



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



École Doctorale RP2E

Université de Lorraine

THÈSE DE DOCTORAT

SCIENCES DU BOIS ET DES FIBRES

Joffrey VIGUIER

Classement mécanique des bois de structure.
Prise en compte des singularités dans la modélisation
du comportement mécanique.

Directeur de thèse : **Laurent BLERON**
Co-encadrement de la thèse : **Robert COLLET**

Soutenue le 12 novembre 2015 devant le jury composé de :

| | |
|--|-----------------------|
| Evelyne Toussaint , Professeure, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand | Rapporteur |
| Frédéric Dubois , Professeur, Université de Limoges, Egletons | Rapporteur |
| Jean-François Bocquet , Maître de conférences, Université de Lorraine, Epinal | Examineur |
| Guillaume Roblot , Dr. Ingénieur, Luxscan Technologies, Ehlerange | Examineur |
| Laurent Bléron , Professeur, Université de Lorraine, Epinal | Directeur de thèse |
| Robert Collet , Maître de conférences, HDR, Arts et Métiers ParisTech, Cluny | Co-directeur de thèse |
| Jean-Denis Lanvin , Dr. Ingénieur chef de projet, Institut technologique FCBA, Bordeaux | Invité |

Remerciements

Tout d'abord je voudrais remercier les professeurs Evelyne Toussaint et Frédéric Dubois d'avoir accepté de juger mon travail et de rapporter ce mémoire.

Je tiens également à remercier Laurent Bléron, mon directeur de thèse sans qui rien de tout cela n'aurait été possible, tant pour son aide d'un point de vue scientifique que pour son soutien au jour le jour et la bienveillance dont il a fait preuve pour me mettre dans les meilleures conditions pour la suite de ma carrière. Grâce à lui j'ai de plus eu la chance de faire de nombreux voyages au cours de ces trois années de thèse. Un grand merci aussi de sa très grande disponibilité pour toutes les re-lectures qu'il a du subir !

Je remercie aussi Robert Collet, pour ses conseils, ses connaissances du milieu industriel, sa sympathie, sa franchise et pour ses remarques toujours constructives sur mon travail émises lors de réunions. Je le remercie aussi de la re-lecture et correction estivale de ce rapport alors que son petit bassin lui tendait les bras !

Pour les nombreux échanges que nous avons pu avoir, ses précieux conseils, son engagement dans ce travail de thèse et son aide pour la rédaction du rapport et des articles, merci à Jean-Denis Lanvin.

Je remercie aussi Jean-François Bocquet pour son aide sur la modélisation et pour les nombreuses discussions et franches rigolades que l'on a pu avoir. Le voyage à Québec restera pour moi un des meilleurs moments de ces trois années.

Un immense merci à Michael Krebs pour sa participation à l'ensemble de la campagne de contrôle non-destructifs. Il m'a toujours accueilli avec amitié même si ma venue était souvent synonyme de journées à transporter des planches. Merci aussi pour l'ensemble de sa participation et de son engagement pour le projet CLAMEB notamment pour la logistique des différentes livraisons de lots de sciages.

Pour leur aide lors de la campagne de contrôles non-destructifs et pour leur accueil chaleureux à chacune de mes venues à Cluny merci à Jean-Claude Butaud, Fabrice Cottin et Louis Denaud.

Je tiens aussi à remercier Guillaume Pot pour sa sympathie, ses conseils, ses remarques, son aide pour la rédaction des articles et son soucis de m'impliquer dans les développements de mes travaux réalisés à Cluny.

Merci aussi à Damien Bourreau et Frédéric Mothe pour leur travail sur l'échantillonnage du lot de douglas et les différents échanges que l'on a pu avoir à ce sujet.

Pour les différentes discussions que nous avons pu avoir et ses précieux conseils sur la modélisation et les analyses statistiques merci à Frédéric Rouger.

Je tiens aussi à remercier Guillaume Roblot d'avoir accepté de prendre part au jury de cette thèse et pour sa disponibilité sur des détails techniques liés au scanner lors du contrôle non-destructif des différents lots.

Je remercie aussi Arnaud Jehl pour ses travaux dont j'ai pu profiter et qui a toujours su se rendre disponible lorsque j'avais besoin de lui.

Merci à Arnaud Besserer de m'avoir fait découvrir des outils d'analyses statistiques dont je ne soupçonnais pas l'existence et qui m'ont permis de prendre pleinement conscience de cette problématique.

Pour son aide lors des essais destructifs menés à l'ENSTIB et sa sympathie merci aussi à Stéphane Aubert.

Je tiens aussi à remercier Jean Piveteau de l'entreprise Piveteau Bois, Jean-Claude Sève et Stéphane Vives de la société Monnet-Sève, et Guillaume Cruzille de l'entreprise Arbonis pour leur confiance et leur soutien financier tout au long de ces trois années de thèse. Merci aussi à Arnaud Grellet et Maxime Chauttard de la société Monnet-Sève et Patrice Colombo de l'entreprise Arbonis pour leur disponibilité et leur implication dans ce projet ainsi qu'à Sébastien Grisard de la société Ducerf d'avoir collecté et fourni les données sylvicoles du lot de chêne.

Un grand merci à Linda Bosser pour sa gentillesse et son professionnalisme, qui a toujours répondu présente lorsque j'avais besoin d'elle. Et bien sur je remercie toutes les personnes grâce à qui j'ai pu passer trois années très agréables. En premier lieu Damien et Marie pour tous ces délicieux repas et joyeuses soirées en votre compagnie, Gofio vous remercie aussi de vous être si bien occupé de lui. Iman (a.k.a mon lapin) avec qui j'ai eu la chance de découvrir l'Iran, Stéphane aux cotés de qui j'ai autant progressé que rigolé. Mathieu pour sa sympathie et son goût prononcé pour le baby foot, Laure (a.k.a Barbara Trepied) pour sa gentillesse, Romain et Clément qui ont sus rendre la fin de ces trois années très sympathique. Pour finir je remercie Sandra, grâce à qui j'ai pu me changer agréablement les idées et trouver plus facilement le sommeil à chacun de mes retours en Auvergne.

Table des matières

| | |
|---|-----------|
| Remerciements | 1 |
| Introduction | 11 |
| 1 Synthèse bibliographique | 17 |
| 1.1 Généralités sur la structure et la croissance des arbres | 17 |
| 1.1.1 Structure générale de l'arbre | 17 |
| 1.1.2 Le phénomène de croissance | 18 |
| 1.1.2.1 Croissance primaire | 18 |
| 1.1.2.2 Croissance secondaire | 18 |
| 1.1.3 Structure microscopique du bois | 20 |
| 1.1.3.1 Formation du bois | 20 |
| 1.1.3.2 La paroi cellulaire | 21 |
| 1.1.4 Différences entre plan ligneux des résineux et des feuillus | 22 |
| 1.1.4.1 Le plan ligneux des résineux | 22 |
| 1.1.4.2 Le plan ligneux des feuillus | 22 |
| 1.1.5 Comportement mécanique du bois | 22 |
| 1.1.5.1 Tenseur des souplesses et loi de comportement | 22 |
| 1.1.6 Conclusion sur la structure et la croissance des arbres | 24 |
| 1.2 Facteurs affectant le comportement mécanique d'un sciage | 25 |
| 1.2.1 Humidité | 25 |
| 1.2.2 Masse volumique | 27 |
| 1.2.3 Pente de fil | 29 |
| 1.2.4 Nodosité | 31 |
| 1.2.5 Bois juvénile | 31 |
| 1.2.6 Bois de réaction | 35 |
| 1.2.7 Données sylvicoles et qualité du bois | 36 |
| 1.2.8 Conclusion sur le comportement mécanique du bois | 39 |
| 1.3 Classement mécanique du bois | 40 |
| 1.3.1 Introduction | 40 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1.3.2 | Caractérisation mécanique d'un sciage à partir d'essais destructifs et classement optimal d'un lot | 43 |
| 1.3.2.1 | Classement optimal | 44 |
| 1.3.3 | Classement visuel | 45 |
| 1.3.3.1 | Comparaison entre classement visuel et classement optimal | 47 |
| 1.3.4 | Classement par machine | 49 |
| 1.3.4.1 | Introduction | 49 |
| 1.3.4.2 | Cadre normatif | 49 |
| 1.3.4.3 | Évaluation de la qualité du classement par machine | 52 |
| 1.3.4.3.1 | Coefficient de détermination | 52 |
| 1.3.4.3.2 | Indice d'efficience | 53 |
| 1.3.5 | Conclusion sur le classement mécanique | 56 |
| 1.4 | Estimation non-destructive des propriétés mécaniques | 56 |
| 1.4.1 | Estimation de la masse volumique | 56 |
| 1.4.1.1 | Pesée du sciage | 56 |
| 1.4.1.2 | Utilisation des rayons X | 56 |
| 1.4.2 | Estimation du module d'élasticité | 57 |
| 1.4.2.1 | Essai de flexion dynamique «Stress grader» | 57 |
| 1.4.2.2 | Méthodes vibratoires | 58 |
| 1.4.2.3 | Méthodes ultrasonores | 60 |
| 1.4.2.4 | Comparatif des différentes méthodes d'estimation du MOE | 60 |
| 1.4.3 | Estimation de la résistance en flexion | 62 |
| 1.4.3.1 | Mesure de la nodosité | 63 |
| 1.4.3.2 | Mesure de la pente de fil | 67 |
| 1.4.4 | Modèles de prédiction | 69 |
| 1.4.4.1 | Régression linéaire multiple | 69 |
| 1.4.4.2 | Réseau de neurones | 71 |
| 1.4.4.3 | Modèles de prédiction basés sur des principes mécaniques | 73 |
| 1.4.4.4 | Comparatif des différentes méthodes d'estimation du MOR | 74 |
| 1.4.5 | Conclusion sur la prédiction des propriétés mécaniques | 75 |
| 1.5 | Refente du bois lamellé-collé | 76 |
| 1.6 | Conclusion de la synthèse bibliographique | 78 |
| 2 | Contrôles non destructifs et modèles de prédiction des propriétés mécaniques | 79 |
| 2.1 | Introduction | 79 |
| 2.2 | Composition des différents lots de l'étude | 79 |
| 2.2.1 | Chêne | 80 |
| 2.2.2 | Douglas | 80 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| 2.2.3 | Epicéa | 81 |
| 2.3 | Données sylvicoles du lot de douglas | 81 |
| 2.3.1 | Localisation verticale des sciages | 81 |
| 2.3.2 | Localisation radiale des sciages | 82 |
| 2.4 | Tests destructifs | 83 |
| 2.5 | Contrôles non destructifs | 85 |
| 2.5.1 | Mesure du taux d'humidité | 85 |
| 2.5.2 | Mesure de masse volumique | 86 |
| 2.5.2.1 | Mesure automatique et pesée manuelle | 86 |
| 2.5.2.2 | Utilisation d'une source rayons X | 86 |
| 2.5.3 | Mesure de module d'élasticité | 87 |
| 2.5.3.1 | Méthode ultra sonore | 87 |
| 2.5.3.1.1 | Mesure à l'aide du Sylvatest | 87 |
| 2.5.3.2 | Méthodes vibratoires | 88 |
| 2.5.3.2.1 | Mesure à l'aide de l'E-scan | 88 |
| 2.5.3.2.2 | Mesure à l'aide du MTG | 89 |
| 2.5.3.2.3 | Mesure à l'aide de l'E-Control | 90 |
| 2.5.4 | Détection et mesure des singularités | 91 |
| 2.5.4.1 | Nodosité | 91 |
| 2.5.4.2 | Pente de fil | 92 |
| 2.6 | Présentation et analyse statistique des grandeurs mesurées | 93 |
| 2.6.1 | Sélection des paramètres issus du Scanner | 94 |
| 2.6.2 | Analyse des données non destructives et sylvicoles dans le cas du chêne | 101 |
| 2.6.3 | Analyse des données non destructives et sylvicoles dans le cas du douglas | 103 |
| 2.6.4 | Analyse des données non destructives dans le cas de l'épicéa | 111 |
| 2.7 | Régressions linéaires | 113 |
| 2.7.1 | Chêne | 113 |
| 2.7.2 | Douglas | 115 |
| 2.7.3 | Epicéa | 115 |
| 2.7.4 | Conclusion sur les régressions linéaires multiples | 117 |
| 2.8 | Modèle analytique | 118 |
| 2.8.1 | Prise en compte de la pente de fil | 119 |
| 2.8.1.1 | Estimation du module d'élasticité local | 119 |
| 2.8.1.2 | Calcul de la rigidité efficace en flexion | 120 |
| 2.8.1.3 | Estimation du module d'élasticité global | 120 |
| 2.8.1.4 | Estimation des contraintes admissibles locales | 121 |
| 2.8.1.5 | Calcul des contraintes normales | 121 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 2.8.1.6 | Estimation de la résistance à la flexion | 121 |
| 2.8.2 | Sans prise en compte de la pente de fil | 122 |
| 2.8.3 | Combiné avec une mesure de module d'élasticité non-destructive . . | 122 |
| 2.8.4 | Résultats de la prédiction du modèle analytique | 122 |
| 2.9 | Conclusion sur la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques | 128 |
| 3 | Classement mécanique du bois massif | 131 |
| 3.1 | Algorithme du réglage machine | 131 |
| 3.2 | Problèmes rencontrés lors du réglage d'une machine | 135 |
| 3.2.1 | Influence du nombre d'IP | 136 |
| 3.2.2 | Problème inhérent au cadre normatif | 139 |
| 3.2.3 | Influence de la combinaison choisie et de la stratégie du réglage . . | 141 |
| 3.3 | Classement mécanique des résineux | 145 |
| 3.3.1 | Rendements selon la stratégie de réglage machine | 145 |
| 3.3.2 | Effizienz et justesse du classement | 153 |
| 3.3.3 | Conclusion sur le classement mécanique par machine des résineux . | 155 |
| 3.4 | Analyse économique pour le cas des résineux | 156 |
| 3.4.1 | Hypothèses et démarche de calcul | 156 |
| 3.4.2 | Outil d'aide à la décision | 165 |
| 3.4.2.1 | Influence de la stratégie de réglage | 167 |
| 3.4.3 | Conclusion sur l'analyse économique du classement machine des résineux | 167 |
| 3.5 | Classement mécanique du chêne | 169 |
| 3.5.1 | Classement par machine | 169 |
| 3.5.2 | Approche par machine d'épreuve | 171 |
| 3.6 | Conclusion sur le classement mécanique du bois massif | 174 |
| 4 | Classement mécanique de poutres reconstituées | 177 |
| 4.1 | Refente du bois lamellé-collé | 177 |
| 4.1.1 | Introduction | 177 |
| 4.1.2 | Essais destructifs à l'échelle de la lamelle | 178 |
| 4.1.2.1 | Matériel et méthodes | 178 |
| 4.1.2.1.1 | Echantillon | 178 |
| 4.1.2.1.2 | Tests destructifs | 178 |
| 4.1.2.2 | Résultats | 178 |
| 4.1.3 | Essais destructifs sur des poutres lamellées-collées | 180 |
| 4.1.3.1 | Matériel et méthodes | 180 |
| 4.1.3.1.1 | Echantillon | 180 |
| 4.1.3.1.2 | Tests destructifs | 181 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.1.3.2 | Résultats | 181 |
| 4.1.4 | Influence de la refente sur des lamelles : modèle analytique | 184 |
| 4.1.4.1 | Matériel et méthodes | 184 |
| 4.1.4.1.1 | Echantillon et essais destructifs | 184 |
| 4.1.4.1.2 | Outil de prédiction des propriétés mécaniques | 184 |
| 4.1.4.1.3 | Refente numérique | 184 |
| 4.1.4.2 | Résultats | 187 |
| 4.1.4.2.1 | Influence de la refente sans prise en considération de la hauteur initiale | 187 |
| 4.1.4.2.2 | Influence de la hauteur initiale sur le processus de refente | 189 |
| 4.1.5 | Refente numérique de poutres lamellées-collées | 192 |
| 4.1.5.1 | Matériel et méthodes | 192 |
| 4.1.5.1.1 | Echantillon et essais destructifs | 192 |
| 4.1.5.1.2 | Caractérisation non-destructive des poutres | 192 |
| 4.1.5.1.3 | Modélisation éléments finis | 195 |
| 4.1.5.1.4 | Poutres aléatoires | 197 |
| 4.1.5.2 | Résultats | 198 |
| 4.1.5.2.1 | Validation du modèle | 198 |
| 4.1.5.2.2 | Influence de la refente | 199 |
| 4.2 | Conclusion | 202 |
| | Conclusions et perspectives | 203 |
| | Bibliographie | 208 |
| | Table des figures | 215 |
| | Liste des tableaux | 221 |

Introduction

Pour atteindre les objectifs de l'Union Européenne en termes de développement durable, d'utilisation de matériaux renouvelables et de lutte contre le changement climatique, le bois possède de nombreux avantages par rapport aux autres matériaux utilisés dans la construction industrielle (acier et béton). En effet, la mise en oeuvre du bois nécessite très peu d'énergie, du CO₂ est de plus stocké lors de sa croissance et la ressource est inépuisable si elle est renouvelée. Au delà de son intérêt écologique, le bois possède aussi de nombreux avantages d'un point de vue architectural : à résistance égale, le bois est beaucoup plus léger que le béton ou l'acier ; cela facilite notamment le transport. La tenue au feu du bois est elle aussi bien meilleure et certaines essences possèdent de plus une durabilité naturelle permettant leur emploi en extérieur. (c'est le cas du douglas naturellement classe 3). Enfin le bois possède aussi de bonnes propriétés thermiques et acoustiques.

Pour que le bois puisse participer aux objectifs à l'horizon 2020 de l'Union Européenne (20% d'énergies renouvelables, diminution de 20 % de la consommation d'énergie et diminution de 20 % des émissions de gaz à effet de serre), l'approvisionnement en matière première doit pouvoir répondre à cet accroissement de la demande. La réponse à cette interrogation se situe dans le fait que la récolte du bois en Europe ne représente que les 2/3 de l'accroissement biologique annuel. De plus, la superficie de la forêt française augmente régulièrement depuis une cinquantaine d'années (passant de 11 millions d'hectares en 1950 à plus de 16 millions en 2009). Les Assises de la forêt [24] en 2008 ont permis d'identifier une ressource supplémentaire mobilisable dans des conditions compatibles avec la gestion durable. Elle était de 12 millions de m³ en 2012 et devrait être de plus de 20 millions de m³ en 2020 pour fournir le bois, matériau et énergie nécessaires, à l'atteinte des objectifs du Grenelle de l'environnement. La marge de progression de la récolte est donc très grande.

De plus l'impact sur l'emploi serait significatif, l'application de ce plan génèrerait près de 40 000 emplois supplémentaires en cinq ans qui seraient ancrés dans les territoires pour la récolte, la mise en oeuvre et la valorisation du bois. C'est pour ces différentes raisons que le développement de l'usage du bois dans le bâtiment est porté par une volonté politique de l'Union Européenne, des États et des collectivités territoriales. Cet intérêt porté en faveur de la filière bois est aussi partagé par les décideurs du secteur du bâtiment par l'investissement croissant de grands promoteurs pour la construction de bâtiments

de grande hauteur en bois. Malgré ces nombreux avantages et les politiques visant à encourager son emploi, un certain nombre de verrous freinent encore le développement du bois.

L'origine naturelle du bois est source d'une grande variabilité des propriétés du matériau bois. Cette variabilité implique par exemple des différences de propriétés selon l'essence considérée ou selon les conditions de sylviculture pratiquées. Elle est aussi présente entre deux arbres même s'ils appartiennent à la même essence. Enfin les produits issus d'un même arbre peuvent aussi présenter des propriétés différentes. Dans un marché de la construction habitué à l'utilisation de produits parfaitement élaborés, normés, certifiés, l'utilisation du bois avec des caractéristiques aléatoires peut être problématique. L'enjeu principal est donc de garantir aux différents acteurs du marché que le bois peut répondre aux mêmes exigences qu'avec tout autre matériaux de construction. Pour le cas de notre étude, les exigences portent sur la garantie des propriétés mécaniques du bois.

En effet, pour le calcul de structures en bois, il convient d'appliquer les méthodes décrites dans l'Eurocode 5. L'application de ces méthodes oblige les prescripteurs à utiliser du bois classé, c'est à dire du bois appartenant à une certaine classe de résistance au sein de laquelle les propriétés mécaniques sont garanties. La contrainte d'utiliser du bois classé est primordiale pour assurer la même fiabilité à une construction en bois qu'à une autre utilisant tout autre matériau de construction. C'est pourquoi le marquage CE des sciages à usage structurel est désormais obligatoire en France, ce marquage impose donc d'avoir recours soit au classement visuel (régé par la norme NF B52-001) ou au classement par machine (norme EN 14081). De nombreuses études ([51], [32]) ont montré la faible performance du classement visuel par rapport au classement par machine, le classement visuel conduisant à un fort déclassement du bois par rapport aux propriétés mécaniques réelles. En effet, un certain nombre de paramètres affectant négativement le comportement mécanique ne sont pas visibles à l'oeil nu (le bois juvénile par exemple) et les corrélations entre les propriétés observées lors du classement visuel et les propriétés mécaniques sont plutôt faibles. Pour éviter tout sur-classement (et ainsi éviter tout problème de sécurité), les propriétés des pièces de bois sont volontairement sous estimées dans les normes de classement visuel. Il est ainsi nécessaire, pour valoriser au mieux la ressource d'avoir recours au classement par machine, cette méthode a de plus pour avantage d'être réalisable à des cadences beaucoup plus élevées.

Selon le cadre normatif relatif au classement structurel, l'attribution d'un sciage à une classe nécessite de garantir trois propriétés : la masse volumique, le module d'élasticité (MOE) et la résistance à la flexion (MOR). Les valeurs seuils sur ces trois propriétés sont répertoriées dans la norme EN 338. Pour chaque classe, des valeurs limites pour ces trois propriétés sont définies. Toutes les autres propriétés dont le concepteur a besoin pour réaliser un dimensionnement sont alors déduites de ces trois propriétés. L'objectif du classement est donc de prédire au mieux ces propriétés. La détermination de la masse

volumique est bien maîtrisée par la simple pesée et mesure des dimensions des pièces de bois. La prédiction du MOE est elle aussi très bonne, de nombreuses machines existent et permettent sa mesure (physique ou réelle) à des cadences industrielles. Le verrou technologique réside dans la prédiction du MOR, sa mesure n'étant pas accessible de manière non-destructive. Dans la grande majorité des applications déjà développées pour le classement mécanique par machine (ou classement pour la résistance par machine), l'estimation du MOR est déduite de la mesure du MOE (en exploitant la corrélation existante entre MOE et MOR). Dans le cas de certaines essences, cette corrélation est trop faible pour apporter une prédiction suffisante du MOR. Des méthodes pour améliorer cette prédiction existent et utilisent l'ajout de la mesure de singularités telles que la nodosité ou la pente de fil dans des modèles.

Par ailleurs, plusieurs études montrent que la résistance mécanique dépend aussi de l'âge de l'arbre, de la vitesse de croissance, de la densité de peuplement, de la position des pièces dans l'arbre ou bien encore d'autres données sylvicoles. La traçabilité de ces données pourrait être conservée de la forêt jusqu'à la pièce de bois. Ces informations pourraient alors être utilisées en complément de la mesure des différentes singularités pour améliorer la prédiction du MOR.

L'amélioration de la précision du classement par machine par l'ajout de la mesure de singularités ou par l'ajout de données sylvicoles, doit être quantifiée dans le cas de la ressource nationale française. Avec 652 000 hectares de surfaces boisées en douglas, représentant 11% de la part des résineux, la France possède la ressource en douglas la plus importante d'Europe. La prépondérance de jeunes plantations et la mauvaise connaissance de la qualité intrinsèque de cette ressource freinent encore ses consommations. La récolte française de douglas est de 2 millions de m³ et son potentiel devrait atteindre plus de 6 millions à l'horizon 2030, positionnant alors le douglas parmi les productions résineuses majeures en France. Le problème est que les sciages en douglas possèdent une nodosité plus forte que l'épicéa, les règles de classement visuel ont alors tendance à dévaloriser très fortement cette essence alors que les sciages issus de douglas possèdent de bonnes propriétés mécaniques. C'est pourquoi il est dès à présent nécessaire de le classer par machine. De plus, les normes de classement sont essentiellement développées par les pays leader d'Europe du Nord et ne sont donc pas adaptées pour valoriser au mieux les essences françaises plus hétérogènes. Enfin, le chêne représente à lui seul plus de 27% de la ressource nationale française, les plus belles pièces étant réservées à l'ameublement, la tonnellerie ou le tranchage. Les prix du marché ne permettent pas l'existence d'un marché du chêne utilisable en construction pour cette ressource de première qualité. En revanche, le chêne de qualité secondaire pourrait très bien être valorisé en tant que bois de structure, pour cela il est nécessaire qu'il soit alors classé. Pour ces différentes raisons, les essences étudiées dans ce projet seront l'épicéa, le douglas et le chêne (de qualité secondaire).

Ce travail de thèse s'inscrit au sein d'un projet ANR (ClaMeB) associant des parte-

naires scientifiques et industriels de domaines variés et complémentaires. Ce projet regroupe :

— **4 partenaires industriels du bois leader de la profession nationale :**

- Piveteau Bois : fabricant français de bois de structure transformant plus de 350000 m³ de grumes par an (douglas, épicéa, pin) dans trois sites de transformation produisant 40000 m³ de bois collés et 130000 m³ de bois rabotés,
- Monnet-Seve Sougy : fabricant français de bois pour la construction transformant environ 800000 m³ de bois rond dans 4 scieries produisant environ 450000 m³ de sciages. 20000 m³ de bois rabotés sont aussi produit aussi bien pour l'utilisation en interne (notamment pour la production d'environ 40000 m³ de produits collés par an tel que du BLC, BMR, BMA et CLT) que la vente en externe,
- Arbonis : fabricant de bois lamellé-collé, filiale de Vinci Construction réalisant annuellement plus de 400 000 m² de structures, poutres, pannes, poteaux en épicéa, douglas ou mélèze,
- Ducerf : Le groupe Ducerf est composé de trois scieries, la production est exclusivement issus de feuillus avec plus de 80% de chêne et représente la transformation de 40 000 m³ de grumes par an.

Le développement de moyens de classement non-destructifs pour les sciages à usage structurel présente donc un fort intérêt pour ces partenaires industriels pour valoriser au mieux leur production. De plus, les industriels possèdent peu de moyens pour comparer la performance des différentes machines de classement disponibles sur le marché. La performance d'une machine de classement étant dépendante de différentes paramètres (essence, classe de résistance, etc...) et les coûts des différentes machines pouvant être très différents, apporter une réponse à la question du choix d'une machine de classement adaptée (à la production) constitue un des objectifs principaux de ce travail de thèse. Les quatre partenaires sont aussi fabricants de produits reconstitués et une partie de l'étude aura donc pour objectif de répondre concrètement à une recommandation normative portant sur la refente de poutres en bois lamellé-collé qui est un procédé de production couramment utilisé par les lamellistes.

— **4 partenaires scientifiques :**

- FCBA (Institut technologique Forêt-Cellulose Bois Ameublement) : cet organisme est habilité au niveau européen pour la certification des machines de classement et des essais normalisés. L'ensemble des essais destructifs ont donc été réalisés par ce partenaire,
- LaBoMAP (Laboratoire Bourguignon des matériaux et Procédés) : spécialiste du classement mécanique du bois, ce partenaire est responsable de l'ensemble des contrôles non-destructifs,
- LE2i (Laboratoire Electronique, Informatique et Image de Bourgogne) : spécia-

liste de la vision industrielle et de l'analyse d'images, ce partenaire est chargé de l'amélioration et du développement de la mesure de nouvelles singularités pour permettre l'amélioration de la prédiction des propriétés mécaniques,

- LERFoB (Laboratoire d'Etude des Ressources Forêt-Bois) : Responsable de toute la partie échantillonnage du lot de douglas étudié.

La première partie de ce rapport est consacrée à une synthèse bibliographique sur la structure et la croissance des arbres suivie par un inventaire des différents paramètres influençant les propriétés mécaniques. Elle se termine par un état des lieux du classement pour la résistance par machine portant sur les aspects normatifs, les méthodes existantes permettant le classement mécanique ainsi que leurs efficacités.

La deuxième partie présente la composition des lots de bois de l'étude, les différents contrôles non destructifs menés et les différentes corrélations établies entre les différents paramètres mesurés et les propriétés mécaniques. Différents modèles de prédictions utilisant ces paramètres sont aussi détaillés et comparés.

Le troisième chapitre portera sur l'évaluation des rendements obtenus à partir de plusieurs machines industrielles en respect du cadre normatif relatif au classement par machine. Différentes méthodes d'évaluation de la qualité du classement sont proposées et notamment une analyse économique ayant conduit au développement d'un outil d'aide à la décision.

Avant les conclusions et les perspectives le dernier chapitre du mémoire s'intéressera à la recommandation particulière de la norme EN 14080 portant sur la refente de poutres lamellées-collées. Partie de l'étude qui constitue un autre objectif de la thèse et qui s'inscrit dans le cadre du projet ANR ClaMeB. Pour cela, des approches destructives et numériques ont été utilisées tant au niveau de la lamelle qu'à l'échelle de la poutre.

Chapitre 1

Synthèse bibliographique

1.1 Généralités sur la structure et la croissance des arbres

1.1.1 Structure générale de l'arbre

L'arbre est constitué de plusieurs parties :

- le système racinaire qui a pour rôle de puiser dans le sol l'eau et les éléments minéraux nécessaires au développement de l'arbre,
- le collet qui désigne la partie où se rejoignent la partie aérienne et souterraine d'un arbre,
- le tronc qui est la partie cylindrique située entre le sol et les premières branches (il est à noter que chaque branche présente la même constitution qu'un tronc mais à une échelle plus petite), cette partie assure la stabilité mécanique de l'arbre,
- le houppier qui est l'association des branches et du feuillage, c'est donc dans cette partie que l'arbre synthétise les éléments nécessaires à sa croissance par le biais de la photosynthèse.

Les produits en bois utilisés à des fins structurelles sont extraits du tronc, c'est pourquoi il est intéressant d'en détailler sa structure. Le tronc est constitué de plusieurs parties qui possèdent toutes des caractéristiques mécaniques et des fonctions physiologiques différentes. Depuis l'extérieur vers l'intérieur on retrouve ainsi : l'écorce, le liber, le cambium, l'aubier, le duramen et enfin le bois de coeur. Les proportions de ces parties sont variables selon l'essence et l'itinéraire sylvicole de l'arbre. La structure du tronc est illustrée sur la figure 1.1.

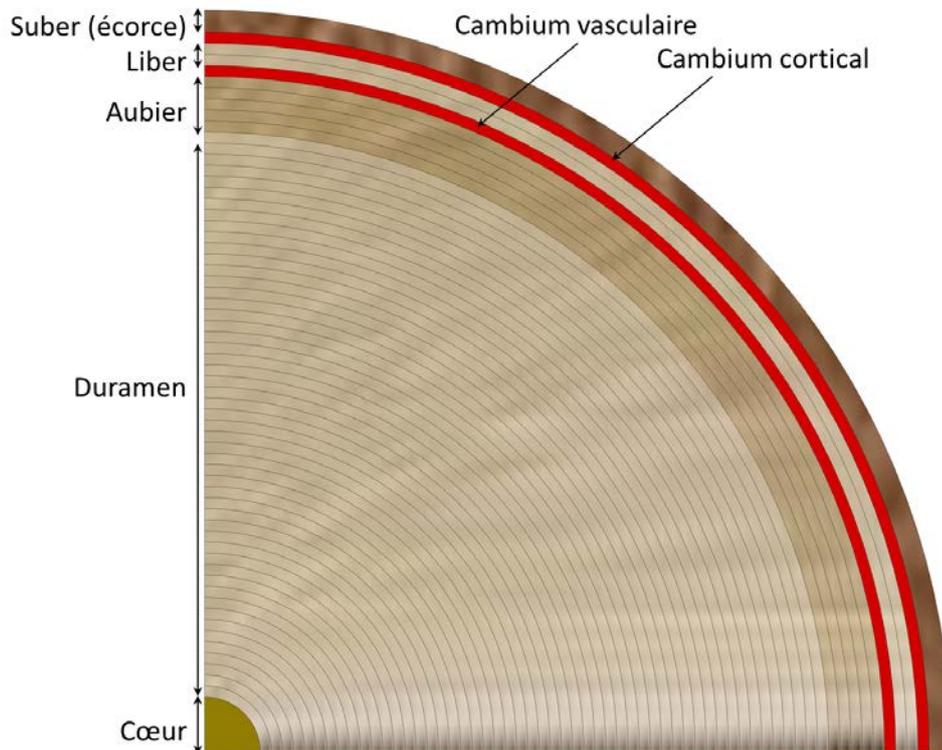


FIGURE 1.1 – Vue en coupe d'un tronc d'arbre

1.1.2 Le phénomène de croissance

La croissance d'un arbre s'effectue selon deux directions :

- la direction axiale qui correspond à la croissance primaire du sol vers le houppier,
- la direction diamétrale qui correspond à la croissance secondaire radiale ou tangentielle (voir figure 1.2).

Dans les deux cas, une quantité de matériau résultant des synthèses biologiques est ajoutée annuellement à la structure existante. Cependant ces deux modes de croissance ne résultent pas des mêmes phénomènes.

1.1.2.1 Croissance primaire

On appelle croissance primaire, l'augmentation en longueur du tronc et des branches, elle s'opère dans la région du bourgeon terminal à partir des méristèmes qui sont des tissus où les cellules, peu différenciées, ont gardé la faculté de se diviser activement.

1.1.2.2 Croissance secondaire

La croissance en diamètre est le résultat d'une division cellulaire se produisant dans la partie du tronc appelée cambium. Le cambium se décompose en deux parties :

- le cambium vasculaire, qui vers l'intérieur crée l'aubier (bois récemment formé), transportant la sève brute et le liber vers l'extérieur qui transporte la sève élaborée,
- le cambium cortical qui crée le phelloderme appelé aussi écorce vivante vers l'intérieur et l'écorce (ou suber) vers l'extérieur.

Ce mécanisme de croissance explique la présence d'alternance de zones claires et sombres dans l'arbre. Ces dernières sont appelées cernes annuels et représentent la production de cellules de bois au cours d'une année. Ces cernes annuels sont visibles sur la figure 1.1.

Deux types de bois coexistent à l'intérieur de ceux ci, on parle de bois de printemps et de bois d'été. En effet, lors de la reprise de la croissance au printemps, l'arbre a besoin de beaucoup de sève et il produit ce que l'on appelle le bois de printemps (ou bois initial) qui en favorise la circulation. Ensuite, au fil des mois, le besoin en sève diminue, le bois d'été (ou bois final) se forme, et a pour principale fonction le maintien mécanique de l'arbre. La transition ne se fait pas brusquement et la structure du bois évolue au fur et à mesure de la période de croissance. Cette variation de structure est représentée figure 1.2.

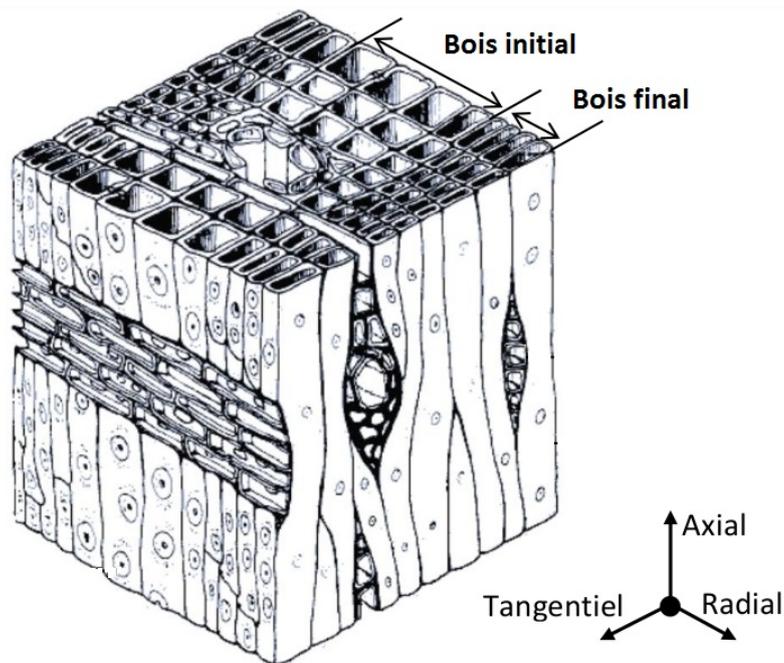


FIGURE 1.2 – Différences structurelles entre bois d'été et bois de printemps [22]

Park *et al.* (2009) [43] se sont intéressés aux différences entre bois de printemps et bois d'été au cours de la vie de l'arbre sur du pin gris. Ils ont montré que la densité du bois d'été atteint son maximum autour d'un âge cambial de 15 ans après une forte augmentation durant cette période. Dans le cas du bois de printemps, l'augmentation de la masse volumique est moins importante et moins rapide mais s'étend sur une plus longue période. Ils ont aussi mis en évidence le fait que le pourcentage de bois d'été dans

un cerne de croissance augmente au cours du temps. Ces résultats sont présentés figure 1.3.

