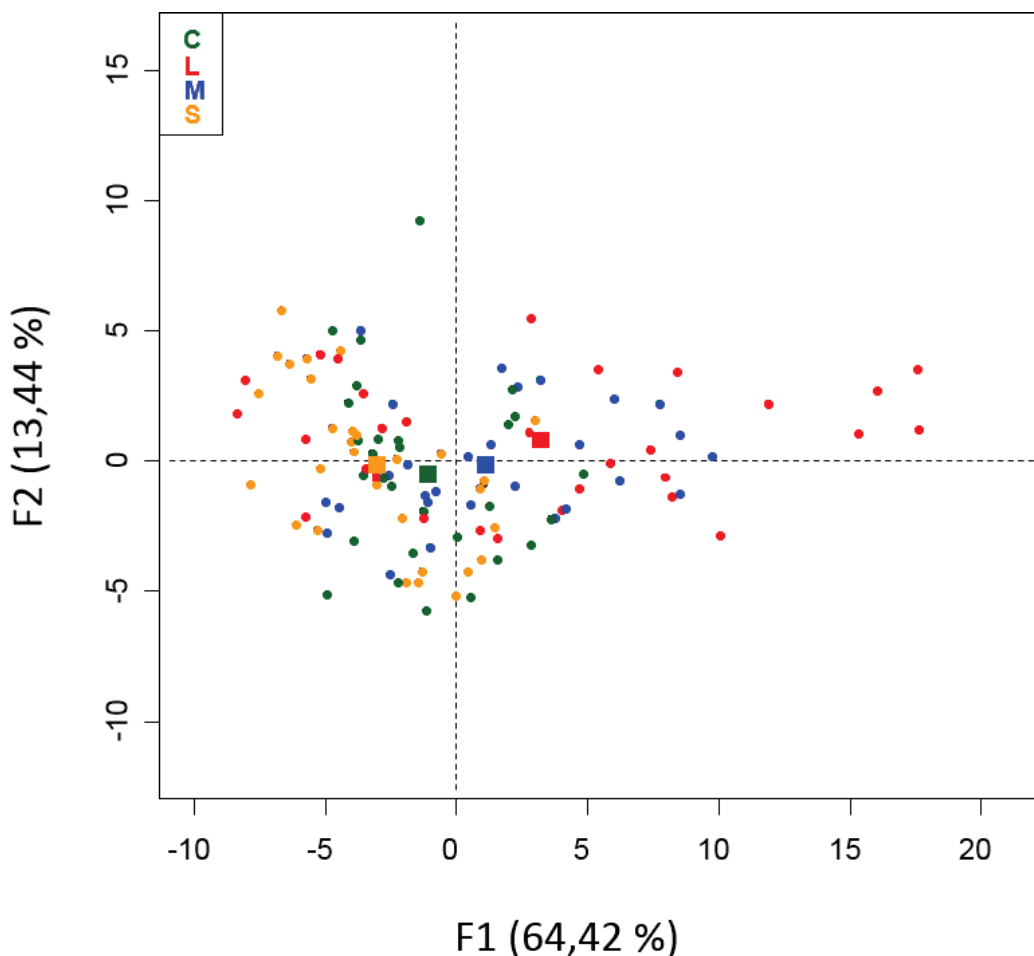


FIGURE 3.7 – Représentation de la projection des individus dans le plan factoriel F1, F2, ainsi que le centre de gravité par essence

En réalisant des matrices de corrélations pour chaque essence, on observe des différences dans les liaisons entre les variables. Cela se visualise bien sur les cercles de corrélation des ACP, effectuées pour chaque essence (figure 3.8). (Les matrices de corrélations de chaque essence sont disponibles dans l'Annexe C page 125).

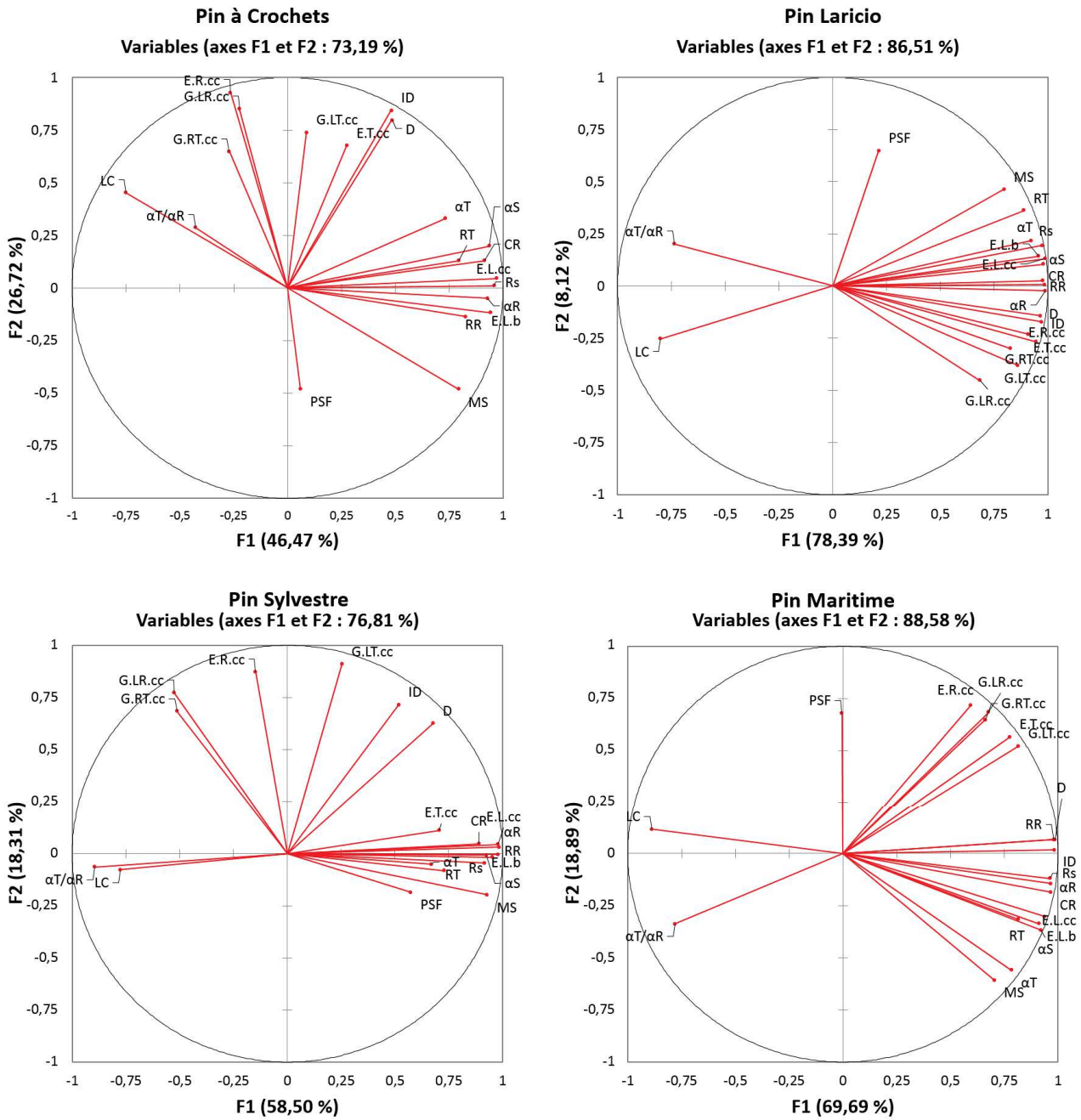


FIGURE 3.8 – Cercles des corrélations des analyses en composantes principales des variables mesurées, réalisées pour chaque essence

La figure 3.8 permet de confirmer que pour le pin maritime et le pin laricio, la densité joue un rôle majeur dans l’explication de la variabilité totale . Elle contribue très fortement au premier axe F1, qui explique à lui seul 70% (pour *M*) et 78% (pour *L*) de la variabilité. Il représente assez bien l’ensemble des variables, hormis le *PSF*.

Ce résultat n’est pas surprenant car la densité est connue pour être un bon prédicteur des propriétés physico-mécaniques (Guitard et El Amri, 1987).

En revanche, pour le pin à crochets et le pin sylvestre le premier axe est davantage construit sur

le module élastique longitudinal. Ceci s'explique par la forte plage de variation de ce dernier, alors que dans notre échantillon, la densité varie peu pour ces essences. La répartition des variables entre les deux axes est plus équilibrée, mais les propriétés transverses sont moins bien représentées.

D'un point de vue général, on peut remarquer que la largeur de cerne est mieux corrélée avec les autres variables, pour une espèce donnée que lorsqu'on prend l'ensemble des pins. On note également son opposition systématique avec le module spécifique qui traduit la corrélation négative entre les deux variables.

3.1.3 Influence de la densité sur les constantes élastiques

La densité apparaît comme un facteur majeur pour toutes les propriétés mesurées (en dehors du *PSF*). Guitard et El Amri (1987) ont proposé de prendre ce seul indicateur comme prédicteur des constantes élastiques, en réalisant une régression linéaire pour l'ensemble des résineux. Il est intéressant d'examiner les résultats obtenus pour les pins dans cette étude en relation avec la densité, en les mettant en regard des données et de la modélisation de ces auteurs. Cela permet au passage de comparer les méthodes utilisées (vibratoire Bing©, US par contact et RUS).

L'étape préliminaire de ce travail est de comparer notre échantillon de pins et celui de résineux utilisé par Guitard et El Amri (1987) pour élaborer leurs modèles. Pour ce faire il a été choisi d'utiliser la densité et le module spécifique, qui sont des mesures directes fiables de notre échantillon figure 3.9.

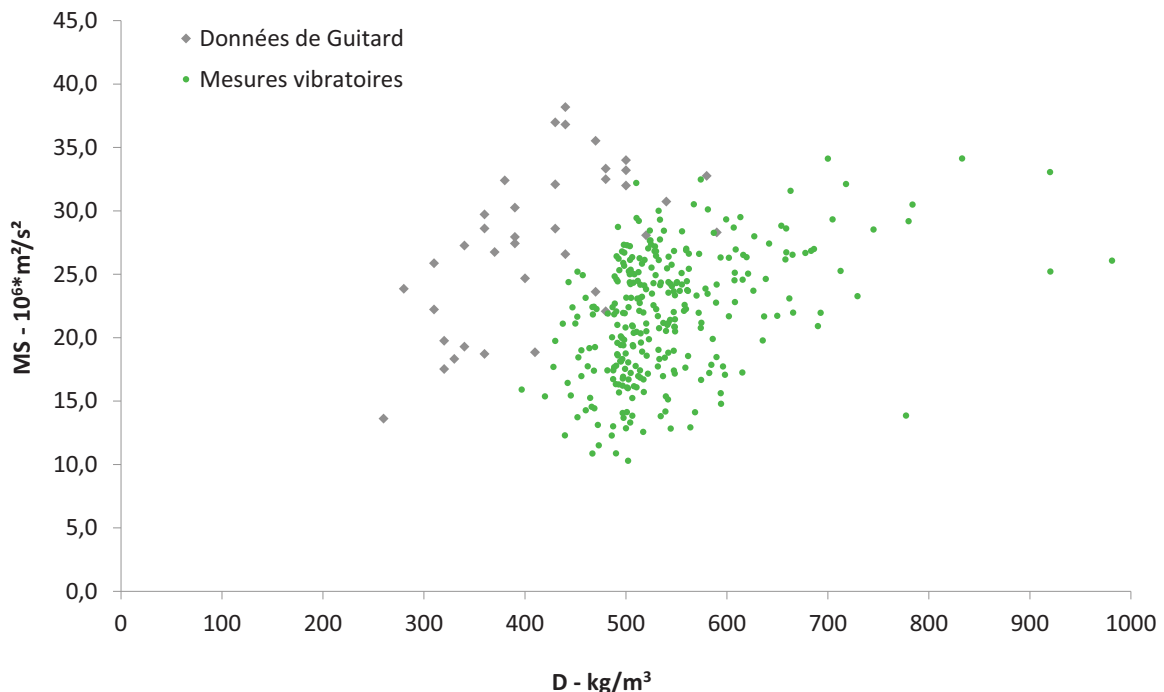


FIGURE 3.9 – Représentation graphique du module spécifique, obtenu par mesure vibratoire, en fonction de la densité, comparé aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987)

On peut constater que les deux échantillonnages : le nôtre et celui utilisé par Guitard et El Amri, sont très différents. D'une part, la densité moyenne et la plage de densité des données Guitard sont plus faibles. D'autre part, à densité équivalente, les modules spécifiques sont bien plus élevés pour les données Guitard, ce qui signifie que les résineux étudiés dans la littérature repris par Guitard et El Amri avaient des angles de microfibrilles plus faibles, ce qui est assez souvent le cas pour les espèces des genres Sapin (*Abies*), Epicea (*Picea*) ou Douglas (*Pseudotsuga*) bien représentées dans ces données.

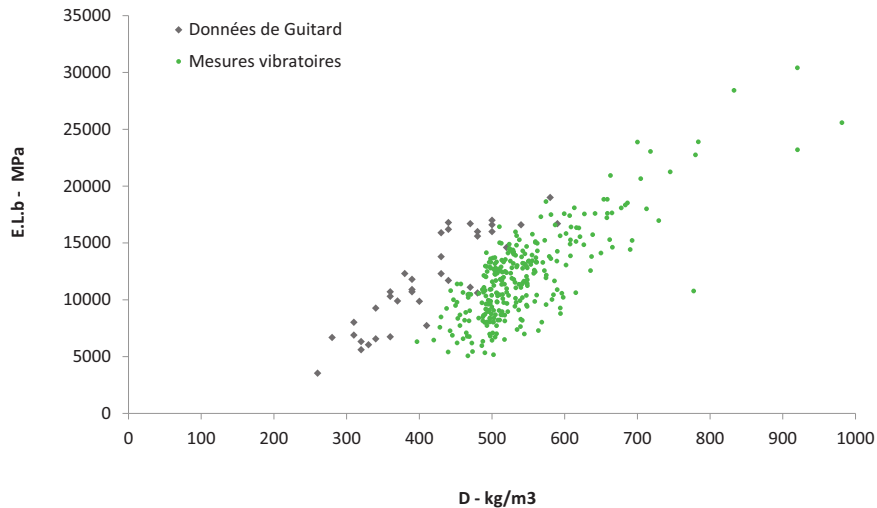


FIGURE 3.10 – Représentation graphique du module élastique longitudinal, obtenu par mesure vibratoire, en fonction de la densité et en fonction du module spécifique, comparé aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987)

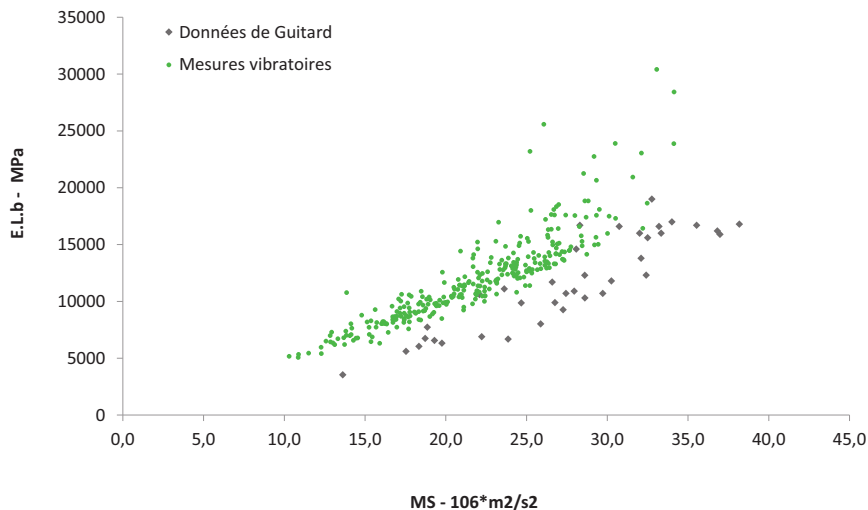


FIGURE 3.11 – Représentation graphique du module élastique longitudinal, obtenu par mesure vibratoire, en fonction du module spécifique, comparé aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987)

En conséquence, les bonnes relations entre les valeurs du module E_L (qui sont dans les deux cas le produit de la densité par le module spécifique) et celles de chacun des indicateurs (D et MS) sont décalées vers le haut ou vers le bas. $E_L = f(MS)$ est décalé vers le haut par rapport aux données de Guitard, qui correspondent à des bois de plus faible densité (figure 3.11). $E_L = f(D)$ est décalé vers le bas par rapport aux données de Guitard, qui correspondent à des bois à plus fort module spécifique (figure 3.10).

