



HAL
open science

Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne

Benoît Besseau

► **To cite this version:**

Benoît Besseau. Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne. Génie mécanique [physics.class-ph]. HESAM Université, 2021. Français. NNT : 2021HESAE056 . tel-03716762

HAL Id: tel-03716762

<https://pastel.hal.science/tel-03716762>

Submitted on 7 Jul 2022

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.

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
LABOMAP – Campus de Cluny

THÈSE

présentée par : **Benoît BESSEAU**

soutenue le : **07 décembre 2021**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie mécanique – Procédés de fabrication**

Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficace du chêne

THÈSE dirigée par :
Monsieur COLLET Robert

et co-encadrée par :
Monsieur POT Guillaume

Jury

M. Laurent BLERON, Professeur des Universités, LERMAB, Université de Lorraine
M. Florent EYMA, Professeur des Universités, ICA, IUT Tarbes
M. Vincent PLACET, Ingénieur de recherche, FEMTO-ST, UBFC
Mme. Evelyne TOUSSAINT, Professeure des Universités, Institut Pascal, UCA
M. Robert COLLET, Maître de Conférences (HDR), LABOMAP, Arts et Métiers
M. Guillaume POT, Maître de Conférences, LABOMAP, Arts et Métiers
M. Thibault CHASTAGNIER, Ingénieur, DUCERF
M. Jean-Denis LANVIN, Docteur, FCBA

Président
Rapporteur
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinateur
Invité
Invité

**T
H
È
S
E**

*A Notre-Dame, tragiquement découronnée,
A mes enfants, puissent-ils la voir couronnée,
A ma femme, par-delà les noces de chêne,
Au lecteur de prose : ces vers furent ma peine.*

Remerciements

Les travaux présentés dans ce mémoire de thèse ont été réalisés conjointement au laboratoire des matériaux et procédés (LABOMAP) de Cluny et aux différents sites charolais du groupe Ducerf. Ce mémoire n'aurait pu être et les résultats présentés n'auraient pu aboutir et prendre cette forme sans le concours de certaines personnes et institutions que je souhaite sincèrement remercier, bien au-delà de ces quelques mentions.

Je remercie tout d'abord Robert Collet d'avoir été à l'initiative et d'avoir dirigé cette thèse en convention CIFRE taillée sur mesure pour un laboratoire de recherche en plein essor dans sa thématique de valorisation des essences locales, une entreprise familiale prenant le virage d'une nouvelle génération et un candidat ayant à cœur de contribuer à une meilleure valorisation du chêne en France. Merci à Robert d'avoir partagé sa passion pour la scierie et les sciences du bois : connaissances techniques et technologiques, expérience des hommes et du terrain, recul nécessaire et pertinent sur les problématiques rencontrées, mise en rapport constant avec les potentielles applications industrielles des travaux de recherche.

Je remercie également la société Ducerf de m'avoir embauché pour cette thèse. Merci à Edouard Ducerf et Jean-Marie Ducerf, incarnant la cinquième génération à la tête de la société du même nom, et à Thibault Chastagnier, mon tuteur en entreprise. Ils m'ont accordé leur confiance pour mener à bien nos différents travaux, m'ont transmis leur passion pour leurs métiers et ce noble matériau et m'ont fait part de leurs conseils pragmatiques. Leur expertise fut très enrichissante et leur disponibilité très appréciable. Merci de m'avoir fait participer aux différents projets gravitant autour de la thèse, ceci m'a appris la vie de l'entreprise au jour le jour.

Je remercie aussi Guillaume Pot, mon co-encadrant de thèse, pour ses nombreux conseils scientifiques, pour sa disponibilité, son aide constante dans la formulation et la résolution des problèmes ainsi que pour les différentes rédactions, ses encouragements lors des redoutées conférences. Sans lui, ce projet n'aurait pas été très efficace.

Je remercie aussi l'Association Nationale Recherche Technologie (ANRT) pour le soutien financier apporté à cette thèse CIFRE ainsi que l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (ADEME) pour le soutien financier apporté au travers du projet de recherche TreCEffiQuaS (appel à projet ADEME Graine).

Merci aussi aux éminents chercheurs de l'équipe bois pour leur contribution directe à ces travaux : Stéphane Girardon pour son aide précieuse lors des travaux de modélisation avec la méthode des éléments finis et pour ses relectures ; Joffrey Viguier pour son actionnariat non négligeable dans les codes Python, son aide dans les différents essais avec les scanners et son esprit critique ; Jean-Claude Butaud pour son assistance technique et ses astuces dans la mise en œuvre des campagnes expérimentales, Rémy Marchal pour sa relecture de l'article publié ; Jean-Denis Lanvin pour ses relectures perspicaces.

Merci encore aux différents collaborateurs du groupe Ducerf qui ont participé aux campagnes expérimentales : Laurent Rizet pour son expérience de la première transformation et pour m'avoir accordé sa confiance ; Julien, Michel et Thierry des Bois Profilés pour avoir permis d'intercaler mes essais au milieu de la production ; les services exploitation forestière et maintenance et les équipes de

production de la scierie et l'atelier aboutage qui ont toujours porté un vif intérêt aux divers essais menés auxquels ils apportaient leur généreuse contribution.

Je remercie Florent Eyma et Vincent Placet d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse ainsi qu'Evelyne Toussaint et Laurent Bléron d'avoir bien voulu être examinateurs.

Merci à toutes les autres personnes que j'ai côtoyé pendant ces trois années et qui ont contribué à les rendre agréables : Rémy et Robin, collègues doctorants ; les autres membres de l'équipe bois dont Fabrice pour les croissants ; les personnels administratif et commercial de Ducerf.

Un grand merci final à mon épouse et mes deux enfants qui, enrichissant constamment ma vie, m'ont apporté l'équilibre nécessaire pour aller au bout de l'aventure.

Table des matières

REMERCIEMENTS	4
TABLE DES MATIERES	6
LEXIQUE	10
INTRODUCTION GENERALE	16
CHAPITRE 1 : LES ETAPES CLES DE LA TRANSFORMATION DU CHENE EN LAMES ABOUTEES	20
1. INTRODUCTION	22
2. L'EXPLOITATION FORESTIERE	23
2.1. LE MATERIAU CHENE	23
2.1.1. Structure de l'arbre	23
2.1.2. Formation du bois	24
2.1.3. Structure cellulaire du chêne	25
2.2. LE CHENE, ESSENCE DOMINANTE EN FRANCE	26
2.3. VALORISATION DE LA RESSOURCE DE CHENE	27
2.4. LE CHENE DE QUALITE SECONDAIRE	29
3. LA PREMIERE TRANSFORMATION	30
3.1. OPERATIONS COMMUNES A TOUS LES PRODUITS DE LA SCIERIE	30
3.2. OPERATIONS PROPRES AU DEBIT D'AVIVES	32
3.3. LES AVIVES	32
4. LE SECHAGE	35
4.1. PRINCIPE DU SECHAGE DU BOIS	35
4.1.1. L'eau et le bois	35
4.1.2. Le comportement hygroscopique du bois	35
4.1.3. Le processus de séchage du bois	35
4.2. LES DEFORMATIONS CAUSEES PAR LE SECHAGE	36
4.2.1. Les retraits dimensionnels	36
4.2.2. Les déformations d'avivés	37
5. LA SECONDE TRANSFORMATION	39
5.1. LA CORRECTION DES DEFAUTS DE SECHAGE	39
5.2. LE PROCEDE D'ABOUTAGE	41
6. LES AMELIORATIONS ET INNOVATIONS POUR UNE TRANSFORMATION PLUS EFFICIENTE DU CHENE	43
6.1. VERS UNE REORGANISATION DE LA PRODUCTION PLUS CENTREE SUR LA LAME ABOUTEE	43
6.2. LE PROCESSUS DE FABRICATION ETUDIE	43
CHAPITRE 2 : ÉVALUATION DE LA PERFORMANCE D'UN SCANNER LASER SUR LE CHENE POUR MESURER L'ORIENTATION DES FIBRES	48
1. INTRODUCTION ET ETAT DE L'ART	50

1.1.	THEORIE DE LA MESURE DE L'ORIENTATION DES FIBRES AVEC UNE TECHNOLOGIE LASER	50
1.2.	EXPLOITATIONS DE LA DIFFUSION DE LUMIERE LASER	51
1.2.1.	L'information de l'orientation de l'ellipse	51
1.2.2.	Les autres informations données par l'ellipse	52
1.3.	LES TECHNOLOGIES DE LASER UTILISEES	52
1.4.	LA PRECISION DE MESURE DE L'ORIENTATION DES FIBRES	52
1.5.	OBJECTIF DES TRAVAUX DE CE CHAPITRE	53
2.	DETERMINATION DE L'ERREUR DE MESURE DE L'ORIENTATION DES FIBRES	53
2.1.	ECHANTILLONNAGE	53
2.2.	SCANNER BOBISCAN	54
2.3.	PROTOCOLE EXPERIMENTAL POUR QUANTIFIER L'ERREUR DE MESURE.	56
2.4.	ANALYSE DES IMAGES DU SCANNER	57
2.4.1.	Orientation réelle de l'éprouvette	57
2.4.2.	Paramétrage des ellipses / détermination de l'orientation des fibres	57
2.4.3.	Paramètres propres à chaque éprouvette	58
2.4.4.	Valeurs d'orientation des fibres des différents lots	62
2.5.	CALCUL DE L'ERREUR DE MESURE DE L'ODF	63
2.5.1.	Méthode de calcul	63
2.5.2.	Erreur de mesure de l'ODF des lots d'éprouvettes	63
2.5.3.	Influence de l'erreur de mesure dans la formule de Hankinson	65
3.	INFLUENCE DE L'ANATOMIE DU BOIS SUR LA DIFFUSION DE LA LUMIERE LASER	65
3.1.	COMPARAISON DE LA DIFFUSION DE LA LUMIERE SUR PLUSIEURS ESSENCES	65
3.2.	INFLUENCE DES CERNES D'ACCROISSEMENT	67
3.3.	INFLUENCE DES RAYONS LIGNEUX	68
3.4.	INFLUENCE DE LA FORME DE L'ELLIPSE SUR LA QUALITE DE MESURE	70
4.	CONCLUSION	71

CHAPITRE 3 : MODELISATION DES DEFORMATIONS AU SECHAGE D'AVIVES DE CHENE A PARTIR DE LA MESURE DE L'ORIENTATION DES FIBRES **74**

1.	INTRODUCTION	76
2.	DETERMINATION EXPERIMENTALE DE LA FLECHE DE RIVE	78
2.1.	ECHANTILLONNAGE	78
2.2.	PROTOCOLE D'ESSAI	78
2.3.	SCANNER UTILISE	78
2.4.	MESURE DU VOILEMENT LONGITUDINAL DE RIVE	79
2.4.1.	Quantification de la flèche de rive	80
2.4.2.	Flèche de rive avant séchage	81
2.4.3.	Flèche de rive après séchage	81
2.5.	MESURE DES RETRAITS	82
3.	MODELISATION PAR ELEMENTS FINIS DU VOILEMENT LONGITUDINAL DE RIVE	84
3.1.	DEFINITION DES PROPRIETES MATERIAUX	84
3.1.1.	Orientation des fibres	84
3.1.2.	Définition des zones de nœuds	85
3.1.3.	Lois de comportement mécaniques utilisées	88
3.2.	MAILLAGE	90
3.3.	RESOLUTION	91

3.4.	QUANTIFICATION DE LA DEFORMATION	93
3.5.	VALIDATION DU MODELE	93
3.6.	DEFINITION DU RETRAIT TRANSVERSE DES NŒUDS DE CHENE	95
4.	CONFRONTATION DU MODELE AUX VALEURS EXPERIMENTALES	96
4.1.	INDICATEURS DE PERFORMANCE	97
4.2.	FIDELITE DE LA FORME DU PROFIL PREDIT	98
4.3.	ERREUR DE PREDICTION	99
4.4.	PREDICTION DE L'AMPLITUDE DES DEFORMATIONS	100
4.5.	CLASSEMENT DES AVIVES PAR LA FLECHE DE RIVE	100
5.	INFLUENCE DES PROPRIETES DU BOIS ET SENSIBILITE DU MODELE	101
5.1.	INFLUENCE DU RETRAIT DU BOIS	102
5.2.	INFLUENCE DES PROPRIETES MECANIQUES	103
5.3.	INFLUENCE DE LA VALEUR DU RETRAIT DANS LE NŒUD	103
6.	CONCLUSION	105

CHAPITRE 4 : EXPLOITATION DES DONNEES D'UN SCANNER LASER POUR L'OPTIMISATION DE LA PRODUCTION DE LAMES ABOUTEES DE CHENE **108**

1.	INTRODUCTION	110
2.	CARACTERISATION EXPERIMENTALE DE LOTS DE LAMES ABOUTEES	112
2.1.	ECHANTILLONNAGE	112
2.2.	ESSAIS ET MESURES EFFECTUES	113
2.3.	PROPRIETES D'ORIENTATION DES FIBRES	114
2.3.1.	Orientation des fibres par face	114
2.3.2.	Modèle d'orientation des fibres en trois dimensions	116
2.3.3.	Orientation 3D des fibres proches des aboutages	122
2.4.	RESISTANCE DES ABOUTAGES EN FLEXION	123
2.5.	MASSE VOLUMIQUE ET MODULE D'ELASTICITE VIBRATOIRE DES COURÇONS	125
2.6.	SYNTHESE SUR LA QUALITE MECANIQUE DES LOTS	126
2.7.	CLASSEMENT MECANIQUE DES LOTS	127
2.7.1.	Exigences pour un usage en structure	127
2.7.2.	Classement mécanique des lots testés	128
2.7.3.	Exigences pour un usage en menuiserie	128
3.	CONTROLE NON DESTRUCTIF D'ABOUTAGES	129
3.1.	FORMULE DE HANKINSON	129
3.2.	PRINCIPE DE LA REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE	130
3.3.	RELATIONS ENTRE PROPRIETES MESUREES ET RESISTANCE DES ABOUTAGES	130
3.4.	INFLUENCE DU PARAMETRE Lx	132
3.5.	EFFET LOT	133
3.6.	REGRESSIONS LINEAIRES MULTIPLES	133
4.	APPLICATION A LA SELECTION DE BOIS A ABOUTER	136
4.1.	ADAPTATION DU MODELE DE PREDICTION DE LA RESISTANCE DES ABOUTAGES	137
4.1.1.	Influence de Lx	137
4.1.2.	Régressions linéaires multiples	137
4.1.3.	Choix d'un modèle	139
4.2.	OPTIMISATION DU DEBIT D'AVIVES FRAIS DE SCIAGE EN COURÇONS POUR L'ABOUTAGE	140
4.2.1.	Enoncé du problème et principe d'étude	140

4.2.2. Création d'un « plan de tronçonnage sur critères pour l'aboutage »	141
5. CONCLUSION	144
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	146
MESURES ET MODELISATION DE L'ODF AVEC LA TECHNOLOGIE DE LASER POINT	146
MODELISATION DES DEFORMATIONS D'AVIVES AU SECHAGE	147
CONTROLE DE LA QUALITE DES ABOUTAGES	147
ROGNAGE D'AVIVES INTEGRANT LA NOTION DE RESISTANCE DES ABOUTAGES	148
ESQUISSE D'UNE USINE DEDIEE A LA PRODUCTION DE LAME ABOUTEES	148
REFERENCES	150
ANNEXES	156
LISTE DES TABLEAUX	166
LISTE DES FIGURES	167

Lexique

Les quelques définitions suivantes, admises dans ce mémoire, sont en partie issues ou adaptées des références suivantes :

- B50-002:1961 (a),
- ISO DIS 24294 : 2020 (b),
- CNRLT (c)
- EN 844 : 2020 (d)
- ISO 2300:1973 (e)

Avivés (d) : Bois scié, de section rectangulaire, pouvant comporter des flaches dans la limite de tolérance.

Bois brut de sciage (a) : Bois débité obtenu par sciage.

Bois de compression (d) : Bois de réaction présent sur la partie inférieure des branches et des tiges penchées ou courbées des résineux.

Bois de réaction (d) : Bois qui présente des caractères anatomiques distinctifs, modifiant les propriétés mécaniques et physiques.

Bois de tension (d) : Bois de réaction présent sur la partie supérieure des branches et des tiges penchées ou courbées des feuillus.

Bois parfait : Désigne, dans le cadre des travaux de modélisation des déformations d'un avivé au séchage, du bois sans nœud.

Classement (b) : séparation ou tri du bois selon l'utilisation finale, l'essence de l'arbre, l'apparence, les propriétés mécaniques ou de travail, les dimensions ou une combinaison de celles-ci.

Courçon : Avivé de courte longueur destiné à l'aboutage.

Défaut (b) : Singularité qui diminue la qualité et réduit l'utilisation du bois.

Déformation (d) : Modification de la forme géométrique d'une pièce de bois provoquée par la transformation et/ou le séchage et/ou le stockage.

Délignage (a) : Opération consistant à éliminer le bord généralement flacheux d'un sciage par un trait de scie rectiligne perpendiculaire à ses faces.

Face (d) : N'importe lequel des côtés longitudinaux opposés les plus larges d'un avivé.

Fabrique (c) : terme ancien désignant un établissement industriel qui transforme les produits semi-traités ou les matières premières en objets manufacturés destinés à être livrés au commerce.

Flache (d) : portion de la surface arrondie de la bille restant apparente sur le bois scié, avec ou sans écorce.

Flèche de face : Désigne, dans ce mémoire, la mesure du voilement longitudinal de face.

Flèche de rive : Désigne, dans ce mémoire, la mesure du voilement longitudinal de rive.

Gauchissement (e) : Courbure hélicoïdale de la pièce dans le sens de la longueur.

Image de diffusion : image de la projection d'un laser point à la surface d'une éprouvette.

Plateau (d) : Bois brut de sciage possédant deux faces parallèles et une ou deux rives entièrement flacheuses.

Ponçage (a) : Opération destinée à polir les faces d'une pièce de bois à l'aide d'abrasif.

Rabotage (a) : Opération destinée à réaliser une surface lisse et à mettre la pièce de bois sur toute sa longueur à l'épaisseur ou largeur d'emploi.

Rive, chant (d) : N'importe lequel des deux côtés longitudinaux opposés les plus étroits d'un avivé.

Rognage (d'un avivé) : Synonyme de tronçonnage.

Ratio : Rapport entre le grand axe et le petit axe d'une ellipse.

Singularité (b) : Particularité physique, morphologique ou anatomique du bois, susceptible d'affecter son utilisation.

Voilement longitudinal de face (e) : Courbure de la pièce dans le sens de la longueur dans un plan perpendiculaire à la face. Désigne, dans ce mémoire, le type de la déformation.

Voilement longitudinal de rive (e) : Courbure de la pièce dans le sens de la longueur dans un plan parallèle à la face. Désigne, dans ce mémoire, le type de la déformation.

Voilement transversal ou tuilage (e) : Courbure de la pièce dans le sens de la largeur.

Tronçonnage (a) : Opération consistant à sectionner transversalement une grume ou une pièce de bois quelconque.

*« Si nos fabriques imposent à force de soin la qualité supérieure de nos produits, les étrangers trouveront avantage à se fournir en France et leur argent affluera dans les caisses du Royaume. »
(Colbert, 1664)*

INDUSTRIES DU BOIS.

*« Nous construisons la France de l'or vert où la forêt est une ressource d'avenir. Les propriétés techniques, économiques et environnementales du bois en font un matériau stratégique aux usages multiples : construction, ameublement, chimie, biomasse... Il est désormais possible de construire de grands immeubles en ossature bois et de valoriser les sous-produits de l'industrie papetière. Les innovations techniques offrent de fortes perspectives de croissance économique et de création d'emplois dans les industries du bois. Troisième surface forestière d'Europe, la France possède des atouts exceptionnels qu'il convient d'exploiter davantage. La filière bois constitue, en effet, le deuxième poste de déficit de la balance commerciale avec une situation singulière : nous exportons notre bois fraîchement sorti de nos forêts et importons les produits finis à plus forte valeur ajoutée. Résultat : un poste déficitaire de plus de 6 milliards d'euros par an dans notre balance commerciale. Les entreprises du secteur, majoritairement des PME et des TPE familiales doivent s'organiser, investir et innover. Le plan « Industries du bois » va corriger ce déséquilibre en réimplantant sur le territoire national les activités de transformation et en accélérant l'industrialisation de l'offre. Il s'agit de rendre la filière plus compétitive en améliorant l'accès à la ressource forestière, en développant la construction bois, la seconde transformation en France et en favorisant les usages énergétiques de la biomasse. La mise en valeur de ce potentiel d'excellence contribuera également à faire connaître aux consommateurs français les nouveaux usages du bois et donc à développer les débouchés de la filière. Le bois de France, transformé en France, fournira ainsi énergie, matériaux de construction et biens de consommation tout en représentant un potentiel pouvant aller jusqu'à 60 000 emplois nouveaux notamment dans les zones rurales. Ce plan permettra de faire des forêts de France la source renouvelable d'une industrie moderne, innovante et responsable. »
(Ministère de l'économie, des finances et de la relance, 2013)*

Introduction générale

Parmi les 34 plans de la reconquête industrielle française présentés en 2013 figurent *les Industries du bois et l'usine du futur*, appelée aussi usine 4.0. « *Présentée comme la quatrième révolution industrielle, après la mécanisation, la production de masse au XIX^e siècle et l'automatisation de la production au XX^e siècle, [l'industrie 4.0] se caractérise par l'intégration des technologies numériques dans les processus de fabrication* » (Richard, 2016). En fonction des secteurs industriels, cela peut prendre différentes formes, mais l'objectif principal de cette évolution industrielle est celui d'une production plus économe quant à sa consommation de ressources, tant matérielles qu'énergétiques. L'un des moyens pour y parvenir est l'implantation tout au long de la production d'une multitude de capteurs permettant d'obtenir en temps réel des données de toutes sortes sur l'état des machines et des produits et dont le traitement numérique fournit une aide précieuse pour l'optimisation de la production. Aussi, grâce aux technologies du numérique, les machines de production pourraient être en mesure d'échanger leurs données capteurs, établissant ainsi une forme de communication qui pourrait aussi relier machines et produits.

La filière forêt-bois a été identifiée par le gouvernement français comme un pilier de la croissance verte, avec un programme national de la forêt et du bois 2016-2026 (Ministère de l'agriculture et de l'alimentation, 2017). Ce dernier constate les fragilités de la filière, et identifie un certain nombre de défis à relever pour « *réduire le déficit commercial à travers le rapatriement de la valeur ajoutée sur le territoire, notamment dans les scieries et la construction* » en particulier en développant de « *nouveaux usages des espèces feuillues* » et « *des produits innovants, répondant aux demandes des marchés* ». Cependant, le « *rapatriement de la valeur ajoutée sur le territoire* » continue de faire face à l'export massif de grumes (un quart de la récolte annuelle pour le chêne (AGRESTE, 2021), générant beaucoup de tensions d'approvisionnement en grumes pour les scieries françaises (FNB 2018, 2021). Malgré cela, la filière bois s'emploie au déploiement des feuillus dans la construction en développant et innovant, aussi bien pour les produits que pour les moyens de production. Petit à petit, les concepts d'usine 4.0 sont appliqués et s'installent dans l'industrie du bois. A titre d'exemples, les sociétés Finega (Finega, 2017, Carroy, 2018) et MicroTec (Microtec, 2021, Chalayer, 2015) ont chacune développé des concepts de scierie 4.0 essentiellement tournés vers la filière bois résineux.

Par ailleurs, l'utilisation du bois dans la construction est en augmentation depuis plusieurs années et les besoins en bois dans les années à venir vont se faire de plus en plus pressants, non seulement en France, mais aussi au niveau mondial (FCBA 2017). En effet, pour ce qui est de la France, la nouvelle Réglementation Environnementale des bâtiments neufs (RE 2020) fait la part belle aux matériaux biosourcés, plus encore que la précédente Réglementation Thermique (RT 2012) qu'elle remplacera. Elle prévoit une nouvelle augmentation du pourcentage obligatoire des matériaux renouvelables, dont le bois est le principal, dans les constructions neuves. De plus en plus, le bois s'affirme comme le matériau du XXI^e siècle, au même titre que l'acier a été celui du XIX^e siècle et le béton celui du XX^e siècle (FCBA 2017, Ducerf 2021).

Le marché de la construction bois est actuellement dominé par les résineux. En effet, la production de sciages est en faveur des résineux, représentant plus de quatre-vingt pourcents du volume des sciages produits par les scieries françaises alors que la surface forestière française est composée de deux tiers de feuillus, dont la moitié de chêne, et d'un tiers de résineux (FCBA, 2020). Dans le marché actuel de la construction, les résineux sont utilisés principalement pour la charpente, l'ossature et la menuiserie intérieure. Les bois feuillus sont plutôt destinés à des usages liés à l'aménagement intérieur, et à la menuiserie intérieure et extérieure. Les produits d'ingénierie, majoritairement en résineux, sont de

plus en plus utilisés car appréciés pour leur meilleure stabilité dimensionnelle et leurs propriétés mécaniques moins hétérogènes et plus faciles à appréhender. Les principaux sont les bois massifs aboutés (BMA), les bois lamellé-collé (BLC) et les panneaux lamellé-croisés (CLT) pour les produits issus du sciage, le contre-plaqué et le LVL (Laminated Veneer Lumber) pour les produits issus du déroulage.

La ressource française de résineux est très bien gérée mais elle offre très peu de marge d'augmentation de la récolte annuelle de bois d'œuvre. Elle ne suffira pas pour répondre aux besoins de bois dans la construction. En revanche, il existe une ressource disponible très importante en feuillus et tout particulièrement en chêne de qualité secondaire, les belles qualités étant très bien exploitées et valorisées (tranchage, tonnellerie, ébénisterie). Le stock de bois sur pied de cette qualité est en constante augmentation et les propriétés mécaniques de ce bois conviennent parfaitement aux exigences structurelles de la construction bois, dépassant même celles des résineux pour certaines applications.

Cependant, pour exploiter et valoriser cette ressource, il est nécessaire d'adapter et de faire évoluer l'ensemble de la transformation car si les feuillus ne représentent que 20 % à peine de la production de sciages de bois d'œuvre, la raison est celle des prix. C'est un fait, les coûts de la matière première sur pied, de l'exploitation des bois en forêt et de la transformation en usine sont en faveur des résineux dont les outils de production sont déjà très automatisés avec des cadences élevées pour des coûts faibles. Ce n'est pas encore le cas pour la filière des feuillus, du chêne en particulier. La forme moins homogène des grumes de chêne et la valeur de la matière première sont deux arguments de poids justifiant des procédés où l'œil et la décision de l'homme restent la règle. Mais ce modèle de transformation n'est plus suffisamment compétitif pour répondre aux exigences pécuniaires du marché de la construction.

C'est ainsi que, pour répondre à cette hausse des besoins en bois, trois défis majeurs à relever par la filière bois feuillus peuvent être identifiés. Tout d'abord, la mobilisation d'un plus grand volume de matière première à des prix acceptables, ensuite la transformation efficiente et flexible de la matière et enfin la fabrication de produits techniques innovants et compétitifs sur le marché de la construction.

Le groupe Ducerf, acteur majeur de la transformation du chêne en France, est bien conscient de ces enjeux et souhaite développer et moderniser son outil de production. La société, qui siège dans le Charolais, est composée de trois filiales : Ducerf Scierie avec ses trois sites de production, Les Bois Profilés, deux sites, et Bourgogne Bois Industrie. Au sein du groupe, tout un travail de rationalisation des coûts, d'industrialisation, de modernisation de l'outil de production et de développement de solutions innovantes est mené au quotidien. La société Ducerf a la caractéristique et la force de regrouper des entreprises de première¹ et seconde² transformation, la mettant en position idéale pour repenser ses métiers et rendre la valorisation des feuillus technologiquement et économiquement plus compatible avec les exigences de la construction bois. De plus, spécialiste de l'aboutage, Ducerf maîtrise l'intégralité des procédés permettant la fabrication de lames aboutées, éléments de base de la majorité des produits d'ingénierie en bois issus du sciage.

Conscient de la nécessité de se transformer et fort de 136 ans d'histoire dans l'industrie de la transformation du chêne, Ducerf s'est entouré par le biais de cette thèse en convention CIFRE des compétences du Laboratoire des Matériaux et Procédés (LABOMAP) de Cluny, acteur local de la recherche sur le bois au rayonnement international. L'équipe Matériau et Usinage Bois (MUB) du LABOMAP travaille depuis 1994 sur la valorisation du chêne (Marchal *et al.* 1994), et ce sujet continue

¹ Ducerf Scierie

² Les Bois Profilés et Bourgogne Bois Industrie

actuellement de faire l'objet de travaux de recherche (Faydi *et al.* 2017, Besseau *et al.* 2020). Ces dernières années, Ducerf et le LABOMAP ont déjà collaboré sur des projets de recherche d'envergure. L'un d'eux, concernant le traitement thermique du bois par haute température, a donné naissance à la société Bois Durables de Bourgogne qui est à ce jour le leader français dans ce domaine. Un autre, toujours actuel, concerne le développement des panneaux CLT en chêne de l'association Bois Croisés de Bourgogne dont fait partie Ducerf.

Cette thèse a ainsi pu bénéficier des moyens de production, de l'expérience et de l'expertise industrielle de Ducerf, des compétences techniques, scientifiques et technologiques de l'équipe MUB du LABOMAP ainsi que du soutien financier de l'Association Nationale Recherche Technologie (ANRT).

Cette thèse s'inscrit dans un projet de développement de solutions innovantes permettant de faire avancer l'industrie du bois vers l'ère de l'usine 4.0 et de la digitalisation. Dans le cas particulier du chêne où l'achat et la transformation d'une matière première aux qualités très hétérogènes sont les problématiques récurrentes, la modernisation des procédés de fabrication et l'évolution vers des concepts d'usine 4.0 devraient rendre la production de produits techniques plus compétitive pour répondre aux marchés de la construction bois. Mais pour cela, il importe d'implanter, tout au long du processus, des capteurs et automates communicant avec les machines d'usinage et permettant de caractériser les produits à différentes étapes. Les scanners apparaissent alors comme des éléments incontournables pour optimiser la valorisation de la matière et accentuer la compétitivité des usines.

Différentes technologies de scanners, d'abord développées pour les résineux, s'adaptent peu à peu au cas du chêne. L'une d'elle permet de mesurer l'orientation des fibres (ODF) du bois grâce à une technologie laser, mais peu d'études scientifiques mettent en avant le potentiel de cette technologie sur le chêne. L'étude la plus aboutie sur le sujet reste la thèse de Faydi en 2017 avec le LABOMAP (Faydi, 2017). Elle traite de l'utilisation de la mesure de l'ODF sur des avivés de chêne sec dans le but de les classer pour la résistance mécanique, étape clé permettant de répondre aux exigences réglementaires d'utilisation du bois en structure (NF B52-001-1:2018). Par ailleurs, ces scanners qui étaient essentiellement destinés à la seconde transformation (sciages secs et rabotés) s'adaptent peu à peu au contexte de la première transformation (sciages verts et bruts).

Des études (Faydi, 2017 ; FCBA, 2017 ; Besseau *et al.* 2020 ; Rais *et al.* 2021) montrent qu'un scanner mesurant l'ODF du bois (scanner ODF) serait un équipement offrant des solutions pour contribuer à l'évolution technologique de la transformation du chêne. Cette thèse a comme objectif l'étude de la performance d'un tel scanner pour le chêne et l'exploration de plusieurs pistes d'utilisation de cette information essentielle pour le bois qu'est l'ODF dans le but d'améliorer l'efficacité de la production, notamment pour ce qui touche aux déformations de séchage et aux aboutages.

Ce mémoire est organisé en quatre volets. Le premier décrit et analyse les procédés de transformation traditionnels du chêne en lames aboutées ainsi que des pistes d'améliorations et le potentiel que représente l'information de l'ODF. Le second expose les études menées en début de thèse pour caractériser la performance d'un scanner laser à mesurer l'ODF sur des sciages de chêne et sa possible implantation à différents étages de la production, notamment en scierie. Le troisième présente une valorisation originale des mesures d'ODF comme données d'entrée pour la modélisation des déformations au séchage d'avivés de chêne. Le quatrième est dédié à la caractérisation de la résistance des aboutages et l'amélioration de la fabrication des lames aboutées grâce à l'exploitation des données d'un scanner ODF. Enfin, une conclusion générale et des perspectives de poursuite de ces travaux sont données en fin de mémoire.

Chapitre 1 :
Les étapes clés de la transformation du chêne en
lames aboutées

1. Introduction

De la forêt aux différents produits de construction, le bois de chêne subit plusieurs phases de transformation (Figure 1.1). Tout d'abord l'exploitation forestière prélève la ressource en forêt pour l'acheminer en scierie qui fait subir aux grumes une première transformation en sciages bruts. Ces derniers sont ensuite séchés pour pouvoir être travaillés par la seconde transformation qui en fera des lames aboutées, produits semi-finis à partir desquels sont fabriqués différents produits d'ingénierie pour la construction bois. Ce chapitre aborde un à un ces différents pôles dans le contexte traditionnel actuel de production. En fin de chapitre sont présentés différentes pistes d'évolution et de modernisation des procédés pour une transformation plus efficiente du chêne.

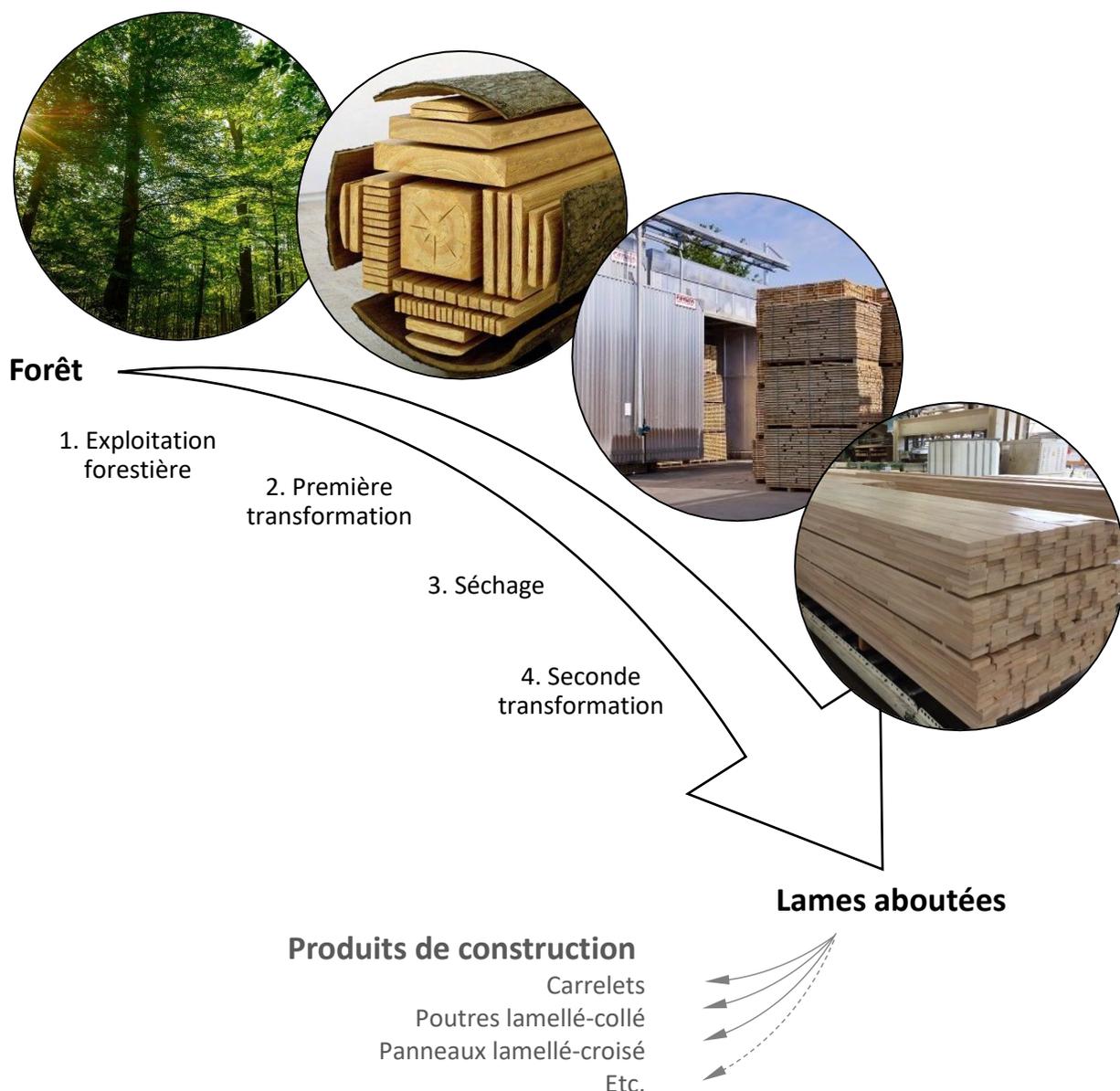


Figure 1.1 : Les étapes clés de la transformation du bois de chêne en produits de construction. Crédits : Bernard Lorette, du bois franc à l'œuvre, Ducerf Groupe.

2. L'exploitation forestière

2.1. Le matériau chêne

2.1.1. Structure de l'arbre

Le chêne est une essence de bois feuillue de la famille des angiospermes (*fagaceae*) qui regroupe plus de 650 espèces. Les plus répandues en France et destinées au bois d'œuvre sont le chêne pédonculé (*Quercus robur*), le chêne sessile (*Quercus petraea*) et le chêne pubescent (*Quercus pubescens*). Comme tout arbre, le chêne est composé (Figure 1.2.a) :

- d'un système racinaire qui assure des fonctions d'alimentation et d'ancrage de l'arbre dans le sol ;
- d'un collet qui fait la jonction entre les parties souterraine et aérienne de l'arbre ;
- d'un tronc, appelé aussi grume ou bille, qui est la partie destinée à la production de bois d'œuvre. Pour le chêne, le tronc représente environ 65 % du volume total de bois ;
- de branches essentiellement localisées sur la partie haute de l'arbre formant le houppier ;

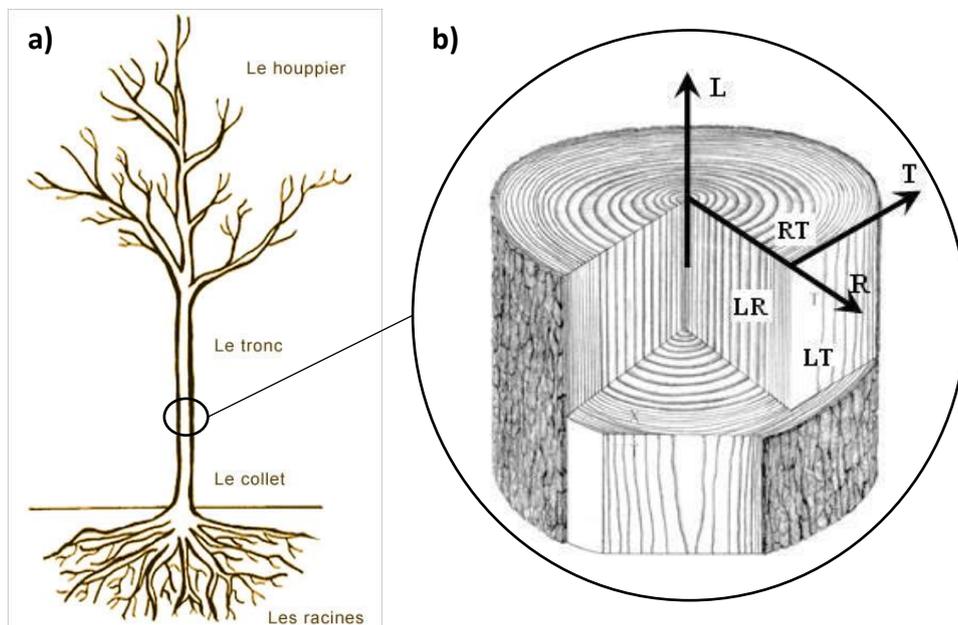


Figure 1.2 : a) Les différentes parties d'un arbre (Source : Pépinière Thuilleaux) ; b) Direction et plans principaux d'un arbre. L : Longitudinal ; T : Tangentiel ; R : Radial. (Moutee 2006).

Le bois est un matériau orienté anisotrope. Un repère cylindrique (Figure 1.2.b), défini par les directions suivantes, lui est généralement associé.

- La direction longitudinale (L) correspond, à l'axe du tronc et des branches.
- La direction tangentielle (T) qui est la direction tangente aux cernes d'accroissement et perpendiculaire à la direction (L).
- La direction radiale (R) qui passe par la moelle et qui est perpendiculaire aux deux autres.

Les trois plans associés à ce repère sont :

- Le plan tangentiel (LT)
- Le plan radial (LR)
- Le plan transversal (RT)

2.1.2. Formation du bois

La croissance d'un arbre s'opère par cycle annuel et se décompose en :

- **Croissance primaire** : c'est l'accroissement longitudinal du tronc et des branches qui fait grandir l'arbre.
- **Croissance secondaire** : c'est l'accroissement radial du tronc et des branches qui fait grossir l'arbre. Elle se caractérise par un cerne d'accroissement (Figure 1.3).

La formation du bois s'effectue en périphérie sous l'écorce en un lieu appelé cambium, véritable usine de production des tissus cellulaires (Figure 1.3). La moelle est donc la partie la plus ancienne de l'arbre. Au cours d'un cycle de croissance, la formation du bois en zone tempérée se fait en deux temps :

- En premier lieu, le cambium fabrique du bois de printemps qui, pour le chêne et certains autres feuillus, se caractérise par la présence de vaisseaux de gros diamètres. La concentration des gros vaisseaux en début de cerne constitue la zone initiale poreuse.
- En second lieu, le cambium produit un bois plus dense appelé bois d'été.

Les cernes nouvellement formés constituent l'aubier. Ses cellules sont vivantes et participent à la circulation de la sève. Au bout de quelques années, elles se bouchent avec des parois fines appelées thylles et renferment des tanins et autres composés chimiques. Le transport de sève cesse alors et le bois n'assure plus qu'une fonction de soutien mécanique. L'ensemble de ces cellules forme le duramen. Le chêne est une essence dite « à aubier différencié » pour la différence de couleur nette entre l'aubier et le duramen.

Entre l'écorce et le cambium se trouve le phloème, appelé aussi liber, qui participe à la conduction de la sève (Figure 1.3).

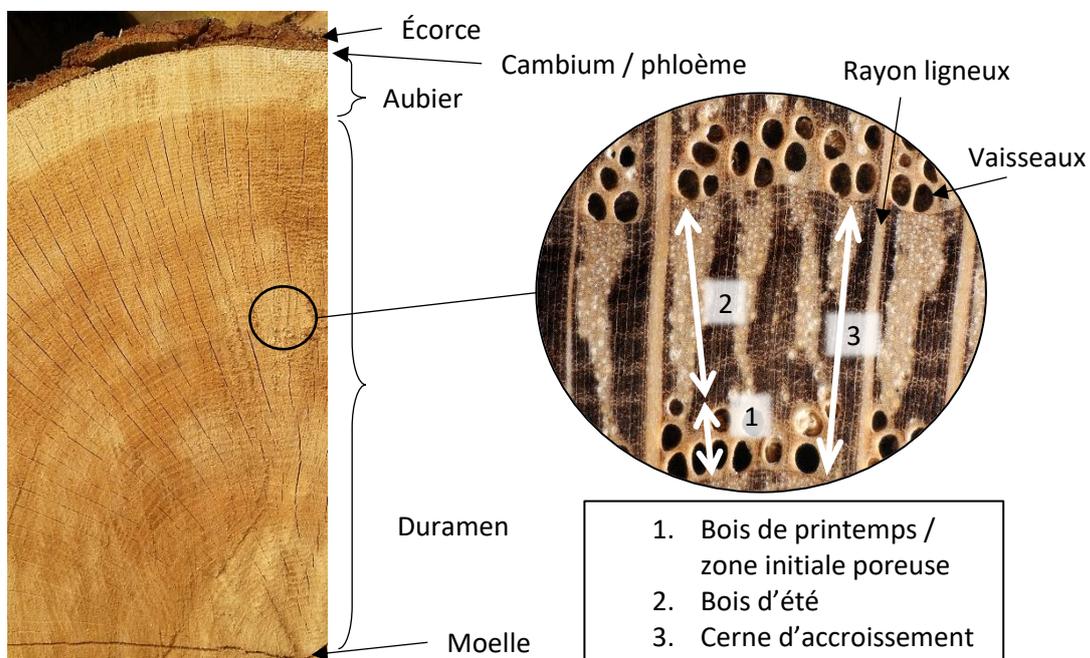


Figure 1.3 : Vue d'une coupe transversale d'un bois de chêne. Crédit : Jean-Claude Cerre

2.1.3. Structure cellulaire du chêne

Au niveau cellulaire, les principaux éléments composant le bois de chêne sont (Figure 1.4.a) :

- Les fibres, cellules de petite taille avec une paroi cellulaire épaisse et un lumen (espace à l'intérieur de la fibre) étroit. Les fibres sont orientées dans la direction longitudinale et assurent le soutien mécanique de l'arbre.
- Les vaisseaux, constitués d'un empilement de cellules formant des canaux pour la circulation de la sève brute. Ils sont orientés dans la direction longitudinale du bois.
- Les rayons ligneux ou parenchymes radiaux, qui sont des cellules orientées dans la direction radiale et qui permettent des échanges de sève entre vaisseaux ainsi que le stockage de réserves nutritives. Les rayons ligneux du chêne sont très grand et facilement visibles sur les trois plans, en particulier dans le plan radial (Figure 1.4.b).

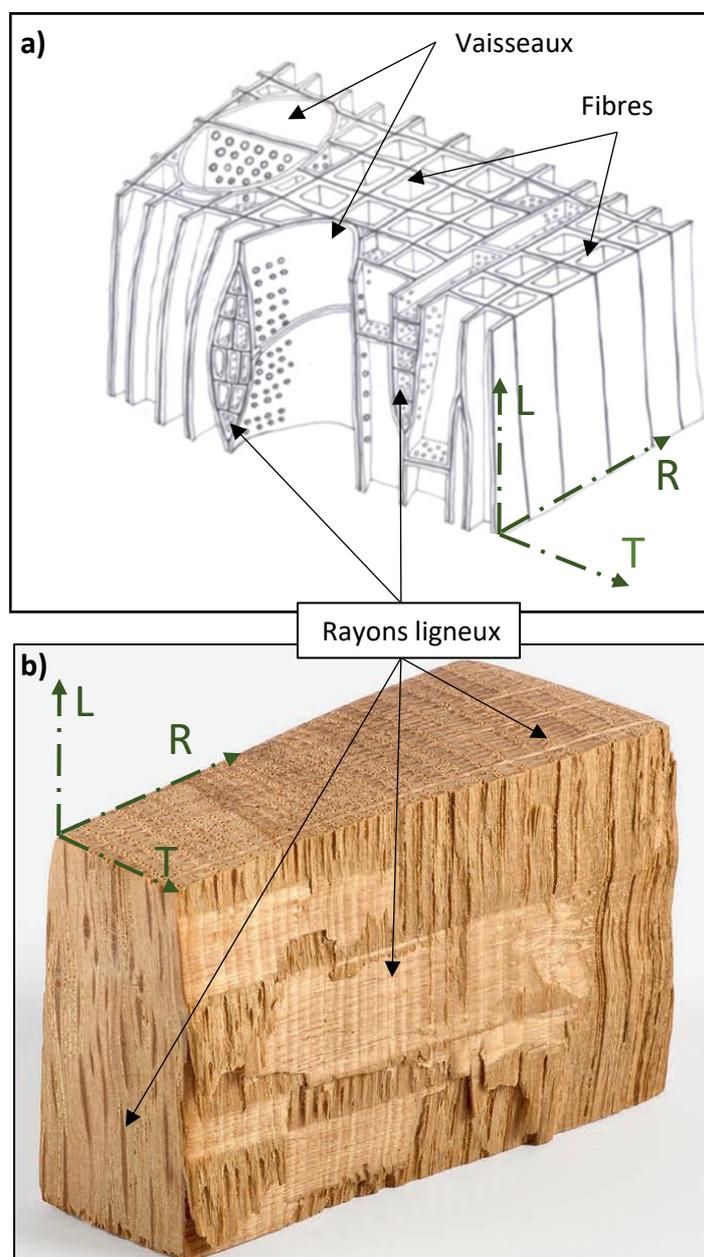


Figure 1.4 : a) Schéma des principaux éléments de la microstructure du chêne (Trouy 2018) ;
b) Pièce de chêne montrant les rayons ligneux dans les trois plans (Macchioni 2015).

2.2. Le chêne, essence dominante en France

La surface totale des forêts françaises est estimée à environ 15 millions d'hectares pour approximativement 72 % de feuillus, dont un tiers de chêne, et 28 % de résineux (Figure 1.5 ; FCBA, 2020). Le chêne représente presque le quart de la surface forestière française. En termes de volume sur pied dans les forêts de production, l'écart est moindre : les feuillus sont estimés à un peu plus d'1,7 milliards de mètres cubes et les résineux à 1 milliard de mètres cubes. Le gisement de chêne est estimé à 727 millions de mètres cubes, soit 26 % de la ressource nationale hors peupleraie (Figure 1.6).

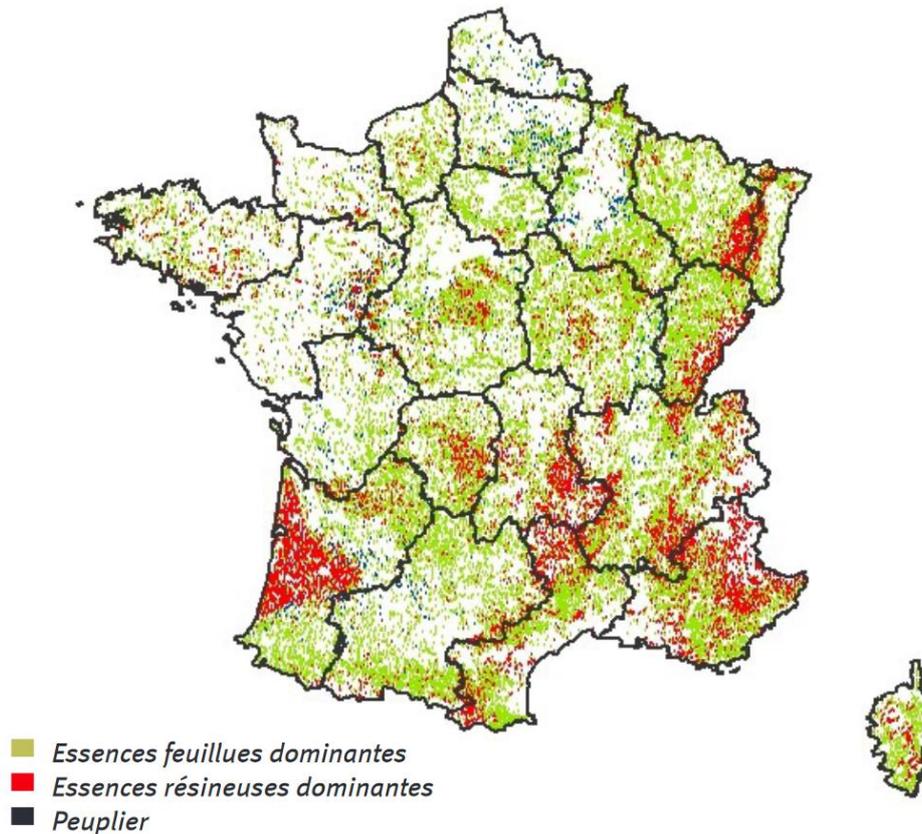


Figure 1.5 : Répartition des formations boisées en France par type d'essences (FCBA 2020)

En revanche, les proportions pour les volumes de bois d'œuvre récoltés sont inversées. Ce sont les résineux qui sont majoritairement exploités et représentent 73 % des volumes transformés. La récolte de bois d'œuvre de chêne a été de 2,4 Mm³ pour l'année 2018 et représente la moitié de la récolte de feuillus (hors peuplier). La plus grande proportion de récolte de résineux peut s'expliquer en partie par le fait qu'ils poussent bien plus vite que les feuillus. Par exemple, l'épicéa est couramment récolté entre 50 à 100 ans et le chêne entre 130 et 200 ans. Les plus grandes possibilités de valorisation des résineux dans la construction en sont aussi la raison.

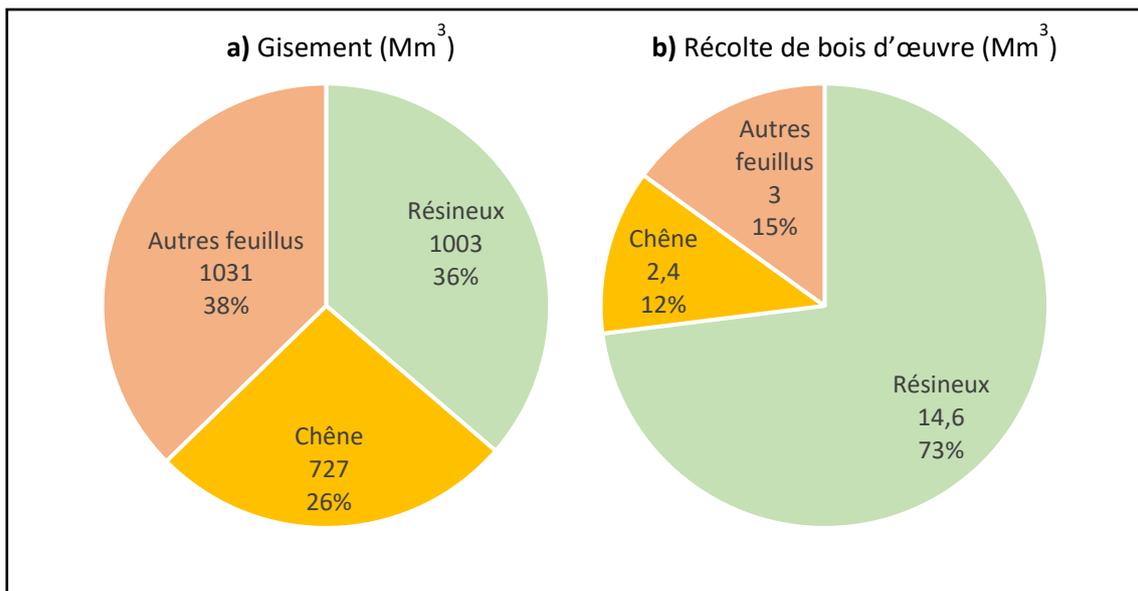


Figure 1.6 : a) Ressource disponible en feuillus et résineux ; b) Volumes de bois d'œuvre récoltés en France. Données de l'année 2018 exprimées en millions de mètres cubes (FCBA 2020).

2.3. Valorisation de la ressource de chêne

La qualité de la ressource de chêne est très variable, au sein d'un peuplement comme au sein d'un même arbre. La norme EN 1316-1:2012 donne un classement des différentes qualités de billons, décrites au Tableau 1.1.

Tableau 1.1 : Classement de la qualité des bois de chêne. (a) EN 1316-1 :2012 ; (b) : IGN, 2019

Classe	Tolérance de défauts principaux (a)	Usages (b)
A (a)	Aucun défaut toléré	Qualité de bois d'œuvre exceptionnelle (tranchage, déroulage, ébénisterie, menuiserie fine, merrains)
B (a)	1 à 2 petits nœuds par mètre linéaire, picots et 1 à 2 petits nœuds pourris tolérés	Bois de sciage de première qualité, qualité de bois d'œuvre bonne et courante (menuiserie, parquet, ameublement notamment)
C (a)	Nœuds sains acceptés, petits nœuds pourris acceptés	Bois de sciage de deuxième qualité (charpente)
D (a)	Nombreux défauts acceptés	Qualité de bois d'œuvre médiocre mais toujours sciable (caisserie, coffrage, traverses)
BI (b)	Aucune limite	Bois d'industrie (trituration, plaquettes, pâte à papier) et bois énergie. Bois de très mauvaise qualité et bois non sciable

La Figure 1.7 présente la position de ces différentes qualités dans une grume de chêne. La meilleure qualité d'un arbre se retrouve toujours au niveau de la bille de pied et elle décroît jusqu'au houppier. Dans la surbille, juste avant le houppier, il y a presque toujours du bois de qualité D. Les différentes qualités de bois sont présentes en proportions variables dans chaque chêne, mais tous ne possèdent pas nécessairement l'intégralité de ces qualités. Il est même courant que les qualités A et B soient absentes des billes de pied, et beaucoup d'arbres sont intégralement de qualité D ou BI. C'est tout le travail de la sylviculture de stimuler la croissance des bois de qualité.

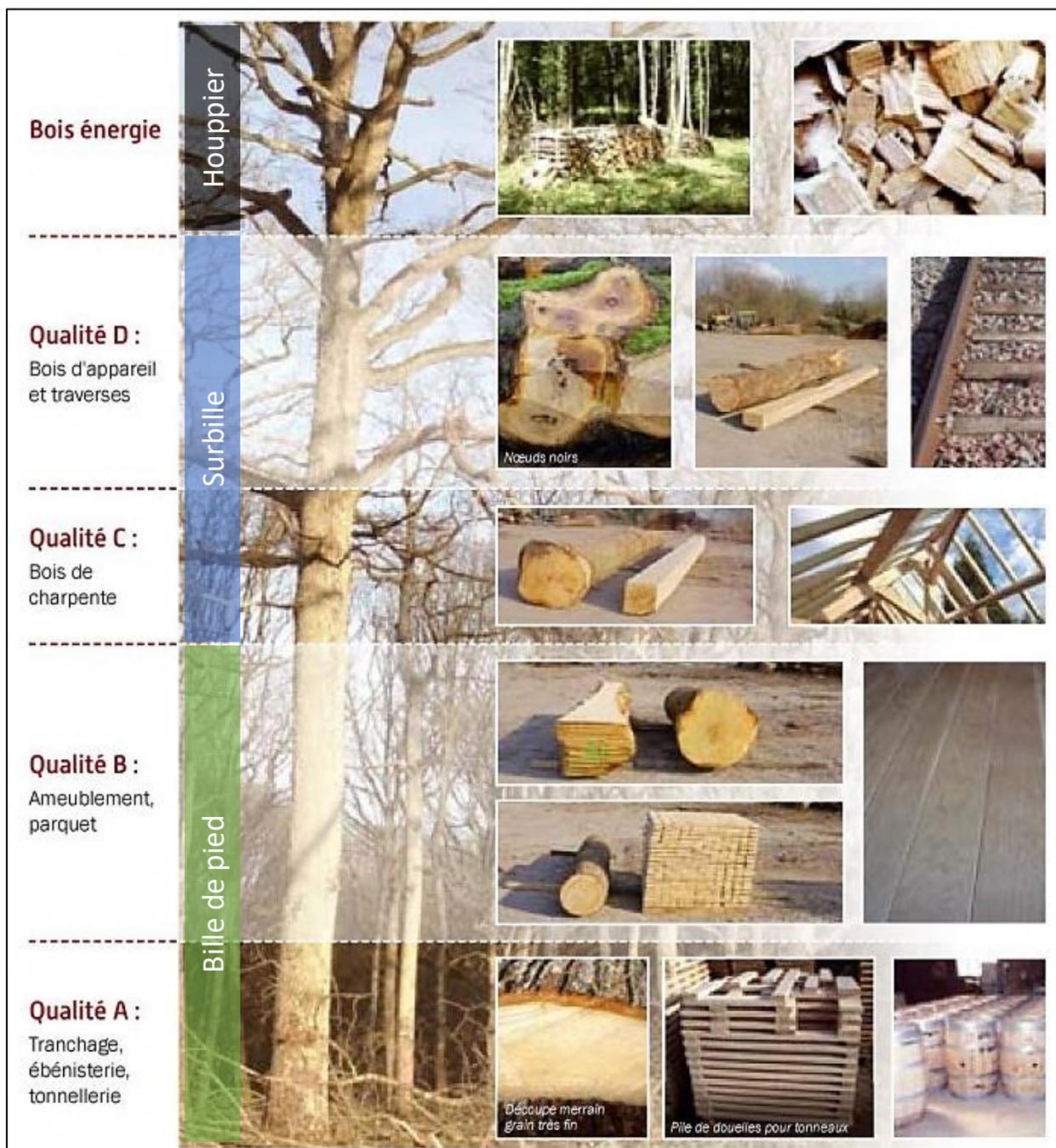


Figure 1.7 : Utilisation du bois de chêne (CRPF Île-de-France Centre Val de Loire, 2015)

2.4. Le chêne de qualité secondaire

Les classes de grume A et B, qui regroupent les chênes dits « de qualité », sont très bien valorisés et n'ont aucun problème de débouchés. Ces dernières années, leur prix n'a cessé d'augmenter car ils sont très recherchés par les transformateurs qui en font des produits à haute valeur ajoutée tels que des placages pour la marqueterie, des douelles pour la tonnellerie ou encore des plots pour l'ébénisterie et la menuiserie. La qualité C destinée à la charpente traditionnelle n'a pas trop de difficultés de débouchés. Une grande partie des chênes de la catégorie BI peut être qualifiée de « sans qualité ». Eux aussi sont bien valorisés relativement à leur qualité car ils bénéficient du nouvel essor que connaît le bois énergie.

En revanche, ce sont les chênes dits « de qualité secondaire » qui sont les moins bien valorisés et dont le gisement augmente considérablement (Croisel et Collet, 2016). Cette qualité de bois regroupe la catégorie D et une part des catégories C et BI. Outre les bois à forte nodosité, elle regroupe aussi les chênes aux courbures multiples et ceux de faibles diamètres avec une forte proportion d'aubier. La baisse de la récolte de chênes de cette qualité observée depuis plusieurs années peut s'expliquer par un relatif déclin de leurs débouchés traditionnels. A l'échelle de la région Bourgogne-Franche-Comté, cela représenterait quelques 50 millions de mètres cubes sur pied (APECF et Arts Cluny, 2011).

En effet, pour une scierie de chêne comme Ducerf, l'objectif est l'achat de chênes dont la bille de pied est de bonne qualité (A et B) ou ceux de qualité C mais avec une bonne rectitude. Or, de par la présence aussi des moins bonnes qualités dans la surbille, ces arbres fournissent un volume de bois de qualité secondaire qui s'avère être suffisant pour répondre aux besoins aux vues des débouchés actuels. C'est ainsi que le gisement de chêne de qualité secondaire reste peu utilisé, et donc, augmente ces dernières années.

La question de la valorisation des bois de qualité secondaire est avant tout un problème de débouchés. Ceux traditionnels n'offrant pas de perspectives de développement, l'équipe MUB du LABOMAP travaille depuis plus de 10 ans sur une valorisation de ces bois dans des produits d'ingénierie pour la construction qui offrirait des débouchés rémunérateurs (APECF et Arts Cluny 2011, Croisel et Collet 2016). En effet, les propriétés mécaniques des sciages issus de chênes de qualité secondaire sont compatibles avec les exigences structurelles de la construction, mais nécessitent un classement pour la résistance par machine (Faydi 2017).

3. La première transformation

Dans le processus traditionnel de fabrication d'une lame aboutée, la première transformation regroupe l'ensemble des opérations permettant la transformation de la grume en avivés. Les avivés sont des bois bruts de sciage de section parallélépipédique et de vives arrêtes (NF B50-002 : 1961). Les différentes opérations actuellement pratiquées en scierie sont listées sur la Figure 1.8. Les trois premières sont communes à tous les produits de la scierie, tandis que les dernières sont spécialement dédiées débitage des avivés.



Figure 1.8 : Liste des opérations de 1^{ère} transformation dans le processus de fabrication de lames aboutées.

3.1. Opérations communes à tous les produits de la scierie

Les grumes (couramment de longueur entre 6 et 20 mètres) coupées en forêt sont acheminées par camion sur le parc à grumes de la scierie où elles sont découpées en billons (couramment de longueur entre 1,5 et 6 mètres) en fonction des différentes qualités et des produits auxquels ils peuvent être destinés. Les billons sont ensuite écorcés puis sciés avec une scie à ruban. A ce stade, deux grandes familles de produits peuvent être identifiées :

- **Les plots** composés de plateaux débités parallèlement (mode de débit en plot) (Figure 1.9). Il existe deux types de plots : les plots reconstitués, lorsque les plateaux sont regroupés par billon, et les plateaux sélectionnés lorsqu'ils sont répartis en piles de qualité homogène. Les premiers plateaux sciés sont appelés « plateaux de découvert » et sont des produits subis écartés à cause d'une trop grande proportion d'aubier et d'une largeur trop faible pour être intégré aux plots. Ces plateaux de découvert sont recyclés le plus souvent pour la fabrication d'avivés. Le mode de débit en plot est le plus productif pour une scierie équipée d'une scie à ruban, car il se limite juste à un sciage de plateaux parallèles sans qu'il n'y ait besoin d'autres usinages par la suite. Ce sont très souvent les plus belles qualités (A et B) qui sont sciées ainsi pour former des plots, mais il peut cependant arriver que des billons de moindre qualité soient aussi débités en plateaux pour alimenter la ligne de débit d'avivés.

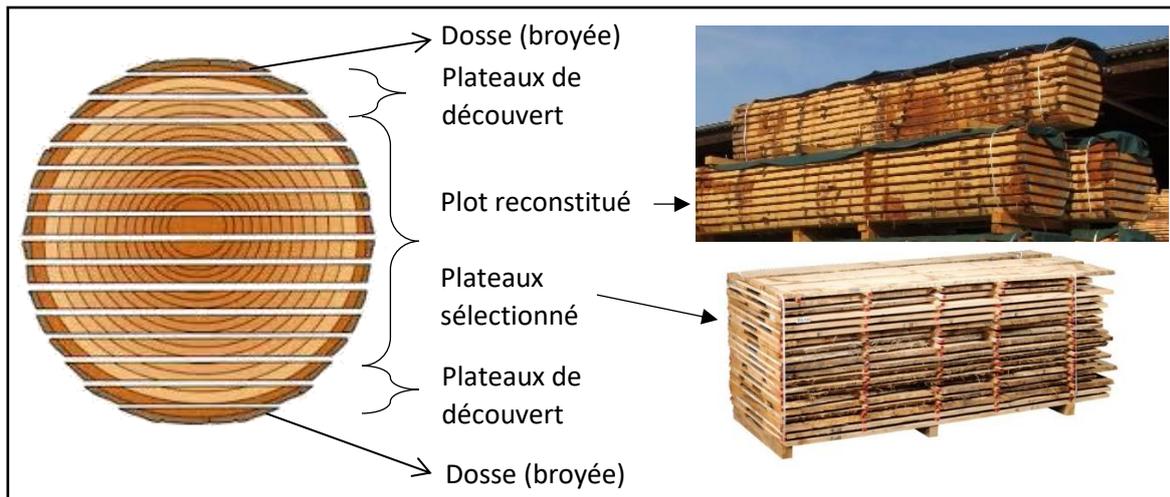


Figure 1.9 : Mode de débit en plot (gauche) et plots produits par Ducerf Scierie (à droite). (Crédit : Ducerf)

- **Les pièces équarries** regroupent des produits de plus fortes sections tels que les charpentes traditionnelles et les traverses pour les voies de chemin de fer ou des aménagements paysagers. Ils sont sciés dans des billons de qualité C ou D, leurs sections importantes permettant d'accepter de plus gros défauts. Le sciage de ces billons génère beaucoup de plateaux de découvert, appelées ici « plateaux de côté », qui sont recyclées pour la fabrication d'avivés souvent de qualité moindre (Figure 1.10).