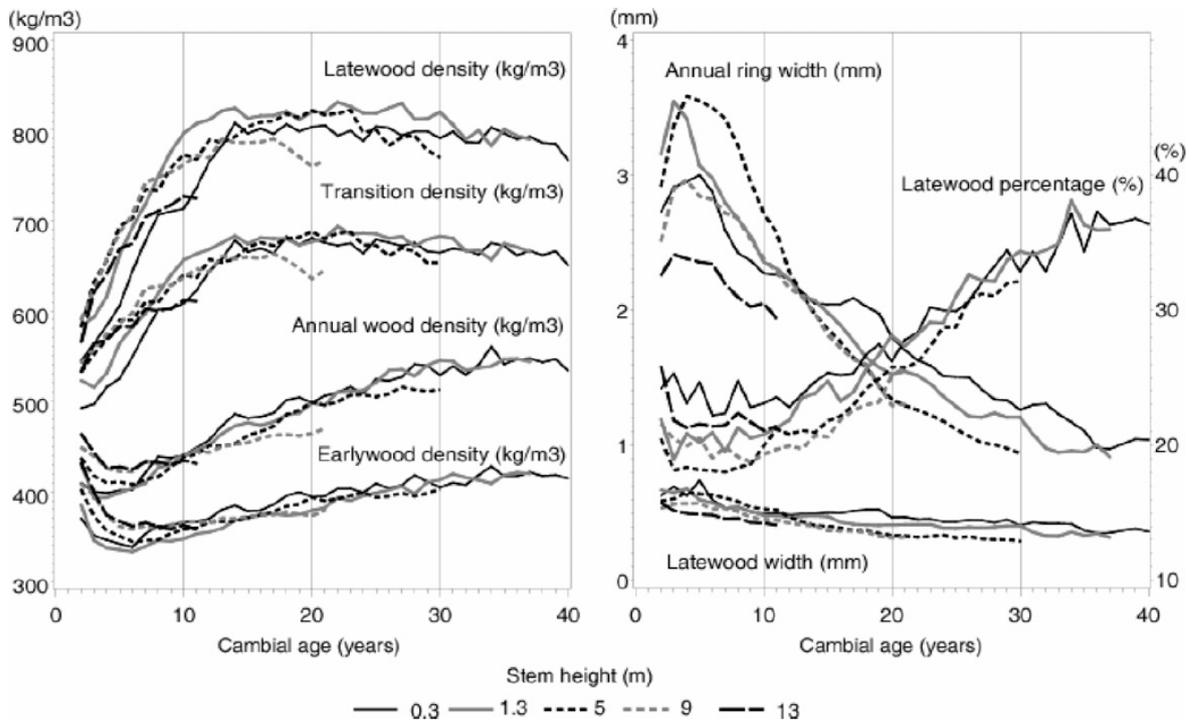


FIGURE 1.3 – Différences entre bois d'été et bois de printemps dans la direction radiale [43]

1.1.3 Structure microscopique du bois

1.1.3.1 Formation du bois

La particularité des cellules de bois réside dans la lignification des parois cellulaires, en effet cette lignification limite fortement les possibilités d'échanges intercellulaires ce qui entraîne le plus souvent la mort des cellules. Ces cellules mortes assurent la conduction des fluides et le soutien mécanique de l'arbre, cette fonction de soutien est possible car la lignine rigidifie les parois des cellules ligneuses ce qui donne au bois ses propriétés mécaniques et sa résistance à la biodégradation.

Chaque année vient s'ajouter un cerne de croissance, dotant ainsi l'arbre de nouveaux conducteurs, ainsi les cernes annuels plus anciens n'ont plus besoin d'assurer leur fonction de conduction. On appelle bois parfait le bois composé uniquement de cellules mortes composé des anciens cernes annuels. Chez certaines essence le bois parfait subit une duraminisation, on l'appelle alors duramen (voir figure 1.1), qui leur confère une résistance aux champignons ou insectes ravageurs.

1.1.3.2 La paroi cellulaire

La plupart des cellules de bois sont des cellules vides délimitées par des parois. La structure microscopique d'une paroi cellulaire ligneuse permet de comprendre de nombreuses propriétés physiques et mécaniques du bois. L'organisation microscopique de la paroi cellulaire est représentée figure 1.4. Nous avons vu précédemment que la couche entre les cellules était chargée en lignine, sur cette couche intercellulaire s'appuie la paroi primaire de chacune des cellules, cette paroi est extensible et n'empêche donc pas l'élongation de la cellule lors de la différenciation. Lorsque l'élongation est terminée, une autre paroi non extensible se forme sur la paroi primaire, c'est la paroi secondaire. Ces deux parois sont composées de microfibrilles de cellulose semi cristalline (rigides et résistantes) noyées dans une matrice de polymères plus petits tels que les hémicelluloses, les pectines ou les lignines. Les microfibrilles formant la paroi primaire sont désorganisées et forment un réseau lâche. La paroi secondaire est quant à elle composée de plusieurs couches :

- la couche appelée S1 : les microfibrilles de cellulose sont disposées en hélices d'orientations variables et alternées. L'angle des microfibrilles par rapport à l'axe de la cellule varie de 60° à 80° ,
- la couche S2 : c'est la plus épaisse. Le plus souvent le comportement mécanique de l'ensemble de la paroi se comporte comme la couche S2. Les microfibrilles sont ici toutes parallèles et présentent un angle par rapport à l'axe de la cellule variant de 5° à 30° ,
- la couche S3 : elle est souvent considérée comme une paroi tertiaire et peut être comparée à S1 bien qu'elle soit souvent plus mince.

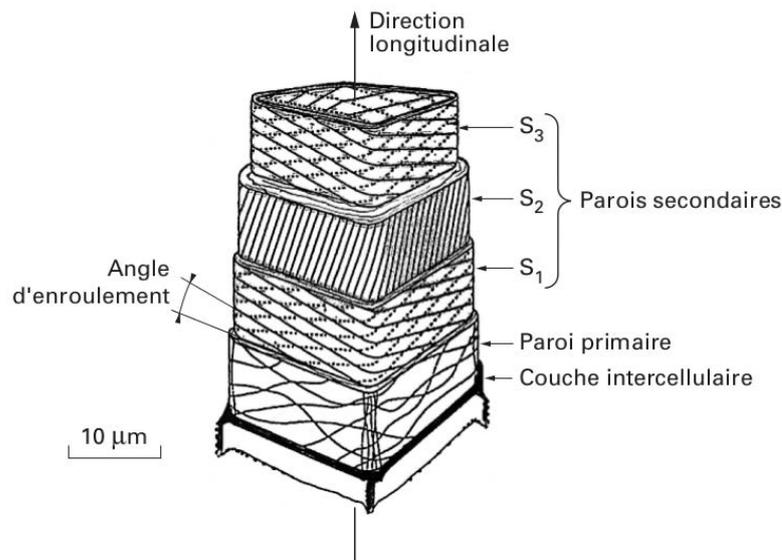


FIGURE 1.4 – Organisation microscopique de la paroi cellulaire [61]

1.1.4 Différences entre plan ligneux des résineux et des feuillus

1.1.4.1 Le plan ligneux des résineux

Le plan ligneux des résineux est plus simple que celui des feuillus, en effet les cellules de bois qui le composent sont peu spécialisées, ainsi près de 90% du volume de bois de résineux est composé de trachéides longitudinales. Ces trachéides sont des cellules allongées, elles résultent de la mort de cellules et ne sont composées que de leur paroi. Ce sont ces cellules qui assurent à la fois la conduction de la sève brute et le soutien mécanique de l'arbre.

L'existence du bois d'été et du bois de printemps dans les résineux se traduit anatomiquement par la variation de la forme des trachéides se formant au cours de ces deux périodes. En effet, au printemps, ces dernières sont de section carrée et à parois minces (permettant une très bonne conduction de la sève) alors qu'en été, les trachéides sont de section rectangulaire et à parois épaisses ce qui confère au bois de meilleures propriétés mécaniques.

1.1.4.2 Le plan ligneux des feuillus

Le plan ligneux des feuillus est plus complexe que celui des résineux du fait de la spécialisation des cellules. De plus, d'une espèce de feuillus à l'autre, on observe une plus grande diversité des plans ligneux. Ainsi, contrairement aux résineux le rôle de conduction de la sève et de soutien mécanique ne sont pas assurés par les mêmes cellules, les vaisseaux assurant le rôle de conduction et les fibres celui du soutien mécanique.

Chez certaines espèces le cambium forme des vaisseaux différenciés et en concentration plus importantes au printemps, on parle alors de bois à zone initiale poreuse, dans d'autres essences cette différenciation ne se produit pas.

1.1.5 Comportement mécanique du bois

1.1.5.1 Tenseur des souplesses et loi de comportement

Nous venons de voir que le bois est un matériau cellulaire hétérogène, combinant des cellules mortes et vivantes. La structure du matériau peut s'apparenter à celle d'un matériau composite multicouche. Ainsi ces différents éléments expliquent le caractère anisotrope et hétérogène du matériau bois. Cependant que ce soit d'un point de vue microscopique ou de par l'évolution de la structure d'un arbre (accroissement en hauteur et augmentation du diamètre), ce matériau présente trois directions privilégiées distinctes et perpendiculaires entre elles. On parle ainsi de plans d'orthotropie, ces plans sont définis par trois directions orthogonales :

- la direction longitudinale notée L, dans le sens des fibres,

- la direction radiale notée R, correspondant à la direction de croissance en diamètre,
- la direction tangentielle notée T, tangente aux cernes annuels.

Ainsi, l'orthotropie génère trois plans de symétrie (LT, LR, TR), le matériau est donc caractérisé par 12 coefficients (dont 9 sont indépendants) :

- 3 modules d'élasticité E_R, E_L et E_T , dans les directions d'orthotropie R, T et L,
- 3 modules de cisaillement G_{TL}, G_{LR} et G_{RT} ,
- 6 coefficients de Poisson $\nu_{TR}, \nu_{TL}, \nu_{RL}, \nu_{RT}, \nu_{LT}$ et ν_{LR} .

Le tenseur des souplesses élastiques exprimé dans le repère local d'anisotropie RTL s'écrit alors :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{RR} \\ \varepsilon_{TT} \\ \varepsilon_{LL} \\ 2\varepsilon_{TL} \\ 2\varepsilon_{LR} \\ 2\varepsilon_{RT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/E_R & -\nu_{TR}/E_T & -\nu_{LR}/E_L & 0 & \cdots & 0 \\ -\nu_{RT}/E_R & 1/E_T & -\nu_{LT}/E_L & \vdots & & \\ -\nu_{RL}/E_R & -\nu_{TL}/E_T & 1/E_L & 0 & & \vdots \\ 0 & \cdots & 0 & 1/G_{TL} & \ddots & \\ \vdots & & & \ddots & 1/G_{LR} & 0 \\ 0 & & \cdots & & 0 & 1/G_{RT} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{RR} \\ \sigma_{TT} \\ \sigma_{LL} \\ \sigma_{TL} \\ \sigma_{LR} \\ \sigma_{RT} \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

On peut aussi noter que le comportement en dehors de la zone élastique est différent en traction et en compression. Cette différence s'explique par le fait qu'en compression les éléments tubulaires sont soumis à du micro-flambement expliquant les différences de résistance en traction et en compression. Ainsi, le bois sollicité en traction possède un comportement fragile alors qu'il est ductile en compression. Les lois de comportement du bois en traction/compression dans la direction longitudinale sont représentées figure 1.5.

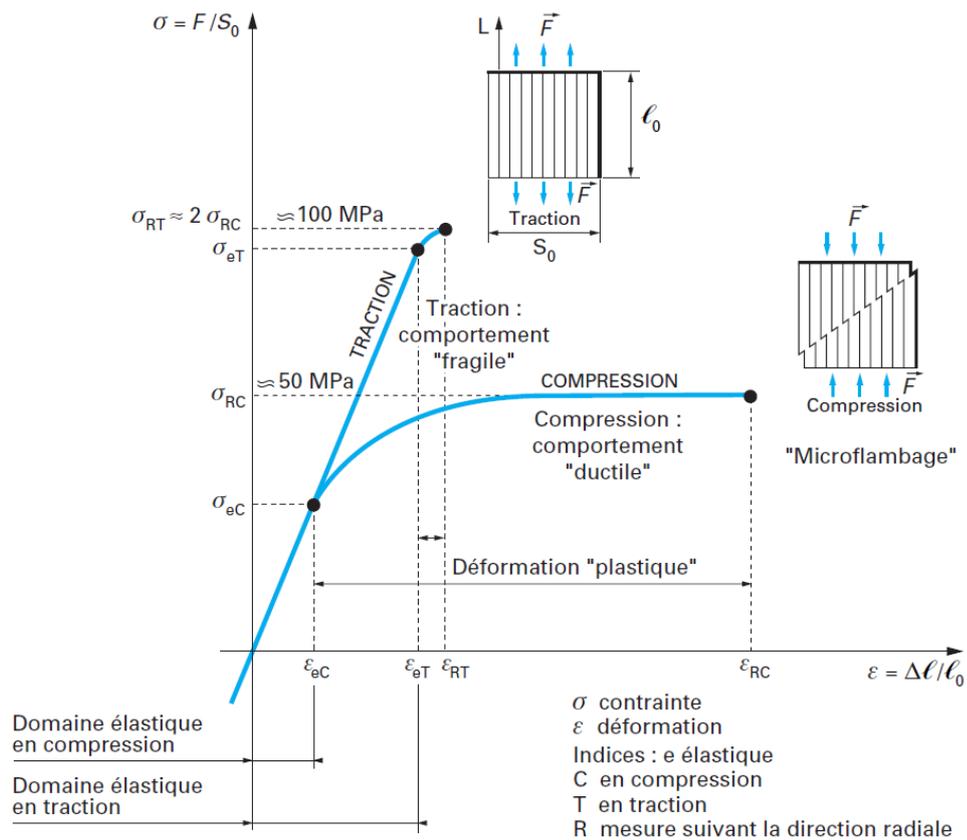


FIGURE 1.5 – Comportement du bois en traction/compression dans la direction longitudinale [61]

1.1.6 Conclusion sur la structure et la croissance des arbres

Ces considérations décrivent le comportement anisotrope du bois. En ce qui concerne son hétérogénéité, elle provient notamment de la différence entre bois initial et bois final, de la présence de cernes de croissance d'épaisseur variable, de la direction des fibres pas toujours parallèle à l'axe du tronc, etc. Outre ces facteurs, d'autres paramètres affectent l'homogénéité et la résistance intrinsèque du matériau bois. Ils sont détaillés dans la partie suivante.

1.2 Facteurs affectant le comportement mécanique d'un sciage

1.2.1 Humidité

Le bois est un matériau hygroscopique. Il est capable d'absorber ou de rejeter de l'eau en fonction de la température et surtout de l'humidité relative de l'air ambiant. On définit le taux d'humidité comme la quantité d'eau présente dans le bois exprimée en pourcentage de son poids à l'état anhydre.

Au sein du bois, l'eau peut être présente sous plusieurs formes : soit liée chimiquement aux composés de la paroi cellulaire, ou bien libre sous forme liquide ou gazeuse dans les lumens (parties creuses des cellules). Au delà d'un taux d'humidité d'environ 30%, seuil appelé point de saturation des fibres, toute l'eau supplémentaire est stockée sous sa forme libre. Lors du séchage, elle s'évacuera progressivement par évaporation, sans que le bois ne subisse de retrait ou de déformation : c'est la phase dite de "ressuyage". Lorsque l'eau libre a entièrement disparu (point de saturation), il ne reste alors que l'eau liée qui est intimement liée aux membranes des cellules. De ce fait, le départ de cette eau liée entraîne des phénomènes de retrait et de déformation.

Les propriétés mécaniques sont affectées par des variations du taux d'humidité en dessous du seuil de saturation des fibres. La plupart de ces propriétés s'améliorent à mesure que le taux d'humidité diminue. Il faut cependant noter que dans certains cas (résistance à la traction par exemple), la propriété peut atteindre un maximum à mesure que l'humidité diminue, puis décroître par la suite. L'effet de l'humidité sur différentes propriétés est illustré sur la figure 1.6.

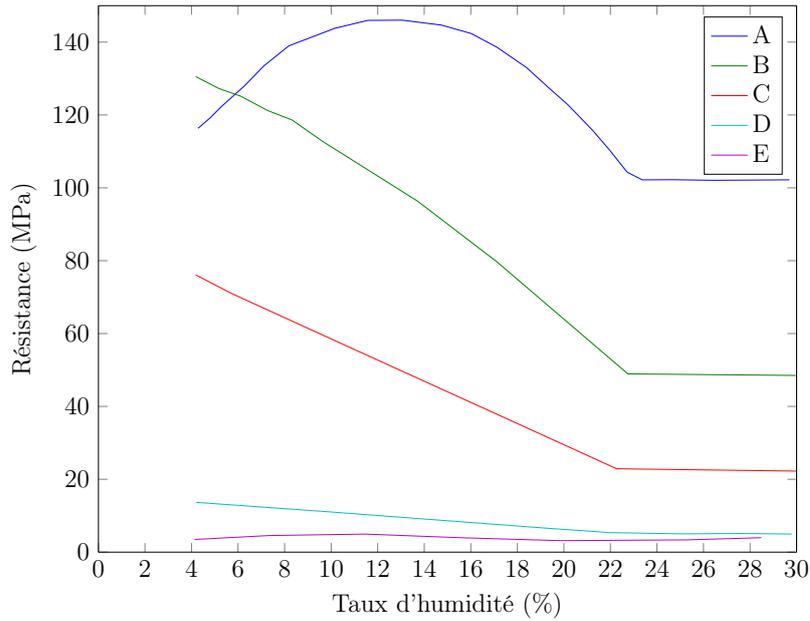


FIGURE 1.6 – Influence du taux d’humidité sur différentes propriétés de résistance du bois. A : résistance en traction dans le sens des fibres; B : résistance en flexion; C : résistance en compression dans le sens des fibres; D : résistance en compression perpendiculaire aux fibres; E : résistance en traction perpendiculaire aux fibres [4]

Des formules existent pour quantifier l’influence du taux hydrique sur les propriétés mécaniques du bois. Ces formules correspondent à une régression linéaire fonction du taux d’humidité du bois. En Europe on considère que le bois est sec lorsque son taux d’humidité est inférieur à 18%. Les propriétés mécaniques sont définies à 12% d’humidité (valeur de référence). Guitard (1987) [22] propose ainsi différentes formules à appliquer pour estimer les principales caractéristiques élastiques à un taux d’humidité de 12% à partir de valeurs estimées sur du bois à un taux d’humidité allant de 6 à 20%. Ces corrections sont décrites dans les équations 1.2 à 1.7.

$$E_L^H = E_L^{12}[1 - 0.015(H - 12)] \quad (1.2)$$

$$E_R^H = E_R^{12}[1 - 0.030(H - 12)] \quad (1.3)$$

$$E_T^H = E_T^{12}[1 - 0.030(H - 12)] \quad (1.4)$$

$$G_{RT}^H = G_{RT}^{12}[1 - 0.015(H - 12)] \quad (1.5)$$

$$G_{TL}^H = G_{TL}^{12}[1 - 0.015(H - 12)] \quad (1.6)$$

$$G_{LR}^H = G_{LR}^{12}[1 - 0.015(H - 12)] \quad (1.7)$$

1.2.2 Masse volumique

La masse volumique est le rapport de la masse sur le volume qui la contient, elle est reconnue pour influencer fortement les propriétés mécaniques. On relève des variations de masse volumique dans plusieurs cas :

- au sein d'une même essence la masse volumique n'est pas la même d'un individu à l'autre notamment à cause de conditions de croissance différentes : climat, nature du sol, mode de sylviculture, etc,
- au sein d'un même arbre, la masse volumique est souvent plus importante dans le bas de l'arbre que vers le houppier,
- à l'échelle d'un cerne de croissance, la masse volumique entre le bois de printemps et le bois d'été n'est pas la même.

Guillard (1987) [22] a établi à partir de nombreuses données issues de la bibliographie des relations entre la masse volumique et des modules d'élasticité pour des espèces de résineux et de feuillus. Ces relations (équation 1.8 et 1.9) sont valables pour un taux d'humidité égal à 12%. (équation et 1.9) La relation proposée pour les feuillus est donnée par l'équation 1.8 et celle pour les résineux par l'équation 1.9.

$$s_{ij}^{-1} = s_{ij}^{0-1} \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^C \quad (1.8)$$

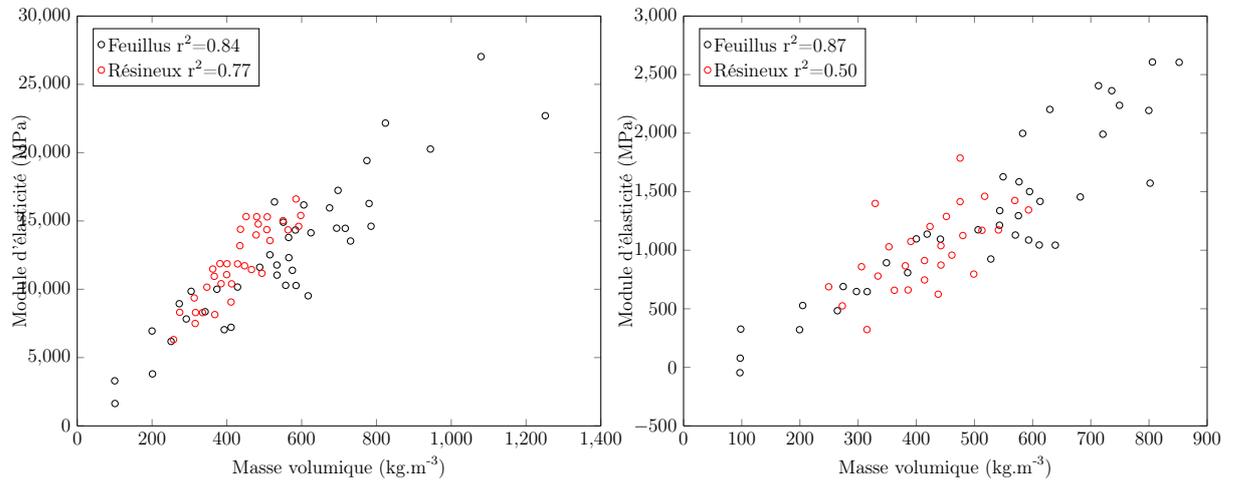
et celle pour les résineux par l'équation 1.9

$$s_{ij}^{-1} = s_{ij}^{0-1} + C(\rho - \rho_0) \quad (1.9)$$

où :

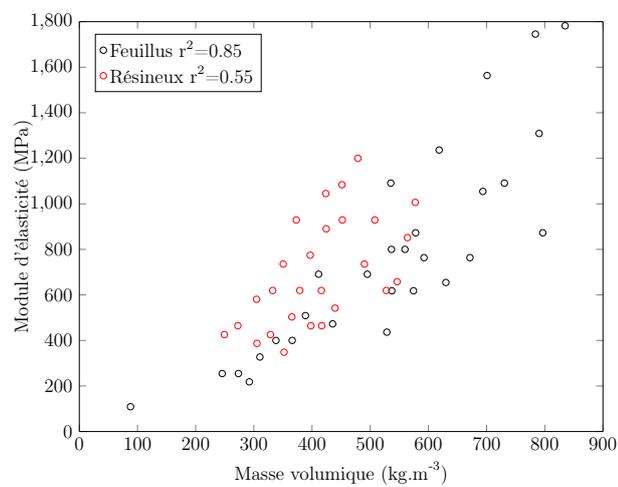
- s_{ij}^{-1} : souplesse à déterminer,
- s_{ij}^{0-1} : souplesse de référence (pour une masse volumique ρ_0 de référence,
- ρ : masse volumique de l'échantillon,
- ρ_0 : masse volumique de référence (650 kg/m^3 pour les feuillus et 450 kg/m^3 pour les résineux),
- C : une constante (dépendante de la direction des fibres du bois pour le cas des résineux).

Ces relations sont valables pour un taux d'humidité égal à 12%. La figure 1.7 (Guillard, 1987) [22] montre l'influence de la masse volumique sur les modules d'élasticité dans les trois directions pour les résineux et les feuillus. On observe sur cette figure que les coefficients élastiques dans les trois directions sont d'autant plus forts que la masse volumique augmente. Les relations présentées sur cette figure sont issues d'essais réalisés sur des éprouvettes de petites dimensions composées de bois sain. Les coefficients de détermination montrent que pour du bois sain les relations entre masse volumique et propriétés élastiques sont plus fortes pour le cas des feuillus. Dans le cas des résineux la corrélation entre masse volumique et module d'élasticité longitudinal est beaucoup plus forte que dans les autres directions.



(a) Direction longitudinale

(b) Direction radiale



(c) Direction tangentielle

FIGURE 1.7 – Évolution des trois modules d'élasticité en fonction de la masse volumique pour des feuillus et résineux (Guitard, 1987) [22]

1.2.3 Pente de fil

Les propriétés mécaniques du bois sont plus fortes dans la direction des fibres et décroissent lorsque la sollicitation n'est plus parallèle aux fibres. Bodig and Jayne, (1982) [6] ont montré que les propriétés mécaniques du bois dans les autres directions que sa pente de fil naturelle peuvent être estimées à partir de la formule de Hankinson (équation 1.10).

$$R_{\theta} = \frac{R_0 R_{90}}{R_0 \sin^n \theta + R_{90} \cos^n \theta} \quad (1.10)$$

où :

- R_{θ} : Propriété à un angle θ ,
- R_0 : Propriété dans la direction des fibres,
- R_{90} : Propriété dans la direction perpendiculaire aux fibres,
- n : constante déterminée empiriquement et dépendant de la propriété (voir tableau 1.1).

| Propriétés | n | R_{90}/R_0 |
|---------------------------|-------|--------------|
| Résistance en traction | 1.5-2 | 0.04-0.07 |
| Résistance en compression | 2-2.5 | 0.03-0.40 |
| Résistance en flexion | 1.5-2 | 0.04-0.10 |
| Module d'élasticité | 2 | 0.04-0.12 |
| Dureté | 1.5-2 | 0.06-0.10 |

TABLE 1.1 – Valeur de n selon les différents modes de sollicitation (Wood Handbook [4])

On observe cette variation de la pente de fil (inclinaison des fibres) dans les deux cas suivants :

- déviation des fibres autour des noeuds : elle résulte de la croissance secondaire simultanée du tronc et de la branche à partir de leurs moelles respectives. Elle se traduit par l'apparition d'une zone de transition entre les fibres verticales du tronc et celles du noeud. (voir figure 1.8),
- déviation hélicoïdale des fibres : l'orientation des fibres dans l'arbre n'est pas parallèle à l'axe de l'arbre cela même en dehors des zones où sont présents des noeuds. Par exemple, pour l'épicéa (*Picea abies*), les fibres suivent le motif d'une hélice dont l'angle est approximativement de 3° à gauche pendant les premières années de croissance. Après 80 ans de croissance cet angle devient nul puis commence ensuite à s'incliner lentement vers la droite (Säll, 2002 [58]). Cette observation semble se vérifier pour la majeure partie des résineux de l'hémisphère nord (Skatter and Kucera, 1998 [57]). Il faut cependant noter que cette règle n'est pas valable

- pour tous les arbres puisque chez certaines espèces l'angle d'hélice ne cesse jamais d'augmenter,
- pente de fil du produit final selon le mode de débit.



FIGURE 1.8 – Déviation des fibres autour des noeuds (Baño *et al.*, 2011) [3]

La figure 1.9 montre l'évolution de la résistance relative en flexion (le rapport de la résistance à l'angle considéré sur la résistance connue dans la direction des fibres) en fonction de l'angle de la pente de fil. On observe ainsi que pour un angle de 20°, la résistance est déjà diminuée de moitié ce qui montre l'importance de l'influence de la pente de fil dans la résistance d'un sciage.

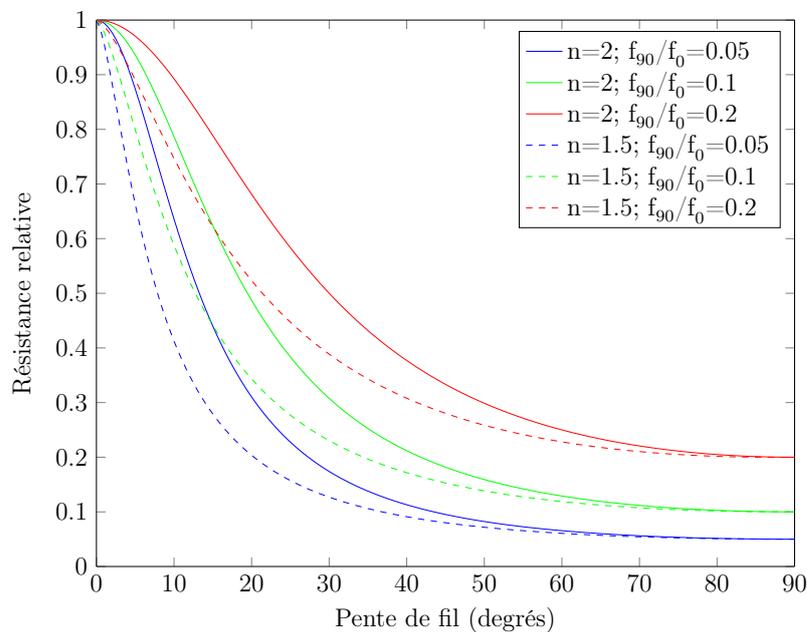


FIGURE 1.9 – Évolution de la résistance relative en flexion en fonction de la pente de fil pour différentes valeurs de paramètres de la formule de Hankinson [4]

1.2.4 Nodosité

Un autre facteur influençant le comportement mécanique des sciages est la présence de noeuds. Ces noeuds correspondent à des parties de branches se retrouvant "piégées" dans le tronc lors de la croissance secondaire de l'arbre. Il existe deux types de noeuds au niveau du sciage en fonction de la nature de la branche qui l'engendre. On parle ainsi de noeuds vivants lorsque la branche est vivante et de noeuds morts lorsque la branche est morte.

Le noeud mort est généralement entouré d'écorce, ce qui d'un point de vue mécanique est assimilable à une discontinuité du matériau. Ce type de noeuds est aussi appelé noeud non adhérent.

La composition du bois d'un noeud n'est pas différente du bois du sciage dans lequel il est inclus. On note cependant dans certaines essences une densité plus forte que dans le bois sain. L'intérêt de l'étude de la nodosité dans un sciage ne repose donc pas sur des différences anatomiques mais plus sur le fait que l'orientation des fibres longitudinales du noeud est non colinéaire à l'axe du sciage. Ce changement local de repère d'orthotropie induit par conséquent une faiblesse dans le sciage.

Cette influence des noeuds sur la résistance a été étudié par Riberholt et Madsen (1979) [47]. En effet, ils ont montré que les prémices de la ruine d'un sciage avaient le plus souvent lieu dans des zones où la nodosité est la plus forte (présence du plus gros noeud ou groupement de noeuds). Deux autres études (Schniewind et Lyon, 1971 [54] et Johansson *et al.*, 1992 [29]), ont mis en évidence que lors d'essais de rupture en flexion, la ruine était due dans plus de 90% des cas à la présence de noeuds ou à la déviation de la pente de fil autour de noeuds, ce qui est certainement plus le cas de figure.

1.2.5 Bois juvénile

Lors du vieillissement de l'arbre, la micro-structure des cellules produites par le cambium évolue. Clark and Saucier (1989) [18] ont ainsi montré que la section d'un tronc dans la direction radiale pouvait être divisée en trois zones : une zone composée de bois dit juvénile, une zone de transition entre bois juvénile et bois mature et enfin une zone composée de bois mature (ou adulte) . Le passage entre bois juvénile et bois mature ne se fait pas brusquement ; la structure du bois évolue au fur et à mesure de la période de maturation du cambium. McAllister et Powers (1992) [37] jugent que la zone de transition vers le bois mature, dans le cas du pin, est atteinte lorsque les cernes de croissance sont composés de 50% de bois d'été.

De plus, le bois juvénile se forme à toutes les hauteurs de l'arbre. Zobel *et al.* (1959) [70] ont montré que la zone de bois juvénile pour des pins («Loblolly pine») de 17 ans est quasiment cylindrique. Le diamètre du coeur de bois juvénile diminue cependant de

112mm à 1.30m de hauteur à 86.4mm à 13.7m. Le diamètre moyen de ce coeur étant de 91.4mm. Alteyrac *et al.* (2006) [1] ont aussi montré que l'âge de la transition entre bois juvénile et bois mature était différent selon la hauteur dans l'arbre : de 17.6 ans à 2.4m à 12.5ans pour des hauteurs supérieures à 5.1m. Zobel *et al.* [70] ont aussi montré que la proportion de bois juvénile passait de 85% pour des arbres de 15ans à 55% pour des arbres de 25ans jusqu'à 19% à 40ans. En d'autres termes plus l'arbre est vieux et possède un diamètre important, plus la proportion de bois juvénile est faible, signifiant que la taille du coeur de bois juvénile reste inchangée. La répartition quasi cylindrique du bois juvénile dans la hauteur de l'arbre sur des pins de 17 ans est présentée figure 2.18 [69].

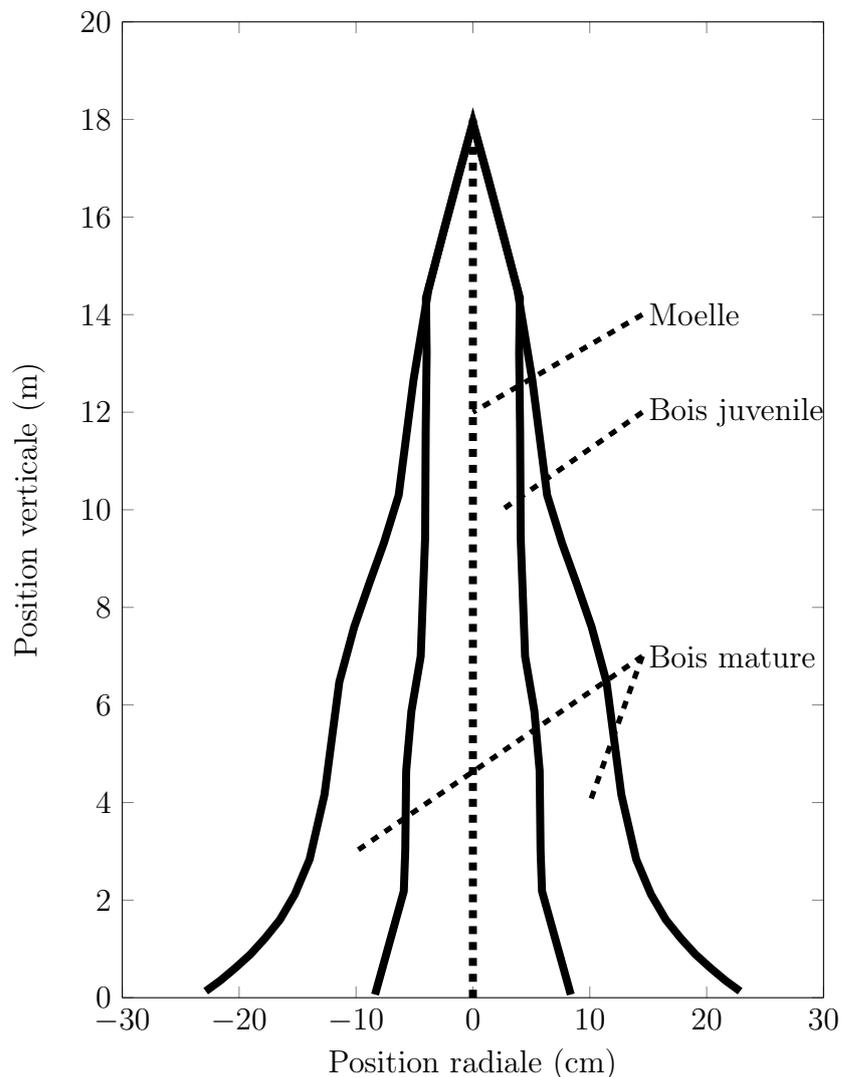


FIGURE 1.10 – Répartition du bois juvénile quasi cylindrique du bois juvénile dans la hauteur de l'arbre. Etude réalisée des pins de 17 ans [69].

Il faut cependant noter que ces valeurs peuvent varier en fonction des conditions de croissances des arbres. En effet, Alteyrac *et al.* (2006) [1] ont aussi montré que la propor-

tion de bois juvénile était plus faible pour des plantations à plus faible densité. Malgré ces nombreux facteurs influençant la formation de bois juvénile, Szymanski et Tauer (1991) [59] montrent que la zone de transition pour du pin est en moyenne de 12ans et précisent que sur le lot étudié, la variation était négligeable. De manière générale, cette valeur peut être reconnue acceptable pour un grand nombre d'applications pour le cas du pin, concernant le douglas cette valeur semblerait être plus proche des 15 années.