Lorsqu'on compare visuellement, les modules de cisaillement $G_{TL.b}$ et $G_{RL.b}$ déterminés par mesure vibratoire, avec les données de Guitard (figure 3.12), on observe que nos mesures sont plus dispersées. Ce qui va dans le même sens que le constat d'un coefficient de variation plus grand pour cette méthode de mesure, fait plus haut.

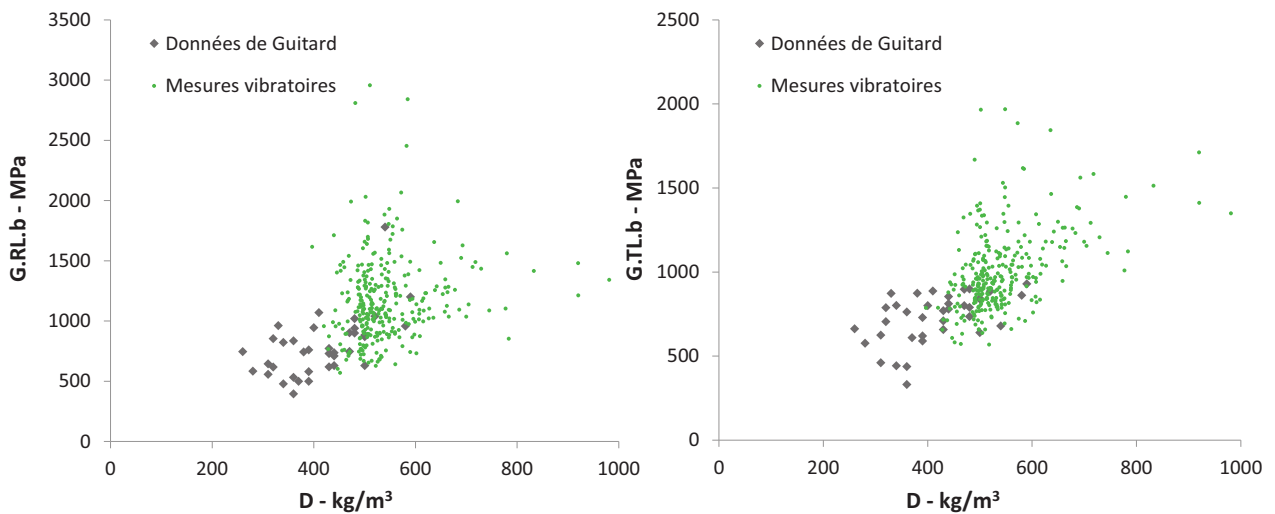


FIGURE 3.12 – Représentation graphique des modules de cisaillement G_{TL} et G_{RL} , obtenus par mesure vibratoire, en fonction de la densité, comparés aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987)

La comparaison des données de la littérature, collectées par Guitard et El Amri, avec les modules élastiques issus des mesures ultra-sonores par contact direct (figure 3.13), montre que ces mesures sont comparables pour le module longitudinal et les modules de cisaillement, mais nettement plus élevées pour les deux modules transverses (E_R et E_T), comme cela avait été observé dans la comparaison des résultats ultra-sonores par contact et RUS.

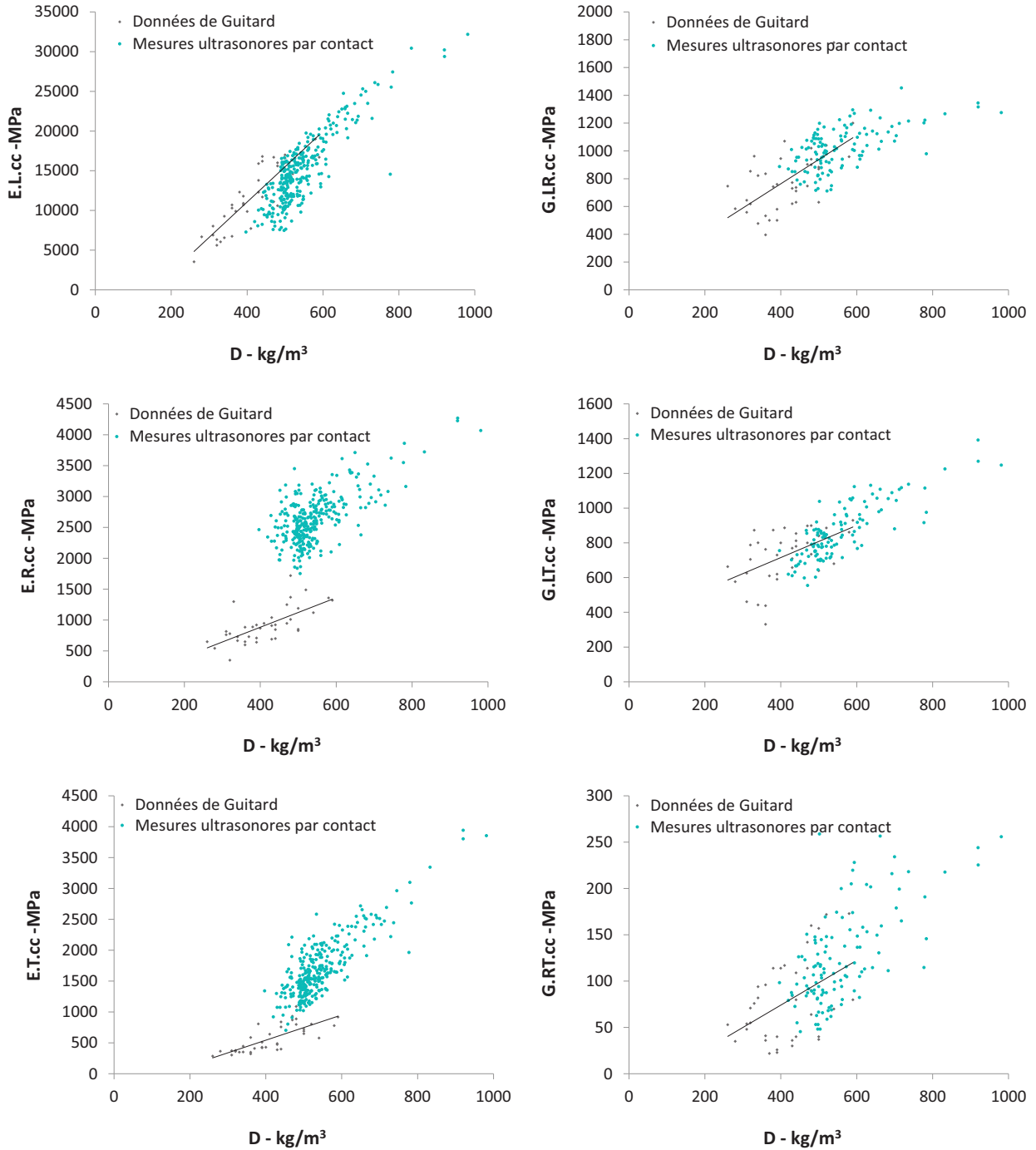


FIGURE 3.13 – Représentation graphique des modules élastiques et de cisaillement obtenus par mesures ultra-sonores par contact direct, en fonction de la densité, comparés aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987)

Les données de spectroscopie par résonance ultra-sonores (RUS) s'inscrivent bien mieux dans la tendance des données de la littérature, retenues par Guitard et El Amri (figure 3.14).

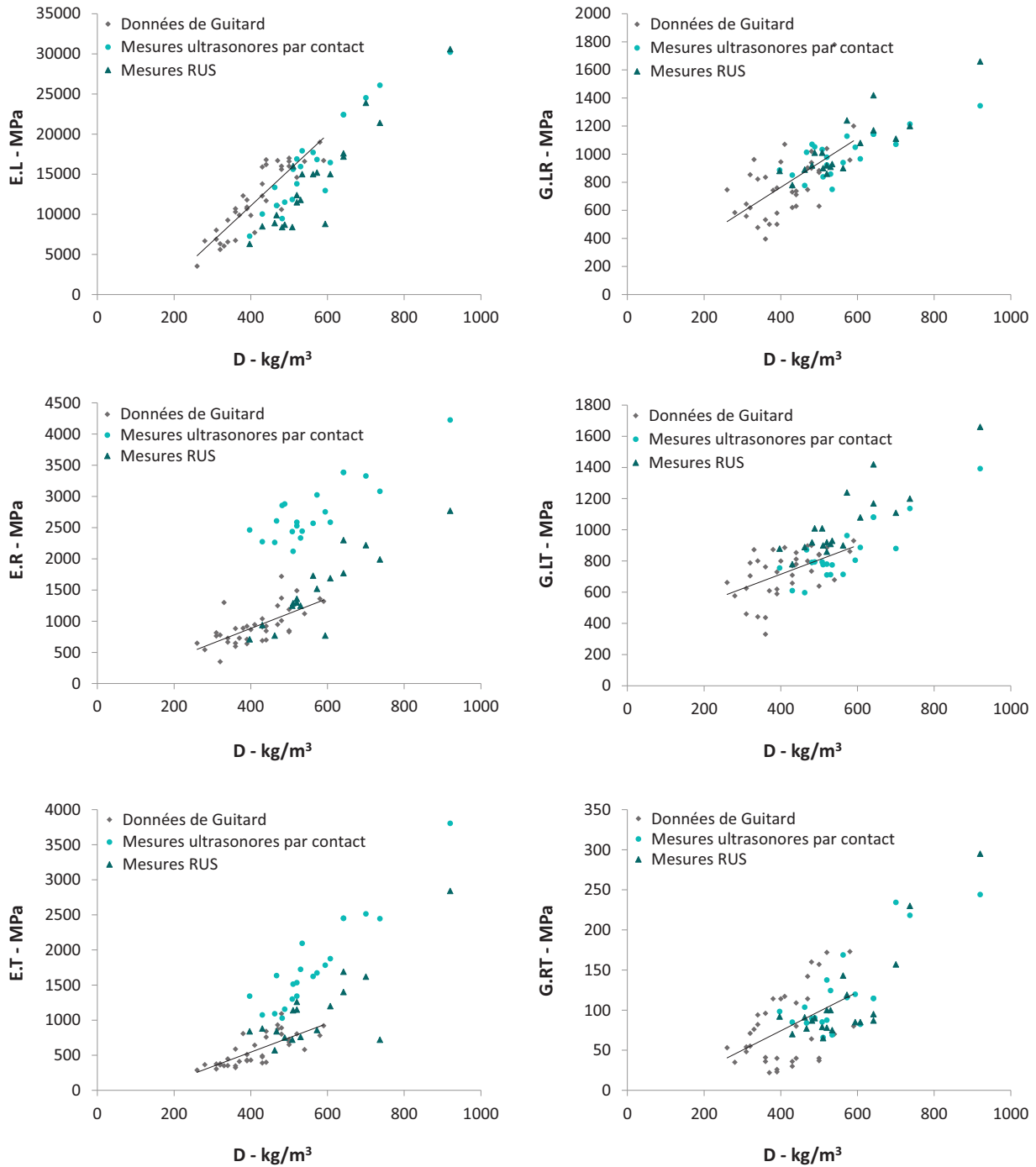


FIGURE 3.14 – Représentation graphique des modules élastiques et de cisaillement obtenus par RUS en fonction de la densité, comparés aux données sur les résineux, issues de Guitard et El Amri (1987) et aux mesures ultrasonores par contact direct

Mis à part, l'anomalie détectée sur la mesure des modules E_R et E_T par méthode ultra-sonore par contact, le modèle de Guitard semble donner une bonne première approche des valeurs des modules de la matrice d'élasticité, dans la plage de variation de densité préconisée par

Guitard (comprise entre 0.26 et 0.59 g/cm^3). Il apparait que les spécimens plus denses sont un peu plus éloignés du modèle et auraient tendance à modifier la pente de la régression proposée par Guitard.

Dans l'objectif qui est de construire des modèles plus précis et sur une plus large plage de densité, le faible nombre de mesures réalisées, ne permet pas d'utiliser les données issues de la RUS. Bien que les modules E_R et E_T mesurés par contact semblent surestimés, la tendance de leur variation avec la densité semble homothétique avec celles lisibles dans les données Guitard ou RUS. On les utilisera dans la suite de cette étude pour construire les modèles les concernant.

Nous retiendrons également les mesures des trois modules de cisaillement, issues de la méthode ultra-sonore par contact, les données pour les modules G_{TL} et G_{RL} obtenues par méthode vibratoire étant bien plus dispersées (ce qui est probablement dû à une incertitude expérimentale de mesure bien plus grande).

3.2 Modèles prédictifs de propriétés

Afin de répondre à l'objectif initial de prédire les propriétés physiques et mécaniques difficiles à mesurer, plusieurs modèles ont été construits. Dans un premier temps, la démarche entreprise a consisté à réaliser des modèles prédictifs seulement à partir des indicateurs physico-mécaniques. La deuxième étape s'est concentrée sur les prédictions à partir des spectres proche-infrarouge mesurés. Enfin, des modèles globaux ont été élaborés en combinant les deux méthodes.

3.2.1 Prédiction par indicateurs physico-mécaniques

Les modélisations des propriétés ont été construites à partir des trois indicateurs : densité, module spécifique et largeur de cernes. La méthode utilisée est la régression linéaire pas à pas. Avant d'entamer les modélisations, il est important de rappeler que le produit de la densité et du module spécifique est égal au module longitudinal. Afin de traduire cette réalité physique dans nos modèles linéaires, et de pouvoir combiner la densité et le module spécifique par multiplication plutôt que par addition, nous avons donc également introduit le produit des deux, E_L , comme quatrième indicateur.

La table 3.4 résume, pour chaque modèle, les indicateurs utilisés dans leur ordre d'introduction par la méthode pas à pas, le coefficient de détermination de la régression et la racine de la moyenne des carrés des erreurs ($RMCE$), aussi appelé écart-type de l'erreur du modèle.

La représentation graphique des modèles est visible sur la figure 3.15 et la figure 3.16.

En premier lieu, il faut noter que le rapport d'anisotropie α_T/α_R n'est pas bien prédit, et que le PSF n'est pas du tout prédit, avec les indicateurs utilisés. Ces résultats confirment les observations faites sur les analyses en composantes principales. À l'inverse, les modèles de l'infradensité ID et de la contrainte de rupture en compression CR affichent respectivement des coefficients de détermination de 95% et 91%. Pour ce qui est des données hygroscopiques, il faut souligner que les variables dans le sens radial sont mieux prédites que dans le sens tangentiel. Cette observation est également visible sur le cercle des corrélations de l'analyse

en composantes principales et semble appuyer le constat fait par Mazet et Nepveu (1991) que le retrait radial est toujours mieux lié à la densité. Du point de vue du mécanicien, cela correspond au comportement du matériau multicouche en série.