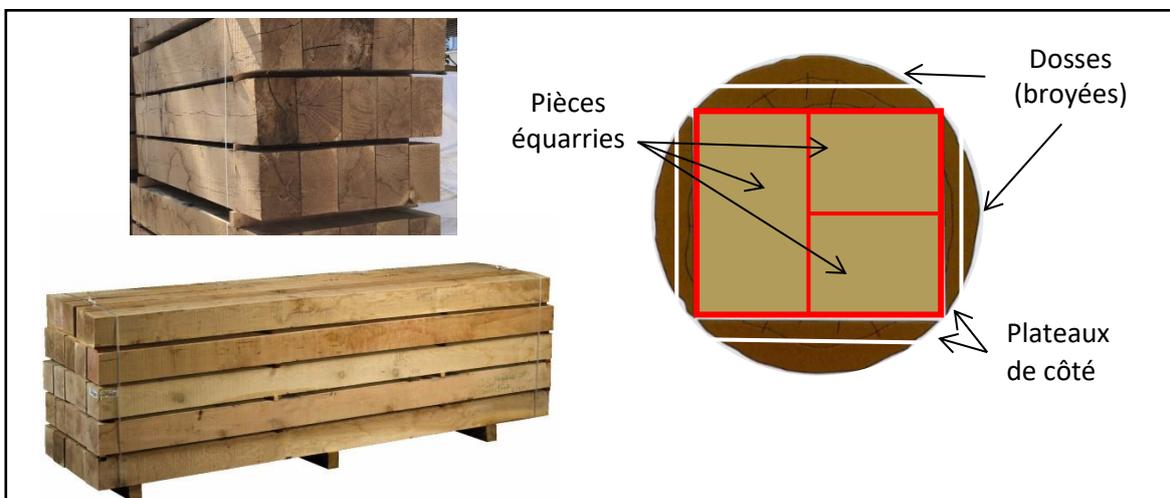


Figure 1.10 : Exemple de débit pour la fabrication de pièces équarries. (Crédit photos : Ducerf)

3.2. Opérations propres au débit d'avivés

Dans les processus traditionnels, en entrée d'une ligne de débit se retrouvent :

- Les plateaux de découvert et de côté qui ont beaucoup d'aubier.
- Des plateaux déclassés : plateaux avec une nodosité importante ou des fentes conséquentes ne pouvant être classés en plateaux sélectionnés.

Les opérations propres au débit d'avivé consistent à :

- Déligner des plateaux en avivés en optimisant leur largeur pour perdre le moins de matière possible. En pratique, l'opération est actuellement manuelle : un opérateur insère un à un les plateaux dans une déligneuse après avoir défini au moyen de lasers les positions des coupes.
- Etablir un plan de débit de tronçonnage en tenant compte des défauts et en optimisant les rendements matière et économique. La schématisation d'un plan de débit d'avivé est donnée sur la Figure 1.11. En pratique, des opérateurs analysent visuellement les avivés, repèrent la position des défauts, tracent les positions de tronçonnage et marquent un code qualité sur chaque élément.
- Tronçonner les avivés en fonction du plan de débit. Cette opération est réalisée par une tronçonneuse automatique équipée de capteurs permettant la lecture du plan de débit (position des défauts et code qualité).
- Trier les avivés par catégorie (section, longueur, qualité). En sortie de tronçonneuse, les avivés sont éjectés automatiquement dans différents casiers.
- Empiler les avivés en paquets par catégorie.

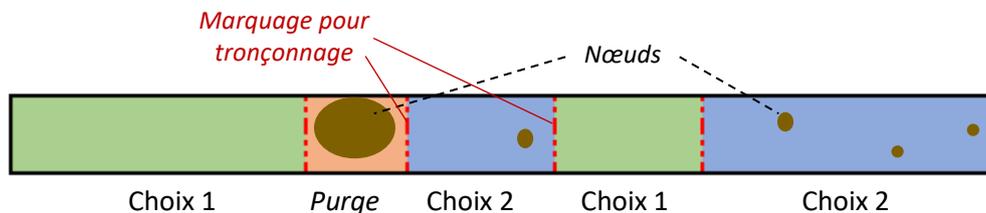


Figure 1.11 : Schématisation d'un plan de débit d'un avivé. Les lignes rouges représentent les positions des tronçonnages optimisés.

3.3. Les avivés

En scierie, les avivés sont triés selon les qualités QF1a, QF1b, QF2, QF3 et QF4 de la norme EN 975-1:2009 (Tableau 1.2). Le suffixe X peut être ajouté et désigne la présence d'aubier sain inférieure aux deux tiers de l'épaisseur. Si celle limite est dépassée, le suffixe XX est ajouté.

Tableau 1.2 : Classement qualitatif d'aspect selon EN 975-1:2009 (Adapté de APECF, crédit : Image&associé)

Qualité	Critères et aspect
QF1a	<p>Pièces de droit fil (3%) exemptes de singularités autres que les nœuds sains</p> <p>Un nœud sain inférieur à 10 mm est admis sur les pièces de largeur inférieure à 120 mm (2 nœuds pour les autres).</p>
QF1b	<p>Pièces pratiquement exemptes de singularités autres que les nœuds sains. Les nœuds sains inférieurs à 5 mm ne sont pas pris en compte.</p> <p>3 nœuds inférieurs à 12 mm admis pour les pièces de largeur inférieure à 120 mm et un nœud supplémentaire par tranche de largeur de 40 mm pour les pièces plus larges.</p>
QF2	<p>Pièces pratiquement exemptes de singularités autres que les nœuds. Les nœuds sains inférieurs à 5 mm ne sont pas pris en compte.</p> <p>3 nœuds inférieurs à 25 mm admis pour les pièces de largeur inférieure à 120 mm et un nœud supplémentaire par tranche de largeur de 40 mm pour les pièces plus larges.</p>
QF3	<p>Les nœuds sains inférieurs à 10 mm ne sont pas pris en compte. Tolérance d'un nœud mort ou pourri inférieur à 20 mm et de flache inférieur à 3 mm.</p> <p>3 nœuds inférieurs à 40 mm admis pour les pièces de largeur inférieure à 120 mm et un nœud supplémentaire par tranche de largeur de 40 mm pour les pièces plus larges.</p>

Nœuds sains inférieurs à 70 mm admis sans limitation.
Tolérance de 2 nœuds morts ou pourris, l'un inférieur à 35 mm et l'autre inférieur à 20 mm.

Flache admis jusqu'à 10 %
de la largeur et 20 % de la
longueur

QF4



La production d'avivés de chêne en France est en très légère baisse depuis 2009 (Figure 1.12). Elle suit à peu près l'évolution du volume total de sciages. Le volume de plots a chuté de près de la moitié ces dix dernières années. La production d'avivés se décline en un très grand nombre de références (estimé entre 100 et 200), tenant compte de l'épaisseur, la largeur, la longueur et la qualité des pièces. Néanmoins, pour Ducerf Scierie, une grande majorité du volume d'avivés secs est en épaisseur 27 mm, en largeurs comprises entre 80 et 130 mm, en longueurs inférieures à 1 m et en qualité supérieure ou égale à QF2XX. Cela représente une vingtaine de références.

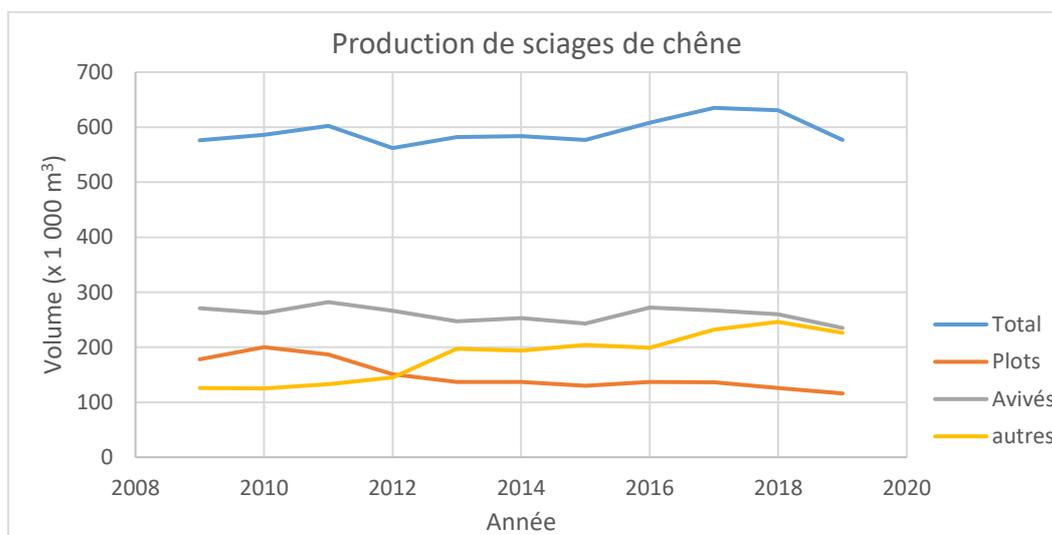


Figure 1.12 : Données de production de sciages (hors bois sous rails) de chêne en France de 2009 à 2019 (source : AGRESTE, 2020).

4. Le séchage

À la charnière entre la première et la deuxième transformation intervient le séchage du bois, étape importante dans le processus de fabrication d'une lame aboutée. En effet, le séchage est nécessaire pour garantir une bonne stabilité dimensionnelle des produits lors de leurs usinages et leur mise en œuvre. De plus, il est important que les bois destinés aux procédés de collage aient une hygrométrie homogène. Par ailleurs, le procédé de séchage est source de pertes de matière, comme cela est exposé dans cette partie.

4.1. Principe du séchage du bois

4.1.1. L'eau et le bois

Le bois est un matériau fibreux composé de cellules vivantes et, comme tout organisme vivant, l'eau est le vecteur principal de son fonctionnement physiologique. Au sein des cellules du bois, l'eau est présente sous deux formes : l'eau libre dans le lumen (vide à l'intérieur des cellules), et l'eau liée contenue dans les parois cellulaires grâce à leurs propriétés hydrophiles. L'état particulier de la fibre dont le lumen est vide d'eau libre et les parois saturées d'eau liée est appelé le point de saturation des fibres (PSF).

La teneur en eau dans une pièce de bois, appelée aussi humidité du bois, est définie comme le rapport entre la masse d'eau présente dans cette pièce et la masse sèche de cette même pièce de bois, appelée masse anhydre. L'humidité du bois s'exprime en pourcentage. Le PSF correspond en moyenne à une humidité du bois de 30 %. Cette valeur varie en fonction de la température (Siau, 1984) et de l'essence. Pour le chêne, la fiche TROPIX 7 du CIRAD donne une valeur de 31 % (CIRAD).

4.1.2. Le comportement hygroscopique du bois

Lorsque la teneur en eau dans le bois est inférieure au PSF, le bois a un comportement hygroscopique, c'est-à-dire que sa teneur en eau va s'équilibrer en fonction des conditions climatiques dans lesquelles il se trouve. Ainsi, les variations de température et d'humidité de l'air entraînent une perte ou une reprise d'eau de la part du bois pour évoluer vers une nouvelle humidité d'équilibre.

4.1.3. Le processus de séchage du bois

Le séchage du bois peut se décomposer en deux phases principales. Dans un premier temps, l'eau libre, se déplaçant facilement dans le bois, s'évacue jusqu'à ce que les fibres atteignent le PSF. Dans un second temps, l'eau liée, dont la migration est lente, s'évacue à son tour. Des phénomènes de transfert couplé de chaleur et de masse entrent en compte lors du séchage et expliquent en partie la lente cinétique de séchage. Ces aspects, qui ne sont pas l'objet de ce manuscrit, sont développés dans l'ouvrage *Fundamentals of Wood Drying* (Perré, 2007).

Il existe deux modes de séchage du bois :

- **Le séchage naturel** : lorsque, après sciage, les pièces de bois sont laissées à l'air libre. Elles sèchent alors naturellement jusqu'à atteindre une humidité d'équilibre entre 13 % et 17 % (NF B50-002:1961). Naturellement, le séchage s'opère par convection.
- **Le séchage artificiel** : dès lors qu'une intervention visant à contrôler le séchage est exercée, il est artificiel. Le séchage artificiel le plus couramment pratiqué est le séchage

par convection forcée qui consiste à placer le bois dans une enceinte, appelée séchoir (Figure 1.13), dans laquelle sont contrôlés l'humidité, la température et les flux d'air. Le séchage artificiel permet de réduire considérablement le temps de séchage et de préserver une bonne qualité du bois (pas d'attaques d'insectes xylophages ou de champignons qui peuvent se produire lors du séchage naturel ; réduction des déformations des bois).

Industriellement, les avivés de chêne sont séchés sur piles dans des séchoirs (Figure 1.13).



Figure 1.13 : Pile d'avivés (gauche) et chargement de piles dans un séchoir (droite). (Crédit : Ducerf).

4.2. Les déformations causées par le séchage

4.2.1. Les retraits dimensionnels

L'assèchement des parois cellulaires provoque un rétrécissement des cellules qui génère des variations dimensionnelles dans le matériau appelées retraits. Le retrait est fortement anisotrope. Le Tableau 1.3 donne des exemples de retraits tangentiel et radial pour quelques essences. Le retrait longitudinal total est de l'ordre de 0,5 % - 1 % pour toutes les essences et est très souvent négligé faces aux deux autres (Perré, 2007). Le retrait total d'une pièce de bois dans une direction i est défini par l'équation 1.1 :

$$R_i = \frac{l_i(PSF) - l_i(anhydre)}{l_i(PSF)} \quad (\text{équation 1.1})$$

Avec i la direction L, R ou T ; l_i la dimension dans la direction i .

Ainsi, pour le chêne, il y a pratiquement un facteur dix entre les retraits longitudinal et tangentiel et un peu plus d'un facteur deux entre les retraits tangentiel et radial.

Tableau 1.3 : Valeurs de retraits pour quelques essences (CIRAD).
Valeurs moyennes suivies des écarts-types entre parenthèse.

Essence	Retrait tangentiel total	Retrait radial total
Chêne	9,7 % (0,9 %)	4,5 % (0,5 %)
Hêtre	11,6 % (1,2 %)	5,7 % (0,9 %)
Châtaignier	6,9 % (-)	4,2 % (-)
Frêne	9,6 % (-)	5,7 % (-)
Epicéa	8,2 % (0,8 %)	3,9 % (1,4 %)
Douglas	6,9 % (1,2 %)	4,7 % (0,4 %)

Ces retraits sont à l'origine d'importantes déformations, de contraintes internes et donc de défauts de séchage. Ces déformations et contraintes ont de multiples origines :

- Les variations locales d'orientation des fibres (ODF) causent des différences d'orientation du retrait des fibres et donc l'apparition de déformations et/ou de contraintes internes.
- Les différences de retraits observables entre le bois d'été et le bois de printemps, ou encore entre le bois parfait et le bois de réaction (Clair 2005), génèrent là aussi des déformations et/ou contraintes.
- Pendant le séchage, la surface extérieure de la pièce de bois séchant plus vite que la partie centrale, elle se rétracte plus rapidement que l'intérieur provoquant ainsi des déformations et/ou contraintes.

Globalement, les défauts liés à ces déformations et contraintes peuvent être classés en deux catégories :

- Les fentes : lorsque les contraintes pendant le séchage dépassent les limites admissibles (résistance à la traction perpendiculaire aux fibres) par le bois, les tissus du bois se déchirent et des fentes apparaissent.
- Les déformations des avivés : la forme géométrique d'une pièce de bois après séchage est différente de celle avant séchage.

La présence de nœuds dans une pièce de bois cause beaucoup de déformations ou contraintes pendant le séchage car plusieurs facteurs les favorisant y sont présents : fortes variations d'ODF, bois de réaction et vitesses de séchage différentes.

4.2.2. Les déformations d'avivés

Du fait de la grande différence entre les retraits tangentiel et radial, les déformations d'un sciage suite au séchage dépendent de sa position dans le plan transverse de la grume. La Figure 1.14 recense les différentes déformations de sections causées par l'anisotropie du retrait. Seules les sections débitées plein quartier (Figure 1.14.a et Figure 1.14.d) conservent leur forme rectangulaire initiale de sciage mais toujours avec une section réduite. Les pièces débitées sur dosse prennent une forme de tuile (Figure 1.14.b), les pièces débitées en faux quartier se déforment en losange (Figure 1.14.e) et les pièces contenant la moelle présentent des irrégularités d'épaisseur avec, souvent, des déformations marquées (Figure 1.14.c).

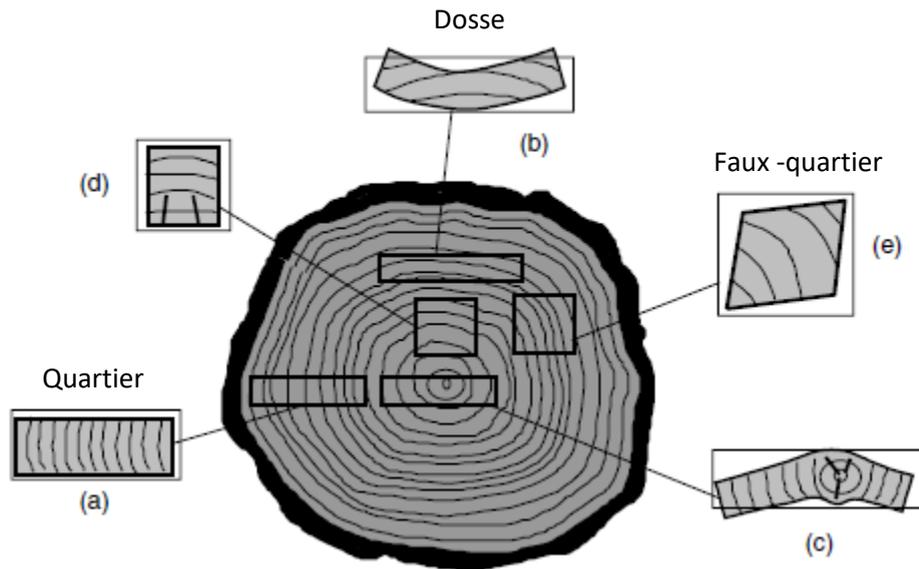


Figure 1.14 : Déformations de section dues à l'anisotropie du retrait tangentiel et radial (adapté de Perré, 2007).

La Figure 1.15 présente la terminologie des différentes déformations d'un sciage selon la direction longitudinale qui peuvent apparaître suite au séchage (ISO 2300:1973) :

- **Le voilement longitudinal de face** est défini comme « *la courbure de la pièce dans le sens de la longueur dans un plan perpendiculaire à la face* ». Il peut être simple (Figure 1.15.a) ou complexe (Figure 1.15.c). La flèche de face permet de quantifier cette courbure.
- **Le voilement longitudinal de rive** est défini comme « *la courbure de la pièce dans le sens de la longueur dans un plan parallèle à la face* » (Figure 1.15.e). Il peut être simple ou complexe. La flèche de rive permet de quantifier cette courbure.
- **Le voilement transversal**, plus couramment appelé **tuilage**, est défini comme « *la courbure de la pièce dans le sens de la largeur* » ou dans la section (Figure 1.15.b).
- **Le gauchissement** est défini comme la « *courbure hélicoïdale de la pièce dans le sens de la longueur* » (Figure 1.15.d). Il s'agit d'une rotation de la section autour de l'axe longitudinal.

Une conduite du séchage avec un cycle optimisé permet de limiter l'amplitude de ces déformations. En effet, le contrôle des conditions climatiques permet de réduire, tout au long du séchage, le gradient d'humidité entre la surface et le centre des pièces de bois (Remond, 2004). De plus, grâce aux phénomènes d'activation thermique et hydrique du fluage viscoélastique (Perré, 2007) ou de mécanosorption (Salin 2003, Riehl *et al.* 2003), il est possible de provoquer des relaxations de contraintes et de diminuer l'amplitude des déformations causées par les propriétés orthotropes du retrait.

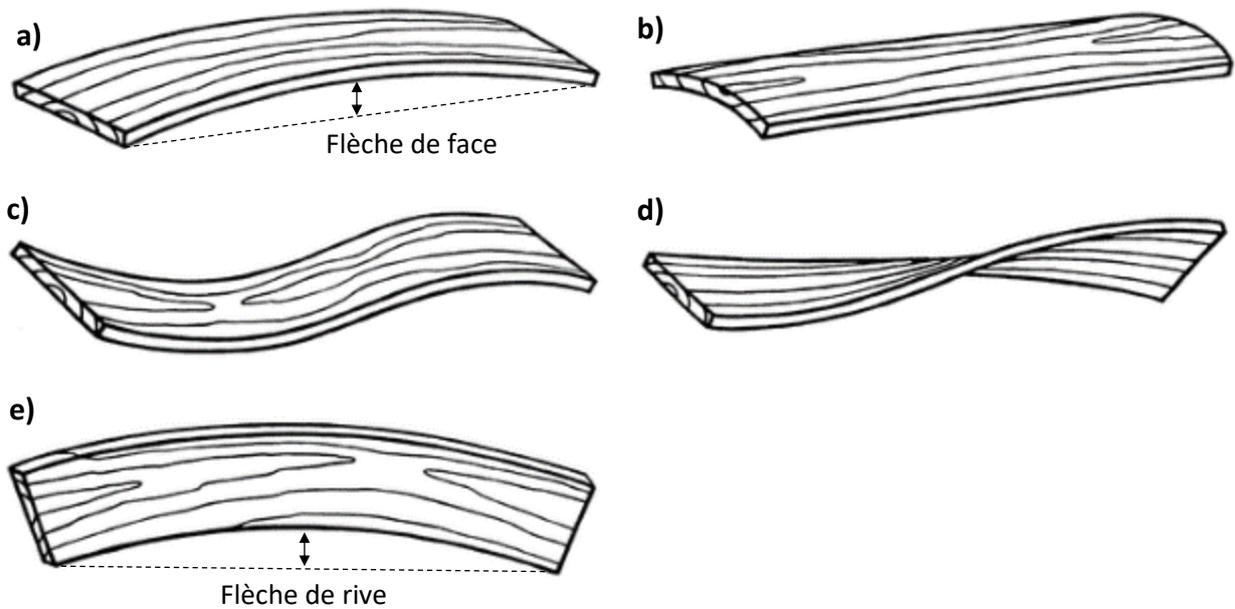


Figure 1.15 : Déformations dans le sens longitudinal d'un avivé : a) Voilement longitudinal de face simple ; b) Tuilage ; c) Voilement longitudinal de face complexe ; d) Gauchissement ; e) Voilement longitudinal de rive. (Adapté de l'ISO 2300:1973)

5. La seconde transformation

C'est après séchage que commence la seconde transformation. La Figure 1.16 présente les opérations permettant de transformer les avivés secs bruts de sciage en lames aboutées.

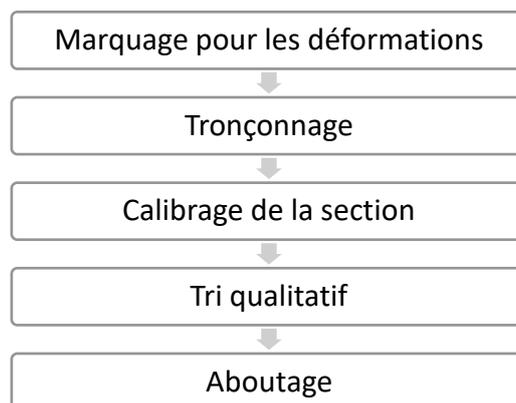


Figure 1.16 : Opérations de seconde transformation pour la fabrication de lames aboutées.

5.1. La correction des défauts de séchage

Avant tout, il est nécessaire d'éliminer les défauts qui résultent du séchage des avivés. Pour contrer les déformations longitudinales, une première opération consiste à tronçonner les avivés en éléments plus courts, appelés courçons, afin de diminuer l'amplitude des flèches de rive, des flèches de face ou encore de la rotation de section du gauchissement (Figure 1.17). Cette opération est faite par soucis

de moins perdre de matière lors du rabotage qui suit. Les fentes résultant du séchage sont aussi purgées à cette étape.

Dans le contexte actuel de l'entreprise Les Bois Profilés, cette étape a aussi pour but de réduire les plus grands avivés à une longueur inférieure à 90 cm, longueur maximale de courçons admissibles dans l'abouteuse.



Figure 1.17 : Exemple de purge d'une fente et de segmentation d'un avivé trop déformé en courçons de plus faible flèche.

L'opération de calibrage de la section se fait par rabotage des quatre faces des courçons. Cette opération d'usinage permet d'obtenir des courçons rectilignes et de section constante.

La surcote en largeur ou en épaisseur correspond à la différence entre la dimension bois sec moyenne d'un lot de courçons et la dimension calibrée souhaitée (Figure 1.18). La profondeur de passe de rabotage correspond à la réduction de dimension opérée par un outil. En général, elle correspond à la moitié de la surcote correspondante.

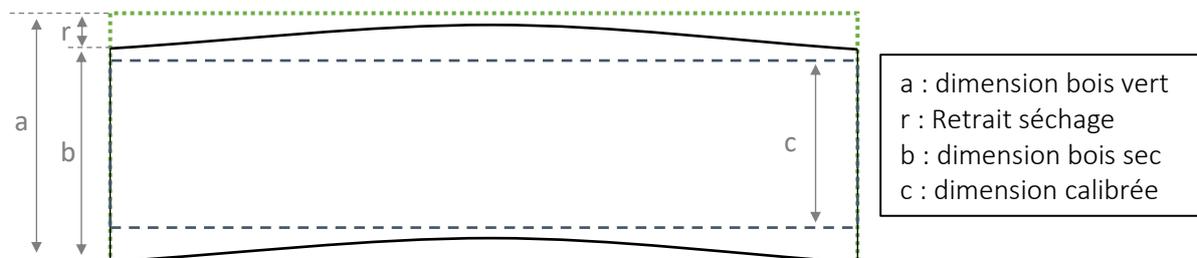


Figure 1.18 : Schématisation du rabotage d'un avivé déformé (vue de la face ou de la rive).

Les valeurs des surcotes doivent tenir compte des défauts apparus au séchage. En effet :

- la forme des sections des courçons n'est plus parfaitement rectangulaire et varie d'une pièce à l'autre à cause de leurs différences de position initiale dans les grumes ;
- les largeurs et épaisseurs des courçons varient aussi du fait de la variabilité des retraits pour une même essence ;
- les courçons ne sont plus rectilignes à cause des déformations longitudinales ;
- l'état de surface des courçons est encore brut de sciage. Le rabotage permet d'obtenir des faces propres et un état de surface plus lisse.

Les différents défauts de séchage sont corrigés grâce à l'enlèvement de matière du rabotage. Or, plus l'amplitude des déformations est importante, plus les surcotes sont élevées et donc plus le rendement matière est faible. Par la réduction de l'amplitude des déformations, le tronçonnage en amont permet de réduire la surcote et ainsi d'améliorer le rendement matière du calibrage.

5.2. Le procédé d'aboutage

Après le calibrage, une opération de tri qualitatif des courçons est effectuée pour affiner les classements esthétique et dimensionnel, avec notamment le contrôle de l'absence de défaut majeur dans la zone d'aboutage. S'en suit le procédé d'aboutage qui amène à la fabrication des lames aboutées.

L'aboutage à entures multiples est « un assemblage longitudinal réalisé par le collage de deux pièces de bois de fil et aux extrémités desquelles ont été pratiqués des coins trapézoïdaux semblables, appelés entures » (Centre Technique du Bois, 1973) (Figure 1.19). Depuis l'abattage de l'arbre jusqu'au courçon raboté, le bois n'a subi que des divisions et segmentations qui ont permis d'extraire les différentes qualités pour optimiser leur valorisation. Le procédé d'aboutage permet, au contraire, de reconstruire le bois en lames de grande longueur et de qualité homogène.

Les paramètres géométriques du profil des entures sont définis sur la Figure 1.19. La Figure 1.20 donne un exemple de ligne d'aboutage industrielle avec les différentes étapes pour produire des lames aboutées. Les courçons sont tout d'abord chargés sur chant par paquet (1). Les entures sont alors usinées en une seule passe sur les extrémités des courçons à l'aide de fraises (2 et 3) puis un peigne applique la colle sur la dernière extrémité usinée (4). Les pièces de bois sont ensuite mises en position d'aboutage (5) dans une presse et enfin un vérin applique pendant quelques secondes une pression longitudinale sur la lame préformée de sorte à générer un coincement mécanique entre les entures (6). Ce serrage suffit à garantir la cohésion de l'aboutage le temps que la colle réticule. Après cela, les lames produites sont empilées et acheminées vers les unités de fabrication des produits de construction ou d'ameublement.

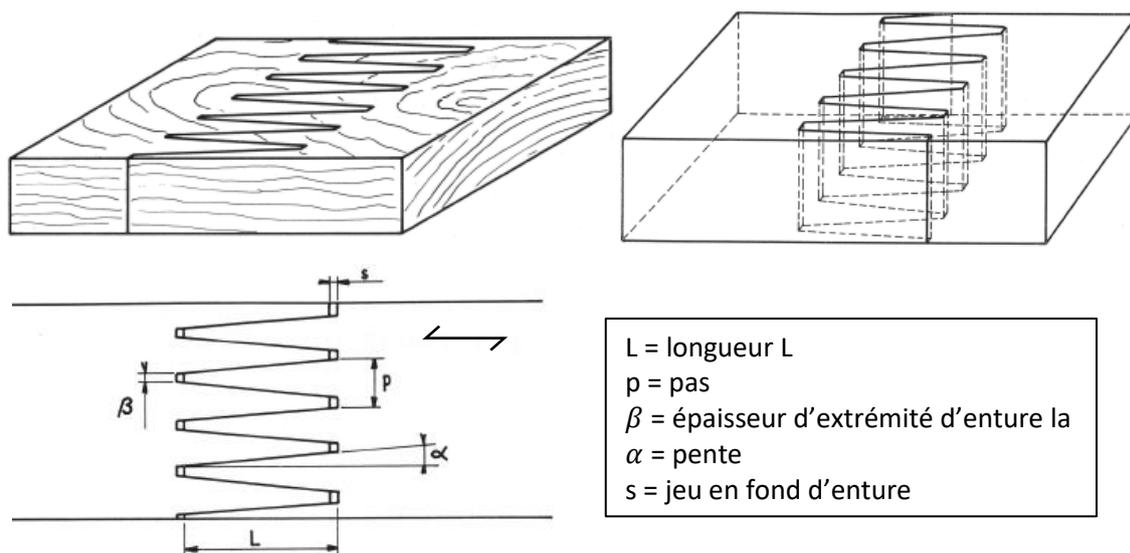
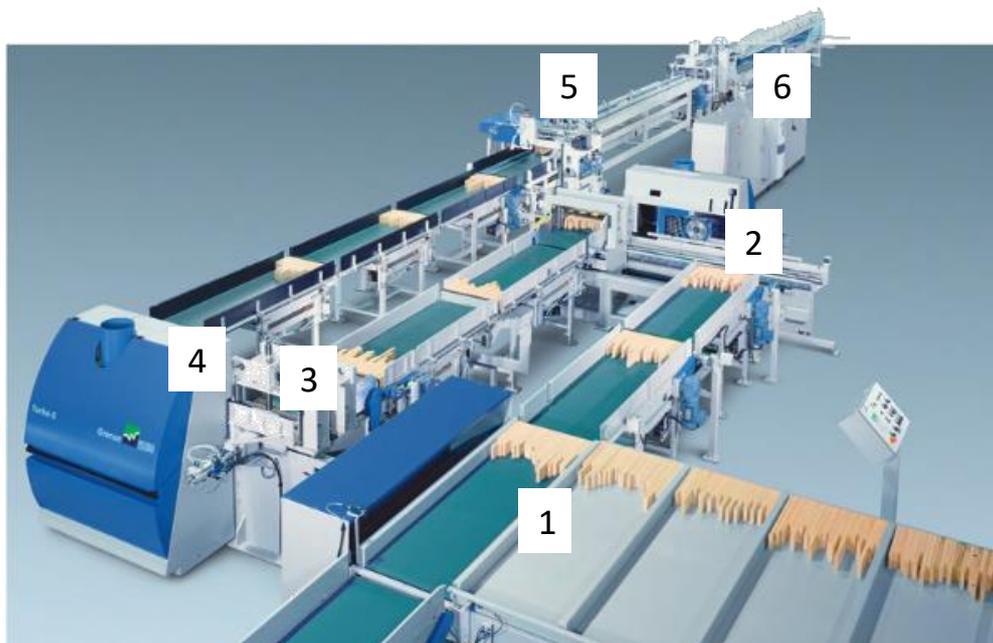


Figure 1.19 : Représentations d'aboutages et paramètres géométriques des entures (Centre Technique du Bois, 1973)



- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. Chargement abouteuse | 4. Encollage de la seconde extrémité |
| 2. Usinage de la première extrémité | 5. Mise bout à bout des courçons |
| 3. Usinage de la seconde extrémité | 6. Pressage longitudinal |

Figure 1.20 : Exemple d'une ligne d'aboutage (crédit : Weinig).

La résistance d'un aboutage dépend de plusieurs facteurs, dont les principaux sont donnés au Tableau 1.4, tels que les propriétés du bois, la géométrie des entures, et les conditions production. Le Centre Technique du Bois a publié en 1973 un cahier consacré à l'étude des aboutages dans lequel l'influence de la plupart de ces facteurs est abordée. De façon générale, de meilleures propriétés mécaniques des bois aboutés donnent des aboutages plus résistants.

Tableau 1.4 : Principaux facteurs influant sur la résistance des aboutages.

Facteurs influant	
Propriétés du bois	La masse volumique Les nœuds L'ODF La proportion de bois final Le bois de réaction Le bois juvénile L'humidité Les fentes et gerces
Propriétés de l'assemblage	La géométrie des entures
Propriétés de production	Le séchage et le conditionnement des bois L'usinage des entures Le type de colle et son application La pression de serrage L'application de chaleur sur les joints Le rabotage

6. Les améliorations et innovations pour une transformation plus efficiente du chêne

6.1. Vers une réorganisation de la production plus centrée sur la lame aboutée

Face à une augmentation attendue des besoins en lames aboutées pour des produits de construction, il est nécessaire d'augmenter la production d'avivés en sciant plus de billons, la valorisation en avivés des produits subits n'offrant qu'un volume limité. Or, la ressource en bois rond disponible pour cela n'est pas dans les belles qualités, mais bien en qualité secondaire.

Cependant, l'organisation et les équipements traditionnels de la transformation du chêne ne sont pas optimisés pour une valorisation rentable des bois de qualité secondaire en lames aboutées. Avec les procédés actuels, ces qualités de bois prennent plus de temps à transformer et ont de moins bons rendements matière, du fait de purges plus importantes de défauts. La production d'avivés n'est actuellement viable que dans la mesure où la majorité du volume est produite à partir de plateaux de découverts et de plateaux de côtés qui sont subis, et donc dans un certain sens déjà « payés » par les produits principaux (plots, pièces équarries...). Dès lors que les avivés sont considérés comme produits principaux d'un billon de qualité secondaire, le coût de la matière première impacte considérablement le prix de revient et le coût de transformation est trop important pour les moins bonnes qualités compte tenu de leur plus faible prix de valorisation.

Un travail conjoint sur le prix de valorisation du bois rond et sur les procédés de transformation du billon jusqu'à la lame aboutée doit être mené pour une transformation plus efficiente et rémunératrice du chêne de qualité secondaire et, par conséquent, des autres qualités. Pour cela, l'évolution des procédés vers plus d'automatisation et l'intégration de technologies 4.0 pourraient apporter des solutions. Cela suppose une réorganisation des procédés de transformation. Actuellement, du fait de la séparation de la première et de la seconde transformation en entités différentes, la production de d'avivés et la fabrication de lames aboutées sont trop dissociées et pas suffisamment flexibles. Il faudrait apporter plus de linéarité en intégrant dès la première transformation des problématiques propres à la seconde transformation, ce qui est facilité dans un groupe industriel comme Ducerf possédant ces deux activités. La prise d'informations permettant de bien définir les qualités d'un bois le plus tôt possible, tel un scanner ODF, participerait à ce nouveau schéma. C'est précisément dans ce contexte que se situe cette thèse.

6.2. Le processus de fabrication étudié

Sur la Figure 1.21 sont présentés le processus de transformation traditionnel de billons en lames aboutées et celui étudié dans cette thèse. Ce nouveau schéma prévoit plusieurs évolutions.

- Un sciage plus efficient des billons en avivés. Une solution serait de combiner un centreur de billon, une machine de type télétwin pour le sciage d'équarris et un centre de reprise pour la refente en avivés, le tout piloté automatiquement.
- L'implantation en scierie d'un scanner capable de détecter les singularités et les qualités des avivés et de piloter leur tronçonnage et leur tri. Parmi les différentes technologies de capteurs qui peuvent être intégrées dans de tels scanners, celle des lasers points est étudiée dans ce mémoire. En effet, elle permettrait, par la mesure de l'ODF, de remplir plusieurs fonctions énoncées ci-dessous et d'agir sur différents procédés pour augmenter l'efficacité du

processus. La performance d'un scanner laser à mesurer l'ODF sur du chêne frais de sciage est étudiée au chapitre 2 de ce manuscrit.

- i. La détection des nœuds. La technologie de lasers points est déjà utilisée par des scanners industriels pour aider à la détection des nœuds sur des bois secs, en compléments d'autres capteurs comme des laser lignes, des caméra couleurs ou des rayons X. Dans les grandes lignes, ce sont les mêmes technologies qui sont réutilisées dans l'adaptation récente de ces scanners pour la première transformation, avec cependant des réglages différents.
 - ii. L'anticipation des déformations du bois au séchage grâce aux mesures de l'ODF des avivés. Cette fonction innovante est étudiée au chapitre 3 de ce manuscrit. Elle permettrait d'anticiper le tronçonnage des avivés secs bruts de sciage pour obtenir des pièces peu déformées après séchage.
 - iii. La prise en compte dès le premier tronçonnage des critères et exigences propres au procédé d'aboutage. Ce point est détaillé au chapitre 4 de ce manuscrit.
- L'empilage automatique des avivés.
 - Le calibrage juste après séchage.
 - Le classement pour la résistance par machine des avivés. Cette étape est indispensable pour la production de lames aboutées destinées à des usages en structure afin de caractériser mécaniquement les courçons aboutés et les aboutages. Ce classement peut être réalisé par un second scanner mesurant l'ODF (Faydi 2017). Ce même scanner équipé de caméras et profilomètres pourrait aussi détecter les fentes et les défauts de calibrage. Des solutions pour réaliser toutes ces mesures existant déjà sur le marché, seul le traitement des données est à adapter en fonction de ces nouvelles applications. La question de la caractérisation mécanique des aboutages est développée au chapitre 4 de ce manuscrit.
 - Un tronçonnage éventuel et le tri qualitatif automatique résultant des mesures et décisions du scanner.

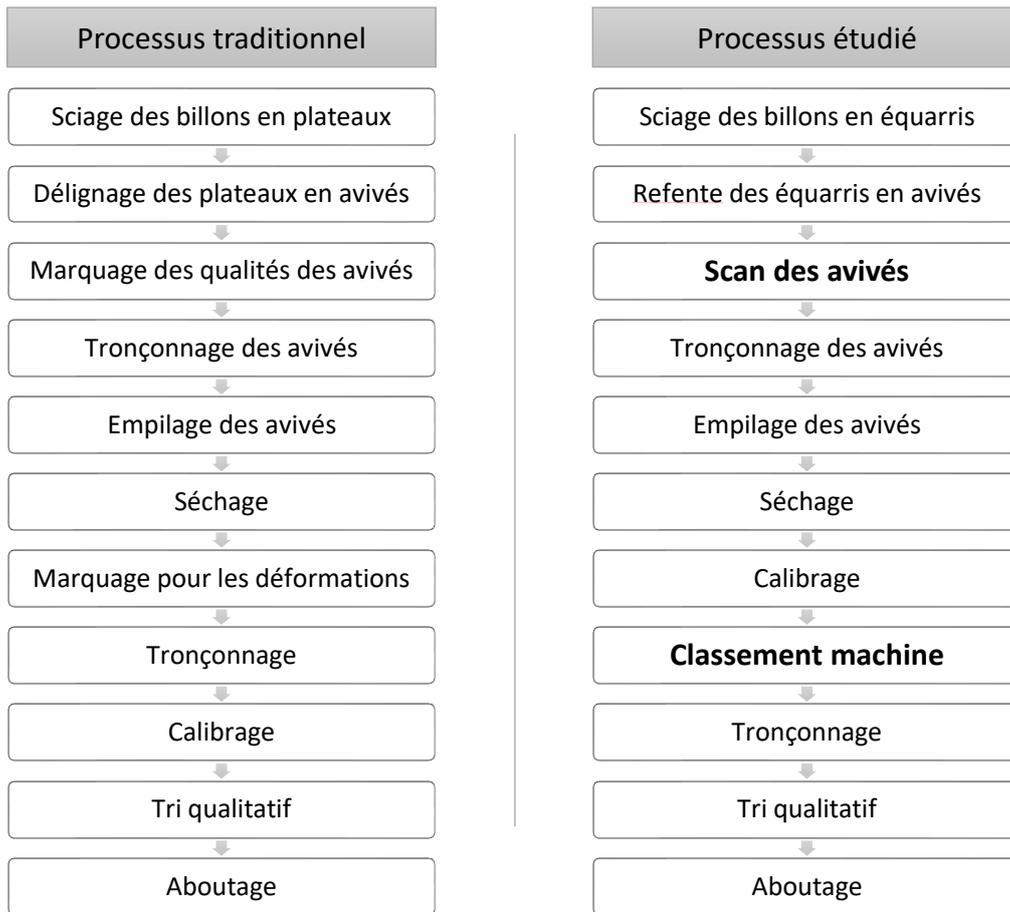


Figure 1.21 : Processus de fabrication traditionnel (gauche) et processus étudié dans cette thèse (droite).

Chapitre 2 :

Évaluation de la performance d'un scanner laser
sur le chêne pour mesurer l'orientation des fibres

1. Introduction et état de l'art

1.1. Théorie de la mesure de l'orientation des fibres avec une technologie laser

Le développement de la technologie de mesure de l'orientation des fibres (ODF) avec un laser a commencé il y a une vingtaine d'années. La mesure de l'ODF avec un laser se base sur l'observation physique suivante : lorsqu'un laser point est projeté perpendiculairement à une surface de bois, il est possible d'observer une image lumineuse de forme allongée quasi-elliptique dont la direction principale correspond à la direction locale des fibres (Figure 2.1). Les premières observations et études ont été faites sur des résineux, ce qui expliquerait que ce phénomène soit appelé dans la littérature « effet trachéide ».

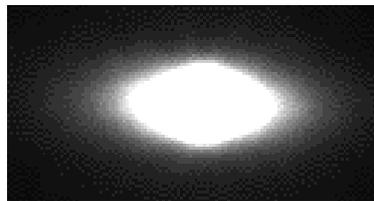


Figure 2.1 : Observation de l'effet trachéide

L'explication physique du phénomène reste encore discutée. Les principaux modèles proposés dans la littérature sont ceux de Simonaho et Silvennoinen (2004a) et de Kienle *et al.* (2008). Le modèle développé par les premiers explique l'effet trachéide comme un phénomène de diffraction de la lumière. Les seconds ont considéré que l'anisotropie de la diffusion de la lumière est causée par les trachéides seules, tandis que les autres cellules (parenchymes) causent une diffusion isotrope. Deux modèles de propagation de la lumière ont été établis : une équation de transport d'ondes électromagnétiques résolue par un algorithme de Monte Carlo et la théorie de la diffusion (qui est une approximation de l'équation précédemment nommée). La Figure 2.2 présente les iso-intensités expérimentales et calculées par Kienle *et al.* (2008).

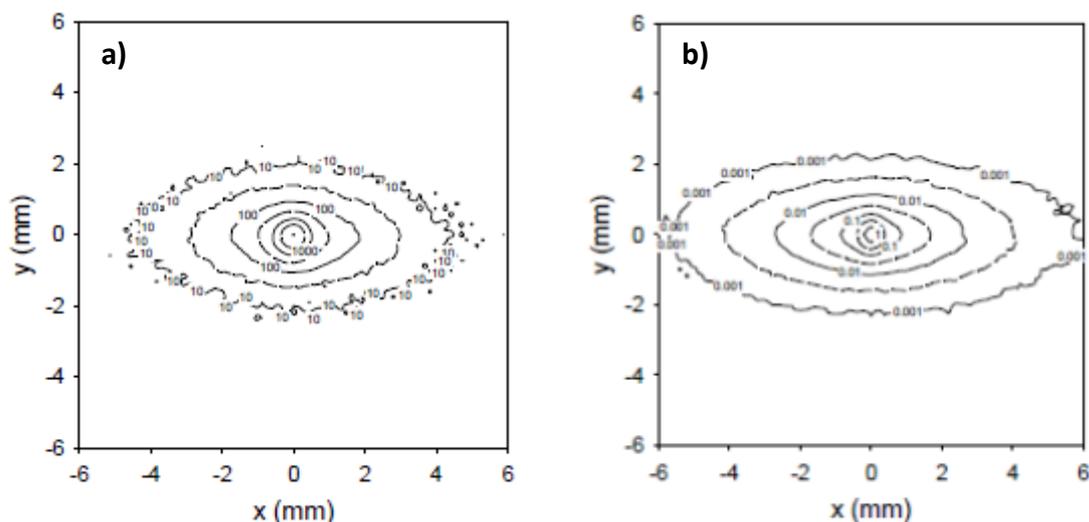


Figure 2.2 : Iso-intensités observées (a) et calculées par la méthode de Monte Carlo (b), d'après Kienle *et al.* (2008).

1.2. Exploitations de la diffusion de lumière laser

Dans ce manuscrit, l'effet trachéide sera assimilé au phénomène de diffusion de la lumière dans la direction des fibres. L'image de diffusion désigne l'image de la projection d'un laser point à la surface d'une éprouvette.

1.2.1. L'information de l'orientation de l'ellipse

Pour exploiter ces observations, l'image de diffusion est approximée à une ellipse et définie par une équation mathématique grâce à diverses méthodes de calcul (Zhou et Chen 2003 ; Hu *et al.* 2004 ; Briggert *et al.* 2018). L'orientation du grand axe de l'ellipse, définie par un angle dans le repère de la pièce de bois, donne alors l'orientation locale des fibres. Ces mesures sur l'intégralité d'une surface permettent de construire des cartographies très utiles pour la représentation des données et la localisation des singularités (Figure 2.3.b).



Figure 2.3 : Exemple d'une cartographie des mesures locales d'ODF d'un avivé de chêne.

L'angle des ellipses est le paramètre le plus étudié dans la littérature, principalement pour le développement de méthodes non destructives de classement mécanique (Olsson *et al.* 2013 ; Viguié *et al.* 2015 ; Faydi 2017). En effet, grâce à la formule empirique de Hankinson (équation 2.1), il est possible d'obtenir, à partir des données d'ODF, des informations locales sur la rigidité ou la résistance d'une planche de bois (Hankinson 1921, DeBonis et Bodig 1975).

$$f(\theta) = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \sin^n(\theta) + f_0 \cdot \cos^n(\theta)} \quad (\text{équation 2.1})$$

Avec $f(\theta)$ la propriété mécanique considérée (module d'élasticité ou résistance mécanique) pour une fibre à une orientation θ ; f_0 la valeur de la propriété mécanique dans la direction de la fibre ; f_{90} la valeur de la propriété mécanique perpendiculairement à la direction de la fibre ; n un paramètre dépendant de l'essence et du type de sollicitation. A titre d'exemple, cette équation appliquée à un avivé de chêne pour une sollicitation en flexion permet de montrer que la résistance est deux fois plus faible pour une fibre orientée dans l'avivé à 20° par rapport à une autre orientée à 0° (Faydi 2017).

L'information de l'angle des ellipses permet donc aussi de localiser les nœuds dans un sciage. En effet, comme le montre la Figure 2.3, les angles les plus élevés se trouvent autour et dans les nœuds.

1.2.2. Les autres informations données par l'ellipse

D'autres paramètres de l'ellipse, comme le rapport entre les axes (ratio) ou l'aire, sont exploités, mais dans une moindre mesure. Il est possible de détecter les nœuds grâce à l'analyse de la forme des ellipses qui sont quasi-circulaires quand le laser pointe sur un nœud (Jolma et Mäkynen 2007). Simonaho *et al.* (2004b), Olsson et Oscarsson (2014) et Briggert *et al.* (2018) ont utilisé le ratio de l'ellipse dans le but de déterminer l'angle de plongée sur des sciages d'épicéa, mais ceci suppose que les ratios ne varient qu'avec l'angle de plongée. Or Purba *et al.* 2020b ont montré une corrélation entre les ratios des ellipses et la densité de placages de hêtre.

Par ailleurs, l'augmentation de l'humidité du bois a pour effet d'augmenter la taille de l'image de diffusion (Simonaho *et al.* 2003 ; Kienle *et al.* 2008 ; Purba *et al.* 2020a ; Purba *et al.* 2020b).

L'état de surface semble aussi impacter la précision de la mesure de l'ODF. Hu *et al.* (2004) ont montré que, pour du hêtre du Japon (*Fagus crenata* Blume) et du cèdre du Japon (*Cryptomeria japonica* D. Don), les mesures d'ODF étaient moins précises pour des éprouvettes dont les états de surface étaient bruts de sciage au lieu de rabotés. Daval *et al.* (2015) ont aussi montré que, sur du douglas, la mesure de l'ODF est plus précise sur une surface rabotée.

1.3. Les technologies de laser utilisées

La mesure de l'ODF avec des lasers points s'est développée autour des lasers rouges sur des résineux, lasers avec lesquels l'effet trachéide est bien marqué. C'est ce type de laser qui est utilisé dans la littérature et dans la plupart des scanners industriels. Cependant, la mesure de l'ODF sur le chêne avec cette technologie de laser ne semble pas être efficace. Schlotzhauer *et al.* (2018), par exemple, ont utilisé des lasers rouges de longueur d'onde 600 nm et de puissance 100 mW et ont indiqué que la mesure de l'ODF ne fonctionne pas sur quelques feuillus dont le chêne, en raison d'une image de diffusion pas suffisamment elliptique. Cependant, à la suite des travaux de Daval *et al.* (2015), le LABOMAP a développé un scanner utilisant des lasers avec une longueur d'onde de 1064 nm et une puissance réglable allant jusqu'à 1 W. Ils permettent de mesurer l'ODF sur des résineux et des feuillus, dont le chêne (Faydi, 2017 ; Olsson *et al.* 2018) et le chêne frais de sciage (Besseau *et al.* 2020). C'est un des premiers scanners à utiliser cette technologie de laser. Récemment, Rais *et al.* (2021) ont utilisé un laser de longueur d'onde 830 nm. L'installation, vers le milieu de cette thèse, de lasers infra-rouges sur le scanner CombiScan (Luxscan) du LABOMAP a permis la réalisation des travaux présentés aux chapitres 3 et 4 de ce manuscrit, chose qui n'aurait pas été possible avec les anciens lasers du CombiScan (Viguié, 2015).

1.4. La précision de mesure de l'orientation des fibres

Quelques études présentent des résultats d'erreur de mesure de l'ODF. Nyström (2003) présente les résultats de mesure de l'orientation de l'ellipse en fonction de la rotation d'un échantillon d'épicéa autour de l'axe du faisceau laser avec une très bonne corrélation. Hu *et al.* (2004) ont fait ce travail sur du hêtre du Japon (*Fagus crenata* Blume) et du cèdre du Japon (*Cryptomeria japonica* D. Don). Pour cela, ils ont opté pour la mesure de l'orientation de l'image de diffusion du laser, approximée à une ellipse, pour différentes orientations d'éprouvette (de 0° à 360°). La même méthode a été utilisée par Schajer et Sutton (2016) sur un échantillon de pin tordu (*pinus contorta*), toujours avec un seul point laser fixe autour duquel l'éprouvette tourne. Or, cette méthode avec un seul point laser fixe n'est pas représentative des conditions industrielles où les mesures se font sans interruption du mouvement d'avance de l'avivé sous une rangée de lasers points. C'est pourquoi il a été choisi, en ouverture de

cette thèse, d'évaluer les performances d'un scanner de mesure de l'ODF dans un contexte d'utilisation industrielle.

Plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité de mesure de l'ODF, et donc la performance du scanner. Outre l'essence de bois et la nodosité, l'état de surface est souvent mis en avant. Hu *et al.* (2004) ont montré que l'erreur de mesure était plus élevée pour le bois brut de sciage et Daval *et al.* (2015) ont présenté des mesures très bruitées sur du douglas brut de sciage. L'influence de l'humidité a aussi été étudiée par Kienle *et al.* (2008) et Purba *et al.* (2020). Ils ont montré que l'augmentation de l'humidité du bois avait pour effet d'augmenter la taille de l'image de diffusion. Mais, à la connaissance des auteurs, aucune communication n'a été faite sur l'influence des plans de symétrie orthotrope du bois sur la diffusion de la lumière laser et la mesure de l'ODF, bien que l'aspect anatomique du bois soit très différent en fonction de la direction des rayons ligneux, de la croissance radiale et de l'alternance de bois initial et final.

1.5. Objectif des travaux de ce chapitre

L'objectif principal des travaux de ce chapitre est d'évaluer la performance d'un scanner laser permettant de mesurer l'ODF dans des conditions de mesures industrielles. En effet, en fonction des applications, l'erreur de mesure de l'ODF acceptable peut être plus ou moins grande. Lorsque l'équation de Hankinson (équation 2.1) est utilisée pour prédire les propriétés mécaniques, la sensibilité par rapport à la valeur de l'angle est plus grande pour les angles de faible valeur. Dans un contexte de valorisation de bois à des fins structurelles, cela a un effet direct sur le classement mécanique des sciages.

Ainsi, dans le cadre des travaux de cette thèse, l'évaluation de la performance d'un scanner laser pour mesurer l'ODF sur le chêne a été réalisée en déterminant l'erreur de mesure et en étudiant l'influence des paramètres anatomiques du bois sur la précision de la mesure dont l'essence de bois, le mode de débit des éprouvettes, et, pour le cas chêne, l'état de surface ainsi que l'humidité du bois.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de communication dans les conférences internationales (Besseau *et al.* 2019a et 2019b) et d'une publication dans la revue scientifique *Journal of Wood Science* (Besseau *et al.* 2020).

2. Détermination de l'erreur de mesure de l'orientation des fibres

2.1. Echantillonnage

La détermination de l'erreur de mesure de l'ODF a été faite pour cinq essences de bois: le chêne (*Quercus petraea* and *Quercus robur* L), le châtaignier (*Castanea*), le hêtre (*Fagus sylvatica*), le douglas (*Pseudotsuga menziesii* Mirb. Franco) et le peuplier (*Populus*).

Pour chaque essence, un lot de dix éprouvettes de bois sans défaut, de surface d'étude 100 x 100 mm² et d'épaisseur 20 mm a été confectionné à partir de sciages différents. Chaque lot est séparé en deux groupes de cinq éprouvettes caractérisées par le plan de symétrie orthotrope de la face d'étude : Longitudinal-Radial (LR) et Longitudinal-Tangentiel (LT) (Figure 2.4, Tableau 2.1). Les éprouvettes de châtaignier, hêtre, Douglas et peuplier ont été scannées à l'état sec (environ 10 %H) et la surface d'étude a été préalablement rabotée.

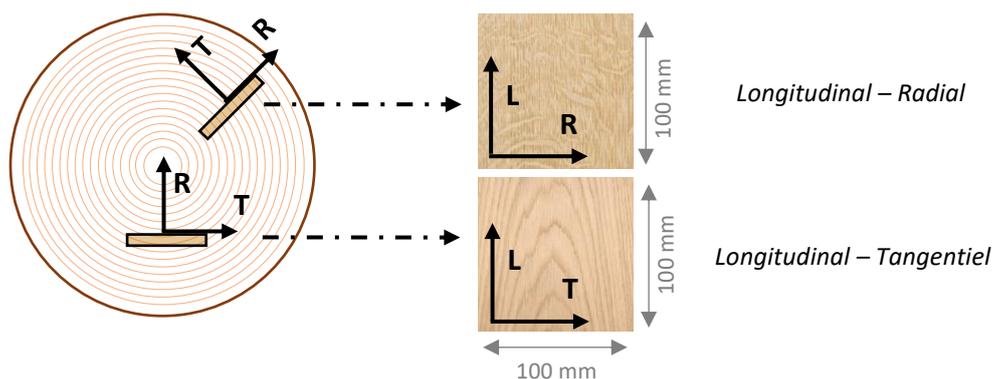


Figure 2.4 : Echantillonnage d'un lot de 10 éprouvettes. Prélèvement selon les plans LT et LR.

Le lot de chêne a été étudié à différents états (Tableau 2.1). Tout d'abord il a été scanné « vert brut », c'est-à-dire juste après sciage à une humidité supérieure au point de saturation des fibres (> 30 %), puis « sec brut », c'est-à-dire sec avec l'état de surface brut de sciage, et enfin « sec poncé », la face d'étude ayant été poncée avec un grain fin (P120) de façon à obtenir un bon état de surface (les éprouvettes étant petites, le rabotage n'a pas pu être pratiqué). A cause du retrait dû au séchage, les éprouvettes de quartier (LR) ont perdu en largeur entre 4 et 6 mm dans la direction R et celles de dosse (LT) ont perdu entre 7 et 10 mm dans la direction T.

Un lot de 4 éprouvettes de HDF (High Density Fiberboard) a également été étudié à des fins de comparaison avec un matériau isotrope. Les micro fibres composant ce panneau ont la particularité de ne pas avoir d'orientation préférentielle.

Tableau 2.1 : Nombre et état des éprouvettes par essence

	Chêne	Châtaignier	Hêtre	Douglas	Peuplier	HDF
LT	5	5	5	5	5	4
LR	5	5	5	5	5	4
Etat des éprouvettes	Vert brut	Sec raboté				Brut
	Sec brut					
	Sec poncé					

2.2. Scanner BobiScan

L'ODF des lots a été mesurée avec un scanner de laboratoire développé par le LABOMAP, appelé BobiScan (Figure 2.5, Faydi 2017). Il est équipé de :

- Deux lasers infrarouges de longueur d'onde 1064 nm et de puissance réglable jusqu'à 1 W traversant chacun un système optique qui permet de diviser le faisceau incident en 19 faisceaux égaux et de les focaliser sur la planche formant une ligne de points perpendiculaire à l'avance de la planche. Sur chaque ligne à la surface de l'élément scanné, les faisceaux sont espacés de 10 mm. Afin d'obtenir la meilleure homogénéité possible de la puissance, un seul des deux lasers a été utilisé pour cette étude.
- Un laser ligne rouge permettant de détecter les bords de l'élément scanné.

- Une caméra proche infra-rouge (Basler acA2000-340kmNIR) pour l'acquisition des images des lasers points et du laser ligne sur l'élément scanné. Un logiciel d'acquisition permet une prise d'image tous les millimètres d'avance de l'élément scanné.

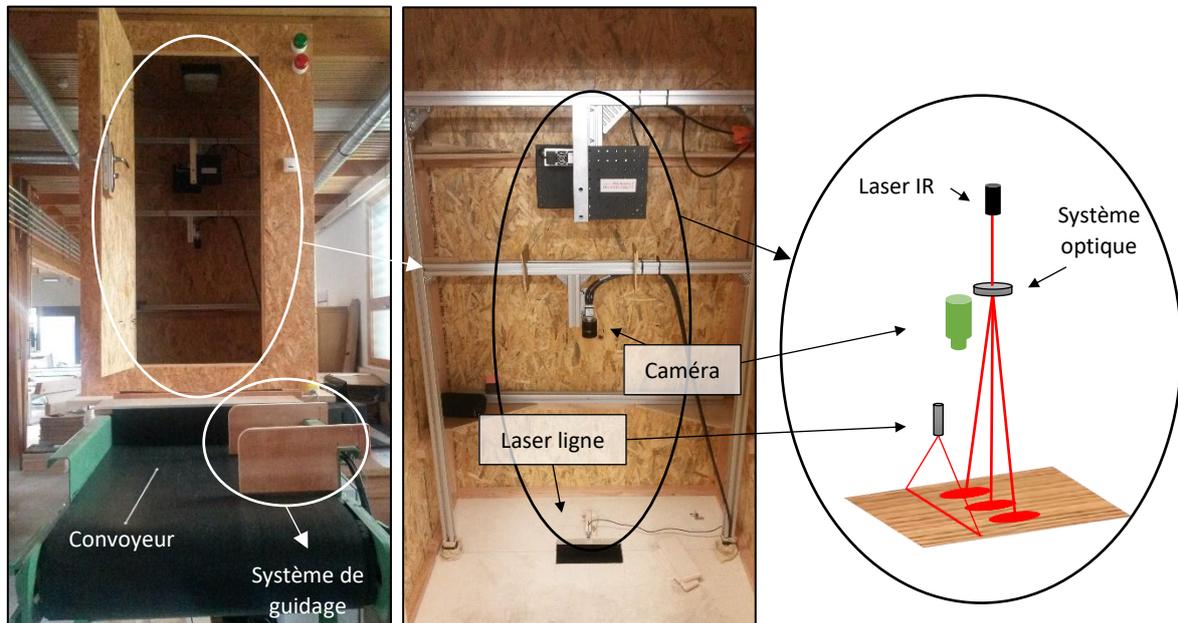


Figure 2.5 : Descriptif du BobiScan

La puissance des faisceaux lasers a été mesurée au niveau de la surface des éprouvettes avec un puissance mètre Thorlabs' PM 16-121 pour deux niveaux de puissance du laser (Réglages 1 et 2 au Tableau 2.2). Le réglage 1 a été utilisé pour les scans des lots de chêne sec brut et sec poncé, de châtaignier, de hêtre, de Douglas et de HDF. Le réglage 2, correspondant à une puissance moins élevée du laser, a été utilisée pour le chêne vert brut et le peuplier. En effet, au niveau de puissance du réglage 1, le grand axe de ellipses de ces deux lots peut dépasser 10 mm, qui est la distance entre deux points laser. Pour éviter des chevauchements d'ellipses dans le cas où les fibres du bois sont orientées à 90° par rapport au sens de défilement de l'éprouvette, la puissance du laser a été réduite au réglage 2. Les mesures de puissance des rayons laser arrivant à la surface d'une éprouvette scannée ont révélé que l'un d'eux, le point n°8 du Tableau 2.2, était nettement moins puissant que les autres, phénomène dû à une imperfection de l'élément diffractif. En conséquence, les données provenant de ce point ont été retirées pour les analyses présentées dans ce chapitre.

Tableau 2.2 : Puissance des faisceaux lasers au niveau de la surface des éprouvettes

		Numéro point laser														
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
P (mW)	Réglage 1	5.84	6.28	5.94	7.09	7.39	5.8	7.26	2.36	8.33	6.17	6.75	6.09	6.67	6.02	7.02
	Réglage 2	3.07	3.36	3.12	3.64	3.81	3.03	3.77	1.21	4.28	3.18	3.51	3.21	3.45	3.19	3.72

2.3. Protocole expérimental pour quantifier l'erreur de mesure.

Les dix éprouvettes de chaque lot ont été placées sur un support où ont été usinés, à l'emplacement de chaque éprouvette, un trou central et autour, sur un arc de cercle, une série de dix trous espacés de 10° les uns des autres (Figure 2.6). Sur chaque éprouvette carrée, deux trous non débouchant, un au milieu et l'autre dans un coin, ont été usinés sur la diagonale de la face du dessous. Deux pions y ont été logés pour assurer la mise en position de l'éprouvette sur le support à une orientation bien définie. Tous ces perçages ont été réalisés avec une défonceuse à commande numérique et font le même diamètre. Pour placer une éprouvette à son emplacement sur le support et à une orientation nominale donnée, il suffit de placer le pion central dans le trou central et le pion du coin un des trous de l'arc de cercle, celui correspondant à l'orientation voulue (Figure 2.6).

Au début de chaque passage dans le scanner, le support a été placé contre un guide afin de conserver la même position à chaque scan et d'utiliser les mêmes points laser pour scanner les éprouvettes (Figure 2.5).