Panshin and de Zeeuw (1980) [42] ont montré qu'en comparaison au bois mature, le bois juvénile possédait :

- une densité plus faible,
- des fibres ou trachéides plus courtes,
- une proportion de bois d'été plus faible,
- des parois cellulaires plus minces,
- des cellules plus petites dans la direction tangentielle,
- une plus petite quantité de cellulose,
- un retrait longitudinal plus faible,
- un angle de microfibrilles plus grand,
- une plus faible résistance mécanique,
- un plus faible module d'élasticité.

Une étude menée par Moore *et al.* (2009) [38] met en évidence les différences de propriétés mécaniques entre bois juvénile et bois mature sur de l'épicéa. Ils ont comparé la densité, le module d'élasticité et la résistance en flexion dans des éprouvettes issues de bois juvénile et de bois mature. Les résultats de cette étude sont présentés figure 1.11. Il apparait aussi que les différences observées sur le module d'élasticité et la résistance (respectivement 29% et 22%) sont beaucoup plus importantes que celle observées sur la masse volumique (7%). La présence de bois juvénile est donc problématique lorsque le bois est destiné à usage structurel, puisqu'il possède des caractéristiques mécaniques inférieures au bois mature. La diminution de l'épaisseur des parois cellulaires ainsi que l'augmentation de l'ange des microfibrilles seraient en partie responsables de la dégradation du comportement mécanique. Dans le cas du classement du bois pour son utilisation en structure, la détection du bois juvénile s'avère donc importante.

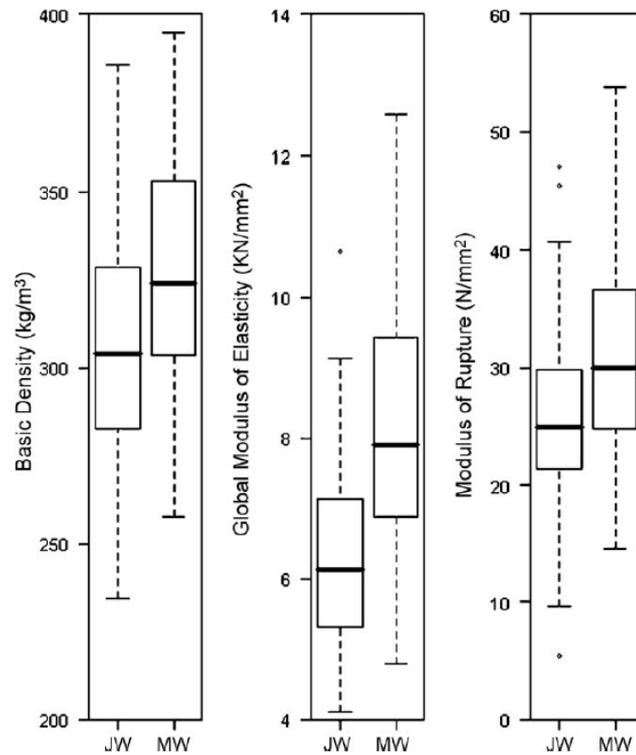


FIGURE 1.11 – Comparaison de la densité, du module d'élasticité et de rupture en flexion entre des éprouvettes issues de bois juvénile (JW) et de bois mature (MW)(Moore *et al.*, 2009) [38]

Pearson and Ross (1984) [44] ont aussi montré ces différences de propriétés mécaniques en comparant les modules élastiques et à rupture selon l'âge des arbres et la position des échantillons par rapport à la moelle. Les résultats sont présentés figure 1.12 et montrent bien que les propriétés mécaniques sont meilleures pour les arbres plus âgés ainsi que pour les échantillons les plus éloignés de la moelle.

En plus de la présence de bois juvénile, du bois de réaction peut aussi se former et influencer les propriétés mécaniques du bois. Les conséquences de la présence de bois de réaction ainsi que son occurrence font l'objet de la partie suivante.

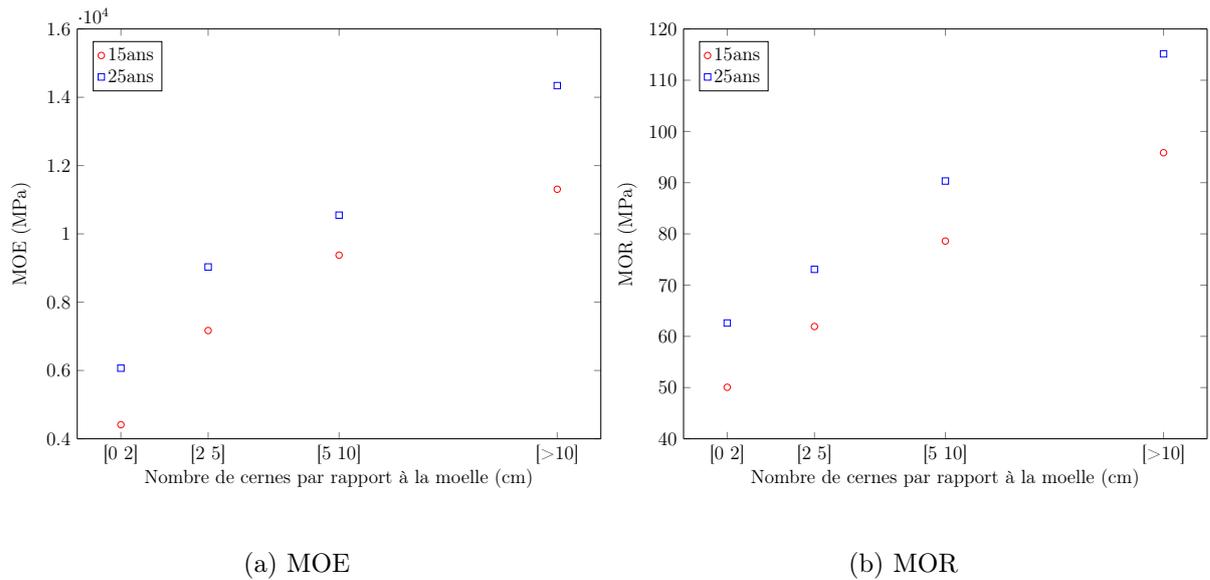


FIGURE 1.12 – Évolution des propriétés mécaniques selon l'âge des arbres et la position par rapport à la moelle; indicateurs des différences de propriétés mécaniques entre bois mature et bois juvénile (Pearson and Ross, 1984) [44] .

1.2.6 Bois de réaction

Un arbre évolue dans un milieu pourvu de nombreux paramètres fluctuants, parmi ceux-ci certains influent sur son orientation dans l'espace, notamment :

- la lumière : elle a un rôle de ressource pour la photosynthèse mais elle est également un signal : les arbres perçoivent des variations de la qualité de la lumière : ce phénomène est appelé photomorphogénèse. Les arbres perçoivent également des différences d'éclaircissement entre les faces de la tige et vont en général s'orienter vers le côté le plus éclairé. C'est le phénomène de phototropisme,
- la gravité : les arbres perçoivent leur orientation dans le champ de gravité et ont la capacité de se réorienter pour revenir à leur inclinaison de consigne appelée GSA (gravitropic set-point angle) qui est en général la verticale pour les troncs mais pas pour les branches. C'est le phénomène de gravitropisme.

Afin de satisfaire à ces deux exigences (de profiter au mieux de l'ensoleillement et d'assurer leur stabilité mécanique), les arbres produisent du bois de réaction ; une forme de bois précontraint provoquant l'apparition de contraintes internes, permettant ainsi à l'arbre de s'orienter. Il peut être de deux types :

- bois de compression dans le cas des résineux, ce bois se forme dans la zone de fibres sollicitées en compression,
- bois de tension pour les feuillus, il se forme dans la zone de fibres sollicitées en

traction.

Les caractéristiques anatomiques, chimiques, physiques et mécaniques des bois de réaction sont différentes de celles du bois normal. Lorsque sa proportion devient trop importante, il altère la qualité du bois et peut rendre la récolte de l'arbre plus difficile (éclatement des grumes, fentes à l'abattage). La présence de bois de réaction se caractérise de plus par une très forte excentricité de la moelle dans les zones où il se forme.

Le retrait, la densité et la dureté du bois sont plus importants pour le bois de tension que dans du bois normal et on observe aussi une légère diminution du module d'élasticité. Les différences de propriétés du bois de compression sont aussi un retrait plus important et un module d'élasticité plus faible et une moins bonne résistance en traction.

1.2.7 Données sylvicoles et qualité du bois

Du fait de l'adaptation de la croissance des arbres à leur milieu, les données sylvicoles peuvent également être un indicateur de la qualité du bois. Moore *et al.* (2009) [38] se sont intéressés à l'influence de la densité de peuplement du site de culture sur les propriétés mécaniques de sciages en épicéa. Les résultats de cette étude sont présentés figure 1.13. Il apparaît pour les résineux que les propriétés mécaniques sont d'autant plus fortes que la densité de peuplement l'est aussi. Ce phénomène est dû à l'adaptation des arbres à leur environnement, en effet dans un site où la densité de peuplement est forte, la concurrence entre les arbres est plus forte, ce qui a pour effet de ralentir leur croissance et d'améliorer leurs propriétés mécaniques.

Lasserre *et al.* (2009) [33] ont obtenu les mêmes résultats sur du pin. Dans cette même étude, ils ont aussi montré que l'élancement des arbres (le rapport entre la hauteur et le diamètre à 1.3m) permet de rendre compte de la densité de peuplement. Ainsi, plus la densité de peuplement est importante et plus l'élancement est grand. En d'autres termes, plus la densité de peuplement est forte, plus les arbres poussent en hauteur et moins en diamètre. Il ont mis en évidence que plus l'élancement est grand, plus le module d'élasticité est important (figure 1.14).

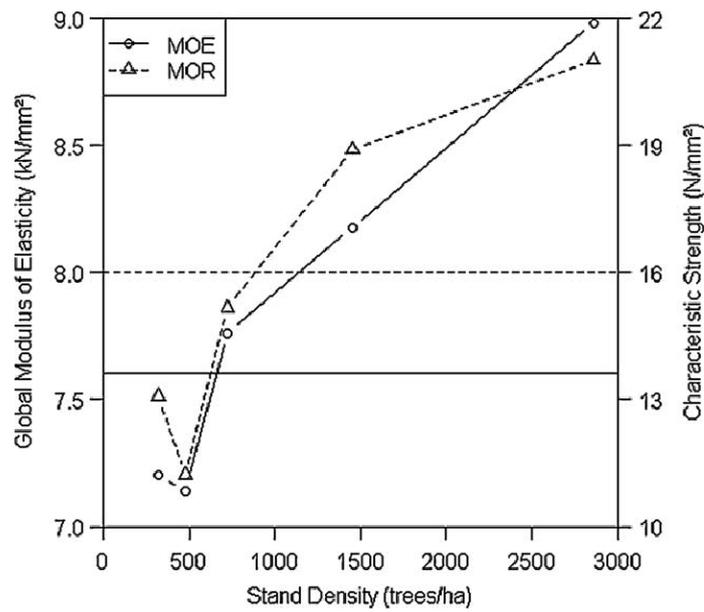


FIGURE 1.13 – Evolution du module d'élasticité et de la résistance en fonction de la densité de peuplement des sites de récolte (Moore *et al.*, 2009) [38].

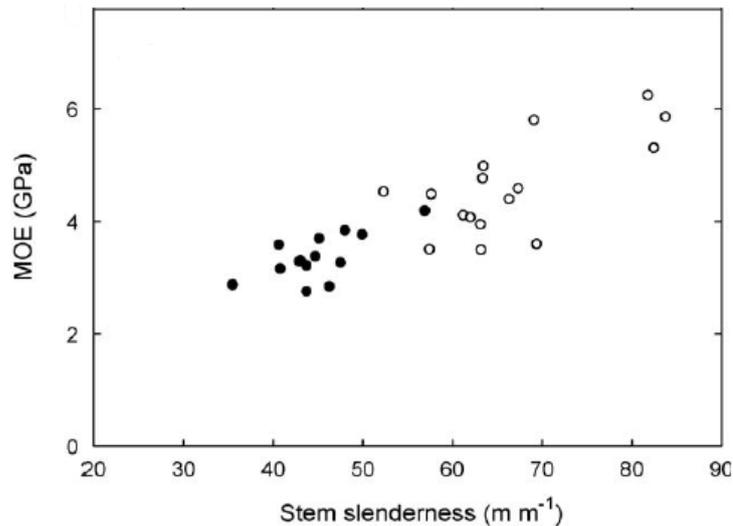


FIGURE 1.14 – Evolution du module d'élasticité en fonction de l'élancement. Les cercles pleins représentent des arbres issus d'une placette où la densité est de 833 arbres par hectare, les vides à 2500 arbres par hectare (Lasserre *et al.*, 2009) [33]

L'amélioration des propriétés mécaniques lorsque la vitesse de croissance ralentit a notamment été mise en évidence par Leban et Haines, (1999) [34]. Cette étude a été menée sur 492 éprouvettes de petites tailles (20x20x380 mm) provenant de mélèze. Ainsi la figure 1.15(a) montre l'évolution du module d'élasticité en fonction du nombre de cernes de croissance par cm. Plus le nombre de cernes par cm est grand (signe d'une croissance

lente) plus le module d'élasticité est important. Dans la même étude, Leban et Haines ont montré que l'âge de l'arbre pouvait être un indice sur les propriétés mécaniques du bois. Ainsi la figure 1.15(b) montre que plus l'arbre est ancien et meilleur est son module d'élasticité dû à la moindre proportion de bois juvénile dans le tronc des arbres les plus âgés.

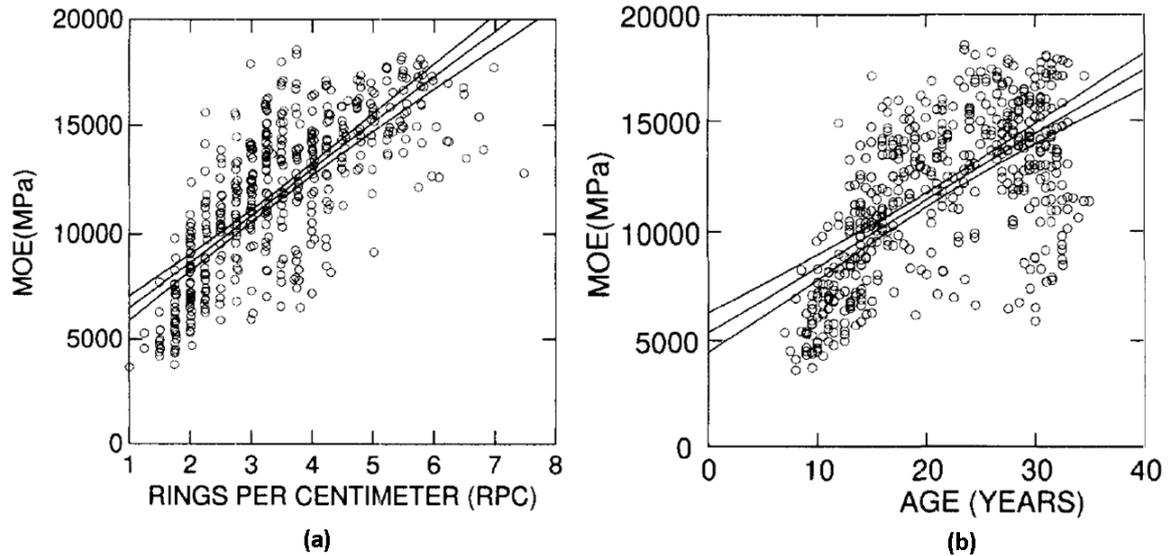


FIGURE 1.15 – Evolution du module d'élasticité en fonction de nombres de cernes par cm (à gauche) et en fonction de l'âge de l'arbre (à droite) pour le mélèze (Leban et Haines, 1999)[34]

Brüchert *et al.* (2000) [8] se sont intéressés aux phénomènes de concurrence dans le cas de l'épicéa et ont comparé les propriétés mécaniques d'arbres dominants par rapport à des arbres dominés. Ils ont montré que les arbres dominants possédaient un module d'élasticité plus faible que les arbres dominés et que ce cela reste valable sur toute la hauteur de l'arbre. Ce résultat est illustré figure 1.16. Cette dominance se traduit notamment par une hauteur d'arbre et un diamètre à 1.3m plus important et confirme donc que l'élancement peut permettre d'améliorer la prédiction de la qualité mécanique du bois.

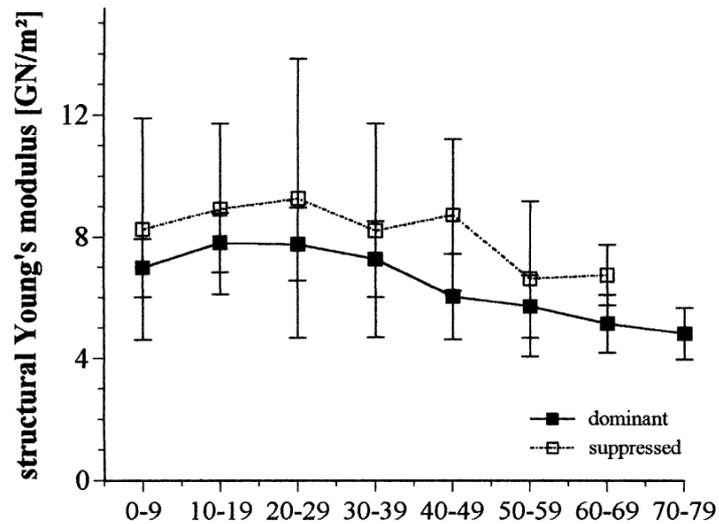


FIGURE 1.16 – Evolution du module d'élasticité en fonction de la hauteur dans l'arbre (exprimée en pourcentage de la hauteur totale) pour des arbres dominants (carrés pleins) et dominés (carrés vides) d'épicéa (Brüchert *et al.*, 2000) [8].

1.2.8 Conclusion sur le comportement mécanique du bois

Cette première partie met en évidence que les propriétés mécaniques du bois sont dépendantes d'un grand nombre de facteurs qui peuvent être plus ou moins influents et plus ou moins aisés à quantifier. En effet, certaines propriétés sont directement mesurables à l'aide de capteur, d'autres peuvent être déduites de manière indirecte. Ce dernier point peut concerner le bois juvénile, en effet des méthodes existent pour l'identifier (mesure de l'angle des microfibrilles au microscope par exemple [55][67][19]) mais ne sont à l'heure actuelle pas applicables dans le domaine industriel. Des informations sylvicoles telles que la distance par rapport à la moelle, l'âge des arbres ou encore la localisation verticale dans l'arbre peuvent se substituer à ces méthodes. Quoiqu'il en soit, ce grand nombre de facteurs montre aussi que la prédiction des propriétés mécaniques peut s'avérer très complexe et que ces différents facteurs doivent être pris en compte pour les prédire au mieux.

L'objectif de ce travail portant sur le classement pour la résistance par machine, il va maintenant être détaillé l'ensemble du cadre normatif s'y rattachant. Il s'agit en particulier de préciser quelles propriétés mécaniques devront être prédites pour assigner une qualité mécanique à un sciage, ainsi que la méthode employée pour opérer à cette attribution.

1.3 Classement mécanique du bois

1.3.1 Introduction

Lorsque l'on utilise le bois pour un usage structurel, la réglementation oblige au préalable de la classer. Ce classement est basé sur les propriétés mécaniques et physiques les plus importantes : la densité, le module d'élasticité et la résistance. Pour prendre en compte les variations de propriétés, la classification s'effectue à partir de valeurs caractéristiques (fractile à 5%) et de valeurs moyennes. Dans le cadre de cette étude nous nous limiterons au classement mécanique à l'échelle d'un sciage.

En Europe, le classement du bois de structure est régi par cinq normes :

- la première de ces normes (EN 408 [16]) regroupe toutes les méthodes d'essais utilisées pour déterminer différentes propriétés mécaniques du bois. Cette norme est applicable aussi bien pour des pièces rectangulaires ou cylindrique, aboutées ou non ainsi que pour du bois lamellé-collé. Il est cependant spécifié que ces tests doivent être menés à une température de 20°C et à une humidité relative de 65%,
- pour obtenir les valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la densité il convient d'appliquer la norme EN 384 [13]. Elle contient les règles nécessaires pour l'échantillonnage, l'analyse (notamment le calcul du fractile à 5% en fonction du nombre de pièces dans un lot) et l'ajustement des données si la géométrie ou les conditions d'essais sont différentes de celles préconisées par la norme EN 408. Une méthode alternative de calcul des valeurs caractéristiques est aussi décrite dans la norme EN 14358 [10],
- une classe de résistance est enfin attribuée au lot de bois, les différentes classes existantes sont décrites dans la norme EN 338 [12],
- Pour effectuer le classement visuel des essences françaises, les normes en vigueur sont les normes NF B52-001 [2] et EN 14081-1 [14],
- Enfin, pour ce qui est du classement par machine, il convient de suivre la norme EN 14081 [14], [17], [15] et [11].

Le but de ce classement est de garantir avec fiabilité aux concepteurs d'ouvrages les propriétés mécaniques du matériau bois. Pour des raisons évidentes, ce classement doit être fait de manière non destructive. Le but est donc d'assigner chaque sciage à une classe satisfaisant les exigences du concepteur. Les différentes classes sont au nombre de :

- 12 pour les résineux (préfixe C) : C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35, C40, C45 et C50,
- 8 pour les feuillus (préfixe D) : D18, D24, D30, D35, D40, D50, D60 et D70.

Le nombre se trouvant après le préfixe représente la résistance caractéristique en flexion, notée $f_{m,k}$ (en MPa). De plus, la norme fournit des relations permettant d'obtenir les différentes propriétés mécaniques à partir de trois propriétés que sont la masse volu-

mique (ρ_k), le module d'élasticité longitudinal $E_{0,mean}$ et la résistance à la flexion $f_{m,k}$. Ces relations sont pour :

— la résistance à la traction axiale :

$$f_{t,0,k} = 0.6f_{m,k}$$

— la résistance à la compression axiale :

$$f_{c,0,k} = 5(f_{m,k})^{0.45}$$

— la résistance à la traction transversale :

$$f_{t,90,k} = 0.4 \quad \text{pour les résineux}$$

$$f_{t,90,k} = 0.6 \quad \text{pour les feuillus}$$

— la résistance à la compression transversale :

$$f_{c,90,k} = 0.007\rho_k \quad \text{pour les résineux}$$

$$f_{c,90,k} = 0.015\rho_k \quad \text{pour les feuillus}$$

— le module d'élasticité axiale :

$$E_{0.05} = 0.67E_{0,mean} \quad \text{pour les résineux}$$

$$E_{0.05} = 0.84E_{0,mean} \quad \text{pour les feuillus}$$

— la valeur moyenne du module d'élasticité transversale :

$$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30 \quad \text{pour les résineux}$$

$$E_{90,mean} = E_{0,mean}/30 \quad \text{pour les feuillus}$$

— la valeur moyenne du module de cisaillement :

$$G_{mean} = E_{0,mean}/16$$

— la valeur moyenne de la masse volumique :

$$\rho_{mean} = 1.2\rho_k$$

Le fait que ces relations soient disponibles permet de se limiter seulement à la détermination de trois propriétés que sont : la résistance en flexion, le module d'élasticité et la masse volumique pour classer mécaniquement des sciages. Un lot de sciages peut être affecté à une certaine classe de résistance si à la fois les valeurs caractéristiques de densité ρ_k , de résistance $f_{m,k}$ (valeur de la fractile à 5%) et la valeur moyenne du module d'élasticité ($E_{0,mean}$) sont supérieures ou égales aux valeurs requises par la classe. Les différentes valeurs caractéristiques de chaque classe issue de la norme EN 338 sont présentées table 1.2.

CHAPITRE 1. SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

| | | Résineux | | | | | | | | | | | |
|---|---------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | C14 | C16 | C18 | C20 | C22 | C24 | C27 | C30 | C35 | C40 | C45 | C50 |
| | | Propriétés de résistance (en $N.mm^{-2}$) | | | | | | | | | | | |
| Flexion | $f_{m,k}$ | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| Traction axiale | $f_{t,0,k}$ | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 16 | 18 | 21 | 24 | 27 | 30 |
| Traction transversale | $f_{t,90,k}$ | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 | 0.4 |
| Compression axiale | $f_{c,0,k}$ | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 25 | 26 | 27 | 29 |
| Compression transversale | $f_{c,90,k}$ | 2.0 | 2.2 | 2.2 | 2.3 | 2.4 | 2.5 | 2.6 | 2.7 | 2.8 | 2.9 | 3.1 | 3.2 |
| Cisaillement | $f_{v,k}$ | 3.0 | 3.2 | 3.4 | 3.6 | 3.8 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 |
| | | Propriétés de rigidité (en $N.mm^{-2}$) | | | | | | | | | | | |
| Module moyen d'élasticité axiale moyen | $E_{0,mean}$ | 7 | 8 | 9 | 9.5 | 10 | 11 | 11.5 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Module d'élasticité axiale (au 5e percentile) | $E_{0,05}$ | 4.7 | 5.4 | 6.0 | 6.4 | 6.7 | 7.4 | 7.7 | 8.0 | 8.7 | 9.4 | 10.0 | 10.7 |
| Module moyen d'élasticité transversale | $E_{90,mean}$ | 0.23 | 0.27 | 0.30 | 0.32 | 0.33 | 0.37 | 0.38 | 0.40 | 0.43 | 0.47 | 0.50 | 0.53 |
| Module moyen de cisaillement | G_{mean} | 0.44 | 0.5 | 0.56 | 0.59 | 0.63 | 0.69 | 0.72 | 0.75 | 0.81 | 0.88 | 0.94 | 1.00 |
| | | Masse volumique (en $kg.m^{-3}$) | | | | | | | | | | | |
| Masse volumique | ρ_k | 290 | 310 | 320 | 330 | 340 | 350 | 370 | 380 | 400 | 420 | 440 | 460 |
| Masse volumique moyenne | ρ_{mean} | 350 | 370 | 380 | 390 | 410 | 420 | 450 | 460 | 480 | 500 | 520 | 550 |
| | | Feuillus | | | | | | | | | | | |
| | | D18 | D24 | D30 | D35 | D40 | D50 | D60 | D70 | | | | |
| | | Propriétés de résistance (en $N.mm^{-2}$) | | | | | | | | | | | |
| Flexion | $f_{m,k}$ | 18 | 24 | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 | | | | |
| Traction axiale | $f_{t,0,k}$ | 11 | 14 | 18 | 21 | 24 | 30 | 36 | 42 | | | | |
| Traction transversale | $f_{t,90,k}$ | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | 0.6 | | | | |
| Compression axiale | $f_{c,0,k}$ | 18 | 21 | 23 | 25 | 26 | 29 | 32 | 34 | | | | |
| Compression transversale | $f_{c,90,k}$ | 7.5 | 7.8 | 8.0 | 8.1 | 8.3 | 9.3 | 10.5 | 13.5 | | | | |
| Cisaillement | $f_{v,k}$ | 3.4 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.0 | 4.5 | 5.0 | | | | |
| | | Propriétés de rigidité (en $N.mm^{-2}$) | | | | | | | | | | | |
| Module moyen d'élasticité axiale | $E_{0,mean}$ | 9.5 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 17 | 20 | | | | |
| Module d'élasticité axiale (au 5e percentile) | $E_{0,05}$ | 8 | 8.5 | 9.2 | 10.1 | 10.9 | 11.8 | 14.3 | 16.8 | | | | |
| Module moyen d'élasticité transversale | $E_{90,mean}$ | 0.63 | 0.67 | 0.73 | 0.80 | 0.86 | 0.93 | 1.13 | 1.33 | | | | |
| Module moyen de cisaillement | G_{mean} | 0.59 | 0.62 | 0.69 | 0.75 | 0.81 | 0.88 | 1.06 | 1.25 | | | | |
| | | Masse volumique (en $kg.m^{-3}$) | | | | | | | | | | | |
| Masse volumique | ρ_k | 475 | 485 | 530 | 540 | 550 | 620 | 700 | 900 | | | | |
| Masse volumique moyenne | ρ_{mean} | 570 | 580 | 640 | 650 | 660 | 750 | 840 | 1080 | | | | |

TABLE 1.2 – Valeurs caractéristiques des différentes classes définies par l'EN 338. En rouge, les propriétés requises pour l'attribution de sciages à une classe

Pour réaliser ce classement de manière non destructive, deux approches existent :

- le classement visuel qui consiste à attribuer une classe à un sciage en prenant en considération des singularités visibles sur le sciage,
- le classement par machine, basé sur l'estimation directe ou indirecte de manière non destructive des trois propriétés nécessaires à l'attribution d'une classe.

Enfin des essais de caractérisation destructifs doivent être menés sur les lots de sciages pour en déterminer le classement optimal. Les valeurs obtenues sont considérées comme étant les valeurs de référence tant pour l'estimation de la qualité de la méthode de classement que pour la validation d'une procédure de classement par machine. La démarche générale du classement mécanique de bois de structure est présentée figure 1.17.

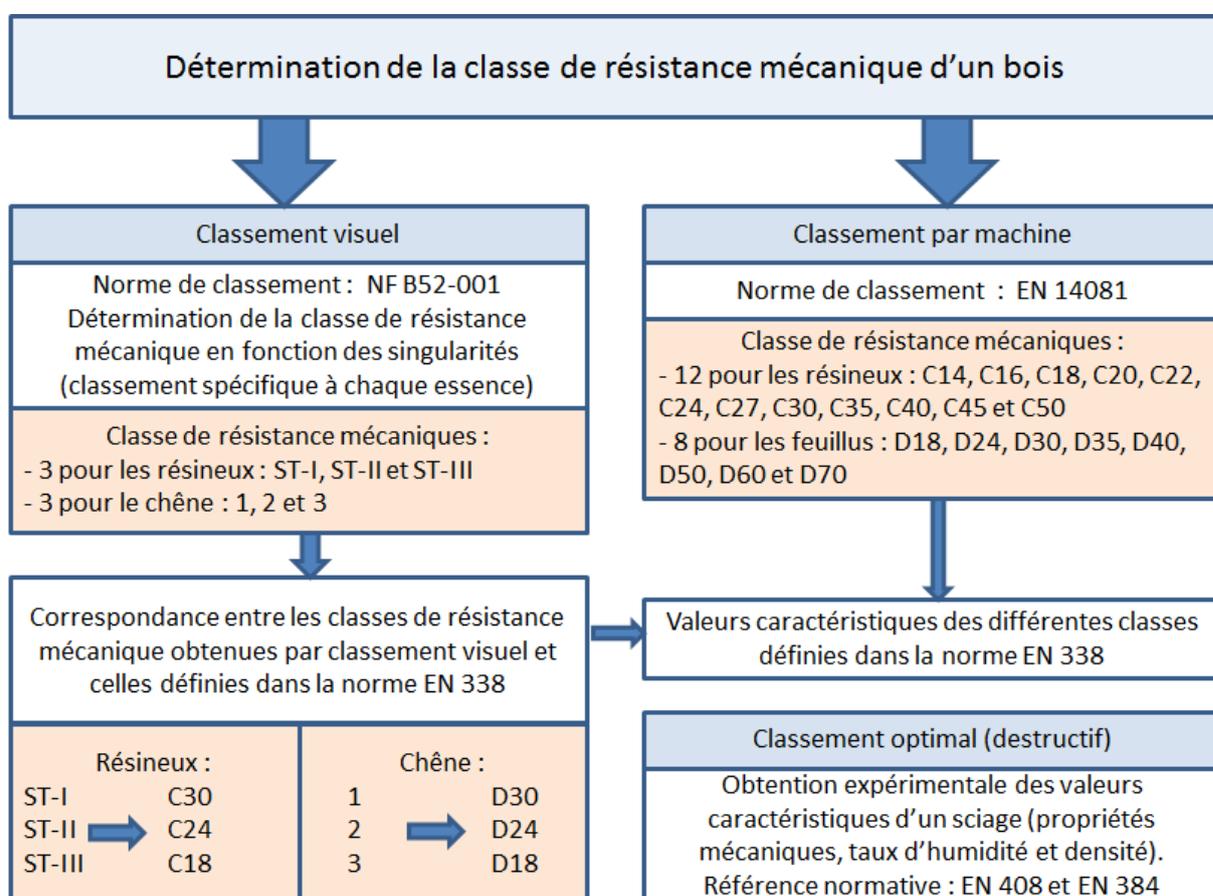


FIGURE 1.17 – Démarche générale du classement mécanique des bois de structures

1.3.2 Caractérisation mécanique d'un sciage à partir d'essais destructifs et classement optimal d'un lot

Pour valider les différentes stratégies de classement qui seront détaillées dans la suite, il faut avoir recours à des essais destructifs, les propriétés obtenues lors de ces essais font

alors office de valeurs de référence. Les caractéristiques des différents essais de caractérisation sont consignées dans la norme EN 408. Seul le module d'élasticité et la résistance en flexion et la masse volumique sont mesurés puisque comme il a été dit précédemment, l'attribution d'une classe à un sciage n'est basée que sur ces trois grandeurs.

Deux modules élastiques différents peuvent être calculés suite à un essai de flexion 4 points :

- un module d'élasticité local (donnant une information entre les points d'application des efforts) issu du calcul via le rayon de courbure,
- un module d'élasticité global (donnant une information sur toute la partie fléchie de la poutre).

Dans les deux cas, l'éprouvette doit avoir une longueur minimale égale à 19 fois la hauteur de la section et l'essai réalisé pour déterminer le module d'élasticité sert aussi pour obtenir le module de résistance en flexion. Il est spécifié dans la norme que la partie supposée la plus faible du sciage (zone à forte nodosité) doit être positionnée au milieu de la portée.

1.3.2.1 Classement optimal

Pour effectuer le classement optimal, l'EN14081 propose d'utiliser la démarche suivante afin de maximiser la proportion de sciages dans les hautes classes :

- 0) choisir la combinaison de classes désirée (C24/C18/Rejet ou C30/Rejet par exemple)
- 1) classer l'ensemble des données relatives à une propriété de détermination de la classe (masse volumique, module d'élasticité ou résistance), puis déterminer et identifier le nombre maximal de pièces conformes à la valeur requise pour cette propriété pour la classe la plus élevée :
- 2) répéter l'étape 1) pour toutes les autres propriétés de détermination de la classe :
- 3) étiqueter les propriétés de détermination de la classe en les nommant par exemple (a), (b) et (c), avec (a) ayant le plus grand nombre de pièces identifié en 1) et 2) ci-dessus, et (c) le plus petit nombre ;
- 4) en n'utilisant que les pièces identifiées pour la propriété (a), les classer principalement en fonction de la propriété (b) en effectuant des classements secondaires en fonction des propriétés (c) et (a), puis déterminer le nombre maximal de pièces conformes à la valeur requise pour la propriété (b). En n'utilisant que ces pièces, les classer principalement en fonction de la propriété (c) en effectuant des classements secondaires en fonction des propriétés (b) et (a). Déterminer et identifier le nombre maximal de pièces conformes à la valeur requise pour la propriété (c). Vérifier que ces pièces sont conformes aux autres propriétés requises et, si tel est le cas, les

- identifier comme appartenant à cette classe. Sinon, effectuer le réglage approprié :
- 5) retirer les pièces assignées à cette classe et répéter les étapes 1) à 5) pour toutes les classes en commençant par la classe supérieure suivante.

Cette démarche permet de garantir que les valeurs caractéristiques du lot ainsi obtenu sont respectées pour les trois propriétés de détermination (Masse volumique, MOE et MOR) et que le résultat obtenu est celui qui donne la plus grande proportion de sciages dans les hautes classes.

1.3.3 Classement visuel

Le classement visuel repose sur plusieurs critères, ces critères peuvent être liés à :

- la structure du bois : les cernes d'accroissement, les noeuds, les poches de résines, l'entre-écorce, les fentes, la pente du fil, le bois de réaction,
- au débit : les flaches,
- aux altérations biologiques : échauffure, piqûres noires ou blanches, trace de gui, bleuissement, coeur brun du chêne,
- aux déformation géométriques : flèche de face, flèche de rive, gauchissement, tuilage.

L'opérateur est chargé de quantifier ces différents paramètres et peut par la suite attribuer une classe aux sciages. Les procédures de classement sont adaptées pour chaque essence et il est présenté un exemple issu de la norme NF B52-001 dans le cas du douglas sur la table 1.3.

En suivant les procédures décrites dans les normes de classement visuel on attribue alors au bois une classe de résistance :

- pour la plupart des résineux ces classes sont au nombres de 3 : ST-I, ST-II et ST-III. (+ classe ST-IV pour les pins),
- pour le chêne, on dénombre 3 classes : 1, 2 et 3.