On constate que la largeur de cerne est retenue en dernier dans les régressions pas à pas, sauf dans la prédiction de E_R , E_T et G_{RT} . Il apparait qu'elle apporte peu dans l'amélioration des modèles prédictifs. Cet indicateur étant plus difficile à mesurer que les deux autres, la question de l'intérêt de sa conservation dans la démarche, se pose. Les modèles ont donc été recalculés sans l'utiliser. On peut ainsi évaluer l'introduction de la largeur de cerne, qui apporte un gain appréciable sur G_{RT} (+17 %) et un peu sur ER (+5 %), mais reste négligeable (de 0 à 3%) pour les autres propriétés.

| Variable | Modèles avec la largeur moyenne de cerne | | | Modèles sans la largeur moyenne de cerne | | |
|---------------------|--|----------------|---------|--|----------------|---------|
| | Indicateurs | R ² | RMCE | Indicateurs | R ² | RMCE |
| α_R | EL+D+LC | 80% | 0.021 | EL+D+MS | 79% | 0.021 |
| α_T | EL+D+MS+LC | 60% | 0.031 | EL+D+MS | 59% | 0.031 |
| α_T/α_R | EL+LC | 33% | 0.360 | EL | 33% | 0.362 |
| PSF | LC | 0.9% | 0.016 | MS | 0.2% | 0.016 |
| R_R | EL+D+LC | 72% | 0.007 | EL+D | 71% | 0.007 |
| R_T | EL+D+MS | 50% | 0.011 | EL+D+MS | 50% | 0.011 |
| R_S | EL+D+MS+LC | 74% | 0.014 | EL+D+MS | 74% | 0.014 |
| ID | D+EL+MS+LC | 95% | 0.013 | D+EL+MS | 95% | 0.014 |
| RC | D+MS+LC | 91% | 2.782 | EL+D+MS | 91% | 2.812 |
| ER | D+MS+LC+EL | 66% | 234.591 | D+MS+EL | 61% | 252.775 |
| ET | D+LC+EL | 73% | 246.975 | D+EL | 70% | 260.763 |
| GLR | D+MS | 59% | 97.954 | D+MS | 59% | 97.954 |
| GLT | D+MS+LC | 71% | 86.350 | D+MS | 69% | 87.549 |
| GRT | D+LC+MS | 66% | 30.238 | D+MS | 49% | 36.716 |

TABLE 3.4 – Tableau récapitulatif des modèles réalisés par régression pas à pas, précisant les indicateurs retenus, le coefficient de détermination R^2 et l'écart-type de l'erreur du modèle RMCE

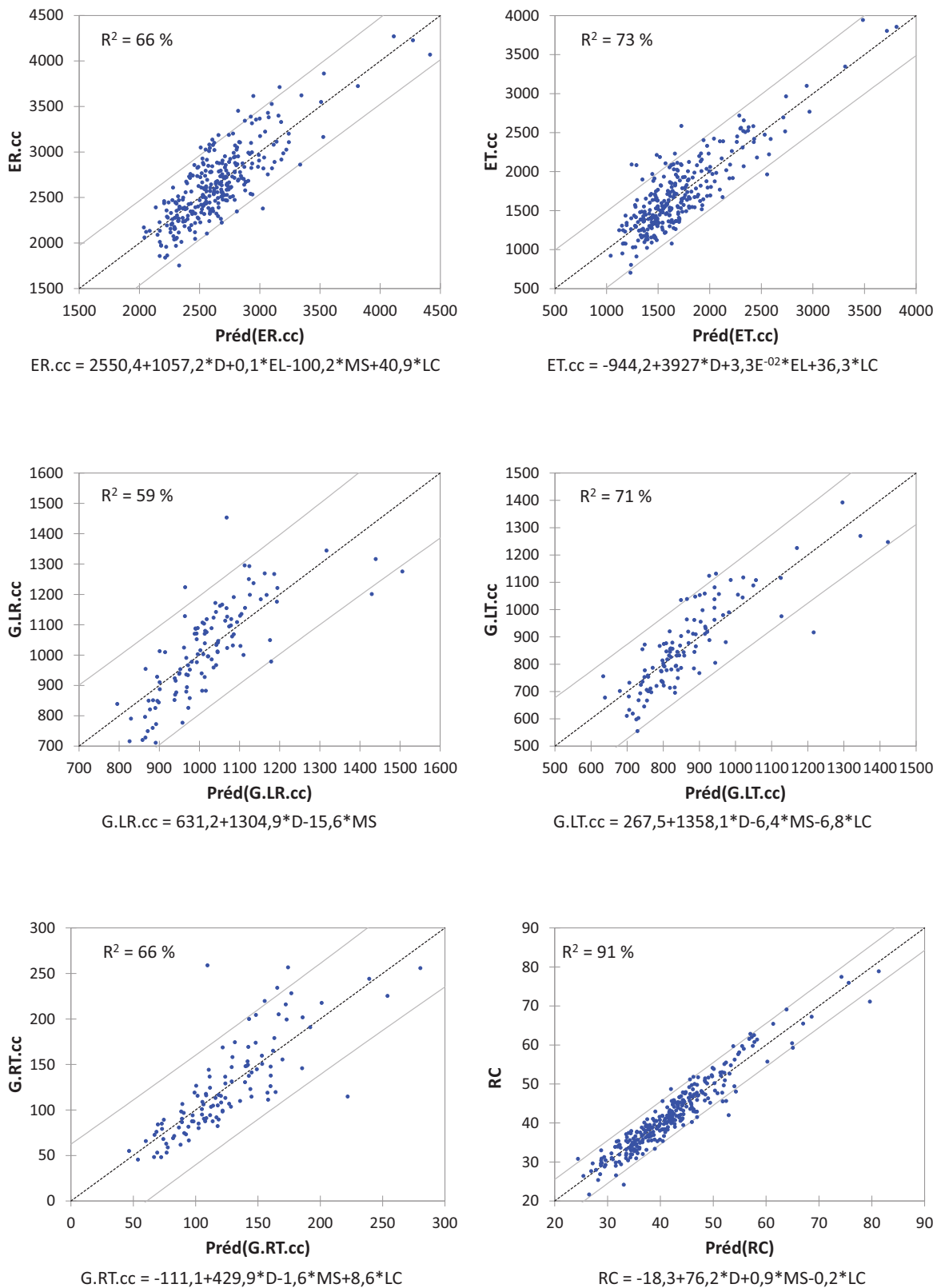


FIGURE 3.15 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures mécaniques en fonction de leur valeur prédite par le modèle

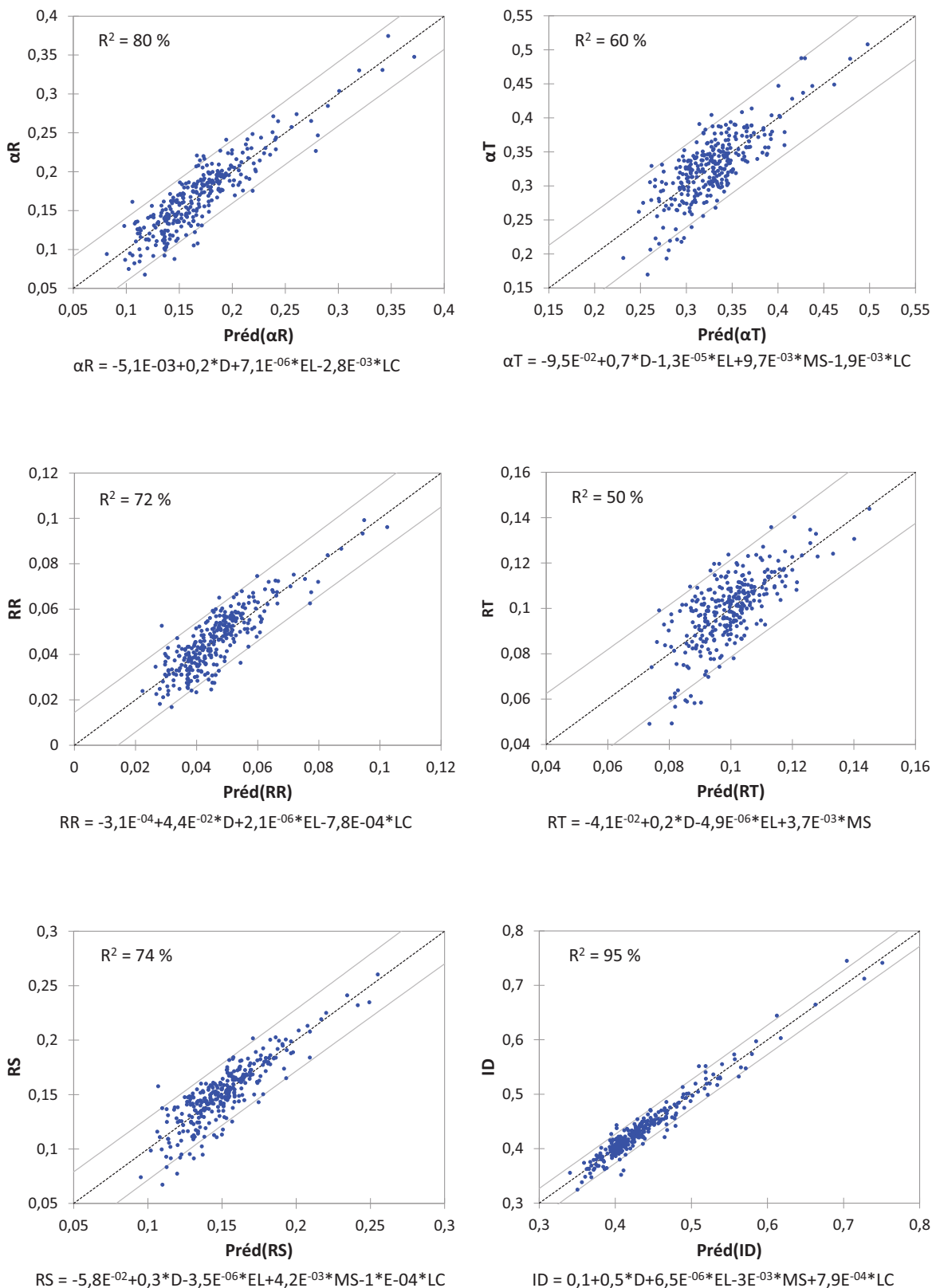


FIGURE 3.16 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures hygrosopiques en fonction de leur valeur prédite par le modèle

3.2.2 Prédiction par spectrométrie proche infrarouge

À partir des spectres obtenus par spectrométrie proche infrarouge, des modèles prédictifs des variables mesurées par ailleurs ont été construits selon la méthode PLS (cf. section 2.4.2.2). L'objectif initial était d'utiliser la NIRS pour améliorer la prédiction des propriétés hygroscopiques, qui sont fortement influencées par la composition chimique du bois (Chong, 1969). Nous avons étendu la démarche aux autres variables mesurées.

Puisque la méthode PLS tient compte de la variable à prédire pour réaliser le modèle, nous avons construit autant de modèles que nous souhaitions prédire de variables, soit 15 modèles. Les résultats obtenus sont observables sur la figure 3.17, la figure 3.18 et la figure 3.19 et résumés dans la table 3.5.

| Variable | n | nb de composantes | R ² | RSE | RMSECV |
|---------------------|-----|-------------------|----------------|-------|--------|
| α_R | 312 | 5 | 82% | 0,020 | 0,024 |
| α_T | 312 | 5 | 74% | 0,025 | 0,030 |
| α_T/α_R | 312 | 3 | 50% | 0,311 | 0,329 |
| <i>PSF</i> | 312 | 5 | 66% | 0,009 | 0,011 |
| R_S | 312 | 7 | 87% | 0,010 | 0,014 |
| R_R | 312 | 6 | 83% | 0,006 | 0,007 |
| R_T | 312 | 6 | 75% | 0,008 | 0,010 |
| <i>RC</i> | 310 | 6 | 85% | 3,6 | 5,0 |
| <i>D</i> | 312 | 7 | 88% | 0,027 | 0,038 |
| <i>E.L.b</i> | 308 | 5 | 84% | 1577 | 1912 |
| <i>MS</i> | 309 | 6 | 76% | 2,4 | 3,1 |
| <i>ID</i> | 312 | 6 | 85% | 0,023 | 0,029 |
| <i>LdC</i> | 312 | 6 | 62% | 1,50 | 1,85 |
| <i>ELcc</i> | 312 | 6 | 90% | 1409 | 1823 |
| <i>ERcc</i> | 312 | 5 | 65% | 235 | 280 |
| <i>ETcc</i> | 312 | 5 | 83% | 198 | 236 |
| <i>GLRcc</i> | 120 | 3 | 53% | 122 | 176 |
| <i>GLTcc</i> | 120 | 3 | 59% | 113 | 144 |
| <i>GRTcc</i> | 119 | 3 | 61% | 32 | 39 |

TABLE 3.5 – Tableau récapitulatif des modèles NIRS réalisés, précisant le nombre de variables (n) et de spectre associé utilisés pour construire le modèle, le nombre de composantes retenues, le coefficient de détermination R^2 de calibration, l'erreur résiduelle de validation croisée (RMSECV) et l'écart-type des résidus (RSE)

Les coefficients de détermination R^2 de l'ensemble des modèles réalisés sont significatifs d'après le test de Fisher (p-value < 2.2e-16).

Il faut noter que la méthode NIRS utilisée donne de meilleures prédictions⁴ que les indicateurs physico-mécaniques pour toutes les propriétés hygroscopiques. En ce qui concerne les propriétés mécaniques, la tendance est inversée sauf pour ET qui est un peu mieux prédit par la NIRS. Bien entendu, il n'y a pas de comparaison à faire pour la densité (D), le module longitudinal (EL) et le module spécifique (MS) puisqu'ils sont mesurés directement.

Il faut malgré tout relever que la densité est particulièrement bien prédite ce qui explique en partie, l'efficacité de la méthode pour les propriétés dépendant fortement de la densité.

Les résultats obtenus pour les mesures hygroscopiques sont comparables à ceux observés dans la littérature (Taylor *et al.*, 2008) (Kokutse *et al.*, 2010). Le PSF n'est tout de même pas très bien prédit, cependant il ne varie pas beaucoup. Lorsqu'on regarde la littérature, dans une étude menée par Kokutse *et al.* (2010) sur le bois de Teck, le modèle construit pour le PSF affiche un R^2 de 0.90 mais avec une plage de variation du PSF plus élevée en valeur relative, allant de 16.2% à 26.0%.

Par ailleurs on peut relever que la largeur de cerne n'est pas bien prédite non plus, bien que ses variations soient élevées.