Dans le but de quantifier l'erreur de mesure de l'ODF, les dix éprouvettes ont été scannées aux dix orientations nominales (ON) définies ci-dessous.

$$ON = [0^\circ ; 10^\circ ; 20^\circ ; 30^\circ ; 40^\circ ; 50^\circ ; 60^\circ ; 70^\circ ; 80^\circ ; 90^\circ]$$

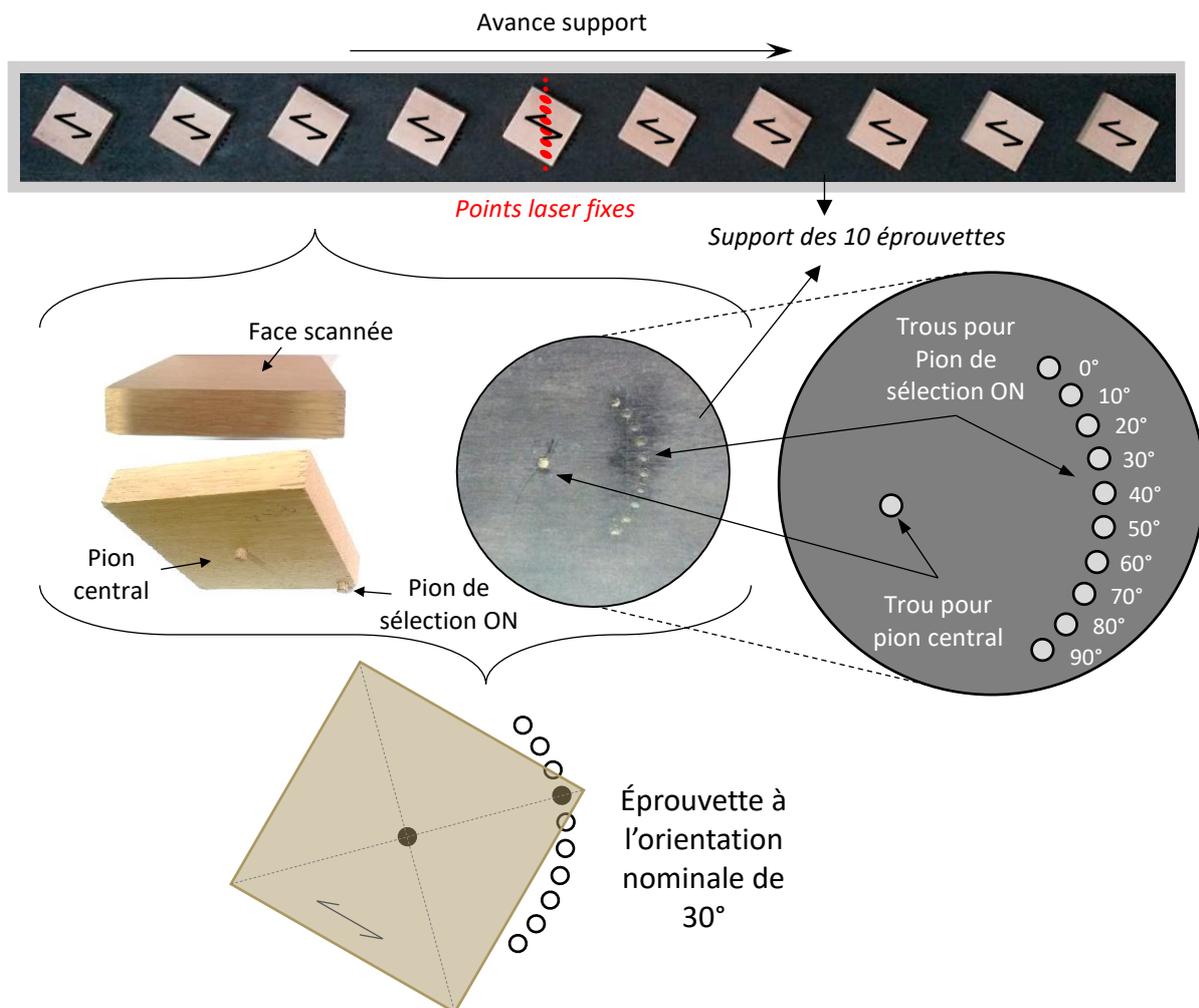


Figure 2.6 : Détails du positionnement des éprouvettes sur le support

2.4. Analyse des images du scanner

2.4.1. Orientation réelle de l'éprouvette

Lors de chaque scan, toutes les éprouvettes présentes sur le support ont été positionnées à la même ON (la Figure 2.6 présente le support avec un lot de dix éprouvettes en position pour le scan à l'ON $i = 30^\circ$). L'orientation précise de chaque éprouvette a été systématiquement calculée dans le repère caméra (x_{camera}, y_{camera}) à partir des images obtenues avec le laser ligne, dans le but de corriger les petites erreurs de position des éprouvettes ou du support pendant les scans.

2.4.2. Paramétrage des ellipses / détermination de l'orientation des fibres

Quand la lumière d'un faisceau laser arrive à la surface du bois, le phénomène de diffusion, plus marqué dans la direction des fibres du bois que dans leur direction transverse, se traduit par la formation d'une image de diffusion de forme quasi-elliptique (cf. chapitre 1) orientée dans la direction des fibres.

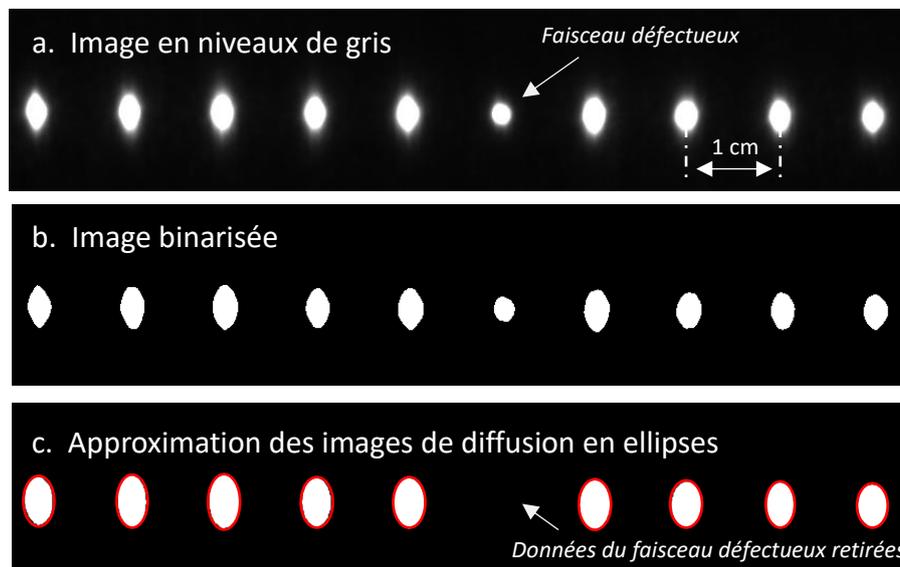


Figure 2.7 : a) Images de diffusion des points laser à la surface d'une éprouvette de chêne scannée à une ON de 0° ; b) Binarisation de l'image prise par la caméra ; c) Calcul des ellipses pour chaque image de diffusion.

Les images de l'ensemble de ces images capturées par la caméra NIR ont été codées sur 8 octets en niveaux de gris (Figure 2.7.a). La première étape de traitement a été la binarisation de l'image avec un seuil de niveau de gris fixé à 83 (Figure 2.7.b. Ce seuil, établi lors de la construction du scanner bien avant cette thèse, n'a pas été changé). L'approximation de ces images en ellipses se fait ensuite par une méthode d'approximation des moindres carrés des points des bords de chaque image (Figure 2.7.c).

A partir de l'équation de l'ellipse, trois paramètres permettant de caractériser chaque ellipse ont été définis (Figure 2.8) : l'aire (s), le ratio (r) entre le grand axe (a) et le petit axe (b) et enfin l'angle (α) entre le grand axe (a) et l'axe x_{camera} , correspondant à la direction de scan. Pour chaque éprouvette scannée à une orientation i , il y a un nombre N_i d'ellipses mesurées. Les paramètres $s_{i,k}$, $r_{i,k}$ et $\alpha_{i,k}$ des ellipses sont référencés par l'indice i de l'orientation nominale de l'éprouvette et l'indice k compris

dans l'intervalle $[1 ; N_i]$. L'angle $\omega_{i,k}$ correspond à l'orientation d'une ellipse dans le repère de l'éprouvette et l'angle $\beta_{i,k}$ à l'orientation réelle de l'éprouvette dans le repère de la caméra.

Afin de s'affranchir des effets de bords et de prendre en compte la réduction en largeur des lots de chêne entre l'état « vert brut » et « sec brut », la zone d'étude a été fixée à 70 x 70 mm² centrée sur l'éprouvette. Ce qui fait qu'en moyenne, il y avait 406 points de mesure par scan d'éprouvette.

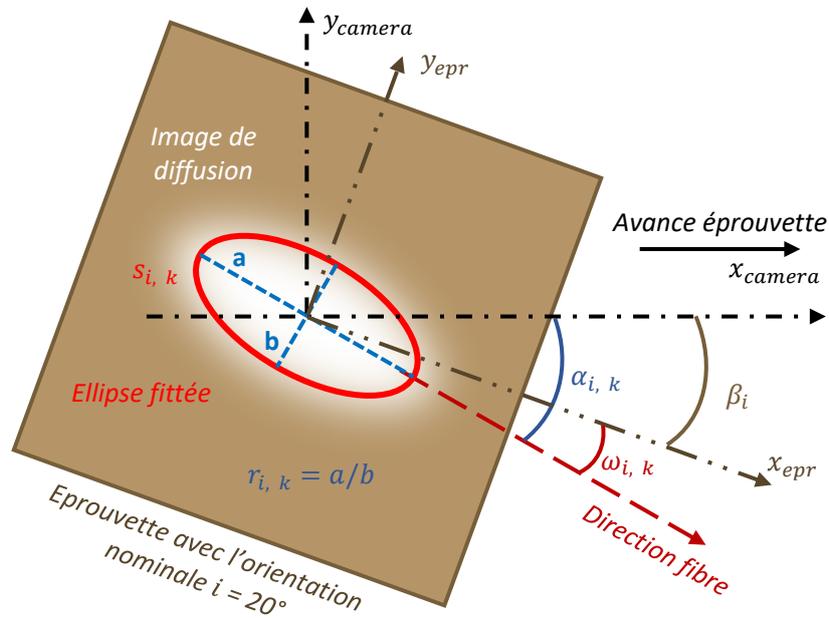


Figure 2.8 : Paramétrage d'une ellipse calculée à partir d'une image de diffusion d'un laser à la surface du bois.

2.4.3. Paramètres propres à chaque éprouvette

Bien que les lots d'éprouvettes aient été choisis sans défaut et visuellement droits de fil, l'ODF varie de quelques degrés sur l'ensemble de l'éprouvette. Par exemple, la Figure 2.9 présente une répartition entre 0° et 12° des angles mesurés sur une éprouvette de châtaignier scannée à une orientation nominale de 0°.

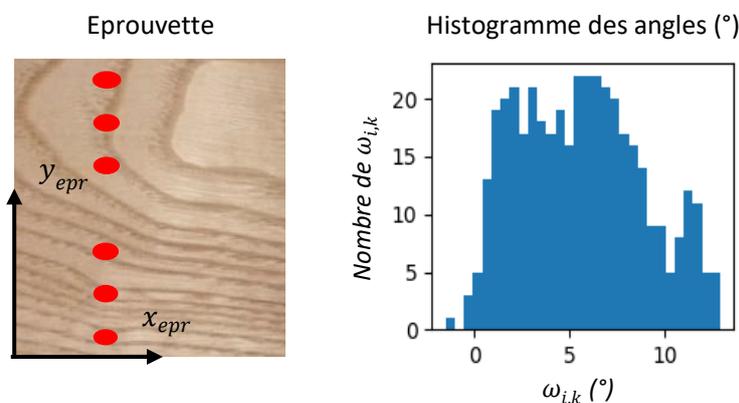


Figure 2.9 : Répartition des angles mesurés sur une éprouvette de châtaignier à une ON de 0°.

Pour caractériser une éprouvette scannée à une orientation nominale i , l'ODF moyenne dans le repère caméra, notée A_i , a été définie comme la moyenne des N_i angles $\alpha_{i,k}$ de la zone d'étude (équation 2.2). Le ratio moyen R_i et l'aire moyenne S_i des ellipses ont également été définis comme la moyenne des $r_{i,k}$ et des $s_{i,k}$, respectivement (équations 2.3 et 2.4). L'ODF moyenne dans le repère éprouvette est $\theta_i = A_i - \beta_i$.

$$A_i = \frac{1}{N_i} * \sum_{k=1}^{N_i} \alpha_{i,k} \quad (\text{équation 2.2})$$

$$R_i = \frac{1}{N_i} * \sum_{k=1}^{N_i} r_{i,k} \quad (\text{équation 2.3})$$

$$S_i = \frac{1}{N_i} * \sum_{k=1}^{N_i} s_{i,k} \quad (\text{équation 2.4})$$

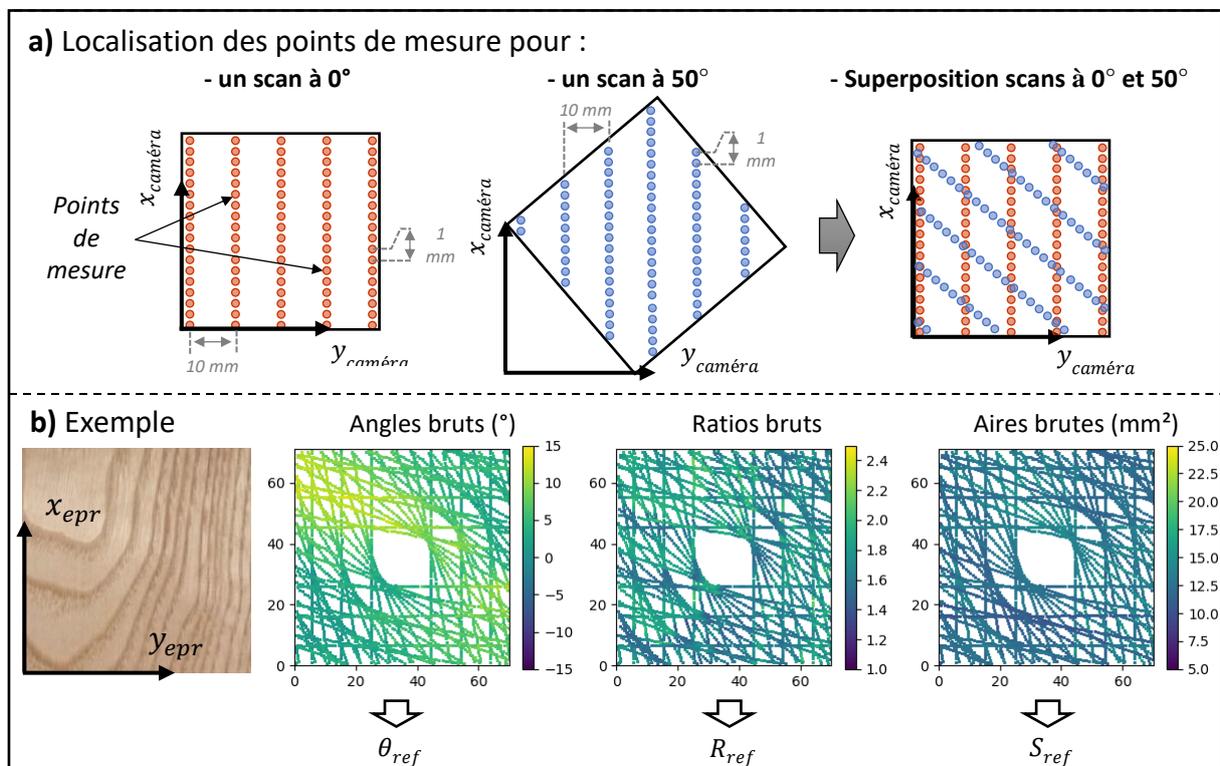


Figure 2.10 : a) Schématisation de la localisation sur l'éprouvette des points de mesure pour des scans à 0° et 50° ; b) Superposition, dans le repère éprouvette et par paramètre ellipse, des dix cartographies d'une éprouvette LT de châtaignier.

A cause de la rotation d'éprouvette de 10° entre chaque scan et des points lasers qui sont fixes, il en résulte une rotation de 10° des points de mesure à la surface de l'éprouvette. La Figure 2.10.a représente le repositionnement dans le repère de l'éprouvette des scans d'orientation nominale 0° et 50°. La Figure 2.10.b présente l'exemple d'une éprouvette LT de châtaignier avec la représentation de la totalité des paramètres ellipses $\omega_{i,k}$, $r_{i,k}$ et $s_{i,k}$ à leur position réelle de mesure sur l'éprouvette. Ces cartographies de données mettent bien en évidence l'ensemble des points de mesure et leur répartition à la surface de l'éprouvette. La zone au milieu de l'éprouvette dans laquelle il n'y a pas de donnée est la conséquence de la non prise en compte des points de mesure du faisceau laser N°8 (cf. chapitre 2, §2.2). Cette superposition de tous les points de mesure a permis de décrire l'éprouvette à travers les paramètres de l'ellipse avec une plus grande résolution que celle d'un simple scan (10 mm en y_{camera} et 1 mm en x_{camera}).

Donc, d'un scan à l'autre, les mesures d'ODF ne sont pas réalisées exactement sur les mêmes fibres. Cela engendre de petites différences entre les dix θ_i d'une même éprouvette scannée à des orientations nominales différentes (dans le cas d'une éprouvette où les fibres seraient rigoureusement rectilignes et parallèles entre elles, les θ_i seraient tous identiques). Ainsi, la valeur de référence d'ODF d'une éprouvette (θ_{ref}) a été définie dans le repère (x_{epr}, y_{epr}) comme la moyenne des dix θ_i (équation 2.5). Les valeurs de références R_{ref} des ratios et S_{ref} des aires des ellipses d'une éprouvette ont été définies respectivement comme la moyenne des R_i et des S_i (équations 2.6 et 2.7).

$$\theta_{ref} = \frac{1}{10} \sum_{i \in ON} (A_i - \beta_i) \quad (\text{équation 2.5})$$

$$R_{ref} = \frac{1}{10} \sum_{i \in ON} R_i \quad (\text{équation 2.6})$$

$$S_{ref} = \frac{1}{10} \sum_{i \in ON} S_i \quad (\text{équation 2.7})$$

Le Tableau 2.3 recense d'une part les angles de référence extrêmes (plus petit et plus grand en valeur absolue) de chaque lot, et d'autre part les ratios et les aires des ellipses moyennés sur les cinq éprouvettes par plan de symétrie orthotrope (sur les quatre éprouvettes pour le HDF). Il apparaît donc bien que l'ODF moyenne des éprouvettes, pourtant choisies droit de fil, est en réalité de quelques degrés. Pour des applications où l'ODF joue un rôle important, comme la valorisation de bois en structure, l'utilisation d'un scanner apparaît comme primordiale pour plus de justesse. Les ratios mesurés sont en moyenne entre 1,07 et 2,41 et sont toujours plus faibles pour le plan LR que pour le plan LT. Cette observation est développée au chapitre 2, §3.1. Les aires des ellipses sont comprises en moyenne entre 6,5 et 18,2 mm².

Tableau 2.3 : Valeurs d'angles de référence extrêmes (en valeur absolue) obtenues sur les éprouvettes d'un même lot. Valeurs de référence moyennes de ratios et d'aires par lot et plan de symétrie orthotrope. Le coefficient de variation donné entre crochets est en pourcents.

	θ_{ref} (°)		\overline{R}_{ref} [CoV]		\overline{S}_{ref} (mm ²) [CoV]	
	Min	Max	LT	LR	LT	LR
Chêne vert brut	0,1	11,9	1,53 [16]	1,33 [15]	10,4 [23]	10,5 [26]
Chêne sec brut	3,1	10,8	1,57 [16]	1,30 [12]	11,7 [11]	11,2 [9]
Chêne sec poncé	3,4	11,2	1,61 [16]	1,32 [12]	10,5 [11]	10,2 [10]
Châtaignier	1,1	5,8	1,83 [11]	1,73 [7]	13,4 [11]	13,2 [11]
Hêtre	2,5	7,5	1,81 [7]	1,46 [6]	14,4 [10]	13,7 [10]
Douglas	0,6	2,9	1,99 [13]	1,84 [15]	18,2 [13]	17,2 [13]
Peuplier	2,5	8,4	2,41 [6]	1,90 [4]	11,7 [10]	12,3 [10]
HDF	1,9	16,2	1,07 [3]		6,5 [10]	

La Figure 2.11 montre les ellipses types obtenues pour chaque essence par plan. Ces ellipses ont été tracées à partir des paramètres \overline{R}_{ref} et \overline{S}_{ref} du Tableau 2.3. Comme attendu, avec un ratio moyen proche de 1, les ellipses du HDF sont les plus petites et peuvent quasiment être assimilées à des cercles. De plus, la faible aire moyenne montre que le phénomène de diffusion est très faible comparé aux lots de bois massif. Pour le peuplier les ellipses sont très allongées et témoignent, au contraire du HDF, d'un phénomène très marqué de diffusion de la lumière dans la direction fibres. Le chêne est l'essence présentant les plus faibles ratios. Entre les trois états des éprouvettes de chêne, les différences de forme et de taille des ellipses sont très faibles. Pour rappel, le réglage de la puissance du laser a été adapté pour les scans des éprouvettes de chêne vert brut justement pour que les tailles d'ellipses ne soient pas trop grandes. L'influence de l'état de surface ne semble pas avoir eu d'effet sur les ratios.

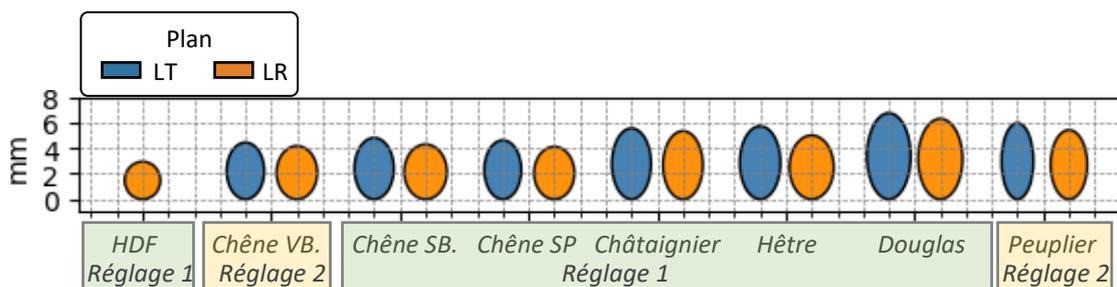


Figure 2.11 : Schématisation des ellipses types de chaque lot.
Chêne VB : Chêne vert brut. Chêne SB : Chêne sec brut. Chêne SP : Chêne sec poncé.

2.4.4. Valeurs d'orientation des fibres des différents lots

Les angles moyens A_i mesurés sur deux éprouvettes de chaque lot sont représentés sur la Figure 2.12 sous forme de points bleus (plan LR) et de croix noires (plan LT) en fonction de l'orientation réelle β_i de l'éprouvette. Les lignes continues et en pointillés, associées respectivement aux éprouvettes de plan LT et LR, représentent l'évolution théorique de l'angle moyen des fibres ($\theta_{ref} + \beta_i$) dans le repère (x_{camera}, y_{camera}) en fonction de la rotation de l'éprouvette. Pour les lots de chêne, ce sont les mêmes éprouvettes LT et LR qui sont représentées sur les trois graphiques en haut de la Figure 2.12.

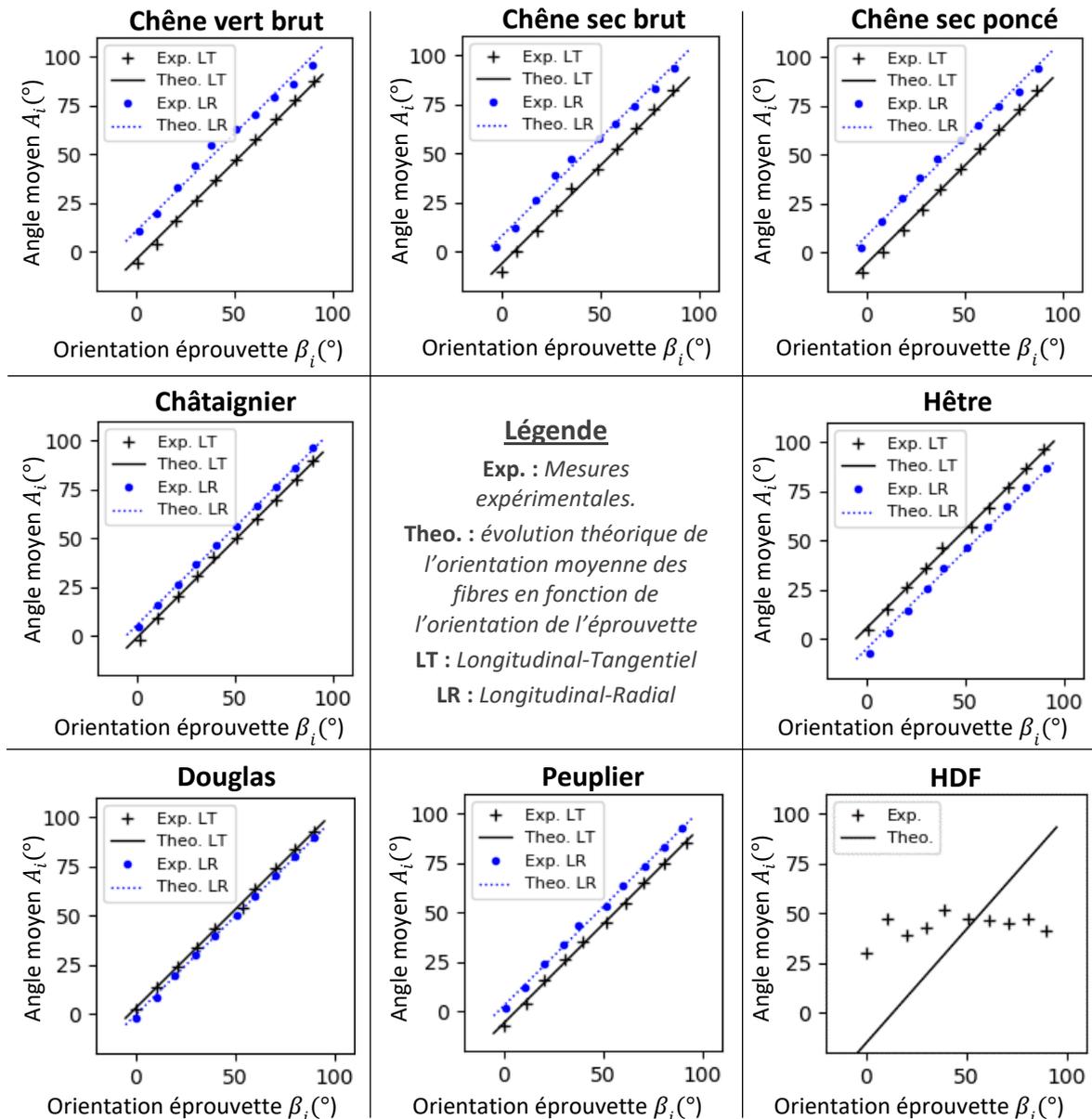


Figure 2.12 : Résultats de mesures d'ODF par lot d'éprouvettes

Ces résultats montrent une bonne corrélation entre les angles mesurés et l'orientation des éprouvettes pour les essences testées : les mesures d'orientation moyenne des fibres des éprouvettes augmentent bien de 10° environ chaque fois que l'orientation initiale de l'éprouvette augmente de

10°. Ces résultats sont quantifiés au §2.5.2 de ce chapitre. Pour toutes les essences testées, les valeurs moyennes mesurées sont proches des valeurs théoriques attendues. En revanche, ce n'est pas le cas pour le lot de HDF. Les orientations moyennes mesurées sont entre 25° et 50° quelle que soit l'orientation de l'éprouvette et aucune corrélation n'est visible. Ce dernier résultat était attendu compte tenu de l'absence d'orientation privilégiée des particules composant le HDF.

Cette méthode de mesure permet de valider que les ellipses des points de mesures sont bien orientées dans la direction des fibres et donc que le phénomène de diffusion de la lumière laser, appelée « effet trachéide » dans le cas des résineux, s'effectue bien dans la direction des fibres du bois. Et plus précisément, la preuve est ici apportée que cette technologie des lasers points permet de mesurer l'ODF sur du chêne avant et après séchage, même avec un état de surface brut de sciage.

2.5. Calcul de l'erreur de mesure de l'ODF

2.5.1. Méthode de calcul

Pour un scan d'éprouvette quelconque, l'erreur de mesure δ_i (équation 2.8) est la différence entre l'orientation mesurée des fibres A_i et l'orientation théorique des fibres définie comme la somme entre la valeur de référence θ_{ref} et l'orientation réelle β_i de l'éprouvette pendant le scan. Cela correspond à la différence entre l'orientation moyenne des fibres θ_i dans le repère éprouvette et son orientation moyenne de référence θ_{ref} .

$$\delta_i = A_i - (\theta_{ref} + \beta_i) = \theta_i - \theta_{ref} \quad (\text{équation 2.8})$$

D'une part, chaque lot d'éprouvette a été composé de cinq éprouvettes pour chacun des plans de symétrie LR et LT, d'autre part chaque éprouvette a été scannée avec dix orientations nominales, il en résulte un nombre de 50 erreurs de mesures calculées par plan de symétrie orthotrope. La racine de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error (RMSE)) a été calculée pour chaque groupe de cinq éprouvettes de même plan de symétrie d'un même lot (équation 2.9 où i est l'orientation nominale éprouvette et j le numéro éprouvette).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{j=1}^5 \sum_{i \in NSO} \delta_{i,j}^2} \quad (\text{équation 2.9})$$

2.5.2. Erreur de mesure de l'ODF des lots d'éprouvettes

Les valeurs de l'erreur de mesure (RMSE) par plan de symétrie orthotrope et par lot sont présentées à la Figure 2.13. Comme attendu, l'erreur de mesure est élevée pour le HDF (RMSE = 24,2°) pour lequel il n'y a aucune corrélation entre les angles mesurés et l'orientation des éprouvettes. Le lot LT de douglas est celui pour lequel le RMSE est le plus faible. Sur trois essences, le châtaignier, le douglas et le peuplier, l'erreur de mesure est inférieure au degré. Pour le hêtre et les lots LT de chêne, l'erreur est entre 1,1° et 1,6° alors que pour les lots LR de chêne, l'erreur est comprise entre 2,5° et 3,1°.

Pour les lots de bois, le plan de symétrie orthotrope a un effet direct sur la précision de mesure. En effet, pour une essence donnée, l'erreur de mesure est toujours plus faible pour les éprouvettes de plan LT que LR, excepté pour le peuplier où les RMSE sont à peu près identiques pour les deux plans et pour le châtaignier pour lequel le RMSE est très légèrement supérieur de 0,1° environ pour les éprouvettes LT. Pour le chêne, le RMSE est quasiment deux fois plus grand sur le plan LR que sur le plan LT. Ces observations rejoignent celles sur la valeur des ratios des ellipses. La relation entre ces deux résultats est développée au §3.4 de ce chapitre.

Pour les trois états des éprouvettes de chêne, les plus faibles RMSE ont été obtenus pour les éprouvettes à l'état sec brut de sciage. En comparaison, les RMSE du chêne vert brut sont supérieurs de 0,1° pour le lot d'éprouvettes LT et de 0,6° pour le lot d'éprouvettes LR. Ceux du chêne sec poncé le sont respectivement de 0,2° (LT) et 0,4° (LR). L'humidité élevée du chêne et son état de surface brut de sciage ne semblent pas remettre en cause la mesure de l'ODF, ni augmenter significativement l'erreur de cette mesure. La mesure de l'ODF est possible à une précision équivalente aussi bien sur du chêne frais de sciage et du chêne sec brut de sciage que sur du chêne sec poncé. En revanche, le mode de débit des bois apparaît comme un facteur plus influant sur la mesure de l'ODF (cette influence est détaillée au §3 de ce chapitre).

Dans la littérature, Nyström (2003) n'a pas donné de valeur d'erreur de mesure comme un RMSE par exemple, mais le très bon coefficient de corrélation (0,99996) entre le mesure de l'ODF et la position angulaire de son éprouvette d'épicéa, ainsi que le faible écart type (0,2°) des angles mesurés laissent penser à une très faible erreur de mesure. Schajer et Sutton (2016) ont trouvé une erreur de 1° pour la mesure de l'ODF sur une éprouvette de pin tordu. Hu *et al.* (2004) ont trouvé, pour des éprouvettes de cèdre du Japon et de hêtre du Japon, des erreurs de mesure respectives de 4,6° et de 2,9°, tandis que pour des éprouvettes rabotées, les erreurs de mesure pour ces mêmes essences étaient respectivement de 0,46° et 1,3°. Ces résultats sont très proches des 0,7° et 0,8° des lots rabotés de douglas et des 1,1° et 1,6° pour ceux de hêtre (Figure 2.13). Par ailleurs, les résultats de Hu *et al.* (2004) laissent entendre que l'état de surface brut de sciage aurait un impact plus négatif sur la mesure de l'ODF pour des essences résineuses que pour des feuillus. Ceci pourrait venir du fait qu'à l'état sec et brut de sciage, la surface des résineux est plus « pelucheuse » que celle des feuillus.

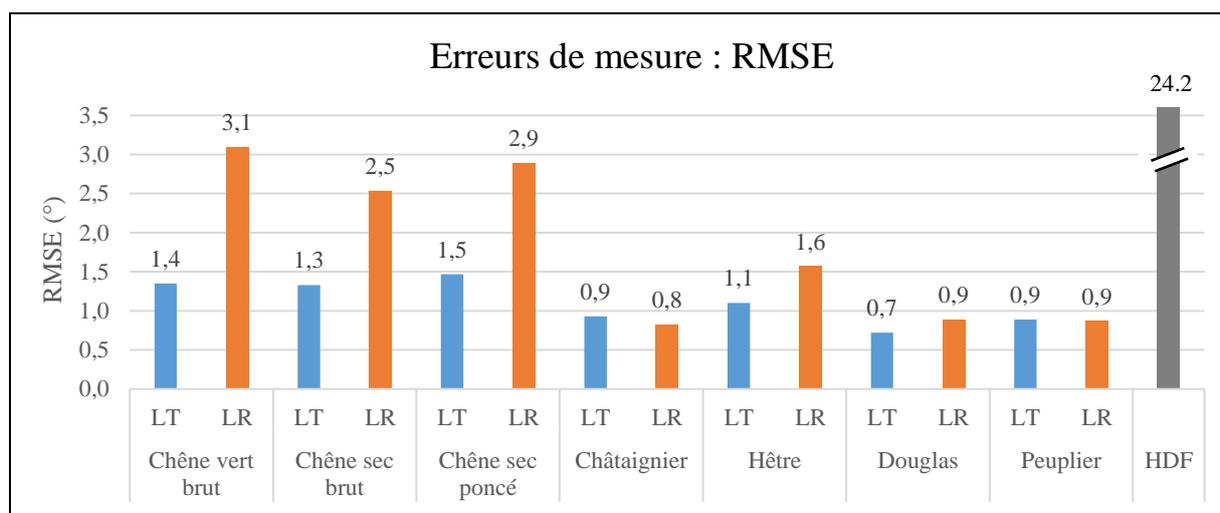


Figure 2.13 : Erreurs de mesure (RMSE) par plan de symétrie orthotrope pour chaque lot testé.

2.5.3. Influence de l'erreur de mesure dans la formule de Hankinson

La Figure 2.14 présente l'influence de l'erreur de mesure de l'ODF sur l'estimation de la résistance avec la formule de Hankinson (équation 2.1 p.51 en prenant $f_0 = 100 \text{ MPa}$ et $f_{90} = 10 \text{ MPa}$). Ainsi, sur la base de cette formule, une erreur moyenne d'un degré sur la mesure de l'ODF représenterait une erreur en termes de résistance mécanique de 5 % au maximum, ce qui est très correct. Lorsque l'erreur est plus proche de trois degrés, cela est plus pénalisant avec une incertitude pouvant atteindre 14 % sur l'estimation de la résistance mécanique. Les erreurs maximales sont constatées pour des ODF autour de 15°.

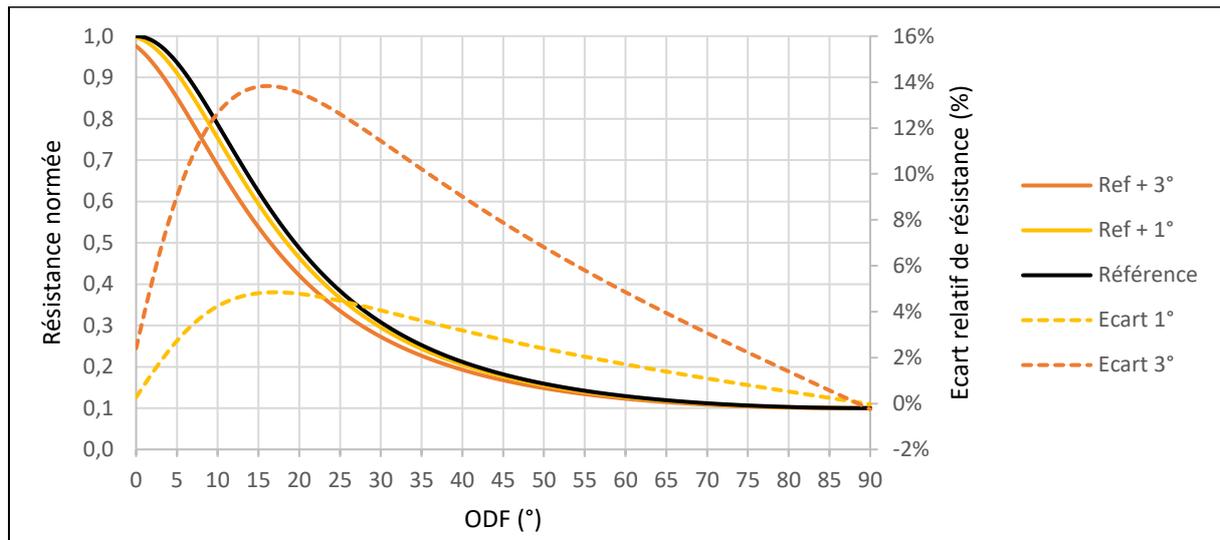


Figure 2.14 : Influence d'erreurs de mesure de 1° et 3° sur l'estimation de la résistance avec la formule de Hankinson.

3. Influence de l'anatomie du bois sur la diffusion de la lumière laser

Les différences de RMSE entre éprouvettes de plan LT et celles de plan LR semblent donc indiquer une influence de l'anatomie du bois sur les phénomènes de diffusion de la lumière laser à la surface du bois. C'est pourquoi, une étude plus approfondie essence par essence pour chacun des plans LT et LR est menée dans ce qui suit.

3.1. Comparaison de la diffusion de la lumière sur plusieurs essences

Le phénomène de diffusion de la lumière laser à la surface du bois peut être qualifié à l'aide de l'étude des deux autres paramètres des ellipses que sont le ratio et l'aire. Les données de ratios $r_{i,k}$ et des aires $s_{i,k}$ des ellipses sont respectivement représentées à la Figure 2.15.a et à la Figure 2.15.b. Ces données sont réparties par essence et par plan LT / LR. Ce type de représentation permet de mettre en évidence la distribution des valeurs, la médiane (ligne horizontale en gras) ainsi que les 1^{er} et 3^e quartiles (lignes horizontales en pointillés).

D'un lot à l'autre, la répartition des valeurs de ratios et d'aires ne se ressemblent pas et ne suivent pas forcément une loi normale. Pour certains lots, il serait possible d'identifier visuellement plusieurs sous-

populations de ratios ou d'aires. Par exemple, deux populations de ratios sont clairement observables pour le lot de douglas LT et, dans une moindre mesure, pour le lot de châtaignier LT.

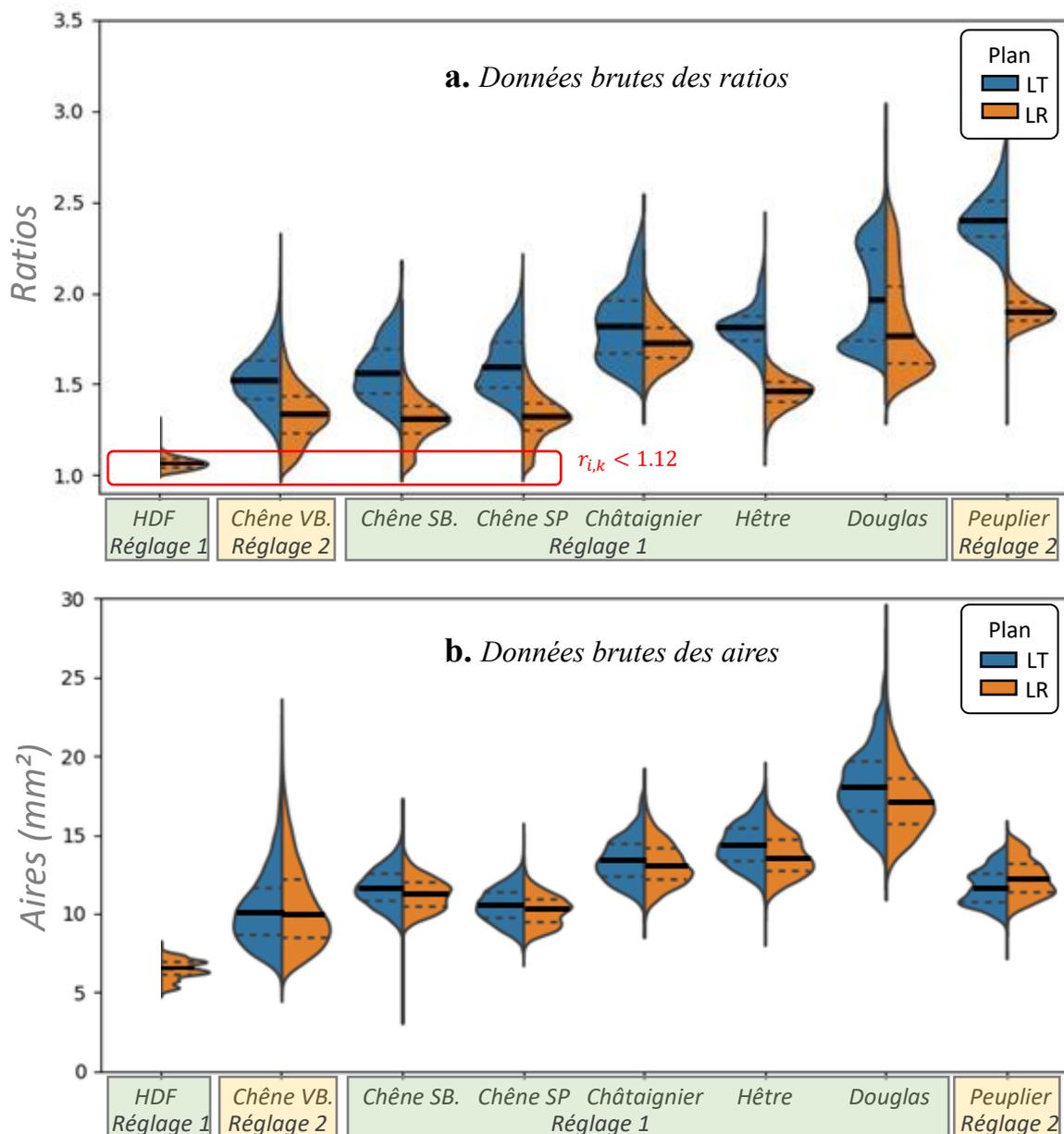


Figure 2.15 : a) Population des ratios des ellipses réparties par essences et plan de symétrie orthotrope ;
 b) Population des aires des ellipses réparties par essences et plan de symétrie orthotrope.
 Chêne VB : Chêne vert brut. Chêne SB : Chêne sec brut. Chêne SP : Chêne sec poncé.

Les écarts observés entre les plans LT et LR pour les populations de ratios ne sont pas aussi prononcés pour les aires des ellipses. Cela pourrait venir du fait que tous les points laser n'ont pas la même puissance, la taille de l'image de diffusion du laser étant sensible à la puissance du laser (pour rappel, la réduction de la puissance du laser a permis d'obtenir des images de diffusion moins grandes pour le chêne vert brut et le peuplier). Cela est visible sur le HDF où plusieurs pics sont observables sur la répartition des aires (Figure 2.15.b).

Ce sont bien les ratios des ellipses qui permettent de quantifier le mieux la géométrie de l'image de diffusion et donc de rendre compte de l'intensité du phénomène de diffusion de la lumière laser dans une direction privilégiée, celle de la fibre du bois. En effet, un ratio proche de 1 indique qu'une ellipse est presque circulaire, et donc que la diffusion de la lumière du laser ne s'effectue pas plus dans une direction que dans une autre, alors que plus le ratio est élevé, plus il traduit que ce phénomène de diffusion est accentué. Pour le HDF, 95 % des ratios sont inférieurs à 1,12. Les ellipses sont quasiment des cercles et confirme les observations de la Figure 2.11. Sur les éprouvettes de bois massif, de telles valeurs de ratios ne sont atteintes que pour les lots LR de chêne. En effet, pour le chêne vert brut LR, le chêne sec brut LR et le chêne sec poncé LR, ce sont respectivement 8,5 %, 9,4 % et 8,0 % des ratios qui sont inférieurs à 1,12. Cette part importante d'ellipses presque circulaires pourrait être la cause de l'erreur de mesure plus élevée pour les éprouvettes LR.

3.2. Influence des cernes d'accroissement

Pour visualiser la répartition des populations des paramètres ellipses à la surface d'une éprouvette et identifier des singularités, les données ont été interpolées et cartographiées. La Figure 2.16 présente en exemple une éprouvette LT de châtaignier des cartographies regroupant, par paramètres ellipses, les données issues des scans aux dix orientations nominales de l'éprouvettes (cf. chapitre 2 §2.4.3 et Figure 2.10). Les données brutes des angles $\omega_{i,k}$, des ratios $r_{i,k}$ et des aires $s_{i,k}$ sont respectivement représentées à la Figure 2.16.b, la Figure 2.16.d et la Figure 2.16.f. Les données interpolées (avec la méthode du plus proche voisin) de ces trois paramètres ellipse sont représentées respectivement à la Figure 2.16.c, la Figure 2.16.e et la Figure 2.16.g sur une grille régulière de résolution 1x1 mm².

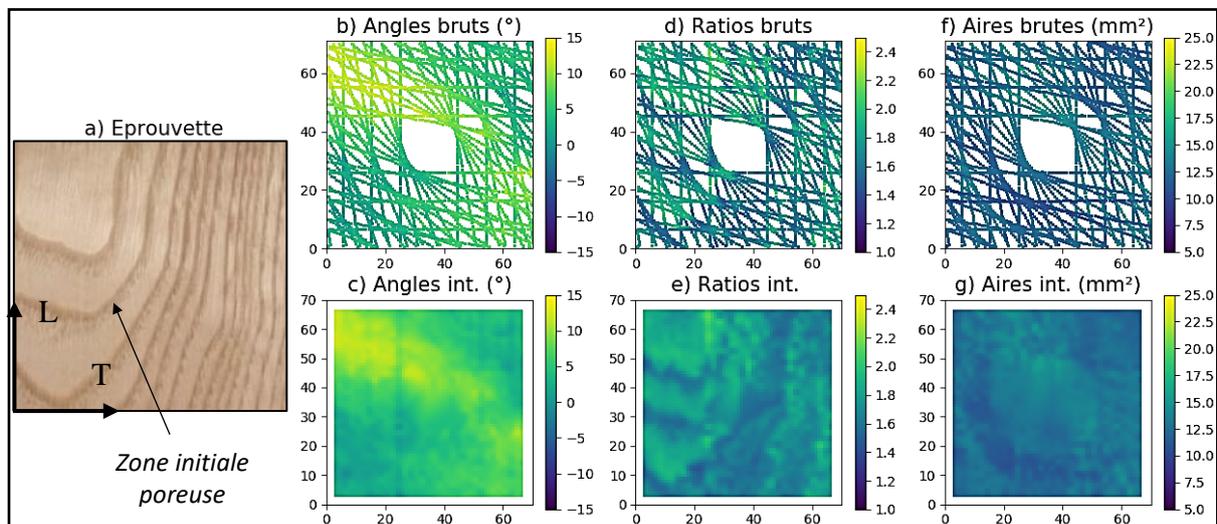


Figure 2.16 : a) Image d'une éprouvette LT de châtaignier ; b) cartographie des angles mesurés $\omega_{i,k}$; c) cartographie des angles $\omega_{i,k}$ interpolés ; d) cartographie des ratios mesurés $r_{i,k}$; e) cartographie des ratios $r_{i,k}$ interpolés ; f) cartographie des aires mesurées $s_{i,k}$; g) cartographie des aires $s_{i,k}$ interpolées. La couleur des pixels indique la valeur des paramètres.

La cartographie des ratios interpolés (Figure 2.16.e) met en évidence une différence de forme de l'image de diffusion selon qu'un faisceau laser pointe sur la zone initiale poreuse ou sur du bois final. Les ellipses seraient ainsi moins allongées dans la zone initiale poreuse. Sur une éprouvette LT de chêne sec poncé (Figure 2.17.g), un phénomène du même type pourrait aussi avoir lieu, mais les différences de ratios ne sont pas assez nettes pour conclure. En revanche, sur l'éprouvette de douglas, les

variations des ratios (Figure 2.17.c) font ressortir les différentes zones de bois d'été et de bois de printemps qui sont bien identifiables sur l'image couleur de l'éprouvette LT correspondante. La même observation peut être faite avec la cartographie des aires, mais pas de façon aussi nette.

Ainsi, l'étude de la diffusion d'un point laser à la surface du bois permet de faire ressortir quelques particularités anatomiques comme les différences entre bois initial et bois final. Sur les exemples étudiés, les mesures d'angles ne semblent pas être affectées par ces différences d'intensité de la diffusion de la lumière laser (Figure 2.16.c et Figure 2.17.b.f).

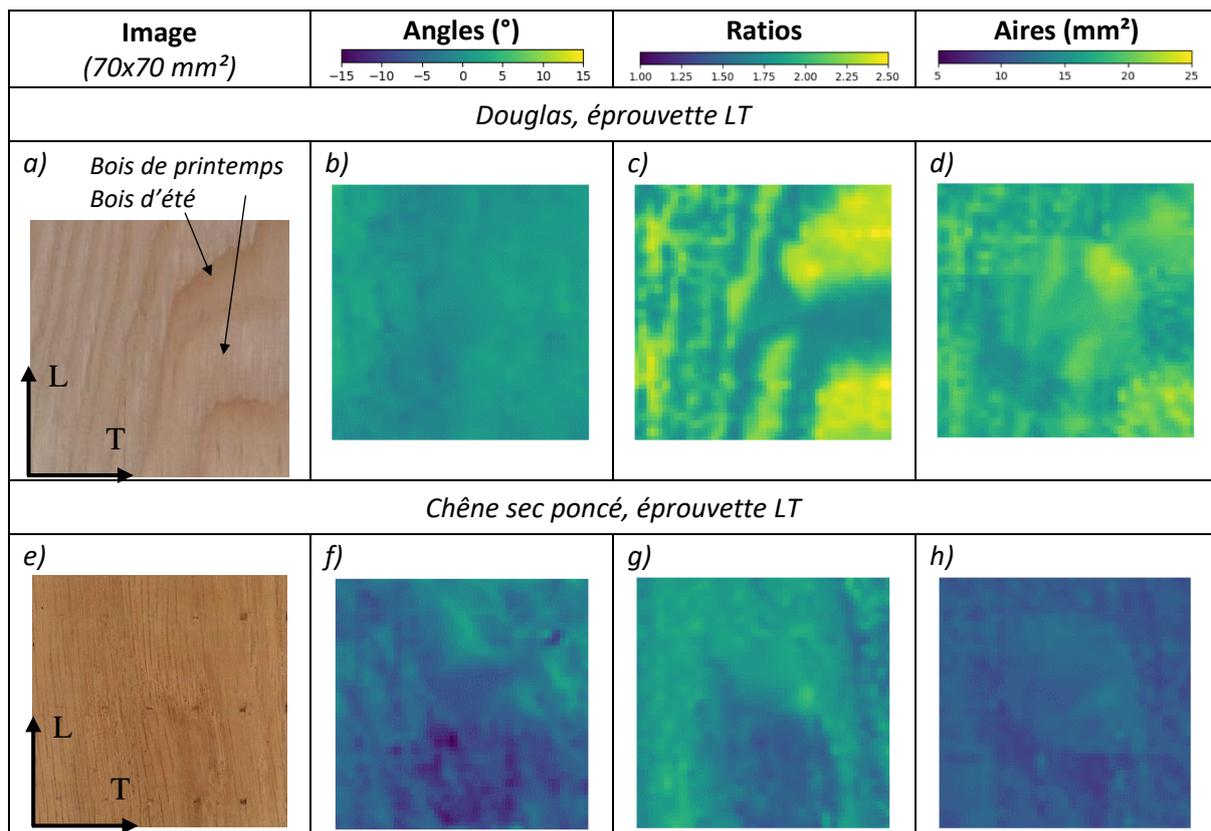


Figure 2.17 : a-b-c-d : Photo et cartographies des angles, ratios et aires interpolés d'une éprouvette LT de douglas ; e-f-g-h : Photo et cartographies des angles, ratios et aires interpolés d'une éprouvette LT de chêne sec poncé (La résolution de la photo e. ne permet malheureusement pas une bonne appréciation de la zone initiale poreuse).

3.3. Influence des rayons ligneux

Concernant le cas des éprouvettes LR de chêne, les cartographies des ratios de la Figure 2.18.e et de la Figure 2.18.f révèlent que les ratios les plus bas (entre 1 et 1,2) se situent dans des zones bien précises correspondant aux gros rayons ligneux, typique du chêne (Figure 2.18.a), et appelé « maille » pour son esthétique bien spécifique. Ainsi, la forme de l'image de diffusion du laser point serait quasiment circulaire dans un rayon ligneux de chêne et non pas elliptique, forme quasi circulaire se retrouvant aussi pour le cas d'un laser pointant sur un nœud (Jolma et Mäkynen 2007). Or, pour cette essence, les rayons ligneux sont de gros amas de parenchymes dont la direction longitudinale coïncide avec la direction radiale des fibres (cf. chapitre 1). Une explication de la forme quasi circulaire des images de diffusion au niveau de ces rayons serait que les parenchymes diffuseraient la lumière laser de manière isotrope, qui est l'hypothèse faite par Kienle *et al.* (2008). En faisant l'hypothèse que la lumière laser pénètre suffisamment dans le bois (environ de 1 mm) et que l'image de diffusion

observée rend compte de la diffusion dans les fibres et cellules contenues dans cette épaisseur, une autre explication serait que la lumière du laser se diffuserait non seulement dans la direction des fibres mais aussi dans la direction des parenchymes.

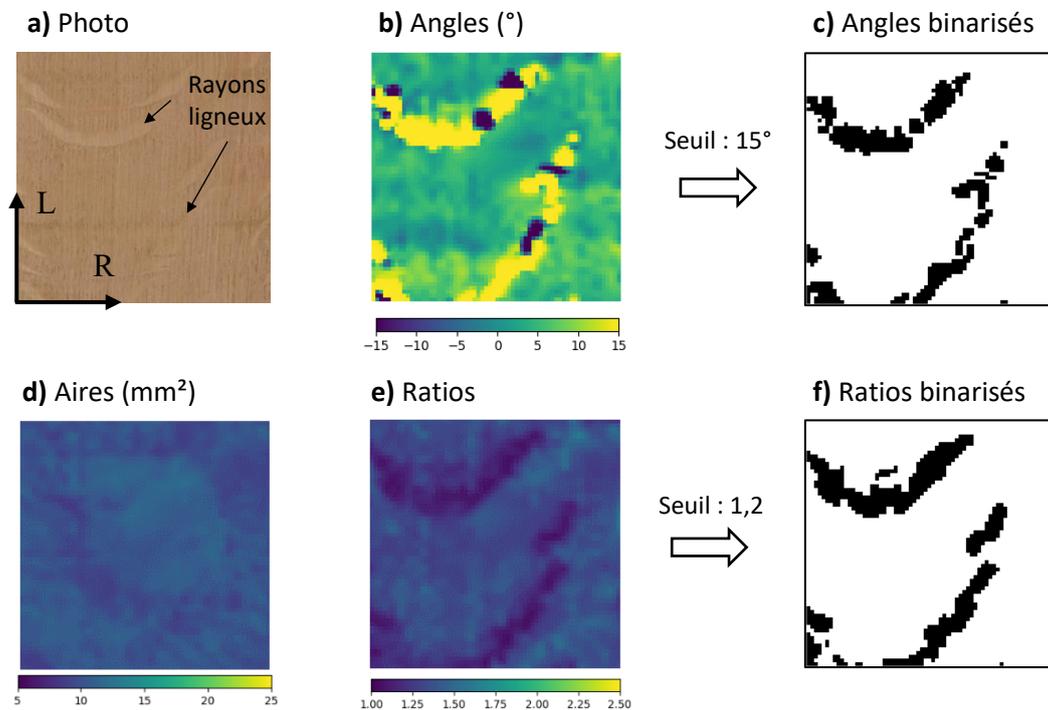


Figure 2.18 : a) Photo d'une éprouvette LR de chêne sec poncé ; b) Cartographie des angles ; c) Cartographie des angles binarisés ; d) Cartographie des aires ; e) Cartographie des ratios ; f) Cartographie des ratios binarisés.

Ces hypothèses permettraient aussi d'expliquer pourquoi, sur l'ensemble des essences testées, les ratios sont en moyenne systématiquement plus faibles sur le plan LR que sur le plan LT. Pour la plupart des essences de bois, les rayons ligneux sont très fins (quelques cellules empilées seulement) et répartis de manière homogène. La présence de ces cellules orientées radialement, qu'elles causent ou pas une diffusion isotrope de la lumière, aurait pour effet d'augmenter la diffusion radiale tout en limitant un peu la diffusion longitudinale de la lumière laser. Ceci se traduirait par une légère augmentation de la taille du petit axe des ellipses et une légère diminution de la taille du grand axe. C'est ce qui s'observe sur les ellipses types de la Figure 2.11. La différence de forme des ellipses entre les plans LT et LR est très marquée pour le hêtre, pour qui les rayons ligneux sont bien visibles à l'œil nu de répartition homogène, et pour le peuplier (Figure 2.15.a). Une autre explication aux ratios plus petits sur le plan LR pourrait être un comportement orthotrope de la diffusion de la lumière à la surface du bois causée par la croissance radiale, comme c'est le cas pour les propriétés mécaniques.

Contrairement aux cernes d'accroissement, la présence des rayons ligneux affecte directement la mesure de l'ODF dans le cas du chêne. Des angles dont la valeur absolue est élevée sont visibles sur la cartographie de la Figure 2.18.b. Sur les plans LR des autres essences testées, les rayons ligneux ne semblent pas affecter à ce point la mesure de l'ODF.

Enfin, l'information de l'aire des ellipses ne permet pas de mettre en évidence, visuellement du moins, les zones de rayons ligneux du chêne. Et pour l'ensemble des essences testées, les différences des aires des ellipses entre les plans LT et LR ne sont pas suffisamment prononcées pour mettre en évidence

des singularités anatomiques. Sur le plan LT, les rayons ligneux n'ont pas la même influence car leur direction longitudinale n'apparaît pas et, de ce fait, ne perturbent pas autant la diffusion de la lumière laser.

3.4. Influence de la forme de l'ellipse sur la qualité de mesure

La Figure 2.19 met en évidence la relation entre l'erreur de mesure de l'ODF et les ratios $\overline{R_{ref}}$. Les points noirs sur le graphique de la Figure 2.19 correspondent aux lots testés et aux valeurs présentées au Tableau 2.3 et à la Figure 2.13. Les marques triangles correspondent aux trois lots LR de chêne ne tenant compte que des ellipses dont le ratio est supérieur à 1,12, seuil correspondant au fractile à 95 % des ratios du lot HDF. Cela revient à supprimer les ellipses contenues dans les zones de rayon ligneux.

Ainsi, plus les ratios des ellipses sont faibles, plus l'erreur de mesure est grande. Pour les ratios supérieurs à 1,7, l'erreur de mesure semble se stabiliser à un peu moins de 1°.

Pour les lots LR de chêne vert brut, sec brut et sec poncé, la suppression des angles mesurés dans les rayons ligneux a permis de réduire l'erreur de mesure. Le RMSE est alors de 2,3° au lieu de 3,1° pour le chêne vert brut LR, de 2,1° au lieu de 2,5° pour le chêne sec brut LR et de 2,2° au lieu de 2,9° pour le chêne sec poncé LR.

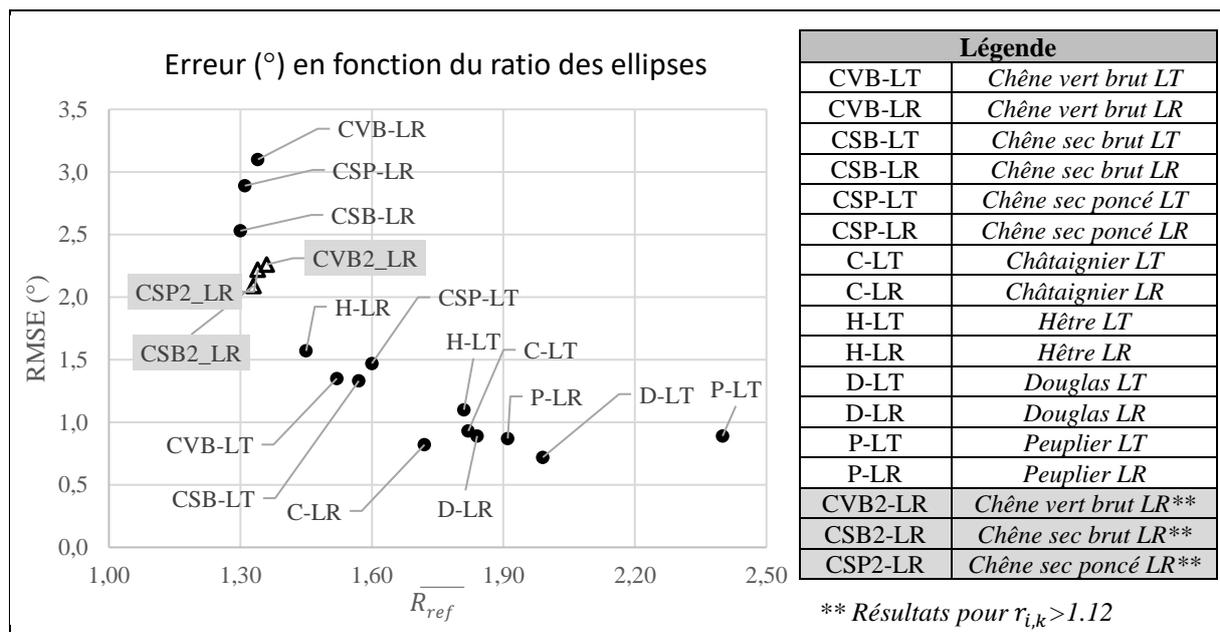


Figure 2.19 : RMSE en fonction des ratios

4. Conclusion

Les résultats de ce chapitre ont montré que la technologie des lasers points pour la mesure de l'ODF est efficace sur toutes les essences testées avec une erreur de mesure allant de quelques dixièmes de degrés à un peu plus de trois degrés, la majorité étant autour d'un degré. Dans le cadre d'une application pour la détection des nœuds, une erreur de mesure de l'angle de 3° n'est pas problématique car l'angle n'est pas la seule information qui peut être exploitée, la forme de l'image de diffusion aidant beaucoup à cela. En revanche, dans le cadre de l'estimation des propriétés mécaniques pour des angles entre 0 et 30 degrés, il conviendra de tenir compte de cette incertitude.

Cette technologie est sensible aux caractéristiques anatomiques des surfaces scannées. La littérature a déjà montré que, sur des nœuds, la diffusion de la lumière laser est isotrope, les images de diffusion observées étant plutôt circulaires. Les travaux présentés dans ce chapitre ont montré que les cernes d'accroissement et les rayons ligneux vus dans le plan radial du bois ont un effet sur le phénomène physique de la diffusion de la lumière du laser à la surface du bois. Si les premiers n'affectent pas la mesure de l'ODF, les seconds ont tendance à atténuer la diffusion de la lumière dans la direction des fibres, rendant les images de diffusion moins elliptiques, et cela d'autant plus que les rayons ligneux sont épais et larges. Dans le cas du chêne vu dans le plan radial, elles sont presque circulaires quand le laser pointe sur les gros rayons ligneux, avec comme conséquences que les mesures d'angles ne correspondent plus à l'ODF et que, sur les cartographies d'angles et de ratios, les rayons ligneux se différencient peu des nœuds.

Il est montré qu'au-dessus d'un seuil de 1,7 pour le ratio des ellipses, l'erreur de mesure est stable et autour de 1°. En dessous d'un seuil de 1,7, l'erreur augmente quand l'image de diffusion s'arrondit, avec des valeurs de l'ordre de 3°, pour des ratios moyens de l'ordre de 1,3. Le fait que l'erreur de mesure de l'ODF soit très liée à la forme de l'image de diffusion permet d'établir quelques points de repère utiles à l'implantation de scanners pour mesurer l'ODF avec la technologie des lasers points. En premier lieu, il est possible de mesurer l'ODF avec une précision correcte au vue des applications envisagées dès que les ratios moyens des ellipses dépassent un seuil de 1,3. En second lieu, pour que l'erreur de mesure soit inférieure à 1°, les réglages des lasers (puissance, focalisation) et des capteurs (diaphragme, gain caméra, seuil de binarisation) peuvent être établis, pour chaque essence et états de surface, de manière à obtenir, autant que possible, des ratios d'ellipses supérieurs ou égaux à 1,7.

Enfin, les travaux présentés dans ce chapitre ont permis de montrer que la mesure de l'ODF avec un scanner équipé d'une technologie de lasers points est possible sur du chêne frais de sciage et aussi sur du chêne sec brut de sciage. Cependant, il faut préciser que les surfaces des éprouvettes scannées sèches et brutes de sciage étaient propres, c'est à dire qu'elles ne comportaient pas de coulure de tanin ni d'autres salissures et qu'elles n'étaient pas grisées, ce qui est typique des bois restés longtemps dehors exposés aux intempéries. Ces résultats valident la faisabilité d'installer ce type de scanner à plusieurs stades de la transformation du chêne, en particulier en première transformation aussitôt après le sciage des bois.

Chapitre 3 :

Modélisation des déformations au séchage
d'avivés de chêne à partir de la mesure de
l'orientation des fibres

1. Introduction

Le séchage du bois est l'un des sujets phares des chercheurs en sciences du bois avec plus de 480 thèses³ de doctorat soutenues en France depuis 1985 et plus de 1 100 brevets⁴ à l'échelle internationale. D'après Romain Rémond, un des experts en séchage du bois, « pour aborder le séchage, il faut avoir des compétences en transfert de chaleur et d'humidité, en mécanique et en chimie » (cité dans un article du Bois International, Tisserand 2013). Les travaux de ce chapitre de thèse ne sont pas de l'ordre de la recherche fondamentale sur le séchage du chêne, mais plus de l'ordre phénoménologique. L'objectif n'est pas d'expliquer fondamentalement les phénomènes physiques se produisant lors du séchage, une littérature fournie et synthétisée dans Perré et Keey (2014) traite du sujet, mais de déterminer quel est le potentiel de la simple information de l'orientation des fibres (ODF) dans le but d'anticiper en situation industrielle les déformations liées au séchage d'avivés de chêne. Il s'agit d'essayer de trouver si une méthode simple peut être mise en œuvre industriellement pour répondre à une problématique récurrente et coûteuse.

En effet, le constat est que, après séchage, certains avivés sont trop déformés et, pour être rabotés proprement et sans perdre trop de matière, doivent être redressés (cf. chapitre 1), mobilisant un poste en seconde transformation dans le processus de fabrication actuel de lames aboutées de l'entreprise Les Bois Profilés. L'expérience montre que la présence de nœuds est cause de fortes déformations des sciages après séchage. Or, la valorisation du chêne de qualité secondaire en matériaux de structure pour la construction implique de conserver, pour augmenter le rendement matière, un maximum de nœuds dans les sciages. Leur présence n'est pas systématiquement rédhibitoire pour ce qui est de leur impact sur les performances mécaniques (APECF et Arts Cluny 2011, Faydi 2017). En revanche, ils peuvent l'être du point de vue des déformations au séchage. Les nœuds augmentent la part d'avivés déformés après séchage et donc la charge de travail du poste de tronçonnage juste après l'opération de séchage, lequel pourrait être supprimé s'il était possible de faire en sorte que les bois à abouter soient assez peu déformés pour être rabotés directement.