Ces classes obtenues par classement visuel peuvent être ensuite mises en correspondance avec les classes définies par la norme EN 338, cette correspondance est présentée figure 1.4.

| | | Classes | | | | | |
|---|-----------------------------|--|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| | | ST-I ⁶ | | ST-II | | ST-III | |
| Largeur des cernes d'accroissement (mm) | | ≤ 6 | ≤ 8 | ≤ 6 | ≤ 10 | ≤ 8 | ≤ 12 |
| Section | | ≤ 18 000 mm ² | > 18 000 mm ² | ≤ 18 000 mm ² | > 18 000 mm ² | ≤ 18 000 mm ² | > 18 000 mm ² |
| Diamètre des nœuds | - sur la face ¹⁾ | ∅ ≤ 30 mm | ∅ ≤ 40 mm | ∅ ≤ 50 mm | ∅ ≤ 70 mm | ∅ ≤ 100 mm | ∅ ≤ 130 mm |
| | | et ∅ ≤ 1/6 de l | et ∅ ≤ 1/6 de l | et ∅ ≤ 1/2 de l | et ∅ ≤ 1/2 de l | et ∅ ≤ 3/4 de l | et ∅ ≤ 3/4 de l |
| | - sur la rive ²⁾ | ∅ ≤ 40 mm | ∅ ≤ 80 mm | ∅ ≤ 40 mm | ∅ ≤ 80 mm | ∅ ≤ 40 mm | ∅ ≤ 80 mm |
| | | et ∅ ≤ 2/3 de l | et ∅ ≤ 2/3 de l | et ∅ ≤ 2/3 de l | et ∅ ≤ 2/3 de l | et ∅ ≤ 2/3 de l | et ∅ ≤ 2/3 de l |
| Fentes ^{3) 4)} | - traversantes | longueur ≤ deux fois la largeur de la pièce | | | | longueur ≤ 600 mm | |
| | - non traversantes | longueur ≤ moitié de la longueur de la pièce | | | | non limitée | |
| Grosse poche de résine | | non admise | | admise si < 80 mm | | | |
| Entre-écorce | | non admise | | | | | |
| Pente de fil (en fraction) | - locale | 1:10 | | 1:4 | | | |
| | - générale | 1:14 | | 1:6 | | | |
| Flaches | - longueur | non admises | | < 1/3 de la longueur de la pièce et < 100 cm | | | |
| | - largeur | | | < 1/3 de l'épaisseur de la rive | | | |
| Altérations biologiques | - bleu - traces de gui | admis | | | | | |
| | - piqûres noires | admises si elles apparaissent sur une seule face | | | | | |
| | - échauffure | non admise | | | | | |
| Déformation maximale en mm pour une longueur de 2 m | - flèche de face (mm) | < 10 | | | < 20 | | |
| | - flèche de rive (mm) | < 8 | | | < 12 | | |
| | Gauchissement | 1 mm/25 mm large | | | 2 mm/25 mm large | | |
| Tuilage | | pas de restrictions | | | | | |

TABLE 1.3 – Critères de classement visuel du douglas (extrait de la norme NF B52-001 partie 1)

| Résineux | ST-I | ST-II | ST-III | ST-IV |
|-----------------|------|-------|--------|-------|
| Douglas | C30 | C24 | C18 | |
| Pin | C30 | C24 | C18 | C14 |
| Mélèze | C27 | C24 | C18 | |
| Sapin-Epicéa | C30 | C24 | C18 | |
| Epicéa de Sitka | | C24 | C18 | |
| Peuplier | | C24 | C18 | |
| Feuillus | 1 | 2 | 3 | |
| Chêne | D30 | D24 | D18 | |

TABLE 1.4 – Correspondance des classes obtenues par classement visuel et celles données par la norme EN 338.

On remarque qu'il n'est pas possible à partir du classement visuel d'obtenir des sciages

de classe supérieure à la classe C30. La méthode de classement visuel est de plus relativement imprécise et ces limites font l'objet de la partie suivante.

1.3.3.1 Comparaison entre classement visuel et classement optimal

Pour des raisons pratiques, lors du classement visuel, seules des caractéristiques reconnaissables visuellement peuvent être prises en compte et seules des règles de combinaisons simple sont possibles. Par exemple, la masse volumique ne peut pas être évaluée correctement alors qu'elle est plutôt bien corrélée avec la résistance. Par conséquent, la précision de la méthode de classement visuel est très limitée et ces limites font l'objet de cette partie.

Une étude (Roblot *et al.*, 2008 [51]), s'est intéressée à la qualité du classement visuel dans le cas de l'épicéa et du douglas d'origine française. Elle a été menée sur 111 pièces d'épicéa et 102 de douglas qui ont été classées visuellement, ces résultats ont ensuite été comparés aux valeurs théoriques obtenues par le classement optimal. Les résultats de cette étude sont reportés dans la figure 1.18. La qualité des sciages utilisés n'apparaît pas très représentatives de la ressource nationale française mais ces lots permettent néanmoins la comparaison entre classement visuel et optimal.

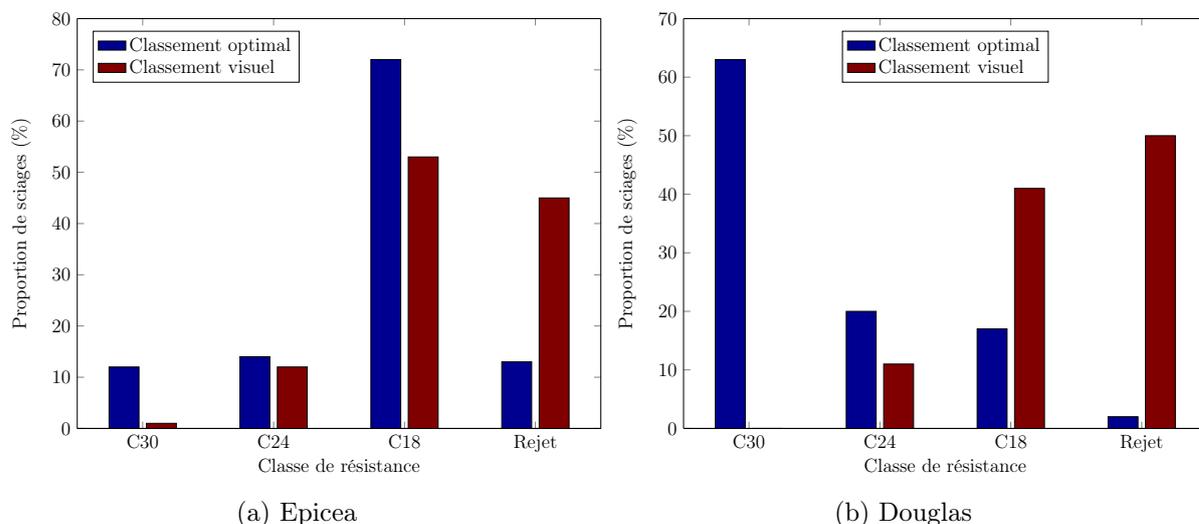


FIGURE 1.18 – Comparaison entre classement optimal et classement visuel pour deux espèces résineuses testées (Roblot *et al.*, 2008)[51]

Cette étude confirme que les normes de classement visuel ne donnent pas de très bons résultats, que ce soit dans le cas de l'épicéa ou du douglas, le classement visuel sous estimant fortement la qualité des sciages. De plus les auteurs précisent que le classement visuel a été mené dans des conditions optimales en accordant à chaque sciage un temps d'analyse conséquent ce qui n'est pas forcément le cas dans des conditions industrielles.

Lanvin *et al.* (2007) [32] ont mené une étude visant à valoriser le chêne français. Ainsi,

deux espèces de chêne ont été étudié (Petraea et Robur Oak). Pour cela 420 arbres ont été sélectionnés afin de représenter au mieux la ressource disponible en France selon :

- la position géographique (répartie dans six différents sites),
- le traitement sylvicole (site à couvert dense ou éclaircies régulières),
- les caractéristiques des sites (acidité et humidité du sol),
- le DBH (diamètre mesuré à 1,3m du sol) allant de 25 à 80 cm.

Des sciages de section $50 \times 150 \text{ mm}^2$ et de 3m de longueur ont ainsi été produits pour un total de plus de 2000 sciages. Ces sciages ont ensuite été soumis à des tests destructifs pour déterminer leur module de rupture en flexion. Le module d'élasticité ainsi que la densité ont aussi été mesurés. Les résultats de cette étude indiquent que les propriétés mécaniques du chêne sont élevées et que seul le MOR peut apparaître comme un critère discriminant.

En comparant les résultats de classement optimaux obtenus par des essais destructifs à ceux obtenus par classement visuel, il a été montré que cette méthode de classement n'est pas adapté pour le chêne. Cette comparaison est présentée dans la figure 1.19. Les auteurs attribuent à ces mauvais résultats la mauvaise corrélation entre la nodosité et les propriétés mécaniques.

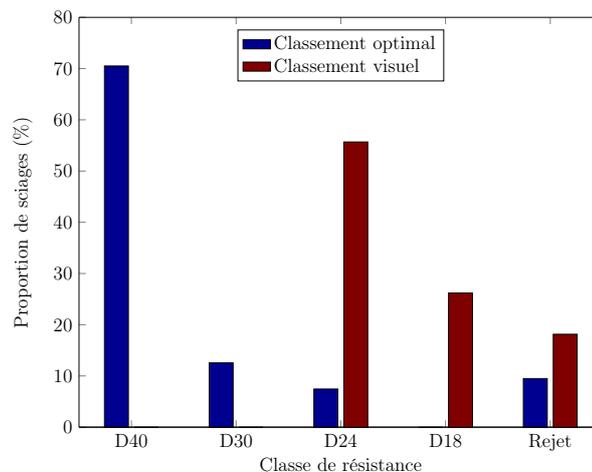


FIGURE 1.19 – Comparaison entre classement optimal obtenu par essais destructifs et classement visuel sur du chêne (Lanvin *et al.*, 2007) [32]

Ces deux études justifient bien l'intérêt porté au classement pour la résistance par machine dans le but de valoriser au mieux les différentes essences. C'est pourquoi pour des applications nécessitant des bois de structure de plus grande résistance, il faut avoir recours au classement pour la résistance par machine. Ce type de classement possède un double intérêt ; le premier étant qu'il estime de manière plus précise la contrainte en rupture que le classement visuel ce qui permet de valoriser au mieux les sciages, le second est qu'il est compatible avec les cadences de production imposées par l'industrie. Le seul

inconvenient de cette méthode est que les pièces sont classées sans aucune considération esthétique ce qui peut être un obstacle à la vente sur le marché traditionnel.

1.3.4 Classement par machine

1.3.4.1 Introduction

Le principe général du classement par machines consiste à estimer au mieux la résistance (MOR), le module d'élasticité (MOE) et la masse volumique via la mesure de propriétés obtenues par contrôles non destructifs. Le problème majeur consiste à estimer la résistance à rupture en flexion d'un sciage de manière non-destructive (le MOE et la masse volumique sont mesurables). Cela implique de rechercher les meilleures corrélations possibles entre des propriétés mesurables par contrôles non destructifs et la résistance. Ainsi les machines de classement estiment la résistance en mesurant notamment le module d'élasticité, la densité, la nodosité et la pente de fil des sciages. De plus, il est possible de coupler ces différentes mesures pour améliorer l'estimation de la résistance, cependant, cela entraîne une multiplication des capteurs et donc une augmentation du coût du classement. Plusieurs technologies ont été développées dans le but de quantifier ces différents paramètres.

1.3.4.2 Cadre normatif

Comme il a été dit en introduction, le classement pour la résistance par machine est régi par la norme EN 14081. L'attribution d'un sciage à une classe de résistance par une machine nécessite le réglage de cette dernière. Ce réglage consiste à se servir d'informations issues de machines pour constituer des lots de sciages dont les valeurs ρ_k , $f_{m,k}$ et $E_{0,mean}$ soient toutes les trois supérieures aux exigences de la classe considérée. Les informations machines sont utilisées pour définir des propriétés indicatrices (IPs), qui sont des valeurs étroitement liées à une ou à plusieurs des propriétés de détermination de la classe. Pour des machines de classement qui calculent et déterminent des valeurs prédictives des propriétés de détermination de la classe directement à partir de plusieurs appareils de mesure, la propriété indicatrice est une valeur prédictive de la propriété de détermination de la classe. Le réglage de la machine consiste alors à la détermination de seuil sur ces IPs qui assurent que les propriétés mécaniques des sciages dont la valeur de l'IP est supérieure au seuil défini sont conformes à la classe considérée. Après réglage, l'information de la machine relative à un sciage unique est utilisée pour identifier son appartenance à une classe de résistance.

Dans le but de calibrer les machines, il faut donc avoir recours à des essais destructifs pour déterminer les seuils des IPs. La première homologation d'une machine nécessite un total de 900 sciages, chaque réglage est valable pour une essence particulière, pour un

pays d'origine du bois et pour une certaine combinaison de classes. Si la machine possède déjà une homologation (pour une autre essence par exemple), la taille du lot nécessaire à son homologation est réduite à 450 sciages. Enfin, chaque réglage doit être conforme aux exigences de la méthode de la matrice coût décrite dans la norme EN 14081-2 [17].

Cette méthode permet la comparaison entre un classement optimal (obtenu par essais destructifs) et le classement réalisé par la machine. Le classement donné par la machine n'étant pas parfait, cela entraîne l'attribution d'une mauvaise classe de résistance à certains sciages. On parle alors de sur-classement si un sciage est assigné par exemple à la classe C30 alors qu'il n'est que C18 en classement optimal, et inversement de sous-classement. Le sur-classement peut induire des problèmes de sécurité alors que le sous-classement représente une perte économique. La norme tolère cependant un certain nombre de sciages surclassés, sans pour autant que cela représente un risque de sécurité puisque les méthodes de dimensionnement de l'Eurocode 5 sont basées sur une approche semi-probabiliste.

La première étape de la méthode consiste à établir la matrice d'effectif. Elle contient le nombre de pièces dans chacune des classes optimales et assignées. Le tableau 1.5 présente la matrice d'effectif utilisée à titre d'exemple dans la norme EN 14081. Elle porte sur le classement de 579 sciages avec une combinaison de classe C35/C27/C22/Rejet.

| Classe optimale | Classe assignée | | | |
|-----------------|-----------------|-----|-----|-------|
| | C35 | C27 | C22 | Rejet |
| C35 | 207 | 32 | 16 | 2 |
| C27 | 10 | 168 | 12 | 1 |
| C22 | 4 | 13 | 84 | 2 |
| Rejet | 0 | 2 | 2 | 24 |

TABLE 1.5 – Exemple de matrice d'effectif de la norme EN 14081. En vert sont représentés les sciages bien classés (sur la diagonale), en rouge les sciages sur-classés (sous la diagonale) et en bleu ceux sous-classés (au dessus de la diagonale)

A chaque couple classe optimale/classe assignée correspond un certain poids donné dans la matrice des coûts élémentaires (voir tableau 1.6). Les poids au dessus de la diagonale correspondent aux pièces sous-classées et sont calculés en se basant sur la perte de matière engendrée par le sous-classement. Ainsi les différents poids relatifs au sous-classement sont calculés grâce à l'équation 1.11.

$$\text{Coût}(\text{sousclassement}) = 10 \left[\left(\frac{E_{\text{optimal}}}{E_{\text{assign}}} \right)^\alpha - 1 \right] \quad (1.11)$$

Avec $\alpha = \frac{1}{3}$ pour les éléments de flexion et $\alpha = 1$ pour les éléments de tension et compression.

En ce qui concerne les termes inférieurs de la matrice, ils correspondent aux pièces surclassées et doivent donc rendre compte de l'augmentation du risque de rupture. Ils sont calculés en estimant la valeur moyenne de contrainte de rupture pour la classe considérée en supposant une répartition log-normale. Les poids élémentaires sont en fait la différence entre le coefficient de sécurité cible β_{tar} (égal à 3) et le coefficient de sécurité obtenu avec le surclassement β_{ach} . Cette différence est ensuite à multiplier par 10. Enfin pour la classe de rejet, la norme préconise de lui accorder 75% des différentes valeurs caractéristiques de la plus basse classe de la combinaison testée.

| Classe optimale | Classe assignée | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | C50 | C45 | C40 | C35 | C30 | C27 | C24 | C22 | C20 | C18 | C16 | C14 |
| C50 | 0 | 0.22 | 0.45 | 0.72 | 1.01 | 1.16 | 1.33 | 1.69 | 1.90 | 2.11 | 2.60 | 3.17 |
| C45 | 0.37 | 0.0 | 0.23 | 0.49 | 0.77 | 0.92 | 1.09 | 1.45 | 1.64 | 1.85 | 2.33 | 2.89 |
| C40 | 0.83 | 0.42 | 0.0 | 0.25 | 0.53 | 0.68 | 0.84 | 1.19 | 1.38 | 1.59 | 2.05 | 2.60 |
| C35 | 1.43 | 0.95 | 0.48 | 0.0 | 0.27 | 0.42 | 0.57 | 0.91 | 1.10 | 1.30 | 1.76 | 2.29 |
| C30 | 2.22 | 1.67 | 1.11 | 0.56 | 0.0 | 0.14 | 0.29 | 0.53 | 0.81 | 1.01 | 1.45 | 1.97 |
| C27 | 2.84 | 2.22 | 1.60 | 0.99 | 0.37 | 0.0 | 0.15 | 0.48 | 0.66 | 0.85 | 1.29 | 1.80 |
| C24 | 3.61 | 2.92 | 2.22 | 1.53 | 0.83 | 0.42 | 0.0 | 0.32 | 0.50 | 0.69 | 1.12 | 1.63 |
| C22 | 4.24 | 3.48 | 2.73 | 1.97 | 1.21 | 0.76 | 0.30 | 0.0 | 0.17 | 0.36 | 0.77 | 1.26 |
| C20 | 5.00 | 4.17 | 3.33 | 2.50 | 1.67 | 1.17 | 0.67 | 0.33 | 0.0 | 0.18 | 0.59 | 1.07 |
| C18 | 5.93 | 5.00 | 4.07 | 3.15 | 2.22 | 1.67 | 1.11 | 0.74 | 0.37 | 0.0 | 0.40 | 0.87 |
| C16 | 7.08 | 6.04 | 5.00 | 3.96 | 2.92 | 2.29 | 1.67 | 1.25 | 0.83 | 0.42 | 0.0 | 0.46 |
| C14 | 8.57 | 7.38 | 6.19 | 5.00 | 3.81 | 3.10 | 2.38 | 1.90 | 1.43 | 0.95 | 0.48 | 0.0 |

TABLE 1.6 – Matrice coût élémentaire pour chaque couple de classe optimale/classe assignée (EN 14081).

La dernière étape de la méthode consiste à calculer la matrice de coût global. Chaque terme de la matrice est obtenu en multipliant chaque case de la matrice d'effectif par le terme correspondant de la matrice de coûts élémentaires et en divisant le résultat par le nombre total de pièces dans la classe assignée (total de la colonne de la matrice d'effectif). Le tableau 1.7 présente la matrice de coût global sur l'exemple présenté dans la norme. Le calcul du terme classe optimale C35 classe assignée C22 est par exemple explicité equation 1.12.

$$CoutGlobal(C35, C22) = \frac{16 \times 0.91}{16 + 12 + 84 + 2} = 0.13 \quad (1.12)$$

Pour qu'un réglage machine soit acceptable, les éléments sous la diagonale (qui correspondent au sur-classement) doivent être inférieurs à 0.2. Ce seuil permet de limiter la quantité de pièces surclassées et de prendre en compte les risques de rupture lors du dimensionnement. Il n'existe pas de limite sur les termes supérieurs de la diagonale (qui correspondent au sous-classement). Ceci signifie que cette méthode ne permet pas de garantir un certain niveau d'efficience d'une machine de classement mais uniquement

| Classe | Classe assignée | | | |
|----------|-----------------|------|------|-------|
| | C35 | C27 | C22 | Rejet |
| optimale | 0.0 | 0.06 | 0.13 | 0.14 |
| C35 | 0.04 | 0.0 | 0.05 | 0.05 |
| C27 | 0.04 | 0.05 | 0.0 | 0.07 |
| C22 | 0.0 | 0.02 | 0.02 | 0.0 |

TABLE 1.7 – Matrice de coût global EN 14081

de limiter le sur-classement. Pour évaluer la qualité du classement, plusieurs méthodes peuvent être utilisées, c'est l'objet du paragraphe suivant.

1.3.4.3 Évaluation de la qualité du classement par machine

1.3.4.3.1 Coefficient de détermination

Comme évoqué précédemment, le principe de base du classement par machine repose sur l'existence de relation entre des propriétés mesurables de manière non-destructives et la résistance. La qualité de la prédiction est donc un bon indicateur de la qualité du classement qui sera obtenu. C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir des outils permettant de juger de l'efficacité de telle ou telle méthode ainsi que de pouvoir les comparer entre elles. Ce besoin de comparaison est notamment nécessaire, car l'usage de certaines propriétés est mieux adapté à certaines essences.

La formulation analytique exacte des relations entre les différentes propriétés mécaniques est beaucoup trop complexe pour être obtenue. Dans la majorité des cas on se contente d'une régression linéaire entre la propriété mesurée et la résistance. On se limite ainsi à un modèle de régression simple tel qu'il est décrit dans l'équation 1.13.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i \quad (1.13)$$

Avec :

- y_i : un vecteur contenant les valeurs de références (MOR essais destructifs),
- x_i : un vecteur contenant les valeurs prédictive de la résistance (variables issues des différentes technologies de classement),
- ϵ_i : un vecteur contenant les valeurs du résidu.

L'objectif est alors de déterminer les coefficients β_0 et β_1 tels qu'ils minimisent la somme des carrés des résidus notée SCR (équation 1.14) :

$$SCR = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (1.14)$$

où e_i^2 représente l'écart entre la valeur fournie par la régression linéaire et celle du point réel. Ce terme est un critère permettant de décrire qualitativement une régression linéaire, en effet une valeur nulle de SCR indiquerait que la régression est parfaite alors qu'au contraire une grande valeur de SCR indique que l'erreur d'estimation est forte. Pour évaluer la pertinence du modèle de régression on peut aussi avoir recours à l'analyse de variance de la régression, elle repose sur le partitionnement des carrés (equation 1.15).

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (\hat{y}^i - \bar{y})^2 + \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (1.15)$$

L'équation 1.15 montre que la somme des carrés des écarts des observations y_i à leur moyenne (notée SCT) se décompose en une somme des carrés expliquée par le modèle (SCM) et une somme des carrés des résidus (SCR) (equation 1.16).

$$SCT = SCM + SCR \quad (1.16)$$

A partir des ces grandeurs on définit alors un rapport appelé coefficient de détermination que l'on note r^2 et qui est donné par l'équation 1.17.

$$r^2 = \frac{SCM}{SCT} = 1 - \frac{SCR}{SCT} \quad (1.17)$$

La valeur de r^2 est comprise entre 0 et 1 et rend compte de la qualité de la régression linéaire. Ainsi un r^2 proche de 0 indique que la régression n'est pas bonne (c'est à dire qu'il n'y a pas une bonne relation de proportionnalité entre la propriété mesurée et la résistance) alors qu'au contrario une valeur proche de 1 indique que la relation est bonne.

Le coefficient de détermination peut être utilisé pour évaluer la qualité de la prédiction, l'augmentation de ce paramètre conduit généralement à une amélioration du classement mécanique final tel qu'il est défini dans l'EN 14081.

1.3.4.3.2 Indice d'efficience

Roblot *et al.* (2013) [49] ont développé une méthode permettant l'évaluation des performances d'une machine. Elle reprend certains principes de la norme EN 14081 et permet le calcul d'une grandeur appelée indice d'efficience. Cette indice varie de 0 à 100 % (plus l'indice est proche de 100, plus les performances de la machine sont bonnes) et est applicable pour comparer deux machines sur la même combinaison de classes. La méthode est basée sur la méthode de la matrice coût. Cependant étant donné que le nombre de pièces sur-classées est limité par la norme elle-même, la matrice d'effectif présentée dans la partie précédente est modifiée et il est considéré que les pièces sur-classées sont en fait bien classées. En pratique cela correspond à ajouter les termes sous la diagonale aux termes de la diagonale de la ligne correspondante. Cette matrice est appelée matrice d'effectif

d'efficience et est présentée tableau 1.8 à partir de l'exemple de la norme EN 14081 cité précédemment.

| Classe optimale | Classe assignée | | | |
|-----------------|-----------------|-----|-----|-------|
| | C35 | C27 | C22 | Rejet |
| C35 | 207 | 32 | 16 | 2 |
| C27 | X | 178 | 12 | 1 |
| C22 | X | X | 101 | 2 |
| Rejet | X | X | X | 28 |

TABLE 1.8 – Matrice d'effectif d'efficience

Les auteurs ont aussi adapté la matrice des coûts élémentaires, ils ont ainsi normés les différents poids en divisant chaque terme de la matrice par le coût de sous-classement maximal égal à 4.5 (correspondant à un sous-classement extrême de la classe C50 à C14). Ensuite pour que l'indice soit d'autant plus grand que les performances machines sont bonnes, chacun des coûts est remplacé par son complémentaire à 1. Le tableau 1.9 représente la matrice des poids élémentaires d'efficience alors que le tableau 1.10 présente les valeurs de poids affectés au rejet en fonction de la classe dont les pièces sont rejetées (correspondant à la plus petite classe de la combinaison testée).

| Classe optimale | Classe assignée | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | C50 | C45 | C40 | C35 | C30 | C27 | C24 | C22 | C20 | C18 | C16 | C14 |
| C50 | 1 | 0.95 | 0.90 | 0.84 | 0.78 | 0.74 | 0.70 | 0.62 | 0.58 | 0.53 | 0.42 | 0.29 |
| C45 | X | 1 | 0.95 | 0.89 | 0.83 | 0.79 | 0.76 | 0.68 | 0.63 | 0.59 | 0.48 | 0.36 |
| C40 | X | X | 1 | 0.94 | 0.88 | 0.85 | 0.81 | 0.74 | 0.69 | 0.65 | 0.54 | 0.42 |
| C35 | X | X | X | 1 | 0.94 | 0.91 | 0.87 | 0.80 | 0.76 | 0.71 | 0.61 | 0.49 |
| C30 | X | X | X | X | 1 | 0.97 | 0.93 | 0.86 | 0.82 | 0.78 | 0.68 | 0.56 |
| C27 | X | X | X | X | X | 1 | 0.97 | 0.89 | 0.85 | 0.81 | 0.71 | 0.60 |
| C24 | X | X | X | X | X | X | 1 | 0.93 | 0.89 | 0.85 | 0.75 | 0.64 |
| C22 | X | X | X | X | X | X | X | 1 | 0.96 | 0.92 | 0.83 | 0.72 |
| C20 | X | X | X | X | X | X | X | X | 1 | 0.96 | 0.87 | 0.76 |
| C18 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 1 | 0.91 | 0.81 |
| C16 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 1 | 0.90 |
| C14 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 1 |

TABLE 1.9 – Matrice de poids élémentaires d'efficience

| Classe optimale | Classe assignée | | | | | | | | | | | |
|-----------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | C50 | C45 | C40 | C35 | C30 | C27 | C24 | C22 | C20 | C18 | C16 | C14 |
| C50 | 0.78 | 0.72 | 0.67 | 0.60 | 0.53 | 0.49 | 0.45 | 0.36 | 0.31 | 0.26 | 0.14 | 0.00 |
| C45 | X | 0.78 | 0.72 | 0.66 | 0.59 | 0.55 | 0.51 | 0.42 | 0.37 | 0.32 | 0.21 | 0.07 |
| C40 | X | X | 0.78 | 0.72 | 0.65 | 0.61 | 0.57 | 0.49 | 0.44 | 0.39 | 0.27 | 0.14 |
| C35 | X | X | X | 0.78 | 0.71 | 0.67 | 0.64 | 0.55 | 0.51 | 0.46 | 0.35 | 0.22 |
| C30 | X | X | X | X | 0.78 | 0.74 | 0.70 | 0.62 | 0.58 | 0.53 | 0.42 | 0.29 |
| C27 | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.74 | 0.66 | 0.62 | 0.57 | 0.46 | 0.34 |
| C24 | X | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.70 | 0.65 | 0.61 | 0.50 | 0.38 |
| C22 | X | X | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.73 | 0.69 | 0.59 | 0.47 |
| C20 | X | X | X | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.73 | 0.63 | 0.51 |
| C18 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.68 | 0.56 |
| C16 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 0.78 | 0.67 |
| C14 | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X | 0.78 |

TABLE 1.10 – Matrice de poids élémentaires d'efficience pour les classes de rejets

Le calcul de la matrice coût global est lui aussi modifié, les différents termes de cette nouvelle matrice appelée matrice d'efficience globale sont obtenus en multipliant chaque terme de la matrice d'effectif de performance par le terme correspondant de la matrice de poids élémentaire de performance. Le résultat de ce produit est enfin divisé par le nombre de pièces de la classe optimale (somme de la ligne). Ainsi, toujours en se basant sur l'exemple présenté dans la norme EN 14081, la matrice obtenue est présentée tableau 1.11.

| Classe optimale | Classe assignée | | | |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| | C35 | C27 | C22 | Rejet |
| C35 | 0.805 | 0.113 | 0.050 | 0.004 |
| C27 | - | 0.932 | 0.056 | 0.003 |
| C22 | - | - | 0.981 | 0.015 |
| Rejet | - | - | - | 1 |

TABLE 1.11 – Matrice d'efficience globale

Le calcul final de l'indice de performance de la machine est alors obtenu en sommant tous les termes de la matrice de performance globale et en le divisant par le nombre de classe de la combinaison testée. L'indice est en réalité tronqué à 50% afin d'amplifier ses variations. (equation 1.18 appliquée à notre exemple.)

$$(1.18) \quad \text{Indice d'efficience} = \left(\frac{\sum \text{termes matrice d'efficience globale}}{4} - 0.5 \right) \times 2 = 97.9\%$$

1.3.5 Conclusion sur le classement mécanique

Cette première partie montre que le classement pour la résistance par machine nécessite d'être capable de prédire au mieux la masse volumique, le module d'élasticité et la résistance en flexion d'un lot de sciages. La masse volumique peut être aisément mesurée de manière précise. Les différentes méthodes d'estimation de module d'élasticité vont être détaillées. Enfin la prédiction de la résistance en flexion nécessite quant à elle de quantifier les différentes singularités jouant un rôle sur les propriétés mécaniques et de les intégrer dans des modèles de prédictions. Cette dernière remarque concernant l'intégration de singularités dans des modèles peut aussi être appliquée pour la prédiction du module d'élasticité en complément de mesure non destructive directe.

1.4 Estimation non-destructive des propriétés mécaniques

1.4.1 Estimation de la masse volumique

1.4.1.1 Pesée du sciage

Pour déterminer la masse volumique moyenne d'un sciage, il existe des machines capables de peser et de mesurer les dimensions des sciages lors de leur convoyage dans la chaîne de production. Il est alors aisé de calculer leur masse volumique moyenne.

1.4.1.2 Utilisation des rayons X

Les rayons X peuvent aussi être utilisés pour la mesure de la masse volumique [31]. Pour cela le sciage est soumis à des rayons X lors de son convoyage et l'intensité transmise est mesurée. Le calcul de la masse volumique locale est basé sur la loi de Beer-Lambert (equation 1.19). Cette loi permet de relier la masse volumique au rapport entre l'intensité de la radiation incidente sur celle transmise.

$$\rho = \frac{1}{\mu t} \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (1.19)$$

où :

- ρ : la masse volumique (g/cm^3),
- μ : le coefficient d'atténuation (cm^2/g),
- t : l'épaisseur de l'échantillon,
- I_0 : l'intensité de la radiation incidente (Sv/h),
- I : l'intensité de la radiation transmise (Sv/h).

Cette méthode permet d'obtenir localement une valeur de masse volumique. Il est alors ensuite possible de calculer une valeur de masse volumique moyenne d'un sciage et d'en déduire sa valeur caractéristique pour un lot particulier à classer.

On peut aussi noter que la masse volumique, en plus d'être un critère de classement mécanique, est aussi un paramètre relativement bien corrélé au module d'élasticité et de rupture.

Les corrélations entre la masse volumique et les propriétés mécaniques (MOE et MOR) observées lors de différentes études sont présentées tableau 1.12. Il apparait clairement que la masse volumique est beaucoup mieux corrélée avec le MOE qu'avec le MOR. Enfin, les corrélations varient très fortement selon l'essence et même selon le lot de bois utilisé, en effet de fortes variations sont aussi observées entre différentes études sur la même essence.

| Publication | Essence | r^2 avec MOE | r^2 avec MOR |
|------------------------------|--------------------|----------------|----------------|
| van de Kuilen (2002) [63] | Feuillus tropicaux | 0.19 | 0.17 |
| Johansson et al. (1992) [29] | Epicea | NC | 0.16 |
| Hoffmeyer (1984) [26] | Epicea | NC | 0.3 |
| Hoffmeyer (1990) [27] | Epicea | NC | 0.16 |
| Fonselius (1997) [21] | Epicea | NC | 0.34 |
| Rohanová (2011) [52] | Epicea | NC | 0,27-0,41 |
| VTT Combigrade (2005)[25] | Epicea | 0.59 | 0.37 |
| | Pin | 0.75 | 0.55 |
| Wang et al. (2007) [68] | Cedre japonais | 0.28 | NC |
| | Douglas | 0.34 | NC |
| | Pin | 0.31 | NC |
| | Taiwania | 0.24 | NC |
| Piter et al. (2004) [45] | Eucalyptus | NC | 0.21 |

TABLE 1.12 – Coefficients de détermination entre masse volumique et module d'élasticité et résistance obtenus dans différentes études.

1.4.2 Estimation du module d'élasticité

Le classement mécanique nécessite aussi de connaître la valeur moyenne du module d'élasticité de chaque lot de sciages à attribuer à une classe. Une relative bonne corrélation existe entre le module d'élasticité et la résistance d'un sciage ce qui en fait un bon outil potentiel de la prédiction de la résistance. C'est pourquoi différentes techniques ont été développées permettant son estimation.

1.4.2.1 Essai de flexion dynamique «Stress grader»

Le module d'élasticité dynamique peut être mesuré en soumettant le sciage à un essai de flexion dynamique. C'est la première technologie à avoir été implantée pour effectuer du classement mécanique par machine. Le principe est de faire passer le sciage entre deux

rouleaux lors du convoyage. Le sciage subit alors un essai de flexion trois points où la flèche est imposée. La mesure de l'effort résultant permet ensuite la détermination du module d'élasticité. Ce type de machine comporte cependant l'inconvénient de ne pas prendre en compte les extrémités des planches et des problèmes de vibrations peuvent aussi apparaître. Il faut aussi noter qu'il est nécessaire de fléchir la planche dans les deux sens du fait que certains sciages peuvent être "tuilés".

Biechele *et al.* (2011) [5] ont analysé la qualité de cette méthode pour le classement de sciages en sapin aboutés. Ils ont trouvé un coefficient de détermination r^2 allant de 0.28 à 0.33 entre le module d'élasticité obtenu par cette méthode et le module de rupture en traction.

1.4.2.2 Méthodes vibratoires

Ces méthodes consistent à faire entrer le sciage en vibration en le percutant afin de déterminer ses fréquences propres, la connaissance de ces fréquences propres permettant le calcul du module d'élasticité.

Il existe deux méthodes :

- la première repose sur la mesure de la fréquence propre en flexion,
- la seconde, sur la fréquence propre en compression longitudinale.

Dans les deux cas, le signal peut être mesuré de différentes manières : microphone, accéléromètre ou de manière optique (vibromètre laser). Le signal obtenu est ensuite traité grâce à des algorithmes de transformée de Fourier rapide (FFT), pour déduire la fréquence du mode de vibration.

Le module d'élasticité est ensuite donné par l'équation 1.20.

$$\begin{aligned} E_{dyn_{flexion}} &= 4\pi^2 \frac{\rho S L^4}{I_{Gz}} \frac{f_n^2}{X_n} \\ E_{dyn_{longi}} &= 4\rho \frac{f_n^2}{n^2} L^2 \end{aligned} \quad (1.20)$$

où :

- E_{dyn} : module d'élasticité longitudinal,
- f : fréquence du mode de vibration considéré,
- n : rang de la fréquence du mode de vibration considéré,
- ρ : masse volumique du sciage,
- L : longueur du sciage,
- X_n pouvant être approché par $(2n + 1)\frac{\pi}{2}$.

Une étude J-W.G. van de Kuilen (2002) [63] sur des espèces de feuillus tropicaux (avec une très forte variabilité) montre une corrélation avec un $r^2 = 0.532$ entre un module obtenu par une méthode vibratoire et la résistance en flexion. Dans le cas de l'épicéa, Jehl *et al.* (2011) [28] ont comparé les résultats obtenus par des méthodes vibratoires avec

des valeurs issues d'essais destructifs. Ils ont ainsi obtenu un coefficient de détermination r^2 égal à 0.907 entre le module d'élasticité prédit et celui obtenu par essais destructifs et un coefficient r^2 égal à 0.581 entre les modules de résistance en flexion. Enfin une autre étude Biechele *et al.* (2011) a donné des coefficients de détermination r^2 entre des modules élastiques obtenus par deux méthodes vibratoires (longitudinale et de flexion) et la résistance en traction compris entre 0.28 et 0.33 pour la vibration longitudinale et entre 0.19 et 0.40 pour la vibration de flexion. Ces derniers résultats portent sur des sciages en sapin aboutés.