4. Un comparatif des modèles est proposé dans la table 3.7 de la section suivante.

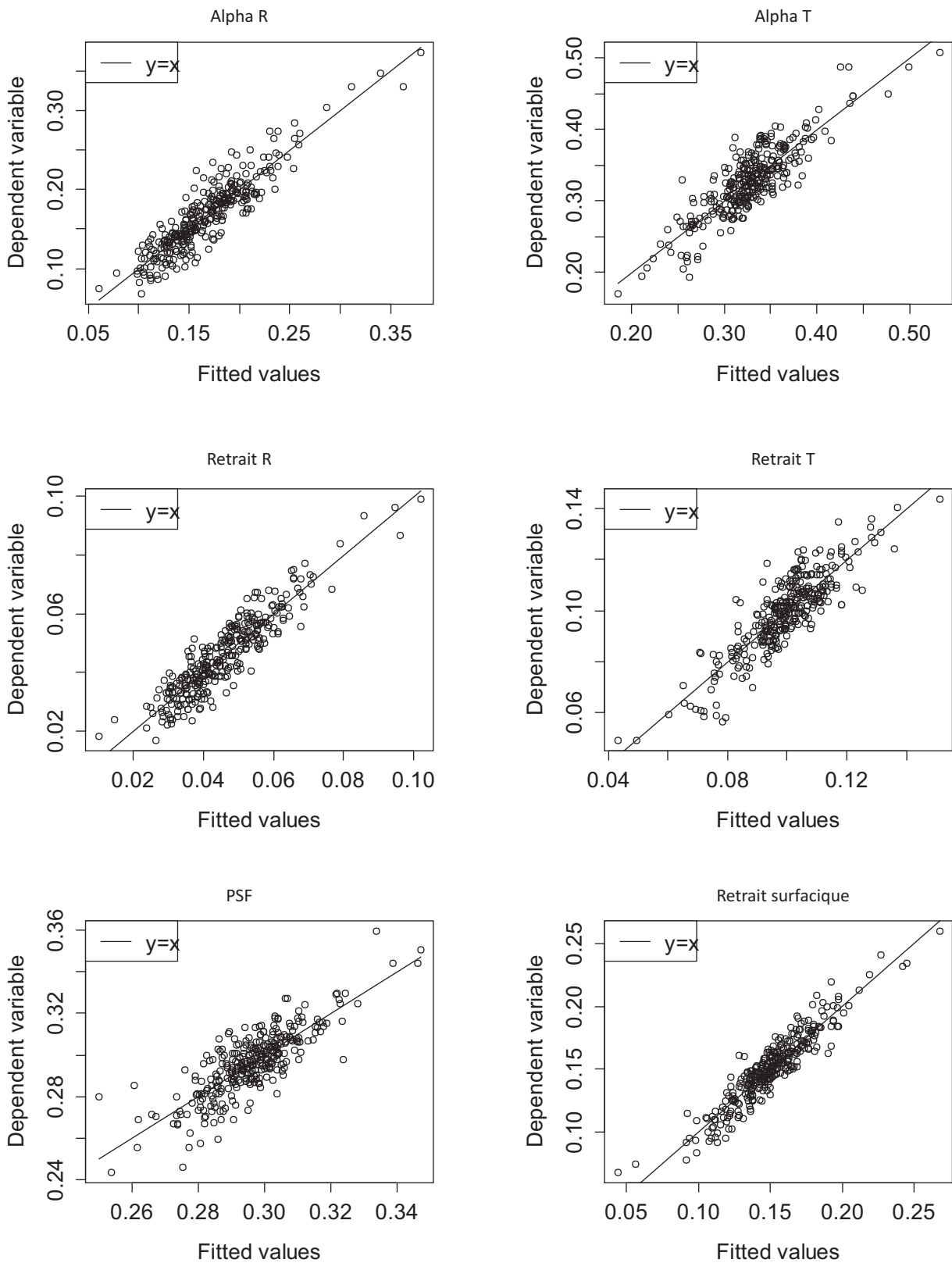


FIGURE 3.17 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures hygroscopiques en fonction de leur valeur prédite par le modèle NIRS

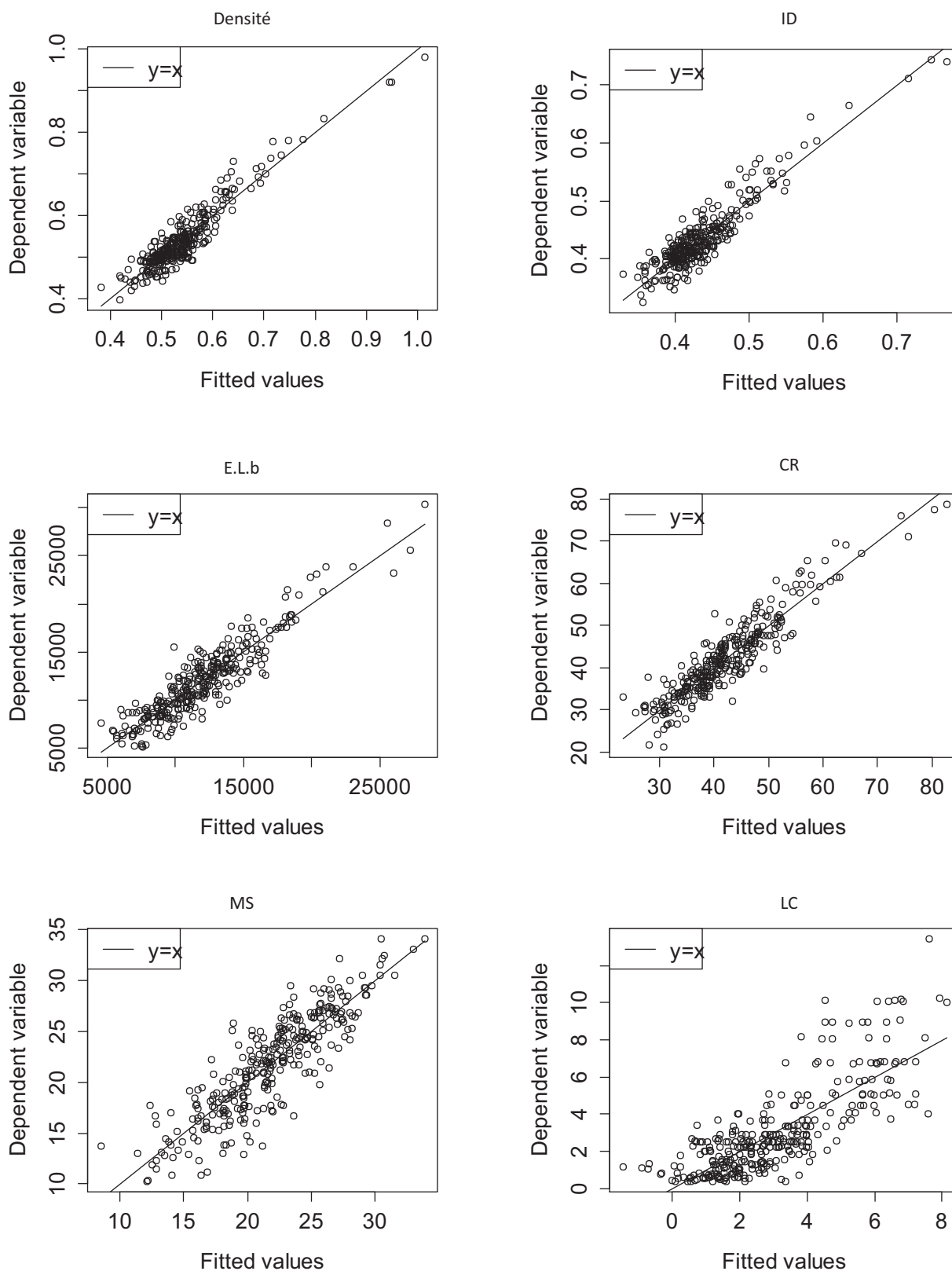


FIGURE 3.18 – Représentation graphique des régressions de variables mesurées en fonction de leur valeur prédite par le modèle NIRS

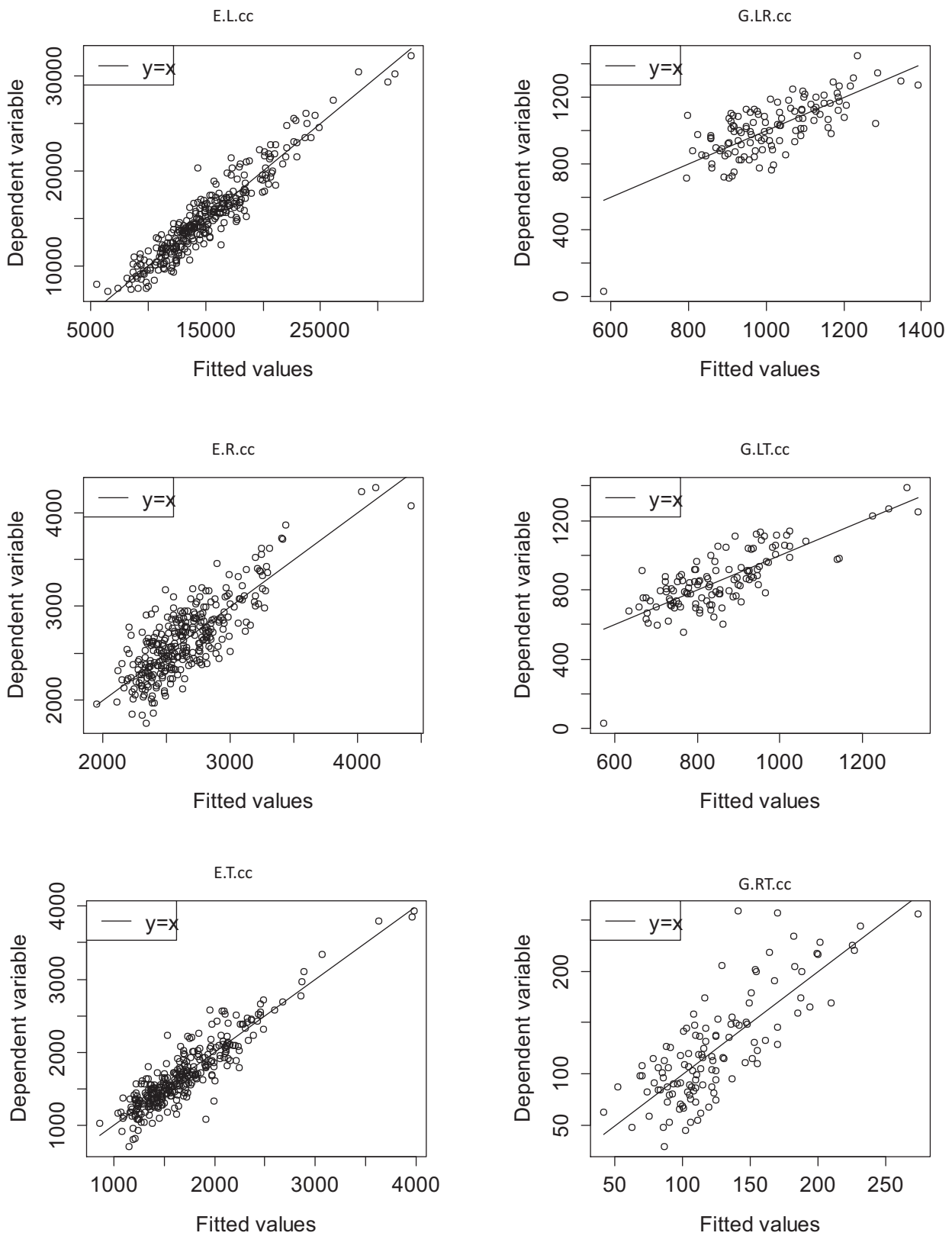


FIGURE 3.19 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures ultra-sonores par contact direct en fonction de leur valeur prédite par le modèle NIRS

3.2.3 Prédiction par modèles combinés

La méthode employée pour combiner les indicateurs physico-mécaniques et les informations disponibles par spectrométrie infra-rouge, consiste à utiliser les valeurs prédites par les modèles NIRS comme données d'entrée des régressions linéaires pas à pas, aux cotés des indicateurs physico-mécaniques.

La table 3.4 résume, pour chaque modèle réalisé, les indicateurs retenus par la méthode pas à pas, le coefficient de détermination de la régression et la racine de l'écart-type de l'erreur du modèle (*RMCE*). Les indicateurs issus de la spectrométrie proche infrarouge sont identifiés par le suffixe « spir ».

La représentation graphique des modèles est visible sur la figure 3.20, la figure 3.21 et la figure 3.22.

| Variable | Modèle avec la largeur moyenne de cerne | | | Modèle sans la largeur moyenne de cerne | | |
|---------------------|--|----------------|---------|---|----------------|---------|
| | Indicateurs | R ² | RMCE | Indicateurs | R ² | RMCE |
| α_R | Dspir+PSFspir+RRspir+D+EL | 90% | 0.015 | | | |
| α_T | Dspir+GLR.ccspir+PSFspir+RRspir+RSspir+D | 82% | 0.021 | | | |
| α_T/α_R | Dspir+LCspir+RRspir+Rtspir+RSspir+D+LC | 66% | 0.261 | Dspir+LCspir+RRspir+Rtspir+RSspir+D | 65% | 0.264 |
| <i>PSF</i> | Dspir+GRT.ccspir+PSFspir+D+LC | 68% | 0.009 | Dspir+GRT.ccspir+PSFspir+D | 68% | 0.009 |
| R_R | Dspir+Msspir+LCspir+RRspir+D+EL+LC | 89% | 0.004 | Dspir+Msspir+LCspir+RRspir+D+EL | 89% | 0.005 |
| R_T | ELspir+IDspir+ α_T/α_R spir+Rtspir+D+MS | 79% | 0.007 | | | |
| R_S | Dspir+Msspir+RSspir+D+EL | 91% | 0.009 | | | |
| <i>ID</i> | Dspir+IDspir+GRT.ccspir+D | 96% | 0.012 | | | |
| <i>RC</i> | Dspir+RCspir+Msspir+IDspir+D+MS | 95% | 2.071 | | | |
| <i>ER</i> | IDspir+ER.ccspir+GRT.ccspir+LCspir+ α_R spir+ α_T/α_R spir+D+EL+MS+LC | 81% | 176.622 | IDspir+ER.ccspir+GRT.ccspir+ α_R spir+ α_T/α_R spir+Rtspir+D+EL+MS | 80% | 180.738 |
| <i>ET</i> | IDspir+ET.ccspir+LCspir+ α_T spir+D+MS+LC | 89% | 157.174 | IDspir+ET.ccspir+ α_T spir+RRspir+D+EL | 89% | 160.205 |
| <i>GLR</i> | Dspir+ELspir+ER.ccspir+ET.ccspir+GLR.ccspir+ α_T spir+D+MS | 78% | 73.460 | | | |
| <i>GLT</i> | ER.ccspir+ET.ccspir+GLT.ccspir+GRT.ccspir+ α_T spir+PSFspir+D | 82% | 69.775 | | | |
| <i>GRT</i> | IDspir+GRT.ccspir+D+MS+LC | 78% | 24.630 | Dspir+GLT.ccspir+GRT.ccspir+ α_T/α_R spir+D+MS | 76% | 25.769 |

TABLE 3.6 – Tableau récapitulatif des modèles réalisés par régression pas à pas, précisant les indicateurs retenus, le coefficient de détermination R^2 et l'écart-type de l'erreur du modèle *RMCE*

Comme cela était attendu, les modèles construits en combinant les deux méthodes affichent de meilleurs coefficients de détermination.

Il faut noter que bien que l'indicateur NIRS correspondant à la variable à prédire, soit généralement choisi au début de la régression pas à pas, il n'est pas systématiquement retenu dans la combinaison finale. Ceci est dû aux corrélations existantes avec les indicateurs physico-mécaniques et les autres indicateurs NIRS.

On peut constater que cette fois, la largeur de cerne n'apporte quasiment aucune amélioration. Il est permis de discuter de l'intérêt de garder ce paramètre assez coûteux à mesurer.