En pratique, dans les scieries, les déformations des avivés au séchage sont réduites grâce à un empilage des avivés sur lattes rapprochées, permettant un séchage des bois sous contrainte, ce qui limite leurs déformations. Par ailleurs, un cycle de séchage adapté a aussi un effet bénéfique sur les déformations des bois au séchage. Cela est le fruit des travaux des chercheurs (Joly et More-Chevalier (1980), Aléon *et al.* (2001)) et des observations sur le terrain des professionnels du séchage. Cependant, même avec ces dispositions, il se trouve toujours en sortie de séchoir des avivés avec de grandes déformations devant être tronçonnés avant le calibrage, réduisant par conséquent la productivité du traitement des avivés.

Afin de contribuer au développement d'un processus de fabrication plus efficace de lames aboutées, une solution consisterait à anticiper les déformations au séchage et de tronçonner avant l'étape de séchage ces avivés en pièces dont les déformations seraient moindres. Mais aujourd'hui, il n'existe pas, à la connaissance des auteurs, de système industriel en capacité d'estimer planche par planche les déformations causées par le séchage. Pour cela, il est nécessaire d'avoir recours à de la modélisation et à un outil de mesure en ligne adapté.

La variabilité des caractéristiques du matériau bois rend la modélisation du séchage complexe. De fait, dans le séchage du bois interviennent des phénomènes physiques de transferts couplés de chaleur et de masse en milieux poreux (Perré et Turner 1999) et des comportements mécaniques provoqués par l'évacuation de l'eau (Dahlblom *et al.* 1996, Ormarsson *et al.* 1998 et 1999). En effet, dans le plus

³ Dans la base de données theses.fr avec la recherche « séchage du bois » dans les titres de thèses.

⁴ Dans la base de données INPI avec les mots clés « séchage » et « bois ».

simple des cas, l'évacuation de l'eau liée (cf. chapitre 1) entraîne un rétrécissement hétérogène des fibres du bois. Ainsi, les retraits tangentiels, radiaux et longitudinaux des fibres du bois étant très différents, les variations d'ODF par rapport à la direction longitudinale d'un avivé génèrent des contraintes mécaniques dans le bois, provoquant alors des déformations en complément de la réduction de volume. Ainsi, l'information de l'ODF se trouve être très importante en vue de modéliser les déformations de séchage.

Cependant, face aux multiples variabilités des propriétés du bois, l'ODF dans une planche est souvent considérée comme uniforme (Constant 1995), hypothèse souvent argumentée par la difficulté de modéliser les nœuds et la volonté de simplifier des problèmes de modélisation déjà complexes en étudiant que du bois sans défaut. Dans leurs articles, Ormarsson *et al.* (1998 et 1999) ont néanmoins présenté une modélisation complète du séchage par éléments finis en montrant, entre autres, un cas de variation de l'ODF du plan LT (appelé « angle de spirale ») en fonction de la position radiale des éléments, mais toujours pour du bois sans nœud. Leur modèle considère l'angle de spirale constant pour tous les éléments de même position radiale et n'évoluant pas dans la longueur de l'avivé.

Or, les travaux présentés au chapitre 2 de ce manuscrit ont confirmé la possibilité d'obtenir avant séchage l'information de l'ODF du chêne avec un scanner laser. Comme sur bois sec, un scanner pourrait d'une part détecter les nœuds et les qualités du bois et d'autre part piloter une tronçonneuse selon un schéma de débit défini par un algorithme optimisant les rendements matière et économique selon les quantités et dimensions des pièces à produire. Une fonction novatrice pourrait maintenant être ajoutée, à savoir celle d'un rognage des avivés dans le but d'obtenir des sciages faiblement déformés après séchage.

L'objectif des travaux de ce chapitre de thèse est d'évaluer dans quelle mesure la seule information de l'ODF obtenue avec un scanner industriel permet de rendre compte des déformations au séchage d'avivés nouveaux de chêne. Pour cette première approche et étant donné un rapport supérieur à trois entre la largeur et l'épaisseur des avivés sélectionnés, une modélisation par éléments finis en contraintes planes (2D) a été adoptée. Elle permet seulement de simuler le voilement longitudinal de rive (cf. chapitre 1). Les conditions de séchages pratiquées par l'industriel seront considérées comme optimales et ne seront pas sujet à étude.

2. Détermination expérimentale de la flèche de rive

2.1. Echantillonnage

L'échantillonnage est composé de 19 avivés de chêne issus de la production de la scierie Ducerf. Ces avivés sont répartis selon leur mode de débit : 15 avivés débités sur dosse et 4 débités sur quartier. Cette répartition tient compte du fait que la grande majorité des planches délignées en avivés dans l'entreprise sont débitées sur dosse (planches issues de découverts de plots et de pièces équarries). Le lot est composé d'avivés avec un ou plusieurs gros nœuds, d'avivés sans nœuds et d'avivés avec uniquement des petits nœuds (Annexes)

2.2. Protocole d'essai

Les avivés ont été sciés et délignés pour obtenir une section bois vert de 109 x 30 mm², ce qui correspond à une section sèche de 100 x 27 mm² environ, section parmi les plus produites par l'entreprise Ducerf Scierie. Leur longueur était comprise entre 1,8 et 2 mètres. Dans les 3 heures suivantes, ils ont été scannés au LABOMAP avec un scanner CombiScan de Luxscan (groupe Weinig, décrit au paragraphe suivant) pour mesurer l'ODF sur toutes leurs faces ainsi que leur déformation initiale. Ils ont ensuite été séchés jusqu'à une humidité cible de 10 % (correspondant aux conditions d'aboutage) et non empilés de façon à ce que le bois puisse se déformer librement. Enfin, les avivés secs ont été de nouveau scannés dans le CombiScan afin de mesurer les déformations résultant du séchage. Pour le passage des avivés dans le scanner, les rouleaux presseurs n'ont pas été appliqués afin de ne pas fausser la mesure des déformations. Les avivés étaient donc juste posés sur le convoyeur du scanner.

2.3. Scanner utilisé

Les différents scans ont été réalisés avec le CombiScan, un scanner industriel comportant les modules suivants (Figure 3.1) :

- Un dispositif composé de :
 - Un laser ligne, projetant son faisceau verticalement.
 - Un laser point infrarouge divisé en plusieurs faisceaux dont les images sur l'avivé sont espacés de 4 mm.
 - Une caméra permettant l'acquisition des images provenant du laser ligne et du laser point.
- Un éclairage LED.
- Une caméra couleur.
- Un laser ligne inclinée (pour mesure 3D)
- Un module à rayons X (RX) qui ne sera pas exploité dans ces travaux.

A l'exception du dispositif RX, ces modules sont dupliqués sur les quatre côtés du convoyeur longitudinal permettant ainsi d'effectuer des mesures sur les quatre faces d'un avivé en un seul passage. La vitesse de défilement du tapis et la fréquence d'acquisition des caméras ont été réglées de façon à obtenir une prise d'image tous les millimètres de longueur de l'avivé scanné.

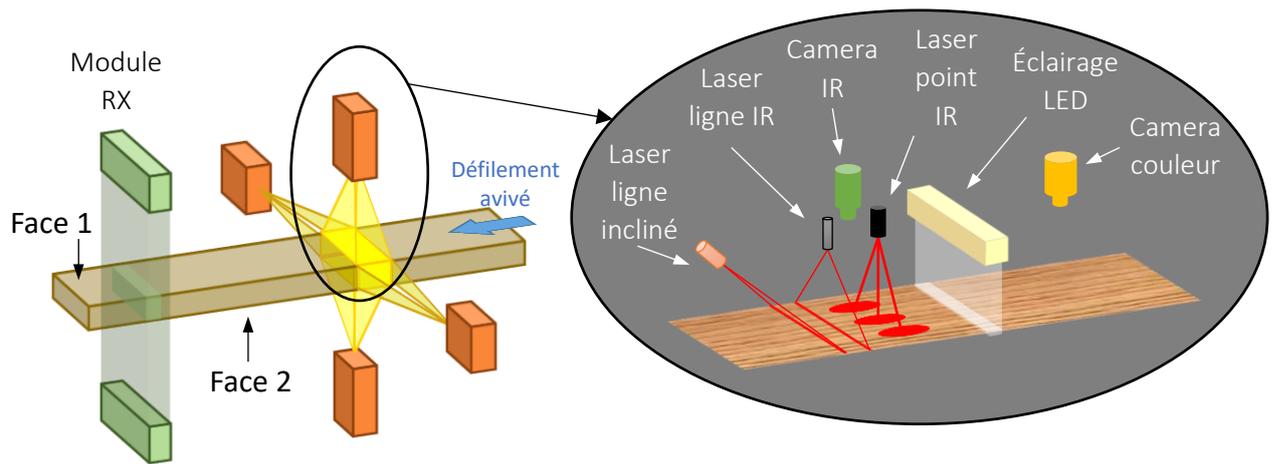


Figure 3.1 : Schéma de principe du scanner industriel CombiScan

2.4. Mesure du voilement longitudinal de rive

La déformation dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) (Figure 3.3) de l'avivé correspond au voilement longitudinal de rive au sens de la norme ISO 2300:1973 (cf. chapitre 1). Les images des deux faces principales de l'avivé obtenues avec le scanner permettent de mettre en évidence ce voilement. La mesure de cette déformation a été faite en relevant la position des bords de l'avivé sur l'image du laser ligne (Figure 3.2). Sur cette image, les pixels du fond valant zéro, une recherche des pixels positifs de la largeur permet de trouver la position du bord inférieur (plus petite ordonnée où le pixel n'est plus égal à zéro) et du bord supérieur (plus grande ordonnée). Cette recherche, propagée sur la longueur, permet d'obtenir l'ensemble des positions des bords de l'avivé (Figure 3.2 d-e). Une opération de lissage des bords (moyenne mobile) a ensuite été réalisée de sorte à obtenir des bords continus et filtrer les pixels aberrants (Figure 3.2 f).

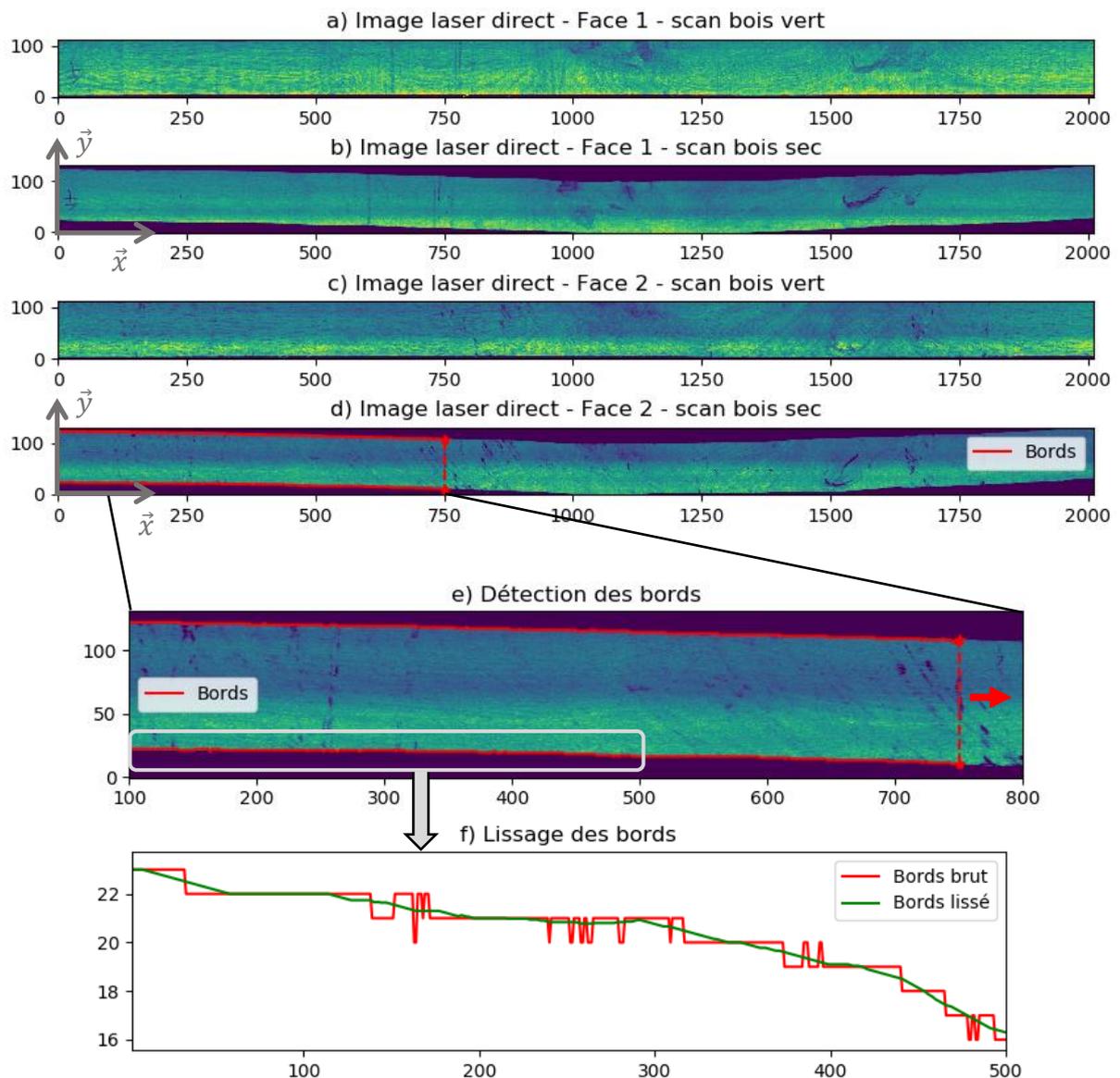


Figure 3.2 : Images du laser direct sur la face 1 – a) bois vert, b) bois sec – et la face 2 – c) bois vert, d) bois sec et position partielle des bords. e) Mesure de la position des bords le long de l’avivé. f) Lissage des bords.

2.4.1. Quantification de la flèche de rive

Le voilement longitudinal de rive a été quantifié par le calcul de la flèche longitudinale de rive (appelée aussi flèche de chant). Pour ce faire, les positions des bords inférieur et supérieur ont été moyennées sur chaque face pour obtenir le voilement moyen par face (Figure 3.3 a-b). Les deux bords moyens obtenus ont à leur tour été moyennés pour obtenir un profil unique de déformation de l’avivé (Figure 3.3 c). La flèche de rive $f(x)$ a été définie comme la distance à la droite (O, L) reliant les deux extrémités du bord moyen.

La flèche maximale f_{max} est définie à l’équation 3.1 comme la flèche $f(x_{f_{max}})$ où $x_{f_{max}}$ est la position de la plus grande flèche en valeur absolue.

$$f_{max} = \max(|f(x)|) * \text{signe}(f(x_{f_{max}})) \quad (\text{équation 3.1})$$

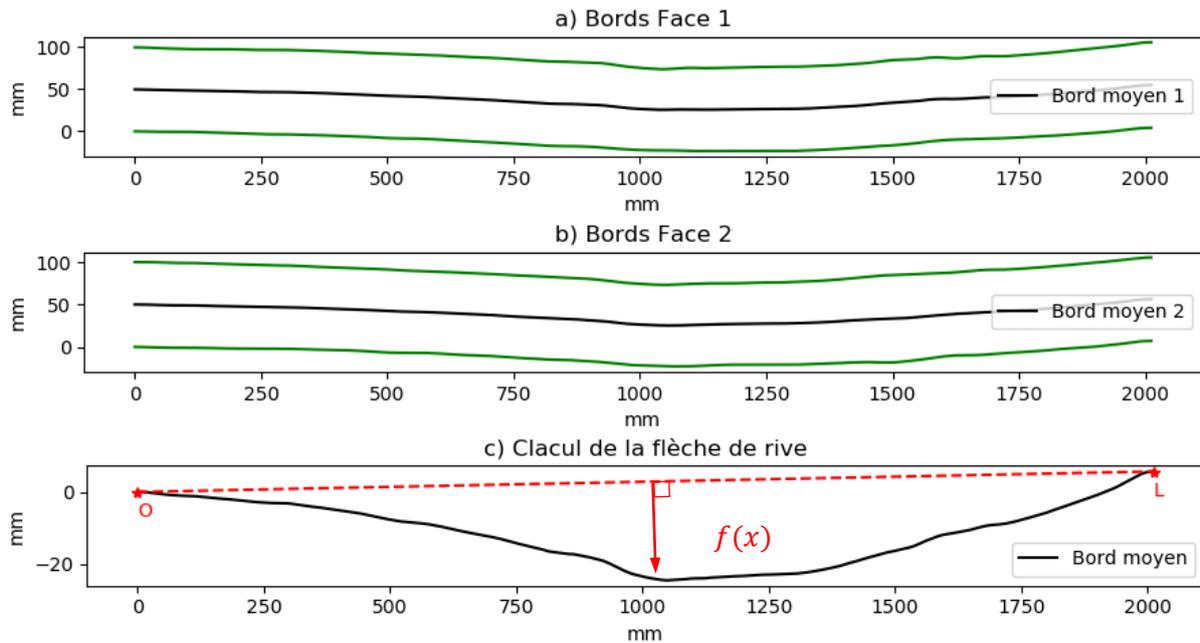


Figure 3.3 : Représentation schématique du calcul de flèches de rive. Le calcul est valable sur bois vert et bois sec.

2.4.2. Flèche de rive avant séchage

La déformation initiale des avivés a été mesurée pour calculer la flèche de rive initiale $f_{vert}(x)$, selon la procédure décrite au §2.4.1 de ce chapitre à partir des images des scans sur bois vert. En effet, des contraintes de croissance peuvent être libérées lors du délignage, provoquant ainsi une première déformation dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) avant séchage. Pour l'échantillonnage de cette étude, ces déformations sont majoritairement de faible amplitude ($f_{vert,max}$ inférieur 5 mm pour 16 avivés et entre 5 et 8 mm pour 3 avivés, cf. Tableau 3.1 p.83).

2.4.3. Flèche de rive après séchage

La flèche de rive après séchage $f_{sec}(x)$ a été calculée conformément au §2.4.1 de ce chapitre à partir des images des scans sur bois sec. La flèche de rive résultant de la déformation au séchage dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) a été définie comme la différence entre la flèche finale calculée d'après les scans sur bois sec et la flèche initiale calculée d'après les scans sur bois vert (équation 3.2). Elle est appelée flèche de rive réelle et notée $f_r(x)$.

$$f_r(x) = f_{sec}(x) - f_{vert}(x) \quad (\text{équation 3.2})$$

Le Tableau 3.1 (p.83) donne les flèches maximales après séchage des avivés testés. L'équation 2 n'est pas valable pour les flèches maximales de rives car la position de ces maximums n'est pas identique entre l'état vert et l'état sec de l'avivé (Figure 3.4).

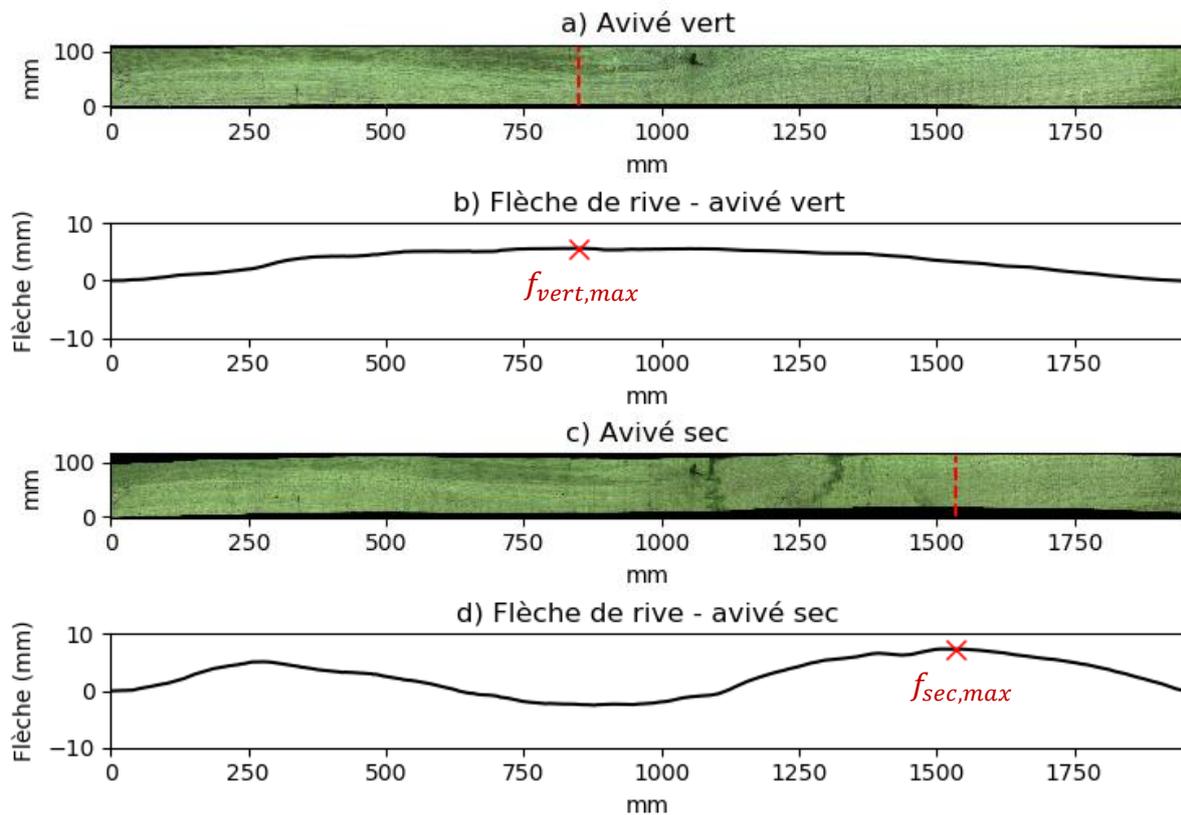


Figure 3.4 : Positions des flèches de rive maximales de l'avivé 18 à l'état vert (a et b) et à l'état sec (c et d)

2.5. Mesure des retraits

Les largeurs des avivés secs (l_{sec}) ont été mesurées avec un mètre ruban dans des zones droites de fil et sans nœuds afin de calculer au mieux le retrait tangentiel des fibres. Un humidimètre à pointe (MOISTRUE) a permis d'obtenir une valeur approchée de l'humidité H (en %) des avivés. La valeur du point de saturation des fibres (PSF) a été fixée pour le chêne à 31 % (CIRAD 2021). Les retraits totaux (R_i) dans la largeur des avivés entre le PSF et l'état anhydre ont été calculés en conséquence (Tableau 3.1) à partir de l'équation 3.3 :

$$R_i = \frac{l_{vert} - l_{sec}}{l_{vert}} * \frac{PSF}{PSF - H} \quad (\text{équation 3.3})$$

Le retrait tangentiel calculé pour les avivés sur dosse a été, dans cette étude, de 10,4 % en moyenne (pour un écart-type (EC) de 1,4 %), valeur cohérente avec celle de 9,7 % (EC = 0,9 %) de la base de données TROPIX du CIRAD pour le chêne (CIRAD, n.d.). Le retrait dans la largeur des quatre avivés sur quartier a été de 6,3 % en moyenne (pour un écart-type de 0,8 %) et devrait correspondre au retrait radial. Cette valeur est significativement différente de celle de 4,5 % (EC = 0,5 %) donnée dans la fiche TROPIX du chêne. C'est au-delà de la valeur moyenne plus deux fois l'écart type. Mais leurs plus fortes valeurs peuvent s'expliquer par le fait que le débit de ces pièces n'est pas parfaitement dans le plan radial sur tout le long de l'avivé.

Tableau 3.1 : Mesures des retraits et des flèches de rive des avivés étudiés.

Référence Avivé	Débit	Après séchage		Retrait total en largeur	$f_{vert,max}$ (mm)	$f_{sec,max}$ (mm)	$f_{r,max}$ (mm)
		Largeur (mm)	H (%)				
				$R_{R,i}$			
01	Quartier	104	11,2	7,2 %	1,7	-5,2	-6,6
02	Quartier	105	11,7	5,9 %	7,4	14,7	7,8
03	Quartier	105	10,5	5,5 %	4,0	-4,4	-8,4
04	Quartier	104	9,9	6,7 %	1,0	-10,5	-11,1
<i>Retrait moyen quartier ($R_{R,moy}$)</i>				6,3 %			
				$R_{T,i}$			
05	Dosse	100,5	9,0	11,0 %	1,7	2,7	1,2
06	Dosse	101	8,5	10,1 %	3,9	4,1	-1,6
07	Dosse	101	7,7	9,8 %	0,7	11,5	11,0
08	Dosse	103	9,0	7,8 %	0,7	-10,0	-10,5
09	Dosse	102	10,1	9,5 %	1,5	-1,4	-2,8
10	Dosse	101	9,5	10,6 %	3,2	-9,4	-11,2
11	Dosse	102,5	8,2	8,1 %	3,5	-35,7	-36,7
12	Dosse	100	9,6	12,0 %	-3,7	3,4	4,5
13	Dosse	101	9,2	10,4 %	6,0	14,3	8,5
14	Dosse	101	9,8	10,7 %	1,6	12,9	11,5
15	Dosse	101,5	9,2	9,8 %	1,9	-6,1	-7,0
16	Dosse	100	7,9	11,1 %	1,3	-16,2	-16,7
17	Dosse	99	9,2	13,0 %	-1,4	-27,4	-27,3
18	Dosse	100,5	10,0	11,5 %	5,7	11,1	7,4
19	Dosse	100	8,2	11,2 %	1,1	7,2	6,1
<i>Retrait moyen dosse ($R_{T,moy}$)</i>				10,4 %			

3. Modélisation par éléments finis du voilement longitudinal de rive

Un modèle éléments finis (EF) a été développé avec le code de calcul aux éléments finis Cast3M (Cast3M, 2019) pour déterminer le voilement longitudinal de rive des avivés de chêne (cf. chapitre 1).

3.1. Définition des propriétés matériaux

3.1.1. Orientation des fibres

L'ODF des deux grandes faces de l'avivé (face 1 et 2) a été mesurée sur bois vert avec des lasers points. Pour rappel, le scanner permet d'obtenir différents points de mesure d'ODF le long de l'avivé avec une résolution de 1 mm dans le sens de défilement (\vec{x}) et de 4 mm dans le sens transverse (\vec{y}). Les données brutes du scanner sont interpolées (méthode d'interpolation au plus proche voisin), ce qui permet de représenter les paramètres locaux des deux grandes faces de l'avivé sous forme de matrice de dimensions la largeur et la longueur de l'avivé (Figure 3.5 b-e) et d'attribuer une valeur d'angle (en degré °) d'ODF locale à chaque élément.

Le phénomène de diffusion de la lumière laser est plus important sur bois humide que sur bois sec (cf. chapitre 2). Pour les lasers points, cela se traduit par l'observation d'images de diffusion plus étendues pouvant provoquer des chevauchements au vu de l'espacement de 4 mm entre chaque point laser. Étant donné que les scans ont été réalisés sur bois vert, un ajustement du seuil de binarisation a été effectué pour réduire la taille des ellipses binarisées et obtenir dans l'ensemble des mesures correctes. Il peut néanmoins rester quelques cas, dans les nœuds et à proximité, où des ellipses juxtaposées se touchent ne permettant pas de déterminer précisément l'angle d'ODF.

Un lissage des mesures d'ODF a été effectué avec la fonction « *scipy.ndimage.uniform_filter* » de la librairie SciPy. C'est un filtre uniforme venant d'une bibliothèque de traitement d'image qui a comme effet de flouter une image. Il a été appliqué aux cartographies des angles (Figure 3.5 c-f) avec une taille de fenêtre glissante carrée de 5 pixels de côté. Le flou généré est faible mais suffisant pour supprimer les points de mesure aberrants et uniformiser les valeurs d'angle des fibres de sorte à obtenir une évolution plus régulière de l'ODF.

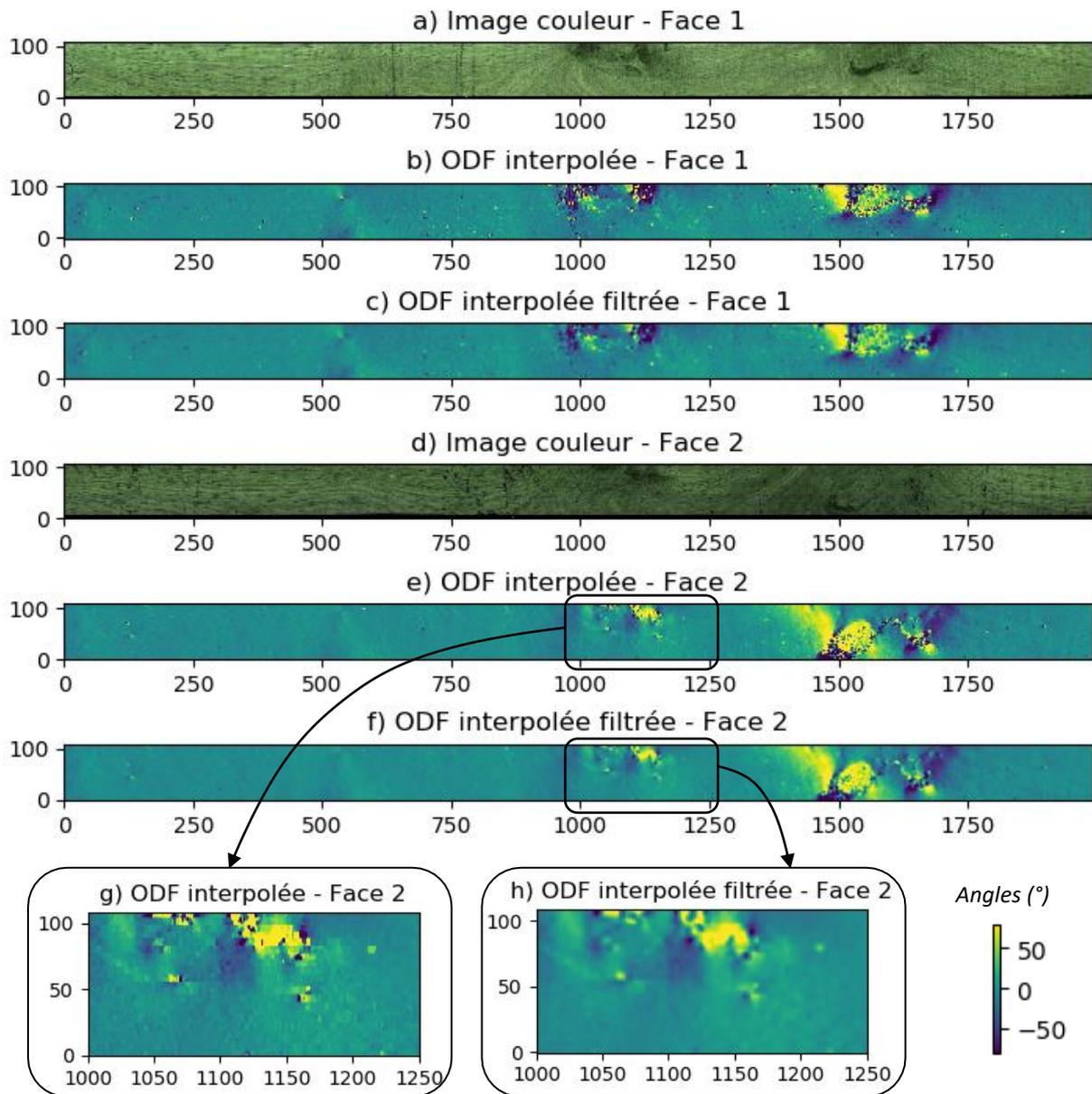


Figure 3.5 : Exemple d'un avivé. Image couleur (a) et cartographies des ODF interpolées (b) puis filtrée (c) de la face 1. Image couleur (d) et cartographies des ODF interpolées (e, g) puis filtrée (f, h) de la face 2.

3.1.2. Définition des zones de nœuds

Les zones de nœud des avivés ont été définies à partir d'une méthode de traitement des données du scanner développée par les auteurs pour cet échantillonnage. Le choix d'une méthode de détection automatique et non manuelle des nœuds se justifie par la volonté de rester au plus proche d'une situation industrielle où la modélisation des déformations au séchage interviendrait après une phase de détection automatique des défauts du bois, et donc des nœuds. Aussi, la méthode de définition des zones de nœuds a été développée à partir des seules données du scanner.

Cette méthode se décompose en deux temps. Le premier est un travail conjoint sur les données de ratios et d'angles des ellipses (cf. chapitre 2) amenant à la création d'une cartographie brute des nœuds. Le second est un travail de traitement numérique d'image permettant d'affiner la position et

la taille des nœuds. Les deux faces principales des avivés ont été traitées séparément. Les diverses opérations sont détaillées ci-dessous.

a) Exploitation des données scanner

- i. Traitement des données de ratios des ellipses identique à celui des angles décrit au § 2.1.1 (interpolation et lissage). La Figure 3.6.b présente, sous forme de cartographie, l'inverse des ratios r_{xy} . Cette représentation permet de mieux visualiser les valeurs élevées dans les zones de nœuds.
- ii. Utilisation des données locales d'ODF telles qu'elles ont été définies au §3.1.1 de ce chapitre. Les angles α_{xy} sont représentés sous forme de cartographie (Figure 3.6.c). Les valeurs extrêmes se retrouvent dans les zones de nœuds.
- iii. Calcul d'un indice de nodosité, noté n_{xy} , en fonction des angles et ratios selon l'équation 3.4. Cette formulation s'inspire de deux techniques de traitement d'image. La première est le rehaussement du contraste des images par l'application d'une puissance deux et quatre aux pixels des angles et des ratios. L'effet recherché est d'accentuer les différences de valeurs de pixels entre les zones de nœuds et de bois sans nœud dans les cartographies d'angles et de ratios. La seconde est une opération entre images. La division des angles au carré par les ratios à la puissance quatre permet d'accentuer encore plus les différences de valeurs entre pixels dans les zones de nœuds et en dehors tout en prenant en compte les informations données par les deux cartographies (Figure 3.6.d). Les fibres de bois sans nœuds présentent la plus grande part des angles de faible valeur et des ratios élevés. Les indices n_{xy} résultant sont donc les plus petits. Au contraire, les zones de nœuds regroupent la grande majorité des valeurs d'angles élevées et de ratios faibles. Les indices n_{xy} résultant sont donc les plus grands. Cependant, c'est aussi le cas pour les mesures dans les rayons ligneux des débits sur quartier (cf. chapitre 2). Les fibres qui contournent les nœuds, ont des valeurs d'angles et de ratios élevées. La division de l'un par l'autre permet d'atténuer les valeurs de n_{xy} résultant et d'accentuer la délimitation des zones de nœuds.

$$n_{xy} = \frac{\alpha_{xy}^2}{r_{xy}^4} \quad (\text{équation 3.4})$$

b) Traitement d'image

- i. Lissage de la cartographie des indices de nodosité avec la fonction « *scipy.ndimage.uniform_filter* » de la librairie SciPy (Figure 3.7.b). Ces lissages ont pour but d'atténuer les valeurs de n_{xy} au niveau des rayons ligneux et d'uniformiser ces valeurs dans les zones de nœuds.
- ii. Binarisation de la cartographie des nœuds. Les valeurs de n_{xy} en dessous du seuil sont considérées comme du bois sans nœud et redéfinies égales à zéro. Les valeurs au-dessus du seuil sont redéfinies égales à un. Ce sont les zones nœuds (en noir sur la Figure 3.7.c).
- iii. Application d'une succession de fonctions de transformations morphologiques (ouverture et fermeture) avec la fonction « *cv2.morphologyEx* » et les méthodes « *cv2.MORPH_OPEN* » et « *cv2.MORPH_CLOSE* » (librairie OpenCV). Cela a pour effet de combler les trous blancs dans les zones de nœuds et de lisser les bords des nœuds (Figure 3.7.d) (Jehl, 2012, Blanc 2016).

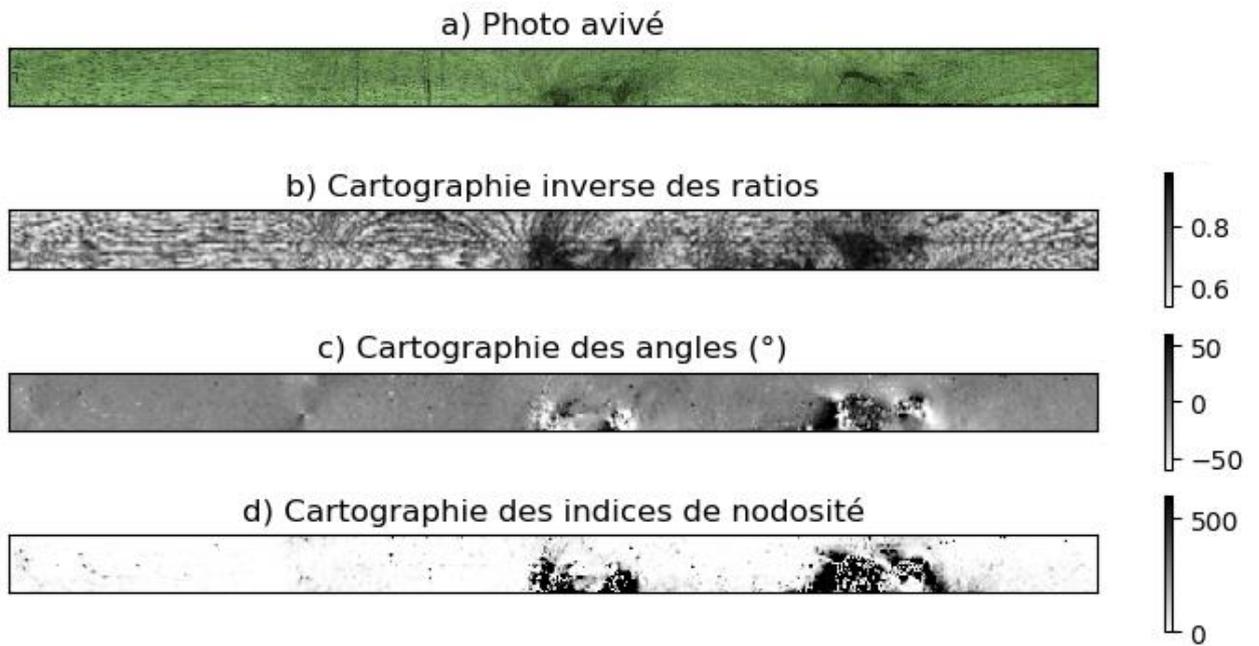


Figure 3.6 : Exemple d'une face d'avivé. a) Image de l'avivé ; b) Cartographie des inverse des ratios r_{xy} ; c) Cartographie des angles α_{xy} ($^{\circ}$) ; d) Cartographie des indices de nodosité n_{xy} ($^{\circ 2}$).

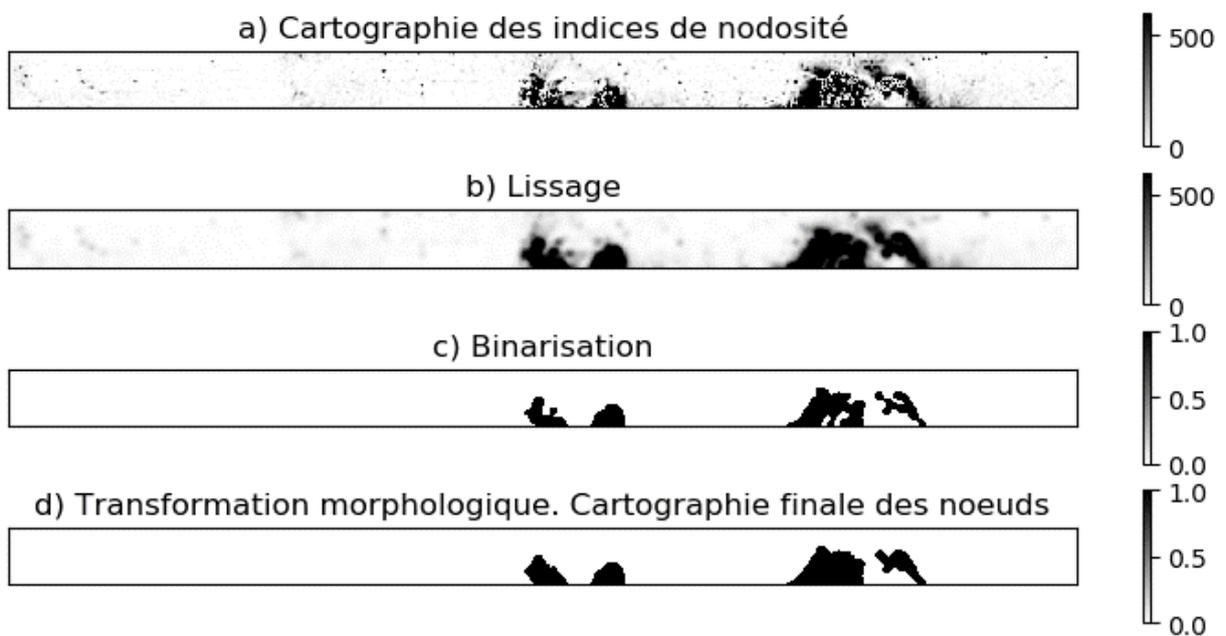


Figure 3.7 : a) Cartographie brute des noeuds n_{ij} ; b) Lissage des n_{ij} ; c) application d'un seuil de binarisation de 600 ; d) application de fonctions de transformations morphologiques donnant la cartographie finale des noeuds.

3.1.3. Lois de comportement mécaniques utilisées

Le séchage est ici considéré comme instantané, c'est-à-dire que les phénomènes de transfert de chaleur et de masse, la cinétique de séchage, le comportement mécanosorptif du bois (Saifouni 2014) ainsi que les phénomènes viscoélastiques ne sont pas pris en compte. Le séchage sera juste traduit par les variations dimensionnelles subies par les fibres du bois suite à la baisse instantanée de leur taux d'humidité. De ce fait, les propriétés mécaniques orthotropes du chêne utilisées dans cette étude sont les propriétés à 12 % d'humidité issues de Kretschmann (2010) et sont présentées dans le Tableau 3.2. Une étude de sensibilité du modèle par rapport à ces propriétés mécaniques est présentée au §5.2 de ce chapitre.

Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques du chêne retenues dans le modèle EF (Kretschmann, 2010).

E_L (GPa)	E_R (GPa)	E_T (GPa)	G_{LR} (GPa)	G_{LT} (GPa)	G_{TR} (GPa)	ν_{LR}	ν_{LT}	ν_{TR}
14,0	2,28	1,01	1,2	1,1	0,633	0,37	0,43	0,3

Les avivés sélectionnés pour cette étude ont été choisis de manière à représenter deux types de débits particuliers par rapport à l'orientation des cernes du bois : les débits sur dosse et sur quartier (Figure 3.8). La déformation du bois au séchage est en réalité un problème en trois dimensions (3D), à loi de comportement orthotrope, mais le choix de sélectionner des débits dans le plan tangentiel ($(LT)_{tronc}$, dosse) ou radial ($(LR)_{tronc}$, quartier) permet en première approche de se rapporter à un problème en deux dimensions (2D). Ainsi, le modèle EF a été abordé en 2D ce qui revient à éliminer une dimension dans la loi de comportement, comme dans le cas de l'isotropie transverse. Cette simplification en 2D est une première approche qui reste cependant efficace étant donné qu'une grande proportion des avivés utilisés en industrie, notamment par les Bois Profilés, est débitée sur dosse. L'originalité et la difficulté résident dans la prise en compte de l'ODF et des nœuds.

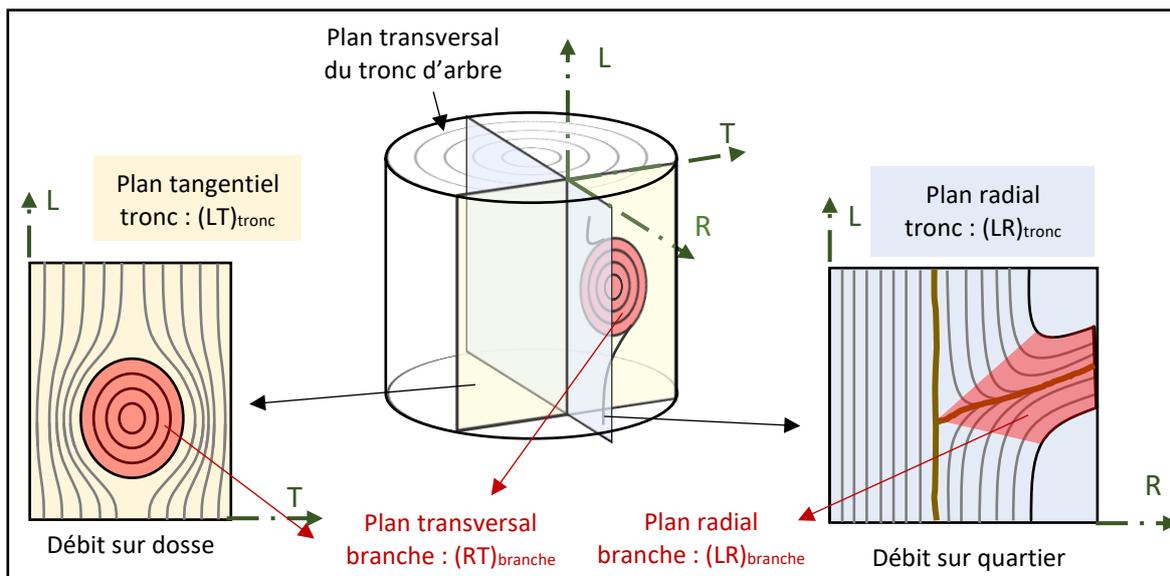


Figure 3.8 : Plans de symétrie orthotrope du tronc d'arbre et d'un nœud (représenté en rouge).

Le nœud est la partie d'une branche incrustée dans le tronc d'arbre. Les fibres de bois dans le nœud sont celles de la branche dont la direction longitudinale n'est pas celle du tronc. Ainsi, pour un avivé sur dosse, les fibres d'un nœud sont dans le plan transverse $(RT)_{branche}$ alors que les fibres de bois parfait sont dans le plan $(LT)_{tronc}$. Pour les avivés sur quartier, les fibres d'un nœud sont dans le plan $(LR)_{branche}$ et les fibres de bois parfait dans le plan $(LR)_{tronc}$.

Les zones de nœuds et de bois parfait des avivés ont été différenciées. Le Tableau 3.3 présente les propriétés appliquées aux fibres en fonction de ces zones pour les deux groupes d'avivés étudiés.

Tableau 3.3 : Paramètres mécaniques du modèle plan en fonction des débits. Les retraits $R_{T,i}$ et $R_{R,i}$ correspondent aux retraits transverses propres à chaque avivé. Voir les valeurs au Tableau 3.1.

Fibre	Avivé dosse		Avivé quartier	
	Bois parfait	Nœud	Bois parfait	Nœud
Module longitudinal fibre (GPa)	14,0		14,0	14,0
Module transverse fibre (GPa)	1,01	1,64	2,28	1,64
Module cisaillement fibre (GPa)	1,10	0,63	1,20	1,15
Coefficient poisson fibre	0,43	0,30	0,37	0,37
Retrait total longitudinal fibre	0,3 %		0,3 %	0,3 %
Retrait total transverse fibre	$R_{T,i}$	7,7 %	$R_{R,i}$	7,7 %

3.1.3.1. Propriétés dans le plan des fibres de bois parfait

Les éléments de bois parfait sont caractérisés par leur ODF, les propriétés matériau étant modifiées selon cet angle par rotation de la matrice de loi de comportement. Une loi de comportement isotrope transverse a été utilisée avec les propriétés mécaniques des fibres de bois parfait données dans le Tableau 3.3. La direction transversale (Tr) correspond à la direction tangentielle pour les avivés sur dosse et radiale pour les avivés sur quartier. Les coefficients de retrait ont également été recalculés par rotation de la matrice en fonction de l'ODF élément par élément, sur la base des retraits donnés dans le Tableau 3.1.

3.1.3.2. Propriétés dans le plan des fibres dans les nœuds

Les propriétés mécaniques des fibres dans les nœuds sont données dans le Tableau 3.3. Les zones dans lesquelles les fibres ont été associées à des nœuds ont été déterminées avec la méthode développée au §3.1.2 de ce chapitre. En fonction de des plans LT et LR, les nœuds sont modélisés différemment :

- Dans le cas d'avivés débités sur dosse, les nœuds sont dans le plan transversal (Figure 3.8). Dans le modèle, les éléments de bois dans ces nœuds ont été modélisés comme un matériau isotrope (Figure 3.10) de retrait R_N . Pour simplifier, l'orientation des cernes dans les nœuds n'a pas été prise en compte. De plus, l'hypothèse a été faite, pour le module d'élasticité transverse des fibres dans les nœuds, de prendre la moyenne entre les modules d'élasticité tangentiel et radial.
- Dans le cas d'avivés débités sur quartier, la direction longitudinale des nœuds apparaît. Le modèle retenu est alors celui d'un matériau isotrope transverse dépendant de leur ODF. Pour

le module d'élasticité transverse des fibres dans ces nœuds, la moyenne entre les modules tangentiel et radial a été retenue. La modélisation de ces nœuds est donc semblable à celle des éléments de bois parfait.

3.2. Maillage

Le modèle a été implémenté dans Cast3M (Cast3M 2019). Le modèle est plan et les éléments utilisés sont des quadrangles à 4 nœuds (QUA4) de 1 x 1 mm² (Figure 3.9). Chaque élément est défini comme étant du bois parfait ou un nœud, comme défini précédemment. Le maillage de l'avivé est régulier et est le même pour chacune des faces 1 et 2. Ainsi, pour chaque élément est défini une matrice de complaisance S dans le repère (L, Tr) de l'avivé (Figure 3.9) selon l'équation 3.5.

$$S = [T] \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{\mu_{TrL}}{E_{Tr}} & 0 \\ -\frac{\mu_{LTr}}{E_L} & \frac{1}{E_{Tr}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{G_{LTr}} \end{bmatrix} \cdot [T^{-1}] \quad (\text{équation 3.5})$$

Avec μ le coefficient de Poisson, E le module d'élasticité, G le module de cisaillement, Tr la direction transverse (tangentielle ou radiale selon les cas) et L la direction longitudinale. Les matrices $[T]$ et $[T^{-1}]$ sont les matrices de passage permettant de passer du repère de la fibre au repère (L, Tr) de l'avivé. Elles sont définies pour chaque élément par les équations 3.6 et 3.7.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_{xy} & \sin^2 \alpha_{xy} & 2 \cdot \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) \\ \sin^2 \alpha_{xy} & \cos^2 \alpha_{xy} & -2 \cdot \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) \\ -\cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) & \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) & \cos^2 \alpha_{xy} - \sin^2 \alpha_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.6})$$

$$[T^{-1}] = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha_{xy} & \sin^2 \alpha_{xy} & -2 \cdot \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) \\ \sin^2 \alpha_{xy} & \cos^2 \alpha_{xy} & 2 \cdot \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) \\ \cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) & -\cos(\alpha_{xy}) \cdot \sin(\alpha_{xy}) & \cos^2 \alpha_{xy} - \sin^2 \alpha_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{équation 3.7})$$

Avec α_{xy} la valeur locale d'ODF pour un élément donné.

Afin d'assurer l'isostatisme du système, l'avivé est considéré comme étant sur deux appuis simples sur chaque extrémité inférieure (Figure 3.9). Les conditions aux limites sont les suivantes : l'appui gauche est bloqué en déplacement dans la direction longitudinale et transversale, et l'appui droit uniquement dans la direction transversale. Ces conditions permettent une déformée libre du modèle.

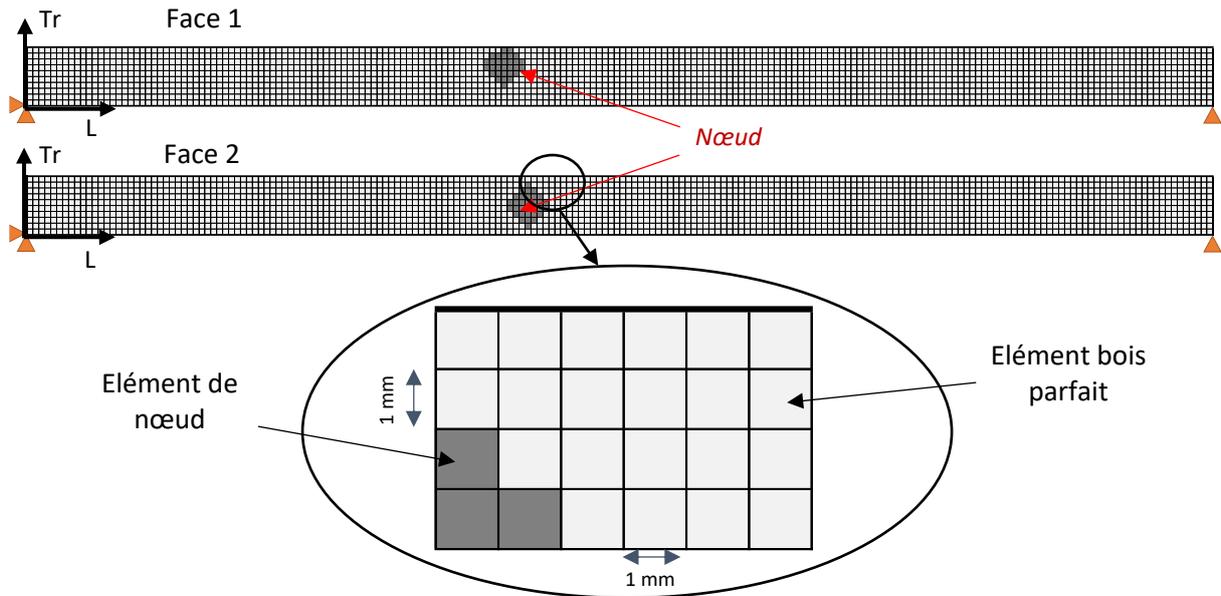


Figure 3.9 : Maillage et conditions aux limites du modèle éléments finis (blocages représentés par les triangles oranges).

3.3. Résolution

Le séchage est modélisé uniquement par la déformation linéaire due aux retraits (variant, pour rappel, en fonction de l'angle qui leur est associé) (Figure 3.10). Dans le modèle, cela revient à appliquer un chargement hydrique sous forme de variation de l'humidité du bois du PSF (31 %) (CIRAD) à l'humidité finale souhaitée du bois (cf. Tableau 3.1). Les déplacements $\varepsilon_{H\%}$ dus à ce chargement hydrique peuvent s'écrire selon l'équation 3.8.

$$[\varepsilon_{H\%}] = \begin{pmatrix} \varepsilon_{L,H\%} \\ \varepsilon_{Tr,H\%} \\ 0 \end{pmatrix} = [T^{-1}] \cdot \begin{pmatrix} R_L \\ R_{Tr} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \Delta H \quad (\text{équation 3.8})$$

L'application des retraits R_L et R_{Tr} en fonction de l'angle de fibre qui diffère d'un élément à l'autre et du type de bois (parfait ou nœud) crée un champ de force $[F_{H\%}]$ déterminé par l'équation 3.9.

$$[F_{H\%}] = \int_{\text{Surface avivé}} [\Phi]^T \cdot [\sigma_{H\%}] \cdot dS \quad (\text{équation 3.9})$$

Avec Φ la fonction d'interpolation de l'élément choisi, linéaire dans ce cas (QUA4 dans Cast3M).

La définition du maillage et des propriétés matériaux de chaque élément ont été faites séparément pour les deux faces des avivés. Cela permet de prendre en considération le fait que l'ODF et la position des nœuds diffèrent d'une face à l'autre. Pour résoudre un unique problème plan, la rigidité équivalente et le chant de force équivalent de l'avivé ont été définis respectivement comme la somme des rigidités et des chants de forces des faces 1 et 2. Le principe fondamental de la statique permet d'obtenir la relation suivante (équation 3.10) :

$$[F_{méca}] + [F_{H\% \text{ Face } 1}] + [F_{H\% \text{ Face } 2}] = ([K_{\text{Face } 1}] + [K_{\text{face } 2}]) \cdot [u] \quad (\text{équation 3.10})$$

Avec $[K]$ la matrice de rigidité et $[u]$ les déplacements.

Une résolution linéaire de l'équation ci-dessus permet de calculer les déplacements $[u]$. La position finale des bords donne la déformation globale de l'avivé, modélisant ainsi le voilement longitudinal de rive généré par le séchage.

Schématisation du modèle

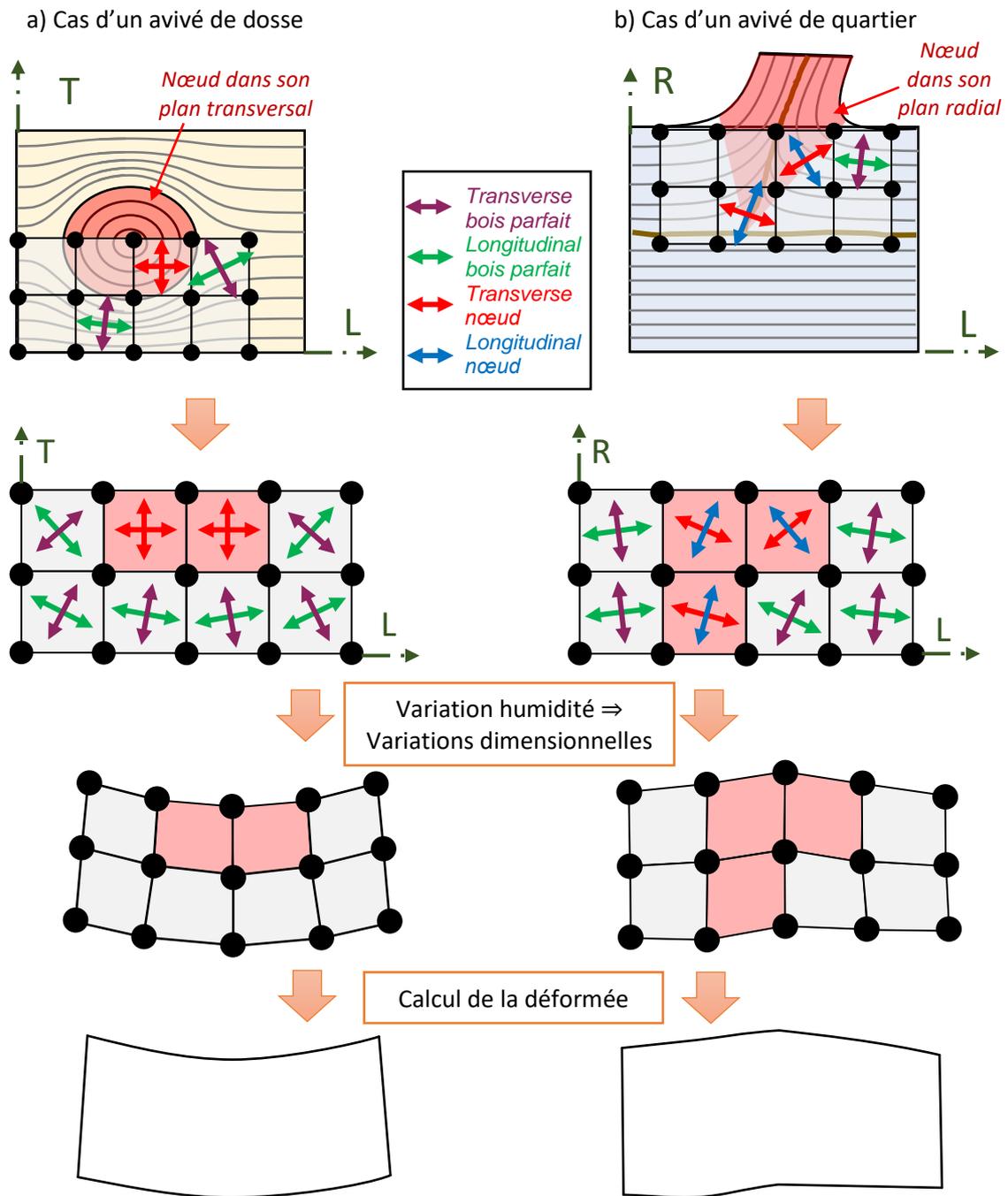


Figure 3.10 : Schématisation du modèle de déformation ; a) Cas d'un avivé sur dosse ; b) Cas d'un avivé sur quartier.

3.4. Quantification de la déformation

De même que pour la mesure expérimentale du voilement longitudinal de rive, la déformation prédite correspond à la position des bords de l'avivé après résolution du modèle, à la différence près que le modèle donne directement la déformation d'une face équivalente de l'avivé. La flèche de rive prédite $f_p(x)$ le long de l'avivé et la flèche maximale $f_{p,max}$ correspondante sont définies conformément au §2.4.1 (p.80) de ce chapitre.

3.5. Validation du modèle

Pour valider le modèle, quelques cas simples ont été simulés avec des avivés de longueur 2 000 mm et de largeur 100 mm. Les propriétés mécaniques retenues sont celles des avivés sur dosse (Tableau 3.3), la valeur de retrait transverse est de 9,7 % pour le bois parfait et de 8,5 % pour le bois de nœud et les humidités de départ et finale sont respectivement de 31 % (PSF) et de 8 %, soit une variation de 23 %.

- a) **Avivé sans nœud et d'ODF constante** (Figure 3.11). L'application du modèle de déformations au séchage sur des avivés d'ODF constante ne fait pas apparaître de flèche de rive. Ce résultat n'est pas surprenant car tous les éléments du modèle EF sont identiques. Seule la largeur finale varie en fonction de la valeur de l'ODF. A noter que la largeur pour le cas d'ODF nulle (Figure 3.11.a) est bien celle correspondant à une diminution de la largeur de 9,7 % pour une variation d'humidité de 23 %.

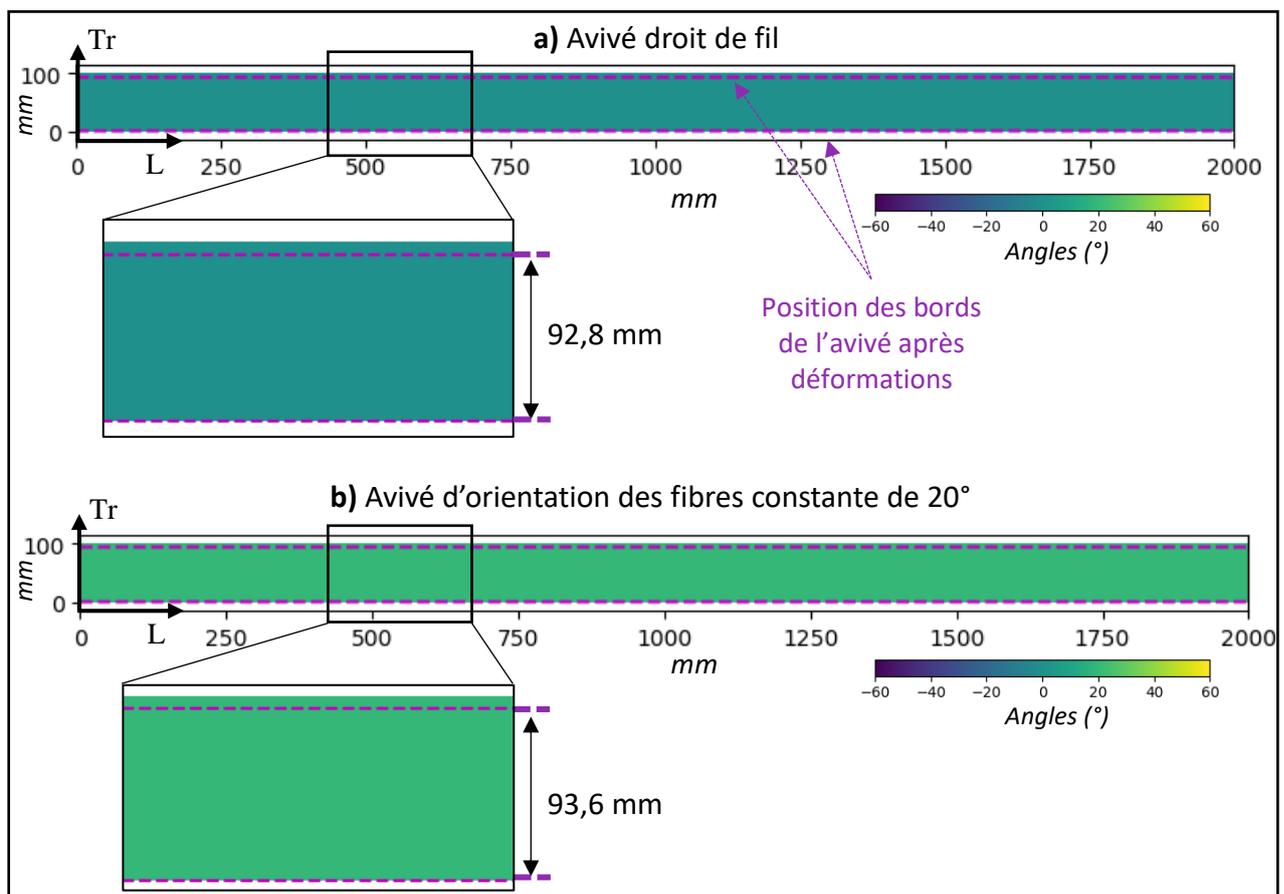


Figure 3.11 : Etude des déformations données par le modèle EF : a) Avivé d'ODF constante de 0° ; b) Avivé d'ODF constante de 20°.

Pour chacun des cas ci-dessous, l'ODF des avivés a été générée avec un modèle de Rankine-Foley (Foley, 2003), dit « Ovale de Rankine », en faisant l'analogie entre l'écoulement d'un fluide incompressible autour d'un obstacle avec l'ODF autour d'un nœud.

- b) **Avivé de dosse ayant un nœud centré dans la largeur.** L'ODF donnée par le modèle de Rankine-Foley est telle que son profil est identique, au signe près, entre la partie supérieure et inférieure du nœud. Cette symétrie d'ODF fait que les efforts générés par le retrait des fibres se compensent, et donc qu'aucune flèche de rive prononcée n'apparaît. Dans cet exemple (Figure 3.12) la flèche maximale de rive $f_{p,max}$ vaut 0,1 mm. La réduction de la largeur est, quant à elle, bien observée.