On peut cependant noter que ces méthodes présentent l'inconvénient de considérer le sciage dans son ensemble et ne permettent pas en général de prendre compte la position des singularités. Le paragraphe suivant décrit une amélioration de ces méthodes avec la prise en compte de ces singularités.

Une étude (Olsson *et al.*, 2011) [40] a montré qu'il était possible de prendre en compte les singularités à partir de la mesure de fréquence de résonance de modes plus élevés. En effet en théorie des poutres, le module d'élasticité peut être déduit à partir de n'importe laquelle de ses fréquences propres car la pulsation propre du i^e mode est donnée par :

$$\omega_i = i \frac{\pi}{L} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1.21)$$

Avec :

- ω_i : pulsation propre,
- L : longueur du sciage,
- E : module d'élasticité,
- ρ : densité du sciage.

et f_i , la i^e fréquence propre donnée par la relation :

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \quad (1.22)$$

Le module d'élasticité est donc obtenu par :

$$E = \rho \left(\frac{2f_i L}{i} \right)^2 \quad (1.23)$$

On peut donc à partir de ces relations, en supposant que le matériau est homogène, calculer les fréquences de résonance d'ordre supérieur à partir de la mesure de la première fréquence propre. En effet si la première fréquence de résonance est égale à 700Hz, la deuxième et troisième doivent être égales à 1 400Hz et 2 100Hz respectivement. En pratique Olsson *et al.* (2011) [40], ont montré que ce phénomène n'est pas vérifié et attribuent cette différence à l'hétérogénéité du sciage. Ils ont alors définis une variable rendant compte de cette hétérogénéité à partir de la différence entre les valeurs de fréquences théoriques et mesurées. En considérant qu'un sciage très hétérogène est moins résistant

qu'un sciage plus homogène, cette variable appelée *Measure of inhomogeneity* (MOI), est intéressante pour classer mécaniquement des sciages. Ces considérations ont permis sur un lot de 105 sciages d'épicéa d'améliorer le coefficient de détermination r^2 entre module d'élasticité et résistance, de 0.69 à 0.75.

1.4.2.3 Méthodes ultrasonores

Cette méthode repose sur la mesure de la vitesse de propagation d'une onde (le plus souvent des ultrasons) le long du sciage. Elle consiste à disposer un émetteur et un receveur à ultrasons en chaque extrémité du sciage. En soumettant l'extrémité d'une planche à une vibration de fréquence connue, on peut, à partir du décalage de phase constaté à l'autre extrémité, déduire le temps de propagation de l'onde. Le module d'élasticité est ensuite calculé à partir de l'équation 1.24.

$$MOE_{ultrasons} = \rho v^2 \quad (1.24)$$

où :

- ρ : densité du sciage,
- v : la vitesse de propagation de l'onde calculée.

Sandoz (1989) [53] a ainsi montré le potentiel de cette méthode pour l'estimation du module d'élasticité ($r^2 = 0.64$) sur des sciages en épicéa. De manière analogue aux méthodes vibratoires, les méthodes ultrasonores ne prennent en général pas en compte les singularités présentes dans le sciage. Des études ont alors été menées afin d'améliorer cette méthode. Rajeshwar *et al.* (1997) [46] ont montré qu'il était possible de prendre en compte la pente de fil et la présence de noeuds à l'aide d'ultrasons. Ils ont ainsi montré que la présence de noeuds dans un sciage augmentait le temps de parcours des ultrasons et atténuait l'énergie des plus hautes fréquences. De plus la vitesse de l'onde ultrasonore diminue aussi lorsque la pente de fil augmente (jusqu'à un angle de 30°, la perte est de plus de 1% par degré). Le tracé de la vitesse de l'onde en fonction de la pente de fil présente approximativement la même forme que le tracé obtenu du module d'élasticité en fonction de la pente de fil à l'aide de la formule de Hankinson. En prenant en compte ces différents phénomènes, le coefficient de corrélation entre l'estimation de la résistance et sa valeur réelle passe de 0.69 à 0.73.

1.4.2.4 Comparatif des différentes méthodes d'estimation du MOE

Une étude menée par Haines *et al.* (1996) [23] s'est intéressée aux différentes méthodes d'estimation du module d'élasticité sur de l'épicéa. Ils ont aussi pu montrer que la méthode la plus précise était celle basées sur l'analyse de la fréquence de résonance en flexion, alors que celles basées sur le temps de parcours d'une onde ultrasonore ou sur la fréquence de résonance longitudinale avaient tendance à surestimer la valeur du module.

Une comparaison de différentes méthodes d'estimation du module d'élasticité a aussi été menée par Wang *et al.* (2007) [68]. Les auteurs ont aussi comparé des méthodes ultrasonores avec l'analyse du premier mode de vibration transverse. Les conclusions tirées sont en accord avec l'étude précédente, pour déterminer le module d'élasticité en flexion, l'analyse vibratoire apparait comme une meilleure technologie par rapport à la méthode ultrasonore.

Le tableau 1.13 contient les différents résultats obtenus lors de différentes études portant sur l'estimation du module d'élasticité ainsi que son utilisation possible comme critère de prédiction de la résistance d'un sciage. La colonne r^2 MOE regroupe ainsi les coefficients de détermination entre l'estimation du module d'élasticité et le module d'élasticité mesuré lors d'un essai de flexion (EN 408). La colonne r^2 MOR montre la corrélation entre cette même estimation de module d'élasticité et la résistance à la flexion (MOR). Il est à noter que peu d'études ont été faites dans le cas des feuillus. Kretschmann et Green (1999) [30] ont cependant mené une étude dans le cas du chêne montrant une relative bonne corrélation entre un module d'élasticité vibratoire et le MOR. De manière générale, l'estimation du module d'élasticité par les différentes méthodes est très bonne et montre que l'estimation du module d'élasticité ne pose pas de problème dans une optique de classement mécanique.

En revanche concernant l'utilisation de ces mesures pour la prédiction du MOR, les résultats sont plus faibles et surtout très variables selon les essences et études présentées. L'effort doit être porté sur la prédiction du MOR tout en essayant de se détacher au maximum de la corrélation intrinsèque entre MOE et MOR. C'est l'objet de la partie suivante.

| Publications | Essence | Méthode | r^2 MOE | r^2 MOR |
|----------------------------------|--------------------|----------------------|-----------|-----------|
| Biechelle et al. (2011) [5] | Sapin abouté | Vibratoire | NC | 0,19-0,40 |
| | Sapin abouté | Flexion dynamique | NC | 0,28-0,33 |
| van de Kuilen (2002) [63] | Feuillus tropicaux | EN 408 | NC | 0.532 |
| Sandoz (1989) [53] | Epicea | Ultrasonore | 0.64 | 0.42 |
| Jehl et al. (2011) [28] | Epicea | Vibratoire | 0.91 | 0.58 |
| Olsson et al. (2011) [40] | Epicea | Vibratoire amélioré | NC | 0.75 |
| Rohanovà et al, (2011) [52] | Epicea | EN 408 | NC | 0.41 |
| | Epicea | Flexion dynamique | NC | 0.51 |
| VTT Combigrade (2005) [25] | Epicea | Flexion dynamique | 0.76 | 0.57 |
| | Epicea | Ultrasonore | 0.57 | 0.42 |
| | Epicea | Vibratoire | 0.67 | 0.46 |
| | Pin | Flexion dynamique | 0.87 | 0.72 |
| | Pin | Ultrasonore | 0.75 | 0.66 |
| | Pin | Vibratoire | 0.75 | 0.55 |
| Wang et al. (2007) [68] | Cedre japonais | Ultrasonore | 0.71 | NC |
| | Douglas | Ultrasonore | 0.8 | NC |
| | Pin | Ultrasonore | 0.82 | NC |
| | Taiwania | Ultrasonore | 0.7 | NC |
| | Cedre japonais | Vibratoire | 0.86 | NC |
| | Douglas | Vibratoire | 0.9 | NC |
| | Pin | Vibratoire | 0.87 | NC |
| Taiwania | Vibratoire | 0.9 | NC | |
| Rajeshwar et al. (1997) [46] | Pin | Ultrasonore amélioré | NC | 0.72 |
| Piter et al. (2004) [45] | Eucalyptus | EN 408 | NC | 0.6 |
| Kretschmann et Green (1999) [30] | Chêne | Vibratoire | NC | 0.44 |

TABLE 1.13 – Coefficients de détermination entre l’estimation du module d’élasticité et des valeurs de module d’élasticité et de rupture obtenues lors d’essais destructifs issues de différentes études

1.4.3 Estimation de la résistance en flexion

Comme il a été montré précédemment, la résistance d’un sciage peut être prédite par la mesure de la masse volumique ou du module d’élasticité. Cependant pour améliorer cette prédiction, il est nécessaire d’avoir recours à d’autres méthodes pour prendre en compte notamment les singularités locales du matériau bois. Afin d’intégrer ces singularités dans un modèle de prédiction, il existe plusieurs méthodes. Il s’agit alors, de prédire les variations d’une variable de sortie (le MOR) en fonction des variations de plusieurs variables d’entrées (les valeurs issues des différentes technologies). La première étape est de développer des solutions de mesure des différentes singularités et ce de à des cadences industrielles.

1.4.3.1 Mesure de la nodosité

Pour caractériser la nodosité d'un sciage il a été défini un facteur appelé *Knot Area Ratio* (KAR) représentant le rapport entre la surface occupée par les noeuds sur la surface de bois sain dans un tronçon. Le calcul de ce paramètre a initialement été proposé par Tredwell (1973) [60] la fenêtre de projection glissante proposée par Tredwell était de 150mm. La figure 1.20 illustre le calcul du KAR.

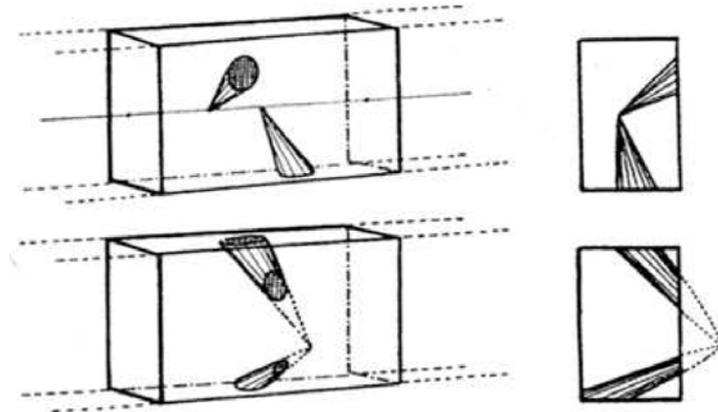


FIGURE 1.20 – Illustration du calcul du KAR (Tredwell, 1973) [60]

L'information du KAR est disponible sur toute la longueur du sciage, il peut alors être retenu soit la valeur maximale, la moyenne ou encore l'écart-type des différents KAR. De plus, les auteurs ont fait varier la longueur de la fenêtre de projection glissante de 50 à 150mm. L'objectif étant ensuite de ne conserver que ceux décrivant au mieux la résistance du sciage. De nombreuses variantes du KAR ont aussi été calculées (Roblot *et al.*, 2010 [50]), ces variantes sont décrites figure 1.21.

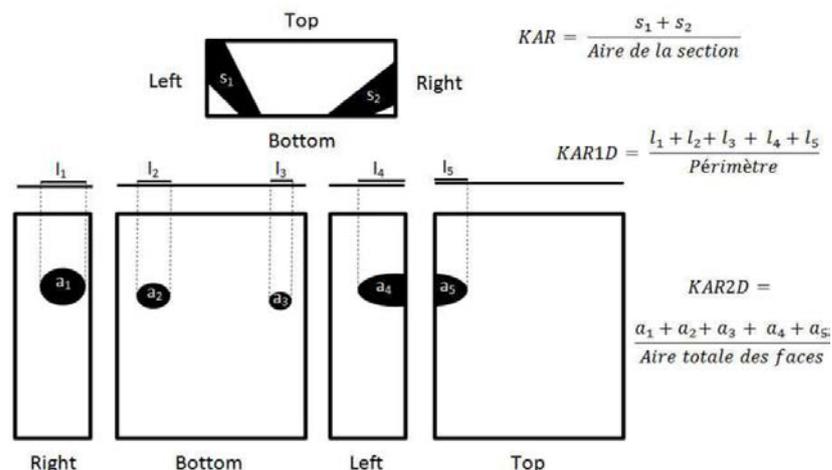


FIGURE 1.21 – Variantes du KAR (Roblot *et al.*,2010) [50]

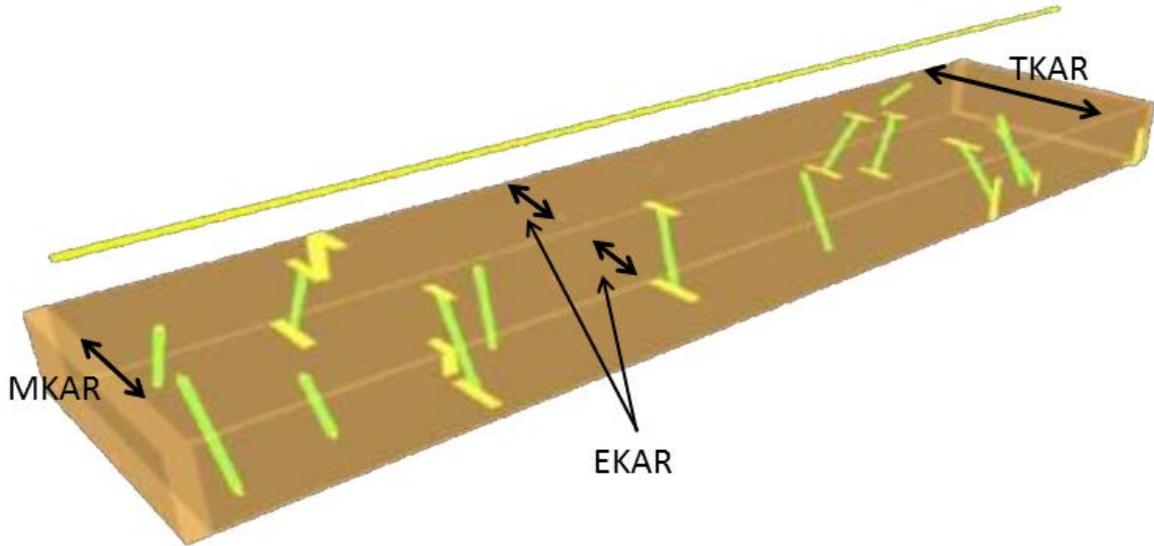
Roblot *et al.* [50] ont mis au point une méthode de calcul du KAR à l'aide d'un scanner optique et d'un algorithme d'analyse d'images. La première étape de calcul automatique du KAR consiste à détecter les noeuds sur les 4 faces du sciage. Il s'agit ensuite de mettre en correspondance ces noeuds afin de déterminer comment ils sont agencés à l'intérieur du sciage. La figure 1.22 montre une représentation schématique des résultats obtenus après mise en correspondance des noeuds.

Cette méthode repose sur la propriété que tous les noeuds proviennent de la moelle, considérée comme une ligne droite parallèle à l'axe longitudinal du sciage. Cette hypothèse permet la mise en correspondance des noeuds entre les différentes faces. On peut aussi déduire l'emplacement théorique de la moelle. Cependant la localisation de la moelle n'est possible que si celle-ci est située à l'extérieur du sciage, dans le cas contraire, il est considéré qu'elle est localisée au milieu de la section du sciage.

Une fois la dimension et la position des noeuds connus à l'intérieur du sciage, il est alors aisé de calculer le KAR, en observant l'évolution de la surface des noeuds à travers une fenêtre d'observation que l'on déplace le long du sciage. De plus, dans cette étude les auteurs ont calculé trois valeurs de KAR tirées de la norme BS 4978 [9] :

- un KAR global calculé sur la totalité de la section du sciage (TKAR),
- un KAR calculé uniquement dans la partie centrale du sciage (MKAR),
- un KAR calculé sur les bords du sciage (EKAR).

L'intérêt de définir ces variantes du KAR réside dans le fait que lors d'essais de flexion à rupture, les bords du sciage sont les parties qui subissent les plus fortes contraintes, ainsi l'EKAR devrait être un indicateur plus précis de la résistance du sciage. Les auteurs ont aussi comparé l'efficacité de plusieurs indicateurs de ces différents KAR : la valeur maximale, la valeur maximale entre les deux points d'appuis, la valeur moyenne, la valeur moyenne pondérée par le diagramme du moment fléchissant ou encore l'écart-type.


 FIGURE 1.22 – Résultats de la mise en correspondances des noeuds (Roblot *et al.* [50])

Oh *et al.* (2009) [39] ont défini un autre paramètre décrivant la nodosité appelé *knot depth ratio* (KDR) égal au rapport de l'épaisseur d'un noeud sur l'épaisseur du sciage et défini selon l'équation 1.25.

$$KDR = \frac{t_{knot}}{t} \quad (1.25)$$

Le calcul de ce paramètre repose sur l'hypothèse que les masses volumiques des noeuds et du bois sain sont constantes. Comme évoqué précédemment, les rayons X permettent d'avoir une mesure de la masse volumique de manière locale, ainsi dans une zone où sont présents des noeuds, la masse volumique peut s'exprimer comme une fonction du KDR et des masses volumiques du bois sain et des noeuds (equation 1.26). De cette équation, on peut alors tirer une valeur de KDR en tout point du sciage (equation 1.27).

$$\rho = \rho_{cw}(1 - KDR) + \rho_k KDR \quad (1.26)$$

$$KDR = \frac{\rho - \rho_{cw}}{\rho_k - \rho_{cw}} \quad (1.27)$$

où :

- KDR : le rapport entre l'épaisseur du noeud sur l'épaisseur du sciage,
- ρ : la masse volumique locale déterminée par rayons X,
- ρ_{cw} : la masse volumique du bois sain,
- ρ_k : la masse volumique des noeuds.

Les auteurs ont confronté les résultats de la prédiction du KDR obtenue par rayons X à une mesure manuelle (faisant office de référence) de ce même paramètre, ils ont montré que cette méthode avait tendance à légèrement surestimer le KDR mais donnait cependant

d'excellents résultats puisque le coefficient de détermination r^2 entre les deux KDR a une valeur proche de 0.9. Ils attribuent notamment cette différence au fait que les rayons X ne permettent pas de distinguer les noeuds des zones de transition entre les noeuds et le bois sain du fait de la faible variation de masse volumique entre ces deux zones. De plus la présence de fissure dans les noeuds joue aussi un rôle dans cette erreur de prédiction.

Une autre méthode d'estimation du KDR a été proposée (Jehl *et al.*, 2011 [28]). Le calcul est réalisé en définissant deux facteurs supplémentaires nommés f_1 et f_2 . Le premier représente la variabilité naturelle du bois sain (ρ_{cw}) observable à l'échelle d'un sciage (environ 15%). Le second désigne le rapport de proportionnalité entre la masse volumique des noeuds (ρ_k) et celle du bois sain.

La définition de ces deux facteurs permet de ne pas prendre en compte les variations de densité provenant d'autres sources que les noeuds. En effet le calcul du KDR en tout point n'est mené que si la masse volumique ρ est supérieure à $f_1 \times \rho_{cw}$. Le KDR est calculé dans ce cas selon l'équation 1.28. L'illustration de ce calcul est de plus présentée figure 1.23.

$$\begin{aligned}
 KDR &= 0 & \text{si } \rho < f_1 \times \rho_{cw} \\
 KDR &= \frac{\rho - \rho_{cw}}{f_2 \times \rho_{cw} - \rho_{cw}} & \text{si } f_1 \times \rho_{cw} < \rho < f_2 \times \rho_{cw} \\
 KDR &= 1 & \text{si } \rho > f_2 \times \rho_{cw}
 \end{aligned} \tag{1.28}$$

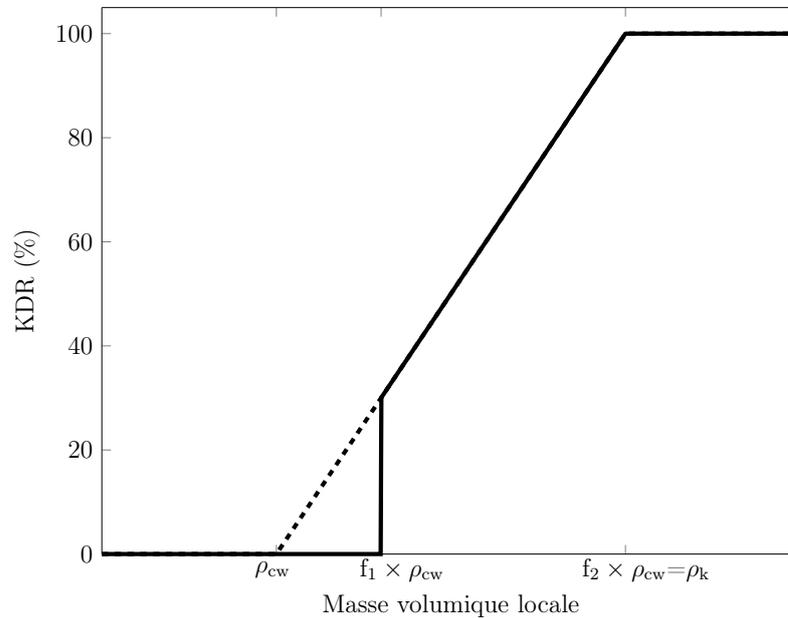


FIGURE 1.23 – Méthode de calcul du KDR (Jehl *et al.*, 2011 [28])

1.4.3.2 Mesure de la pente de fil

La mesure de la pente de fil est quant à elle possible sur les résineux grâce à l'effet trachéides. En effet il a été montré (Simonaho *et al.*, 2004 [56]) que lorsqu'un laser est projeté perpendiculairement à la surface du bois, une partie de la lumière diffusée remonte à la surface de la pièce, la tâche observée est alors plus grande que la tâche produite par le laser incident. Le plan x-y décrit sur la figure 1.24 est le plan sur lequel le laser est projeté et la pente de fil est décrite par le vecteur \vec{G} . Deux angles peuvent être distingués : α qui est l'angle défini par les fibres dans le plan x-y appelé pente de fil ainsi que l'angle β qui est l'angle formé entre le vecteur \vec{G} et sa projection dans le plan x-y par rapport à l'axe x, β est appelé angle de plongée. Ces deux angles sont décrits figure 1.24.

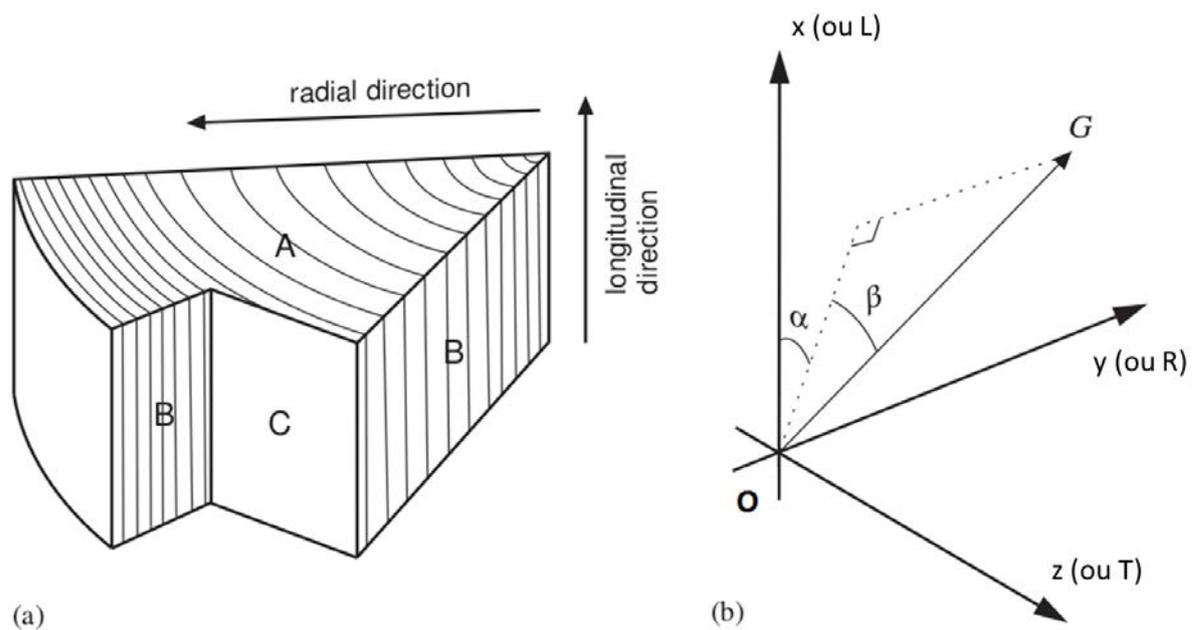


FIGURE 1.24 – La figure (a) représente les différents plans du bois : A, B et C sont respectivement les plans transversal, radial et tangentiel. La figure (b) définit quant à elle les deux angles mesurables par cette méthode : α l'orientation de la pente de fil et β l'angle de plongée. Le plan où est projeté le faisceau de laser est le plan x-y dans la figure (b) et correspond le plus souvent au plan B de la figure (a) [56].

Lorsque le laser est projeté à la surface d'un sciage, la tâche obtenue est non seulement différente mais dépendante de l'orientation des fibres ; si les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface observée la tâche est circulaire, au contraire si les fibres ne le sont pas, la tâche prend une forme d'ellipse, une propriété intéressante de cette ellipse est que son grand axe s'oriente parallèlement à la direction des fibres, l'orientation de l'ellipse ainsi obtenue permet de définir l'angle α défini précédemment. Ce phénomène est dû au rôle de guide optique joué par les parois et cavités cellulaires, qui ont pour effet d'étirer le motif de diffusion. L'angle de plongée β peut quant à lui être déterminé à partir

de la forme de l'ellipse, en effet lorsque la déviation de la pente de fil possède aussi une composante hors plan, cela entraîne une diminution du grand axe de l'ellipse, ainsi plus l'angle de plongée β sera grand plus l'ellipse se rapprochera d'une forme circulaire. Les conséquences de quatre différents cas de pente de fil sur la forme de l'ellipse observée sont décrites figure 1.25.

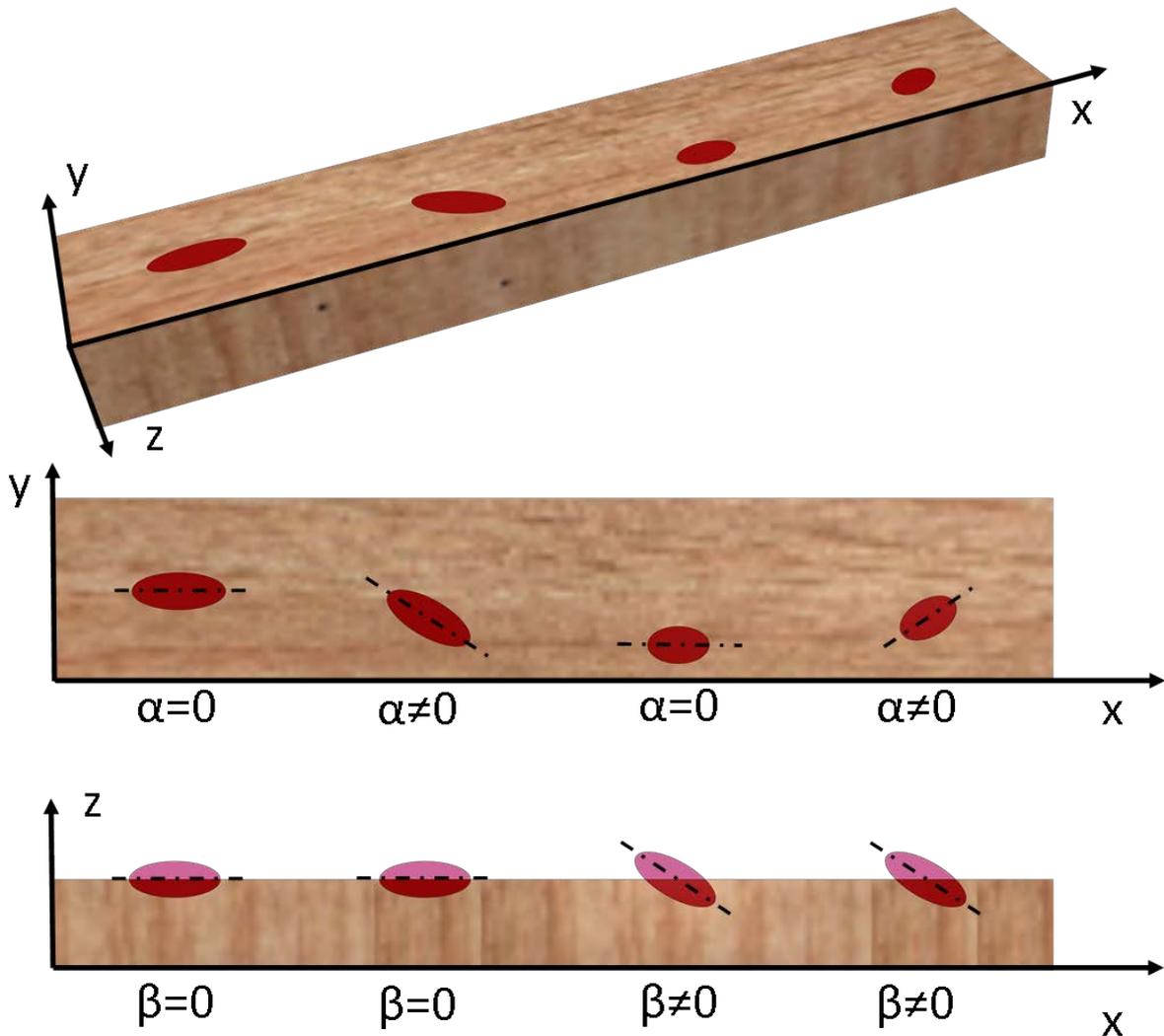


FIGURE 1.25 – Illustration des tâches de diffusion obtenus selon différents cas possibles d'orientation de la pente de fil [66].

En pratique la mesure de la pente de fil s'effectue en projetant sur la surface du sciage un faisceau de plusieurs lasers afin d'obtenir l'information sur la totalité de la largeur du sciage (voir figure 1.26).

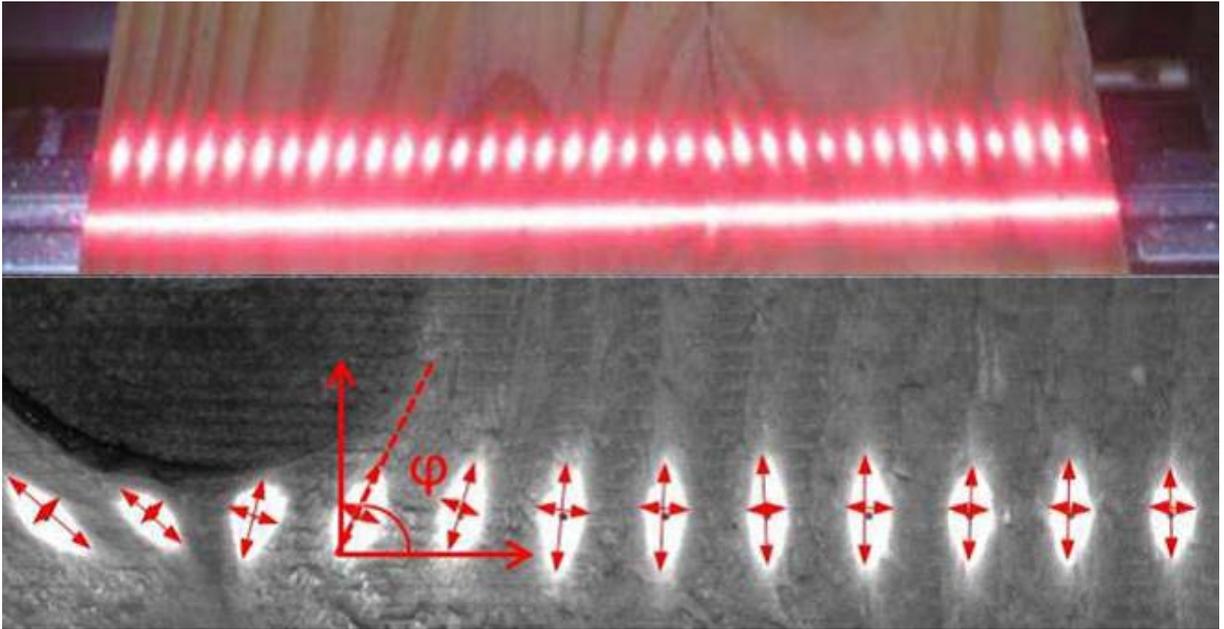


FIGURE 1.26 – Illustration de la mesure de la pente de fil grâce à un faisceau de plusieurs lasers (Scanner Luxscan)

1.4.4 Modèles de prédiction

1.4.4.1 Régression linéaire multiple

La régression linéaire multiple permet d'ajouter plusieurs paramètres à un modèle, on cherche alors à exprimer la valeur de sortie (la résistance par exemple) comme une fonction de différentes propriétés sous la forme de l'équation 1.29.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{1i} + \dots + \beta_p x_{pi} + \epsilon_i \quad (1.29)$$

Pour évaluer la qualité d'une régression linéaire simple, le coefficient de détermination est utilisé. Dans le cas de la régression linéaire multiple, les valeurs de r^2 ont tendance à augmenter avec le nombre de variables. C'est pourquoi il est préférable d'utiliser le coefficient de détermination ajusté (r_{ajust}^2), ce dernier est calculé grâce à l'équation 1.30, où n représente le nombre d'échantillons et p le nombre de variables.

$$r_{ajust}^2 = 1 - \frac{n-1}{n-p-1} (1 - r^2) \quad (1.30)$$

Une étude J-W.G. van de Kuilen (2002) [63] montre que la combinaison de plusieurs méthodes grâce à une régression linéaire multiple permet d'obtenir de meilleures corrélations avec la résistance en flexion. L'auteur montre que pour un r^2 est égal à 0.55 entre un module d'élasticité obtenu à partir d'une méthode vibratoire, la corrélation peut être

améliorée en intégrant dans le modèle la masse volumique ainsi que le module d'élasticité obtenu lors d'un essai de flexion avec cette fois un r^2 égal à 0.61.

Une autre étude (Piter *et al.*, 2004) [45], montre aussi que l'ajout de paramètres permettait d'améliorer légèrement le r^2 dans le cas de l'eucalyptus argentin. Ainsi les différentes valeurs de coefficients de détermination entre les différents paramètres et la résistance en flexion sont présentées dans le tableau 1.14.

| Technologies utilisées | r^2 MOR |
|---|-----------|
| module d'élasticité | 0.66 |
| Masse volumique | 0.21 |
| KAR | 0.19 |
| module d'élasticité + masse volumique | 0.66 |
| module d'élasticité + masse volumique + KAR | 0.67 |

TABLE 1.14 – Coefficient de détermination entre module de rupture estimé à l'aide de plusieurs méthodes et le module de rupture issu d'essais destructifs (Piter *et al.*, 2004) [45]

On voit ici que l'amélioration n'est pas très importante dans le cas de l'ajout de la masse volumique à la mesure du module d'élasticité, ce résultat illustre les limites de cette méthode, en effet si les variables que l'on ajoute au modèle sont trop fortement corrélées (ce qui est le cas entre le module et la masse volumique) l'amélioration peut être très faible.

Roblot *et al.* [50] ont évalué la prédiction du MOR par le calcul automatique du KAR en utilisant des régressions linéaires multiples et plus particulièrement, ils ont montré que l'ajout de ce paramètre à une mesure de module d'élasticité permettait d'améliorer la prédiction de la résistance en flexion. L'indicateur le plus efficace pour la prédiction de la résistance serait l'écart-type obtenu pour les valeurs de l'EKAR (c'est-à-dire celui calculé uniquement sur les bords du sciage et équivalent au margin KAR de la norme BS 4978 [9]). Les coefficients de détermination correspondant à ces améliorations pour les deux essences étudiées sont présentés dans le tableau 1.15.

| Paramètres | r^2 MOR | |
|-------------------------|-----------|---------|
| | Épicéa | Douglas |
| MOE méthode vibratoire | 0.41 | 0.58 |
| + Écart-type sur l'EKAR | 0.50 | 0.71 |

TABLE 1.15 – Apport du KAR sur le classement mécanique d'épicéa et de douglas [50]

Une autre étude (Brännström *et al.*, 2008 [7]) s'est intéressée à d'autres paramètres issus de mesure par laser pouvant prédire la résistance d'un sciage. Cette étude porte sur

du sapin (*picea abies*), ainsi les auteurs ont trouvé des coefficients de détermination r^2 égaux à :

- 0.43 entre la moyenne de l'excentricité de l'ellipse et la résistance,
- 0.28 entre la moyenne de la pente de fil et la résistance,
- 0.29 entre la surface moyenne de la tâche du laser et la résistance.