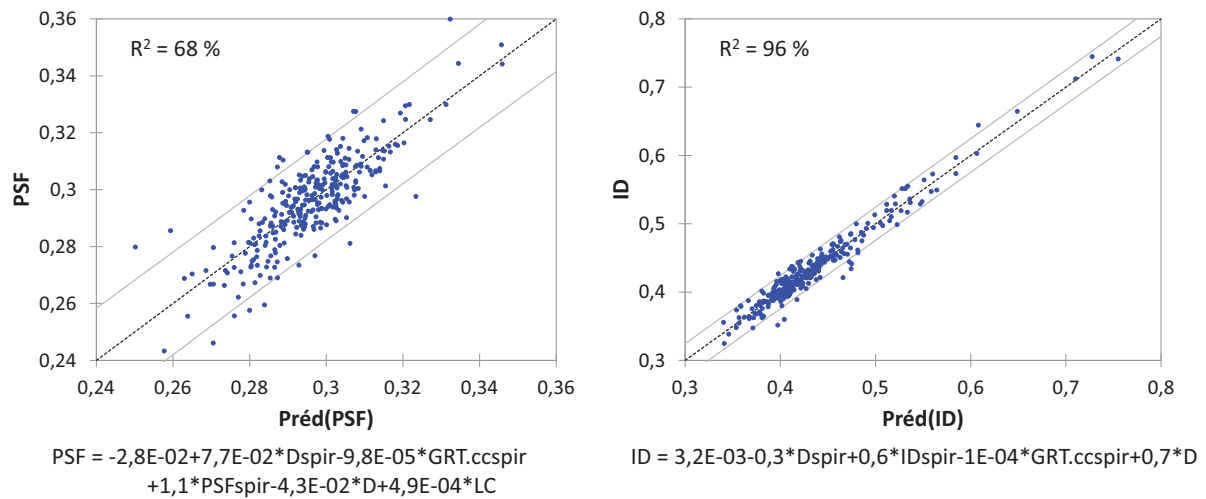


FIGURE 3.20 – Représentation graphique des régressions du PSF et de l'infradensité en fonction de leur valeur prédite par le modèle combiné

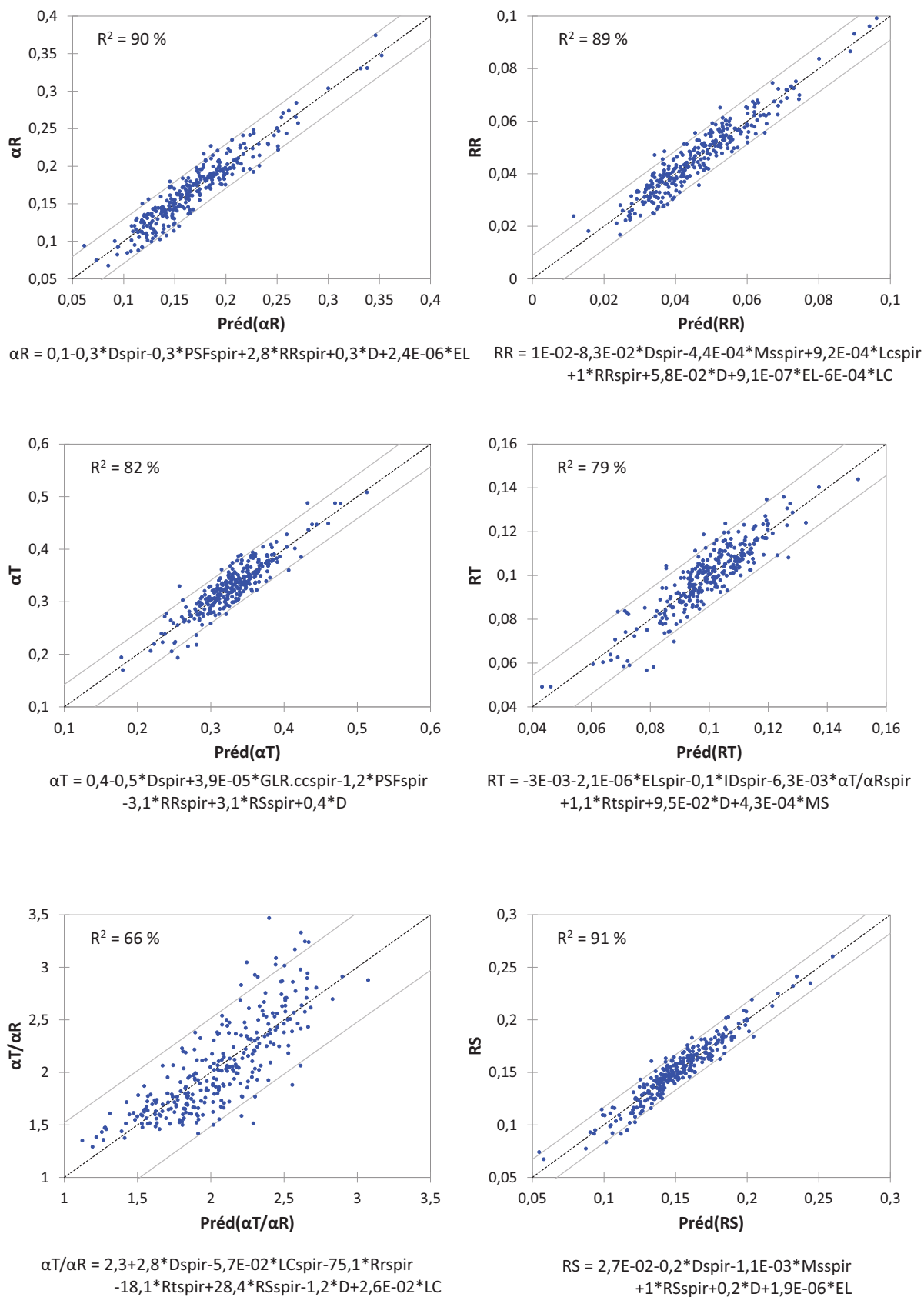


FIGURE 3.21 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures hygroscopiques en fonction de leur valeur prédite par le modèle combiné

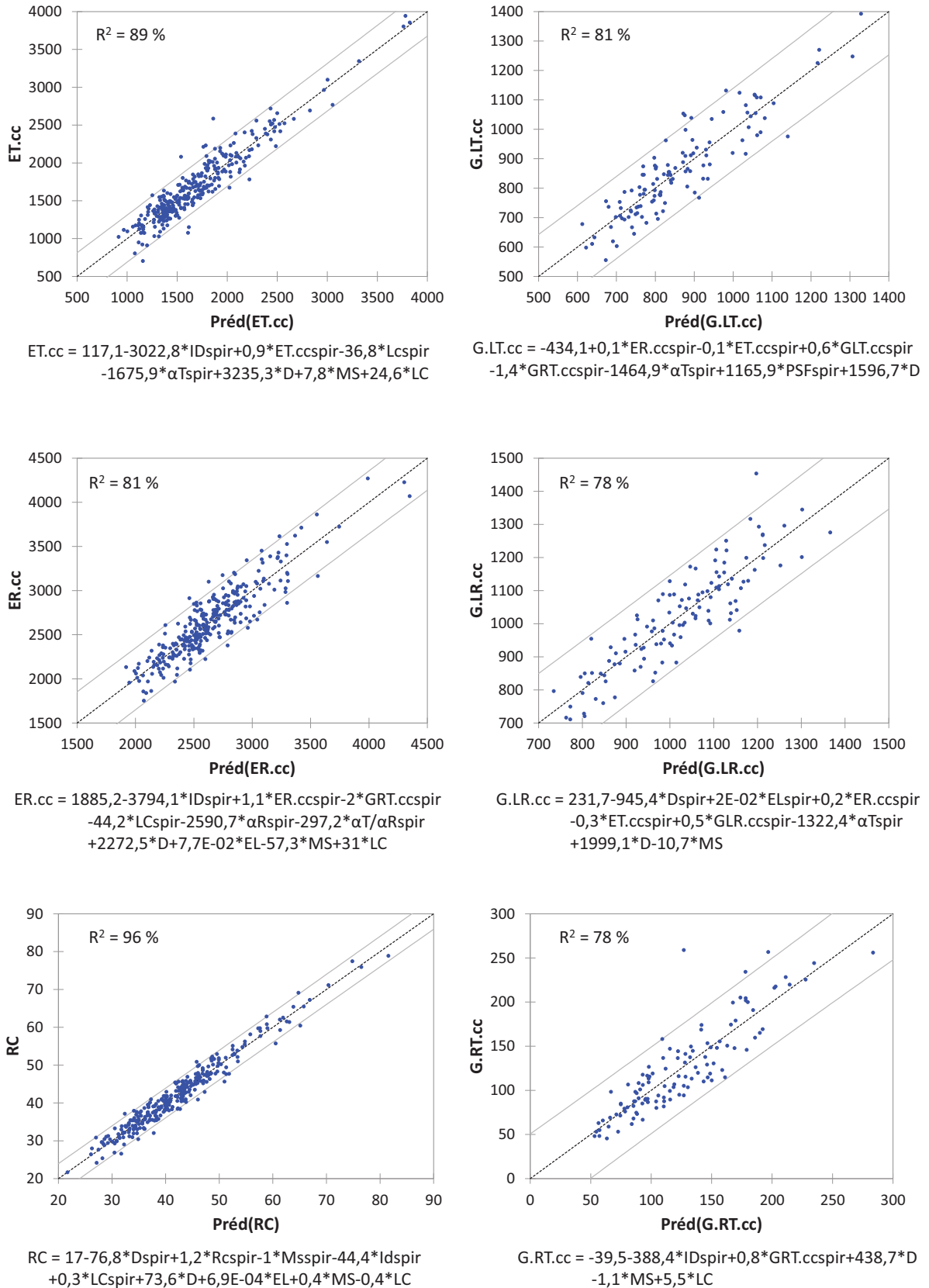


FIGURE 3.22 – Représentation graphique des régressions des variables issues des mesures mécaniques en fonction de leur valeur prédite par le modèle combiné

3.2.4 Conclusion pour ce chapitre

La table 3.7 permet d'offrir une vision d'ensemble des trois étapes de modélisations réalisées dans cette étude.

| Variable | Modèle physico-mécanique | | Modèle Nirs | Modèle combiné | |
|---------------------|--------------------------|-------------|----------------|----------------|--|
| | R ² | Indicateurs | R ² | R ² | Indicateurs |
| α_R | 80% | EL+D+LC | 82% | 90% | Dspir+PSFspir+RRspir+D+EL |
| α_T | 60% | EL+D+MS+LC | 74% | 82% | Dspir+GLR.ccsspir+PSFspir+RRspir+RSspir+D |
| α_T/α_R | 33% | EL+LC | 50% | 66% | Dspir+LCspir+RRspir+Rtspir+RSspir+D+LC |
| PSF | 0.9% | LC | 66% | 68% | Dspir+GRT.ccsspir+PSFspir+D+LC |
| R_R | 72% | EL+D+LC | 83% | 89% | Dspir+Mssspir+LCspir+RRspir+D+EL+LC |
| R_T | 50% | EL+D+MS | 75% | 79% | ELspir+IDspir+ α_T/α_R spir+Rtspir+D+MS |
| R_S | 74% | EL+D+MS+LC | 87% | 91% | Dspir+Mssspir+RSspir+D+EL |
| ID | 95% | D+EL+MS+LC | 85% | 96% | Dspir+IDspir+GRT.ccsspir+D |
| RC | 91% | D+MS+LC | 85% | 95% | Dspir+RCspir+Mssspir+IDspir+D+MS |
| ER | 66% | D+MS+LC+EL | 65% | 81% | IDspir+ER.ccsspir+GRT.ccsspir+LCspir+ α_R spir+ α_T/α_R spir+D+EL+MS+LC |
| ET | 73% | D+LC+EL | 83% | 89% | IDspir+ET.ccsspir+LCspir+ α_T spir+D+MS+LC |
| GLR | 59% | D+MS | 53% | 78% | Dspir+ELspir+ER.ccsspir+ET.ccsspir+GLR.ccsspir+ α_T spir+D+MS |
| GLT | 71% | D+MS+LC | 59% | 82% | ER.ccsspir+ET.ccsspir+GLT.ccsspir+GRT.ccsspir+ α_T spir+PSFspir+D |
| GRT | 66% | D+LC+MS | 61% | 78% | IDspir+GRT.ccsspir+D+MS+LC |

TABLE 3.7 – Tableau récapitulatif des modèles réalisés par régression, précisant les indicateurs retenus et le coefficient de détermination R^2 , pour chaque méthode

L'analyse de la dispersion des résidus pour les modèles construits, par des tests d'hypothèses (test de Bartlett et test de Levene) ne révèle pas d'effet « essence » significatif (dans notre échantillonnage). Cela peut également s'observer graphiquement en distinguant les essences sur la représentation des résidus en fonction de la valeur prédite, comme sur l'exemple donné dans la figure 3.23. Il n'est donc pas nécessaire de construire un modèle de chaque propriété pour chaque essence. De tels modèles seraient probablement un peu meilleurs, mais bien moins pratiques à utiliser qu'un modèle global.

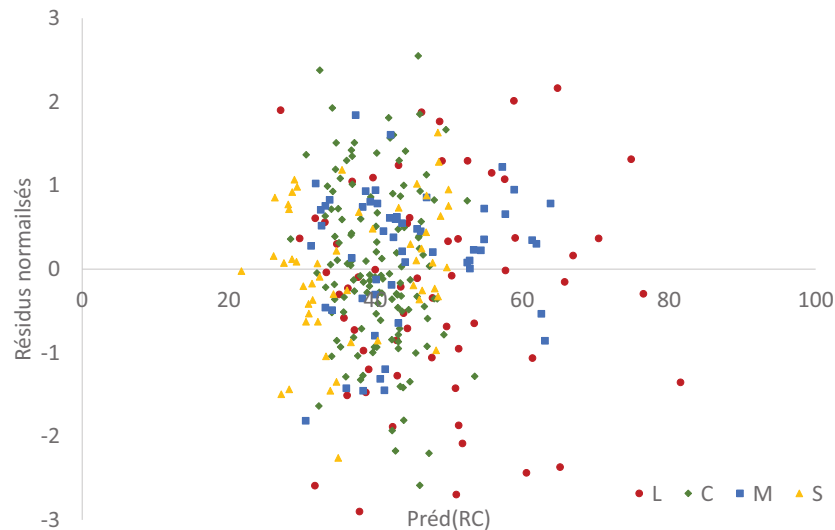


FIGURE 3.23 – Représentation graphique des résidus en fonction de la valeur prédite de rupture en compression par le modèle combiné

La combinaison de mesures physico-mécaniques simples et d'une mesure de spectrométrie proche infra-rouge donne de bons résultats dans la prédiction des propriétés élastiques (ainsi que la contrainte à la rupture en compression) et hygroscopiques des bois de pin « sans défauts ».

Toutefois la manière de combiner les indicateurs physico-mécaniques et ceux issus de la NIRS utilisée peut être critiquée. En effet, avec cette méthode les indicateurs entrant dans la régression sont quelquefois fortement corrélés entre eux.

Une alternative de combinaison intéressante serait d'introduire directement les indicateurs physico-mécaniques comme colonnes supplémentaires de la matrice des spectres de la NIRS, avant de réaliser la régression PLS.

Les prédictions affichées sont par ailleurs à nuancer puisque les coefficients de détermination sont ceux de la calibration des modèles. L'étape suivante est la vérification des modèles avec un autre lot de bois « sans défauts » de pin.

Cependant la démarche mise en œuvre mérite d'être approfondie car elle permettrait d'offrir au concepteur de composants mécaniques, les caractéristiques d'une pièce de bois donnée, avec beaucoup moins d'incertitudes.

Conclusion générale

Contexte et Enjeux

Ce travail de thèse s'inscrit dans le cadre de grands enjeux complémentaires, que l'on peut aborder :

Du point de vue scientifique :

- identifier des relations entre paramètres de structure et propriétés du bois, permettant d'éviter de mesurer toutes les propriétés sur toutes les essences, et tous les types de bois ;
- développer les méthodes rapides et non invasives de mesure des propriétés macroscopiques utiles à l'ingénieur.

Du point de vue industriel :

- trouver des outils et méthodes permettant une plus forte valeur ajoutée des bois, se rapprochant des réalisations de l'artisanat de haute qualité ;
- redonner aux bois leur place dans le paysage des matériaux pour la conception mécanique.