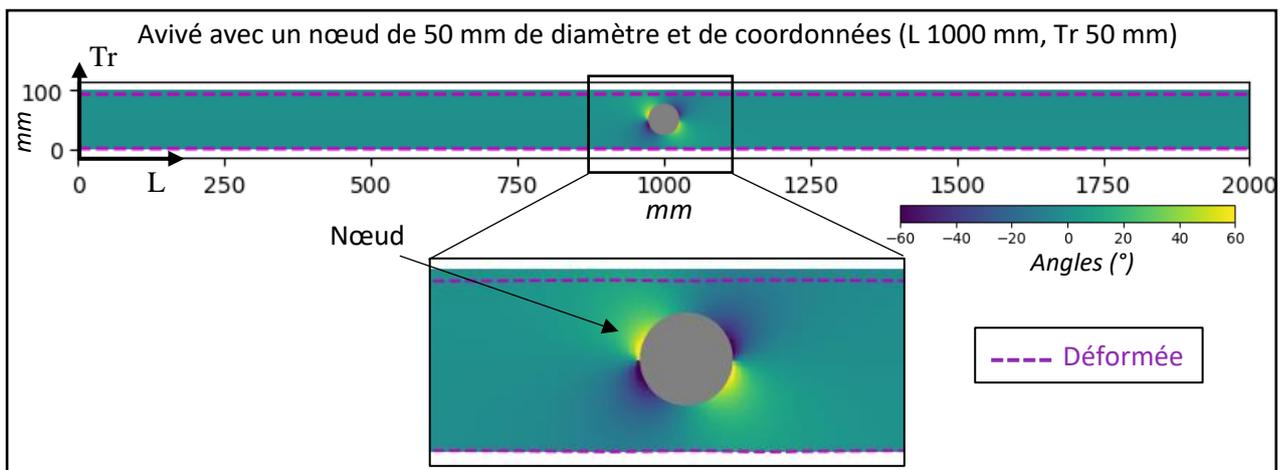


Figure 3.12 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec un nœud centré dans la largeur.

- c) **Avivé de dosse ayant un nœud excentré dans sa largeur.** Le voilement longitudinal de rive résultant du modèle EF montre que l'avivé se tord autour du nœud. Pour l'exemple de la Figure 3.13, la flèche maximale $f_{p,max}$ vaut 23,8 mm.

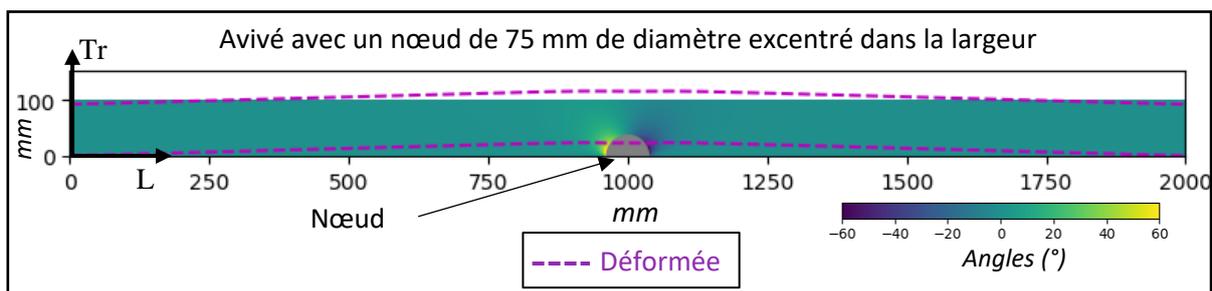


Figure 3.13 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec un nœud excentré.

- d) **Avivé de dosse avec plusieurs nœuds** (Figure 3.14). Pour ce cas, la flèche maximale $f_{p,max}$ vaut 5,1 mm. Il est intéressant de remarquer que cet avivé qui a plus de nœuds que celui de la Figure 3.13 a une amplitude de déformation plus faible, selon les résultats du modèle EF. Il y a là un phénomène de compensation des contraintes générées par les différents nœuds du fait de leur position dans l'avivé.

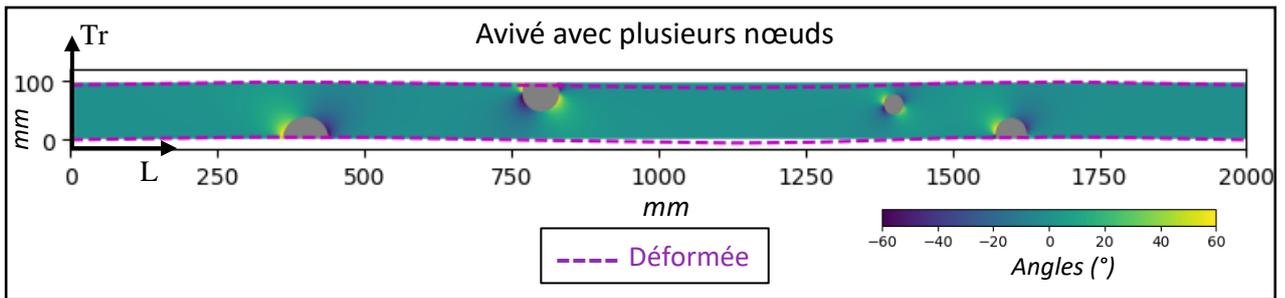


Figure 3.14 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec plusieurs nœuds.

Ces études de cas théoriques montrent que :

- Les variations d'ODF dans un avivé influent sur la largeur après séchage.
- L'amplitude de la flèche de rive est très sensible à la position des nœuds dans un avivé.
- Un grand nombre de nœuds, selon leur répartition, ne donne pas automatiquement une flèche de rive élevée (phénomène de compensation).

3.6. Définition du retrait transverse des nœuds de chêne

Pour les avivés sur dosse, les nœuds, étant modélisés comme un matériau isotrope, se comportent comme des charnières autour desquelles le bois se déforme, et ce d'autant plus que le nœud a un diamètre important et est proche des rives. Ce phénomène est très bien mis en évidence sur la Figure 3.15.c-d-e : l'amplitude de la flèche prédite augmente à mesure que le retrait transverse R_N dans le nœud augmente. Pour cet avivé, le retrait R_N de 7,7 % permet la prédiction la plus proche de la réalité avec un RMSE (cf. §4.1 de ce chapitre) de seulement 0,5 mm. En absence de valeur pertinente dans la littérature, le retrait des nœuds de chêne a par conséquent été fixé à 7,7 %, valeur optimale pour cet avivé dont la corrélation entre flèches prédite et réelle est la meilleure de l'échantillonnage testé (cf. §4 de ce chapitre).

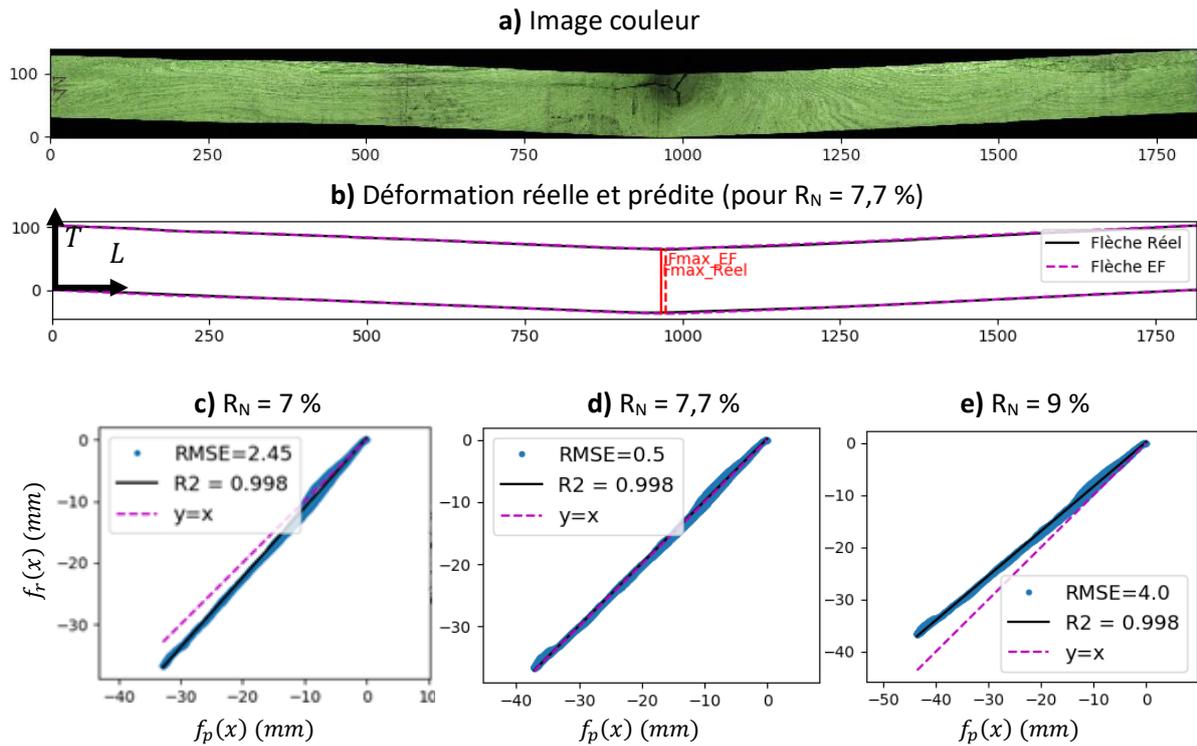


Figure 3.15 : Déformations réelle et prédite (avivé 11, dosse).

4. Confrontation du modèle aux valeurs expérimentales

La Figure 3.16 et la Figure 3.17 donnent des exemples de déformations prédites par le modèle EF en comparaison avec les déformations réelles mesurées pour un avivé en débit sur quartier et un avivé en débit sur dosse. Des figures identiques pour les autres avivés étudiés sont disponibles en Annexe.

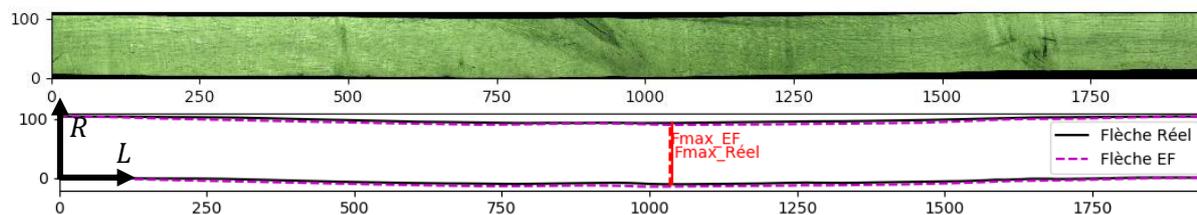


Figure 3.16 : Exemple d'un avivé sur quartier (réf. 04). En haut : image couleur de l'avivé sec. En bas : superposition de la déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).

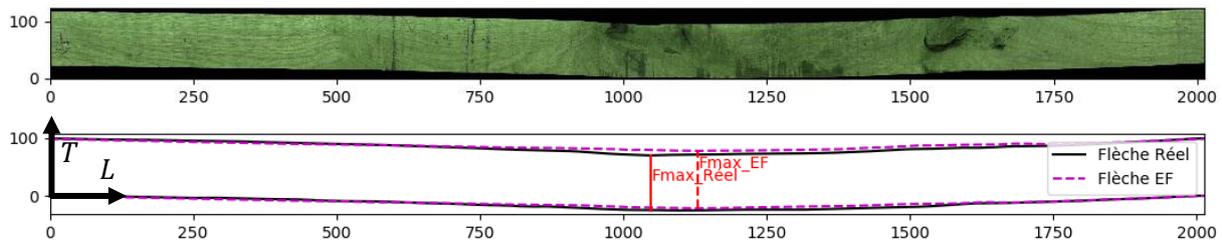


Figure 3.17 : Exemple d'un avivé sur dosse (réf. 17). En haut : image couleur de l'avivé sec. En bas : superposition de la déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).

4.1. Indicateurs de performance

Par avivé, il est possible de calculer trois indicateurs pour qualifier la prédiction des déformations.

- Le coefficient de détermination R^2 de la régression linéaire au sens des moindres carrés entre la flèche de rive prédite $f_p(x)$ et la flèche de rive réelle $f_r(x)$ le long de l'avivé. Il permet d'apprécier si la forme globale de la déformée est bien prédite. Dans le Tableau 3.4, l'astérisque suivant certaines valeurs de R^2 indique que la pente de la droite de régression est négative. Théoriquement, dans la situation présente, cela indiquerait que le modèle donne une courbure globale opposée à la réalité. Pour les faibles valeurs de R^2 , cela serait juste le fait de l'absence de corrélation.
- Le RMSE entre la flèche de rive prédite $f_p(x)$ et la flèche de rive réelle $f_r(x)$ (équation 3.11). Cette valeur permet de quantifier l'erreur de prédiction de la flèche le long de l'avivé.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{x=1}^N (f_p(x) - f_r(x))^2} \quad (\text{équation 3.11})$$

- L'écart δ_f (équation 3.12) entre les flèches de rive maximale prédite $f_{p,max}$ et réelle $f_{r,max}$ est un indicateur de l'erreur de prédiction de l'amplitude des déformations. Si δ_f est positif, le modèle prédit une déformation plus importante que la réalité, et si δ_f est négatif, une déformation moins grande.

$$\delta_f = |f_{p,max}| - |f_{r,max}| \quad (\text{équation 3.12})$$

Les résultats de ces indicateurs sont présentés par avivé dans le Tableau 3.4.

Tableau 3.4 : Flèches de rive réelle et prédite avec le modèle éléments finis. Indicateurs de performance du modèle. L'astérisque suivant certaines valeurs de R^2 indique que le coefficient directeur de la droite de corrélation est négatif.

Référence Avivé	Débit	$f_{r,max}$ (mm)	$f_{p,max}$ (mm)	R^2	RMSE	δ_f (mm)
01	Quartier	-6,6	2,6	0,69*	5,3	-4,0
02	Quartier	7,8	7,8	0,87	1,0	0,0
03	Quartier	-8,4	-2,4	0,02*	4,9	-6,1
04	Quartier	-11,1	-14,9	0,97	3,4	3,8
05	Dosse	1,2	2,8	0,16	1,3	1,6
06	Dosse	-1,6	-0,9	0,74	0,4	-0,7
07	Dosse	11,0	8,5	0,96	1,7	-2,5
08	Dosse	-10,5	-9,8	0,95	0,7	-0,7
09	Dosse	-2,8	-5,8	0,13	3,1	3,0
10	Dosse	-11,2	32,4	0,14	23,6	21,3
11	Dosse	-36,7	-37,1	1,00	0,5	0,5
12	Dosse	4,5	9,2	0,55	3,2	4,8
13	Dosse	8,5	-8,3	0,13*	9,9	-0,2
14	Dosse	11,5	12,0	0,94	1,0	0,4
15	Dosse	-7,0	3,0	0,69*	6,1	-4,0
16	Dosse	-16,7	-14,3	0,95	1,7	-2,4
17	Dosse	-27,3	-21,4	0,97	3,7	-5,9
18	Dosse	7,4	-8,6	0,74	4,9	1,2
19	Dosse	6,1	4,7	0,93	1,5	-1,4

4.2. Fidélité de la forme du profil prédit

La moitié des avivés testés ont un R^2 supérieur à 0,8, ce qui donne une très bonne corrélation entre la prédiction et les mesures. Huit de ces neuf avivés ont même une R^2 de plus de 0,9 (Tableau 3.4). Trois autres avivés offrent une corrélation satisfaisante avec un R^2 supérieur à 0,5 et une droite de régression de pente positive. Ainsi, pour 63 % des avivés testés, la forme de la déformation au séchage donnée par le modèle est fidèle à la réalité. Cela montre aussi que l'ODF de l'avivé est bien un paramètre déterminant des déformations au séchage.

Deux avivés, le 01 et le 15, ont un bon R^2 mais une droite de régression de pente négative. Théoriquement, cela indiquerait que le modèle donne une courbure globale opposée à la réalité, la forme du voilement étant, en absolu, bien prédite. Or, les faibles flèches de rive maximales prédites, de valeurs respectives 2,6 mm et 3 mm, indiquent que l'influence de l'ODF sur les déformations finales après séchage est, pour ces avivés, faible et qu'un autre phénomène est prédominant. Ce serait alors probablement un hasard si le R^2 vaut 0,69 pour ces deux avivés.

Pour l'avivé 10, la très grande flèche de rive maximale prédite (de l'ordre de 3 fois plus grande que la réalité) est causée par la présence d'une grande zone complexe de nœuds difficilement modélisable par les simples informations d'ODF et des valeurs de retrait. Il est très probable que les paramètres mécaniques attribués aux nœuds dans cette étude ne s'appliquent pas à ce cas singulier, et que la forme du nœud issue de la détection automatique est éloignée de la réalité (Figure 3.18). De plus, dans

une telle zone noueuse, l'influence de la densité et des contraintes internes doit être importante pendant le séchage. Or le présent modèle EF ne prend pas en compte ces paramètres.

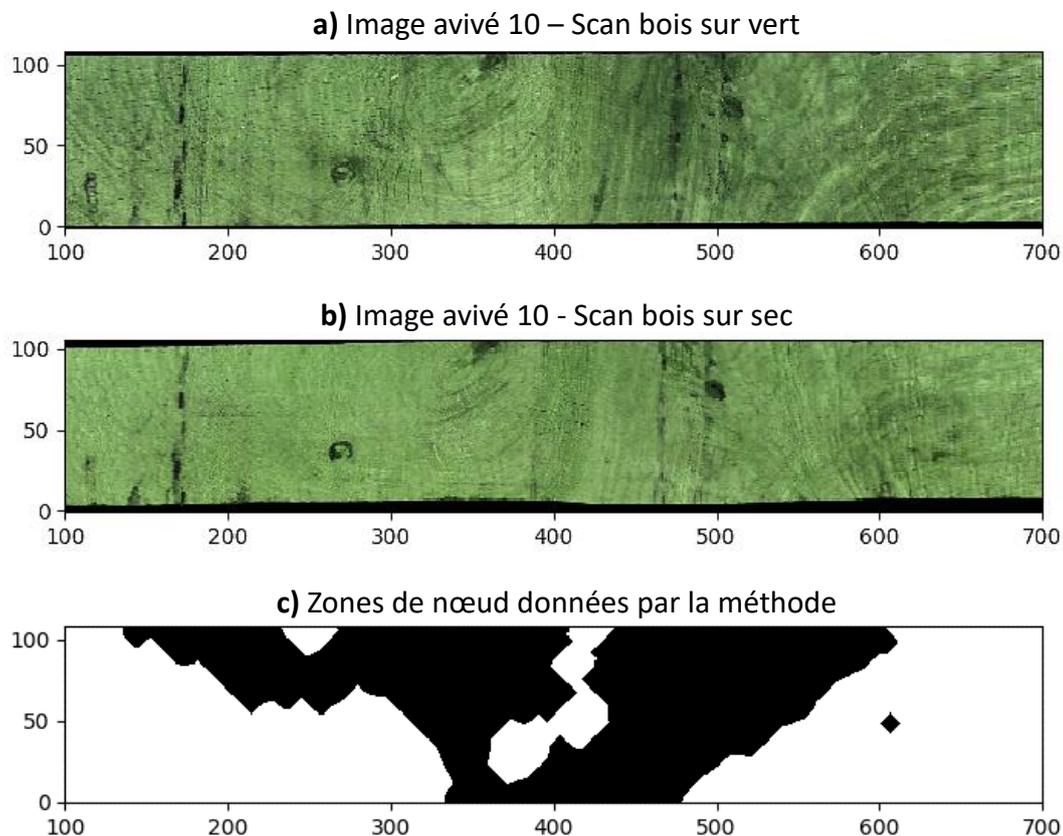


Figure 3.18 : Focus sur la zone noueuse complexe de l'avivé 10 ; a) image bois vert, b) image bois sec, c) résultat de la détection de nœud.

Enfin, pour les avivés dont les R^2 sont faibles, le modèle EF ne permet donc pas de prédire les déformations au séchage avec la simple information de l'ODF. Pour ces avivés, d'autres phénomènes, comme la présence importante de bois de réaction par exemple, ont très certainement été prépondérant face aux variations d'ODF dans les avivés.

4.3. Erreur de prédiction

Pour rappel, les déformations d'un avivé après séchage sont problématiques pour la première opération de rabotage pour deux raisons principales. La première est que l'avivé se coince dans la machine si ses déformations sont trop importantes. La seconde est, dans le cas où la machine absorbe bien l'avivé, la présence de manques de rabotage sur les faces et rives. Cela est dû au fait que la profondeur des passes de rabotage n'a pas été suffisante pour corriger les défauts de rectitude de l'avivé (cf. chapitre 1). Ainsi, en application industrielle, un système de prédiction des déformations au séchage sera jugé sur sa capacité à anticiper ces deux problématiques.

Ce qui est pratiqué actuellement par les Bois Profilés, c'est de réduire la largeur des courçons de bois de 4 mm, ce qui équivaut à une profondeur de passe de rabotage de 2 mm en moyenne sur chaque rive. Cette faible passe est possible car les courçons rabotés sont de longueur inférieure à 90 cm (40 cm

en moyenne). Mais lors du rabotage d'avivés de grande longueur (1,5 m et plus), c'est plutôt une surcote de 10 à 20 mm en largeur qui est pratiqué, soit une profondeur de passe de rabotage de 5 à 10 mm. En moyenne, il est constaté que la sur-largeur appliquée vaut environ 1 % de la longueur. Ainsi, l'erreur de prédiction des déformations (RMSE) peut être vue comme acceptable tant qu'elle est inférieure à la profondeur de passe de rabotage sur une rive.

Le RMSE de la flèche de rive est inférieure à 2 mm pour presque la moitié des avivés, et est entre 2 et 5 mm pour six autres avivés (Tableau 3.4). Il reste donc quatre avivés dont le RMSE est supérieur à 5 mm.

4.4. Prédiction de l'amplitude des déformations

Les écarts δ_f entre flèches prédite et réelle de chaque avivé indiquent que le modèle a bien estimé l'amplitude des déformations pour six avivés ($-1 < \delta_f < 1$ mm). La flèche de rive maximale a été surestimée pour six avivés et sous-estimée pour sept avivés. Le RMSE entre $f_{r,max}$ et $f_{p,max}$ est de 5,7 mm (avec un R^2 de 0,65, Figure 3.19), mais n'est plus que de 3,1 mm en écartant l'avivé 10 (avec un R^2 de 0,88). Globalement, le modèle estime la flèche de rive maximale avec une erreur moyenne de 3,1 mm, ce qui est une erreur acceptable par rapport à une surcote de 20 mm laissée pour le rabotage d'avivés de longueur 2 m.

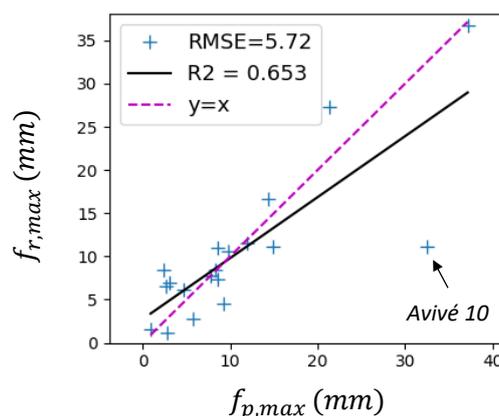


Figure 3.19 : Corrélation entre les flèches de rives maximales prédites et réelles.

4.5. Classement des avivés par la flèche de rive

La prédiction de la flèche de rive maximale $f_{p,max}$ est une information globale du voilement longitudinal de rive de l'avivé qui peut être rapidement exploitée en situation industrielle. Il est important de pouvoir anticiper les déformations importantes de l'avivé qui nécessiteront, après séchage, une opération de tronçonnage avant celle de rabotage. Cela peut se réduire à prédire les déformations de séchage et déterminer quels sont les avivés à tronçonner en fonction d'un seuil de flèche maximale afin que les flèches de rives soient inférieures aux profondeurs de passe de rabotage. Par le fait même du tronçonnage de l'avivé, les flèches de rives maximales des courçons sont systématiquement plus faibles. La Figure 3.20 montre deux scénarios de rabotage, le premier avec des seuils à 5 mm pour du rabotage d'avivés de 1 m et le second avec un seuil à 2 mm pour du rabotage de courçons de longueur moyenne de 50 cm.

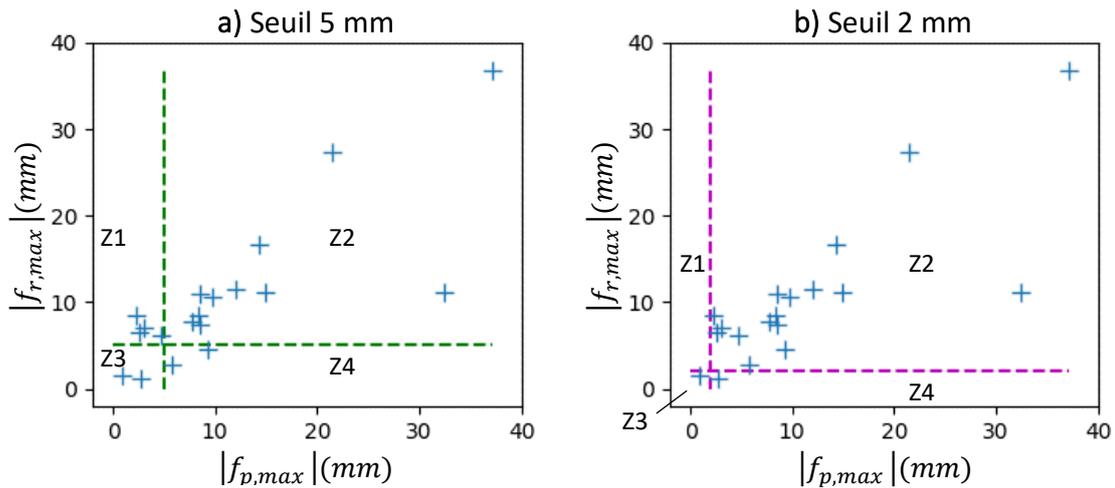


Figure 3.20 : Scénarios de prédiction de la flèche de rive maximale. Les droites en pointillés représentent les valeurs des seuils.

Un calcul de justesse permet de qualifier le modèle de déformations. La justesse est définie ici comme le rapport entre le nombre d'avivés dont les flèches de rives maximales ont bien été prédites par rapport au seuil (Zones Z2 et Z3 sur la Figure 3.20) et le nombre d'avivé total.

Ainsi, pour les seuils à 5 mm et 2 mm, la justesse est respectivement de 68 % et 94 %. Il est intéressant de noter que tous les avivés ayant une flèche maximale supérieure à 2 mm ont été détectés. En revanche, le modèle a détecté seulement 79 % des avivés dont la flèche maximale est supérieure à 5 mm. Ces résultats donnent une bonne indication sur la performance du modèle de déformation pour détecter la flèche de rive maximale. Cependant, une étude sur un plus grand échantillonnage est nécessaire pour confirmer la robustesse de ces observations.

5. Influence des propriétés du bois et sensibilité du modèle

Différentes simulations, référencées dans le Tableau 3.5, ont été effectuées pour tester l'influence de la valeur du retrait du bois et des nœuds et du module d'élasticité des fibres sur la sensibilité du modèle. En effet, les résultats ci-dessus ont été obtenus en connaissance des débits des planches et du retrait mesuré dans la largeur (simulation $S_{étude}$). En situation de production industrielle, il est compliqué de connaître précisément le débit et la valeur réelle du retrait de chaque avivé (simulation S_{indus}). Cependant, les avivés issus des productions actuelles de Ducerf Scierie étant majoritairement débités sur dosse, le cas de ceux sur quartier ne sera pas étudié dans ce paragraphe. Le retrait des avivés devant être fixe, le choix a été fait de prendre la valeur de 9,7 % pour le retrait tangentiel (CIRAD). Cette valeur est conservée pour les cinq simulations restantes qui testent l'influence des propriétés mécaniques du bois (simulations $S_{MOE 12}$ et $S_{MOE 16}$, le module d'élasticité transversal et le module de cisaillement étant recalculés en fonction du module d'élasticité longitudinal) ainsi que de la valeur du retrait attribué aux éléments de nœud (simulations $S_{RN 7}$, $S_{RN 9}$ et $S_{RN 10}$).

Tableau 3.5 : Liste des différentes simulations avec les paramètres propres à chacune

Simulation	Retrait total bois sans nœud	Retrait total nœud	$E_{L \text{ Fibre}}$ (GPa)	$E_{Tr \text{ Fibre}}$ (GPa)	$G_{LTr \text{ Fibre}}$ (GPa)
$S_{étude}$	$R_{avivé}$	7,7 %	14	1,01	1,10
S_{indus}	9,7 %	7,7 %	14	1,01	1,10
$S_{E 12}$	9,7 %	7,7 %	12	0,86	0,94
$S_{E 16}$	9,7 %	7,7 %	16	1,15	1,26
$S_{RN 7}$	9,7 %	7 %	14	1,01	1,10
$S_{RN 9}$	9,7 %	9 %	14	1,01	1,10
$S_{RN 10}$	9,7 %	10 %	14	1,01	1,10

5.1. Influence du retrait du bois

L'influence du retrait total en largeur des fibres du bois est étudiée en comparant les simulations $S_{étude}$, dont les résultats ont été présentés au §4 de ce chapitre, et S_{indus} prenant en compte un unique retrait tangentiel de 9,7 % pour tous les avivés (Tableau 3.5). Les graphiques de la Figure 3.21 représentent les écarts $\Delta_{R^2 indus}$, $\Delta_{RMSE indus}$ et $\Delta_{f indus}$ pour chaque avivé de dosse entre, respectivement, les R^2 , RMSE et $f_{p,max}$ de S_{indus} et ceux de $S_{étude}$ (équations 3.13, 3.14 et 3.15).

$$\Delta_{R^2 indus} = R^2(S_{indus}) - R^2(S_{étude}) \quad (\text{équation 3.13})$$

$$\Delta_{RMSE indus} = RMSE(S_{indus}) - RMSE(S_{étude}) \quad (\text{équation 3.14})$$

$$\Delta_{f indus} = f_{p,max}(S_{indus}) - f_{p,max}(S_{étude}) \quad (\text{équation 3.15})$$

La valeur moyenne de chacun de ces écarts, représentée par une ligne horizontale en pointillés, est proche de zéro. L'application de la même valeur de retrait tangentiel pour tous les avivés a eu une incidence pour quelques avivés, principalement ceux dont le retrait réel est le plus éloigné de 9,7 %. Les résultats avec cette unique valeur de retrait restent satisfaisants et montrent que le modèle est robuste.

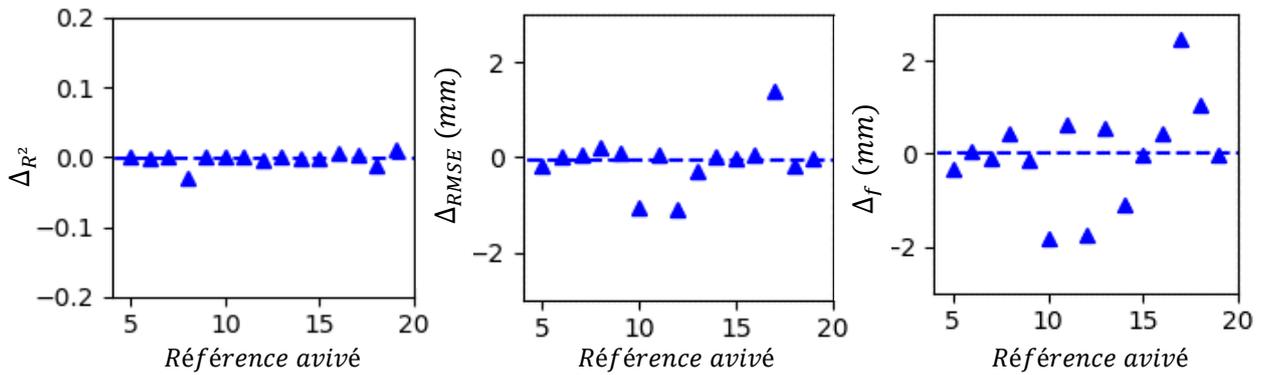


Figure 3.21 : Comparaison de $S_{étude}$ et S_{indus} : Δ_{R^2} , Δ_{RMSE} et Δ_f pour chaque avivé. Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.

5.2. Influence des propriétés mécaniques

Pour quantifier l'influence des valeurs des propriétés mécaniques, les simulations S_{E12} et S_{E16} ont été comparées à la simulation S_{indus} . Les valeurs du module d'élasticité transversal et du module de cisaillement ont été adaptées proportionnellement à celles de S_{indus} .

L'influence de ces variations de propriétés mécaniques (E_L de 12 à 16 GPa) est quasi nulle sur les valeurs de R^2 et très légère sur les RMSE et sur les flèches de rive prédites maximales (Figure 3.22).

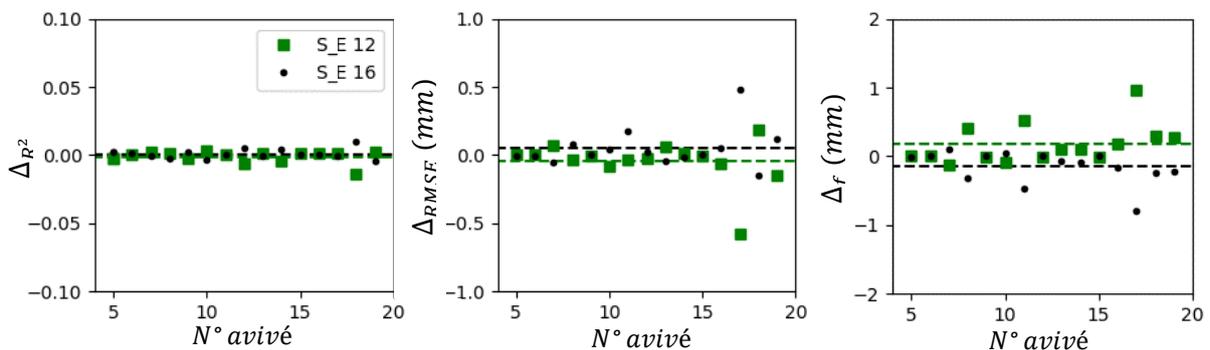


Figure 3.22 : Ecarts Δ_{R^2} , Δ_{RMSE} et Δ_f par avivé entre S_{E12} et S_{indus} et entre S_{E16} et S_{indus} . Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.

5.3. Influence de la valeur du retrait dans le nœud

Pour quantifier l'influence de la valeur du retrait dans les nœuds, les simulations S_{RN7} , S_{RN9} et S_{RN10} ont été comparées à la simulation S_{indus} . Seules les valeurs de retrait dans les nœuds diffèrent entre ces quatre simulations (Figure 3.23).

Pour certains avivés, les écarts de R^2 sont plus conséquents que pour les simulations précédemment étudiées. L'augmentation du retrait dans les nœuds améliore le R^2 pour l'avivé 08 ($R^2(S_{RN7}) = 0,91$ et $R^2(S_{RN10}) = 0,95$) tandis que c'est l'inverse qui est constaté pour l'avivé 18 ($R^2(S_{RN7}) = 0,74$ et $R^2(S_{RN10}) = 0,68$). Ces variations sont néanmoins faibles et globalement, la fidélité de la forme du profil prédit reste stable pour l'ensemble des avivés testés.

La variation du retrait dans les nœuds a plus l'impact sur l'amplitude de la flèche de rive. En effet, les nœuds des avivés de dosse, modélisés comme un matériau isotrope, se compriment plus ou moins selon la valeur du retrait qui leur est attribué, générant ainsi des déformations plus ou moins grandes. « L'effet charnière » est donc plus prononcé pour une valeur de retrait élevée dans les nœuds.

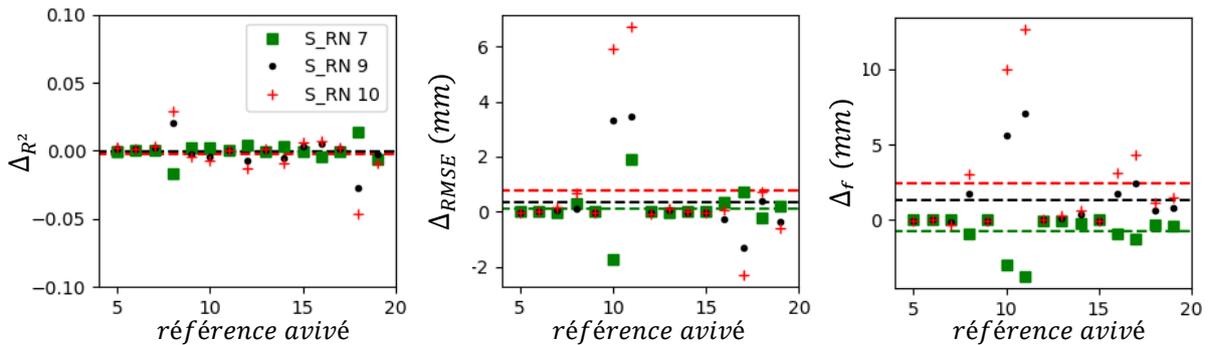


Figure 3.23 : Ecart Δ_{R^2} , Δ_{RMSE} et Δ_f entre $S_{RN 7}$ et S_{indus} , entre $S_{RN 9}$ et S_{indus} et entre $S_{RN 10}$ et S_{indus} .
Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.

Ces résultats et ceux de la Figure 3.24 manifestent bien que, comme attendu, ce sont les avivés avec les plus gros nœuds qui sont impactés par le changement de la valeur du retrait des nœuds. Les variations de prédiction de la flèche de rive s'observent principalement pour les grandes déformations (avivés 10, 11, 16, 17).

Au sujet de l'avivé 11, une fente dans le nœud est observable. Elle est apparue pendant le séchage et a réduit l'amplitude de la déformation (relaxation de contraintes internes). Il est certain que si le nœud ne s'était pas fendu, la flèche de rive réelle se serait rapprochée des 50 mm prédits par la simulation $S_{RN 10}$. L'exemple de l'avivé 16 qui lui est semblable mais sans fente dans le nœud montre que le modèle avec un retrait dans le nœud de 10 % donne une flèche de rive prédite égale à la flèche de rive réelle. Pour l'avivé 17, c'est aussi pour un retrait de 10 % dans le nœud que la prédiction est la plus proche de la mesure expérimentale.

Ainsi, un retrait dans les nœuds de 10 % semble être une valeur plus adaptée pour prédire le voilement longitudinal de rive et permet d'être sécuritaire. En effet, cette valeur correspond mieux au cas des nœuds excentrés dans la largeur et sans fente après séchage, cas donnant les plus grandes flèches de rive. Et si un nœud présente une fente après séchage, l'amplitude prédite sera plus élevée qu'en réalité, ce qui est plus sécuritaire que de prédire une flèche de rive plus faible qu'en réalité.

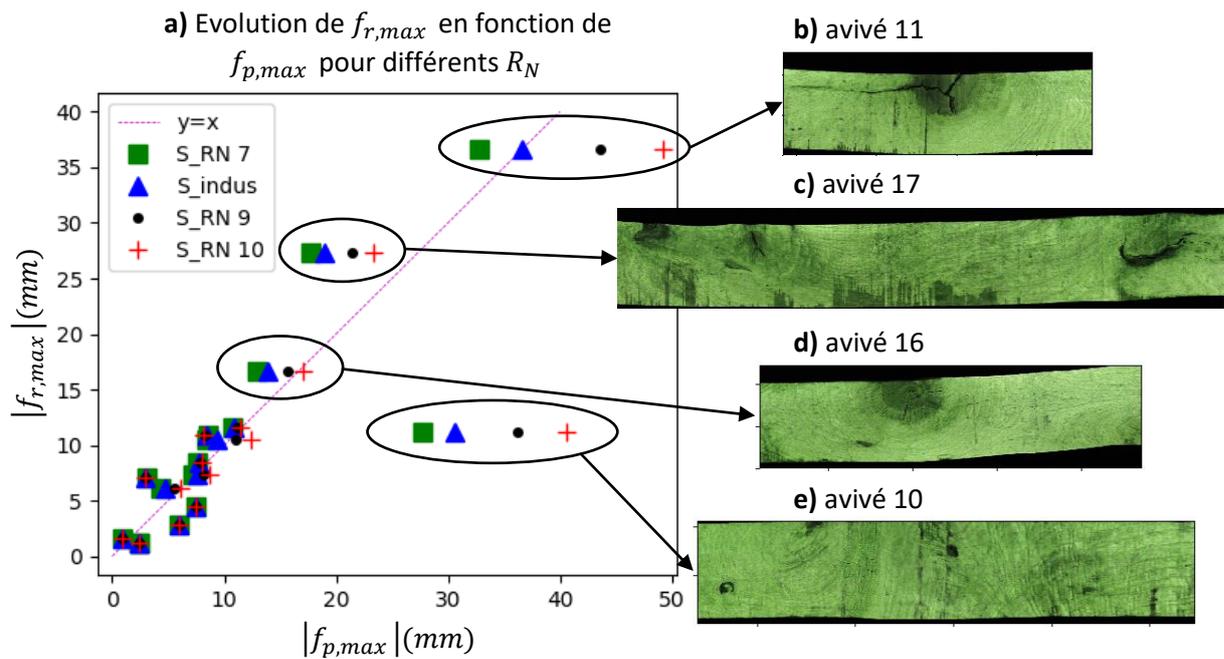


Figure 3.24 : a) Flèche de rive réelle en fonction de la prédite pour les cas où le retrait dans le nœud est égal à 7 %, 7,7 % (S_{indus}), 9 % et 10 %. Zoom sur les défauts principaux qui sont aussi les lieux de la flèche maximale pour : b) avivé 11 (nœud proche d'une rive fendu après séchage) ; c) avivé 17 (plusieurs nœuds) ; d) avivé 16 (nœud proche d'une rive non fendu après séchage) ; e) avivé 10 (grosse zone de nœud).

6. Conclusion

Dans ce chapitre une méthode de modélisation par la méthode des éléments finis du voilement longitudinal de rive à partir de la mesure de l'ODF sur bois vert a été développée. La prise en compte de l'ODF locale permet de traduire les différences de retraits d'un élément à un autre et ainsi de modéliser des contraintes internes de séchage générant des déformations.

Les premiers résultats obtenus sont encourageants et montrent qu'il est possible de modéliser convenablement les déformations au séchage dans le plan d'un avivé de chêne uniquement à partir des mesures d'ODF et que le modèle développé est stable. Ils incitent à aller plus loin dans la modélisation avec cette ligne directrice. L'étape suivante pourrait être la prise en compte de l'ODF mesurée sur les chants des avivés pour modéliser l'ODF en trois dimensions et ainsi obtenir des informations sur les autres types de déformations tels que le voilement longitudinal de face ou le gauchissement.

Cependant, l'ODF n'est pas la seule cause de l'hétérogénéité des retraits locaux. Elle trouve aussi une de ses causes dans la composition anatomique du bois. Par exemple, le bois de réaction joue un rôle non négligeable dans les déformations au séchage, tout comme la cinétique de séchage (apparition d'un gradient d'humidité dans la section de l'avivé), la diffusion de l'eau dans le bois ou les phénomènes de mécanosorption (Saifouni, 2014). Mais une fois que le cycle de séchage et que le mode

d'empilage sont optimisés, ces paramètres sembleraient de second ordre par rapport aux variations d'ODF des avivés.

Malgré cela, les résultats présentés dans ce chapitre révèlent de belles performances du modèle et un potentiel de valorisation intéressant pour des applications industrielles. En effet, l'ODF est une donnée qui est maintenant accessible à des cadences industrielles, même en première transformation, et plus simple à mesurer que le bois de réaction ou encore la vitesse de migration de l'eau dans le bois qui peut varier d'une pièce de bois à une autre. Il a été montré que l'erreur de prédiction du modèle est acceptable par rapport à l'objectif de rabotage visé et permet de poursuivre sereinement les recherches dans un système qui définirait le débit des avivés aussi en fonction de leurs potentielles déformations au séchage. Ce dispositif aurait toute sa place dans une ligne de transformation du chêne, et même d'autres feuillus ou résineux, dédié à la fabrication de lames aboutées. Par rapport à l'existant, le gain se traduirait en premier lieu par la suppression de l'opération de tronçonnage avant le premier rabotage car le débit des avivés à l'état vert serait fait de telle sorte que leurs déformations soient directement absorbées par le rabotage. Cela permettrait aussi un gain de rendement matière, grâce à la purge avant séchage des zones de bois responsables des grandes déformations. De plus, la confirmation de la faible erreur de prédiction des déformations des avivés testés pourrait offrir la possibilité de connaître avant séchage la profondeur de passe de rabotage minimale pour chaque pièce de bois et, selon les besoins et en prévision des produits finaux, de classer les avivés en fonction de la profondeur de passe nécessaire de rabotage dans le but de perdre le moins de matière possible. Toutefois, il conviendrait de mener d'autres campagnes d'essais pour des avivés dont les flèches de rive modélisées seraient jugées trop grandes, dans le but de simuler le tronçonnage d'avivés frais de sciage en avivés courts de plus faibles flèches de rive prédites puis de les sécher pour après qualifier la précision du modèle en situation d'application industrielle et sur des avivés courts.

Par ailleurs, un travail de réduction des temps de calcul du modèle devra être fait pour permettre son implantation industrielle. Dans les simulations réalisées, le temps de calcul du profil de déformation prédite d'un avivé approche un temps d'une minute et trente secondes. Mais les logiciels utilisés pour ces travaux de recherche ne sont pas optimisés pour de telles conditions d'utilisation. Ce temps de calcul peut être réduit considérablement par le développement d'un code adapté implémenté directement dans les logiciels des scanners et permettant des applications industrielles directement sur les lignes de productions.

Chapitre 4 :
Exploitation des données d'un scanner laser pour
l'optimisation de la production de lames
aboutées de chêne

1. Introduction

De nombreuses techniques de contrôle non destructif se développent pour le classement pour la résistance des bois de structure afin de garantir au plus juste leurs propriétés mécaniques tout en cherchant à maximiser les rendements matières et économiques des procédés. Petit à petit, le classement par machine prend le pas sur le classement visuel, pour les résineux en tout cas. En attestent l'évolution des normes de classement en ce sens, le développement et la commercialisation de machines de classement vibratoire (Viscan, Escan) et de scanners à rayons X. Concernant le classement par mesure de l'orientation des fibres (ODF), un brevet est, à ce jour, déposé (Olsson *et al.* 2015).

L'aboutage est une technique d'assemblage de pièces de bois qui est très répandue dans la fabrication des produits d'ingénierie destinés à des usages en structure (Bois d'ossature, BLC, BMR, CLT). Ce procédé permet de reconstituer des lames de grande longueur et surtout de qualité homogène, avec une meilleure valorisation de la matière première et un tri plus ciblé des qualités. Cependant, le contrôle qualité des aboutages est encore soumis à des règles de type visuel. Selon l'EN 14080:2013, pour garantir la fabrication d'aboutages résistants : (i) « un nœud⁵ ou une perturbation importante de fibre ne doit pas se trouver dans la zone de l'aboutage », (ii) « la distance entre le bord d'un nœud et la base d'un aboutage à entures multiples ne doit pas être inférieure à trois fois le diamètre du nœud (Figure 4.1), à moins qu'une procédure de classement approuvée ne soit utilisée et qu'il soit démontré par des essais qu'une résistance adéquate des aboutages à entures multiples est atteinte avec une plus faible distance minimale ». L'EN 15497:2014 précise que la distance minimale au nœud peut être de 1,5 fois son diamètre en cas de système automatisé approuvé. Cette notion de rognage en fonction de la taille des nœuds a pour but de s'assurer que les entures soient usinées dans une zone relativement droit de fil, la présence d'un nœud générant des perturbations dans l'ODF. En effet, Frayssinhes *et al.* (2020) ont mis en évidence que, dans le plan LT du bois de douglas, un nœud rond provoque une perturbation significative de l'orientation du fil dans un rayon de 3,4 fois le rayon du nœud, c'est-à-dire jusqu'à une distance du bord du nœud de 1,2 fois son diamètre. Si ce résultat pourrait conforter une règle du type « distance minimale à un nœud » dépendant du diamètre des nœuds, il plaide néanmoins pour un réajustement de la valeur de ce critère, et ce grâce aux nouveaux moyens disponibles de mesures de l'ODF (chapitre 2), surtout que dans le cas des sciages, de feuillus particulièrement, les nœuds sont rarement bien ronds et souvent de biais.

Ces règles appliquées à la fabrication d'aboutages ont certes fait leurs preuves pour les essences concernées par ces normes, les résineux, mais apparaissent aujourd'hui comme un frein pour une valorisation plus efficiente et pour l'utilisation des feuillus dont les tailles de nœuds peuvent être plus importantes et les limites avec le bois sans défaut moins marquées que dans le cas des résineux. En effet, dans le cas de la purge d'un nœud (Figure 4.1.b), c'est une grande zone de bois sans nœud qui est retirée et plus le nœud est gros, plus le rendement matière diminue. Pour le développement de produits de structure à partir de chêne de qualité secondaire, l'application de ces règles pose problème :

- d'une part, avec des moyens de production conventionnels (cf. chapitre 1), le respect des consignes de distance de purge des nœuds est difficile et dans le cas chêne, la règle (ii) est pratiquement impossible à tenir,
- d'autre part, dans le cadre d'une transformation de billons de chêne de qualité secondaire dédiés à la production de lames aboutées, quand bien même le tronçonnage des bois serait

⁵ Les nœuds de diamètre inférieur ou égal à 6 mm ne sont pas considérés.

fait en respectant ces règles, les pertes de rendement matière seraient telles que la fabrication ne serait pas viable économiquement.

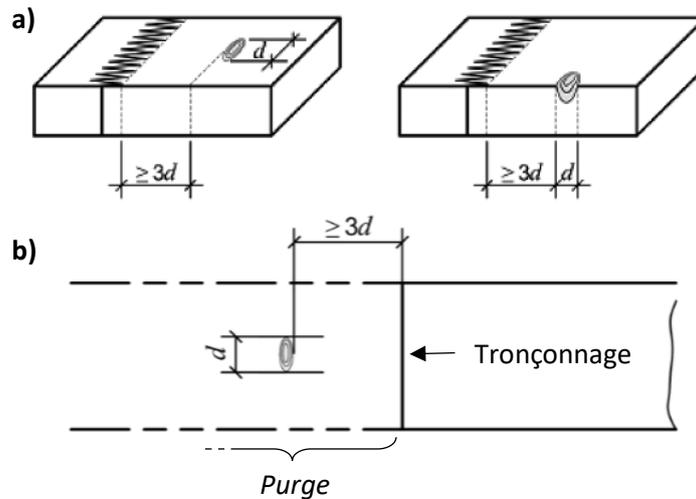


Figure 4.1 : Distance minimale entre la base de l'aboutage à entures multiples et un nœud (EN 14080:2013) ;
a) Nœud conservé dans la lame aboutée ; b) purge d'un nœud avant aboutage.

Pour réaliser des produits d'ingénierie en chêne pour la construction, il est donc nécessaire de développer des solutions machines garantissant le contrôle qualité des aboutages. Olsson *et al.* (2019) ont exploité, pour de l'épicéa, la possibilité laissée par les normes de mise au point des procédures automatisées en proposant une interprétation quantitative des règles quelque peu subjectives pour la fabrication d'aboutages structurels, notamment celle indiquant qu'il ne peut y avoir de « *perturbation prononcée du fil à l'intérieur même de l'aboutage* » (EN 14080:2013). Leurs travaux montrent qu'alors, avec un scanner de mesure de l'ODF, une caméra couleur et des critères adaptés, il est possible de réduire sensiblement les pertes matières. Ils ne donnent cependant pas de relations entre les perturbations du fil et la résistance des aboutages, et la consigne demeure du type « distance minimale à un nœud ».

Néanmoins, même avec un système automatisé homologué garantissant la bonne ODF dans les aboutages, la règle de la distance minimale au nœud de 1,5 fois son diamètre est encore trop pénalisante pour le chêne. Il faudrait être en mesure de prédire la résistance des aboutages avec des machines de contrôle non destructif, à la manière de ce qui se fait pour le classement pour la résistance mécanique des sciages (Viguié 2015, EN 14081-2:2018). Cela permettrait alors de s'affranchir d'une règle dépendant uniquement de la taille des nœuds pour évoluer vers une règle basée sur des mesures d'ODF avec des critères d'angles moyens dépendant des classes de résistance. En effet, les règles (i) et (ii) dont il a été question précédemment portent uniquement sur la qualité du bois autour de l'aboutage et non sur les conditions de production et la qualité de la réalisation de l'assemblage. Par ailleurs, la seule exigence donnée par les normes de classement et à laquelle les aboutages doivent satisfaire concerne la résistance mécanique de l'assemblage. Or, il a été montré que les performances mécaniques du bois, et du chêne en particulier, peuvent être bien appréhendées (Faydi 2017), notamment par la mesure de l'ODF.

L'objectif de ce chapitre est de montrer qu'il est possible de classer mécaniquement des aboutages en utilisant la mesure de l'ODF. Cette solution machine permet d'ouvrir diverses applications de tri et de sélection des bois qui sont présentées.

2. Caractérisation expérimentale de lots de lames aboutées

2.1. Echantillonnage

Afin de respecter au mieux des conditions industrielles, l'échantillonnage sur lequel s'est basé cette étude est composé de quatre lots de lames aboutées par entures multiples de longueur 10 mm produites sur la ligne industrielle de l'entreprise Les Bois Profilés avec les procédés décrits au chapitre 1. L'aboutage s'est fait sans chercher à respecter la distance entre le bord de l'un aboutage et le nœud le plus proche, distance préconisée par les normes (EN 14080:2013 ; EN 14081-2:2018) pour des applications en structure. De ces lames, 272 aboutages ont été testés.

Ces lames et aboutages sont répartis en quatre lots décrits au Tableau 4.1. Deux colles ont été utilisées : une colle polyuréthane (Purbond HB S209) et une colle vinylique (Rakoll GLX4).

Tableau 4.1 : Description de l'échantillonnage

Lot	PU_1	PU_2	VI_1	VI_2
Colle	Purbond HB S209		Rakoll GLX4	
Quantité colle ⁶	Classique -	Classique +	Classique	Classique
Pression serrage ⁷ (MPa)	18,6	23,9	19,2	24,9
Section d'aboutage (mm ²)	116 x 25,5	116 x 25,5	96 x 25,5	96 x 23
Section d'essai (mm ²)	104 x 22,5	105 x 23	90 x 22	90 x 22
Longueur d'enture	10 mm			
Nombre d'aboutages testés	67	125	48	32

- Le lot PU_1 a été abouté avec une pression de serrage un peu plus faible de celle habituellement appliquée par les Bois Profilés. Au cours de la production, la quantité de colle constatée dans l'aboutage a été jugée à peine suffisante.
- Le Lot PU_2 a été composé avec deux ajustements par rapport au lot PU_1 :
 - La quantité de colle dans l'aboutage a été augmentée.
 - La pression de serrage a été celle appliquée habituellement par les Bois Profilés.
- Le lot VI_1 a été composé de lames provenant d'un stock de qualité QF2xx et choisies parmi celles de moins bonne qualité visuelle (plus forte nodosité, pente de fil visuellement élevée).
- Le lot VI_2 a été composé avec un choix des courçons comportant des nœuds proches des extrémités de façon à forcer la présence de nœuds autour des aboutages. La pression de serrage était un peu plus élevée que pour le lot VI_1 du fait de la plus faible épaisseur des courçons aboutés et d'une consigne de pression un peu plus élevée.

⁶ Le grammage réel appliqué n'a pas pu être relevé. La seule information relevée a été de savoir si le réglage machine du débit de colle était supérieur (noté "Classique+" dans ce tableau) ou inférieur (noté "Classique-") à celui habituellement appliqué (noté "Classique").

⁷ La pression de serrage correspond ici à la contrainte de compression initiale dans le bois (hors pertes par frottement). Ce serrage est appliqué dans le sens longitudinal de la lame afin d'effectuer le bon collage de l'aboutage.

2.2. Essais et mesures effectués

Après aboutage, les lames ont été calibrées à la section d'essai puis ont subi le protocole d'essais suivant :

- a) Passage des lames aboutées dans le scanner Combiscan (présenté au chapitre 3) de sorte à mesurer l'ODF sur les 4 faces grâce aux lasers points.
- b) Test de flexion 4 points à plat selon l'EN 408:2012 (Figure 4.2) dans le but d'obtenir la résistance mécanique des aboutages, notée $f_{m,j}$. Les essais ont été réalisés sur une machine d'essais du LABOMAP. Dans la configuration à plat, la hauteur d'essai est l'épaisseur. L'écartement entre les appuis extérieurs (ceux en bas de la Figure 4.2) a été de quinze fois l'épaisseur de la lame testée et celui entre les appuis du haut de six fois l'épaisseur. Le positionnement de la lame pendant l'essai était tel que l'aboutage testé se trouvait au milieu des appuis.
- c) Suite aux essais de flexions, les éléments de bois cassés ont été purgés des zones endommagées par la rupture. Les morceaux de bois alors obtenus sont appelés courçons.
- d) Pesée et mesure des dimensions des courçons afin de déterminer leur masse volumique.
- e) Détermination du module d'élasticité longitudinal des courçons par mesure vibratoire avec la méthode BING (Brancheriau 2002, Brancheriau et Paradis 2007).



Figure 4.2 : Photo du dispositif d'essai de mesure de la résistance en flexion à plat des aboutages à enture multiples (montage d'essai selon EN408:2012)

2.3. Propriétés d'orientation des fibres

2.3.1. Orientation des fibres par face

Le traitement des données issues du scanner permettant l'obtention de cartographies d'ODF a été celui décrit au chapitre 3 §3.1.1. La Figure 4.3 montre, pour les faces et rives d'une lame ayant deux aboutages, les cartographies d'angles $\alpha_{xy,Face}$ et $\beta_{xz,Rive}$ obtenues par ce traitement ainsi que la position des aboutages testés, délimités par deux traits en pointillés espacés de 10 mm.

Lors d'un essai de flexion 4 points d'une poutre, la partie du matériau testé se situant entre les deux appuis centraux est soumise théoriquement à des contraintes de flexion pure et c'est dans cette zone que les contraintes sont maximales. Aussi, c'est bien dans cette zone où les perturbations du fil du bois peuvent avoir le plus d'influence sur la contrainte de rupture. Pour les essais réalisés sur les aboutages, la distance entre ces appuis était en moyenne de 136 mm, avec l'aboutage au milieu. Les traits rouges délimitant cette zone sont alors définis dans un premier temps à une distance $Lx = (136-10)/2 = 63$ mm des bords de l'aboutage correspondant afin d'avoir une vue d'ensemble. L'ODF dans cette zone sera par la suite corrélée à la résistance des aboutages et une étude de sensibilité du paramètre Lx permettra de déterminer la valeur donnant la meilleure corrélation ODF-résistance.

L'orientation moyenne des fibres ODF_i autour de l'aboutage i est alors calculée par face et rive sur les 63 mm de chaque côté de l'aboutage, donnant ainsi quatre valeurs : $ODF_{i,Face\ 1}$, $ODF_{i,Face\ 2}$, $ODF_{i,Rive\ 1}$ et $ODF_{i,Rive\ 2}$ calculées selon les équations 4.1 et 4.2. La zone de l'aboutage entre les deux traits en pointillés n'est pas prise en compte dans ce calcul à cause de l'incertitude des mesures due à la présence des entures.

$$ODF_{i,Face\ k} = \frac{1}{l \cdot 2Lx} \sum_{y=1}^l \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} |\alpha_{xy,Face\ k}| + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} |\alpha_{xy,Face\ k}| \right) \quad (\text{équation 4.1})$$

$$ODF_{i,Rive\ k} = \frac{1}{e \cdot 2Lx} \sum_{z=1}^e \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} |\beta_{xz,Rive\ k}| + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} |\beta_{xz,Rive\ k}| \right) \quad (\text{équation 4.2})$$

Avec k l'indice de la face et de la rive (égal à 1 ou 2).

L'ODF moyenne des faces $ODF_{i,Faces}$ et l'ODF moyenne de rives $ODF_{i,Rives}$ ont été définies pour caractériser l'ODF autour des aboutages (équations 4.3 et 4.4, Figure 4.3). L'ensemble de ces valeurs sont représentées par lot sur la Figure 4.4.

$$ODF_{i,Faces} = \frac{1}{2} (ODF_{i,Face\ 1} + ODF_{i,Face\ 2}) \quad (\text{équation 4.3})$$

$$ODF_{i,Rives} = \frac{1}{2} (ODF_{i,Rive\ 1} + ODF_{i,Rive\ 2}) \quad (\text{équation 4.4})$$

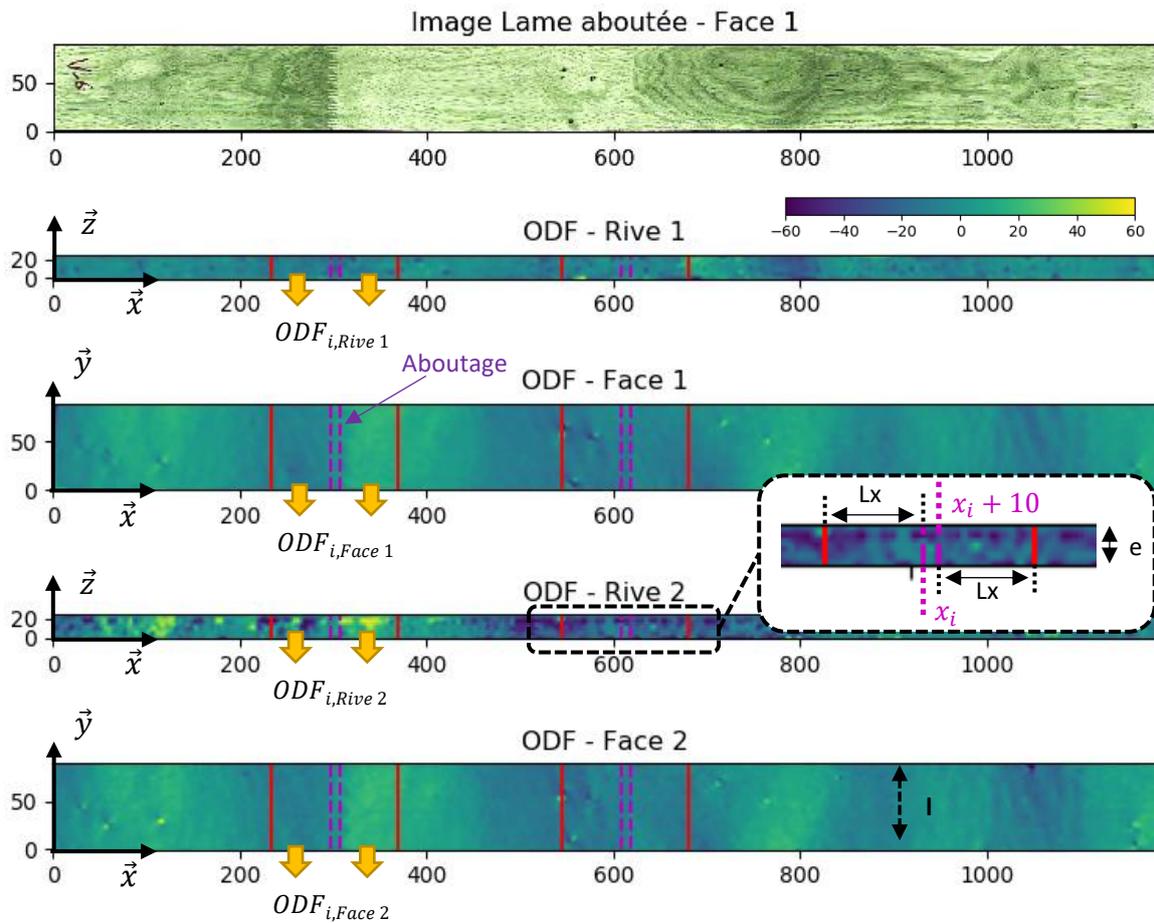


Figure 4.3 : Exemple de cartographies d'angles d'ODF d'une lame aboutée (le code couleur donne la valeur des angles en degré) et visualisation des aboutages et des zones d'étude pour la caractérisation de l'ODF autour des aboutages.

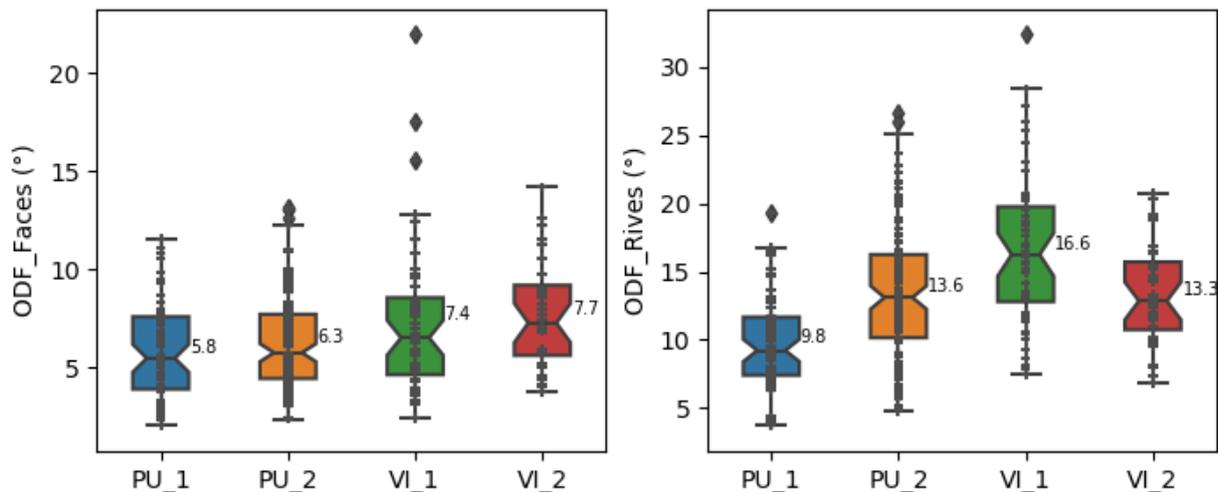


Figure 4.4 : Comparaison des populations d'orientations des fibres de face et de rive proches des aboutages. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.

Ces populations d'orientations des fibres ont été comparées deux à deux par une analyse de la variance à un facteur (ANOVA) qui permet de déterminer si les moyennes des lots sont significativement différentes. En effet, l'ANOVA teste l'hypothèse « les deux moyennes sont identiques » et renvoie la probabilité qu'elles le sont. Si cette probabilité (*p-value* dans le Tableau 4.2) est inférieure à 0,05 il est couramment admis que les deux moyennes sont statistiquement distinctes. Ainsi, autour des aboutages, les deux lots PU se différencient par leur ODF des rives, tout comme les deux lots VI. Les lots PU ont légèrement moins d'ODF sur les faces que les lots VI. A noter aussi que les mesures de la plongée ne sont pas statistiquement différentes entre les lots PU_2 et VI_2.