1.4.4.2 Réseau de neurones

Les réseaux de neurones sont utilisés pour approximer des fonctions inconnues à l'aide d'un ensemble de mesures de variables d'un processus (les données issues des différents technologies de classement machine dans notre cas) et du résultat du processus (la résistance en flexion d'un sciage par exemple). En supposant qu'il existe une relation entre ces variables et le résultat, il est possible d'obtenir une approximation de cette relation. L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'obtenir cette relation même si le nombre de mesures est fini, que ces mesures sont entachées d'incertitudes et que toutes les variables pouvant jouer un rôle dans le processus ne sont pas toutes mesurées. Un avantage de cette méthode par rapport à une régression linéaire multiple est qu'à nombre de données égales la précision obtenue est censée être meilleure. On peut notamment souligner que cette méthode possède un inconvénient majeur dans notre cas, elle ne repose que sur des principes statistiques et ne s'appuie aucunement sur des considérations mécaniques.

Les travaux sur l'approche par réseau de neurones ont été initiés en 1943, Mc Culloch et Pitts ont présenté la première notion de neurone formel, inspirée d'observations neurophysiologiques et anatomiques. Un neurone formel est en fait une fonction algébrique non linéaire dont la valeur dépend de paramètres appelés coefficients ou poids. Le plus souvent les neurones formels utilisés sont ceux pour lesquels la fonction f est une fonction non linéaire d'une combinaison linéaire des entrées, en d'autres termes, un neurone effectue une somme pondérée des entrées suivie d'une non-linéarité. Un neurone formel est représenté sur la figure 1.27, avec X_i les variables d'entrée, C_i les poids affectés à chaque entrée et Y la variable de sortie.

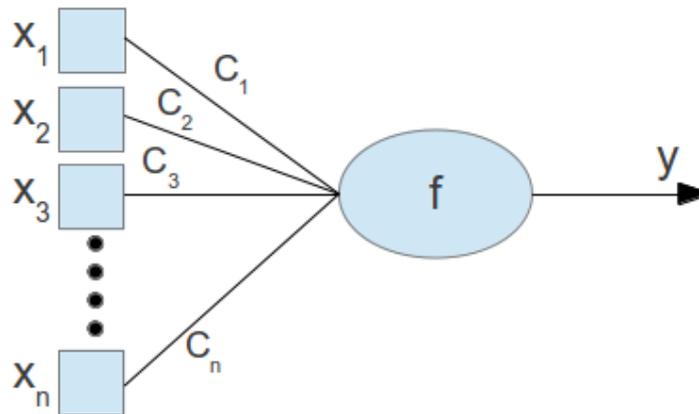


FIGURE 1.27 – Représentation schématique d'un neurone formel

Un réseau de neurones n'est en fait que l'association de plusieurs neurones formels. Ces réseaux peuvent être de deux types : on parle de réseau de neurones non bouclés ou de réseau de neurones bouclés. La principale différence entre ces deux types d'architecture de réseau est que dans le cas des réseaux non bouclés, l'information circule des entrées vers la sortie sans retour en arrière, ce qui n'est pas le cas pour les réseaux bouclés. Dans les deux cas, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs numériques sont calculées par algorithmes informatiques.

Une fois le choix de réseau effectué, il reste une étape importante dans l'utilisation des réseaux de neurones, c'est la phase d'apprentissage. C'est une procédure durant laquelle les différents poids associés aux variables d'entrées vont être modifiés. Cette modification est faite à partir d'exemples connus du problème à résoudre. La plupart des algorithmes d'apprentissage sont des algorithmes d'optimisation (méthode du gradient notamment) : ils cherchent à minimiser l'écart entre les réponses réelles et les réponses du réseau pour un jeu de variables d'entrées données. Ce processus est itératif, à la première itération les poids sont définis aléatoirement puis modifiés pas à pas jusqu'à l'obtention d'un compromis satisfaisant sur la précision de l'approximation sur l'ensemble des exemples réels fournis.

Très peu d'études se sont intéressées à l'utilisation des réseaux de neurones pour la prédiction des propriétés mécaniques. Cependant une étude réalisée par Mansfield *et al.* [36] montre que cette méthode donne des résultats satisfaisants pour prédire à la fois le MOE et le MOR. Les coefficients de détermination qu'ils obtiennent sont respectivement égaux à 0.75 et 0.56 pour le MOE et le MOR à partir de mesures d'angle de microfibrilles, de densité et d'humidité sur de l'Hemlock de l'Ouest. Esteban *et al.* [20] ont quant à eux utilisés un réseau de neurones pour prédire le MOE obtenant un coefficient de détermination égal à 0.75 sur du sapin.

1.4.4.3 Modèles de prédiction basés sur des principes mécaniques

Des études ont aussi été menées afin d'utiliser différentes singularités pour définir des propriétés mécaniques locales à intégrer dans des modèles pour prédire les propriétés mécaniques globales de sciages. Une de ces études (Olsson *et al.* 2013 [41]) utilise la mesure de l'orientation de la pente de fil sur les faces et les rives de sciages d'épicéa en utilisant l'effet trachéide pour décrire une variation locale du module d'élasticité. Par intégration de ces modules élastiques, sont calculés sur chaque section des profils de rigidités et une propriété indicatrice est déduite de ce profil. Le coefficient de détermination obtenu dans cette étude s'élèvent à 0.71 entre la propriété indicatrice et la résistance en flexion.

Une autre étude (Jehl *et al.*, (2011) [28]), s'est intéressée elle aussi à la définition de propriétés indicatrices à l'aide de mesure de masse volumique locale et de pente de fil. Les auteurs utilisent l'information de densité locale pour prendre en compte la nodosité du sciage en appliquant la méthode de calcul du KDR. Le modèle de détermination des propriétés indicatrices (IPs) repose sur la prise en compte de singularités servant à définir un sciage équivalent mécaniquement au sciage réel. Les propriétés mécaniques et géométriques de ce sciage équivalent dépendent des singularités mesurées. Ainsi le module d'élasticité local du sciage dépend de la masse volumique mesurée localement. Les singularités telles que la nodosité et la pente de fil sont quant à elles prises en compte comme une variation d'épaisseur du sciage (lui conférant une inertie variable). Dans cette étude la distinction est aussi faite entre la déviation de la pente de fil dans le plan du sciage (angle α) et l'angle de plongée (angle β). Le calcul de la propriété indicatrice repose ensuite sur la théorie des poutres et permet de calculer une propriété indicatrice du module d'élasticité et de la résistance à la rupture. En effet, connaissant le module d'élasticité et l'inertie de la poutre, il est possible de calculer la flèche de manière analytique et ainsi déduire à un module d'élasticité global. La qualité des corrélations obtenues entre MOE et MOR et ces propriétés indicatrices sont décrites tableau 1.16. Ce tableau montre aussi l'apport important de la mesure de la pente de fil à la prédiction des propriétés mécaniques. En effet, différents modèles ont été testés, le premier est basé sur l'utilisation seul d'un scanner à rayon X, le deuxième est la combinaison du premier avec la prise en compte de l'angle α et le troisième est la combinaison des deux premières avec l'ajout de l'angle de plongée β .

| Paramètres du modèle | r^2 | |
|-------------------------|-------|------|
| | MOE | MOR |
| RX | 0.68 | 0.61 |
| RX + α | 0.72 | 0.65 |
| RX + α + β | 0.72 | 0.69 |

TABLE 1.16 – Apport de la mesure de la pente de fil au classement mécanique par machine. Coefficients de détermination r^2 pour différents jeux de paramètres sur un lot d'épicéa (Jehl *et al.*, 2011) [28]

1.4.4.4 Comparatif des différentes méthodes d'estimation du MOR

Une étude a été menée dans le cadre d'un projet appelé Combigrade [25] et traitant de la combinaison de plusieurs méthodes pour le classement mécanique par machine. Les résultats de cette étude sont présentés dans le tableau 1.17, ainsi qu'un récapitulatif des différents coefficients de détermination obtenus lors des études présentées précédemment.

1.4. ESTIMATION NON-DESTRUCTIVE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

| Publication | Essence | Méthode | r^2 MOR |
|-------------------------------------|--------------------|--|-----------|
| van de Kuilen (2002) [63] | Feuillus tropicaux | $\rho + \text{MOE(EN408)}$ | 0.58 |
| Piter et al. (2004) [45] | Eucalyptus | $\rho + \text{MOE(EN408)}$ | 0.66 |
| | | $\rho + \text{MOE(EN408)+KAR (manuel)}$ | 0.67 |
| Roblot et al, (2010) [50] | Douglas | $\text{MOE(vibratoire)+KAR (auto)}$ | 0.71 |
| | Epicea | $\text{MOE(vibratoire)+KAR (auto)}$ | 0.5 |
| Jehl et al. (2011) [28] | Epicea | $\rho + \text{MOE(vibratoire)}$ | 0.58 |
| | | RX | 0.61 |
| | | RX+lasers | 0.69 |
| Olsson <i>et al.</i> 2013 [41] | Epicéa | $\text{MOE(vibratoire)+Lasers}$ | 0.71 |
| | | $\text{MOE(vibratoire)+KAR (manuel)}$ | 0.51 |
| VTT Combigrade (2005) [25] | Epicéa | $\text{MOE(flexion dynamique)+}\rho$ | 0.59 |
| | | $\text{MOE(flexion dynamique)+KAR(manuel)}$ | 0.63 |
| | | $\text{MOE(vibratoire)+RX}$ | 0.67 |
| | | $\rho + \text{KAR (manuel)}$ | 0.55 |
| | | $\text{MOE(vibratoire)+KAR (manuel)}$ | 0.73 |
| VTT Combigrade (2005) [25] | Pin | $\text{MOE(flexion dynamique)+}\rho$ | 0.72 |
| | | $\text{MOE(flexion dynamique)+KAR (manuel)}$ | 0.76 |
| | | $\text{MOE(vibratoire)+RX}$ | 0.8 |
| | | $\rho + \text{KAR (manuel)}$ | 0.7 |
| | | $\text{MOE(vibratoire)+KAR (manuel)}$ | 0.73 |
| Brännström et al. (2008) [7] | Sapin | Lasers | 0.43 |
| Johansson et al. (1992) [29] | Epicéa | $\text{MOE} + \text{KAR}$ | 0.73 |
| Hoffmeyer (1984) [26] | Epicéa | $\text{MOE} + \text{KAR}$ | 0.58 |
| Hoffmeyer (1990) [27] | Epicéa | $\text{MOE} + \text{KAR}$ | 0.64 |
| Fonselius et al. (1997) [21] | Epicéa | $\text{MOE} + \text{KAR}$ | 0.68 |
| Mansfield <i>et al.</i> (2007) [36] | Hemlock | $\rho + \text{MFA}$ | 0.56 |

TABLE 1.17 – Coefficient de détermination entre module de rupture estimée à l'aide de plusieurs méthodes et module de rupture issu d'essais destructifs pour différentes études

1.4.5 Conclusion sur la prédiction des propriétés mécaniques

Cette partie a mis en évidence que la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques était fortement dépendante de l'essence, du lot de sciage étudié, de la propriété à prédire et de la méthode d'analyse utilisée. En effet, concernant la masse volumique et le module d'élasticité, des méthodes existent et possèdent une très bonne précision. Dans le cas de la masse volumique, il est possible de la mesurer de manière locale à des cadences industrielles. Pour ce qui est de la mesure de module d'élasticité, il a été montré que son estimation par des méthodes vibratoires ou ultrasonores donne de très bons résultats (r^2 allant de 0.57 à 0.91) et ce quelque soit les essences. Les méthodes ultrasonores semblent cependant donner de moins bons résultats que les méthodes vibratoires. Ces mesures permettent aussi de prédire avec une plus ou moins bonne précision la résistance à la rupture en se basant sur la corrélation intrinsèque propre à chaque essence entre MOE et MOR. Enfin des méthodes d'estimation du MOR de manière non-destructive ont aussi été

présentées utilisant l'intégration de certaines singularités dans différents types de modèle. Dans ce cas les résultats sont extrêmement variables entre les différentes essences et études présentées. En effet, les coefficients de détermination varient de 0.5 à 0.8. Ce qui ressort cependant de ces études est que la mesure de paramètres supplémentaires permet une prédiction plus précise de la rupture.

Les méthodes basées sur la mesure de singularités locales présentent de plus un autre intérêt que leur supposé meilleure précision. En effet, le caractère local peut permettre de déduire des propriétés mécaniques sur des parties spécifiques de sciages. Par exemple ces mesures peuvent être utilisées pour la détection de défaut dans une optique de fabrication de bois reconstitué afin d'opérer au tronçonnage des parties faibles avant aboutage. De la même manière, ces modèles de prédiction pourraient être utilisés pour étudier l'influence de la refente de produits en bois dans le sens longitudinal. En effet, la mesure locale des singularités des sous produits de la refente peut être obtenu de manière aisée à partir de l'acquisition de ces données sur le produit entier. L'influence du processus de refente a peu été étudié et fait l'objet de la partie suivante.

1.5 Refente du bois lamellé-collé

Pour fabriquer du bois lamellé collé de faible largeur ($<100\text{mm}$), les fabricants, pour des questions de productivité ont souvent recours à la refente longitudinale de poutres plus larges. Deux (refente simple) ou trois poutres (refente double) sont obtenues, ce qui permet notamment d'économiser du temps de fabrication (collage, pressage, etc). Les deux (ou trois) pièces ainsi obtenues peuvent cependant avoir des propriétés mécaniques différentes de la poutre initiale. Une étude (Riberholt et Crocetti [48]) a été menée pour évaluer cette évolution des propriétés mécaniques. Cette étude est basée sur les résultats de deux campagnes expérimentales :

- la première réalisée à partir de 30 poutres de section $225 \times 90 \text{ mm}^2$ fabriquées à partir de lamelles extérieures de section $45 \times 90 \text{ mm}^2$ possédant une résistance à la traction égale à 18 MPa, il s'agit ici de poutres de classe GL28. Parmi ces 30 poutres, 10 ont été refendues pour obtenir 20 poutres de sections $40 \times 225 \text{ mm}^2$. Il a été montré que la résistance à la flexion caractéristique $f_{m,k}$ des poutres refendues était inférieure de 2.9 MPa et leur module d'élasticité moyen $E_{m,l}$ de 300 MPa,
- la deuxième, réalisée à partir de 24 poutres de sections $180 \times 90 \text{ mm}^2$ fabriquées à partir de lamelles de sections $45 \times 90 \text{ mm}^2$ possédant une résistance à la traction égale à 22 MPa, il s'agit ici de poutres de classe GL30. Parmi ces 24 poutres, 8 ont été refendues pour obtenir 16 poutres de sections $40 \times 180 \text{ mm}^2$. Dans ce cas-là, la résistance à la flexion caractéristique $f_{m,k}$ des poutres refendues était inférieure de 0.8 MPa et leur module d'élasticité moyen $E_{m,l}$ de 600 MPa. Les résultats de cette

deuxième campagne d'essais sont présentés figure 1.28. Concernant la résistance, il semble qu'elle soit en moyenne plus forte pour les poutres refendues mais avec une variabilité beaucoup plus importante ce qui cause alors la diminution observée en valeur fractile.

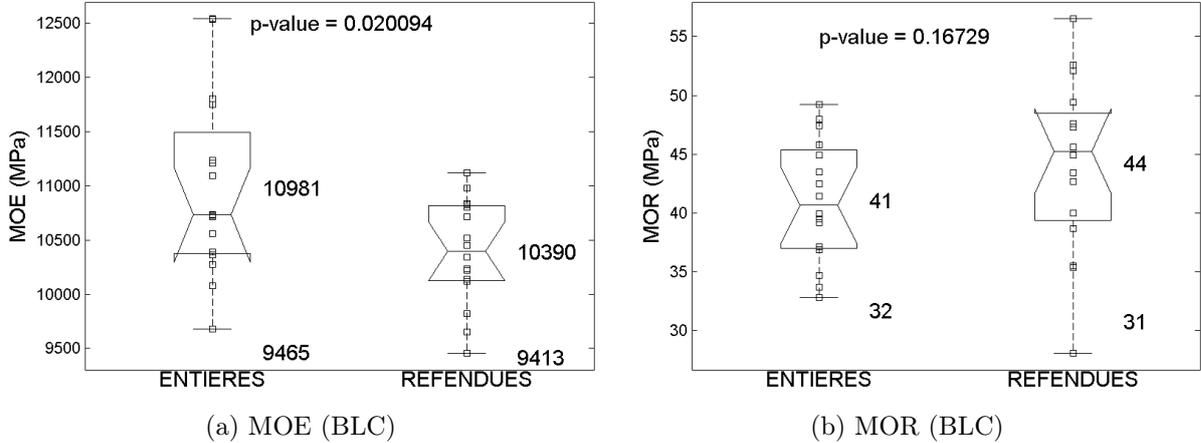


FIGURE 1.28 – Propriétés mécaniques de poutres entières et de poutres refendues (qualité initiale GL30) [48].

A partir de ces résultats, les auteurs ont proposé des formules reliant la résistance à la flexion des poutres refendues et la résistance à la traction des lamelles extérieures de la poutre entière. L'élaboration de ces formules a donné lieu à l'intégration dans la norme EN14080 de formules permettant le calcul de la résistance à la flexion de poutres refendues (équation 1.31 et 1.32).

$$f_{m,s,k} = f_{m,g,k} - \frac{96}{f_{t,0,l,k} - 6} + 4 \quad \text{pour la simple refente} \quad (1.31)$$

$$f_{m,s,k} = f_{m,g,k} - \frac{96}{f_{t,0,l,k} - 6} \quad \text{pour la double refente} \quad (1.32)$$

Avec :

- $f_{m,s,k}$ la valeur caractéristique de résistance en flexion de la poutre refendue,
- $f_{m,g,k}$ la valeur caractéristique de résistance en traction de la poutre entière,
- $f_{t,0,l,k}$ la valeur caractéristique de résistance en traction des lamelles extérieures.

Le module d'élasticité moyen parallèle aux fil $E_{0,s,moyen}$ du bois lamellé-collé refendu doit être déterminé à partir du module d'élasticité moyen $E_{0,g,moyen}$ du bois lamellé-collé entier par l'équation 1.33.

$$E_{0,s,moyen} = E_{0,g,moyen} - 500 \quad (1.33)$$

Ces formules sont de plus applicables à deux conditions :

- la résistance caractéristique à la traction de la lamelle doit être supérieure à 18 MPa et inférieure ou égale à 30 MPa,
- la résistance à la traction des lamelles intérieures doit être inférieure de 8 MPa au maximum à la résistance caractéristique à la traction des lamelles extérieures en cas de bois lamellé-collé panaché.

Les limitations sur l'application de ces formules sont problématiques dans le cas de la France puisque les lamellistes français pratiquent la refente de poutre de qualité GL24. De plus, les essais ont été effectués sur des poutres de section initiale faible et il apparaît nécessaire d'évaluer l'effet de la section initiale sur l'influence du processus de refente.

1.6 Conclusion de la synthèse bibliographique

Ce premier chapitre a permis de montrer que le comportement mécanique du bois était très complexe. Cette complexité s'explique en partie par la présence de nombreux facteurs influençant les propriétés mécaniques. L'origine de ces facteurs repose sur la nature vivante de l'arbre, ainsi selon les conditions de sylviculture, les propriétés mécaniques peuvent varier. De plus le matériau bois possède des singularités héritées de la croissance de l'arbre dont il est issu, ces singularités peuvent être réparties de manière très différentes entre les sciages. Toutes ces considérations entraînent que le comportement mécanique d'un sciage est très difficile à évaluer.

Le fait qu'il est impossible à l'heure actuelle de garantir les propriétés mécaniques d'un sciage avec précision représente un problème pour leur utilisation en structure. C'est pourquoi tout un cadre normatif a été développé, objet d'une partie de ce premier chapitre, pour assurer au concepteur un certain degré de fiabilité en accord avec les règles de calcul de l'Eurocode 5. Il a été montré que ce classement par machine résulte du réglage de seuils sur un lot de calibrage pour garantir trois propriétés fondamentales que sont : la valeur du fractile à 5% du MOR, la masse volumique et le module d'élasticité moyen.

Une partie de ce chapitre a donc été consacré à l'état de l'art concernant la prédiction de ces trois propriétés de manière non-destructive. Cette partie a montré que la prédiction de la masse volumique et du module d'élasticité sont de très bonne qualité indépendamment des essences, par contre l'estimation du module à rupture est quant à elle beaucoup moins aisée. Cette estimation est généralement basée sur la corrélation plutôt bonne entre MOE et MOR, cependant cette corrélation pour certaines essences plus hétérogènes ne permet pas une prédiction acceptable, c'est pourquoi de nombreuses études se sont intéressées à la mesure de singularités du matériau bois pour les intégrer dans des modèles de prédictions. Ces études donnaient des résultats très différents selon les méthodes employées, les essences étudiées et le lot de sciages testé.

Chapitre 2

Contrôles non destructifs et modèles de prédiction des propriétés mécaniques

2.1 Introduction

Notre étude vise notamment à augmenter l'efficacité du classement des sciages en améliorant la prédiction de leurs propriétés mécaniques. Cette amélioration passe en partie par l'ajout de paramètres mesurés par des machines de classement dans des modèles de prédiction. Ces paramètres peuvent aussi être issus de données sylvicoles. L'avantage des données sylvicoles est qu'elles sont beaucoup moins onéreuses que l'installation (et le développement dans le cas précis du bois juvénile) de capteurs. La traçabilité de ces différentes informations de l'abattage jusqu'à la production du sciage semble parfaitement réalisable dans un contexte industriel (par l'implantation de puces RFID dans les grumes par la tête d'abattage par exemple) [62]. Un des objectifs de cette partie sera de quantifier l'apport des données sylvicoles dans l'amélioration des modèles de prédiction en comparaison à celui apporté par différents capteurs de mesure.

L'étude porte sur trois essences différentes : le chêne, le douglas et l'épicéa. Dans un premier temps, la composition des lots sera décrite. Dans un second temps, les différents contrôles non-destructifs menés sur les trois lots seront détaillés. La troisième partie sera consacrée à la présentation des différentes grandeurs relevées et à leur analyse statistique. Enfin, différents modèles de prédiction des propriétés mécaniques seront détaillés.

2.2 Composition des différents lots de l'étude

Initialement, la taille des lots devait être de 900 sciages de douglas et de 450 pour le chêne et l'épicéa afin de permettre l'homologation de machines. De plus les sections choisies sont parmi les plus couramment utilisées. Suite à différents problèmes lors des différents tests menés (destructifs ou non), les lots ont été diminués afin de disposer des

mêmes informations pour chaque sciage. Il n'en reste pas moins que la taille des lots reste conséquente et suffisante pour leur analyse à des fins de classement par machine. Ces lots vont maintenant être décrits.

2.2.1 Chêne

Les sciages composant le lot de chêne ont été fournis par la société Ducerf. Le lot est composé de 400 pièces de longueurs 3m réparties en deux sections différentes, 40x100mm² et 50x150mm². Un des objectifs de ce travail étant la valorisation de bois de qualité "secondaire", une partie du lot est dit de qualité "traverse", qui est de moins bonne qualité par rapport à la seconde partie du lot de qualité "charpente".

| Section (mm) | Longueur (mm) | Qualité fournisseur | Nombre de sciages |
|--------------|---------------|---------------------|-------------------|
| 40x100 | 3 000 | Traverse | 127 |
| 40x100 | 3 000 | Charpente | 135 |
| 50x150 | 3 000 | Traverse | 138 |
| | | Total | 400 |

TABLE 2.1 – Composition du lot en chêne, la dénomination de la qualité est celle utilisée par les fournisseurs.

Certaines informations concernant la provenance des différents sciages sont également disponibles telles que la longueur de la grume initiale, son diamètre médian ainsi qu'une information sur la localisation verticale du sciage dans la grume (sciage provenant de la bille de pied ou d'une surbille). A noter que les sciages de qualité charpente sont tous issus de la bille de pied. Les informations sylvicoles ont directement été fournies par la société Ducerf lors de l'échantillonnage.

2.2.2 Douglas

Les sciages composant le lot de douglas ont été fournis par les sociétés Monnet-Sève et Piveteau. Le lot est composé de 805 pièces de longueur 4m réparties en trois sections différentes, 40x100mm², 50x150mm² et 65x200mm². Différentes informations sylvicoles sur les sciages ont été collectées telles que : l'âge de l'arbre, la localisation verticale du sciage dans le billon et la distance du sciage par rapport à la moelle. Ces données sylvicoles ont été collectées par le Lerfob lors de l'échantillonnage du lot sur le parc à grumes.

| Section (mm) | Longueur (mm) | Nombre de sciages |
|--------------|---------------|-------------------|
| 40x100 | 4 000 | 235 |
| 50x150 | 4 000 | 278 |
| 65x200 | 4 000 | 292 |
| | Total | 805 |

TABLE 2.2 – Composition du lot de douglas.

2.2.3 Epicéa

Les sciages composant le lot d'épicéa ont été fournis par la société Monnet-Sève. Le lot est composé de 437 pièces de longueur 4m répartis en trois sections différentes, 40x100mm, 50x150mm et 65x200mm.

| Section (mm) | Longueur (mm) | Nombre de sciages |
|--------------|---------------|-------------------|
| 40x100 | 4 000 | 137 |
| 50x150 | 4 000 | 150 |
| 65x200 | 4 000 | 150 |
| | Total | 437 |

TABLE 2.3 – Composition du lot d'épicéa.

Dans le cas de l'épicéa, aucune donnée sylvicole n'a été relevée, le lot est issu directement de la production courante du fournisseur.

2.3 Données sylvicoles du lot de douglas

Différentes informations ont été collectées par le Lerfob lors de l'échantillonnage du lot de douglas. En particulier l'âge des arbres a été mesuré en comptant le nombre de cernes sur le gros bout de chaque grume, le diamètre à 1.3m (Dbh) a lui aussi été mesuré. De plus, les localisations verticales et radiales des sciages dans les grumes ont été référencées.

2.3.1 Localisation verticale des sciages

Concernant la localisation verticale des sciages, chaque grume a été billonnée à 4m et a reçu un numéro unique permettant de l'identifier, et chaque billon une lettre (A, B, C ou D) représentant sa hauteur dans l'arbre. Ainsi, en se basant sur l'hypothèse que l'abattage s'est fait à 50 cm du sol (hauteur de souche moyenne):

- les fins bouts des billons A se situent à une hauteur d'environ 4.5 m depuis le sol,

- les fins bouts des billons B se situent à une hauteur d'environ 8.5 m depuis le sol,
- les fins bouts des billons C se situent à une hauteur d'environ 12.5 m depuis le sol,
- les fins bouts des billons D se situent à une hauteur d'environ 16.5 m depuis le sol.

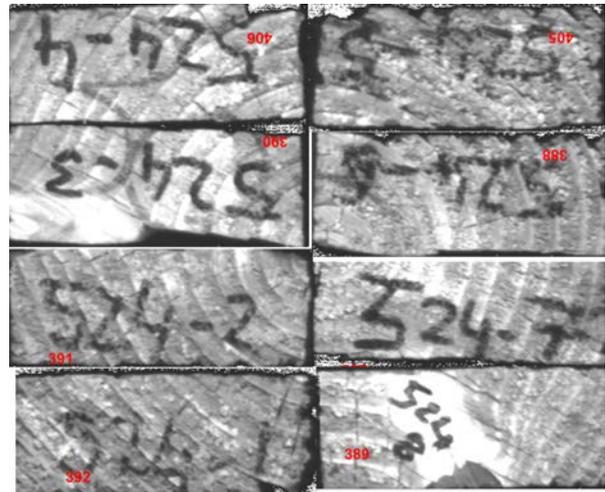
L'information d'appartenance d'un sciage à un billon a enfin été conservée permettant de donner la localisation verticale des sciages dans la grume initiale.

2.3.2 Localisation radiale des sciages

Au fin bout de chaque billon, une cible colorée permettant le repérage spatial des sciages a été réalisée. La mire était positionnée sur la moelle et deux codes couleurs ont été réalisés afin d'éviter le plan de symétrie lors du repositionnement des sciages dans les billons (partie (a), figure 2.1). Le tableau 2.4 donne les distances relatives à chaque anneau de couleur.



(a) Cible colorée réalisée au fin bout des billons



(b) Billon reconstitué

FIGURE 2.1 – Repérage de la localisation radiale des sciages

| Couleur | | Distance moelle-sciage (mm) | |
|---------|-------|-----------------------------|-----------|
| Axe 1 | Axe 2 | intérieur | extérieur |
| | | 30 | 50 |
| | | 80 | 100 |
| | | 130 | 150 |
| | | 180 | 200 |

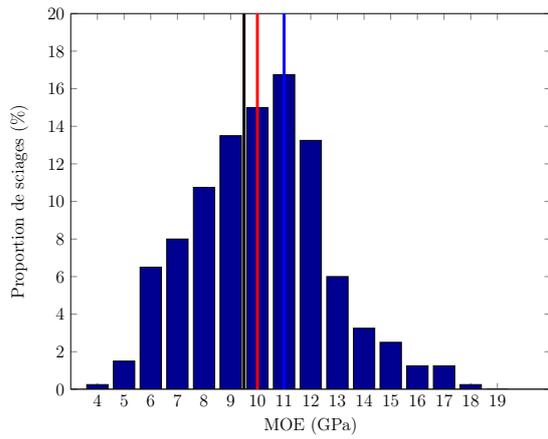
TABLE 2.4 – Descriptif des codes couleurs utilisés pour les mires et les distances à la moelle relative à chaque couleur

Les valeurs de ce tableau permettent donc de donner une valeur approximative de la distance moelle-sciage. il a été choisi d'utiliser l'information d'appartenance de chaque sciage à un billon pour le reconstituer à partir d'images prises du bout des sciages. Ces photos et la reconstitution d'un billon sont montrées dans la partie (b) de la figure 2.1. Il est alors possible de déterminer la position du centre du sciage par rapport à la moelle de manière plus précise. C'est cette valeur qui sera utilisée dans l'analyse qui va suivre.

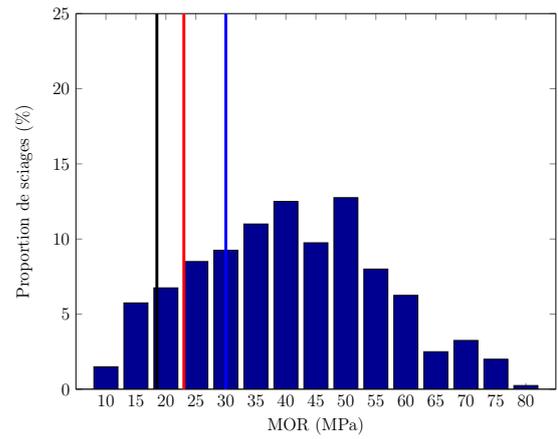
2.4 Tests destructifs

Tous les sciages ont été testés de manière destructive par FCBA selon l'EN408. Les valeurs obtenues ont toutes été corrigées à partir de la norme EN384. Les résultats de ces essais destructifs concernant le module d'élasticité et la résistance à la flexion pour les trois essences étudiées sont présentés figure 2.2. Sur ces figures sont présentés les histogrammes de module d'élasticité ou de résistance des différents lots de sciages. L'analyse des résultats destructifs sera détaillée par la suite, mais il peut d'ores et déjà être remarqué qu'en terme de module d'élasticité, le lot de douglas et de chêne présente des résultats assez proches et très supérieurs à ceux du lot d'épicéa. Concernant la résistance à la flexion, les résultats sont beaucoup plus disparates selon les essences avec cependant une proportion de sciages de plus faible résistance plus importante dans le cas de l'épicéa et une proportion de sciages possédant une résistance plus importante dans le cas du chêne.

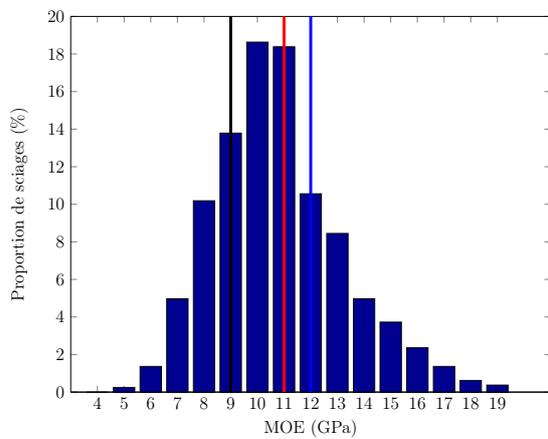
CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES



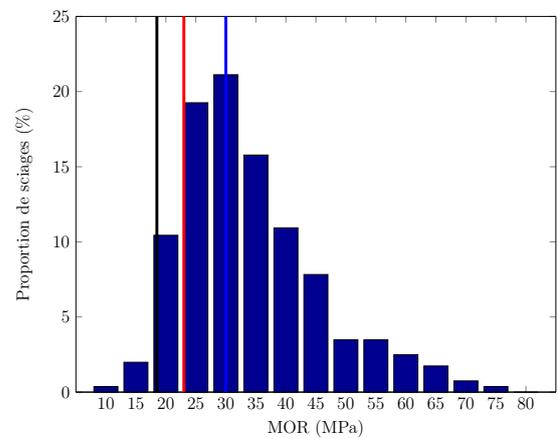
(a) MOE chêne



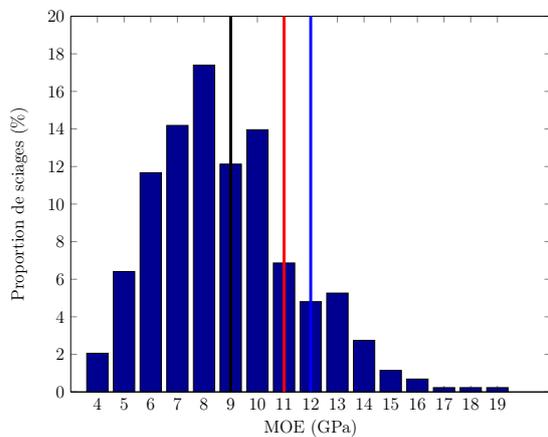
(b) MOR chêne



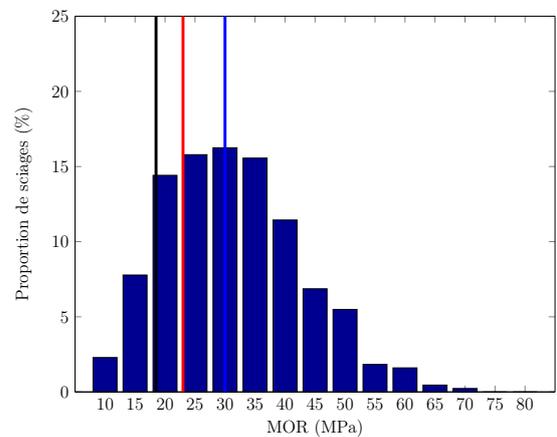
(c) MOE douglas



(d) MOR douglas



(e) MOE épicéa



(f) MOR épicéa

FIGURE 2.2 – Répartition des sciages selon leurs module d'élasticité et module à rupture obtenus lors des essais destructifs. Les lignes verticales représentent les bornes des classes C18 (ou D18) en noir, C24 en rouge (ou D24) et C30 (ou D30) en bleu.

2.5 Contrôles non destructifs

Sur les trois lots, une campagne de caractérisation par des tests non-destructifs a été menée. Chaque sciage a ainsi été testé à l'aide de plusieurs appareils :

- hygromètre à pointes pour la mesure de l'humidité,
- balance manuelle pour la détermination de la masse volumique,
- Sylvatest : appareil permettant l'estimation du module d'élasticité basé sur le temps de parcours d'une onde ultrasonore,
- E-Scan : dispositif utilisé dans l'industrie pour estimer le module d'élasticité par des méthodes vibratoires pendant le convoyage du sciage sur la ligne de production,
- E-Control : machine fonctionnant sur le même principe physique que l'E-Scan mais utilisée ici dans sa version portable, elle se compose d'un marteau et d'un microphone et permet de faire entrer le sciage dans différents modes de vibration,
- MTG : machine fonctionnant sur le même principe physique que l'E-Scan et l'E-Control mais en version portative,
- CombiScan+ : scanner optique permettant l'acquisition d'images des quatre faces du sciage puis leurs traitements pour la détection de différents défauts. Le scanner est aussi équipé d'une source Rayons X permettant la mesure d'une cartographie de masse volumique (figure 2.4) et de lasers points pour la détection de la pente de fil,
- enfin, lors du passage des sciages sur l'E-Scan, une caméra a été installée afin de capturer automatiquement une photo de l'extrémité du sciage afin de repérer la position de la moelle ou de la déterminer après analyse.

Les différentes grandeurs mesurées sont décrites dans la partie suivante.