Du point de vue sociétal :

- contribuer aux objectifs de la COP 21, par la substitution de matériaux à fort coût énergétique et émission de carbone fossile, par des matériaux à faible coût énergétique et capacité de stockage du carbone atmosphérique.
- contribuer au redressement de la filière forêt-bois française du point de vue de la valorisation des sciages et de l'emploi (une partie des économies financières sur l'énergie pourrait être affectée aux emplois qualifiés demandés par le bois).

Bien entendu, pour le moment ce travail de thèse n'apporte qu'une infime contribution à ces enjeux. Même sur le plan industriel, il se situe très en amont des problématiques actuelles des acteurs de la filière forêt-bois, et des concepteurs du génie mécanique.

La caractérisation des bois « sans défauts »

L'échantillonnage réalisé a permis de balayer une large frange de la diversité des bois de pin « sans défauts ». Bien que cela n'en soit pas le principal objectif, le travail de caractérisation réalisé a permis de contribuer à enrichir modestement les bases de données. Par ailleurs, la collection d'éprouvettes bien orientées qui a été élaborée, pourra servir aux perspectives décrites ci-après.

Ce travail n'avait pas pour but de développer de nouvelles méthodes de caractérisation, mais d'utiliser « en routine » des méthodes déjà éprouvées.

Toutefois, pour le dispositif RUS, qui est encore en développement, ce travail sur les bois de pins a permis de mettre à jour certaines faiblesses, et de réaliser de petites améliorations, aussi bien du côté du protocole de mesure que de l'étape d'identification.

Les difficultés rencontrées dans la réalisation des mesures ultrasonores par résonance et par contact illustrent la complexité de mesurer « proprement » les propriétés d'un matériau aussi complexe que le bois. En particulier, ces méthodes qui fonctionnent bien sur des bois de feuillus comme le hêtre (plus homogènes), montrent leurs limites dans la mesure des propriétés transverses d'un multicouche fortement contrasté tel que le bois de pin.

Conclusion générale

Les termes non diagonaux de la matrice des complaisances n'ayant pas pu être mesurés avec la RUS, comme cela avait été escompté au démarrage de cette étude, il serait intéressant de réaliser d'autres mesures afin de compléter la caractérisation du comportement élastique de notre échantillon. Par exemple, des mesures de compression instrumentées, permettraient de déterminer les coefficients de Poisson.

Ces retours d'expérience mettent en évidence le potentiel de travail de recherche qu'il reste encore à mener dans le développement des méthodes de caractérisation non destructives.

À propos des modèles prédictifs

La combinaison de mesures physico-mécaniques et de la spectrométrie proche infra-rouge s'est révélée fructueuse. Ce constat illustre encore les liens entre la composition chimique du bois et ses propriétés physico-mécaniques. Lorsque l'on s'affranchit de la part de variabilité expliquée par des facteurs physiques, et en particulier la densité, la spectrométrie proche infra-rouge révèle des facteurs explicatifs supplémentaires.

On peut toutefois reprocher à la méthode NIRS, son côté « boîte noire » qui ne permet pas d'identifier les facteurs explicatifs et donc de contribuer à la compréhension des liens structure-propriétés.

La méthode de construction des modèles par régression linéaire pas à pas choisie est simple mais semble satisfaisante. (On peut rappeler que c'est également le modèle linéaire qui a été retenu par Guitard et El Amri (1987) pour expliquer les propriétés élastiques des résineux.) Les régressions de type log-log, n'ont pas donné de meilleurs résultats sur notre échantillon. Elles n'ont donc pas été retenues, puisqu'il n'apparaît pas de justification physique évidente à ce type de relation. Seul l'effet multiplicatif de la densité et du module spécifique, a été pris en compte par l'introduction du module élastique longitudinal dans les données d'entrée des modèles.

Il apparaît toutefois des perspectives d'amélioration dans la manière de combiner les indicateurs physico-mécaniques et ceux issus de la NIRS. Dans la méthode actuelle, ces indicateurs sont quelquefois fortement corrélés entre eux, ce qui nuit à l'efficacité du modèle.

Deux perspectives ont été envisagées pour pallier ce problème :

- utiliser les composantes PLS des modèles NIRS comme données d'entrée des régressions linéaires pas à pas, aux côtés des indicateurs physico-mécaniques,
- ou introduire les indicateurs physico-mécaniques comme colonnes supplémentaires de la matrice des spectres de la NIRS.

Ces propositions d'apparences simples demandent tout de même, pour être correctement mises en œuvre, de prendre des précautions à cause de la manipulation statistique d'un grand nombre de données d'entrées, de natures différentes (données physiques, et valeurs de spectre).

Bien que les modèles linéaires semblent satisfaisants, on pourrait envisager par ailleurs, de les comparer à d'autres outils statistiques, tels que les réseaux de neurones (Cointe, 2003; Grazide, 2014).

Extension du cadre scientifique

L'étude et la prédiction des propriétés élastiques linéaires et hygroscopiques apparaissent comme une première étape logique dans la caractérisation des bois « sans défauts ». Pour répondre aux besoins des concepteurs de composants structurels, il faut envisager de compléter leur caractérisation mécanique.

Si l'on considère l'application de la démarche employée, au comportement viscoélastique linéaire du bois, on peut à priori, s'attendre à ce que la combinaison de la densité, du module spécifique et la NIRS soit efficace dans la prédiction de l'amortissement (Brémaud *et al.*, 2010). En revanche, pour la prédiction des fluages de moyenne ou longue durée ou le fluage mécanosorptif, la question reste entière.

On peut également s'interroger sur la prédiction du comportement au-delà de la limite élastique (déformations et contraintes limites avant danger, notamment en compression et cisaillement transverses et propagation de fissure). Cependant sur le bois « sans défauts », plus proche des propriétés intrinsèques du matériau bois que les pièces de bois d'œuvre, on peut escompter de meilleures corrélations entre les propriétés élastiques et les contraintes limites, qui seront donc certainement plus faciles à prédire.

Les essais ont été réalisés sur des échantillons de faibles dimensions, on peut donc s'attendre à observer un « effet d'échelle » en étudiant des pièces plus grandes. Ce changement d'échelle induit davantage d'hétérogénéité, ce qui pour le bois « sans défauts » correspond aux variations de genèse du bois sur de petites distances. En augmentant les dimensions de la pièce, on s'expose également davantage au risque de variations de fil (qui influe notamment sur la résistance à la contrainte de flexion).

Enfin pour poursuivre la démarche, il faudrait prendre en compte les variations d'humidité du bois. Dans notre étude, la teneur en eau des éprouvettes au moment des mesures était stabilisée autour de 12%. Dans une ambiance non contrôlée, il faudra nécessairement la mesurer et prendre en compte ce paramètre supplémentaire, pour l'ajouter aux données d'entrée des modèles. L'addition de ce paramètre ne devrait pas poser de problème majeur car il est très facile à mesurer et que l'évolution des propriétés élastiques des bois en fonction de l'humidité a déjà été étudiée (Guitard, 1987). Il faudra cependant recréer des modèles NIRS pour chaque teneur en eau, ce qui alourdit un peu le processus de création des modèles.

Vers le transfert industriel

Au delà des étapes à franchir pour parfaire la caractérisation des bois « sans défauts », le transfert vers l'industrie amène d'autres questionnements.

Les indicateurs retenus ayant été pensés pour être facilement mesurables en milieu industriel, de nombreux outils sont compatibles avec la démarche. On peut citer pour la mesure du module longitudinal, les méthodes vibratoires, par ultrasons, ou par essai mécanique non destructif. Le choix du dispositif est évidemment à adapter au contexte de l'utilisateur (PME de pointe ou grande série industrielle).

Conclusion générale

On peut également se demander s'il est préférable de construire des modèles pour chaque essence ou par groupe d'essences proches, comme dans cette étude. La réponse est nécessairement dépendante de l'incertitude de la méthode de prédiction et du niveau de précision souhaité.

La démarche de caractérisation semble indissociable d'une bonne traçabilité des bois. Il faudra donc parallèlement, mettre au point des outils d'identification (par code barre ou puce RFID par exemple) de chaque pièce de bois permettant son référencement dans des bases de données d'identités, regroupant les propriétés prédites et mesurées ainsi que la disponibilité des pièces.

À ces questions techniques viennent s'ajouter des questions d'ordre stratégique. Il faut nécessairement se demander quelles sont les propriétés à prédire, avec quelle incertitude, et pour quels usages. Cette réflexion doit s'accompagner d'une analyse financière.

De la même manière on peut se demander à quel moment et par qui doit se faire la caractérisation ? Est-il plus intéressant de mesurer les pièces en ligne comme cela est déjà le cas pour le bois d'œuvre ? Ou alors en laboratoire, dans des conditions plus contrôlées ? Ou bien encore en externe par des laboratoires spécialisés au service d'une profession.

Enfin, le bois c'est compliqué, mais il va bien falloir y passer.



Bibliographie

- Alexandre, S., Gault, J., Guerin, A.-J., Lefebvre, E., de Menthiere, C., Rathouis, P., Texier, P.-H., Thibault, H.-L., Toussaint, X., et Attali, C. Les usages non alimentaires de la biomasse. Technical report, 2012.
- Arakami, M., Baillères, H., Brancheriau, L., Kronland-Martinet, R., et Ystad, S. Sound quality assessment of wood for xylophone bars. *Journal of Acoustical Society of America*, 121(4) : 2407–2420, 2007.
- Arciniegas, A., Brancheriau, L., et Lasaygues, P. Tomography in standing trees : revisiting the determination of acoustic wave velocity. *Annals of Forest Science*, 72 :685–691, 2015.
- Ashby, M. F., Bréchet, Y. J. M., Cebon, D., et Salvo, L. Selection strategies for materials and processes. *Materials and Design*, 25 :51–67, 2004.
- Ashby, M. F. Materials selection in mechanical design. 2005.
- Ashby, M. F. et Jones, D. R. H. Matériaux - Tome 1 : Propriétés, applications et conception. Dunod, 2013.
- Bernoulli, D. Réflexions et éclaircissements sur les nouvelles vibrations des cordes exposées dans les mémoires de l'Académie de 1747 et 1748. Mémoire de l'Académie des Sciences de Berlin, 1748.
- Bertrand, D. et Dufour, E. Spectroscopie infra-rouge. Collections Sciences et techniques agroalimentaires, 2000.
- Bertrand, D. Étalonnage multidimensionnel : application aux données spectrales. Technical report, Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- Bjorn-Helge, M. et Wehrens, R. The pls package : Principal component and partial least square regression in R. *Journal of Statistical Software*, 18(2), 2007.
- Bodros, E., Pillin, I., Montrelay, N., et Baley, C. Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications? *Composite Science and Technology*, 67 :462–470, 2007.
- Bordonné, P.-A. Module dynamique et frottement intérieur dans le bois. Mesures sur poutres flottantes en vibration naturelles. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1989.

BIBLIOGRAPHIE

- Boulay, C. Capping H.P.C. cylinders with the sand box : new developments. Issu de *4th International Symposium on Utilization of High-strength/High-performance concrete*, pages 197–202, 1996.
- Boulay, C. et De Larrard, F. The sand-box. *Concrete International*, 4 :63–66, 1993.
- Brancheriau, L. et Baillères, H. Natural vibration analysis of clear wooden beams : a theoretical review. *Wood Science and Technology*, 36 :347–365, 2002.
- Brancheriau, L., Baillères, H., et Guitard, D. Comparison between modulus of elasticity values calculated using 3 and 4 point bending tests on wooden samples. *Wood Science and Technology*, 36(5) :367–383, November 2002.
- Brancheriau, L., Baillères, H., Détienne, P., Kronland, R., et Metzger, B. Classifying xylophone bar materials by perceptual, signal processing and wood anatomy analysis. *Annals of Forest Science*, 2006.
- Brancheriau, L. Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique. PhD thesis, 2002.
- Brancheriau, L. Influence of cross section dimensions on Timoshenko's shear factor – Application to wooden beams in free-free flexural vibration. *Annals of Forest Science*, 63 :319–321, 2006.
- Brancheriau, L. Vibrations de poutre - Caractérisation acoustique du matériau bois pour son utilisation en structure. Editions universitaires européennes, 2011.
- Brancheriau, L., Paradis, S., et Baillères, H. Bing : Beam Identification by Non destructive Grading. CIRAD, 2007.
- Brancheriau, L., Kouchade, C., et Brémaud, I. Internal friction measurement of tropical species by various acoustic methods. *Journal of Wood Science*, 56 :371–379, 2010.
- Bréchet, Y., Ashby, M. F., Dupeux, M., et Louchet, F. Choix et usage des matériaux. *Techniques de l'Ingenieur*, 1997.
- Brémaud, I., Minato, K., Langbour, P., et Thibaut, B. Physico-chemical indicators of inter-specific variability in vibration damping of wood. *Annals of Forest Science*, 67(7) :707, 2010.
- Brémaud, I., Gril, J., et Thibaut, B. Anisotropy of wood vibrational properties : dependence on grain angle and review of literature data. *Wood Science and Technology*, 45 :735–754, 2011.
- Brown, C. The global outlook for future wood supply from forest plantations. Technical report, Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2000.
- Bucur, V. Acoustics of wood. Springer Series in Wood Science, Springer, 2006.
- Camargo, M. Choix des matériaux dans une conception innovante. *Techniques de l'Ingénieur*, 2012.

- Cave, I. D. The anisotropic elasticity of the plant cell wall. *Wood Science and Technology*, 2 (4) :268–278, 1968.
- Chen, J., Wang, Q., Shen, W. Z., Pang, X., Li, S., et Guo, X. Structural optimization study of composite wind turbine blade. *Material and Design*, 46 :247–255, 2013.
- Chiu, C.-M., Lin, C.-H., et Yang, T.-H. Application of nondestructive methods to evaluate mechanical properties of 32-year-old Taiwan incense cedar (*Calocedrus formosana*) wood. *BioResources*, 8(1) :688–700, 2013.
- Chong, E. T. Effect of extractives on shrinkage and other hygroscopic properties of ten southern pine woods. *Wood Fiber*, 1 :124–133, 1969.
- Cointe, A. Pr evision de r esistances d'assemblages bois par organes multiples   l'aide des réseaux de neurones. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2003.
- Critchfield, W. B. et Little, E. L. J. Geographic distribution of the pine of the world. Washington, D.C. : U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, 1966.
- da Silva, A. R., Pastore, T. C. M., Braga, J. W. B., Davrieux, F., Okino, E. Y. A., Coradin, V. T. R., Camargos, J. A. A., et do Prado (In memoriam), A. G. S. Assessment of total phenols and extractives of mahogany wood by near infrared spectroscopy (NIRS). *Holzforschung*, 67 :1–8, 2013.
- Dahl, K. B. Mechanical properties of clear wood from Norway spruce. PhD thesis, Norwegian University of Science and Technology, 2009.
- Donaldson, L. Microfibril angle : measurement, variation and relationships – A review. *Bio-technology*, 29(4) :345–386, 2008.
- Ferry, J. D. Viscoelastic properties of polymers. John Wiley & Sons, 1961.
- Fournier, M., Dlouh a, J., Jaouen, G., et Alm eras, T. Integrative biomechanics for tree ecology : beyond wood density and strength. *Journal of Experimental Botany*, 2013.
- Foyer-B enos, C. Résultats des enqu etes annuelles de branche réalisées en 2011 sur les exploitations forestières et scieries en 2010 en Languedoc-Rousillon. Technical report, AGRESTE, 2012.
- Franceschini, T., Longuetaud, F., Bontemps, J.-D., Bouriaud, O., Caritey, B.-D., et Leban, J.-M. Effect of ring width, cambial age, and climatic variables on the within-ring wood density profile of Norway spruce *Picea abies* (L.) Karst. *Trees*, 2013.
- Freyburger, C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T., et Leban, J.-M. Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of Forest Science*, 66, 2009.
- Gardiner, B., Barnett, J., Saranp a a, P., et Gril, J. The biology of reaction wood. Springer Series in Wood Science, 2014.
- Gibson, L. et Ashby, M. Cellular Solids : Structure and Properties. Cambridge Solid State Science Series. Cambridge University Press, 1987. ISBN 9781316025420.