Tableau 4.2 : *p-value* des ANOVA des populations d'ODF_Faces et d'ODF_Rives.

<i>Population testée</i>	<i>ODF_Faces</i>			<i>ODF_Rives</i>		
	PU_2	VI_1	VI_2	PU_2	VI_1	VI_2
PU_1	0,137	0,006	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
PU_2		0.023	0.006		<0.001	0,773
VI_1			0.746			0.005

2.3.2. Modèle d'orientation des fibres en trois dimensions

L'ODF a été, jusque-là, considérée dans le plan, celui de la face sur laquelle ont été relevées les images de diffusion elliptiques des lasers. Mais en toute rigueur, l'ODF devrait être définie dans l'espace. Les travaux de modélisation en 3D de l'ODF sont assez récents et novateurs. La question à laquelle répondrait ce type de modélisation est celle de l'estimation de l'ODF à l'intérieur d'un sciage à partir des données observables sur ses surfaces extérieures.

Les chercheurs de Linnaeus University compte parmi les premiers à prendre en compte d'ODF dans le volume d'un sciage. Olsson et Oscarsson (2014) suivis de Brigert *et al.* (2018) ont utilisé le ratio des ellipses de diffusion pour estimer l'angle dans la direction perpendiculaire aux surfaces scannées. Mais cette méthode n'est pas très précise, certainement dû au fait que d'autres facteurs que l'angle de plongée, dont un certain nombre sont donnés au chapitre 2 de ce manuscrit, ont une influence sur le ratio des ellipses. Dans leurs modèles de classements pour la résistance mécanique, Olsson *et al.* (2013) et Olsson *et al.* (2018) affectent dans le volume les valeurs d'ODF mesurées sur les faces (Figure 4.5.a).

Pour modéliser l'ODF d'un sciage en 3D, Lukacevic *et al.* (2019) ont utilisé un scanner pour déterminer la position et la taille des nœuds pour les utiliser comme données d'entrée d'un modèle basé sur celui de Rankine-Foley (Foley 2003, Frayssinhes 2020). Ils ne partent donc pas de mesures d'ODF.

Rais *et al.* (2021) ont, quant à eux, procédé par interpolation des angles plans mesurés sur les faces et rives (Figure 4.5.b) puis par le calcul de l'angle dans l'espace grâce au produits des angles dans chacun des deux plans (équation 4.5).

$$\cos(\text{angle } 3D) = \cos(\text{angle plan } XZ) * \cos(\text{angle plan } YZ) \quad (\text{équation 4.5})$$

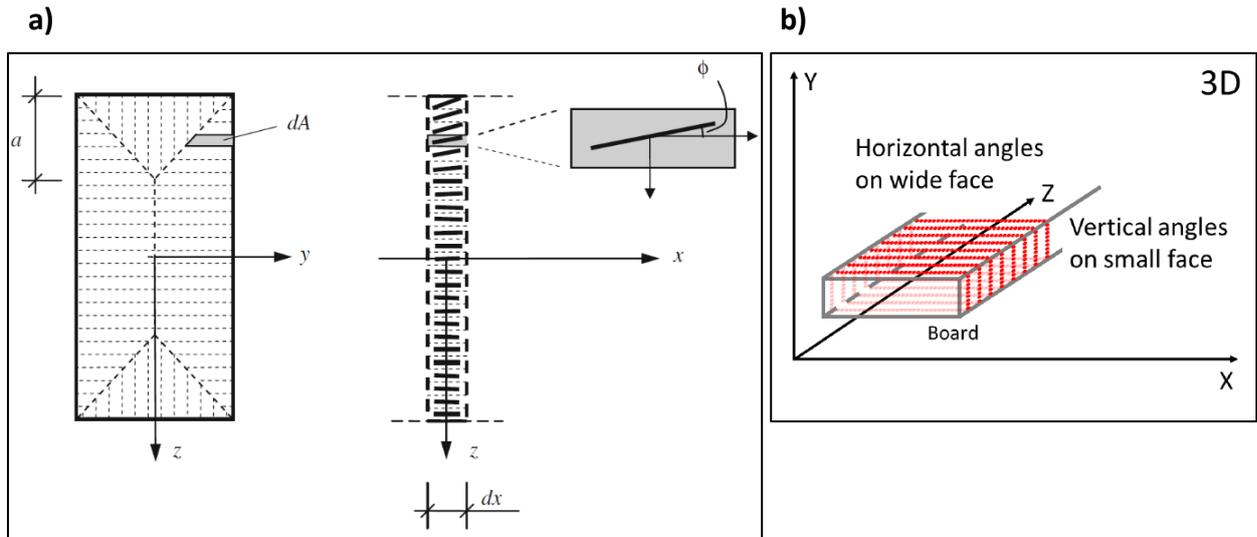


Figure 4.5 : a) Attribution dans le volume des angles de surface (Olsson et al. 2013) ;
 b) : Représentation schématique des angles dans Rais et al. (2021). Les points rouges représentent les images de diffusion.

2.3.2.1. Approche théorique

Il a été choisi, dans le cadre de ces travaux de thèse, d'utiliser les mesures d'ODF des faces et rives d'un avivé et de tester l'apport de de la méthode d'interpolation des angles plans et du calcul de l'angle 3D des fibres avec une autre formule que celle utilisée par Rais et al. (2021).

La Figure 4.6 représente le paramétrage dans le repère $(\vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ d'un élément de volume de bois dont l'orientation moyenne des fibres le composant est représentée par le vecteur \vec{u}_{Fibre} . La projection de ce vecteur dans le plan (\vec{x}, \vec{y}) est notée \vec{u}_{xy} et celle dans le plan (\vec{x}, \vec{z}) est notée \vec{v}_{xz} . L'orientation dans l'espace d'un élément de fibre est donnée par l'angle γ_{xyz} entre \vec{u}_{Fibre} et le vecteur normal \vec{n} , ici confondu avec la direction \vec{x} . Les coordonnées b et c sont exprimables en fonction de a selon les équations suivantes :

$$b = a \cdot \tan(\alpha_{xy}) \quad (\text{équation 4.6})$$

$$c = a \cdot \tan(\beta_{xz}) \quad (\text{équation 4.7})$$

L'angle γ_{xyz} a été calculé de la façon suivante.

$$\vec{u}_{Fibre} \cdot \vec{x} = \|\vec{u}_{Fibre}\| \cdot \|\vec{x}\| \cdot \cos(\gamma_{xyz}) \quad (\text{équation 4.8})$$

$$\Rightarrow \cos(\gamma_{xyz}) = \frac{\vec{u}_{Fibre} \cdot \vec{x}}{\|\vec{u}_{Fibre}\| \cdot \|\vec{x}\|} = \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2 + c^2}} \quad (\text{équation 4.9})$$

$$\Rightarrow \gamma_{xyz} = \arccos \left(\frac{1}{\sqrt{1 + \tan^2(\alpha_{xy}) + \tan^2(\beta_{xz})}} \right) \quad (\text{équation 4.10})$$

Ainsi, l'angle γ_{xyz} s'exprime donc seulement en fonction des angles α_{xy} et β_{xz} , appelés angles plans.

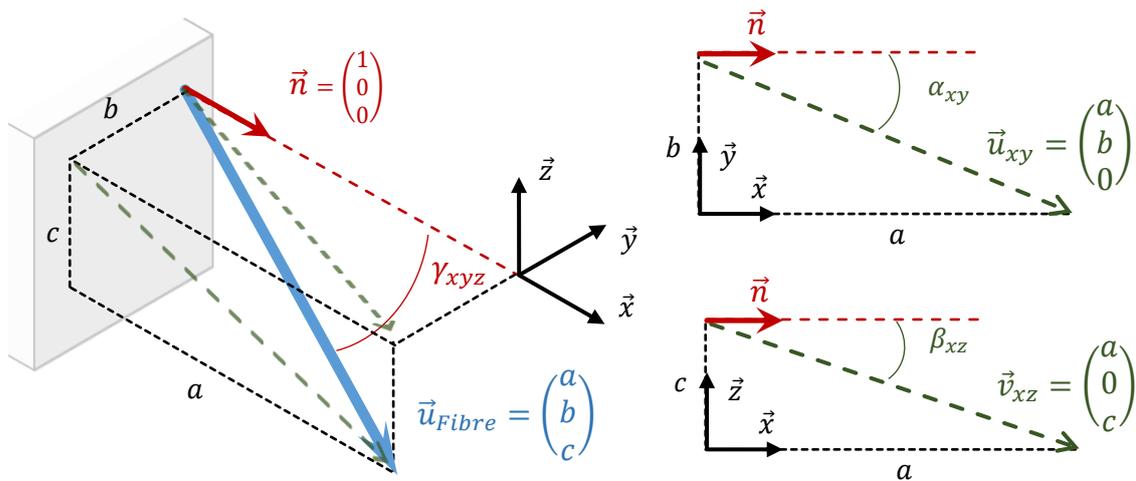


Figure 4.6 : Paramétrage d'un élément de fibre dans l'espace

2.3.2.2. Angles plans connus

Les données d'ODF sur les quatre côtés d'une lame scannée permettent d'obtenir les angles α_{xy} et β_{xz} de l'enveloppe de la lame (Figure 4.7). Il manque néanmoins toutes les valeurs dans la section de la lame.

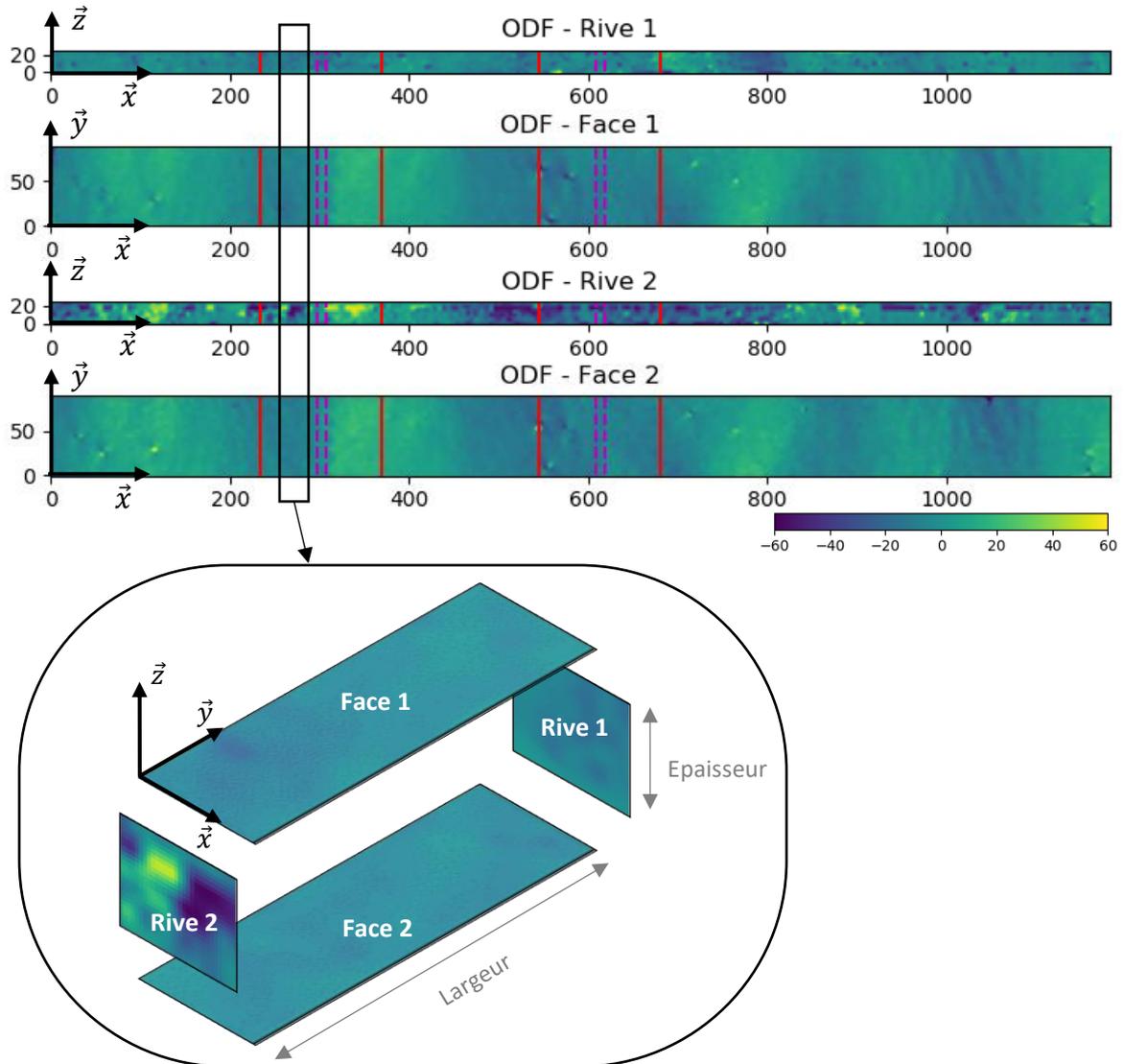


Figure 4.7 : de haut en bas : Représentation des mesures d'ODF dans le plan (le code couleur donne la valeur des angles en degré) ; Recomposition dans l'espace d'une partie de la lame ; Discrétisation en vue du calcul des angles plans.

2.3.2.3. Calcul des angles plans dans le volume de la lame

La lame est discrétisée dans son volume en cubes de $1 \times 1 \times 1 \text{ mm}^3$. Pour calculer les angles γ_{xyz} dans le volume du bois, les mesures des angles plans sur l'enveloppe de la lame ne suffisent pas. Pour les fibres se trouvant immédiatement sous les deux grandes faces d'une lame de bois, les angles α_{xy} sont

directement issus des mesures des lasers, mais l'angle de plongée β_{xz} n'est connu qu'aux extrémités (Figure 4.8-b). Pour les fibres se trouvant immédiatement sous les rives, c'est l'inverse : les β_{xz} sont connus mais pas les α_{xy} , sauf aux extrémités (Figure 4.8-c). Les composantes α_{xy} et β_{xz} manquantes ont été respectivement obtenues par interpolation linéaire dans l'épaisseur et dans la largeur (Figure 4.8).

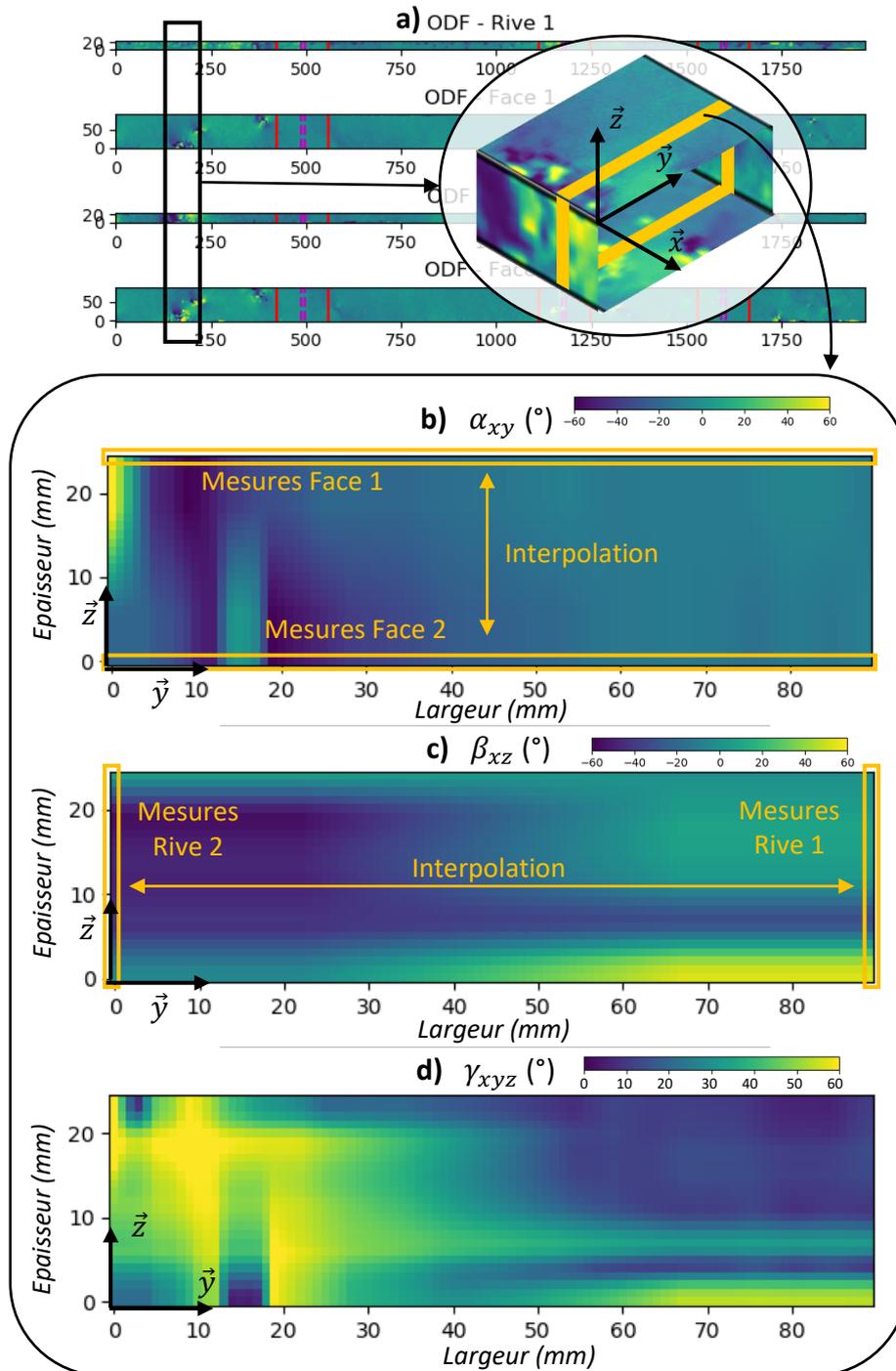


Figure 4.8 : Exemple de calcul des angles γ_{xyz} pour un élément de section. Le code couleur indique la valeur des angles.

Deux limites de cette méthode par interpolation peuvent être mentionnées.

- Dans le cas d'un nœud centré dans la largeur et invisible par les mesures sur les rives (Figure 4.9), la plongée β_{xz} obtenue par interpolation n'est pas correcte au niveau du nœud (Figure 4.9.b) et devrait plutôt s'approcher des valeurs données sur la Figure 4.9.d. La conséquence est que l'angle γ_{xyz} dans le nœud s'en retrouve minimisé (Figure 4.9.c-e).
- Dans le cas d'un nœud visible sur une rive mais ne se propageant que très peu dans la largeur (Figure 4.10), l'interpolation de l'angle β_{xz} dans la largeur donne des valeurs trop élevées sitôt le nœud dépassé (Figure 4.10.b). En réalité, elles devraient être plus proches de celles données à la Figure 4.10.d, avec pour conséquence que l'angle γ_{xyz} dans le nœud s'en retrouve maximisé (Figure 4.10.c-e).

Il apparait donc que la détection préalable des nœuds apporterait des informations supplémentaires et permettrait une modélisation des angles dans l'espace plus proche de la réalité.

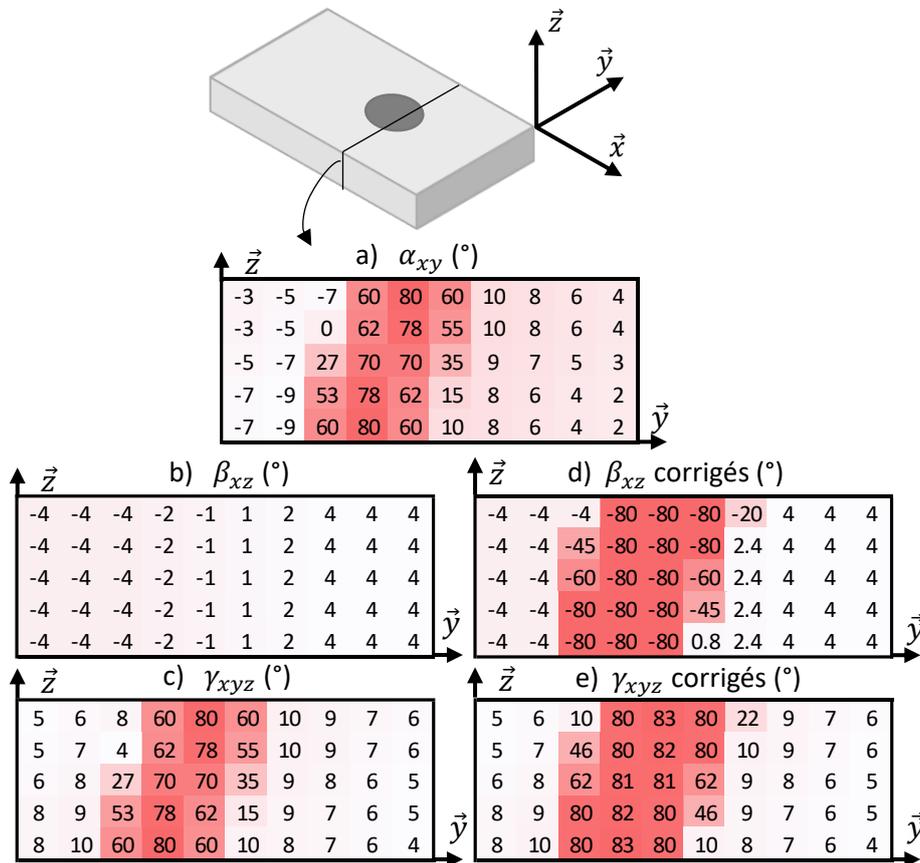


Figure 4.9 : Cas d'un nœud centré dans la largeur et invisible sur les rives.

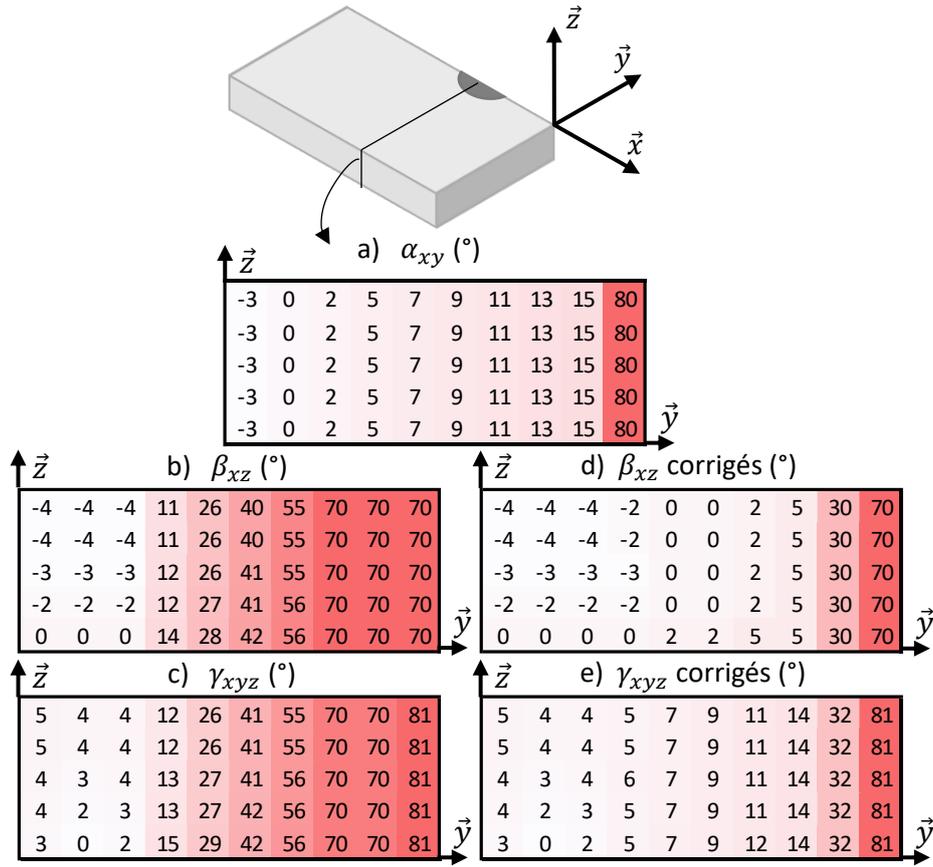


Figure 4.10 : Cas d'un nœud visible sur une rive et se propageant très peu dans la largeur.

2.3.3. Orientation 3D des fibres proches des aboutages

Autour des aboutages, l'orientation moyenne des fibres en 3D, $ODF_{i,3D}$, est calculée sur la longueur Lx de part et d'autre de l'aboutage (équation 4.11). L'ensemble de ces valeurs sont représentées sur la Figure 4.11 en fonction des lots.

$$ODF_{i,3D} = \frac{1}{e.l.2Lx} \sum_{z=1}^e \sum_{y=1}^l \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} \gamma_{xyz} + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} \gamma_{xyz} \right) \quad (\text{équation 4.11})$$

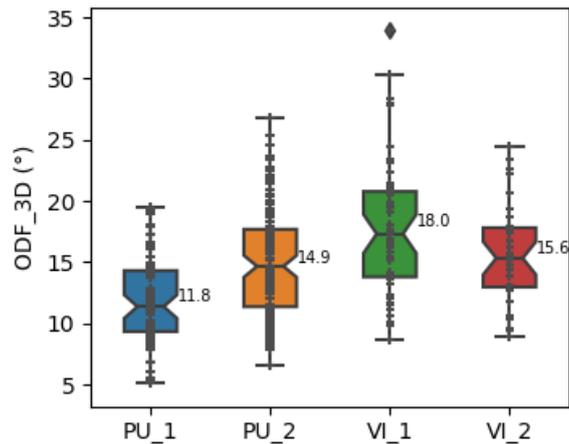


Figure 4.11 : Comparaison des populations d'orientations des fibres 3D ($ODF_{i,3D}$) proches des aboutages. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.

Le Tableau 4.3 donne les p-value des ANOVA réalisées sur les populations d'angles 3D $ODF_{i,3D}$. Le lot PU_1 est celui ayant les plus faibles $ODF_{i,3D}$ autour des aboutages et se démarque bien des autres lots. Le lot VI_1 est celui avec en moyenne les plus grands $ODF_{i,3D}$, tandis que les moyennes des $ODF_{i,3D}$ des lots PU_2 et VI_2 sont statistiquement identiques.

Tableau 4.3 : p-value des ANOVA des populations d' ODF_{3D} .

Population testée	ODF_{3D}		
	PU_2	VI_1	VI_2
PU_1	<0.001	<0.001	<0.001
PU_2		<0.001	0.371
VI_1			0.074

Les résultats obtenus avec cet angle 3D résumant donc ceux des angles sur les faces et sur les rives. Ainsi, d'après les résultats d'ODF présentés à la Figure 4.4 et à la Figure 4.11, le lot VI_1 est celui qui en possède le plus autour des aboutages. Viennent ensuite les lots PU_2 et VI_2 avec des ODF assez semblables autour des aboutages, et enfin le lot PU_1 est celui qui présente les plus faibles valeurs d'ODF.

2.4. Résistance des aboutages en flexion

La Figure 4.12.a présente les résultats de résistance en flexion des aboutages. Les résultats des ANOVA du Tableau 4.4 sur les populations de résistance montrent qu'elles sont toutes statistiquement différentes, exceptés les deux lots vinyliques qui sont semblables. Le lot PU_2 est le lot en moyenne le plus résistant. Les deux lots PU sont en moyenne plus résistants que les lots VI de plus de 10 MPa.

Après essais, une valeur de décollement des entures a été évalué visuellement comme le pourcentage d'entures restées intactes après rupture de l'aboutage. Ces résultats sont présentés à la Figure 4.12.b. Le lot PU_1 se démarque des autres par son pourcentage moyen d'entures décollées significativement plus élevé que les autres lots pour lesquels le décollement est similaire (Tableau 4.4). Le décollement

des entures, indiquant le fait que c'est le joint de colle qui a localement cédé et non le bois, peut provenir soit d'un manque de colle, soit du fait que la résistance du bois se trouvait supérieure à celle de la colle. Ce phénomène représente un grave défaut de collage que lorsque la contrainte à rupture s'en trouve fortement affectée. Or, la Figure 4.12.c, représentant la résistance des aboutages dont au moins à 80 % des entures sont restées intactes, met en évidence que les aboutages du lot PU_2 ont une résistance moyenne de presque 8 MPa de plus que la moyenne du lot complet, tandis que pour le lot PU_1, ces aboutages majoritairement décollés n'ont une résistance supérieure à la moyenne du lot que de 3 MPa. De plus, la différence significative (p -value < 0,001) de résistance moyenne entre les populations d'aboutages décollés de ces lots est de 9 MPa, ce qui est important compte tenu que c'est la même colle qui a été utilisée. Ces résultats tendent à confirmer l'observation initiale d'un moins bon collage du lot PU_1 (quantité de colle et pression de serrage).

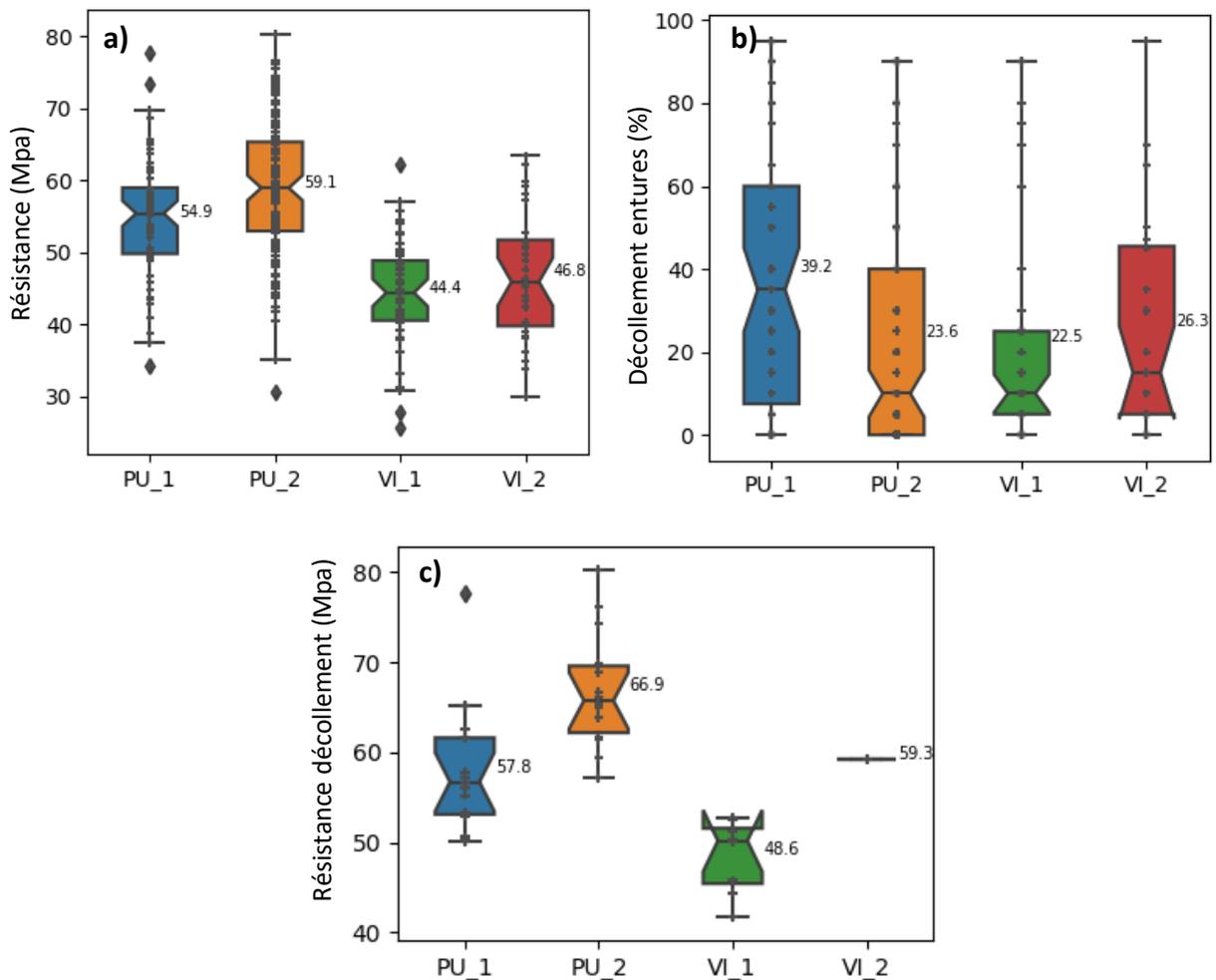


Figure 4.12 : a) Populations de résistance des aboutages ; b) Populations de décollage moyen des entures ; c) Populations de résistance des aboutages ayant un décollage d'au moins 80 %. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1er quartile, médiane, 3e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.

Tableau 4.4 : p-value des ANOVA des populations de résistance et de décollements des entures.

Population testée	Résistance			Décollement entures		
	PU_2	VI_1	VI_2	PU_2	VI_1	VI_2
PU_1	0.002	<0.001	<0.001	<0.001	0.003	0.050
PU_2		<0.001	<0.001		0.825	0.624
VI_1			0.198			0.533

2.5. Masse volumique et module d'élasticité vibratoire des courçons

La Figure 4.13.a présente les masses volumiques des courçons de bois entre les aboutages testés. Le lot PU_2 est en moyenne le plus dense et le lot VI_1 le moins dense. Les lots PU_1 et VI_2 ont en moyenne presque la même masse volumique. Les résultats des mesures de module d'élasticité longitudinal vibratoire de ces courçons sont présentés sur la Figure 4.13.b et les résultats des ANOVA au Tableau 4.5. Ceux-ci indiquent que seuls les lots PU_1 et PU_2 sont statistiquement identiques. Les modules d'élasticité vibratoires mesurés sont compris entre 5,2 et 18,6 GPa.

A noter que les écarts entre lots ne sont pas les mêmes pour la masse volumique que pour le module d'élasticité vibratoire. Les deux lots PU ont en moyenne des modules d'élasticité identiques, alors que le lot PU_2 est plus dense. De même, le lot VI_2 est aussi dense que le lot PU_1 alors qu'il est de module d'élasticité plus faible. Enfin, pour ces deux propriétés mécaniques, c'est le lot VI_1 qui est le plus faible.

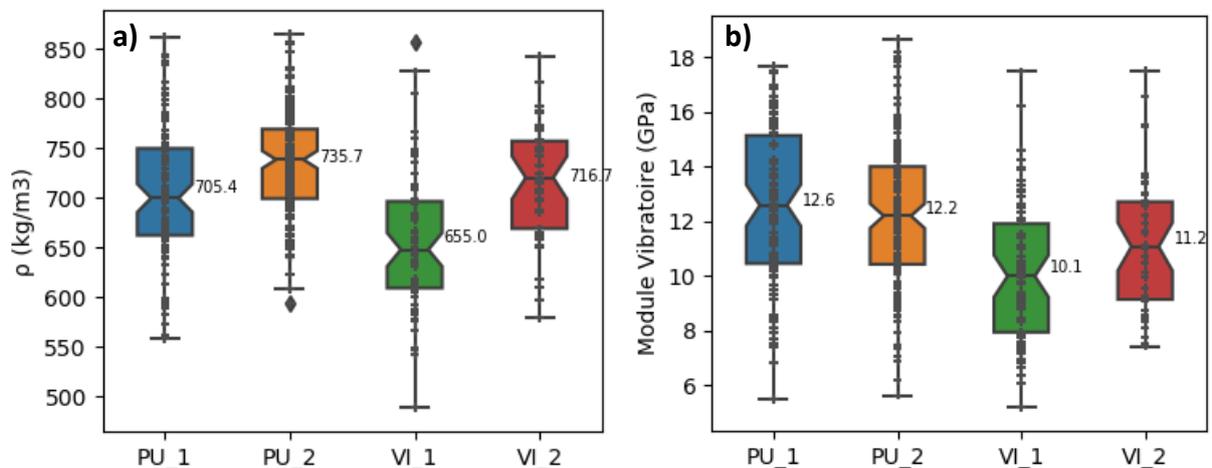


Figure 4.13 : a) Comparaison des populations de masses volumiques des courçons composant les aboutages ; b) Comparaison des populations de modules vibratoires des courçons. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1er quartile, médiane, 3e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.

Tableau 4.5 : p-value des ANOVA des populations de masses volumiques et de modules d'élasticité vibratoires.

Population testée	Masse volumique			Module d'élasticité vibratoire		
	PU_2	VI_1	VI_2	PU_2	VI_1	VI_2
PU_1	<0.001	<0.001	0.357	0.329	<0.001	0.007
PU_2		<0.001	0.047		<0.001	0.024
VI_1			<0.001			0.038

2.6. Synthèse sur la qualité mécanique des lots

Le Tableau 4.6 donne une vision synthétique des comparaisons entre les différents lots en fonction des propriétés mécaniques mesurées sur les bois aboutés. Au regard des mesures d'ODF, de module d'élasticité et de masse volumique, la qualité des bois aboutés des lots PU est équivalente tandis que celle du lot VI_1 est la moins bonne. Cela laisserait supposer un classement identique pour la résistance des aboutages de ces lots. Or ce n'est pas exactement ce qui a été constaté.

En effet, si la prédominance des lots PU pouvait être attendue au regard des meilleures propriétés des bois aboutés, le lot PU_1 est malgré tout moins résistant. Plusieurs facteurs peuvent en être la cause.

L'explication qui semble la plus probable est la qualité du collage comme en atteste le décollement moyen plus important. Cette différence de qualité de collage pourrait être due à la moins bonne répartition de la colle dans les aboutages du lot PU_1. Une autre cause pourrait être l'humidité qui n'a pas été mesurée, des bois au moment du collage des lots PU. En effet, la colle polyuréthane réticule au contact avec des molécules d'eau présentes dans le bois et dans l'air. L'humidification de la surface de collage avant application de la colle est pratiquée en atelier, essentiellement en conditions climatiques chaudes et sèches. Franke *et al.* (2014) ont montré que, dans le cas d'aboutages de hêtre avec ce type de colle, l'ajout d'eau améliorerait leur résistance. Pour le cas présent, l'information de l'humidification des bois n'a pas été relevée, ni celle des conditions climatiques exactes dans lesquelles ont été aboutés les lots PU.

La différence de pression de serrage entre ces lots pourrait l'expliquer, mais alors il y aurait contradiction avec la conclusion donnée par la différence de pression des lots VI : les aboutages VI_2, bien que pressés plus fort que ceux du lot VI_1, ne sont pas plus résistants. Pour expliquer la différence de résistance des lots PU par la pression de serrage, il faudrait vérifier les hypothèses que la colle polyuréthane serait, de par sa composition, viscosité ou autre, plus sensible à une variation de pression de serrage qu'une colle vinylique, ou bien que la colle polyuréthane nécessite un niveau de pression minimal plus élevé que la colle vinylique pour laquelle ce niveau minimal aurait été atteint pour les deux lots VI. Or, les données techniques des colles renvoient à la norme allemande DIN 68140 (1971) qui indique une pression de serrage minimum de 120 kg/cm² (environ 11,8 MPa) pour des aboutages avec des entures de 10 mm de long, critère respecté pour les quatre lots de l'étude. Cependant, la littérature scientifique tend à montrer que la résistance des aboutages augmente avec la pression de serrage (Lara-Bocanegra *et al.* 2016) et qu'au-delà d'un certain niveau les entures s'endommagent, entraînant une diminution de la résistance de l'assemblage (Bustos *et al.* 2003). Ainsi, avec les données à disposition, il est difficile d'expliquer les différences de résistance entre les lots par la pression de serrage.

Deux observations sur les écarts de résistances entre les lots peuvent surprendre : la grande différence de résistance entre les lots PU et VI ainsi que la résistance du lot VI_2 qui n'est pas au niveau espéré. En effet, son ODF moyenne autour des aboutages est plus proche du lot PU_2 que du lot VI_1, sa densité moyenne aussi bonne que le lot PU_1 et son module d'élasticité moyen légèrement plus faible que ceux des lots PU. De plus, les paramètres de collage ont plutôt été favorables à une bonne résistance des aboutages. La résistance propre de la colle pourrait en être la cause, hypothèse appuyée par le fait que la colle vinylique n'est pas structurelle au contraire de la colle polyuréthane. De plus, d'après Karastergiou *et al.* (2006), il semblerait que la résistance d'aboutages de chêne soit sensible aux classes D1, D2 et D3 de colles vynyliques, à savoir que la résistance des aboutages augmenterait avec l'utilisation d'une classe élevée de colle (observation aussi faite dans Vassiliou *et al.* (2007) pour du hêtre abouté).

Tableau 4.6 : Classements des lots selon les propriétés mesurées, du plus performant au moins performant.

	PU_1	PU_2	VI_1	VI_2
ODF	1 ^{er}	2 ^e	4 ^e	3 ^e
Module d'élasticité vibratoire	1 ^{er}	1 ^{er}	4 ^e	3 ^e
Masse volumique	2 ^e	1 ^{er}	4 ^e	2 ^e
Synthèse propriétés	1 ^{er}	1 ^{er}	4 ^e	3 ^e
Colle	PU	PU	Vinylique	Vinylique
Pression serrage	4 ^e	2 ^e	3 ^e	1 ^{er}
Décollement	+	-	-	-
Résistance aboutage	2 ^e	1 ^{er}	3 ^e	3 ^e

2.7. Classement mécanique des lots

2.7.1. Exigences pour un usage en structure

Le projet de norme PR NF EN 16351:2020 indique que pour classer mécaniquement un lot de lames aboutées, il est nécessaire de classer préalablement le bois les composant selon l'EN 14081-1:2016 d'une part, et de classer les aboutages par des essais de type initiaux et en contrôle de production en usine d'autre part. Les valeurs de résistance à la flexion ($f_{m,0,k}$), de rigidité ($E_{m,0,mean}$) et de masse volumique (ρ_k) en fonction des classes de bois feuillus données dans l'EN 338:2016 sont rappelées dans le Tableau 4.7.

La classe de résistance d'une lame aboutée correspond alors à celle des courçons de bois qui la composent à condition que la résistance des aboutages réponde à l'exigence de l'équation 4.12 donnée au §4.1.3 du PR NF EN 16351:2020. Les valeurs de résistance caractéristique des aboutages ($f_{m,j,k}$) en fonction des classes du bois sont données dans le Tableau 4.7.

$$f_{m,j,k} > f_{m,0,k} + 8 \text{ MPa} \quad (\text{équation 4.12})$$

Tableau 4.7 : Valeurs de résistance, de rigidité et de masse volumique du bois feuillus pour plusieurs classes de résistance. Valeurs de résistance des aboutages associées aux classes de résistance des bois aboutés.

Classe	D18	D24	D27	D30	D35	D40	D45	D50
Exigences pour le bois de feuillu testés sur chant (EN 338:2016)								
$f_{m,0,k}$ (MPa)	18	24	27	30	35	40	45	50
$E_{m,0,mean}$ (GPa)	9,5	10,0	10,5	11,0	12,0	13,0	13,5	14,0
ρ_k (kg/m ³)	475	485	510	530	540	550	580	620
Exigences pour les aboutages (NF EN 16351:2021 encadrant les résineux)								
$f_{m,j,k}$ (MPa)	26	32	35	38	43	48	53	58

2.7.2. Classement mécanique des lots testés

Les valeurs de rigidité moyenne des courçons obtenues par mesure vibratoire ainsi que leurs valeurs caractéristiques de masse volumique (Tableau 4.8) peuvent être utilisées pour estimer la classe de résistance mécanique des bois utilisés pour la fabrication des lames, dans la mesure où ils vérifieraient la valeur de résistance caractéristique de la classe, ce qui est une hypothèse réaliste étant donné le procédé de purge des nœuds menant à la production de ces courçons. Ainsi, les courçons des lots PU pourraient être au mieux classés D35 tandis que ceux des lots VI_1 et VI_2 seraient au mieux respectivement D24 et D30.

A l'exception du lot PU_2, la classe de résistance des aboutages est inférieure à celle supposée des courçons. Cela a pour conséquence directe de limiter la classe de résistance des lames aboutées. Ainsi, sous réserve que les courçons de chaque lot respectent la condition de résistance de la classe annoncée pour le lot considéré, les lames des lots PU_1, PU_2, VI_1 et VI_2 sont respectivement de classe D30, D35, D18 et D18. Tous lots confondus, les lames aboutées sont de classe D27.

Tableau 4.8 : Valeurs de rigidité, de masse volumique et de résistance des aboutages des lots testés.

Lot	PU_1	PU_2	VI_1	VI_2	Total
Courçons					
Evib,0,mean (GPa)	12,6	12,2	10,1	11,2	11,8
μ_k (kg/m ³)	591	646	539	612	596
Classe supposée du bois	D35	D35	D24	D30	D30
Aboutages					
f_{m,j,k} (MPa)	41,4	43,3	31,6	31,8	36,9
Classe des aboutages	D30	D35	D18	D18	D27

2.7.3. Exigences pour un usage en menuiserie

Pour un usage non structurel, la norme expérimentale XP CEN/TS 13307-2:2010 indique que la valeur du 5^e percentile de la résistance d'un lot d'aboutages, calculé selon l'équation 4.13, doit être supérieure à 17 MPa.

$$f_{m05} > \overline{f_m} - 1,70 \cdot S_{f_m} \quad (\text{équation 4.13})$$

Où $\overline{f_m}$ est la résistance moyenne d'un lot d'aboutage et S_{f_m} l'écart type de ce lot.

Les valeurs de f_{m05} des lots donnés dans le Tableau 4.9 montrent que tous les lots d'aboutages respectent la condition pour un usage non structurel.

Tableau 4.9 : Valeurs du 5^e percentile de résistance des lots d'aboutages calculés selon XP CEN/TS 13307-2:2010

Lot	PU_1	PU_2	VI_1	VI_2
f_{m05} (MPa)	41,3	43,1	31,8	31,3

3. Contrôle non destructif d'aboutages

3.1. Formule de Hankinson

La formule empirique de Hankinson (redonnée à l'équation 4.14) permet d'obtenir, à partir des données d'ODF, des informations sur la rigidité et la résistance (Hankinson 1921, DeBonis et Bodig 1975).

$$f(\theta) = \frac{f_0 \cdot f_{90}}{f_0 \cdot \sin^2(\theta) + f_0 \cdot \cos^2(\theta)} \quad (\text{équation 4.14})$$

Avec $f(\theta)$ la propriété mécanique considérée (module d'élasticité ou résistance mécanique) pour une fibre à une orientation θ ; f_0 la valeur de la propriété mécanique dans la direction de la fibre ; f_{90} la valeur de la propriété mécanique perpendiculairement à la direction de la fibre.

Cette formule a été appliquée aux valeurs locales $\alpha_{i,Face}$ et $\beta_{i,Rive}$ des cartographies d'angles, définies au §2.3.1 de ce chapitre, pour calculer des résistances locales en prenant f_0 égal à 100 MPa et f_{90} égal à 10 MPa (le choix d'un ratio 10 entre ces deux valeurs est en cohérence avec les études de sensibilité de ces paramètres sur un modèle type Hankinson présentées dans Faydi, 2017). Ces calculs ont été fait pour les cartographies d'angles des faces, des rives et des angles 3D. Cette façon d'utiliser l'information locale d'ODF pour déterminer des valeurs de résistance locale a montré son potentiel, notamment dans Viguier *et al.* (2015), Viguier *et al.* (2016) et Faydi (2017).

Comme pour l'ODF, chaque aboutage a été caractérisé par trois valeurs moyennes de résistance appelées $fHank_{i,Faces}$, $fHank_{i,Rives}$ et $fHank_{i,3D}$ et calculés de la même manière que $ODF_{i,Faces}$, $ODF_{i,Rives}$ et $ODF_{i,3D}$, i étant l'aboutage considéré (équation 4.15, équation 4.16 et équation 4.17).

$$fHank_{i,Face\ k} = \frac{1}{l \cdot 2Lx} \sum_{y=1}^l \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} f(\alpha_{xy,Face\ k}) + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} f(\alpha_{xy,Face\ k}) \right) \quad (\text{équation 4.15})$$

$$fHank_{i,Rive\ k} = \frac{1}{e \cdot 2Lx} \sum_{z=1}^e \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} f(\beta_{xz,Rive\ k}) + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} f(\beta_{xz,Rive\ k}) \right) \quad (\text{équation 4.16})$$

Avec k l'indice de la face et de la rive (égal à 1 ou 2).

$$fHank_{i,3D} = \frac{1}{e \cdot l \cdot 2Lx} \sum_{z=1}^e \sum_{y=1}^l \left(\sum_{x=x_i-Lx}^{x_i} f(\gamma_{xyz}) + \sum_{x=x_i+10}^{x_i+10+Lx} f(\gamma_{xyz}) \right) \quad (\text{équation 4.17})$$

3.2. Principe de la régression linéaire multiple

Pour prédire la résistance des aboutages en fonction de différents paramètres à disposition, il a été choisi d'utiliser des régressions linéaires multiples selon l'équation 4.18.

$$Y_i = a_0 + a_1 \cdot X_{i,1} + a_2 \cdot X_{i,2} + \dots + a_k \cdot X_{i,k} + \varepsilon_i \quad (\text{équation 4.18})$$

La résistance expérimentale des aboutages Y_i est expliquée en fonction de données d'entrées X_i dont les coefficients multiplicateurs a_i sont tels que l'erreur quadratique entre l'ensemble des valeurs prédites et les valeurs expérimentales correspondantes soit minimisée. La résistance prédite \hat{Y}_i est alors calculée selon l'équation 4.19.

$$\hat{Y}_i = a_0 + a_1 \cdot X_{i,1} + a_2 \cdot X_{i,2} + \dots + a_k \cdot X_{i,k} \quad (\text{équation 4.19})$$

L'erreur de prédiction est notée ε_i . La qualité de la prédiction peut être évaluée par le calcul de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2} \quad (\text{équation 4.20})$$

3.3. Relations entre propriétés mesurées et résistance des aboutages

La Figure 4.14 présente les corrélations entre la résistance des aboutages et divers paramètres, sans distinction de lot :

- $fHank_{i,Faces}$, pour $Lx = 63$ mm,
- $fHank_{i,Rives}$, pour $Lx = 63$ mm,
- $fHank_{i,2D}$, pour $Lx = 63$ mm, calculé à partir d'une régression linéaire multiple entre la résistance des aboutages et les paramètres $fHank_{i,Faces}$ et $fHank_{i,Rives}$ (équation 4.21).
- $fHank_{i,3D}$, pour $Lx = 63$ mm,
- Le module d'élasticité moyen des deux courçons de l'aboutage, noté $E_{vib_aboutage}$.
- La masse volumique moyenne des deux courçons de l'aboutage, notée $\rho_{aboutage}$.

$$fHank_{i,2D} = -7,96 + 0,48 \cdot fHank_{i,Faces} + 0,27 \cdot fHank_{i,Rives} \quad (\text{équation 4.21})$$

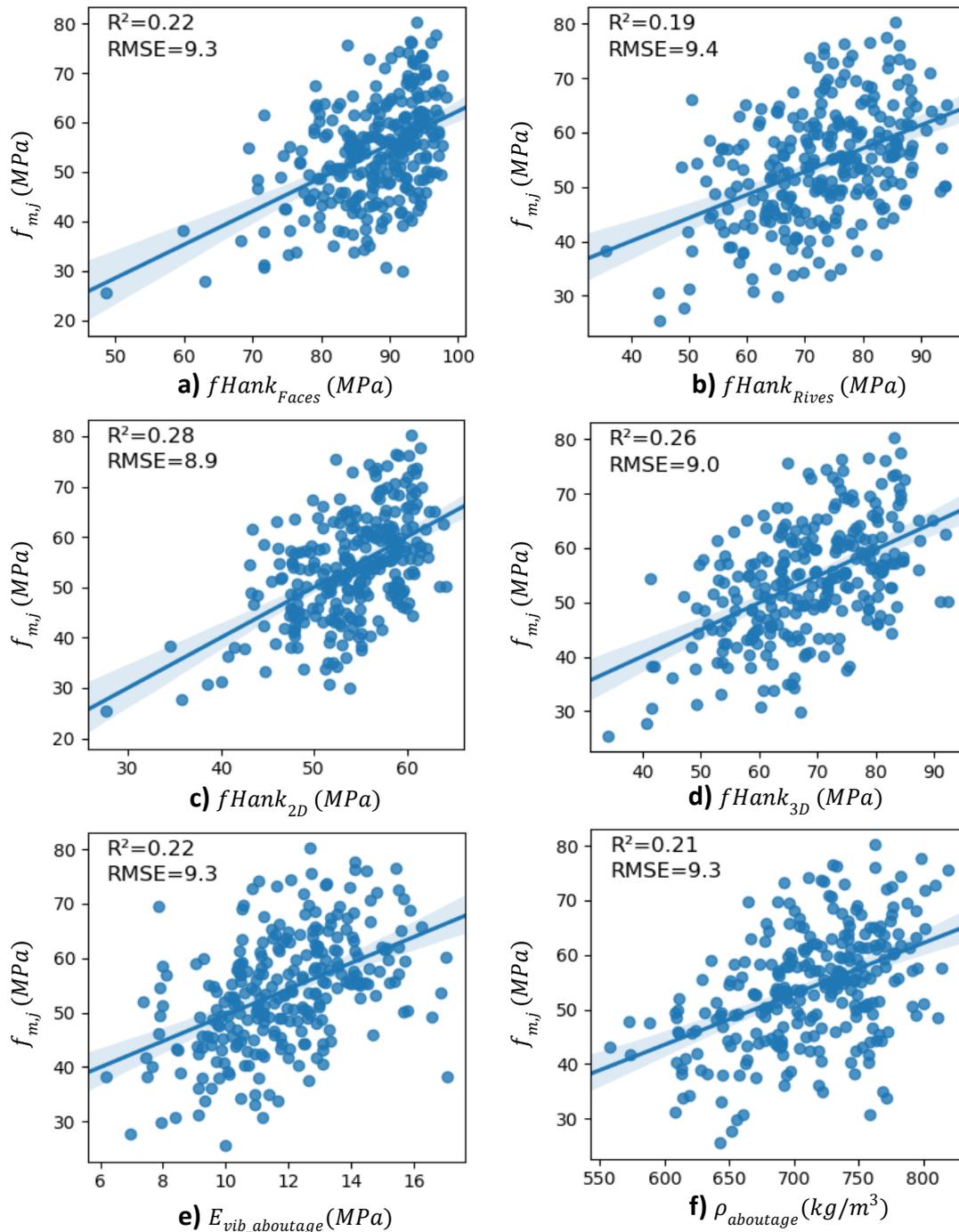


Figure 4.14 : Corrélations, tous lots confondus, entre la résistance des aboutages et les $fHank$ des aboutages (a, b, c, d), le module d'élasticité vibratoire (e) et la masse volumique (f). Les RMSE sont exprimés en MPa.

Globalement, les valeurs de R^2 et de RMSE de ces six corrélations sont semblables. Le coefficient de détermination entre $fHank_{i,Faces}$ et la résistance des aboutages est très similaire à celui présenté dans Faydi (2017) pour une corrélation entre la moyenne des résistances prédites grâce aux données locales d'ODF et la résistance statique ($R^2 = 0,23$). En revanche, les RMSE correspondant de Faydi (2017) sont environ deux fois plus grands que ceux des corrélations de la Figure 4.14. Cela peut s'expliquer par le fait que les plus gros défauts ont été purgés avant aboutage et que la zone d'essais est assez restreinte autour des aboutages. Une des causes possibles à la dispersion des points des

fHank (Figure 4.14.a.b.c.d) pourrait être l'erreur de mesure de l'ODF qui, pour rappel, est entre 1° et 3° pour le chêne, ce qui peut entraîner une incertitude pouvant atteindre 14 % pour l'estimation de la résistance avec la formule de Hankinson.

La combinaison des mesures d'ODF sur les faces et les rives, que ce soit avec le calcul 3D donnant $fHank_{i,3D}$ ou la régression donnant $fHank_{i,2D}$, permettent une légère amélioration de la corrélation avec la résistance des aboutages. La corrélation entre la résistance des aboutages et le paramètre $fHank_{i,2D}$ (Figure 4.14.f) est celle pour laquelle le coefficient de détermination R^2 est le plus élevé ($R^2 = 0.28$) et le RMSE⁸ le plus faible (RMSE = 8,9 MPa).

Les corrélations avec le module d'élasticité vibratoire et la masse volumique (Figure 4.14.d-e) sont sensiblement les mêmes avec respectivement un R^2 de 0,22 et 0,21 et des RMSE de 9,3 MPa. Le coefficient de détermination trouvé pour le module d'élasticité vibratoire se rapproche de celui donné dans Viguier (2015) qui était aussi de 0,22 entre le module d'élasticité longitudinal moyen et la résistance en flexion sur chant de sciages de chêne. En revanche, il ne trouvait pas de corrélation entre la masse volumique des sciages et leur résistance mécanique alors que, pour le cas des aboutages, il y en aurait une. De fait cette corrélation est avérée pour du bois sans défaut. Or, les bois utilisés dans cette étude avaient moins de défauts que les avivés testés par Viguier (2015).

3.4. Influence du paramètre Lx

La Figure 4.15 présente l'évolution, en fonction de la distance Lx, du coefficient de détermination entre la résistance et les paramètres $fHank_{Faces}$, $fHank_{Rives}$, $fHank_{3D}$ et $fHank_{2D}$. Pour ces deux derniers paramètres, le R^2 est maximal pour une distance Lx de 30 mm. Pour $fHank_{Rives}$, la corrélation s'améliore jusqu'à une distance de 35-40 mm tandis que pour $fHank_{Faces}$, il décroît de façon quasi constante. Au-delà de 40 mm, le R^2 chute significativement pour tous les paramètres.

Du fait de ces résultats, dans la suite de l'étude, la valeur de Lx retenue sera de 30 mm et non plus 63 mm (valeur initialement basée sur la distance entre appuis de l'essai de flexion 4 points).

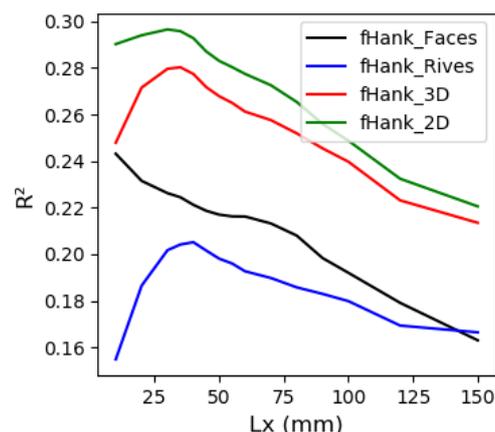


Figure 4.15 : Evolution du coefficient de détermination R^2 entre la résistance des aboutages et les paramètres $fHank$ en fonction de la distance Lx de l'aboutage sur laquelle sont moyennées les différentes valeurs locales $fHank$.

⁸ RMSE entre la résistance réelle et la résistance prédite avec l'équation de la régression linéaire

3.5. Effet lot

Pour rappel, l'ensemble des aboutages testés sont divisibles en quatre lots différenciés par leurs propriétés de collage. Comme évoqué au §2.6 de ce chapitre, il semblerait que le type de colle ainsi que la qualité de colle aient eu une influence sur la résistance finale des aboutages, alors que ce n'est pas le cas de la pression de serrage. Aussi ce dernier paramètre ne sera pas considéré dans les données d'entrée des régressions linéaires multiples (présentées au §3.6 de ce chapitre). Ainsi, en l'absence de données quantifiées, le type et la quantité de colle seront considérés de la façon suivante :

- Le type de colle par un paramètre défini arbitrairement égal à 1 pour la colle PU et égal à 2 pour la colle vinylique (Tableau 4.10).
- La quantité de colle moyenne par un paramètre défini égal à 0,9 pour le lot PU_1, égal à 1,1 pour le lot PU_2 et égal à 1 pour les deux lots VI (Tableau 4.10), de manière à traduire les observations qualitatives.

Tableau 4.10 : Paramétrage des propriétés de collage

Lot	PU_1	PU_2	VI_1	VI_2
Type colle	1	1	2	2
Quantité Colle	0,9	1,1	1	1

3.6. Régressions linéaires multiples

Le Tableau 4.11 présente plusieurs cas de régressions linéaires multiples selon différentes données d'entrée.

Cinq critères ont été calculés et permettent de juger de la qualité de la prédiction :

- **Le coefficient de détermination R^2** donne une indication sur la qualité de la corrélation.
- **Le RMSE** donne l'erreur moyenne de prédiction.

Les trois paramètres suivants sont relatifs au classement mécanique pour la résistance des aboutages seule.

- **Le seuil** correspond à la valeur prédite limite en dessous de laquelle des aboutages sont déclassés par rapport à un classement D35 du lot d'aboutages. Sa détermination s'opère de manière itérative : une première valeur de 20 MPa a été choisie puis augmentée progressivement jusqu'à ce que le fractile à 5 % de la résistance réelle des aboutages classés (Z2 et Z4 sur la Figure 4.16) soit supérieur ou égal à la limite de résistance des aboutages de la classe visée ($LimD30 = 38$ MPa ou $LimD35 = 43$ MPa sur la Figure 4.16). Les aboutages pointés en Z4 représentent donc 5 % des aboutages classés.
- **Le rendement** est défini comme le nombre d'aboutages classés (ceux des zones Z2 et Z4) divisé par le nombre total d'aboutages. Cela permet d'avoir une indication sur la quantité d'aboutages conservés et sur la perte matière conséquente au classement machine.
- **La justesse** est définie comme le nombre d'aboutages correctement classés (ceux des zones Z2) et déclassés (zone Z3) divisé par le nombre total d'aboutages. A la différence du rendement, la justesse prend en compte le fait que le modèle déclassé des aboutages dont la

résistance est réellement inférieure à la limite de la classe visée. La perte réelle d'aboutages correspond à ceux écartés et dont la résistance est supérieure à la limite de la classe visée (zone Z1), ce qui arrive pour les classements D35 des aboutages (Figure 4.16.c et d).

Tableau 4.11 : Résultats des simulations de régressions linéaires pour $L_x = 30$ mm. Le calcul des paramètres testés prend en compte les deux courçons formant l'aboutage.

Désignation	Données d'entrée	R ²	RMSE (MPa)	Seuil D35 (MPa)	Rendement	Justesse
2Da	fHank_Faces & fHank_Rives	0,296	8,8	52,5	62,5 %	71,0 %
2Da_MVa	fHank_Faces & fHank_Rives & ρ _aboutage	0,481	7,6	51,7	66,9 %	74,6 %
2Da_MVa_Eviba	fHank_Faces & fHank_Rives & ρ _aboutage & Evib_aboutage	0,482	7,6	51,6	66,9 %	74,6 %
2Da_C_Q	fHank_Faces & fHank_Rives & Type colle & Quantité colle	0.514	7.3	48.4	77.6 %	83.8 %
2Da_MVa_C_Q	fHank_Faces & fHank_Rives & ρ _aboutage & Type colle & Quantité colle	0,572	6,9	47,6	80,9 %	87,9 %
3Da	fHank_3D	0.280	8.9	52.4	59.9 %	68.4 %
3Da_MVa	fHank_3D & ρ _aboutage	0.451	7.8	50.6	72.1 %	79.0 %
3Da_C_Q	fHank_3D & Type colle & Quantité colle	0.507	7.4	48.2	76.8 %	83.8 %
3Da_MVa_C_Q	fHank_3D & ρ _aboutage & Type colle & Quantité colle	0.557	7.0	48.0	77.9 %	84.9 %

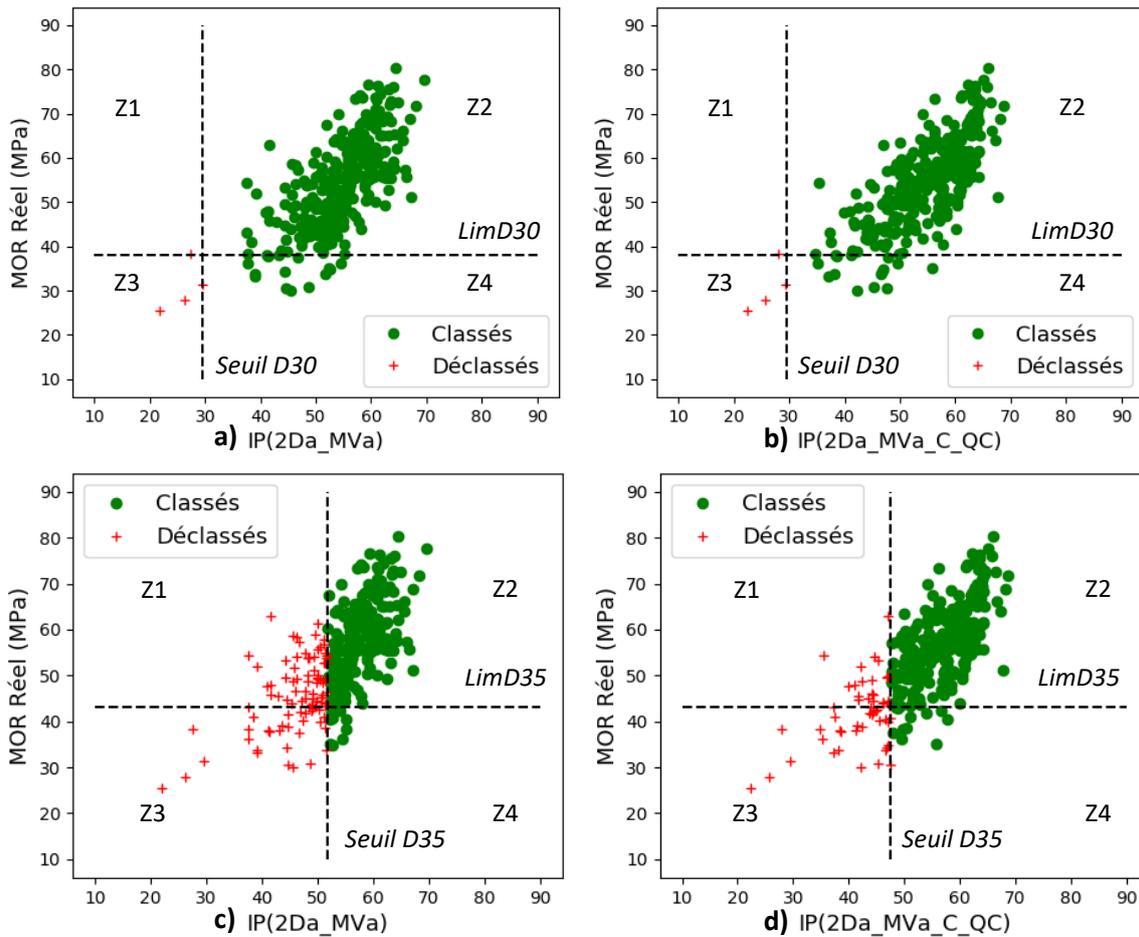


Figure 4.16 : Classement D30 (a ; b) et D35 (c ; d) des aboutages selon les simulation 2Da_MVa (à gauche) et 2Da_MVa_C_Q (à droite).