2.5.1 Mesure du taux d'humidité

Une mesure du taux d'humidité a été réalisée sur les pièces composant les différents lots. Cette mesure a été effectuée à l'aide d'un hygromètre à pointe par FCBA durant la campagne d'essais destructifs. L'objectif de cette étape est de ramener les valeurs des propriétés mécaniques à celles qu'elles auraient à un taux d'humidité des sciages égal à environ 12% conformément aux préconisations normatives. Les différents lots ont tous subit au préalable un séchage (objectif de 12%) par les partenaires industriels. La qualité du séchage a été vérifié et une valeur moyenne d'humidité des sciages égal à 11.45%, 11.3% et 13.7% a été relevée respectivement dans le cas du douglas, de l'épicéa et du chêne.

2.5.2 Mesure de masse volumique

2.5.2.1 Mesure automatique et pesée manuelle

Le scanner optique permet la mesure précise des trois dimensions du sciage, la longueur, la hauteur et l'épaisseur. Par rapport à une mesure classique, l'avantage de cette méthode est le calcul de valeurs moyennes sur l'ensemble du sciage. En ajoutant à cette mesure une pesée manuelle, la masse volumique peut alors être calculée de manière précise.

2.5.2.2 Utilisation d'une source rayons X

La source rayon X est implantée dans le scanner optique CombiScan+ et une relation linéaire existe entre le niveau de gris relevé après le passage du faisceau X et la masse volumique. En effet comme décrit au chapitre 1 la masse volumique peut être déterminée grâce à l'équation 2.1.

$$\rho = \frac{1}{\mu t} \log\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (2.1)$$

Le paramètre μ représentant l'absorbance du matériau pour la longueur d'onde du rayonnement X utilisé. Cette absorbance est considérée constante pour un lot de sciage donné et pour un réglage défini de la source rayons X. L'épaisseur des sciages ainsi que leur humidité sont également supposées constantes. En faisant l'hypothèse que l'image obtenue par transmission des rayons X ne présente de saturation ni dans le noir, ni dans le blanc (un réglage approprié de la puissance de la source des rayons X doit donc être effectué au préalable), le niveau de gris relevé sur l'image est directement proportionnel à l'intensité de l'onde transmise. Il est alors possible de réécrire l'équation 2.1 sous la forme d'une relation affine entre la masse volumique et le logarithme des niveaux de gris. (equation 2.2). Ainsi, la mesure de la masse volumique locale ne nécessite plus que l'identification des deux paramètres a et b.

$$\rho \times t = a \times \ln(\text{niveau de gris}) + b \quad (2.2)$$

Grâce à une mesure de masse volumique par pesée et à la valeur de l'épaisseur de chaque sciage d'une part et en calculant la moyenne des logarithmes des niveaux de gris sur l'ensemble de l'image des différentes planches d'autre part, les constantes a et b sont alors égales aux coefficients de la droite de régression entre ces deux valeurs. L'identification de ces deux paramètres est représentée sur la figure 2.3.

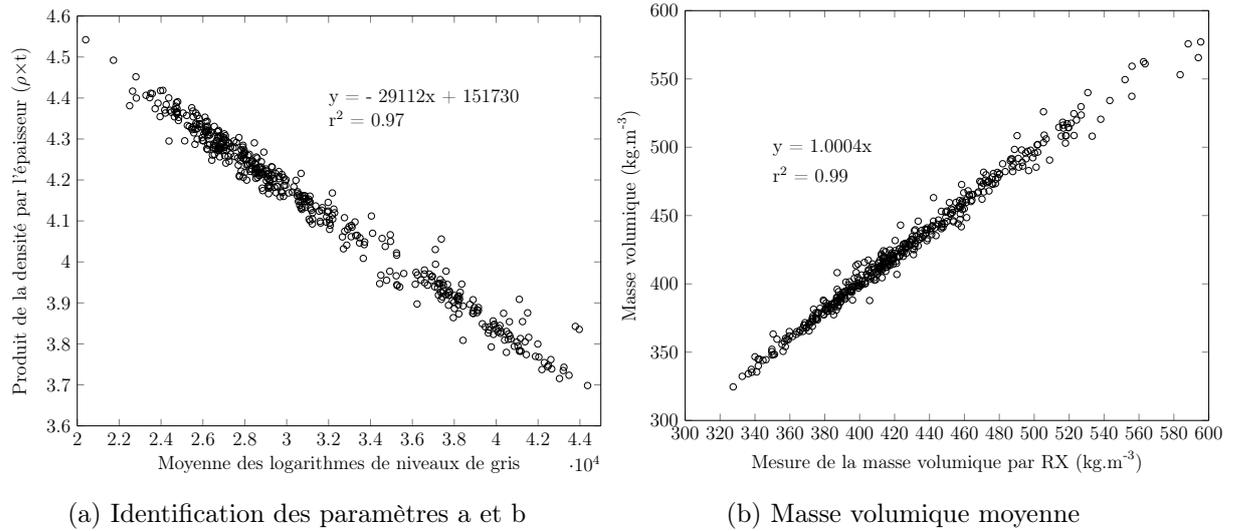


FIGURE 2.3 – Mesure de masse volumique par rayons X

Ainsi, sur l'ensemble du sciage l'information de masse volumique est disponible de manière locale (en chaque point de l'image, la valeur de niveau de gris est interprétée en terme de masse volumique). La valeur fournie localement représente la valeur moyenne de la masse volumique sur toute l'épaisseur du sciage. Un exemple de la cartographie de masse volumique d'un sciage est présentée figure 2.4.

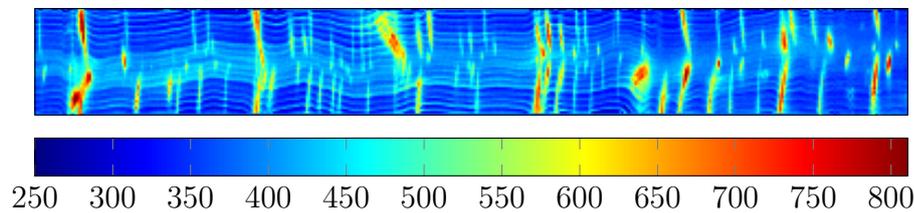


FIGURE 2.4 – Exemple de cartographie de la masse volumique d'un sciage d'épicéa

2.5.3 Mesure de module d'élasticité

Le module d'élasticité a été mesuré à partir de 4 méthodes utilisant des principes physiques différents afin de comparer leur justesse selon l'essence considérée.

2.5.3.1 Méthode ultra sonore

2.5.3.1.1 Mesure à l'aide du Sylvatest

Le Sylvatest permet la mesure du module d'élasticité en se basant sur le temps de parcours d'une onde ultrasonore le long d'un sciage. Il est composé de deux sondes : un émetteur et un récepteur. Chacune des sondes est positionnée aux extrémités du sciage (voir figure 2.5) et le temps de parcours de l'onde est mesuré. En connaissant la masse

volumique moyenne du sciage, le calcul du module d'élasticité est donné par l'équation 2.3.

$$MOE_{sylvatest} = \rho * \left(\frac{L}{t}\right)^2 \quad (2.3)$$

Où :

- $MOE_{sylvatest}$: module d'élasticité estimé,
- ρ : masse volumique,
- L : longueur du sciage,
- t : temps de parcours de l'onde ultrasonore.

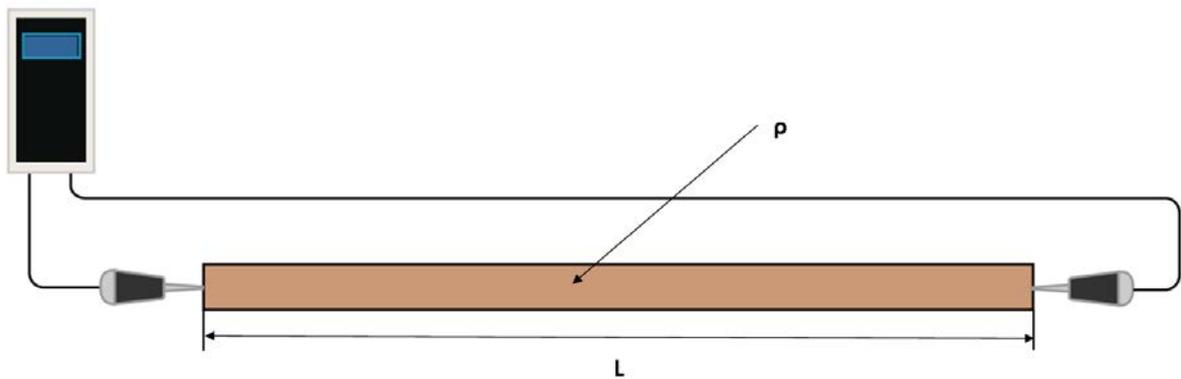


FIGURE 2.5 – Utilisation du sylvatest

2.5.3.2 Méthodes vibratoires

2.5.3.2.1 Mesure à l'aide de l'E-scan

L'E-scan est un appareil de classement mécanique de la société LuxScan Technologies (groupe Weinig) permettant l'estimation du module d'élasticité par des méthodes vibratoires (figure 2.6). Il est composé d'un marteau et d'un vibromètre laser (composé d'un laser et d'un interféromètre permettant de mesurer le déplacement en utilisant l'effet Doppler). Pendant le convoyage du sciage, le marteau vient frapper l'extrémité du sciage de manière à le faire entrer en vibration. Le vibromètre laser permet d'acquérir le signal temporel de la vibration de compression longitudinale induite par le choc du marteau. L'analyse de ce signal temporel par transformée de Fourier permet de connaître la fréquence du mode de vibration correspondant. Le module d'élasticité peut alors être calculé grâce à l'équation 2.4.

$$MOE_{E-scan} = 4 \times \rho \times f^2 L^2 \quad (2.4)$$

Où :

- MOE_{E-scan} : module d'élasticité estimé,
- ρ : masse volumique,
- f : fréquence du mode de vibration,
- L : longueur du sciage.

Il est à noter que c'est lors du passage des sciages sur l'E-Scan que les photos des extrémités des sciages (utilisées pour la détermination de la distance sciage/moelle) ont été prises de manière automatique. Le matériel a été mis à disposition par le LE2I. L'objectif était de comparer les valeurs calculées manuellement par la reconstitution des billons et les résultats d'un algorithme d'analyse d'image pour le calcul de la distance par rapport à la moelle à partir de la détection de l'orientation des cernes sur l'extrémité des sciages.

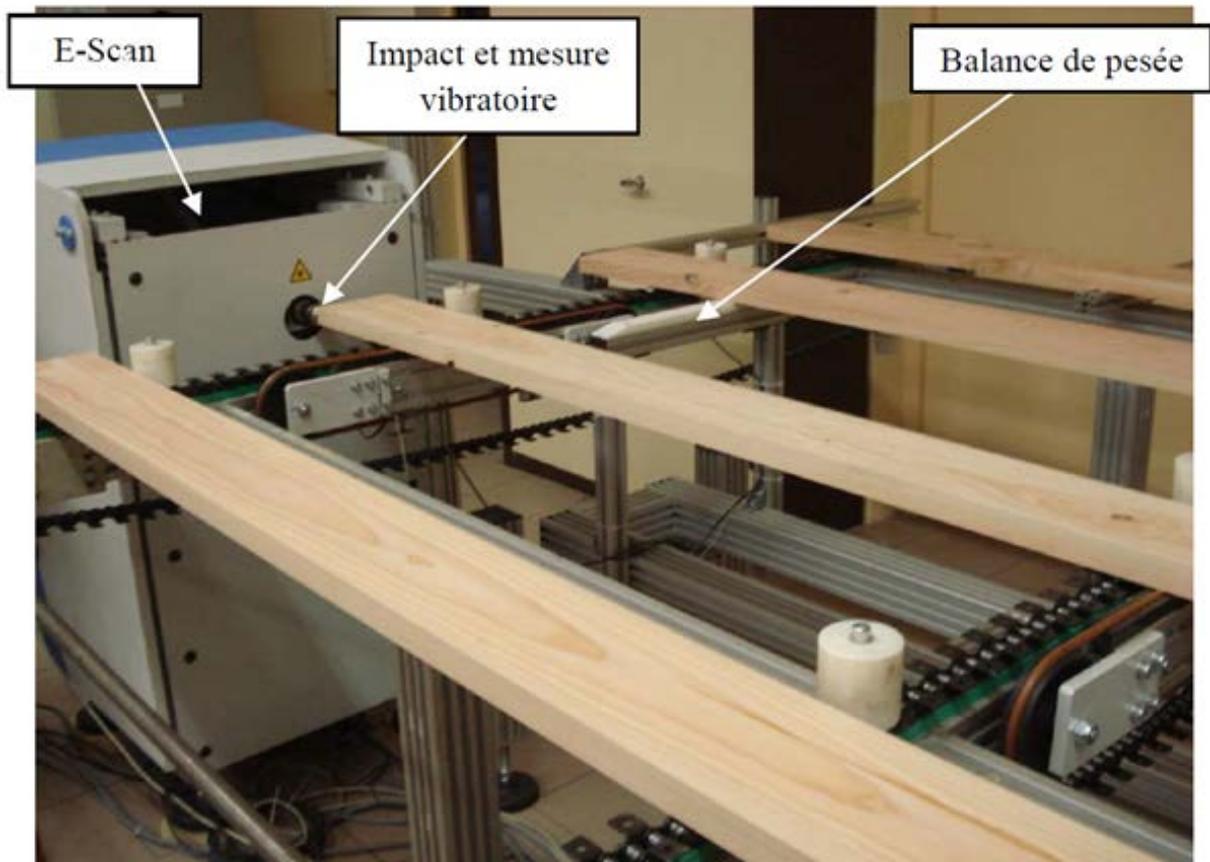


FIGURE 2.6 – Photographie de l'E-scan

2.5.3.2.2 Mesure à l'aide du MTG

Un autre dispositif de mesure du module d'élasticité vibratoire a été utilisé. L'appareil est le MTG de la société Brookhuis qui est une machine portable basée sur le même principe physique que l'E-Scan mais cette fois le dispositif de mesure des vibrations est un microphone. Cette mesure a été réalisée par FCBA.



FIGURE 2.7 – Photographie du MTG

2.5.3.2.3 Mesure à l'aide de l'E-Control

En plus des mesures de modules élastiques réalisées avec l'E-Scan et le MTG, dans le cas du chêne une mesure a aussi été réalisée à l'aide de l'E-Control de la société Innodura. Les essais réalisés ici le sont avec sa version portable. Ces mesures ont été réalisées dans le cadre d'un projet de fin d'études d'un élève ingénieur ENSAM [35], profitant de l'opportunité de passer le lot de chêne sur cette machine.

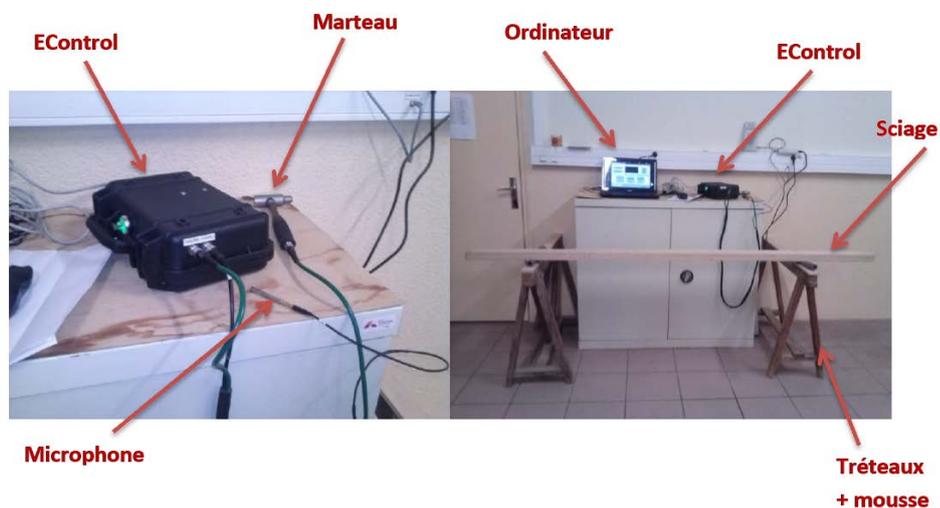


FIGURE 2.8 – Photographie E-Control

2.5.4 Détection et mesure des singularités

2.5.4.1 Nodosité

Pour caractériser la nodosité des sciages, il a été choisi d'utiliser le *Knot Depth Ratio*. Cet indice représente la proportion de noeud par rapport au bois sain sur l'épaisseur du sciage (le KDR est compris entre 0 et 1, il vaut 1 lorsqu'à une position considérée, le noeud est présent sur toute l'épaisseur du sciage et vaut 0 lorsque il y a uniquement présence de bois sain). Il est calculé à partir des cartographies de masse volumique et de la méthode décrite dans le chapitre 1. Pour appliquer cette méthode, il est nécessaire de connaître les valeurs de la masse volumique du bois sain et des noeuds des différentes essences étudiées. Ceci est nécessaire pour le calcul des paramètres f_1 et f_2 donnés équation 2.5 et 2.6.

$$f_1 = 1 + \frac{Ecart\ type(\rho_{cw})}{Moyenne(\rho_{cw})} \quad (2.5)$$

$$f_2 = \frac{\rho_k}{\rho_{cw}} \quad (2.6)$$

Une analyse des images X de chaque sciage est réalisée pour séparer les zones de noeuds et de bois sain. Il est alors possible de calculer les différents paramètres (ρ_{cw} , ρ_k , f_1 et f_2) pour chaque sciage. La détection de contour est présentée figure 2.9.

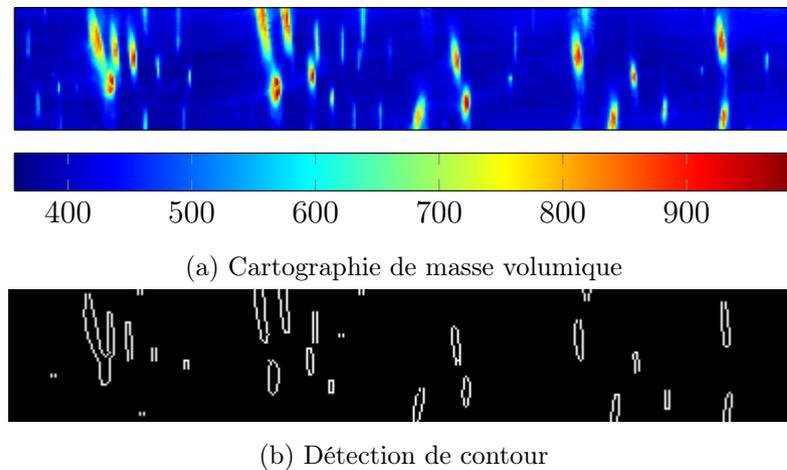


FIGURE 2.9 – Séparation des zones de noeuds et de bois sain pour le calcul des paramètres f_1 et f_2 .

La procédure a été réalisée sur les trois lots de l'étude, les valeurs des différents paramètres pour le calcul du KDR sont alors prises comme les valeurs moyennes des paramètres obtenus sur tout le lot. Ces paramètres sont présentés tableau 2.5. A noter que les valeurs des paramètres f_1 et f_2 sont très proches dans le cas du chêne (dû à la faible différence de masse volumique entre le bois sain et les noeuds) ce qui peut rendre la mesure du KDR plus difficile.

| | Epicéa | Douglas | Chêne |
|-------------|--------|---------|-------|
| ρ_{cw} | 412 | 475 | 727 |
| ρ_k | 841 | 818 | 860 |
| f_1 | 1.12 | 1.13 | 1.11 |
| f_2 | 2.05 | 1.75 | 1.29 |

TABLE 2.5 – Valeurs moyennes des paramètres de calcul du KDR pour les trois essences étudiées

L'exemple d'une cartographie sur un sciage en chêne est présenté figure 2.10. La présence de plusieurs gros noeuds traversants sur le sciage est visible puisque la valeur de KDR est très proche de 1. On observe aussi la présence de deux tâches plus petites avec des valeurs de KDR proche de 0.4, signe de la présence de noeud dans l'épaisseur du sciage. La résolution de ces cartographies est de 1cm dans le sens de la longueur et de 2mm dans la hauteur du sciage.

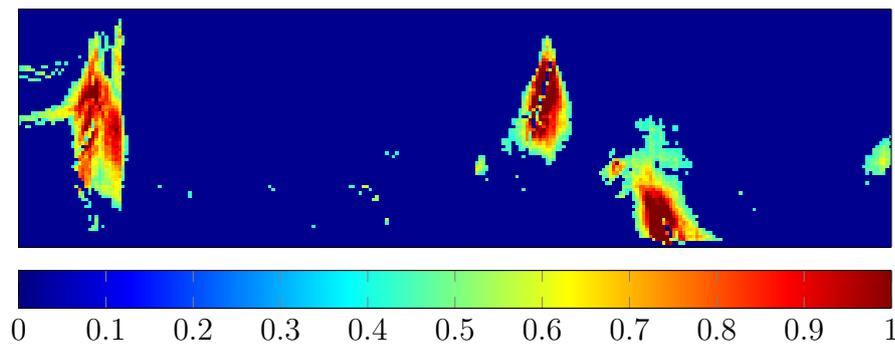
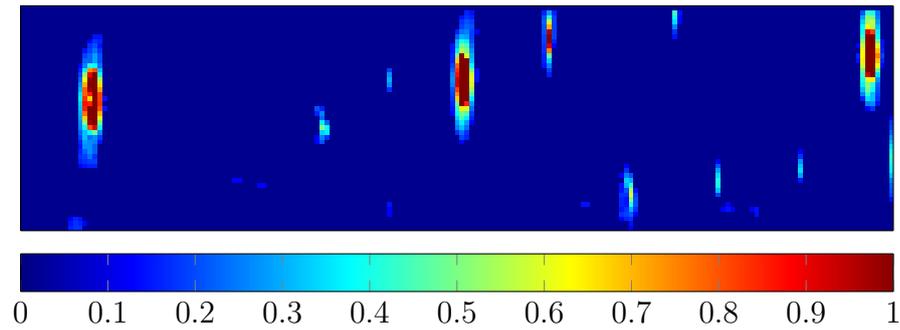
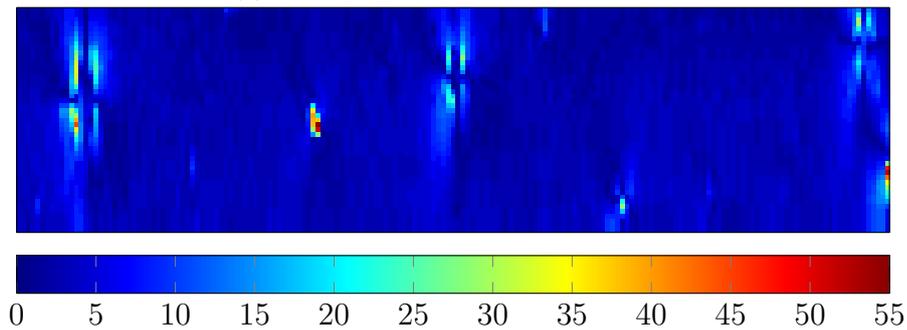


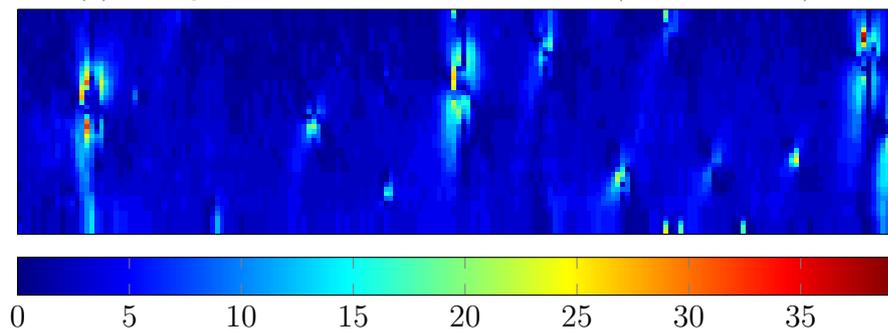
FIGURE 2.10 – Cartographie du KDR sur un sciage en chêne

2.5.4.2 Pente de fil

Grâce à l'effet trachéide pour les deux essences résineuses présenté dans le chapitre 1, une mesure de la pente de fil est disponible sur les deux grandes faces du sciage. Pour rappel, la méthode consiste à étudier la direction du grand axe de l'ellipse formée par la projection d'un laser point à la surface du sciage, qui a pour particularité de s'orienter dans la même direction que la pente de fil. Un exemple de cette mesure est présenté figure 2.11. Sont représentées sur ces images, la cartographie du KDR ainsi que la mesure de la pente de fil sur les deux faces du sciages. La comparaison de ces cartographies permet par exemple de mettre en évidence la déviation de la pente de fil autour des noeuds, les valeurs des angles de pente de fil sont les plus importantes à ces positions. La résolution de ces cartographies est de 1cm dans le sens de la longueur et de 2mm dans la hauteur du sciage.

(a) Cartographie de *Knot Depth Ratio*

(b) Cartographie de mesure de la pente de fil (face du dessous)



(c) Cartographie de mesure de la pente de fil (face du dessus)

FIGURE 2.11 – Mesure de la pente de fil sur un sciage d'épicéa

2.6 Présentation et analyse statistique des grandeurs mesurées

Les grandeurs mesurées pour chacune des trois essences vont à présent être précisées. Certains paramètres n'ont pas pu être mesurés en fonction des essences. Un nombre important de données sylvicoles est seulement disponible pour le douglas où la traçabilité depuis la grume jusqu'au sciage a été réalisée. En ce qui concerne le chêne, seule la longueur de la grume et le DBH (diamètre à 1.30m) sont connus. Pour les paramètres issus des tests non destructifs, la pente de fil dans le cas du chêne ne sera pas disponible puisque sa mesure n'est pas possible avec la technologie implantée dans le scanner sur

des bois issus de feuillus. Les paramètres recensés pour chaque essence sont donnés table 2.6. Une analyse statistique sera présentée afin d'étudier les coefficients de détermination entre chaque paramètre, ainsi que le degré de signification de la corrélation à l'aide de la valeur p (p-value). En effet, il est possible d'observer une corrélation très faible entre deux paramètres mais cela ne signifie pas nécessairement que ces paramètres ne sont pas liés. La valeur p représente la probabilité d'observer la corrélation entre deux paramètres sous l'hypothèse que les deux paramètres ne sont pas corrélés. Pour une valeur de p de 0.05, cela signifie qu'il y a moins de 5% de chance de ne pas observer le résultat obtenu. En pratique, des seuils sur la valeur de p sont établis et permettent de caractériser le degré de corrélation :

- $p < 0.01$: degré de corrélation extrêmement significatif,
- $0.01 < p < 0.05$: degré de corrélation très significatif,
- $p < 0.1$: degré de corrélation significatif,
- $p > 0.1$: pas de corrélation.

| | | Chêne | Douglas | Épicéa |
|----------------------------|----------------------------------|-------|---------|--------|
| Données sylvicoles | Longueur grume | ✓ | ✓ | - |
| | Dbh | ✓ | ✓ | - |
| | Age de l'arbre | - | ✓ | - |
| | Hauteur dans l'arbre | ✓ | ✓ | - |
| | Position par rapport à la moelle | - | ✓ | - |
| Contrôle non destructif | Masse volumique | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MOE E-Scan | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MOE Sylvatest | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MOE MTG | ✓ | ✓ | ✓ |
| | MOE E-Control | ✓ | - | - |
| | <i>Knot Depth Ratio</i> | ✓ | ✓ | ✓ |
| | Pente de fil (SoG) | - | ✓ | ✓ |

TABLE 2.6 – Données disponibles en fonction des essences

2.6.1 Sélection des paramètres issus du Scanner

Étant donné le caractère local des informations issues du scanner (calcul du *KDR* et mesure de la pente de fil), il est nécessaire de créer des valeurs globales pour chacun des sciages. Le nombre de paramètres qu'il est possible de créer est quasi infini, il faut donc pouvoir choisir des paramètres qui donnent la plus haute corrélation avec les données destructives ce qui fait l'objet de cette partie.

Tout d'abord, à partir de la mesure de la pente de fil sur les deux faces des sciages, une

nouvelle grandeur locale basée sur la formule de Hankinson (éq. 2.7) a été créée en utilisant l'équation 2.8. La fonction H donne le ratio entre une propriété mécanique à un angle θ par rapport à cette même propriété mécanique dans l'axe du sciage. Les paramètres k et n sont respectivement égaux à 0.04 et 2 [4].

$$H(\theta) = \frac{E(\theta)}{E_0} = \frac{k}{\sin^n(\theta) + k \times \cos^n(\theta)} \quad (2.7)$$

$$Red(x, y) = \frac{H[\theta_{top}(x, y)] + H[\theta_{bot}(x, y)]}{2} \quad (2.8)$$

Différents paramètres ont ensuite été calculés à partir des différentes cartographies de singularités obtenues, en effet il est possible de prendre par exemple la moyenne de tous les points, ou encore des valeurs fractiles. De plus, les essais destructifs étant de la flexion 4 points, il peut sembler pertinent de ne calculer ces différentes grandeurs que sur les tiers comprimés et tendus des sciages et d'ignorer la partie médiane. Les différents paramètres mesurés sont décrits tableau 2.7. Les différentes corrélations ainsi que leurs significativités entre les paramètres décrits et les valeurs obtenues durant les essais destructifs ont été calculées pour les trois essences étudiées.

| Paramètres de nodosité | | |
|----------------------------|--|------------------|
| Désignation | Signification | Zones |
| KDR ₁ | <i>KDR</i> moyen | Sciage entier |
| KDR ₂ | <i>KDR</i> moyen | Tiers extérieurs |
| KDR ₃ | Fractile à 95 % du <i>KDR</i> selon x puis moyenne selon y | Sciage entier |
| KDR ₄ | Fractile à 95 % du <i>KDR</i> selon x puis moyenne selon y | Tiers extérieurs |
| KDR ₅ | Fractile à 95 % du <i>KDR</i> selon x et y | Sciage entier |
| KDR ₆ | Fractile à 95 % du <i>KDR</i> selon x et y | Tiers extérieurs |
| Paramètres de pente de fil | | |
| Désignation | Signification | Zones |
| SoG ₁ | Ratio moyen (eq.2.8) | Sciage entier |
| SoG ₂ | Ratio moyen (eq.2.8) | Tiers extérieurs |
| SoG ₃ | Fractile à 5 % du ratio selon x puis moyenne selon y | Sciage entier |
| SoG ₄ | Fractile à 5 % du ratio selon x puis moyenne selon y | Tiers extérieurs |
| SoG ₅ | Fractile à 5 % du ratio selon x et y | Sciage entier |
| SoG ₆ | Fractile à 5 % du ratio selon x et y | Tiers extérieurs |

TABLE 2.7 – Signification des différents paramètres calculés à partir des singularités locales

Les résultats portant sur la nodosité sont donnés tableau 2.8. Sur cette table est aussi présenté le coefficient de détermination entre la masse volumique mesurée par la source RX et la masse volumique réelle. Ces coefficients sont très proches et révèlent la très bonne précision de la mesure de la masse volumique par cette méthode.

Les coefficients de déterminations maximums entre le module à rupture (MOR) et les différents paramètres calculés sont respectivement égaux à 0.28, 0.31 et 0.32 pour le

chêne, le douglas et l'épicéa avec des significativités très fortes. Ces valeurs sont atteintes sur les paramètres de KDR basés sur des valeurs de fractiles à 95% sur la hauteur du sciage puis la moyenne de ces différentes valeurs sur la longueur du sciage calculées sur l'intégralité du sciage (KDR3) ou uniquement sur les tiers extérieurs (KDR4). Le fait de prendre la valeur de fractile à 95% plutôt que la valeur maximum permet d'attribuer des valeurs de nodosité plus forte à des sections où le noeud serait de plus grande taille. En effet, l'utilisation de la valeur maximale conduirait à de nombreuses valeurs le long du sciage égales à 1. Enfin, il est à noter que les corrélations pour les différentes essences sont assez proches bien que la mesure du KDR en elle même se veut beaucoup moins précise dans le cas du douglas et du chêne, due à la plus faible différence de masse volumique entre les noeuds et le bois sain pour ces deux essences.

En ce qui concerne les corrélations entre les différents paramètres et le module d'élasticité (MOE), les coefficients de détermination maximum sont respectivement égaux à 0.22, 0.41 et 0.34 pour le chêne, le douglas et l'épicéa. Les valeurs maximales sont atteintes pour les paramètres KDR3 et KDR4, excepté pour le cas de l'épicéa où le paramètre KDR1 est celui ayant la plus forte corrélation tout en restant assez proche de celle du paramètre KDR3 (0.34 au lieu de 0.36). Le fait que la corrélation soit la plus importante dans le cas du douglas peut provenir du fait que la taille de ces noeuds est généralement plus forte. Ces résultats montrent que le KDR est un assez bon indicateur des propriétés de rigidité ou de résistance globales d'un sciage et cela quelque soit l'essence, et que les corrélations sont les meilleures avec les paramètres KDR3 et KDR4 (à l'exception du cas du MOE pour l'épicéa).

| Chêne | | | | | | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| - | MOE | DENS | DENSRX | KDR ₁ | KDR ₂ | KDR ₃ | KDR ₄ | KDR ₅ | KDR ₆ |
| MOR | 0.36 (***) | 0.01 (x) | 0.00 (x) | 0.18 (***) | 0.17 (***) | 0.28 (***) | 0.28 (***) | 0.13 (***) | 0.14 (***) |
| MOE | - | 0.19 (***) | 0.19 (***) | 0.22 (***) | 0.22 (***) | 0.22 (***) | 0.22 (***) | 0.16 (***) | 0.16 (***) |
| DENS | - | - | 0.92 (***) | 0.05 (***) | 0.08 (***) | 0.01 (**) | 0.03 (***) | 0.01 (**) | 0.02 (***) |
| Douglas | | | | | | | | | |
| - | MOE | DENS | DENSRX | KDR ₁ | KDR ₂ | KDR ₃ | KDR ₄ | KDR ₅ | KDR ₆ |
| MOR | 0.58 (***) | 0.23 (***) | 0.23 (***) | 0.12 (***) | 0.11 (***) | 0.31 (***) | 0.30 (***) | 0.22 (***) | 0.23 (***) |
| MOE | - | 0.53 (***) | 0.54 (***) | 0.23 (***) | 0.19 (***) | 0.41 (***) | 0.37 (***) | 0.31 (***) | 0.31 (***) |
| DENS | - | - | 0.96 (***) | 0.11 (***) | 0.08 (***) | 0.20 (***) | 0.16 (***) | 0.19 (***) | 0.16 (***) |
| Épicéa | | | | | | | | | |
| - | MOE | DENS | DENSRX | KDR ₁ | KDR ₂ | KDR ₃ | KDR ₄ | KDR ₅ | KDR ₆ |
| MOR | 0.71 (***) | 0.33 (***) | 0.31 (***) | 0.30 (***) | 0.25 (***) | 0.32 (***) | 0.27 (***) | 0.19 (***) | 0.16 (***) |
| MOE | - | 0.52 (***) | 0.50 (***) | 0.36 (***) | 0.27 (***) | 0.34 (***) | 0.26 (***) | 0.18 (***) | 0.14 (***) |
| DENS | - | - | 0.99 (***) | 0.08 (***) | 0.05 (***) | 0.06 (***) | 0.03 (***) | 0.02 (***) | 0.01 (x) |

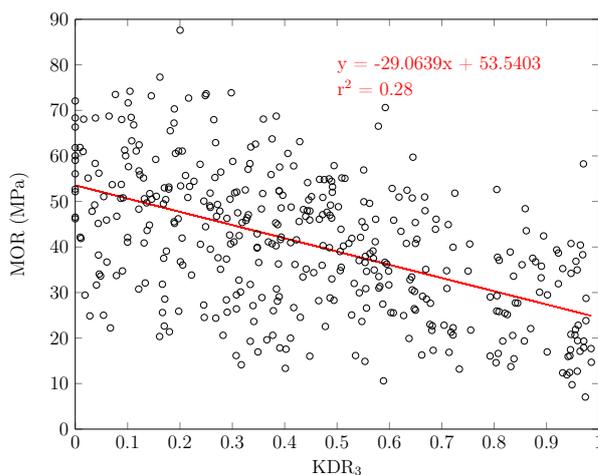
TABLE 2.8 – Coefficient de détermination r^2 entre les différents paramètres pour les mesures de nodosité. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative; * : corrélation significative et x : pas de corrélation

A titre d'exemple la relation existante entre le paramètre KDR3 et les propriétés

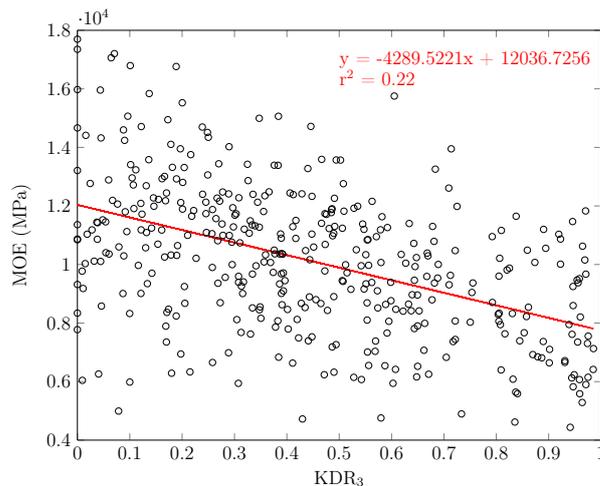
2.6. PRÉSENTATION ET ANALYSE STATISTIQUE DES GRANDEURS MESURÉES

mécaniques (MOE et MOR) des trois essences étudiées est décrite figure 2.12. L'influence négative de la présence de noeuds sur les propriétés mécaniques peut ainsi être observée. En effet, une valeur du paramètre KDR3 proche de 1 est le témoin de sciage comportant de nombreux noeuds et inversement lorsque cette valeur est proche de 0. Il apparaît sur ces différents graphiques et de façon logique que les propriétés mécaniques sont plus faibles lorsque la nodosité est grande.