BIBLIOGRAPHIE

- Gibson, L. E. The hierarchical structure and mechanics of plant materials. *Journal of the Royal Society Interface*, 2012.
- Gérard, J. Caractérisation technologique et règles de classement des bois de *Pinus caribaea* et *Pinus elliottii* de Nouvelle-Calédonie. Technical report, CIRAD, 2005.
- Grazide, C. Une modélisation de la résistance en flexion du Pin Maritime utilisé en construction. PhD thesis, Université de Bordeaux, 2014.
- Guitard, D. Mécanique du matériau bois et composites. Cepadues-Editions, 1987.
- Guitard, D. et El Amri, F. Modèles prévisionnels de comportement élastique tridimensionnel pour les bois feuillus et les bois résineux. *Annals of Forest Science*, 44(3) :335–358, 1987.
- Gutiérrez Oliva, A., Baonza Merino, V., Fernández-Golfín Seco, J. I., García, C., et Hermoso Prieto, E. Effect of growth conditions on wood density of Spanish *Pinus nigra*. *Wood Science and Technology*, 40 :190–204, 2006.
- Haines, D. W., Leban, J. M., et Herbé, C. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood Science and Technology*, 30 :253–263, 1996.
- Hata, T., Umemura, K., Yamauchi, H., Nakayama, A., Kawai, S., et Sasaki, H. Design and pilot production of a "spiral-winder" for the manufacture of cylindrical laminated veneer lumber. *Journal of Wood Science*, 47 :115–123, 2001.
- Hearmon, R. et Paton, J. The maximum moisture content of wood. *Forestry*, 1958.
- Hoffmeyer, P. et Pedersen, J. G. Evaluation of density and strength of Norway spruce by near infrared reflectance spectroscopy. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 53 :165–170, 1995.
- Jahan, A., Ismail, M. Y., Sapuan, S. M., et Mustapha, F. Material screening and choosing methods – A review. *Material and Design*, 31 :696–705, 2010.
- Kelley, S. S., Rials, T. G., Snell, R., Groom, L. H., et Sluiter, A. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, 38 :257–276, 2004.
- Koch, P. Utilization of the Southern Pines - Volume 1, volume 420. 1972.
- Kohlhauser, C., Hellmich, C., Vitale-Brovarone, C., Boccaccini, A. R., Rota, A., et Eberhardsteiner, J. Ultrasonic characterisation of porous biomaterials across different frequencies. *Strain*, 45 :34–44, 2009.
- Kokutse, A.-D., Brancheriau, L., et Chaix, G. Rapid prediction of shrinkage and fibre saturation point on teak (*Tectona grandis*) wood based on near-infrared spectroscopy. *Annals of Forest Science*, 67 :403p1–403p10, 2010.
- Kolsky, H. Stress waves in solids. Dover, 1963.
- Kotsovos, M. D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. *Matériaux et Construction*, 16(1) :3–12, 1983.

- Kretschmann, D. E. et Green, D. W. Lumber stress grades and design properties. Issu de *Wood Handbook-Wood as an Engineering Material*, chapitre 6, page 1–15. Forest Products Laboratory, Madison, department edition, 1999.
- Lachenbruch, B., Moore, J. R., et Evans, R. Radial Variation in Wood Structure and Function in Woody Plants, and Hypotheses for its Occurrence, pages 121–164. Springer Netherlands, Dordrecht, 2011. ISBN 978-94-007-1242-3.
- Laroze. Mécanique des structures. Tome 3 : Thermique des structures, Dynamique des structures. Masson, 1992.
- Laurent, T., Kergueme, J.-L., Arnould, O., et Dureisseix, D. Eco-conception d'un bras de robot grande vitesse en bois 1. Méthode de conception et justification du choix du matériau. *Technologie*, 168 :28–36, 2010.
- Le Duigou, A., Davies, P., et Baley, C. Seawater ageing of flax/poly(lactic acid) biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 94 :1151–1162, 2009.
- Leonardon, M., Altaner, C. M., Vihermaa, L., et Jarvis, M. C. Wood shrinkage : Influence of anatomy, cell wall architecture, chemical composition and cambial age. *European Journal of Wood and Wood Products*, 68 :87–94, 2010.
- Lippke, B., Wilson, J., Meil, J., et Taylor, A. Characterizing the importance of carbon stored in wood products. *Wood and Fiber Science*, 42 :5–14, 2010.
- Longo, R., Delaunay, T., Laux, D., El Mouridi, M., Arnould, O., et Le Clézio, E. Wood elastic characterization from a single sample by resonant ultrasound spectroscopy. *Ultrasonics*, 52 (8) :971–4, December 2012.
- Max, J. et Lacoume, J.-L. Méthodes et techniques de traitement du signal. Dunod, 2004.
- Mazet, J. F. et Nepveu, G. Relations entre caractéristiques de retrait et densité du bois chez le pin sylvestre, le sapin pectiné et l'épicéa commun. *Annals of Forest Science*, 48(1) :87–100, 1991.
- Mazet, V. Développement de méthodes de traitement de signaux spectroscopiques : estimation de la ligne de base et du spectre de raies. PhD thesis, Université Henri Poincaré - Nancy I, 2005.
- Moore, J. R., Cown, D. J., McKinley, R. B., et Sabatia, C. O. Effects of stand density and seedlot on three wood properties of young radiata pine grown at a dry-land site in New Zealand. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 45(4) :1–15, 2015.
- Naes, T., Isaksson, T., Fearn, T., et Davies, T. Multivariate calibration and classification. NIR Publications, 2004.
- NF B51-002. Bois - Caractéristiques physiques et mécanique des bois, 1947.
- NF B51-007. Bois - Essai de compression axiale, 1985.

BIBLIOGRAPHIE

- NF B51-016. Bois - Flexion statique - Détermination du module d'élasticité en flexion statique de petites éprouvettes sans défaut., Decembre 1987.
- Paradis, S., Guibal, D., Gérard, J., Beauchêne, J., Brancheriau, L., Cabantous, B., Châlon, I., Daigremont, C., Détienne, P., Fouquet, D., Langbour, P., Lotte, S., Méjean, C., Parant, M.-F., Thévenon, M.-F., Thibaut, A., et Venay, M. Tropix 7.5.1 - Caractéristiques technologiques de 245 essences tropicales et tempérées (Technological Characteristics of 215 Tropical Timbers). CIRAD, 2015. Logiciel de gestion de données, version française et anglaise, ISBN 978-2-87614-680-8, référencement APP : IDDN.FR.001.070032.002.S.P.2002.000.30615.
- Pellerin, R. et Ross, R. Non-destructive evaluation of wood. Forest Products Society, Madison, 2002.
- Polge, H. Une nouvelle méthode de détermination de la texture du bois - L'analyse densitométrique de clichés radiographiques. *Annales de l'école nationale des eaux et forêts et de la station de recherches et expériences*, 1963.
- Rade, L. Mathematics handbook for science and engineering. Springer, 2013.
- Riou-Nivert, P. Les résineux, tome 3 : bois, utilisation, économie. CNPF, Institut pour le Développement Forestier (IDF), 2015.
- Roblot, G. Calcul automatique du knot area ratio appliqué au classement par machine des bois de structure. PhD thesis, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2010.
- Royer. Ondes élastique dans les solides. 2002.
- Sandak, A., Sandak, J., et Negri, M. Relationship between near-infrared (NIR) spectra and the geographic provenance of timber. *Wood Science and Technology*, 45 :35–48, 2011.
- Sathre, R. et O' Connor, J. Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environmental Science and Policy*, 13 :104–114, 2010.
- Savitzky, A. et Golay, M. J. E. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8) :1627–1639, July 1964.
- Schimleck, L., Mora, C., et Daniels, R. Estimation of the physical wood properties of green *Pinus taeda* radial samples by near infrared spectroscopy. *Canadian Journal of Forest Research*, 33 :2297–2305, 2003.
- Siau, J. F. Basic wood-moisture relationships, volume 2 of *Springer Series in Wood Science*, pages 1–34. Springer Berlin Heidelberg, 1984.
- Sjölund, J., Karakoç, A., et Freund, J. Effect of cell geometry and material properties on wood rigidity. *International Journal of Solids and Structures*, 62 :207–216, 2015.
- Svedström, K., Lucenius, J., Van den Bulcke, J., Van Loo, D., Immerzeel, P., Suuronen, J.-P., Brabant, L., Van Acker, J., Saranpää, P., Fagerstedt, K., Mellerowicz, E., et Serimaa, R. Hierarchical structure of juvenile hybrid aspen xylem revealed using X-ray scattering and microtomography. *Trees*, 26(6) :1793–1804, 2012.

- Taylor, A., Baek, S. H., Joeong, M., et Nix, G. Wood shrinkage prediction using NIR spectroscopy. *Wood and Fiber Science*, 40(2) :301–307, 2008.
- Thelandersson, S. et Larsen, H. J. Timber engineering. Wiley, 2003.
- Timoshenko, S. Théorie des vibrations à l’usage des ingénieurs. Librairie polytechnique Ch. Béranger, 1954.
- Viguié, J. Classement mécanique des bois de structures. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique. PhD thesis, Université de Lorraine, 2015.
- Vorobyev, A., Arnould, O., Laux, D., Longo, R., van Dijk, N. P., et Gamstedt, K. Characterisation of cubic oak specimens from the Vasa ship and recent wood by means of quasi-static loading and resonance ultrasound spectroscopy (RUS). *Holzforschung*, 70(5) :457–465, 2015.
- Werner, F., Taverna, R., Hofer, P., Thürig, E., et Kaufmann, E. National and global greenhouse gas dynamics of different forest management and wood use scenarios : a model-based assessment. *Environmental Science and Policy*, 13 :72–85, 2010.
- Yeh, T.-F., Chang, H.-M., et Kadla, J. F. Rapid prediction of solid wood lignin content using transmittance near-infrared spectroscopy. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 52 : 1435–1439, 2004.
- Zahri, S., Moubarik, A., Charrier, F., Chaix, G., Baillères, H., Nepveu, G., et Charrier, B. Quantitative assessment of total phenol contents of European oak (*Quercus petraea* and *Quercus robur*) by diffuse reflectance NIR spectroscopy on solid wood surfaces. *Holzforschung*, 62 :679–687, 2008.
- Zhang, S. Y. Effect of growth rate on wood specific gravity and selected mechanical properties in individual species from distinct wood categories. *Wood Science and Technology*, 29 :451–465, 1995.

BIBLIOGRAPHIE

Annexes

Annexe A - Développement du calcul de mise en vibration d'un barreau dans la méthode Bing©

On considère une poutre prismatique pleine, de masse volumique ρ , de longueur L , de hauteur h et d'épaisseur e (figure 24).

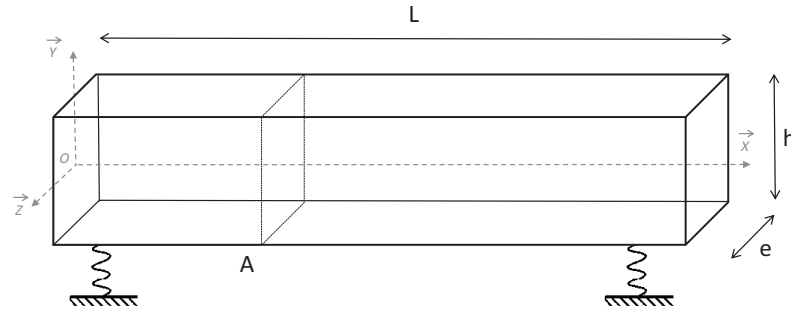


FIGURE 24 – Schéma d'une poutre sur deux appuis de rigidité k , définition géométrique

On applique les hypothèses de la théorie des poutres de la résistance des matériaux. L'état de référence est la position d'équilibre de la poutre sur des appuis élastiques de rigidité k . La vibration est produite par une percussion latérale à une des extrémités. En faisant l'hypothèse que le module d'élasticité E_X , le moment d'inertie I_{GZ} , le module de cisaillement G_{XY} et l'aire de la section transverse A sont constants le long de la poutre, on peut écrire l'équation de vibration en flexion suivante (Brancheriau, 2002) :

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K G_{XY}}\right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \quad (1)$$

(termes de vibration libre-libre)

$$\frac{\rho k I_{GZ}}{K A G_{XY}} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - \frac{E_X k I_{GZ}}{K A G_{XY}} \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad ,$$

(termes de vibration engendrés par les supports élastiques)

avec :

- v le déplacement transversal,
- le coefficient K considéré comme un facteur de forme, dépendant de la section de poutre, pour une section rectangulaire $K = 5/6$ (Bordonné, 1989; Brancheriau, 2006).

Le barreau repose sur des appuis élastiques de rigidité très faible. Les interactions entre les appuis et les vibrations naturelles peuvent être négligées. L'équation du mouvement 1 se simplifie et s'écrit :

$$E_X I_{GZ} \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} - \rho I_{GZ} \left(1 + \frac{E_X}{K G_{XY}}\right) \frac{\partial^4 v}{\partial x^2 \partial t^2} + \frac{\rho^2 I_{GZ}}{K G_{XY}} \frac{\partial^4 v}{\partial t^4} + \rho A \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad . \quad (2)$$

Le milieu étant borné, l'onde propagée est réfléchiée aux extrémités, donnant naissance à une onde stationnaire. Les solutions de l'équation 2 sont de la forme $v(x, t) = f(x) \cos(\omega t + \varphi)$ (Laroze, 1992), exprimées en fonction de la pulsation naturelle ω et du déphasage des fonctions temporelles φ .

À partir des modèles de Bernoulli (Bernoulli, 1748) et de Timoshenko (Timoshenko, 1954), Bordonné a proposé la solution P_{Bn} suivante :

$$\frac{1}{P_{Bn}} = \frac{1}{P_n} [1 + \alpha[\theta^2(m) + 6\theta(m)] + \Gamma[\theta^2(m) - 2\theta(m)]] \quad , \quad (3)$$

avec :

— P_n la solution du modèle de Bernoulli :

$$\sqrt[4]{P_n} = (2n + 1) \frac{\pi}{2}, \quad n \in N^* \quad , \quad (4)$$

— en posant :

$$\theta(m) = m \frac{\tan(m) \tanh(m)}{\tan(m) - \tanh(m)} \quad \text{avec } m = \sqrt[4]{P_n} \quad ,$$

— et en définissant les variables intermédiaires :

$$\alpha = \frac{I_{GZ}}{A L^2} \quad ,$$

$$\Gamma = \frac{E_X I_{GZ}}{K A G_{XY} L^2} \quad ,$$

le paramètre Γ prenant en compte l'effet du cisaillement.

La solution de Bernoulli propose l'expression des fréquences de vibration suivante :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_X I_{GZ} P_n}{\rho A L^4}} \quad . \quad (5)$$

En remplaçant P_n par la solution de Bordonné P_{Bn} dans l'équation 5, on peut déduire l'expression des fréquences propres suivante :

$$f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{E_X I_{GZ} P_n}{\rho A L^4 [1 + \alpha F_1(m) + \alpha \frac{E_X}{K G_{XY}} F_2(m)]}} \quad , \quad (6)$$

avec :

$$F_1(m) = \theta^2(m) + 6\theta(m) \quad \text{et} \quad F_2(m) = \theta^2(m) - 2\theta(m).$$

Les valeurs de module d'élasticité E_X et de cisaillement G_{XY} se calculent en effectuant une régression linéaire sur les couples (x_n, y_n) (Hearmon et Paton, 1958), tels que :

$$x_n = \alpha F_2(m) 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} \quad \text{et} \quad y_n = 4\pi^2 \frac{AL^4}{I_{GZ}} \frac{f_n^2}{P_n} [1 + \alpha F_1(m)] \quad . \quad (7)$$

Annexe B - Courbes de réponse des transducteurs

OLYMPUS



Tel: 781-419-3900
www.olympusndt.com

TRANSDUCER DESCRIPTION

PART NO.: V151
SERIAL NO.: 889798
DESIGNATION: CONTACT
FREQUENCY: 0.50 MHz
ELEMENT SIZE: 1 in. DIA.