De ces résultats, plusieurs observations peuvent être faites :

- a) Il ressort que les combinaisons de paramètres où figurent les angles en 2D donnent de meilleurs résultats que lorsque ces angles sont convertis préalablement en 3D. Cela peut être dû à l'ajout de l'erreur générée par la modélisation dans l'espace de l'ODF, et plus particulièrement au moment de l'interpolation des angles entre les deux rives (cf. 2.3.2.3 de ce chapitre).
- b) Un autre résultat intéressant est l'influence de la masse volumique des courçons sur la qualité de la prédiction avec un R^2 passant de 0,296 à 0,481 pour les combinaisons 2D_a et 2D_a_MV_a, et de 0,280 à 0,451 pour les combinaisons 3D_a et 3D_a_MV_a. La prise en compte de la masse volumique minimale ou maximale des deux courçons au lieu de la moyenne donne des résultats légèrement moins bons⁹. L'amélioration se fait aussi sentir sur le rendement du classement et la justesse de la méthode de classement permettant ainsi d'atteindre des valeurs respectives de 72 % et 79 % avec les angles 3D.

⁹ Les résultats de ces deux simulations ne sont pas exposés dans ce manuscrit.

- c) L'ajout de l'information du module d'élasticité vibratoire moyen des courçons de l'aboutage n'a pas d'influence sur la prédiction. Le module d'élasticité semble expliquer la résistance des aboutages que la moins bien masse volumique. C'est, malgré tout, un résultat assez surprenant qui mériterait d'être vérifié sur une autre campagne d'essais où les mesures sur les courçons seraient faites avant aboutage.
- d) L'intégration des paramètres de collage entraîne une amélioration de la prédiction et du classement (régressions $2D_a_C_Q$, $2D_a_MV_a_C_Q$, $3D_a_C_Q$ et $3D_a_MV_a_C_Q$ du Tableau 4.11). Les régressions avec la masse volumique donnent là aussi les meilleurs critères de qualité. Le coefficient de détermination de la corrélation atteint alors 0,57 avec un rendement de 81 % et une justesse de 88 % pour la régression $2D_a_MV_a_C_Q$. Les paramètres de collage étant constants au sein de chaque lot, leur prise en compte revient à ajouter un offset propre à chaque lot. Cet effet lot met en lumière l'importance, initialement sous-estimé, des conditions de fabrication des aboutages. Cela a un effet important sur la justesse du classement qui peut chuter de 6 à 12 %. Les régressions $2D_a_MV_a_C_Q$ et $3D_a_MV_a_C_Q$ sont certainement optimistes et la réalité se situerait un peu plus en deçà.
- e) Le manque d'aboutage de faible résistance (< 40 MPa) a pour effet de donner de très bonnes performances des méthodes de prédiction pour un classement D30 (Figure 4.16). En réalité, ce manque de valeurs faibles ne permet pas de conclure de l'efficacité des méthodes de prédiction pour cette classe de résistance. En revanche, pour un classement D35, l'échantillonnage est suffisamment représentatif.

4. Application à la sélection de bois à abouter

La modélisation de la résistance des aboutages établie précédemment, tient compte de l'état final de l'aboutage, avec la prise en compte des propriétés mécaniques des deux courçons aboutés, et reste applicable industriellement à un cas de contrôle non destructif de lames aboutées avant la composition de poutres lamellées-collées, de panneaux CLT ou autres éléments structurels en bois massifs reconstitués. Ecarter à ce stade des lames défectueuses entraînerait des pertes matières importantes et une mauvaise productivité. Au mieux, il pourrait être fait un tri des lames qui, selon leurs performances et les caractéristiques des produits visées, pourraient être affectées à l'usage qui leur est le mieux adapté. Mais il resterait toujours le fait qu'une lame ayant un aboutage défaillant se retrouverait déclassée alors que, sans celui-ci, elle aurait pu être mieux classée. Pour produire des lames aboutées de qualité homogène, il serait plus judicieux d'identifier avant le procédé d'aboutage les courçons critiques pour les écarter ou purger la zone de bois défectueuse et ainsi classer les courçons en fonction des différentes classes souhaitées. Mieux encore, un bénéfice plus grand apparaît dans l'intégration de cette problématique d'aboutage dès le procédé de fabrication des courçons à abouter, et selon les procédés mis en œuvre, cela peut être avant ou après le séchage des avivés. Ainsi, avant de définir une méthode de sélection des bois à abouter, il est nécessaire de réaliser un ajustement du modèle de prédiction de la résistance des aboutages, en considérant non plus les deux courçons déjà aboutés, mais celui à l'origine de la rupture.

4.1. Adaptation du modèle de prédiction de la résistance des aboutages

L'adaptation du modèle de prédiction de la résistance des aboutages consiste à considérer uniquement les propriétés physiques et mécaniques du courçon responsable de la rupture. Lors des essais de flexion réalisés, il a été possible de déterminer, pour 221 aboutages, le courçon de bois qui a cédé ou du moins celui qui paraissait être à l'origine de la rupture. De nouvelles régressions linéaires multiples ont été réalisées avec, cette fois-ci, non plus les propriétés moyennes d'ODF et de masse volumique des deux courçons aboutés, mais avec celles de celui qui a cassé.

4.1.1. Influence de Lx

L'influence de la distance Lx (Figure 4.17) est similaire au cas précédent (§3.4 de ce chapitre), à la différence près que la corrélation de fHank_{Faces} chute plus rapidement. La valeur de Lx = 30 mm sera conservée.

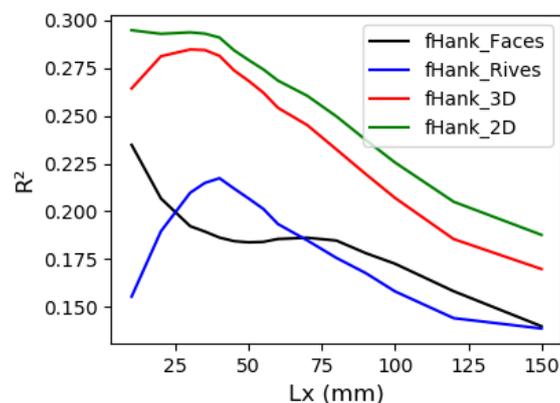


Figure 4.17 : Evolution du coefficient de détermination R^2 entre la résistance des aboutages et les paramètres fHank du courçon qui a cassé, en fonction de la distance Lx de l'aboutage sur laquelle sont moyennées les différentes valeurs fHank.

4.1.2. Régressions linéaires multiples

La Figure 4.18 présente des résultats de prédictions de résistance d'aboutages par régression linéaire multiple. La population d'aboutages testée a été limitée aux 221 dont la rupture a pu être attribuée à l'un des courçons.

Les coefficients de détermination sont comparables en considérant le courçon de la rupture ou ceux de l'aboutage (respectivement "rup" et "ab" sur Figure 4.18). Une légère baisse est cependant observée pour les couples 2D_MV et 3D_MV. Cela vient de la moins bonne corrélation entre la masse volumique du courçon qui a cassé et la résistance de l'aboutage (Figure 4.19).

Le rendement et la justesse sont toujours soit plus élevés pour la configuration "rup", soit équivalents entre les deux configurations. Seule la régression 2D_MV_C_Q présente des pourcentages légèrement plus faibles. Pour la régression 2D_MV, bien que la corrélation soit moins bonne pour le cas "rup", le rendement et la justesse sont meilleurs pour ce cas d'un peu plus de 5 points.

Enfin, les résultats des régressions avec les angles 2D donnent encore des résultats légèrement meilleurs que ceux avec la modélisation en 3D de l'ODF.

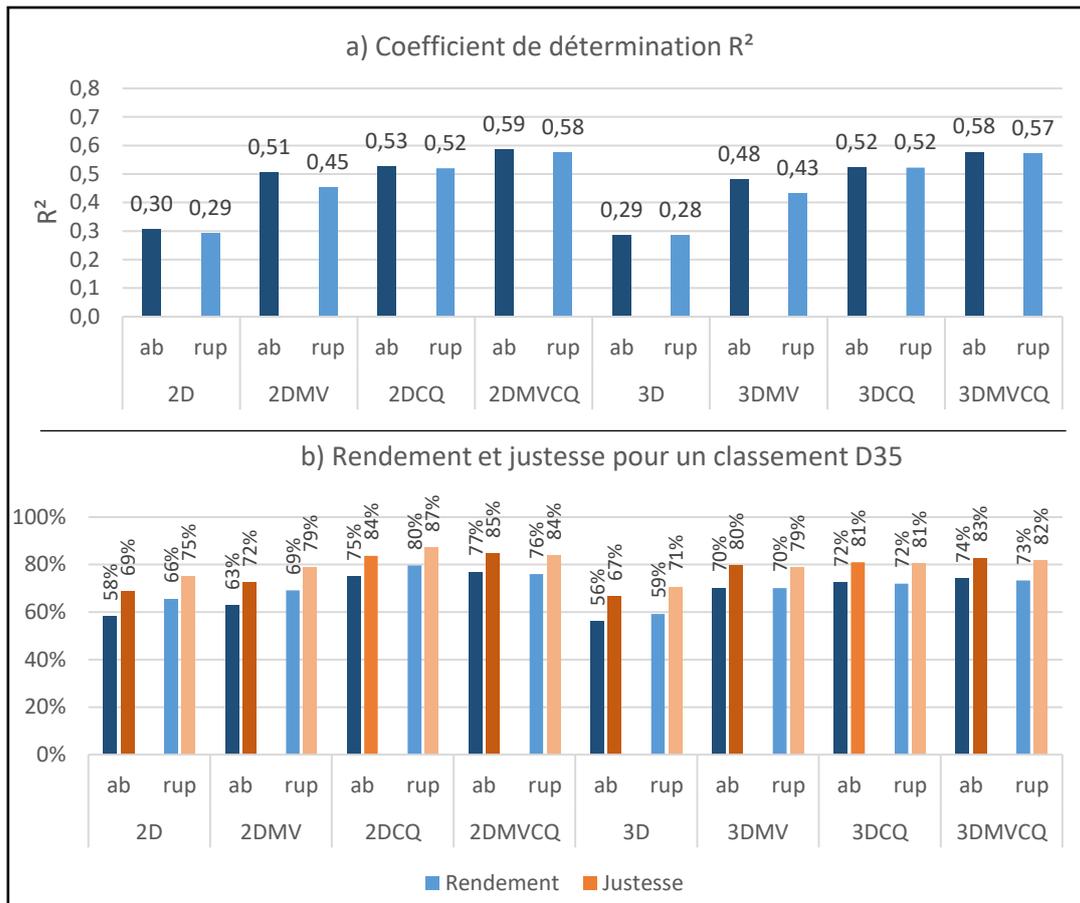


Figure 4.18 : Comparaison de prédiction avec la considération des deux courçons (ab) et de celui qui a cassé (rup). a) : R²; b) Rendement et justesse. La population d'aboutages testée est restreinte aux aboutages dont la casse a pu être affectée à l'un des deux courçons.

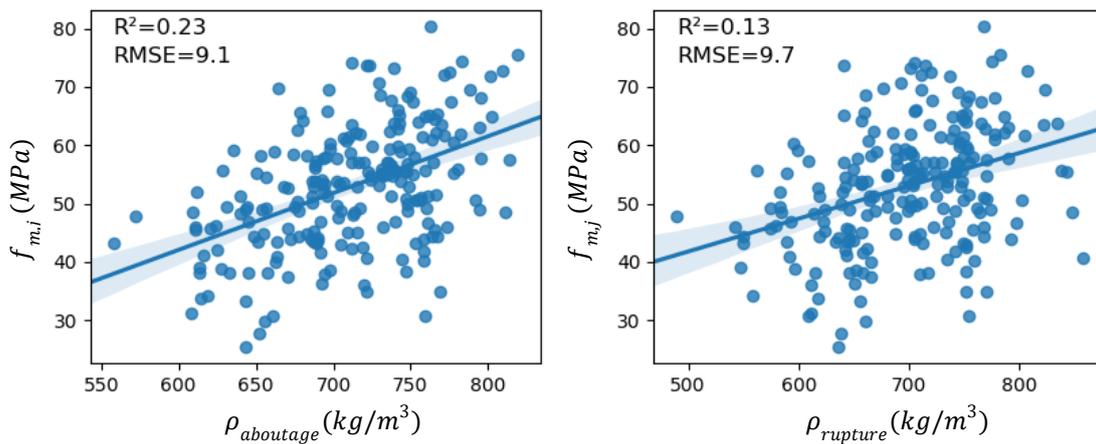


Figure 4.19 : Comparaison des corrélations entre masse volumique et résistance. a) : masse volumique moyenne des deux courçons; b) masse volumique de celui qui a cassé.

4.1.3. Choix d'un modèle

Tout d'abord, compte tenu des résultats décrits précédemment, une première sélection retiendra les régressions intégrant les données d'angles en 2D. Une évolution de la modélisation des angles en 3D tenant compte de la position des nœuds devrait conduire à l'intégration des angles en 3D plutôt qu'en 2D (cf. §2.3.2.3). Ensuite, le choix du modèle dépendra des données disponibles et de l'implantation du scanner dans le processus de production de lame aboutées. Plusieurs situations¹⁰ :

- a) Cas de la **sélection des courçons** juste avant aboutage avec un scanner positionné après le premier rabotage permettant d'obtenir l'ODF sur les faces et rives des courçons ainsi que leurs dimensions. Un dispositif permettant de mesurer la masse des éléments en ligne est envisageable de sorte à obtenir la masse volumique des courçons. Sachant les conditions de collage, le choix du modèle peut se porter sur la corrélation $2D_a_MV_a_C_Q$ ou le pendant, moins optimiste, $2D_a_MV_a$. Industriellement, le scanner serait implanté juste avant le tri des courçons à abouter pour faire uniquement du contrôle et éjecter les courçons défectueux du flux de production.
- b) Cas d'une **ligne de débit d'avivés secs**. L'intégration d'un scanner sur ce type de ligne permettrait d'une part la détection des défauts (nœuds et fentes critiques) et des qualités du bois et d'autre part la commande du tronçonnage de l'avivé en courçons de qualité homogène. Or, plutôt que d'avoir à scanner à nouveau les courçons produits pour se ramener au cas a), il apparaît plus judicieux d'estimer, avant rognage de l'avivé, si les courçons débités formeront des aboutages de tenue mécanique suffisante et d'adapter le rognage en fonction. Techniquement, cela peut être réalisé grâce à l'ajout d'un algorithme, complémentaire à ceux déjà présents dans les logiciels du scanner, utilisant les corrélations $2D_a_MV_a$ ou $2D_a_MV_a_C_Q$, le module ODF du scanner permettant l'obtention des données d'angles 2D et la masse volumique pouvant être obtenue par pesée ou bien par mesure RX si implantés dans le scanner.
- c) Cas d'une **ligne de débit d'avivés verts**. Même argumentation que la situation b) à la différence que la détermination de la masse volumique n'est pas aisée en première transformation. Elle serait alors considérée comme inconnue, ce qui orienterait vers l'utilisation des corrélations $2D_a$ ou $2D_a_C_Q$.

¹⁰ Les situations énoncées se veulent théoriques et ne prennent pas en compte les problématiques techniques pouvant leur être associées. Il est admis qu'une solution existe ou pourra être développée à chaque problème technique que peuvent soulever ces situations.

4.2. Optimisation du débit d'avivés frais de sciage en courçons pour l'aboutage

En se plaçant dans le contexte d'une usine de transformation du chêne dédiée à la fabrication de lames aboutées, l'intégration au plus tôt de l'estimation de la résistance des aboutages pourrait offrir un potentiel de gain en rendement matière. Cela rejoint la situation c) exposée au paragraphe précédent. Une méthode de traitement des données d'ODF, intégrant la notion de résistance des aboutages, a été développée afin de détecter les zones d'un avivé qui seraient problématiques pour la réalisation d'aboutages suffisamment résistants et de proposer un plan de tronçonnage en conséquence.

4.2.1. Enoncé du problème et principe d'étude

Lorsqu'un avivé est scanné, le scanner possède un ou plusieurs algorithmes permettant de déterminer à quelle(s) position(s) il faut le tronçonner. Ces positions sont choisies de façon à optimiser les rendements matière et économique. Or, il s'agit ici de vérifier si les extrémités des deux courçons obtenus suite à la coupe pourront former des aboutages de résistance minimale souhaitée. Pour ce faire, un algorithme a été développé afin de déterminer, pour toutes les positions de tronçonnage $x_{tronçonnage}$ le long de la planche, si oui ou non un aboutage suffisamment résistant pourra être usiné dans les deux nouvelles extrémités générées par la coupe (Figure 4.20). Ces deux extrémités, notées $ExtG_x$ pour "extrémité gauche" et $ExtD_x$ pour "extrémité droite", sont à considérer de façons totalement indépendantes.

L'algorithme prend en considération le fait qu'une partie du bois (Z_A) est déchetée juste avant l'usinage des entures, dont la profondeur a été définie à 10 mm. La distance d'étude L_x sur laquelle sont prises en compte les mesures d'ODF pour la prédiction de la résistance se situe donc à 15 mm de la position étudiée (Figure 4.20).

Ainsi, pour une position $x_{tronçonnage}$ donnée, l'avivé est virtuellement tronçonné et un calcul de résistance d'un potentiel aboutage est fait sur chaque extrémité $ExtG_x$ et $ExtD_x$. Ces deux valeurs sont ensuite comparées au critère de résistance correspondant au modèle de prédiction et selon que la résistance estimée lui est supérieure ou inférieure, l'extrémité est respectivement en capacité ou en incapacité, de former un aboutage suffisamment résistant.

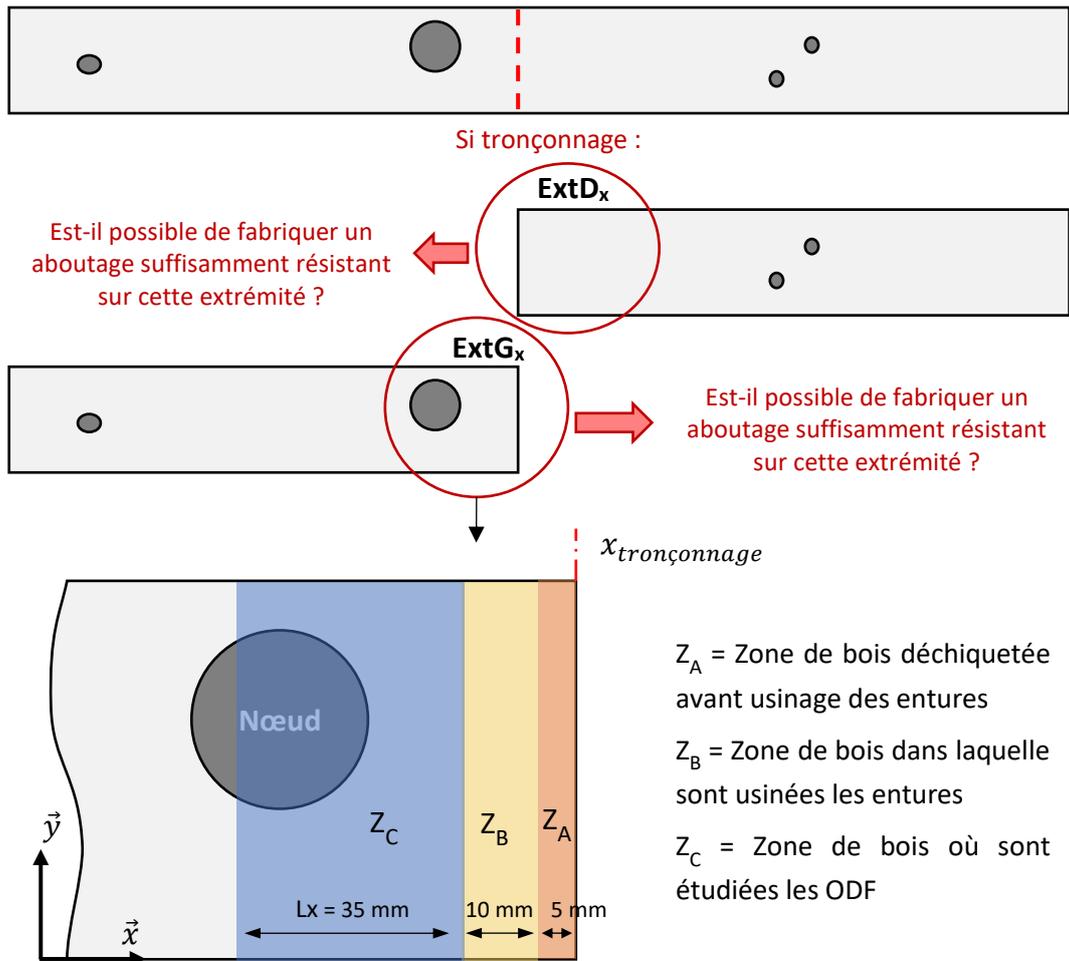


Figure 4.20 : Schématisation du problème de tronçonnage d'un avivé en tenant compte de la résistance des futurs aboutages.

4.2.2. Création d'un « plan de tronçonnage sur critères pour l'aboutage »

Cette étude, étendue sur toute la longueur de l'avivé, a pour résultat la définition des zones où l'avivé peut ou pas être tronçonner, prenant la forme d'un « plan de tronçonnage sur critères pour l'aboutage », appelé plus simplement « plan de tronçonnage », prenant en compte deux critères :

- i. La résistance des aboutages.
- ii. La longueur minimale de courçon de 250 mm, imposée par les caractéristiques de l'abouteuse des Bois Profilés¹¹. Ce critère a été pris en compte uniquement pour les deux bouts de l'avivé. Dans la situation, non prise en compte dans ces travaux, où l'avivé traité doit être tronçonné en au moins trois éléments à abouter, il conviendrait alors de vérifier qu'ils ont la longueur minimale requise. Cet aspect est très souvent déjà intégré dans les machines industrielles.

¹¹ Cette valeur est liée à l'abouteuse et peut varier d'une machine à l'autre.

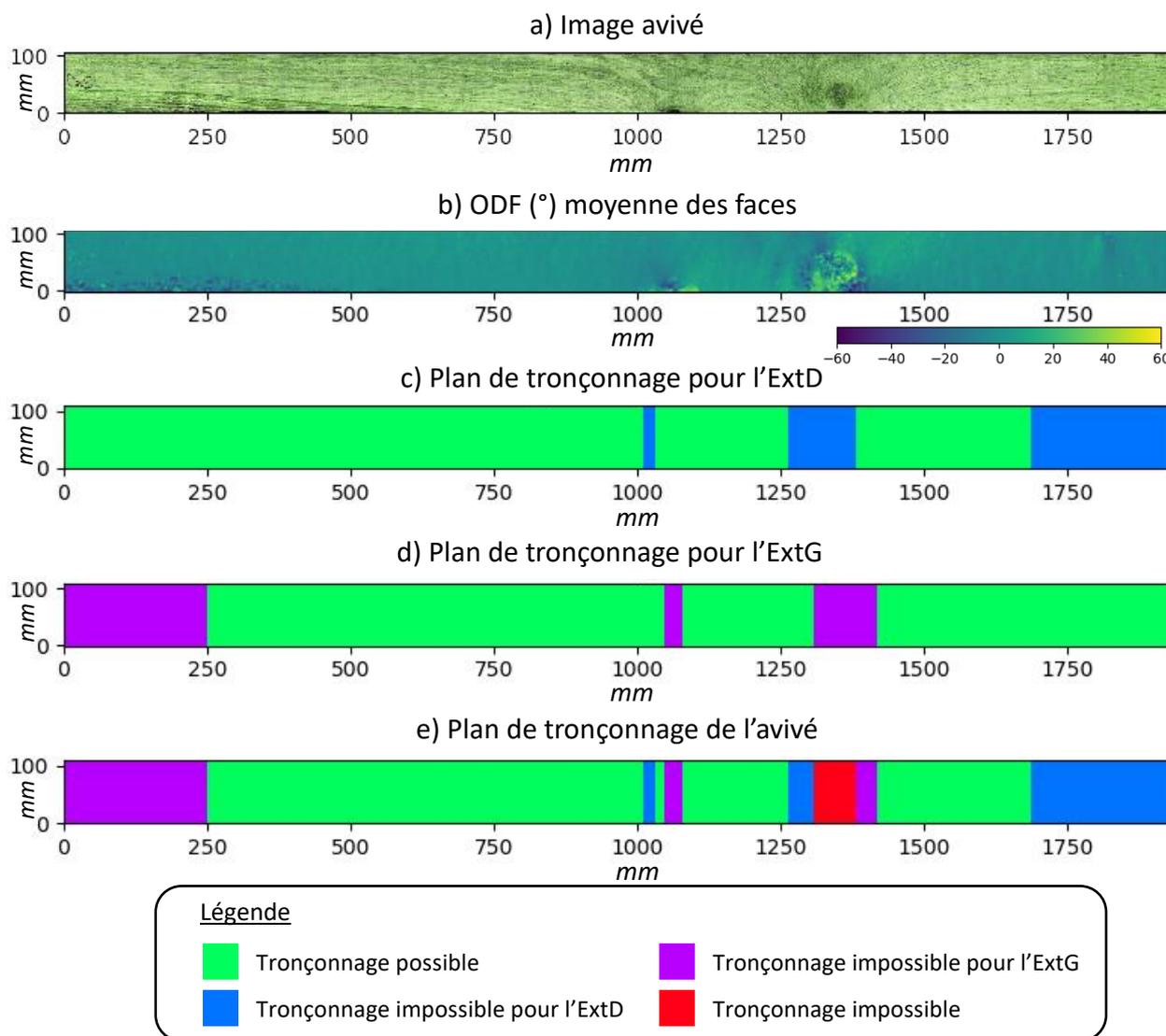


Figure 4.21 : a) Image d'un avivé frais de sciage ; b) ODF moyenne des deux faces de l'avivé, mesurées sur bois vert ; c) Plan de tronçonnage pour l'extrémité à droite de la position de tronçonnage (ExtD) ; d) Plan de tronçonnage pour l'extrémité à gauche de la position de tronçonnage (ExtG) ; e) Regroupement des deux plans de tronçonnage pour former le plan de tronçonnage final de l'avivé. Le code couleur des figures c), d), et e) permet la distinction des différentes zones où le tronçonnage est possible ou pas.

Interprétation des plans de tronçonnage :

- Figure 4.21.c : Plan de tronçonnage pour l'ExtD : Les zones bleues donnent les positions de tronçonnage de l'avivé pour lesquelles l'extrémité du courçon à droite de la coupe ne convient pas pour faire un aboutage de résistance suffisante, au contraire des coupes en zones vertes. Les 250 mm en fin d'avivé sont désignés en bleu car en cas de tronçonnage dans cette zone, le courçon de droite serait trop court pour être abouté.
- Figure 4.21.d : Plan de tronçonnage pour l'ExtG: Les zones violettes donnent les positions de tronçonnage de l'avivé pour lesquelles l'extrémité du courçon à gauche de la coupe ne convient pas pour faire un aboutage de résistance suffisante, au contraire des coupes en zones vertes. Les 250 mm en début d'avivé sont désignés en violet car en cas de tronçonnage dans cette zone, le courçon de gauche serait trop court pour être abouté.

- Figure 4.21.e : Plan de tronçonnage de l'avivé : c'est la réunion des informations contenues dans les plans de tronçonnage pour l'ExtD et l'ExtG. L'intersection des zones bleues et violettes sont représentées en rouge et indiquent qu'en cas de tronçonnage en cette zone, aucune des deux extrémités générées ne sera apte à former un aboutage résistant. En effet, cela reviendrait à former des aboutages directement dans le gros nœud de l'avivé en exemple sur la Figure 4.21. Par ailleurs, en cas de tronçonnage en zone bleue, seule l'extrémité gauche sera en capacité de former un aboutage résistant. De même, en cas de tronçonnage en zone violette, seule l'extrémité droite sera en capacité de former un aboutage résistant.

En pratique, il convient donc d'orienter le tronçonnage en zone verte de façon à s'assurer la production de courçons qui formeront des aboutages ayant la résistance minimale requise. Le plan de tronçonnage de l'avivé serait alors l'information à implémenter dans l'algorithme donnant la décision finale du débit de l'avivé, en recoupant avec les informations de purges de défauts, de zones de qualité du bois, de rendement matière et rendement économique. Pour les avivés débités frais de sciage, il y aurait aussi la possibilité d'ajouter l'information des déformations au séchage.

La méthode de définition des zones pour le tronçonnage d'un avivé telle qu'elle est présentée dans ce chapitre s'applique au débit d'avivé frais de sciage, mais aussi à celui d'avivés secs que la masse volumique soit connue ou non. En effet, si cette dernière est connue, il suffit seulement de changer de formule pour la prédiction de la résistance des aboutages, le principe de l'étude restant le même. Ainsi cette méthode peut aussi s'appliquer au cas de la sélection de courçons.

5. Conclusion

Les travaux de ce chapitre de thèse ont permis de mettre en lumière plusieurs résultats pertinents pour le développement de procédés innovants pour la transformation du chêne.

Tout d'abord, un pas de plus a pu être fait dans la modélisation de l'ODF d'un sciage avec une approche de la définition des angles en 3D. Si l'utilisation des données d'ODF sous cette forme n'a pas donné de meilleurs résultats que la simple approche 2D pour la modélisation de la résistance des aboutages, de possibles améliorations peuvent être apportées avec une réelle détection des nœuds, l'intérêt d'une modélisation de l'ODF des sciages en 3D étant d'approcher au mieux ses propriétés mécaniques réelles pour qu'ils soient valorisés au plus juste.

Ensuite, les essais expérimentaux menés sur les lames aboutées ont confirmé l'importance du procédé de collage sur la résistance des aboutages. Avec les abouteuses de dernière génération, il est plus aisé de contrôler et d'assurer la bonne répartition de la colle dans les entures.

Par ailleurs, les travaux de prédiction de la résistance des aboutages ont donné des résultats exploitables et ont mis en évidence l'importance qu'ont aussi, sur la résistance de l'assemblage, les données d'ODF autour de l'aboutage ainsi que la masse volumique des courçons aboutés. En revanche, bien qu'il a été montré que l'information du module d'élasticité longitudinal des courçons ne semble pas importante pour prédire la résistance des aboutages, une nouvelle campagne d'essais mériterait d'être réalisée pour confirmer cette observation.

Ces travaux de prédiction de la résistance des aboutages laissent aussi apparaître la possibilité de réaliser des aboutages plus proches des nœuds en comparaison d'une règle établie pour les résineux qui indique qu'un aboutage doit se situer à une distance minimale d'un nœud égale à trois fois le diamètre de celui-ci. Or, pour le chêne dont les nœuds sont sensiblement plus gros que ceux des résineux, cette règle est très pénalisante. Ainsi, avoir recourt à du contrôle non destructif serait une solution très bénéfique pour le rendement matière, en plus d'être très souvent plus productif que le classement visuel.

Enfin, un algorithme intégrant la notion de résistance des aboutages a été proposé. Des campagnes d'essais pour juger de la qualité des modèles de prédictions et pour évaluer les rendements matière restent encore à faire. Avec des logiciels industriels optimisés et les puissances de calcul actuellement disponibles, le temps de traitement pour l'ajout d'une telle option à un scanner ODF ne devrait pas poser problème.

Conclusion générale et perspectives

Les résultats de cette thèse contribuent au développement de solutions innovantes pour rendre la transformation du chêne plus efficiente, et par extension pour moderniser l'industrie du bois. Ils s'appuient sur l'apport de nouvelles connaissances de la technologie et le traitement de données de mesures de l'orientation des fibres (ODF) avec un laser point et par la proposition d'applications inédites rendues possibles grâce à cette prise d'information par un scanner mesurant l'ODF (scanner ODF).

Mesures et modélisation de l'ODF avec la technologie de laser point

Les travaux du chapitre 2 ont montré que l'erreur de mesure de l'ODF est bien corrélée à la forme de l'image de diffusion qui s'observe lorsqu'un laser point est projeté à la surface d'une pièce de bois. En se basant sur l'approximation de cette image par une ellipse, l'erreur de mesure calculée dans le cadre des essais menés est inférieure à un degré lorsque le rapport entre le grand axe et le petit axe de l'ellipse, appelé ratio, est supérieur à 1,7. Ce résultat conduit à des réglages des lasers et des capteurs afin d'obtenir le plus grand ratio possible.

Ces travaux ont mis aussi en évidence que les ratios des ellipses de diffusion, lorsqu'ils sont observés dans le plan radial du bois, sont semblables dans les nœuds et les rayons ligneux du chêne. Cela rend plus difficile l'interprétation des mesures de l'ODF dans le plan radial et donc la bonne détection des singularités du bois. Cependant, il apparaît que la diffusion de la lumière est plus intense dans les rayons ligneux que dans les nœuds, ce qui se traduit par des aires d'ellipses plus grandes sur les rayons ligneux que sur les nœuds. Ainsi, l'étude de la cartographie des aires permettrait de différencier ces deux singularités. Au cours des travaux menés dans cette thèse, cela n'a pu être fait car les points lasers utilisés étaient de puissance trop variable. En effet, la puissance des lasers est apparue comme un facteur influençant la taille des ellipses, phénomène qui a été utilisé dans le cadre des travaux du chapitre 2 pour réduire la taille des ellipses sur le chêne frais et le peuplier. Ainsi, pour bien exploiter les informations qui peuvent être tirées des aires des ellipses, il faudrait mener des travaux pour mieux caractériser le phénomène de diffusion de la lumière laser sur le bois en fonction de la puissance des lasers. Une normalisation de l'aire des ellipses en fonction de la puissance point laser pourrait aussi être effectuée.

En marge des travaux principaux, il a été proposé une méthode de représentation spatiale de l'ODF dans le volume d'un avivé à partir des mesures réalisées sur les quatre côtés de leur section. Cette méthode affiche néanmoins des limites, notamment dans et autour de certains nœuds. Pour améliorer cette modélisation, tout en gardant le principe de calcul de l'ODF dans le volume par interpolation des angles plans, il serait pertinent de faire préalablement une détection des nœuds sur les faces et rives de l'avivé pour ensuite modifier l'angle de plongée dans les nœuds afin d'être plus proche de la réalité.

Modélisation des déformations d'avivés au séchage

En montrant que la mesure de l'ODF avec des lasers points est efficace sur du chêne frais de sciage, les travaux de cette thèse ont permis de valider l'utilisation d'un scanner ODF en scierie. Ceci permet d'entrevoir une première application novatrice. En effet, avec cette information obtenue dès la première transformation, les résultats du chapitre 3 ont montré qu'il était possible d'anticiper les déformations au séchage d'avivés avec une précision suffisante par rapport au respect des surcotes nécessaires aux opérations de rabotage pratiquées en aval. La prise en compte de l'ODF locale dans un modèle éléments finis a permis de modéliser les déformations induites lors du séchage du fait des différences des retraits longitudinal et transverse. Les résultats de ces travaux exploratoires confirment l'intérêt de cette approche originale de la modélisation de la déformation d'avivés au séchage en utilisant les informations d'ODF. Ils confortent ainsi le concept de départ et encouragent la poursuite de recherches et la mise au point d'un système qui définirait le tronçonnage d'avivés frais de sciage non seulement selon leur qualité, mais aussi en fonction de leurs potentielles déformations au séchage. L'apport d'une telle stratégie se traduirait par une augmentation de la productivité lors du traitement des bois bruts en seconde transformation et un gain de rendement matière significatif au moment du rabotage des avivés.

Pour donner suite à ces travaux, il conviendrait de mener d'autres campagnes d'essais dans le but de confirmer les résultats précédents et de simuler le tronçonnage d'avivés frais de sciage en avivés courts de plus faibles flèches de rive prédites pour qualifier le modèle en situation d'application industrielle. De plus, une modélisation éléments finis en 3D plutôt que plane, tenant compte de l'ODF dans le volume des avivés, permettrait de faire évoluer le modèle avec lequel il serait certainement possible de modéliser le voilement longitudinal de face et le gauchissement en plus du voilement longitudinal de rive. La conséquence serait des gains de rendement matière lors du rabotage dans l'épaisseur des avivés.

Contrôle de la qualité des aboutages

L'exploitation des données d'ODF s'est aussi révélée pertinente pour la caractérisation de la résistance mécanique des aboutages de courçons de chêne. Les travaux développés au chapitre 4 ont confirmé que l'ODF autour des aboutages a un impact direct sur leur résistance mécanique et qu'elle permettait de l'estimer. Il ressort aussi de ces travaux que la connaissance de l'ODF permet de réaliser un aboutage plus proche des nœuds que ce qui est prescrit de façon systématique dans la norme EN 14080:2013, entre autre, mais aussi qu'une certaine perturbation du fil autour des aboutages peut, dans le cas du chêne du moins, être acceptée.

Cette thèse propose le concept d'une solution machine garantissant la bonne qualité des aboutages qui peut trouver une application dans le cadre du contrôle de la résistance mécanique des aboutages de lames destinées à des usages structurels et peuvent participer à leur classement pour la résistance mécanique. Ce concept, basé sur l'estimation de la résistance à partir des mesures d'ODF d'un scanner, pourrait aussi apporter contribution à l'élaboration d'un autre type de critère pour les normes encadrant les aboutages en usage structurel (EN 14080:2013). Actuellement, ce type de norme ne s'applique qu'aux résineux et les règles de contrôle de la résistance des aboutages dépendent de la taille du nœud le plus proche de l'aboutage. Le critère proposé pourrait prendre en compte une valeur limite d'ODF moyenne qui dépendrait de la classe de résistance visée. Il ne dépendrait plus d'une taille de nœud mais bien de mesures non destructives, et s'inscrirait en cela dans l'esprit du développement du classement pour la résistance des sciages.

Aborder la question de la qualité des aboutages avec les règles des normes pour les résineux est très pénalisant pour les feuillus, le chêne en particulier, pour lesquels les nœuds sont sensiblement plus gros que ceux des résineux. En revanche, l'utilisation d'un scanner équipé d'une technologie de mesure ODF pour aborder cette question avec cette nouvelle vision permettrait un gain de rendement matière significatif qui rendrait le développement de produits techniques en feuillus pour la construction plus viable et compétitif.

Rognage d'avivés intégrant la notion de résistance des aboutages

Les travaux du chapitre 4 ont conduit à l'élaboration d'un « plan de tronçonnage sur critère pour l'aboutage » dont le but est d'intégrer des critères propres au procédé d'aboutage dans l'algorithme gérant le débit d'un avivé. Le plan de tronçonnage qui y est présenté ne tient compte que d'un critère de résistance des aboutages, dans l'esprit du concept de critère évoqué précédemment, et d'une longueur minimale des courçons débités. D'autres, en fonction des situations et des applications, pourraient y être ajoutés comme la longueur maximale des courçons, l'absence de nœud ou fente dans la zone de bois où seront usinées les entures ou encore la détection des zones de bois dont la résistance en compression est trop faible par rapport à la pression de serrage appliquée aux lames aboutées.

Dans le but d'optimiser le tronçonnage d'avivés en scierie, il resterait encore à intégrer le fait de tronçonner les avivés dans le but de réduire l'amplitude des déformations au séchage.

Esquisse d'une usine dédiée à la production de lame aboutées

Le point final apporté à ce mémoire est l'intégration des résultats de cette thèse dans l'esquisse d'une usine performante répondant aux trois enjeux principaux de la filière bois feuillus que sont la mobilisation d'un plus grand volume de la matière première disponible, la transformation efficace et flexible de la matière et la fabrication de produits innovants de qualité supérieure et compétitifs sur le marché de la construction.

Cette fabrique s'approvisionnerait essentiellement en billons de qualité secondaire, actuellement peu exploités par la filière. Les propriétés mécaniques de ces bois correspondent aux exigences et aux besoins de la construction. La possibilité de réaliser des lames de grande longueur grâce au procédé d'aboutage permet leur valorisation en produits techniques d'ingénierie à forte valeur ajoutée.

En entrée de ligne de sciage, un scanner géométrique de billons définirait le débit optimal maximisant le rendement matière du sciage des billons en avivés. Ces avivés seraient en majeure partie destinés à la fabrication de lames aboutées, pour des usages en structure et en menuiserie. Les avivés de meilleure qualité seraient triés pour des usages plus nobles. Le tronçonnage et le tri des avivés seraient assurés par un second scanner implanté en première transformation qui analyserait les avivés grâce à plusieurs capteurs, dont la technologie des lasers points pour mesurer l'ODF, et piloterait une tronçonneuse. Le plan de débit généré par ce scanner tiendrait compte des nœuds, de l'aubier, des fentes et de l'ODF pour déterminer les différentes qualités, mais aussi des potentielles déformations au séchage, des zones de faible résistance en compression et de la possibilité de réaliser des aboutages suffisamment résistants avec les courçons débités. Le plan de débit final maximiserait les rendements matière et économique.

Pour garantir la résistance à l'état sec, les courçons destinés à des usages en structure seraient, après séchage et rabotage, classés pour la résistance mécanique par le moyen d'un scanner ODF, d'une

mesure de masse et potentiellement d'une machine de classement vibratoire. Dans le même temps, une analyse des extrémités des courçons secs serait effectuée pour valider leur utilisation pour la fabrication d'aboutage de résistance satisfaisante. Les éventuelles fentes apparues au séchage pourraient ainsi être purgées.

S'en suivrait la fabrication de lames aboutées de qualité homogène destinées à composer différents produits techniques innovants pour la construction. Parmi eux peut être cité le panneau CLT en chêne de l'association Bois Croisés de Bourgogne, actuellement en cours de développement, lequel bénéficierait de nombreux résultats issus des travaux de cette thèse.

Références

- Aléon D., Négrié G., Chanrion P. 2001. Séchage Du Bois : Guide Pratique. CTBA.
- AGRESTE 2020. Production de sciages en millier de m3. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/SCINR01/detail/>. Consulté le 30/09/2021
- AGRESTE 2021. Echanges extérieurs de bois de la France & DOM avec le monde, par produits, par pays et groupes de pays. <https://agreste.agriculture.gouv.fr/agreste-web/disaron/COMEXTBOIS/detail/>. Consulté le 30/09/2021
- APECF, Classement des sciages de chêne.
- Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J. 2019a. Assessment of the Error of Fiber Orientation Measurement Obtained by Laser Scanning on Several European Hardwood and Softwood Species. In Computational Methods in Wood Mechanics, 61–62. Vaxjö, Sweden.
- Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J. 2019b. Measurement of fiber orientation by laser light scattering on dry and rough sawn green hardwoods. In 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, 225–232.
- Besseau B., Pot G., Collet R., Viguier J. 2020. Influence of wood anatomy on fiber orientation measurement obtained by laser scanning on five European species. Journal of Wood Science 66 (1): 74.
- BF 029 - BNBA - ISO DIS 24294. Bois — Bois ronds et bois sciés — Vocabulaire.
- Blanc C. 2016. Traitement numérique des images, Cours 4 : Traitement des images. <http://christophe-blanc.fr/enseignements/traitement-des-images>. Consulté le 19/09/2021.
- Briggert A., Hu M., Olsson A., Oscarsson J. 2018. Tracheid effect scanning and evaluation of in-plane and out-of-plane fiber direction in Norway spruce timber. Wood Fiber Science. 50. 411-429.
- Bléron L. 2012. Valorisation des chênes de qualité secondaire en Bourgogne dans la construction. In 2ème Forum Bois Construction, Beaune. 12. <https://docplayer.fr/26356946-Valorisation-des-chenes-de-qualite-secondaire-en-bourgogne-dans-la-construction.html>.
- Brancheriau L. 2002. Expertise mécanique des sciages par analyses des vibrations dans le domaine acoustique. Thèse de doctorat. Université de la méditerranée - Aix Marseille II. <http://www.theses.fr/06919551X>.
- Brancheriau L., Paradis S. 2007. Bing 9 - Beam Identification by Non-destructive Grading. Montpellier : CIRAD, 2 p. <https://agritrop.cirad.fr/576230/>.
- Bustos C. 2003. Optimisation du procédé d'aboutage par entures multiples du bois d'épinette. Québec, Canada : Faculté de Foresterie et Géomatique, Université Laval. Thèse de doctorat. <https://corpus.ulaval.ca/jspui/bitstream/20.500.11794/17809/1/21006.pdf>.
- Bustos C., Mohammad M., Hernández R.E., Beauregard R. 2003. Effects of curing time and end pressure on the tensile strength of finger-joined black spruce lumber. Forest Products Journal. 53 (11): 6.
- B50-002 : 1961. Bois – Vocabulaire
- Carroy C. 2018. La filière bois a rendez-vous avec l'industrie 4.0. Forestopic. <https://www.forestopic.com/fr/yes-i-wood/filiere-bois/734-filiere-bois-industrie-4-0>. Consulté le 29/09/2021.
- Cast3M. 2019. Logiciel de calcul par éléments finis en mécanique des structures et des fluides, version Cast3M19, <http://www-cast3m.cea.fr/index.php>

- Centre Technique du Bois (CTB). 1973. Étude technico-économique de l'aboutage. Cahiers du Centre Technique du Bois, Travail mécanique du bois – Usinage - Fabrication des matériaux dérivés du bois, no. 92 (Octobre): 48.
- Chalayer M. 2015. Voyage au cœur de la « scierie du futur », Bois Mag, n°. 144 : 3.
- CIRAD. TROPIC 7 : Chêne. <https://tropix.cirad.fr/FichiersComplementaires/FR/Temperees/CHENE.pdf>. Consulté le 29/09/2021.
- Clair B. 2005. Etude des propriétés mécaniques et du retrait au séchage du bois à l'échelle de la paroi cellulaire: essai de compréhension du comportement macroscopique paradoxal du bois de tension à couche gélatineuse. Thèse de doctorat, ENGREF: Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc.
- CNRTL. Lexicographie. <https://www.cnrtl.fr/definition/>. Consulté le 14/10/2021.
- CRPF Île-de-France Centre Val de Loire. 2015. Notre Forêt. N°71, juin 2015.
- Croisel J. et Collet R. 2016. La Forêt et la valorisation des chênes en Bourgogne-Franche-Comté. Revue forestière française 68, n° 2 : 167–172.
- Constant T. 1995. Modélisation des déformations des pièces de bois au séchage et influence de la structure interne de l'arbre. Revue Forestière Française XLVII (S): 141. <https://doi.org/10.4267/2042/26705>.
- Dahlblom O., Ormarsson S., Petersson H. 1996. Simulation of wood deformation processes in drying and other types of environmental loading. Annals of Forest Science 53 (4): 857–66. <https://doi.org/10.1051/forest:19960405>
- Daval V., Pot G., Belkacemi M., Meriaudeau F., Collet R. 2015. Automatic measurement of wood Fiber orientation and knot detection using an optical system based on heating conduction. Optical Society of America. 23: 26 33529–33539. <https://doi.org/10.1364/OE.23.033529>.
- DeBonis A.L., Bodig J. 1975. Nailed wood joints under combined loading. Wood Science and Technology. 9 : 129-144.
- Ducerf. 2021. Ducerf, acteur engagé pour valoriser les bois feuillus dans la construction. <https://www.ducerf.com/actualites/ducerf-acteur-engage-pour-valoriser-les-bois-feuillus-dans-la-construction>. Consulté le 29/09/2021.
- Faydi Y., Brancheriau L., Pot G., and Collet R. 2017. Prediction of oak wood mechanical properties based on the statistical exploitation of vibrational response. BioResources, 12(3), 5913–5927.
- Faydi Y. 2017. Classement pour la résistance mécanique du chêne par méthodes vibratoires et par mesure des orientations des fibres. Thèse de doctorat. ENSAM de Cluny: Ecole doctorale n°432 : Science des Métiers de l'Ingénieur. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-01749503>.
- FCBA. 2017. WOODRISE: Ressources forestières et produits bois construction moyenne et grande hauteur – retour d'expériences. FCBA INFO, 4.
- FCBA. 2020. Memento.
- Finega. 2017. Scierie 4.0, 4.0 Smart Sawmill made in FINEGA. <https://youtu.be/x4O9NeDUz4A>. Consulté le 29/09/2021.
- FNB. 2018. Crise : L'exportation croissance de chêne brut ruine la filière française de la transformation qui en appelle au président de la république. Dossier de presse, version du 05/02/2018. https://www.fnbois.com/wp-content/uploads/2018/03/DP_FNB_BoisFran%C3%A7aisEnDanger_draft9_050218.pdf. Consulté le 20/09/2021.
- FNB, 2021, En l'absence de répondeur de la France et Bruxelles la Chine continue de siphonner la forêt française. Communication de presse du 09/07/2021. <https://www.fnbois.com/en-labsence-de-repondeur-de-la-france-et-bruxelles-la-chine-continue-de-siphonner-la-foret-francaise/>. Consulté le 20/09/2021.

- Foley C. 2003. Modeling the effects of knots in structural timber. Thèse de doctorat. Division of the Structural Engineering, Lund University, Suède.
- Franke B., Schusser A., Müller A. 2014. Analysis of finger joints from beech wood. In World Conference on Timber Engineering. Québec City, Canada.
- Frayssinhes R., Girardon S., Denaud L., Collet R. 2020. Modeling the Influence of knots on Douglas-Fir veneer fiber orientation. *Fibers* 8(9): 54. <https://doi.org/10.3390/fib8090054>.
- Frayssinhes R. 2020. Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles. Thèse de doctorat. ENSAM de Cluny : Ecole doctorale n°432 : Science des Métiers de l'Ingénieur. <https://pastel.archives-ouvertes.fr/tel-03132767/document>.
- Hankinson R. L. (1921). Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain. Air Force Information Circular N° 259, U. S. Air Service.
- Hu C., Tanaka C., Ohtani T. 2004. On-Line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser light scattering pattern image. *Journal of Wood Science*. 50: 321-326. <https://doi.org/10.1007/s10086-003-0569-z>.
- IGN. 2019. Inventaire Forestier. <https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article600>. Consulté le 20/10/2021
- ISO 2300:1973. Sciages de bois feuillus – Défauts – Termes et définitions.
- Jehl A. 2012. Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser. Thèse de doctorat, ENSAM de Cluny : Ecole doctorale n°432 : Science des Métiers de l'Ingénieur.
- Jodin P. 1994. Le bois, matériau d'ingénierie, A.R.BO.LOR., 433 p.
- Jolma I.P., Mäkynen A.J. 2007. The detection of knots in wood materials using the tracheid effect. *Advanced Laser Technologies, Proceedings of SPIE*, 70220G-70220G – 9. <https://doi.org/10.1117/12.803924>.
- Joly P., More-Chevalier F. 1980. Théorie, pratique et économie du séchage des bois, Editions H.Vial.
- Karastergiou S., Barboutis J., Vassiliou V. 2006. Effect of the PVA gluing on bending strength properties of finger jointed turkey oakwood (*Quercus Cerris* L.). *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 64 (4): 339–40. <https://doi.org/10.1007/s00107-005-0075-7>.
- Kienle A., D'Andrea C., Foschum F., Taroni P., Pifferi A. 2008. Light propagation in dry and wet softwood. *Optical Society of America*. 16: 9895-906. <https://doi.org/10.1364/OE.16.009895>.
- Kretschmann D. E. 2010. Wood handbook, chapter 05: Mechanical properties of wood. Forest Products Laboratory, Department of Agriculture Forest Service, Madison, Wisconsin, USA.
- Lara-Bocanegra A. J., Majano-Majano A., Crespo J., Guaita M. 2016. Finger-joint performance in engineered laminated products made of Eucalyptus Globulus. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)*. Vienne, Autriche.
- Lukacevic M., Kandler G., Hu M., Olsson A., Füssl J. A. 2019. A 3D model for knots and related fiber deviations in sawn timber for prediction of mechanical properties of boards. *Materials and Design* 166 (March): 107617. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107617>.
- Macchioni N., Corbineau P. 2015. Connaître, reconnaître et nommer le bois. In *Savoir et faire : Le bois, Actes Sud*. Fondation d'entreprise Hermes, 424. Hugues Jaquet.
- Marchal R., Mothe F. 1994. Appreciation of oak wood (*Quercus-Robur* L, *Quercus-Petraea* Liebl) for the French consumer and wood professionals. *Annals of Forest Science*, 51(3), 213–231.
- Microtech. 2021. Smart Link, Digital Fingerprint, <https://microtec.eu/fr/catalogue/all/smart-link-digital-fingerprint/>. Consulté le 13/09/2021.

- Ministère de l'économie, des finances et de la relance. 2013. La nouvelle France industrielle : 34 plans de reconquête. <https://www.economie.gouv.fr/files/la-nouvelle-france-industrielle.pdf>. Consulté le 30/09/2018.
- Ministère de l'agriculture et de l'alimentation. 2017. Programme national de la forêt et du bois 2016-2026. <http://agriculture.gouv.fr/le-programme-national-de-la-foret-et-du-bois-2016-2020>. Consulté le 12/12/2018.
- MoisTRUE. <https://www.logica-hs.it/moistrue?lang=en>. Consulté le 29/09/2021
- Moutee M. 2006. Modélisation du comportement mécanique du bois au cours du séchage. Thèse de doctorat. Québec : Université Laval.
- NF B 52-001-1 : 2018. Règles d'utilisation du bois dans la construction – Classement visuel pour l'emploi en structures des bois sciés résineux et feuillus – Partie 1 : bois massif.
- NF EN 844 : 2020. Bois rond et bois scié – Terminologie.
- NF EN 1316-1 : 2012. Bois ronds feuillus – Classement qualitatif – Partie 1 : Chêne et hêtre.
- NF EN 14080 : 2013. Structures en bois – Bois lamellé collé et bois massif reconstitué – Exigences.
- NF EN 14081-1 : 2016 + A1 : 2019. Structures en bois – Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance – Partie 1 : exigences générales.
- NF EN 14081-2 : 2018. Structures en bois – Bois de structure à section rectangulaire classé pour sa résistance – Partie 2 classement mécanique par machine ; exigences supplémentaires concernant les essais de type.
- NF EN 15497 : 2014. Bois massif de structure à entures multiples – Exigences de performances et exigences minimales de fabrication
- Nyström J. 2003. Automatic Measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture*. 41: 91-99.
- Öhman M. 1999. Correspondences between manually estimated compression wood in Norway spruce and the warp of the sawn timber. *Holz Als Roh- Und Werkstoff* 57 (October): 391–96. <https://doi.org/10.1007/s001070050366>.
- Öhman M. 2001. Methods for avoiding the negative effects of compression wood. Rapport de recherche. Lulea University of Technology. <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:997715/FULLTEXT01.pdf>.
- Olsson A., Oscarsson J., Serrano E., Källsner B., Johansson M., Enquist B. 2013. Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation. *European Journal of Wood and Wood Products*. 71: 319-333. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0684-5>.
- Olsson A., Oscarsson Y., Serrano E., Källsner B., Johansson M., Enquist B. 2013. Prediction of timber bending strength and in-member cross-sectional stiffness variation on the basis of local wood fibre orientation. *European Journal of Wood and Wood Products* 71 (3): 319–33. <https://doi.org/10.1007/s00107-013-0684-5>.
- Olsson A., Oscarsson J. 2014. Three dimensional fibre models for wood based on laser scanning utilizing the tracheid effect. In *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*. Quebec City, Canada.
- Olsson A., Serrano E., Oscarsson J., Enquist B., Johansson M., Kaellsner B. 2015. Method and device for evaluating a wooden board. Brevet N°WO2013131999A1.
- Olsson A., Briggert A., Oscarsson J. 2019. Increased yield of finger jointed structural timber by accounting for grain orientation utilizing the tracheid effect. *European Journal of Wood and Wood Products* 77 (6): 1063–77. <https://doi.org/10.1007/s00107-019-01465-0>.

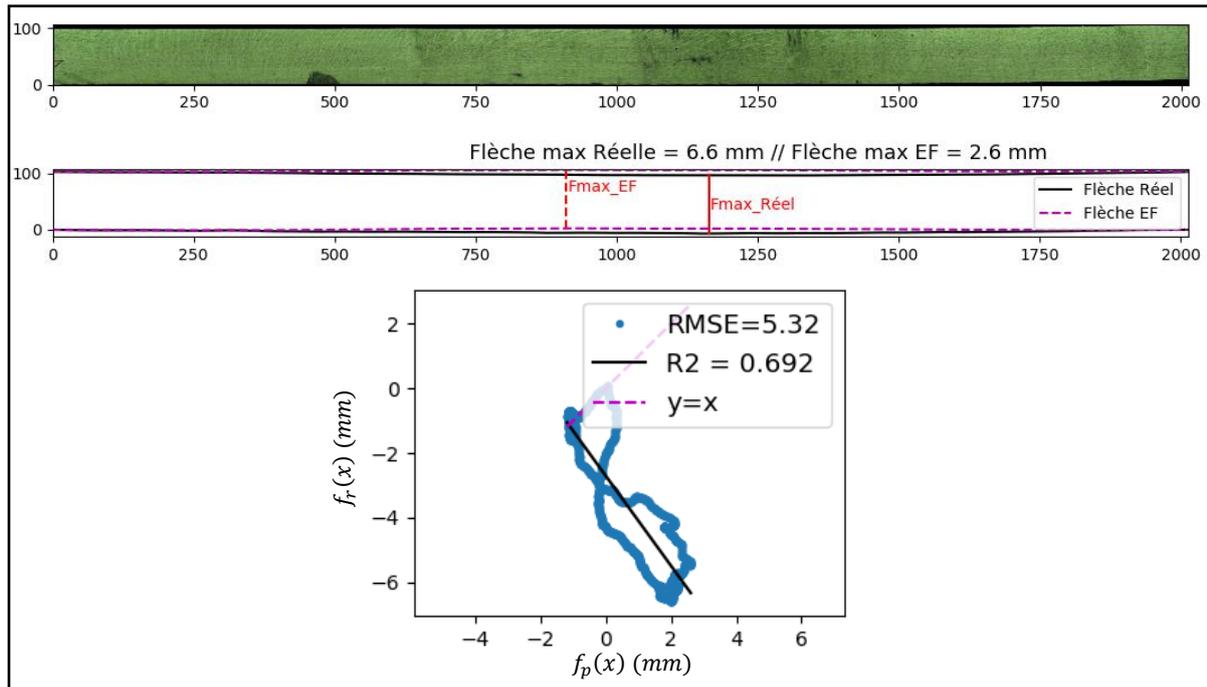
- OpenCV. Morphological Transformations. https://opencv-python-tutroals.readthedocs.io/en/latest/py_tutorials/py_imgproc/py_morphological_ops/py_morphological_ops.html. Consulté le 29/09/2021
- Ormarsson S., Dahlblom O., Petersson H. 1998. A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation - Part1: Theory. *Wood Science and Technology* 34, 207–219. <https://doi.org/10.1007/s002260000042>.
- Ormarsson S., Dahlblom O., Petersson H. 1999 A numerical study of the shape stability of sawn timber subjected to moisture variation Part 2: Simulation of drying board. *Wood Science and Technology* 33, 407–423. <https://doi.org/10.1007/s002260050126>.
- Perré, P., Turner I.W. 1999. A 3-D version of TransPore: a comprehensive heat and mass transfer computational model for simulating the drying of porous media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 42 (24), 4501–4521.
- Perré P. 2007. *Fundamentals of wood drying*, A.R.BO.LOR., 366 p.
- Perré P., Keey R. 2014. *Drying of Wood: Principles and Practices*. In *Handbook of Industrial Drying*, Fourth Edition, by Arun Mujumdar, 797–846. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17208-44>.
- PR NF EN 16351 : 2021. Structures en bois – Bois lamellé croisé – Exigences.
- Purba C.Y.C., Viguier J., Denaud L., Marcon B. 2020a. Contactless moisture content measurement on green veneer based on laser light scattering patterns. *Wood Science and Technologies*. 54: 891–906.
- Purba C.Y.C., Viguier J., Denaud L., Marcon B, Pot G. 2020b. Measurement of beech veneer density using laser scattering method. In *Proceedings of World Conference on Timber Engineering*, 6. Santiago, Chili.
- Rais A., Bacher M., Khaloian-Sarnaghi A., Zeilhofer M., Kovryga A., Fontanini F., Hilmers T., et al. 2021. Local 3D Fibre Orientation for Tensile Strength Prediction of European Beech Timber. *Construction and Building Materials*, 279 (April): 122527. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122527>.
- Remond R. 2004. *Approche déterministe du séchage des avivés de résineux de fortes épaisseurs pour proposer des conduites industrielles adaptées*. Thèse de doctorat. Engineering Sciences [physics]. ENGREF (AgroParis-Tech).
- Richard P. 2016. L'usine 4.0, c'est quoi? *Techniques de l'ingénieur* <https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/lusine-4-0-cest-quoi-37271/>. Consulté le 29/09/2021.
- Riehl T., Welling J. 2003. Taking advantage from oscillating climate conditions in industrial timber drying processes. 8th International, IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania.
- Saifouni O. 2014. *Modélisation des effets rhéologiques dans les matériaux: application au comportement mécanosorptif du bois*. Thèse de doctorat, Institut Pascal : Université Blaise Pascal, Clermont II.
- Salin J.G. 2003. External Heat and Mass Transfer. In *Heat and Mass Transfer*, 8th International IUFRO Wood Drying Conference, Brasov, Romania, pp 343-347.
- Schajer G. S., Sutton D.B. Identification of 3D wood grain angle by directional reflection measurement. *Wood Material Science & Engineering* 11, 170–175 (2016).
- Schlotzhauer P., Wilhelms F., Lux C., Bollmus S. 2018. Comparison of three systems for automatic grain angle determination on European hardwood for construction use. *European Journal of Wood and Wood Products*. 76: 911–923. <https://doi.org/10.1007/s00107-018-1286-z>.
- Siau, J.F. 1984. *Transport processes in wood*, Springer-Verlag, 245 p.
- Simonaho, S.P., Silvennoinen R. 2004a. Light diffraction from wood tissue. *Optical Review* 11 (5): 308–11. <https://doi.org/10.1007/s10043-004-0308-8>.

- Simonaho S.P., Palviainen J., Tolonen Y., Silvennoinen R. 2004b. Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. *Optics and Lasers in Engineering*. 41: 95-103. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(02\)00144-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(02)00144-6).
- SciPy, `scipy.ndimage.uniform_filter`,
https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.ndimage.uniform_filter.html
- Tarmian A., Remond R., Faezipour M., Karimi A., Perré P. 2009. Reaction wood drying kinetics: tension wood in *Fagus Sylvatica* and compression wood in *Picea Abies*. *Wood Science and Technology* 43 (1–2): 113–130.
- Tisserand F. 2013. Recherche en Séchage du Bois : Perspectives via la modélisation. *Le Bois International*, January 13, 2013.
- Trouy M.C. Anatomie du Bois – MOOC. 2018.
- Vassiliou V., Barboutis I., Karastergiou S. 2007. Effect of PVAc bonding on finger-joint strength of steamed and unsteamed beech wood (*Fagus Sylvatica*). *Journal of Applied Polymer Science* 103 (February): 1664–69. <https://doi.org/10.1002/app.25079>.
- Viguié J., Jehl A., Collet R., Bléron L., Meriaudeau F. 2015. Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling. *Wood Material Science & Engineering*. 10: 145-156. <https://doi.org/10.1080/17480272.2014.951071>.
- Viguié J. 2015. Classement Mécanique Des Bois de Structure : Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique. Thèse de doctorat, ENSTIB, Epinal : École Doctorale RP2E, Université de Lorraine.
- Viguié J., Pot G., Bléron L. & Collet R. 2016. Comparison between a finite element model based on grain angle detection and full-field measurements of timber in bending. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE)*, Vienne, Autriche, 2518–2524
- Zhou J., Shen J. 2003. Ellipse detection and phase demodulation for wood grain orientation measurement based on the tracheid effect. *Optics and Lasers in Engineering*. 39: 73-89. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(02\)00041-6](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(02)00041-6).

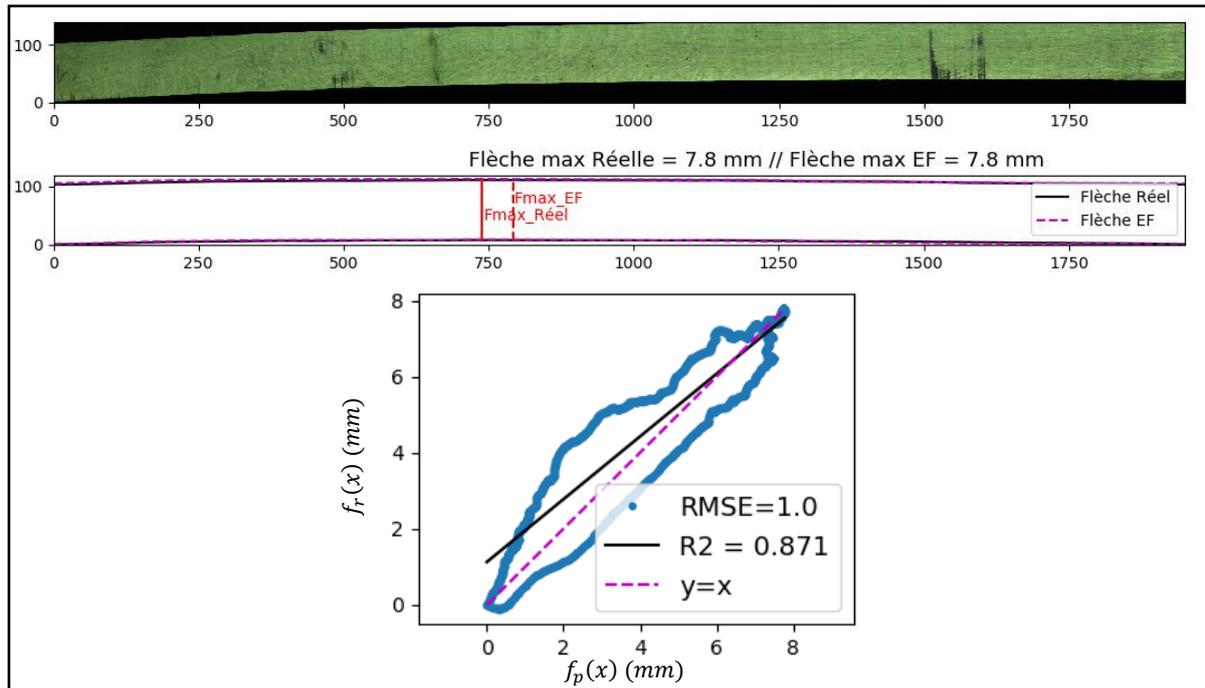
Annexes

Les résultats des flèches de rives des avivés présentés dans cette annexe correspondent aux données du Tableau 3.3 et aux résultats du Tableau 3.4.