TEST INSTRUMENTATION

PULSER/RECEIVER: PANAMETRICS 5052UA CD00826
DIGITAL OSCILLOSCOPE: LeCroy LT342 / SN: LT34201114
TEST PROGRAM: TP103-3
CABLE: RG-58 A/U LENGTH: 4FT

TEST CONDITIONS

PULSER SETTING: ENERGY: 1 ; DAMPING: 200 ohm
RECEIVER SETTING: ATTN: 46dB ; GAIN: 40dB
TARGET: 5 in. COPPER
JOB CODE: TP200

MEASUREMENTS PER ASTM E1065

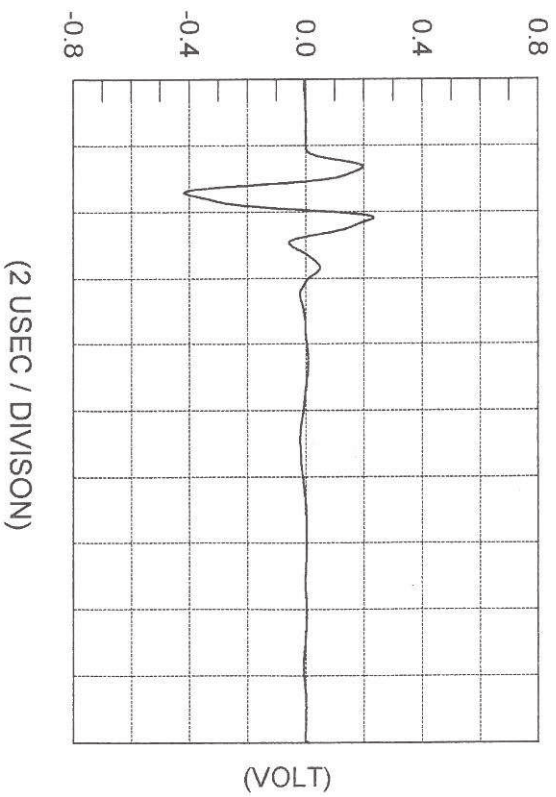
WAVEFORM DURATION:
-14DB LEVEL -- 2.240 US
-20DB LEVEL -- 3.480 US
-40DB LEVEL -- 18.040 US
SPECTRUM MEASURANDS:
CENTER FREQ. ----- 0.55 MHz
PEAK FREQUENCY -- 0.62 MHz
-6DB BANDWIDTH -- 107.88 %

COMMENTS:

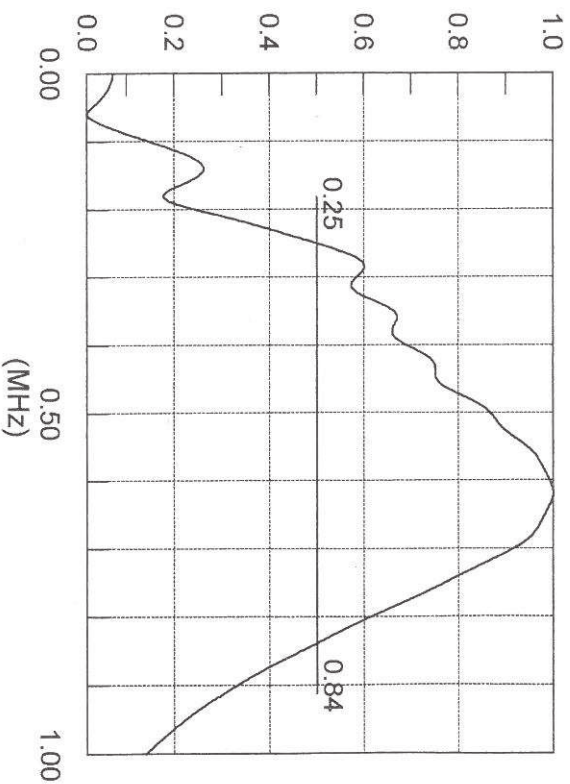
This unit was tested using a system that applies uniform pressure to the transducer to insure product integrity, therefore the sensitivity demonstrated on this certification can only be duplicated under similar conditions.

** ACCEPTED

SIGNAL WAVEFORM



FREQUENCY SPECTRUM





**PHYSICAL
ACOUSTICS
CORPORATION**
A MISTRAS Holdings Company

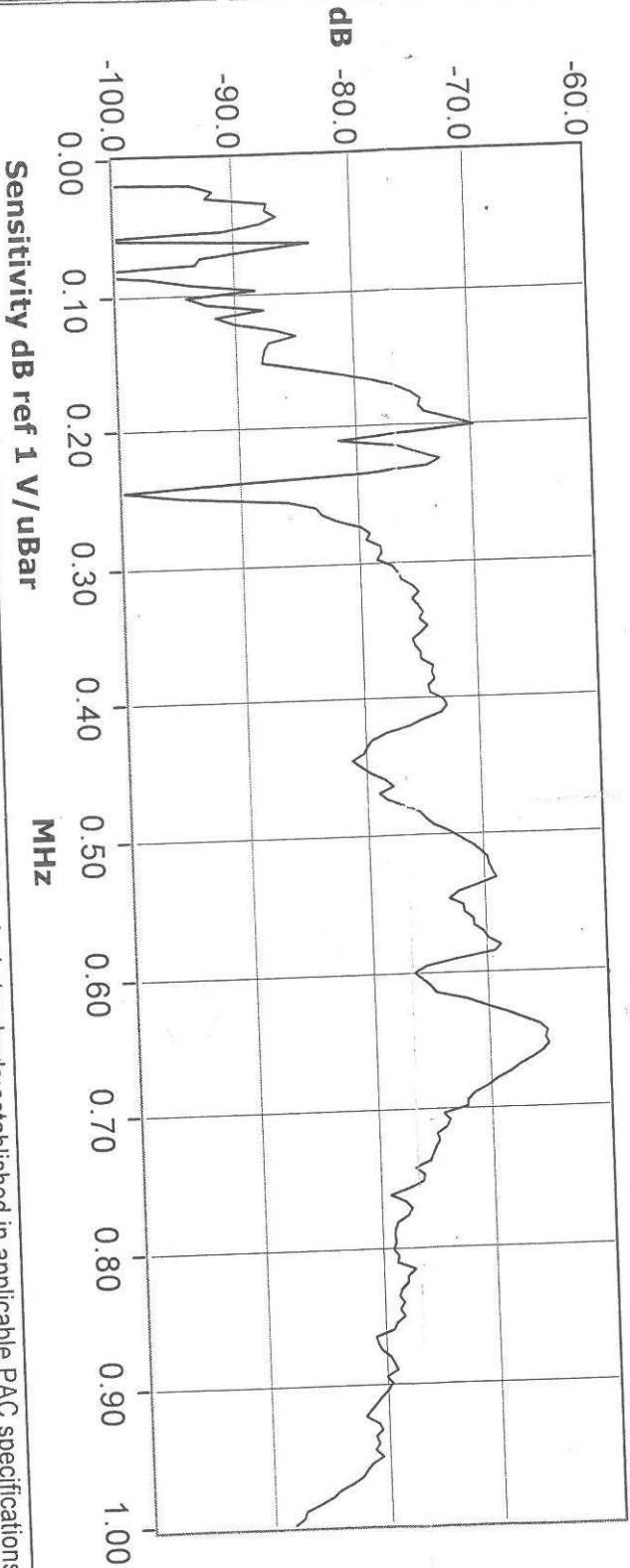
**EUROSONIC CERTIFICATE
AE SENSOR CALIBRATION**

Sensor Name: R80-ALPHA
Sensor S/N: AA58
Comment:

Max. Value (dB): -65.07
Peak Freq. (KHz): 654.30

Tested By: *[Signature]*

MISTRAS Group, S43
13127 Vitrolles
de France
Tel: 04.42.31.18.30
Fax: 04.42.31.18.31
RCS 409 879612043



PAC Certifies that this sensor meets all performance, environmental and physical standards established in applicable PAC specifications.
Calibration methodology based on ASTM standard E976- "Guide for Determining the Reproducibility of AE Sensor Response."



Annexe C - Résultats complémentaires

| Variable : <i>E.L.cc</i> | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|-------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 13653 | 2227 | 193 | 16% | 7643 | 13596 | 20260 | 133 | |
| L | 17958 | 5928 | 741 | 33% | 7283 | 17517 | 32185 | 64 | |
| M | 17109 | 3688 | 489 | 22% | 7593 | 16815 | 26100 | 57 | |
| S | 12490 | 3544 | 461 | 28% | 7470 | 11367 | 18451 | 59 | |

| Variable : <i>E.R.cc</i> | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 2414 | 302 | 26 | 13% | 1752 | 2383 | 3549 | 133 | |
| L | 2992 | 465 | 58 | 16% | 2321 | 2879 | 4269 | 64 | |
| M | 2706 | 244 | 32 | 9% | 2240 | 2684 | 3354 | 57 | |
| S | 2747 | 275 | 36 | 10% | 2276 | 2750 | 3451 | 59 | |

| Variable : <i>E.T.cc</i> | | | | | | | | | |
|--------------------------|---------|------------|-------------|------|------|---------|------|-----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 1471 | 213 | 18 | 14% | 813 | 1461 | 2081 | 133 | |
| L | 2181 | 557 | 70 | 26% | 1300 | 2072 | 3942 | 64 | |
| M | 1859 | 396 | 52 | 21% | 1076 | 1723 | 2581 | 57 | |
| S | 1447 | 385 | 50 | 27% | 703 | 1352 | 2584 | 59 | |

| Variable : <i>G.LR.cc</i> | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|------------|-------------|------|-----|---------|------|----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 1003 | 137 | 25 | 14% | 760 | 1008 | 1224 | 30 | |
| L | 1094 | 155 | 28 | 14% | 844 | 1084 | 1453 | 30 | |
| M | 1025 | 146 | 27 | 14% | 772 | 1014 | 1296 | 30 | |
| S | 969 | 146 | 27 | 15% | 711 | 1024 | 1155 | 30 | |

| Variable : <i>G.LT.cc</i> | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|------------|-------------|------|-----|---------|------|----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 864 | 95 | 17 | 11% | 693 | 870 | 1039 | 30 | |
| L | 940 | 201 | 37 | 21% | 555 | 914 | 1392 | 30 | |
| M | 863 | 173 | 32 | 20% | 598 | 839 | 1137 | 30 | |
| S | 776 | 91 | 17 | 12% | 611 | 778 | 964 | 30 | |

| Variable : <i>G.RT.cc</i> | | | | | | | | | |
|---------------------------|---------|------------|-------------|------|-----|---------|-----|----|--|
| Essence | Moyenne | Ecart-type | Erreur type | C.V. | Min | Médiane | Max | n | |
| C | 92 | 39 | 7 | 43% | 45 | 86 | 259 | 30 | |
| L | 147 | 49 | 9 | 33% | 87 | 136 | 256 | 30 | |
| M | 166 | 39 | 7 | 23% | 104 | 156 | 257 | 30 | |
| S | 91 | 22 | 4 | 25% | 53 | 89 | 144 | 29 | |

TABLE 8 – Tableaux récapitulatifs des résultats des mesures ultra-sonores par contact direct, en fonction de l'essence

Caractérisations physico-mécaniques de bois "sans défauts" pour la conception mécanique : application aux pins de la région méditerranéenne française

L'utilisation des bois pour des usages structuraux en ingénierie mécanique, sous forme de bois massifs ou éléments reconstitués, suppose une bonne connaissance des propriétés des composants bois élémentaires utilisés. Faute de cela, les bois restent exclus du monde moderne de la conception mécanique.

En Languedoc-Roussillon, les pins constituent la ressource forestière principale (30 % des bois sur pieds). La valorisation de cette ressource est un enjeu majeur pour l'inter-profession de la filière bois. L'objectif de ce travail de thèse est d'examiner la possibilité de prédire les propriétés de base des bois de pin « sans défauts », à partir de mesures non destructives disponibles. L'étude a été réalisée sur quatre des espèces de pins les plus présentes : pin sylvestre, pin à crochets, pin laricio et pin maritime.

Les indicateurs de base retenus sont la densité (obtenue par mesure de masse et de volume), le module spécifique (obtenu par mesure vibratoire) et des indicateurs issus de la spectroscopie proche infrarouge (NIRS). Les propriétés technologiques étudiées sont les neuf constantes de la matrice élastique (obtenues par mesures ultra-sonores sur une éprouvette unique), les coefficients de retrait et retraits totaux ainsi que la résistance en rupture en compression axiale (obtenus par les essais normalisés).

L'analyse des données permet de construire des modèles prédictifs des propriétés de base, uniques pour l'ensemble des pins étudiés, à partir des indicateurs mesurés sur chaque échantillon de bois « sans défauts ».

Il est alors possible d'associer à une pièce de bois donnée, une fiche technique des propriétés utiles à la conception mécanique. Les indicateurs choisis étant facilement mesurables dans le milieu industriel, le transfert de la méthode est envisageable. Chaque pièce de bois d'intérêt (i.e. avec peu de défauts) pourrait être rapidement caractérisée. Associé à une bonne traçabilité (par code barre par exemple) cette démarche permettrait d'identifier clairement chaque pièce et ses propriétés, donnant ainsi la possibilité au concepteur de sélectionner les matériaux les mieux adaptés à ses besoins.

***Mots-clefs :** caractérisation mécanique, comportement hygroscopique, modèles prédictifs, pins, forêt méditerranéenne, variabilité.*

Physical-mechanical characterizations of clear wood for mechanical design : application to pines from the French Mediterranean area

Using wood for mechanical engineering as solid wood or glued solid timber (or glued laminated timber) requires a good knowledge of the properties of each elementary piece. Due to this lack of knowledge, woods are still not used in modern mechanical design.

In the Languedoc-Roussillon French region, pines are the dominant forest resource (approx. 30 % of standing wood). The development of this resource is a major interest for the inter-branch organisation. The aim of this PhD work is to examine the possibility to predict basic useful properties of pine clear wood, based on available non-destructive methods. The study has been made on four of the most present species : Laricio black pine, Maritime pine, Mountain pine and Scots pine.

Basic relevant indicators are the density (obtained by mass and volume measurements), the specific modulus of elasticity (obtained by vibrational measurements) and indicators from Near Infrared Resonance Spectroscopy (NIRS). Technological properties are the nine components of the elastic matrix (obtained by resonant ultrasonic measurements on a single specimen), hygroscopic dilatations and compressive breaking strength along the fibres (obtained in standard testing conditions).

Data analysis allows to build some predictive models, unique for the whole pine selection, of basic properties, from indicators measured on each specimen of clear wood.

Therefore it is possible to associate to a given piece of wood, a technical specification sheet of useful properties for mechanical design. Selected indicators are common measurements in industry and knowledge transfer is conceivable. Each interesting piece of wood (i.e. with few defects) could be rapidly characterized. Related to a good traceability this process could lead to identify clearly each piece and its properties, giving the possibility to the designer to select the best materials to his or her needs.

***Keywords :** Mechanical characterization, hygroscopic behavior, predictive models, pine, Mediterranean forest, variability.*