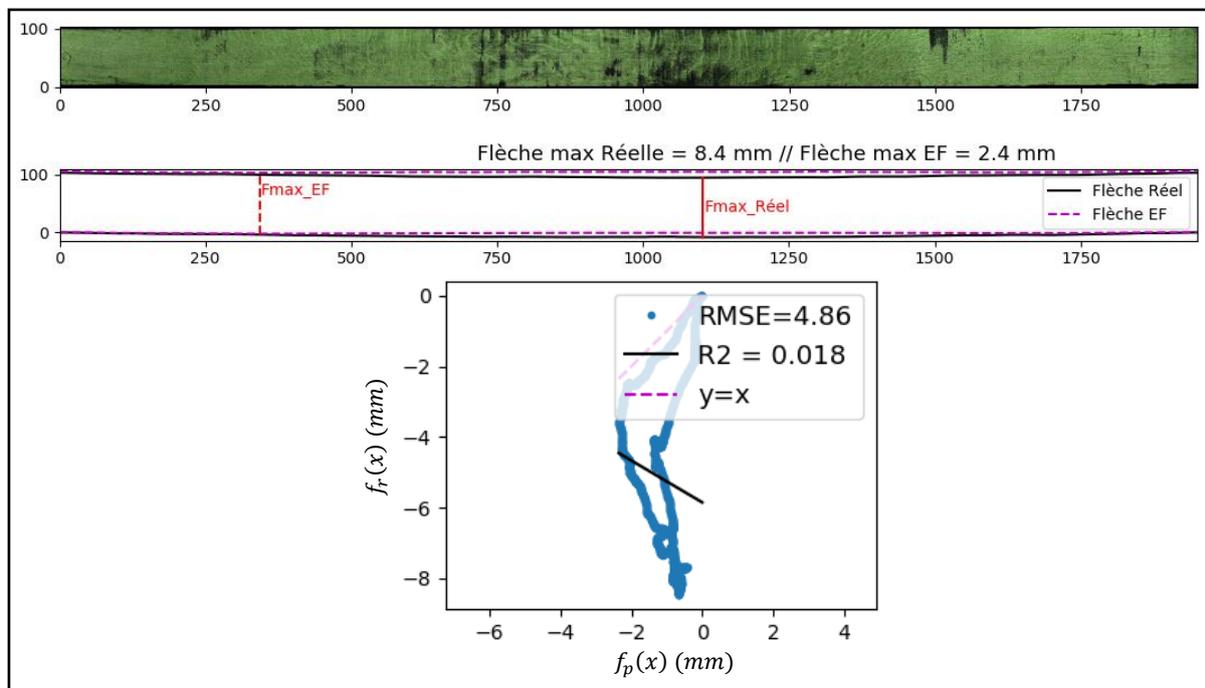
Avivé N°01



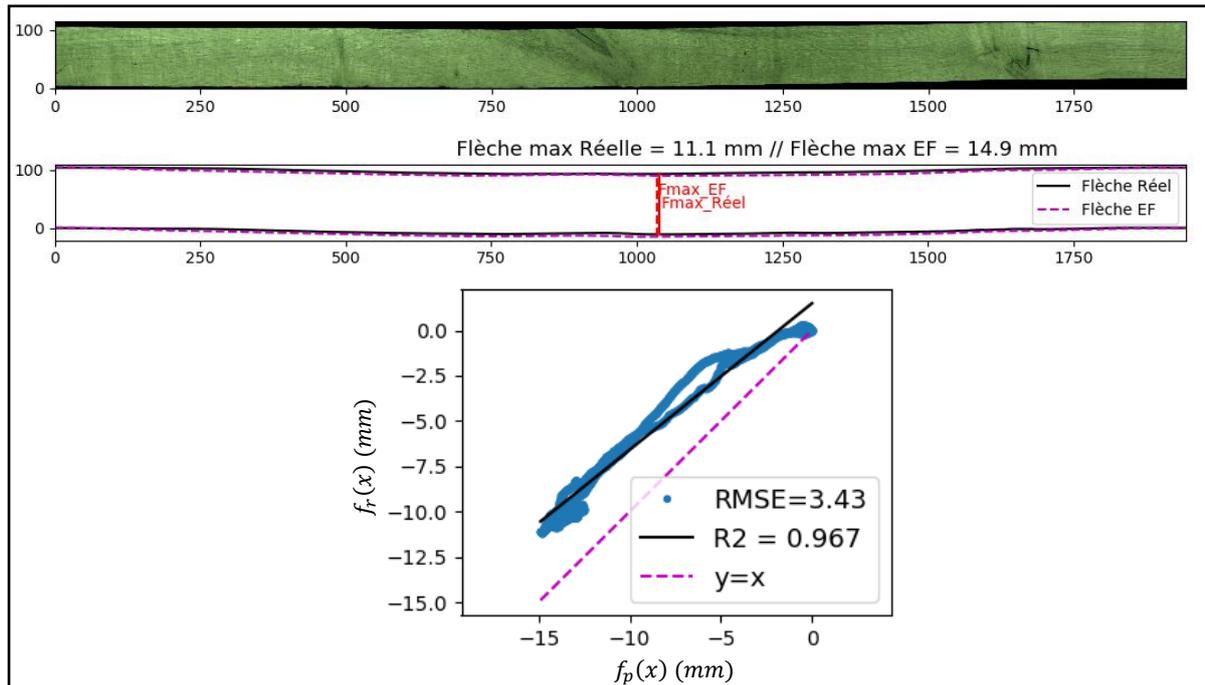
Avivé N°02



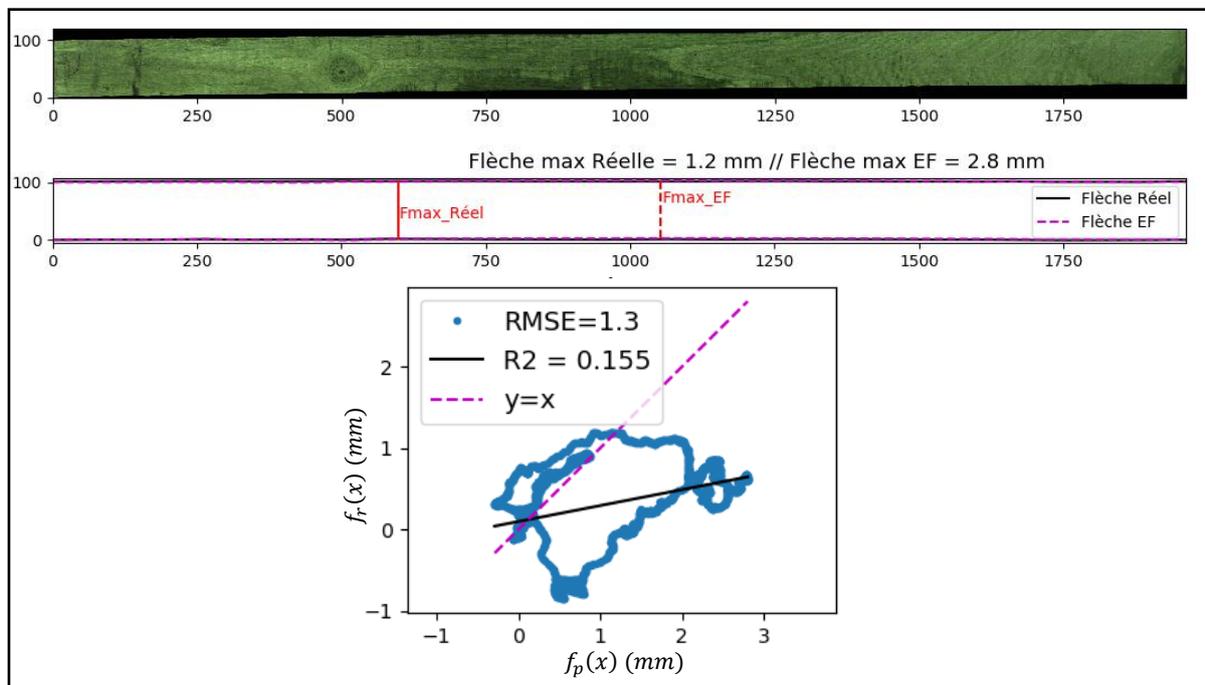
Avivé N°03



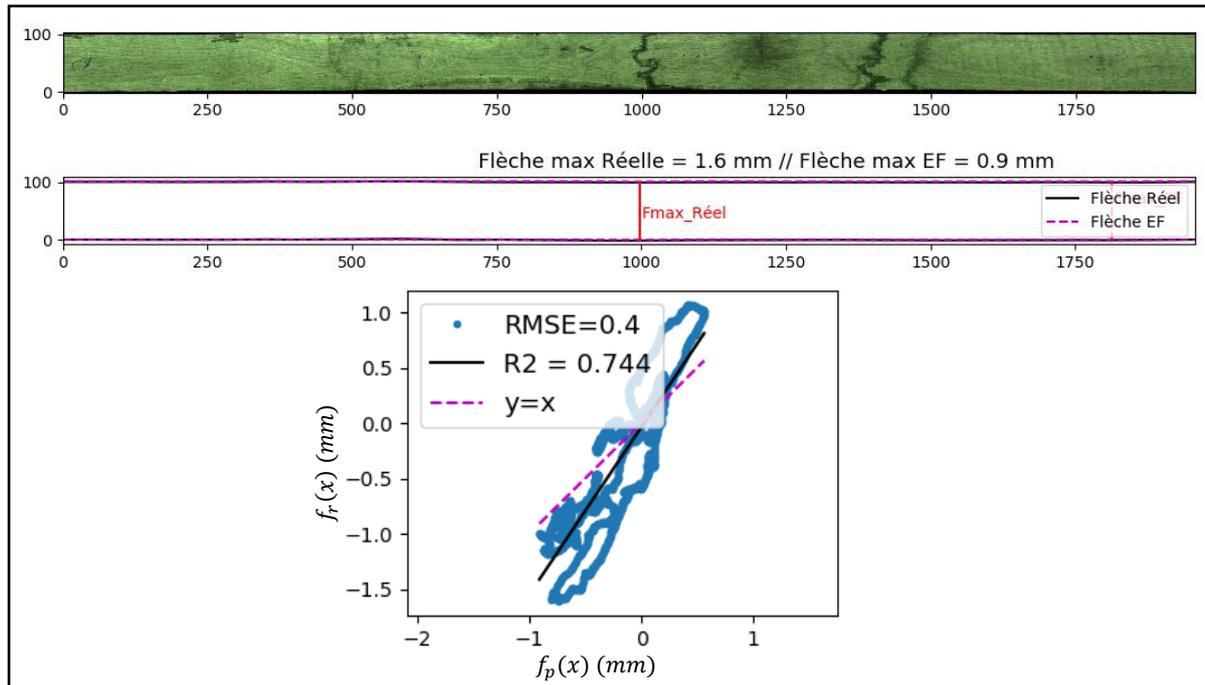
Avivé N°04



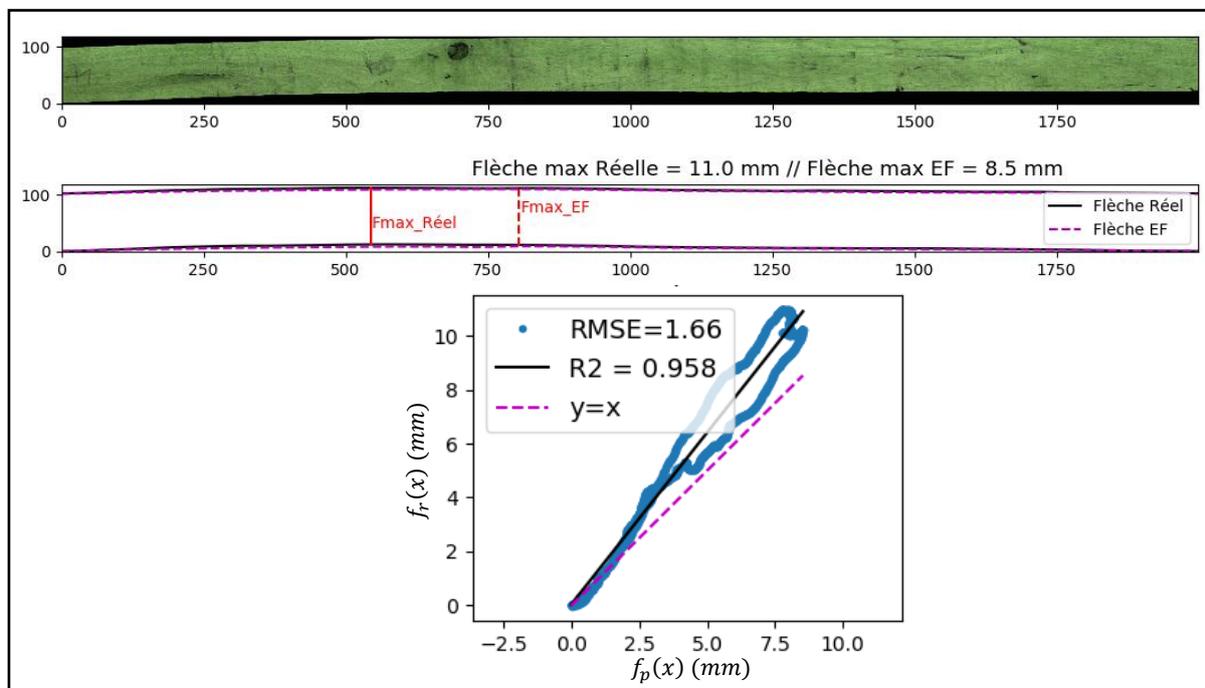
Avivé N°05



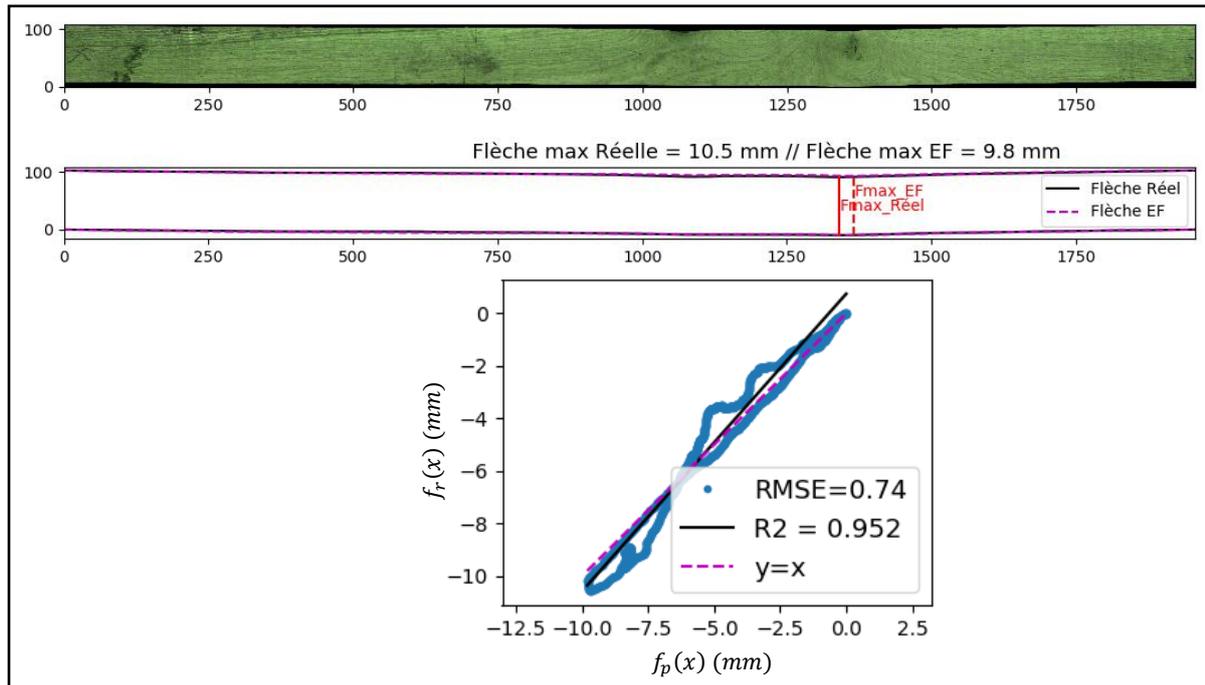
Avivé N°06



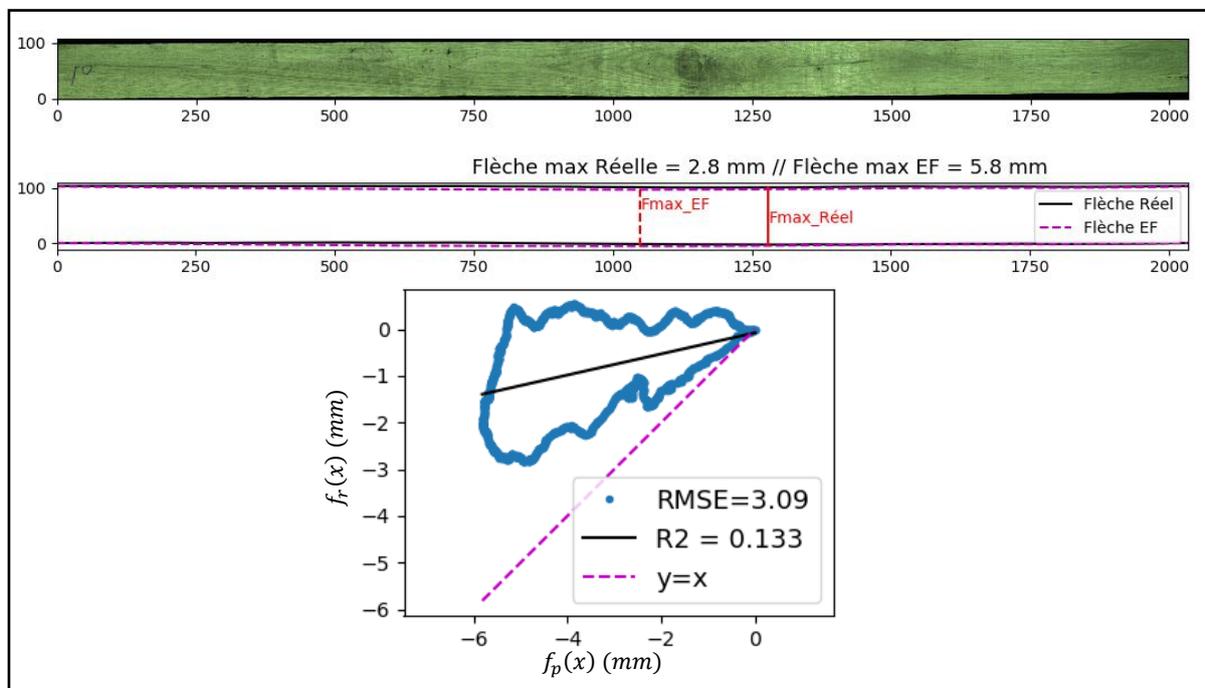
Avivé N°07



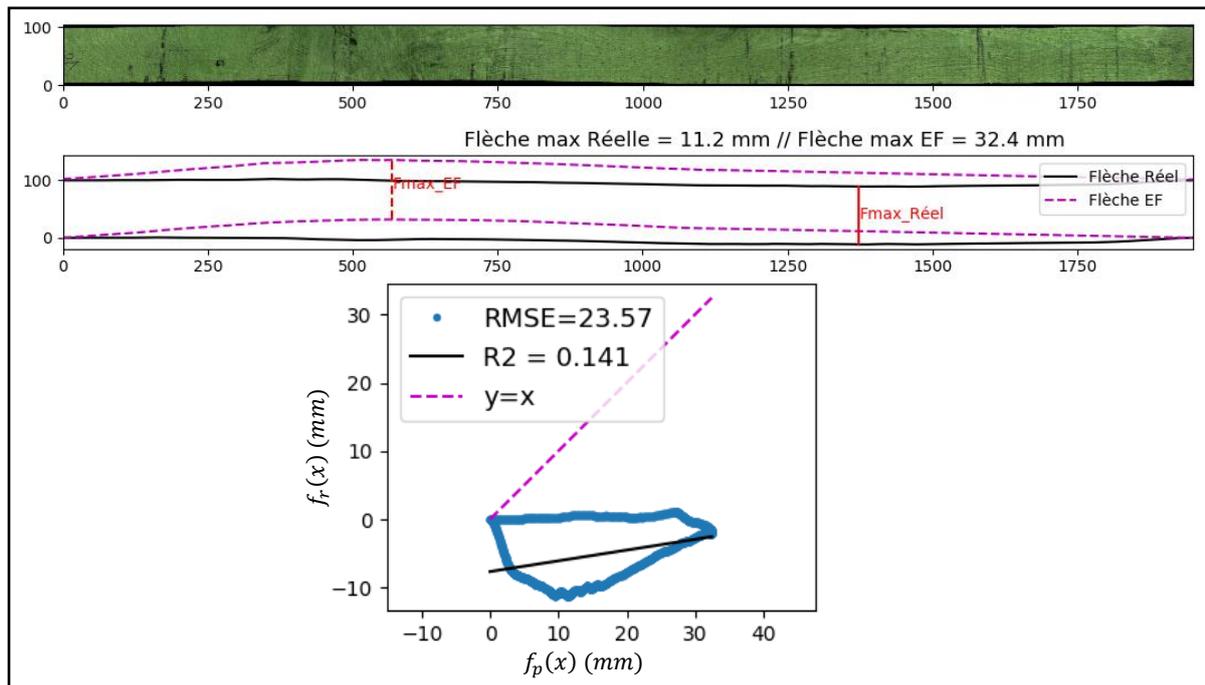
Avivé N°08



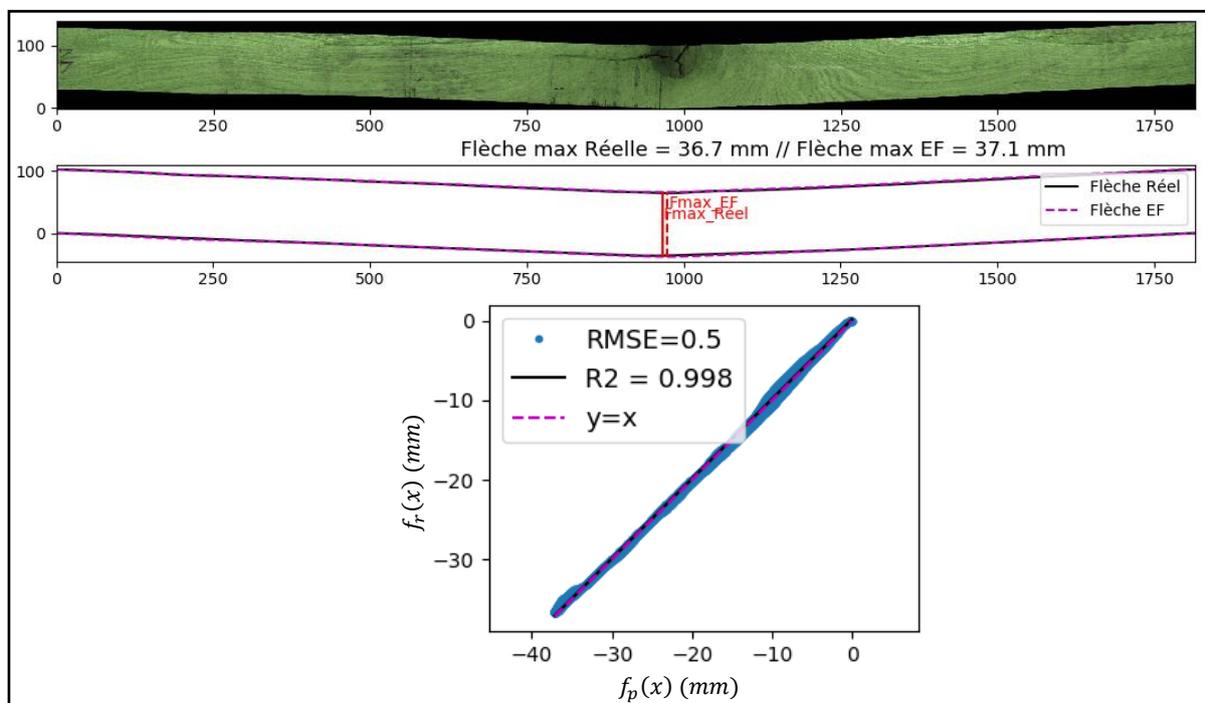
Avivé N°09



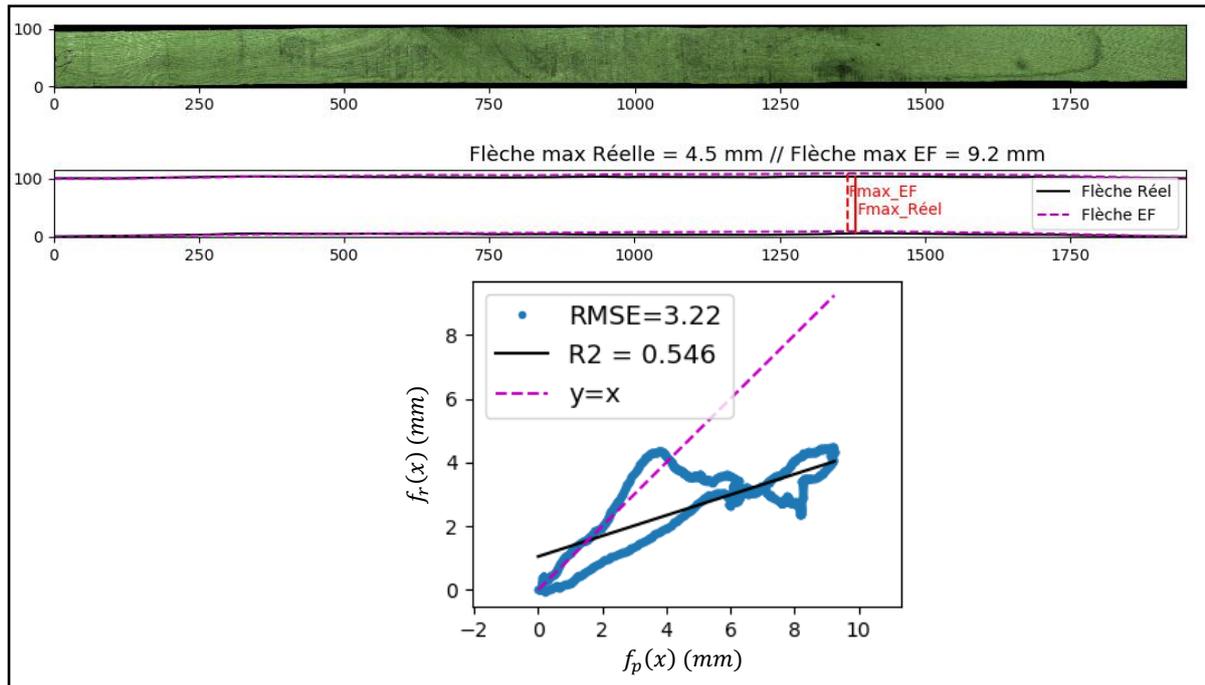
Avivé N°10



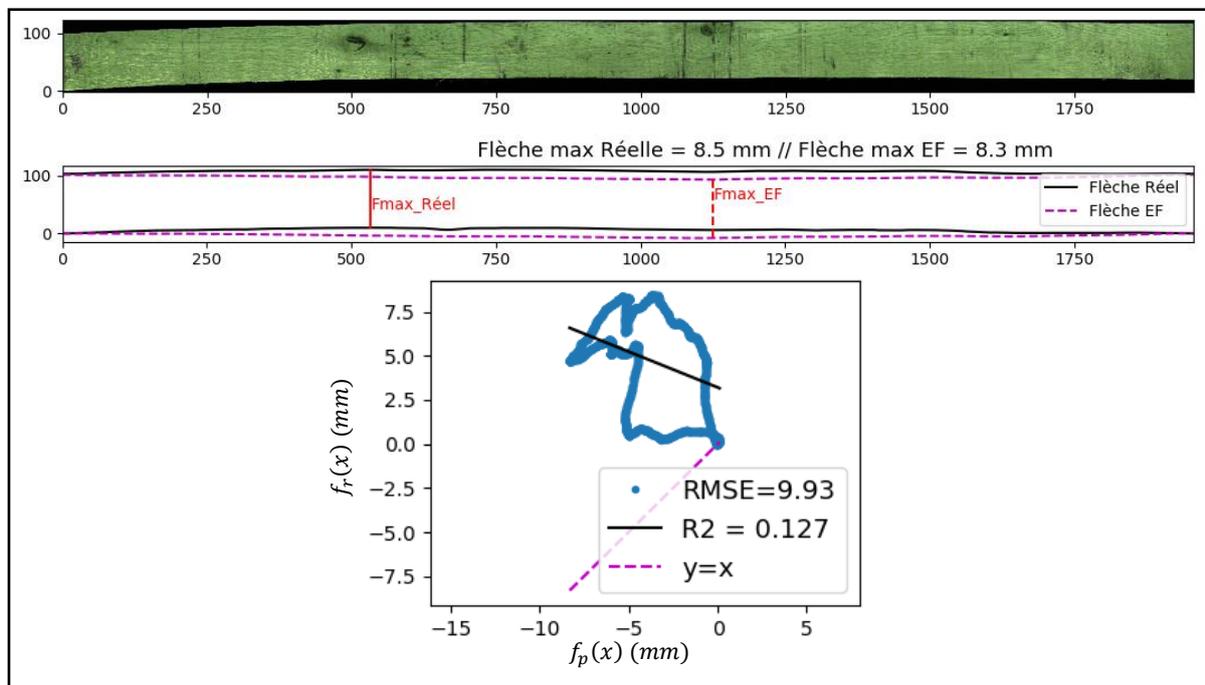
Avivé N°11



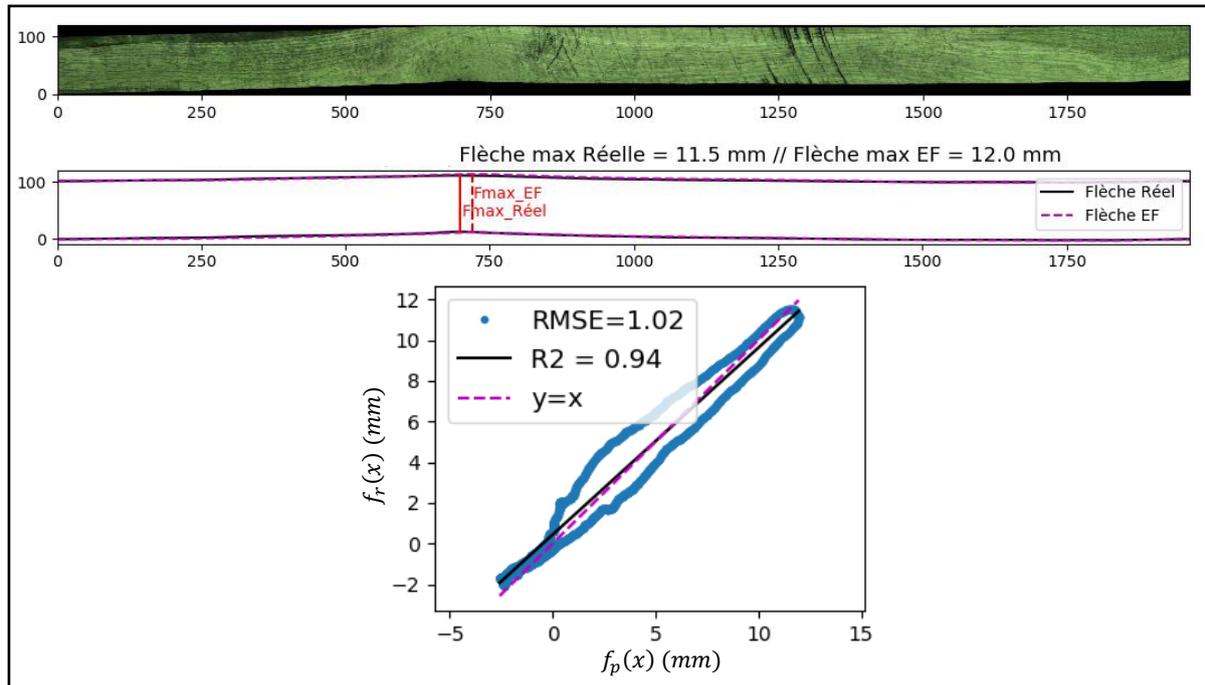
Avivé N°12



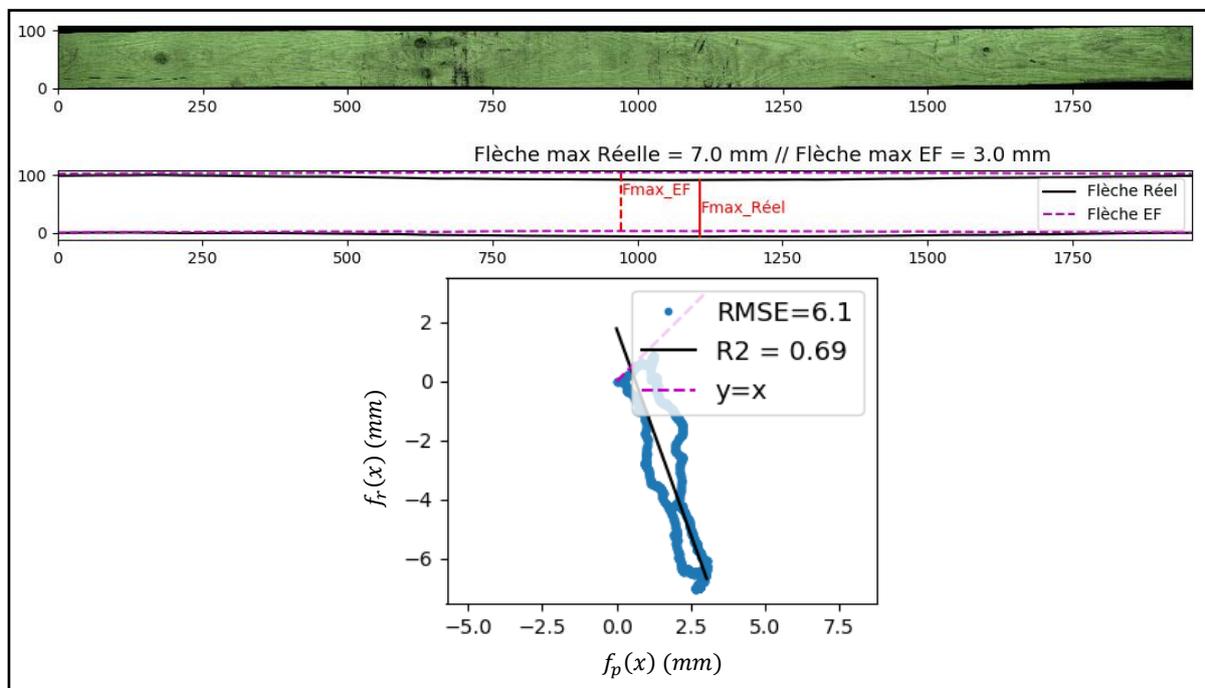
Avivé N°13



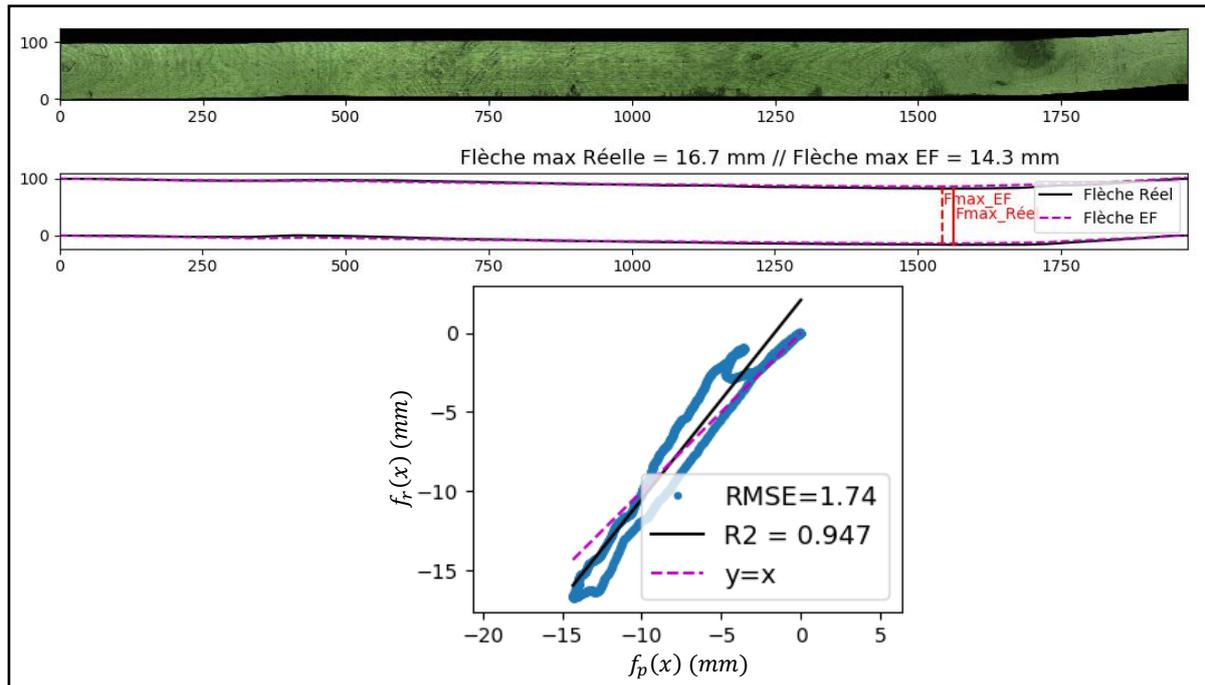
Avivé N°14



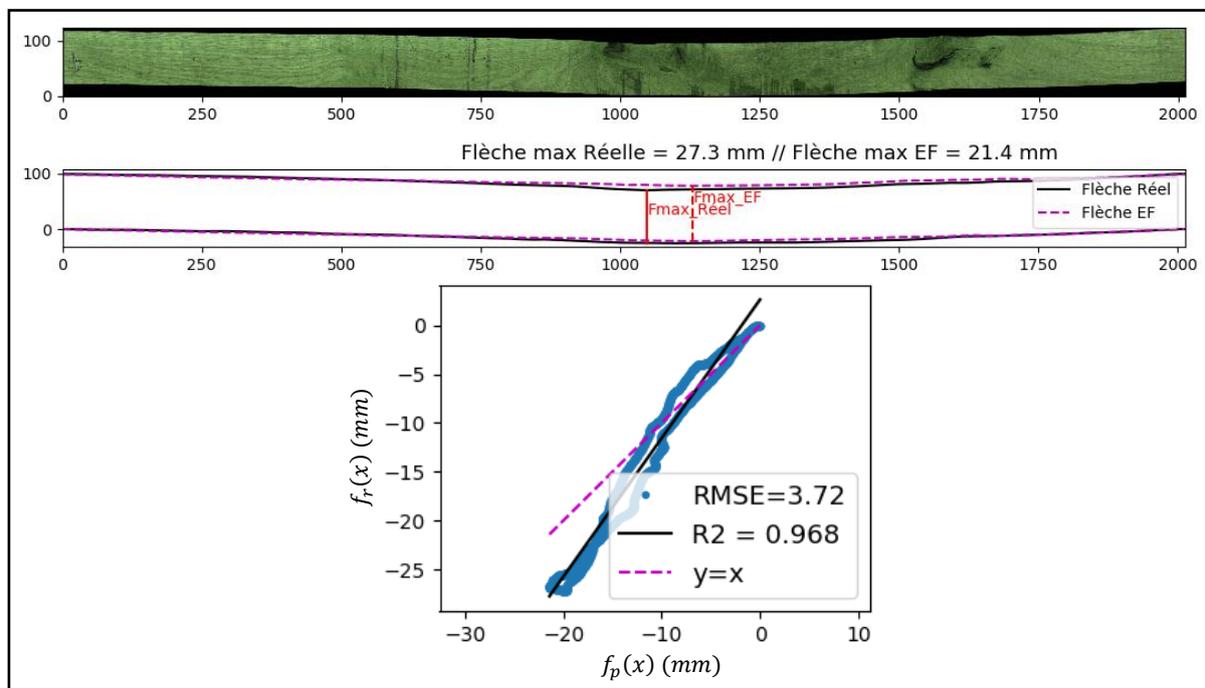
Avivé N°15



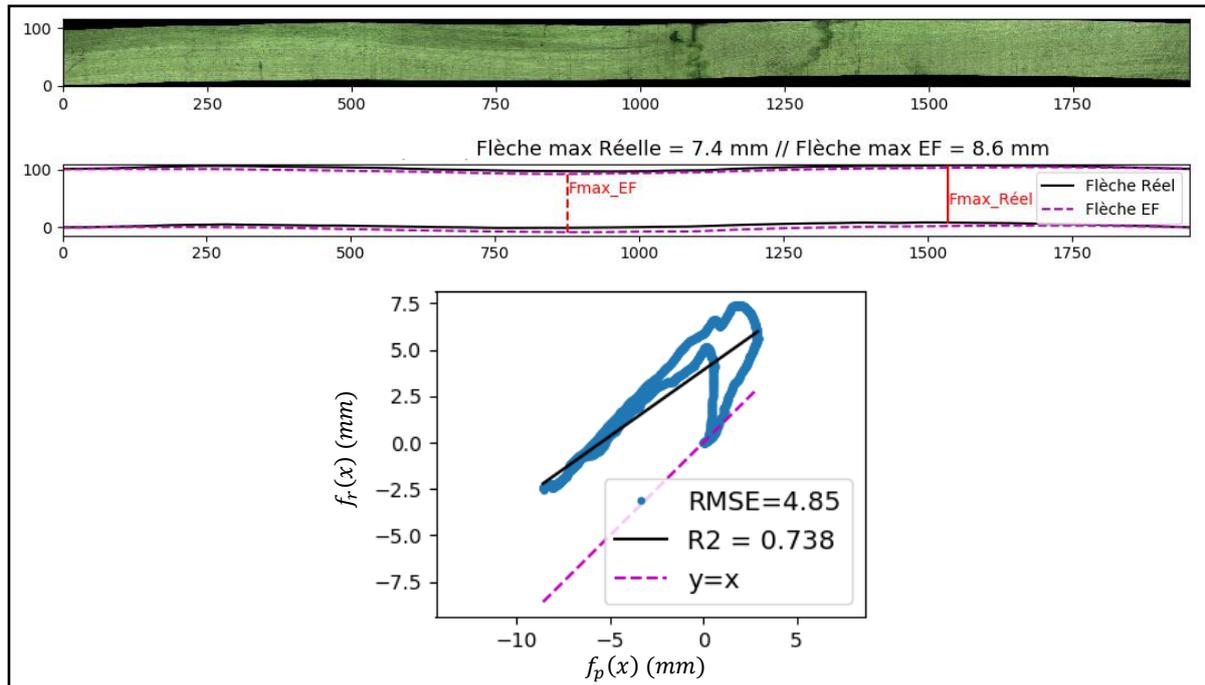
Avivé N°16



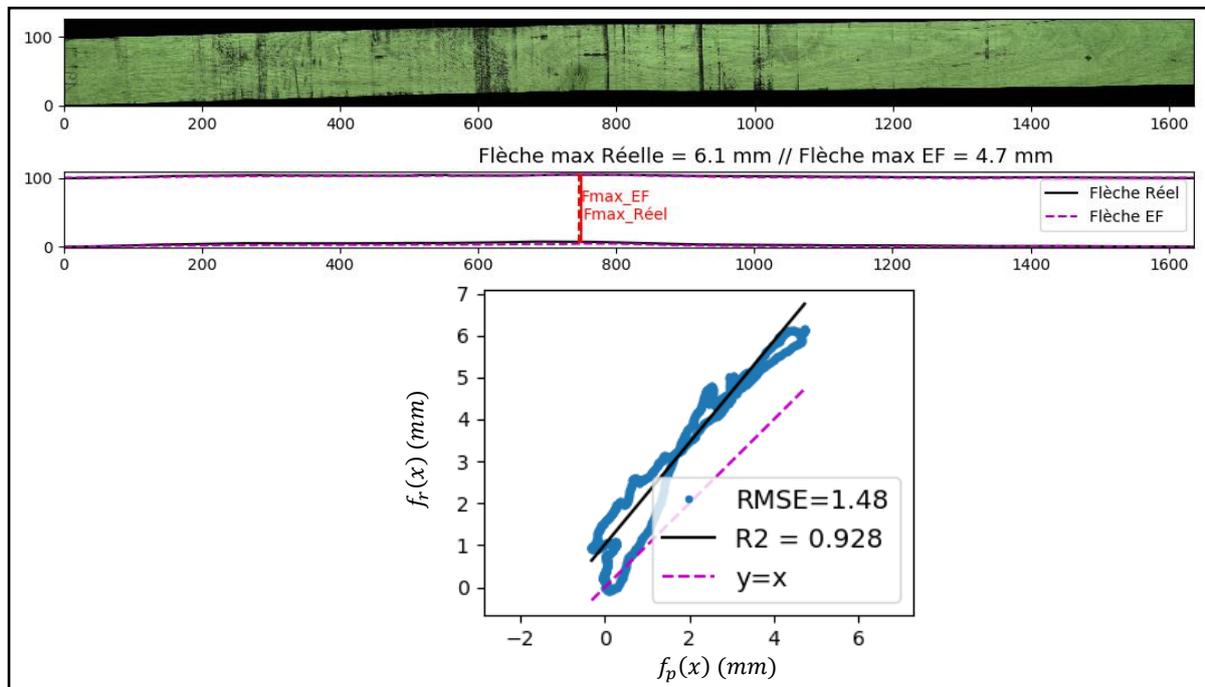
Avivé N°17



Avivé N°18



Avivé N°19



Liste des tableaux

<i>Tableau 1.1 : Classement de la qualité des bois de chêne. (a) EN 1316-1 :2012 ; (b) : IGN, 2019.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 1.2 : Classement qualitatif d'aspect selon EN 975-1:2009 (Adapté de APECF, crédit : Image&associé) .</i>	<i>33</i>
<i>Tableau 1.3 : Valeurs de retraits pour quelques essences (CIRAD). Valeurs moyennes suivies des écarts-types entre parenthèse.</i>	<i>37</i>
<i>Tableau 1.4 : Principaux facteurs influant sur la résistance des aboutages.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau 2.1 : Nombre et état des éprouvettes par essences</i>	<i>54</i>
<i>Tableau 2.2 : Puissance des faisceaux lasers au niveau de la surface des éprouvettes</i>	<i>55</i>
<i>Tableau 2.3 : Valeurs d'angles de référence extrêmes (en valeur absolue) obtenues sur les éprouvettes d'un même lot. Valeurs de références moyennes de ratios et c'aires par lots et plan de symétrie orthotrope. Le coefficient de variation donné entre crochets est en pourcents.</i>	<i>61</i>
<i>Tableau 3.1 : Mesures des retraits et des flèches de rive des avivés étudiés.</i>	<i>83</i>
<i>Tableau 3.2 : Propriétés mécaniques du chêne retenues dans le modèle EF (Kretschmann, 2010).</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 3.3 : Paramètres mécaniques du modèle plan en fonction des débits. Les retraits $R_{T,i}$ et $R_{R,i}$ correspondent aux retraits transverses propres à chaque avivé. Voir les valeurs au Tableau 3.1.</i>	<i>89</i>
<i>Tableau 3.4 : Flèches de rive réelle et prédite avec le modèle éléments finis. Indicateurs de performance du modèle. L'astérisque suivant certaines valeurs de R^2 indique que le coefficient directeur de la droite de corrélation est négatif.</i>	<i>98</i>
<i>Tableau 3.5 : Liste des différentes simulations avec les paramètres propres à chacune</i>	<i>102</i>
<i>Tableau 4.1 : Description de l'échantillonnage</i>	<i>112</i>
<i>Tableau 4.2 : p-value des ANOVA des populations d'ODF_Faces et d'ODF_Rives.</i>	<i>116</i>
<i>Tableau 4.3 : p-value des ANOVA des populations d'ODF_3D.</i>	<i>123</i>
<i>Tableau 4.4 : p-value des ANOVA des populations de résistance et de décollements des entures.</i>	<i>125</i>
<i>Tableau 4.5 : p-value des ANOVA des populations de masses volumiques et de modules d'élasticité vibratoires.</i>	<i>125</i>
<i>Tableau 4.6 : Classements des lots selon les propriétés mesurées, du plus performant au moins performant. .</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 4.7 : Valeurs de résistance, de rigidité et de masse volumique du bois feuillus pour plusieurs classes de résistance. Valeurs de résistance des aboutages associées aux classes de résistance des bois aboutés.</i>	<i>127</i>
<i>Tableau 4.8 : Valeurs de rigidité, de masse volumique et de résistance des aboutages des lots testés.</i>	<i>128</i>
<i>Tableau 4.9 : Valeurs du 5^e percentile de résistance des lots d'aboutages calculés selon XP CEN/TS 13307-2:2010</i>	<i>129</i>
<i>Tableau 4.10 : Paramétrage des propriétés de collage.....</i>	<i>133</i>
<i>Tableau 4.11 : Résultats des simulations de régressions linéaires pour $L_x = 30$ mm. Le calcul des paramètres testés prend en compte les deux courçons formant l'aboutage.</i>	<i>134</i>

Liste des figures

<i>Figure 1.1 : Les étapes clés de la transformation du bois de chêne en produits de construction. Crédits : Bernard Lorette, du bois franc à l'œuvre, Ducerf Groupe.</i>	22
<i>Figure 1.2 : a) Les différentes parties d'un arbre (Source : Pépinière Thuilleaux) ; b) Direction et plans principaux d'un arbre. L : Longitudinal ; T : Tangentiel ; R : Radial. (Moutee 2006).</i>	23
<i>Figure 1.3 : Vue d'une coupe transversale d'un bois de chêne. Crédit : Jean-Claude Cerre</i>	24
<i>Figure 1.4 : a) Schéma des principaux éléments de la microstructure du chêne (Trouy 2018) ; b) Pièce de chêne montrant les rayons ligneux dans les trois plans (Macchioni 2015).</i>	25
<i>Figure 1.5 : Répartition des formations boisées en France par type d'essences (FCBA 2020)</i>	26
<i>Figure 1.6 : a) Ressource disponible en feuillus et résineux ; b) Volumes de bois d'œuvre récoltés en France. Données de l'année 2018 exprimées en millions de mètres cubes (FCBA 2020).</i>	27
<i>Figure 1.7 : Utilisation du bois de chêne (CRPF Île-de-France Centre Val de Loire, 2015)</i>	28
<i>Figure 1.8 : Liste des opérations de 1^{ère} transformation dans le processus de fabrication de lames aboutées.</i>	30
<i>Figure 1.9 : Mode de débit en plot (gauche) et plots produits par Ducerf Scierie (à droite). (Crédit : Ducerf)</i>	31
<i>Figure 1.10 : Exemple de débit pour la fabrication de pièces équerries. (Crédit photos : Ducerf)</i>	31
<i>Figure 1.11 : Schématisation d'un plan de débit d'un avivé. Les lignes rouges représentent les positions des tronçonnages optimisés.</i>	32
<i>Figure 1.12 : Données de production de sciages (hors bois sous rails) de chêne en France de 2009 à 2019 (source : AGRESTE, 2020).</i>	34
<i>Figure 1.13 : Pile d'avivés (gauche) et chargement de piles dans un séchoir (droite). (Crédit : Ducerf).</i>	36
<i>Figure 1.14 : Déformations de section dues à l'anisotropie du retrait tangentiel et radial (adapté de Perré, 2007).</i>	38
<i>Figure 1.15 : Déformations dans le sens longitudinal d'un avivé : a) Voilement longitudinal de face simple ; b) Tuilage ; c) Voilement longitudinal de face complexe ; d) Gauchissement ; e) Voilement longitudinal de rive. (Adapté de l'ISO 2300:1973)</i>	39
<i>Figure 1.16 : Opérations de seconde transformation pour la fabrication de lames aboutées.</i>	39
<i>Figure 1.17 : Exemple de purge d'une fente et de segmentation d'un avivé trop déformé en courçons de plus faible flèche.</i>	40
<i>Figure 1.18 : Schématisation du rabotage d'un avivé déformé (vue de la face ou de la rive).</i>	40
<i>Figure 1.19 : Représentations d'aboutages et paramètres géométriques des entures (Centre Technique du Bois, 1973)</i>	41
<i>Figure 1.20 : Exemple d'une ligne d'aboutage (crédit : Weinig).</i>	42
<i>Figure 1.21 : Processus de fabrication traditionnel (gauche) et processus étudié dans cette thèse (droite).</i>	45
<i>Figure 2.1 : Observation de l'effet trachéide</i>	50
<i>Figure 2.2 : Iso-intensités observées (a) et calculées par la méthode de Monte Carlo (b), d'après Kienle et al. (2008).</i>	50
<i>Figure 2.3 : Exemple d'une cartographie des mesures locales d'ODF d'un avivé de chêne.</i>	51

Figure 2.4 : Echantillonnage d'un lot de 10 éprouvettes. Prélèvement selon les plans LT et LR.	54
Figure 2.5 : Descriptif du BobiScan.....	55
Figure 2.6 : Détails du positionnement des éprouvettes sur le support	56
Figure 2.7 : a) Images de diffusion des points laser à la surface d'une éprouvette de chêne scannée à une ON de 0° ; b) Binarisation de l'image prise par la caméra ; c) Calcul des ellipses pour chaque image de diffusion.....	57
Figure 2.8 : Paramétrage d'une ellipse calculée à partir d'une image de diffusion d'un laser à la surface du bois.	58
Figure 2.9 : Répartition des angles mesurés sur une éprouvette de châtaignier à une ON de 0°.	58
Figure 2.10 : a) Schématisation de la localisation sur l'éprouvette des points de mesure pour des scans à 0° et 50° ; b) Superposition, dans le repère éprouvette et par paramètre ellipse, des dix cartographies d'une éprouvette LT de châtaignier.	59
Figure 2.11 : Schématisation des ellipses types de chaque lot. Chêne VB : Chêne vert brut. Chêne SB : Chêne sec brut. Chêne SP : Chêne sec poncé.....	61
Figure 2.12 : Résultats de mesures d'ODF par lot d'éprouvettes.....	62
Figure 2.13 : Erreurs de mesure (RMSE) par plan de symétrie orthotrope pour chaque lot testé.....	64
Figure 2.14 : Influence d'erreurs de mesure de 1° et 3° sur l'estimation de la résistance avec la formule de Hankinson.	65
Figure 2.15 : a) Population des ratios des ellipses réparties par essences et plan de symétrie orthotrope ; b) Population des aires des ellipses réparties par essences et plan de symétrie orthotrope. Chêne VB : Chêne vert brut. Chêne SB : Chêne sec brut. Chêne SP : Chêne sec poncé.....	66
Figure 2.16 : a) Image d'une éprouvette LT de châtaignier ; b) cartographie des angles mesurés $\omega_{i,k}$; c) cartographie des angles $\omega_{i,k}$ interpolés ; d) cartographie des ratios mesurés $r_{i,k}$; e) cartographie des ratios $r_{i,k}$ interpolés ; f) cartographie des aires mesurées $s_{i,k}$; g) cartographie des aires $s_{i,k}$ interpolées. La couleur des pixels indique la valeur des paramètres.....	67
Figure 2.17 : a-b-c-d : Photo et cartographies des angles, ratios et aires interpolés d'une éprouvette LT de douglas ; e-f-g-h : Photo et cartographies des angles, ratios et aires interpolés d'une éprouvette LT de chêne sec poncé (La résolution de la photo e. ne permet malheureusement pas une bonne appréciation de la zone initiale poreuse).	68
Figure 2.18 : a) Photo d'une éprouvette LR de chêne sec poncé ; b) Cartographie des angles ; c) Cartographie des angles binarisés ; d) Cartographie des aires ; e) Cartographie des ratios ; f) Cartographie des ratios binarisés. .	69
Figure 2.19 : RMSE en fonction des ratios.....	70
Figure 3.1 : Schéma de principe du scanner industriel CombiScan	79
Figure 3.2 : Images du laser direct sur la face 1 – a) bois vert, b) bois sec – et la face 2 – c) bois vert, d) bois sec et position partielle des bords. e) Mesure de la position des bords le long de l'avivé. f) Lissage des bords.	80
Figure 3.3 : Représentation schématique du calcul de flèches de rive. Le calcul est valable sur bois vert et bois sec.	81
Figure 3.4 : Positions des flèches de rive maximales de l'avivé 18 à l'état vert (a et b) et à l'état sec (c et d)	82
Figure 3.5 : Exemple d'un avivé. Image couleur (a) et cartographies des ODF interpolées (b) puis filtrée (c) de la face 1. Image couleur (d) et cartographies des ODF interpolées (e, g) puis filtrée (f, h) de la face 2.....	85
Figure 3.6 : Exemple d'une face d'avivé. a) Image de l'avivé ; b) Cartographie des inverse des ratios r_{xy} ; c) Cartographie des angles α_{xy} (°) ; d) Cartographie des indices de nodosité n_{xy} (°²).....	87

Figure 3.7 : a) Cartographie brute des nœuds n_{ij} ; b) Lissage des n_{ij} ; c) application d'un seuil de binarisation de 600 ; d) application de fonctions de transformations morphologiques donnant la cartographie finale des nœuds.	87
Figure 3.8 : Plans de symétrie orthotrope du tronc d'arbre et d'un nœud (représenté en rouge).	88
Figure 3.9 : Maillage et conditions aux limites du modèle éléments finis (blocages représentés par les triangles oranges).	91
Figure 3.10 : Schématisation du modèle de déformation ; a) Cas d'un avivé sur dosse ; b) Cas d'un avivé sur quartier.	92
Figure 3.11 : Etude des déformations données par le modèle EF : a) Avivé d'ODF constante de 0° ; b) Avivé d'ODF constante de 20°	93
Figure 3.12 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec un nœud centré dans la largeur.	94
Figure 3.13 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec un nœud excentré.	94
Figure 3.14 : Etude des déformations données par le modèle EF. Cas d'un avivé avec plusieurs nœuds.	95
Figure 3.15 : Déformations réelle et prédite (avivé 11, dosse).	96
Figure 3.16 : Exemple d'un avivé sur quartier (réf. 04). En haut : image couleur de l'avivé sec. En bas : superposition de la déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).	96
Figure 3.17 : Exemple d'un avivé sur dosse (réf. 17). En haut : image couleur de l'avivé sec. En bas : superposition de la déformation prédite (pointillés) et réelle (trait plein).	97
Figure 3.18 : Focus sur la zone noueuse complexe de l'avivé 10 ; a) image bois vert, b) image bois sec, c) résultat de la détection de nœud.	99
Figure 3.19 : Corrélation entre les flèches de rives maximales prédites et réelles.	100
Figure 3.20 : Scénarios de prédiction de la flèche de rive maximale. Les droites en pointillés représentent les valeurs des seuils.	101
Figure 3.21 : Comparaison de $S_{étude}$ et S_{indus} : ΔR^2 , $\Delta RMSE$ et Δf pour chaque avivé. Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.	103
Figure 3.22 : Ecarts ΔR^2 , $\Delta RMSE$ et Δf par avivé entre SE 12 et S_{indus} et entre SE 16 et S_{indus} . Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.	103
Figure 3.23 : Ecarts ΔR^2 , $\Delta RMSE$ et Δf entre SRN 7 et S_{indus} , entre SRN 9 et S_{indus} et entre SRN 10 et S_{indus} . Les lignes en pointillés représentent la valeur moyenne des écarts des avivés.	104
Figure 3.24 : a) Flèche de rive réelle en fonction de la prédite pour les cas où le retrait dans le nœud est égal à 7 %, 7,7 % (S_{indus}), 9 % et 10 %. Zoom sur les défauts principaux qui sont aussi les lieux de la flèche maximale pour : b) avivé 11 (nœud proche d'une rive fendu après séchage) ; c) avivé 17 (plusieurs nœuds) ; d) avivé 16 (nœud proche d'une rive non fendu après séchage) ; e) avivé 10 (grosse zone de nœud).	105
Figure 4.1 : Distance minimale entre la base de l'aboutage à entures multiples et un nœud (EN 14080:2013) ; a) Nœud conservé dans la lame aboutée ; b) purge d'un nœud avant aboutage.	111
Figure 4.2 : Photo du dispositif d'essai de mesure de la résistance en flexion à plat des aboutages à enture multiples (montage d'essai selon EN408:2012)	113
Figure 4.3 : Exemple de cartographies d'angles d'ODF d'une lame aboutée (le code couleur donne la valeur des angles en degré) et visualisation des aboutages et des zones d'étude pour la caractérisation de l'ODF autour des aboutages.	115

<i>Figure 4.4 : Comparaison des populations d'orientations des fibres de face et de rive proches des aboutages. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.</i>	<i>115</i>
<i>Figure 4.5 : a) Attribution dans le volume des angles de surface (Olsson et al. 2013) ; b) : Représentation schématique des angles dans Rais et al. (2021). Les points rouges représentent les images de diffusion.</i>	<i>117</i>
<i>Figure 4.6 : Paramétrage d'un élément de fibre dans l'espace</i>	<i>118</i>
<i>Figure 4.7 : de haut en bas : Représentation des mesures d'ODF dans le plan (le code couleur donne la valeur des angles en degré) ; Recomposition dans l'espace d'une partie de la lame ; Discrétisation en vue du calcul des angles plans.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 4.8 : Exemple de calcul des angles γ_{xyz} pour un élément de section. Le code couleur indique la valeur des angles.....</i>	<i>120</i>
<i>Figure 4.9 : Cas d'un nœud centré dans la largeur et invisible sur les rives.</i>	<i>121</i>
<i>Figure 4.10 : Cas d'un nœud visible sur une rive et se propageant très peu dans la largeur.</i>	<i>122</i>
<i>Figure 4.11 : Comparaison des populations d'orientations des fibres 3D (ODFi, 3D) proches des aboutages. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.</i>	<i>123</i>
<i>Figure 4.12 : a) Populations de résistance des aboutages ; b) Populations de décollement moyen des entures ; c) Populations de résistance des aboutages ayant un décollement d'au moins 80 %. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.</i>	<i>124</i>
<i>Figure 4.13 : a) Comparaison des populations de masses volumiques des courçons composant les aboutages ; b) Comparaison des populations de modules vibratoires des courçons. Les repères horizontaux des boîtes à moustache représentent, de bas en haut : minimum, 1^{er} quartile, médiane, 3^e quartile, maximum. La moyenne est inscrite à sa droite.</i>	<i>125</i>
<i>Figure 4.14 : Corrélations, tous lots confondus, entre la résistance des aboutages et les fHank des aboutages (a, b, c, d), le module d'élasticité vibratoire (e) et la masse volumique (f). Les RMSE sont exprimés en MPa.</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4.15 : Evolution du coefficient de détermination R^2 entre la résistance des aboutages et les paramètres fHank en fonction de la distance L_x de l'aboutage sur laquelle sont moyennées les différentes valeurs locales fHank.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 4.16 : Classement D30 (a ; b) et D35 (c ; d) des aboutages selon les simulation 2Da_MVa (à gauche) et 2Da_MVa_C_Q (à droite).....</i>	<i>135</i>
<i>Figure 4.17 : Evolution du coefficient de détermination R^2 entre la résistance des aboutages et les paramètres fHank du courçon qui a cassé, en fonction de la distance L_x de l'aboutage sur laquelle sont moyennées les différentes valeurs fHank.</i>	<i>137</i>
<i>Figure 4.18 : Comparaison de prédiction avec la considération des deux courçons (ab) et de celui qui a cassé (rup). a) : R^2 ; b) Rendement et justesse. La population d'aboutages testée est restreinte aux aboutages dont la casse a pu être affectée à l'un des deux courçons.</i>	<i>138</i>
<i>Figure 4.19 : Comparaison des corrélations entre masse volumique et résistance. a) : masse volumique moyenne des deux courçons ; b) masse volumique de celui qui a cassé.....</i>	<i>138</i>
<i>Figure 4.20 : Schématisation du problème de tronçonnage d'un avivé en tenant compte de la résistance des futurs aboutages.</i>	<i>141</i>
<i>Figure 4.21 : a) Image d'un avivé frais de sciage ; b) ODF moyenne des deux faces de l'avivé, mesurées sur bois vert ; c) Plan de tronçonnage pour l'extrémité à droite de la position de tronçonnage (ExtD) ; d) Plan de tronçonnage pour l'extrémité à gauche de la position de tronçonnage (ExtG) ; e) Regroupement des deux plans</i>	

de tronçonnage pour former le plan de tronçonnage final de l'avivé. Le code couleur des figures c), d), et e) permet la distinction des différentes zones où le tronçonnage est possible ou pas. 142

Benoît BESSEAU

Contribution au développement de procédés innovants pour une transformation plus efficiente du chêne



Résumé

L'un des défis majeurs de la filière bois feuillus, pour répondre à la forte augmentation des besoins en bois dans la construction, est la transformation efficiente de la ressource de qualité secondaire en produits innovants et compétitifs. Cette thèse contribue au développement de solutions pour répondre à cet enjeu, tout d'abord par l'apport de connaissances sur la technologie de mesure de l'orientation des fibres (ODF) d'un sciage avec un laser point, puis par la proposition d'applications originales rendues possibles grâce à un scanner mesurant l'ODF. Après avoir montré que ces mesures peuvent être réalisées sur du chêne frais brut de sciage, les déformations au séchage d'un avivé ont été modélisées sur la base de ces données d'ODF. L'exploitation des données d'ODF s'est aussi révélée pertinente pour la caractérisation de la résistance mécanique des aboutages de courçons de chêne et pour l'évolution de la normalisation du contrôle de la qualité des aboutages. Ces résultats se sont aussi révélés utiles pour optimiser le tronçonnage d'avivé en courçons spécialement destinés à l'aboutage.

Bois ; chêne ; orientation des fibres ; séchage ; aboutage

Résumé en anglais

One of the major challenges for the hardwood industry to meet the sharp increase of wood requirements in construction is the efficient processing of the second quality resource into innovative and competitive products. This thesis contributes to the development of solutions to respond to this challenge, first by providing knowledge on the laser dot technology to measure the wood fiber orientation (FO), then by the presentation of new applications made possible by a scanner measuring FO. After showing that these measurements can be carried out on fresh rough sawn oak, lengthwise curvatures of a square edge wood caused by drying were modeled on the basis of this FO data. The use of FO data has also been shown to be relevant to characterize the mechanical resistance of oak finger jointing and to develop the standardization of finger joint quality control. These results have also been used to optimize the cutting of square edge wood into elements specially reserved to do finger joints.

Wood; oak; fiber orientation; drying; finger joint.