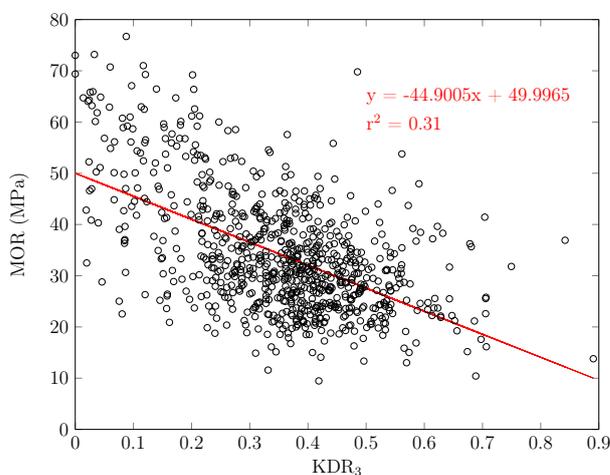
CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES



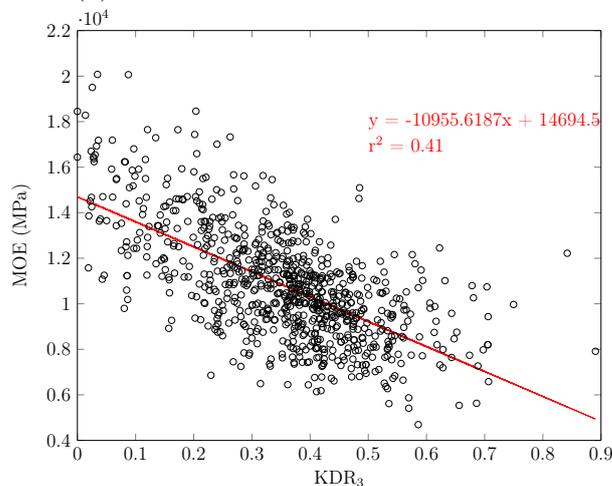
(a) MOR en fonction du KDR : chêne



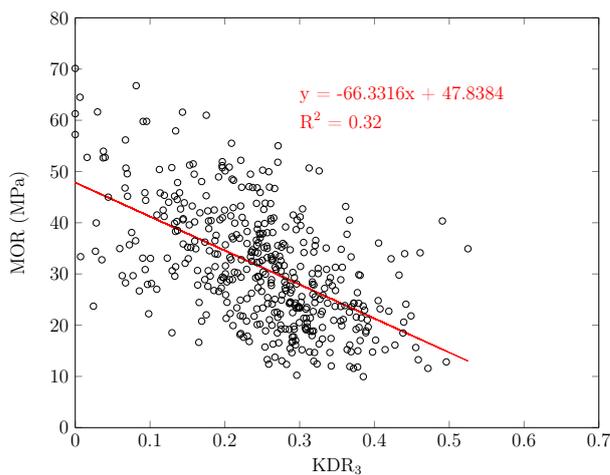
(b) MOE en fonction du KDR : chêne



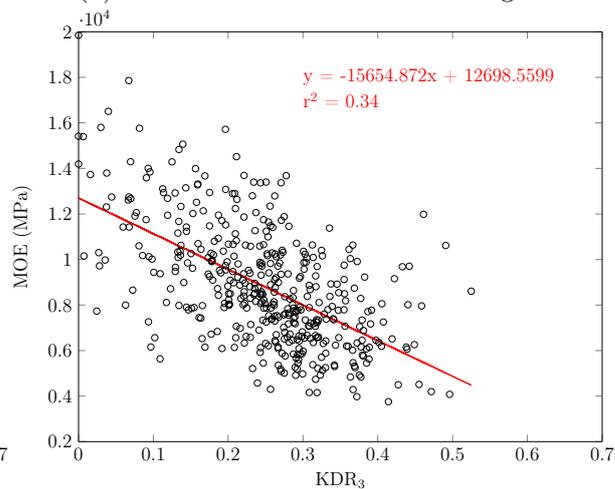
(c) MOR en fonction du KDR : douglas



(d) MOE en fonction du KDR : douglas



(e) MOR en fonction du KDR : épicéa



(f) MOE en fonction du KDR : épicéa

FIGURE 2.12 – KDR en fonction des propriétés mécaniques; à gauche en fonction du module à rupture et à droite en fonction du module d'élasticité; de haut en bas : pour le chêne, le douglas et l'épicéa

2.6. PRÉSENTATION ET ANALYSE STATISTIQUE DES GRANDEURS MESURÉES

Les coefficients de détermination pour les paramètres calculés à partir des mesures de pente de fil sont présentés tableau 2.9. Pour rappel les mesures de pente de fil ne sont pas disponibles pour le chêne. Les corrélations maximales sont observées pour les paramètres SOG3 et SOG4. Ces paramètres représentent la moyenne selon la longueur des fractiles à 5% selon la hauteur sur l'intégralité du sciage (SOG3) et sur les tiers extérieurs (SOG4). De la même manière que pour le cas du KDR il a été choisi d'utiliser une valeur de fractile plutôt que le minimum. Les valeurs maximales du coefficient de détermination sont égales respectivement à 0.28 et 0.21 avec le MOR et le MOE dans le cas du douglas alors qu'elles sont égales à 0.49 et 0.47 pour l'épicéa. De la même manière que pour la nodosité ces corrélations sont extrêmement significatives. Ces résultats montrent donc que la mesure de la pente de fil et sa prise en compte par la formule de Hankinson est un bon indicateur des propriétés mécaniques globales d'un sciage.

| Douglas | | | | | | | | | |
|---------|------------|------------|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| - | MOE | DENS | DENSRX | SoG ₁ | SoG ₂ | SoG ₃ | SoG ₄ | SoG ₅ | SoG ₆ |
| MOR | 0.58 (***) | 0.23 (***) | 0.23 (***) | 0.15 (***) | 0.17 (***) | 0.24 (***) | 0.28 (***) | 0.14 (***) | 0.13 (***) |
| MOE | - | 0.53 (***) | 0.54 (***) | 0.14 (***) | 0.15 (***) | 0.19 (***) | 0.21 (***) | 0.11 (***) | 0.10 (***) |
| DENS | - | - | 0.96 (***) | 0.01 (**) | 0.00 (*) | 0.01 (***) | 0.01 (***) | 0.00 (x) | 0.00 (x) |
| Épicéa | | | | | | | | | |
| - | MOE | DENS | DENSRX | SoG ₁ | SoG ₂ | SoG ₃ | SoG ₄ | SoG ₅ | SoG ₆ |
| MOR | 0.71 (***) | 0.33 (***) | 0.31 (***) | 0.33 (***) | 0.37 (***) | 0.49 (***) | 0.48 (***) | 0.41 (***) | 0.37 (***) |
| MOE | - | 0.52 (***) | 0.50 (***) | 0.34 (***) | 0.39 (***) | 0.47 (***) | 0.45 (***) | 0.38 (***) | 0.33 (***) |
| DENS | - | - | 0.99 (***) | 0.04 (***) | 0.05 (***) | 0.09 (***) | 0.08 (***) | 0.06 (***) | 0.05 (***) |

TABLE 2.9 – Coefficient de détermination r^2 entre les différents paramètres pour les mesures de pente de fil. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative; * : corrélation significative et x : pas de corrélation

L'évolution des propriétés mécaniques des sciages en fonction du paramètre SOG4 est présentée figure 2.13 pour les deux essences de résineux étudiées. La valeur du paramètre SOG4 évolue inversement à la présence de forts angles de pente de fil sur les deux faces du sciages. En d'autres termes, une petite valeur de ce paramètre traduit la présence d'importantes variations de pente de fil. Les figures présentées montrent alors l'influence négative de la présence de variation de pente de fil sur les propriétés mécaniques. En effet comme attendu, les sciages les plus résistants et les plus rigides sont ceux dont la valeur du paramètre SOG4 est le plus proche de 1 et les sciages les moins bons mécaniquement sont ceux dont la valeur du paramètre SOG4 est la plus faible.

CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

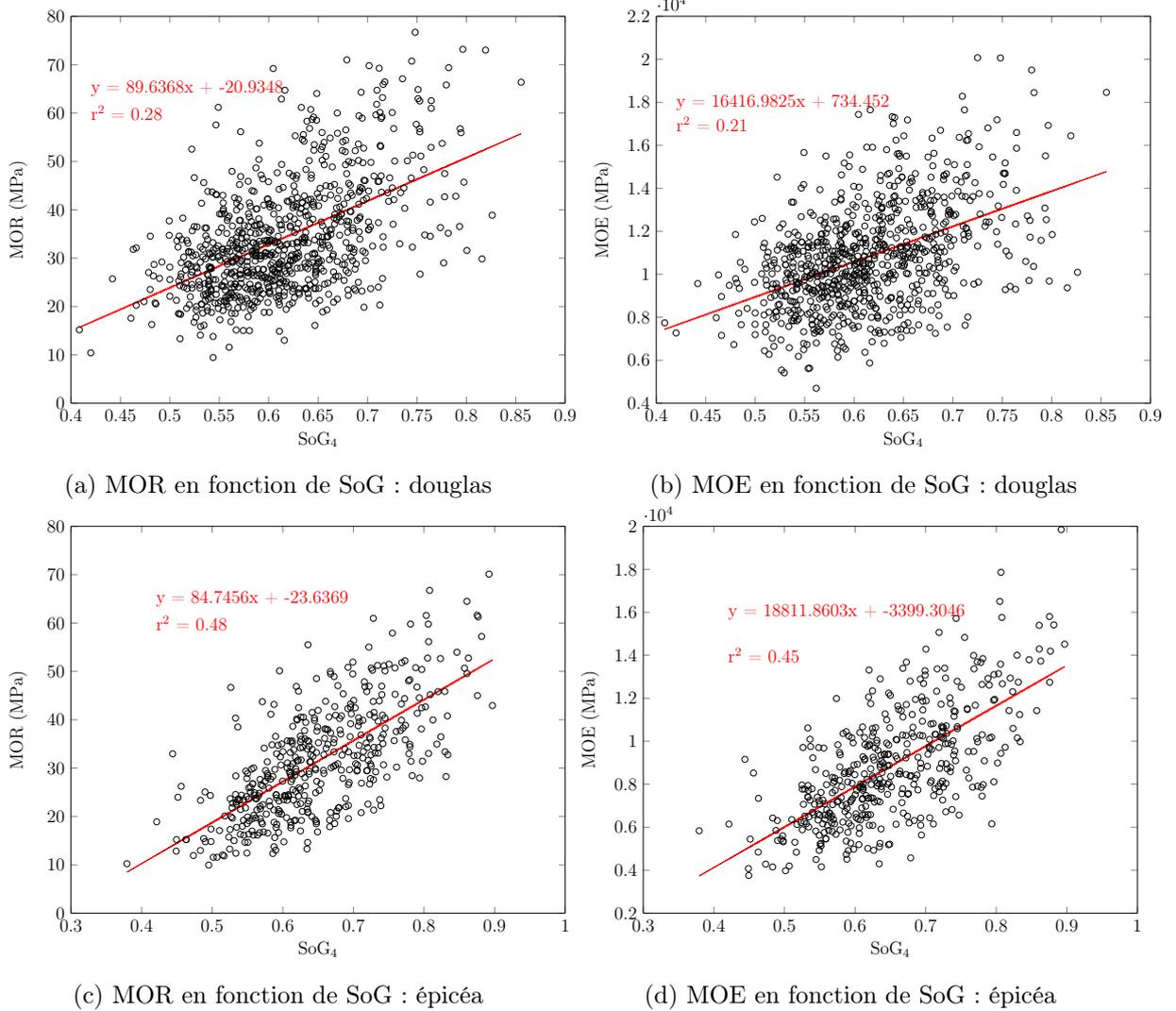


FIGURE 2.13 – SoG en fonction des propriétés mécaniques; à gauche en fonction du module à rupture et à droite en fonction du module d'élasticité; de haut en bas : pour le douglas et l'épicéa

Pour conclure sur cette partie, et pour la suite lors de l'analyse statistique des paramètres, seuls ceux possédant la plus forte corrélation avec les propriétés mécaniques seront gardés. Dans notre cas, il s'agit des paramètres de nodosité KDR_3 et KDR_4 et les paramètres calculés à partir de la pente de fil SoG_3 et SoG_4 .

2.6.2 Analyse des données non destructives et sylvicoles dans le cas du chêne

Les informations disponibles sur le chêne sont présentées table 2.10. Les sciages sont en majorité issus de grume d'environ 10m de long. La localisation verticale du sciage dans l'arbre indique seulement si le sciage provient de la bille de pied ou d'une surbille. Sur la totalité du lot, 143 sciages proviennent d'une bille de pied. Les deux indices de nodosité mesurés (KDR_3 et KDR_4) sont quant à eux très proches tant en valeur moyenne qu'en terme de variabilité. Enfin, les méthodes d'estimation du module d'élasticité donnent elles aussi des résultats proches, il est cependant à noter que la mesure effectuée par le Sylvatest donne des valeurs supérieures de module d'élasticité.

| | Min | Max | Moyenne | Fractile à 5% | Ecart-type | CV |
|--|---------------------------|--------|---------|---------------|------------|------|
| Longueur de la grume (m) | 3 | 13 | 9.26 | 6 | 1.9 | 20.1 |
| Diamètre de la grume (cm) | 42 | 68 | 54.4 | 43.5 | 7.4 | 13.6 |
| Hauteur dans l'arbre | Bille de pied ou surbille | | | | | |
| Masse volumique (kg.m^{-3}) | 556 | 909 | 725 | 617 | 67.5 | 9.3 |
| MOE (MPa) | 4 438 | 17 697 | 10 140 | 6 136 | 2 518 | 24.8 |
| MOR (MPa) | 7.1 | 87.6 | 40.7 | 16.2 | 15.4 | 37.8 |
| MOE E-Scan (MPa) | 6 421 | 17 222 | 11 123 | 7 510 | 2 163 | 19.4 |
| MOE Sylvatest (MPa) | 6 810 | 18 491 | 12 149 | 8 536 | 2 203 | 18.1 |
| MOE MTG (MPa) | 6 787 | 16 089 | 10 839 | 7 778 | 1 774 | 16.4 |
| MOE E-Control (MPa) | 6 306 | 20 339 | 11 161 | 7 543 | 2 284 | 20.5 |
| MV scanner (kg.m^{-3}) | 510 | 897 | 723 | 609 | 69.2 | 9.6 |
| KDR_3 | 0 | 0.99 | 0.44 | 0.03 | 0.28 | 62.8 |
| KDR_4 | 0 | 0.98 | 0.43 | 0.03 | 0.27 | 61.3 |

TABLE 2.10 – Statistiques descriptives des grandeurs disponibles sur le lot de chêne.

La figure 2.14 montre l'influence de la position verticale du sciage dans l'arbre sur les propriétés mécaniques. Les différents repères horizontaux portés sur les différentes boîtes à moustaches sont de bas en haut : la valeur minimum, le premier quartile, la médiane, le second quartile et la valeur maximale. La valeur moyenne est aussi reportée sur ces diagrammes. Il apparaît sur cette figure que le bois possède de meilleures propriétés mécaniques lorsqu'il est issu de billes de pied. En effet, une perte d'environ 5, 25 et 21% est observée respectivement sur la valeur moyenne (reportée sur la figure) de la masse volumique, du module d'élasticité et du module à rupture entre des sciages issus d'une bille de pied et ceux issus de surbilles. Une analyse statistique met en évidence que les moyennes des deux sous groupes sont statistiquement différentes. Il en est de même pour les valeurs médianes. Cette observation est cohérente avec les méthodes employées par le fournisseur dans le cadre du projet ClaMeb pour classer leurs sciages en qualité dite

"charpente" et "traverse" (voir tableau 2.1). En effet, tous les sciages classés en qualité charpente proviennent de billes de pied.

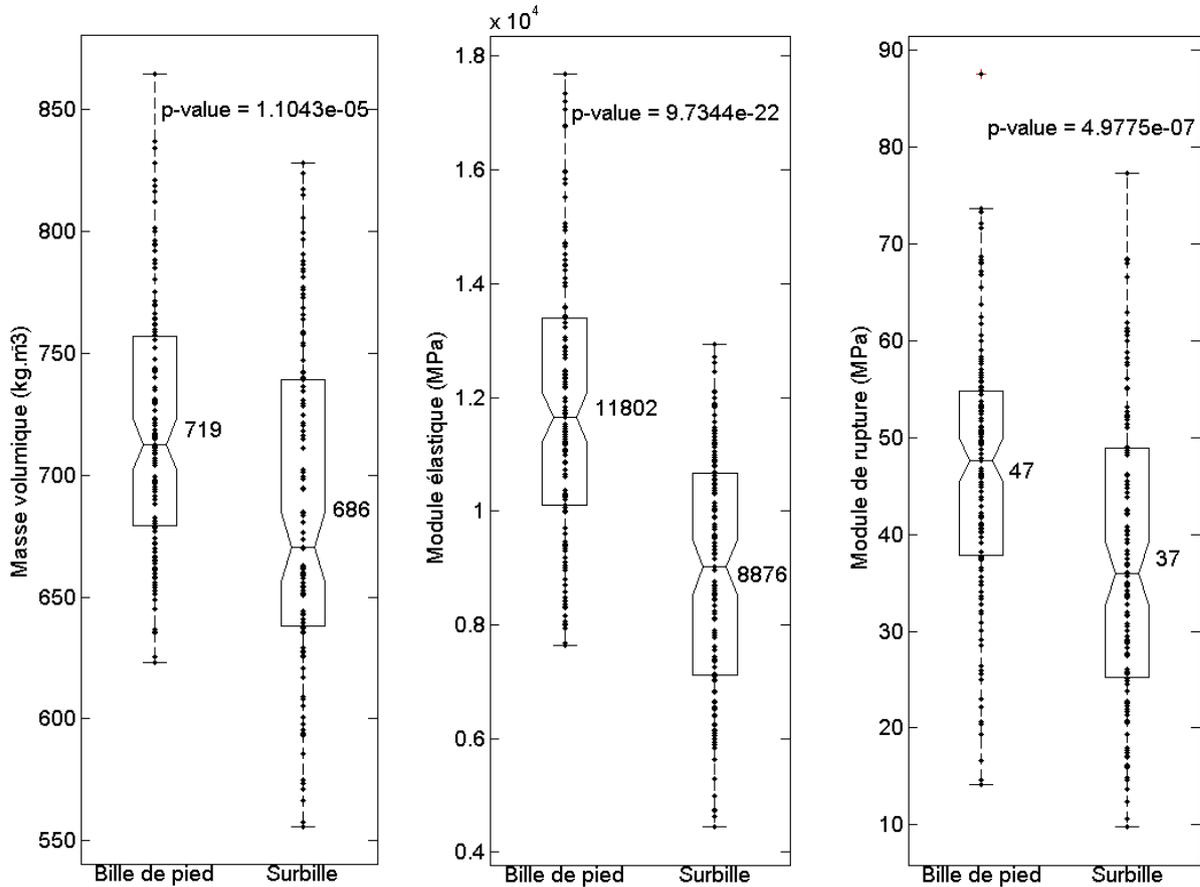


FIGURE 2.14 – Influence de la position verticale du sciage sur les propriétés mécaniques du chêne

Le tableau 2.11 représente les coefficients de détermination entre les différents paramètres mesurés ainsi que la significativité de ces corrélations à l'aide de la valeur p. La première analyse est la faible corrélation intrinsèque entre les trois propriétés mécaniques. En effet, le coefficient de détermination entre MOE et MOR est de seulement 0.36 et 0.19 entre la masse volumique et le MOE. Ces corrélations bien que relativement faibles sont statistiquement significatives. Enfin, la corrélation entre densité et MOR est quand à elle nulle. Concernant les informations sylvicoles, bien que plusieurs de ces corrélations avec les propriétés mécaniques soient statistiquement significatives, il apparaît que seule la position verticale possède une corrélation intéressante avec le MOE ($r^2 = 0.22$).

Dans la deuxième partie du tableau sont détaillés les coefficients de détermination entre les différentes méthodes de mesure de module d'élasticité et les propriétés mécaniques. Ces résultats illustrent la très bonne corrélation entre ces valeurs et le module d'élasticité issu des essais destructif (r^2 compris entre 0.72 et 0.80). Enfin, les corrélations entre ces mesures et le MOR sont quant à elles beaucoup plus faibles (r^2 compris entre 0.18 et

0.25). La faible corrélation intrinsèque entre MOE et MOR décrite précédemment en est la cause.

La dernière partie du tableau reprend les valeurs de r^2 pour les paramètres de nodosité calculés et sélectionnés précédemment. Il peut ainsi être observé que concernant le MOR, ces paramètres possèdent une meilleure corrélation que celles des mesures de module d'élasticité. Cette observation n'est pas du tout faisable concernant le MOE.

| Donnees Sylvicoles | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|----------------|------------------|--------------------|---------------|
| - | MOE | DENS | Longueur grume | Diametre grume | Position verticale | |
| MOR | 0.36 (***) | 0.01 (x) | 0.01 (*) | 0.00 (x) | 0.07 (***) | |
| MOE | - | 0.19 (***) | 0.04 (***) | 0.06 (***) | 0.22 (***) | |
| DENS | - | - | 0.01 (**) | 0.02 (***) | 0.00 (x) | |
| Mesure de module d'élasticité | | | | | | |
| - | MOE | DENS | MOE E-Scan | MOE Sylvatest | MOE MTG | MOE E-Control |
| MOR | 0.36 (***) | 0.01 (x) | 0.22 (***) | 0.18 (***) | 0.25 (***) | 0.23 (***) |
| MOE | - | 0.19 (***) | 0.74 (***) | 0.72 (***) | 0.80 (***) | 0.76 (***) |
| DENS | - | - | 0.27 (***) | 0.35 (***) | 0.28 (***) | 0.25 (***) |
| Donnees Scanner | | | | | | |
| - | MOE | DENS | Dens RX | KDR ₃ | KDR ₄ | |
| MOR | 0.36 (***) | 0.01 (x) | 0.00 (x) | 0.28 (***) | 0.28 (***) | |
| MOE | - | - | 0.19 (***) | 0.22 (***) | 0.22 (***) | |
| DENS | - | - | 0.92 (***) | 0.01 (**) | 0.03 (***) | |

TABLE 2.11 – Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées et les propriétés mécaniques dans le cas du chêne. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation

2.6.3 Analyse des données non destructives et sylvicoles dans le cas du douglas

Les statistiques descriptives des différentes paramètres disponibles sont présentées tableau 2.12. Les informations en rouge sont celles seulement disponibles pour la moitié du lot. Pour cette moitié l'âge des arbres est d'environ 46 ans. Les sciages sont issus de grumes de 16m de long permettant l'extraction de 4 billons pour la production de sciages de longueur 4m. L'information de la position verticale du sciage a été conservée et les sciages sont répartis entre 4 hauteurs (4, 8 12 et 16m), cette répartition sera détaillée par la suite. Le diamètre à 1.30m (Dbh) a lui aussi été mesuré et montre que les arbres utilisés sont des arbres de petits/moyens diamètres puisque la moyenne de cette valeur est d'environ 43cm. Enfin la dernière information sylvicole concerne la distance du milieu de chaque sciage par rapport à la moelle. Elle a été mesurée sur l'intégralité du lot. Les distances par rapport à la moelle montrent que les sciages sont proches de la moelle

CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION
DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

(moyenne égale à 5cm avec un écart-type faible égal à 3.3) et que pour certains sciages la moelle est comprise dans le sciage.

Concernant les mesures de module d'élasticité, les valeurs moyennes des méthodes vibratoires sont très proches de la valeur moyenne du module d'élasticité issu des essais destructifs. Pour la mesure effectuée avec le sylvatest, il semble que la moyenne est légèrement plus élevée comme dans le cas du chêne. Cette différence ne semble pas être liée à une hypothétique plus forte variabilité puisque ces dernières sont très proches. L'analyse sur la valeur du fractile à 5% ou minimum et maximum semble montrer que ces méthodes faillissent dans la prédiction du module d'élasticité de sciages de fort ou faible rigidité. Les valeurs descriptives du paramètre de masse volumique calculé à partir de la source RX du scanner montre à nouveau l'excellente précision de cette méthode pour l'estimation de la masse volumique.

| | Min | Max | Moyenne | Fractile à 5% | Ecart-type | CV |
|---------------------------------------|-----------------------------------|--------|---------|---------------|------------|------|
| Dbh (cm) | 29.1 | 59.8 | 43.0 | 30.9 | 7.2 | 16.7 |
| Age de l'arbre | Environ 46 ans | | | | | |
| Hauteur dans l'arbre | Sciages répartis entre 4 hauteurs | | | | | |
| Position / à la moelle (cm) | 0 | 19 | 5.7 | 0.9 | 3.3 | 58.3 |
| Masse volumique (kg.m ⁻³) | 384 | 639 | 487 | 426 | 40.1 | 8.2 |
| MOE (MPa) | 4693 | 20073 | 10809 | 7323 | 2434 | 22.5 |
| MOR (MPa) | 9.5 | 76.7 | 34.1 | 19.7 | 11.6 | 34 |
| MOE E-Scan (MPa) | 5 902 | 20 220 | 11 491 | 8 129 | 2 240.8 | 19.5 |
| MOE Sylvatest (MPa) | 6 461 | 20 549 | 12 181 | 8 572 | 23.7 | 18.9 |
| MOE MTG (MPa) | 5 945 | 19 015 | 10 782 | 7 819 | 25.6 | 18.6 |
| MV scanner (kg.m ⁻³) | 381 | 641 | 488 | 422 | 41.7 | 8.6 |
| KDR ₃ | 0 | 0.89 | 0.35 | 0.09 | 0.14 | 40.3 |
| KDR ₄ | 0 | 0.89 | 0.36 | 0.08 | 0.15 | 42.5 |
| SoG ₃ | 0.42 | 0.84 | 0.63 | 0.53 | 0.06 | 10.4 |
| SoG ₄ | 0.41 | 0.86 | 0.61 | 0.52 | 0.07 | 11.2 |

TABLE 2.12 – Récapitulatif des variables mesurées pour le lot de douglas.

La figure tableau 2.15 représente la répartition des sciages selon leur position par rapport à la moelle et leur localisation verticale. Deux informations ressortent de ces différents histogrammes. La première est que le nombre de sciage provenant des deux premières billes est sensiblement plus important (près de 60%) que celui des deux billes à 12 et 16m (environ 40%). La deuxième concerne la position des sciages par rapport à la moelle; la proportion de sciages éloignées de la moelle diminue à mesure que la hauteur de billonage augmente. Ce phénomène est dû à la conicité de la bille et de plus la jeunesse de la plantation conduit de plus à ce que la majorité des sciages provienne de zones très proches de la moelle, près de 90% de l'échantillon étant à moins de 10cm de la moelle.

2.6. PRÉSENTATION ET ANALYSE STATISTIQUE DES GRANDEURS MESURÉES

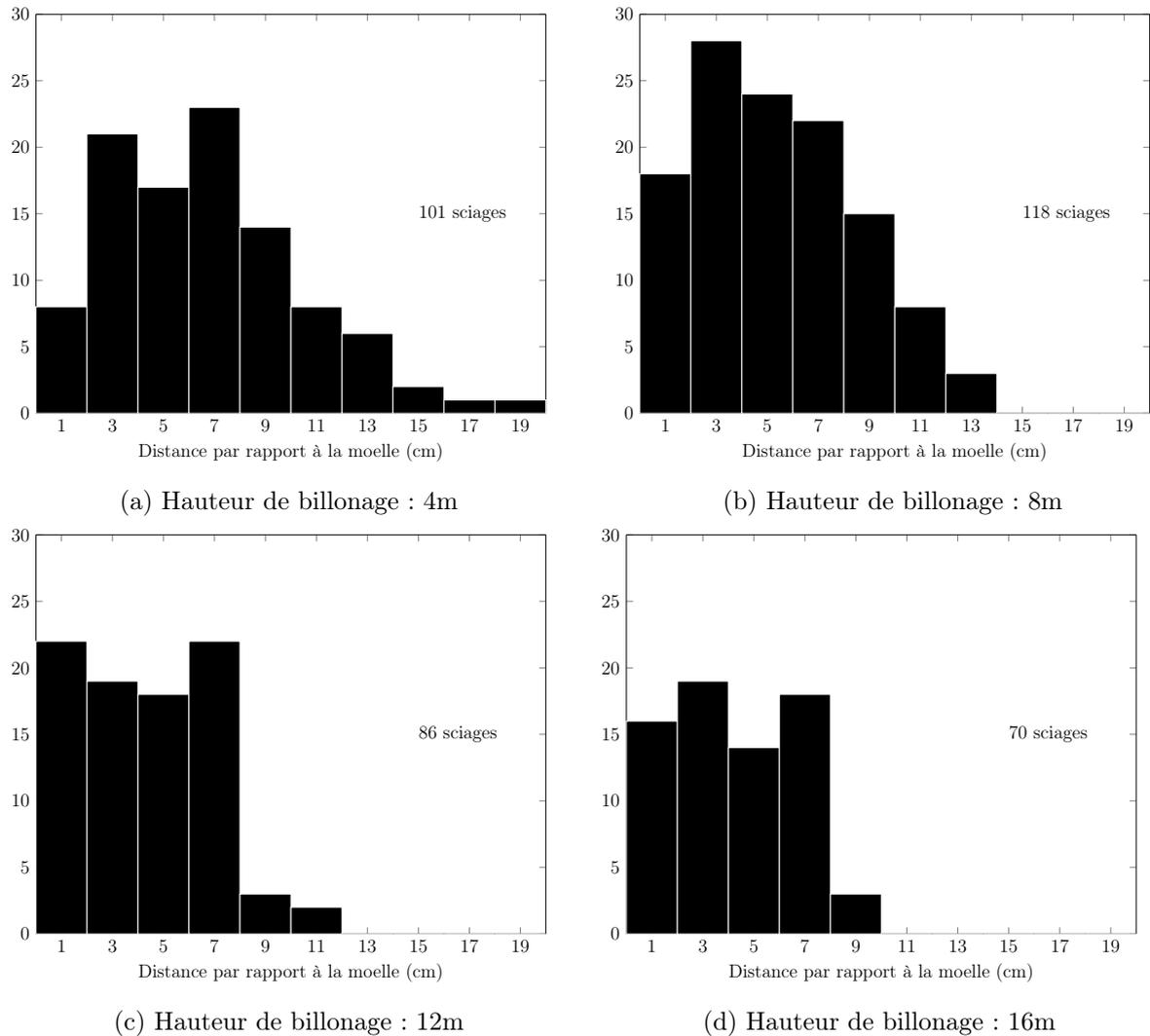


FIGURE 2.15 – Répartition des sciages selon leur position par rapport à la moelle et leur localisation verticale.

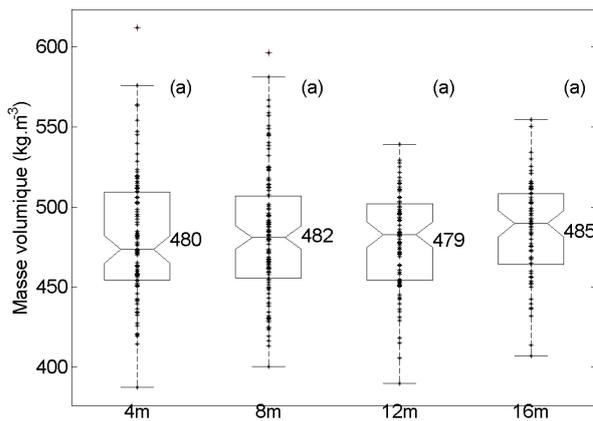
La figure 2.16 présente l'évolution des propriétés mécaniques (et le de la masse volumique) en fonction de la localisation spatiale du sciage dans l'arbre. Ainsi, les trois figures de la partie gauche présente les résultats d'une analyse de variance pour des populations de sciages provenant de hauteurs différentes. Les résultats de cette analyse montrent qu'en moyenne aucune différence n'est observée concernant la masse volumique et la résistance. Concernant le module d'élasticité des sciages, l'analyse de variance montre qu'en moyenne les sciages de la bille la moins haute possèdent un module d'élasticité plus faible que celle des sciages provenant des trois autres hauteurs. Ce résultat s'exprime sous la possibilité de rassembler les sciages de la première bille dans un groupe noté (a) et tous les autres sciages dans un sous-groupe noté (b) où en moyenne le module d'élasticité est le même statistiquement.

La partie droite de la figure montre quant à elle les résultats de l'analyse de variance

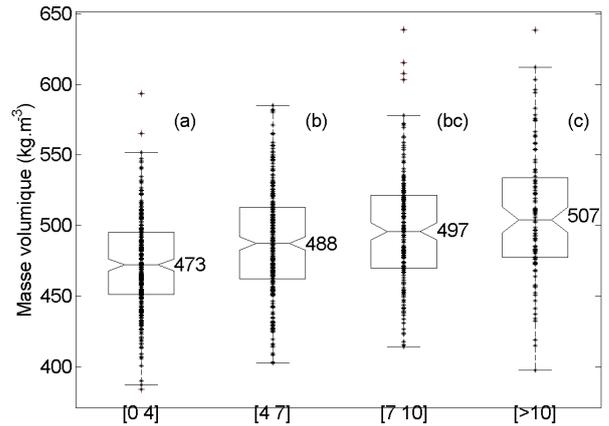
pour des sous-groupes constitués de sciages plus ou moins éloignés de la moelle. Il peut ainsi être observé que la masse volumique augmente en moyenne selon la distance par rapport à la moelle. Les sciages éloignés d'une distance comprise entre 0 et 4cm possèdent ainsi une masse volumique moyenne égale à 473 kg.m^{-3} , celle du groupe des sciages éloignés de plus de 10cm est de 507 kg.m^{-3} . Bien que la variation soit statistiquement significative, elle reste très faible mais cohérente avec la bibliographie (autour de 7%). Le module d'élasticité des sciages semble aussi augmenter à mesure que les sciages sont éloignés de la moelle. Dans ce cas seulement deux groupes peuvent être définis, le premier regroupant tous les sciages éloignés de moins de 4cm de la moelle (groupe (a) de la figure) et le deuxième contenant tous les sciages éloignés de plus de 4cm. Le MOE moyen du premier groupe est égal à 9 889 MPa alors qu'il est égal à 11 286 MPa pour le second. Enfin, une influence de la position par rapport à la moelle est aussi mise en évidence sur le module à rupture. En effet, ici trois groupes peuvent être constitués et le MOR moyen passe de 31MPa pour des sciages éloignés de moins de 4cm de la moelle à 40 MPa pour ceux à plus de 10 cm de la moelle.

Les différences de propriétés mécaniques observables selon la position de prélèvement des sciages sont représentées figure 2.17. Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques relevées sur les sciages groupés selon leur localisation dans l'arbre sont ainsi reportées. Il apparaît alors les mêmes phénomènes observés par l'analyse de variance, les propriétés mécaniques sont meilleures pour les sciages les plus hauts et les plus éloignés de la moelle.

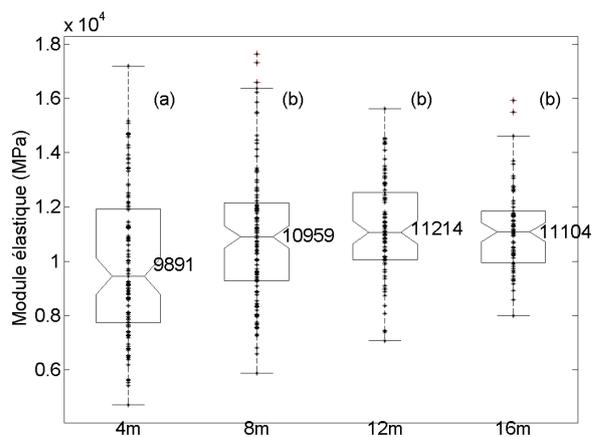
2.6. PRÉSENTATION ET ANALYSE STATISTIQUE DES GRANDEURS MESURÉES



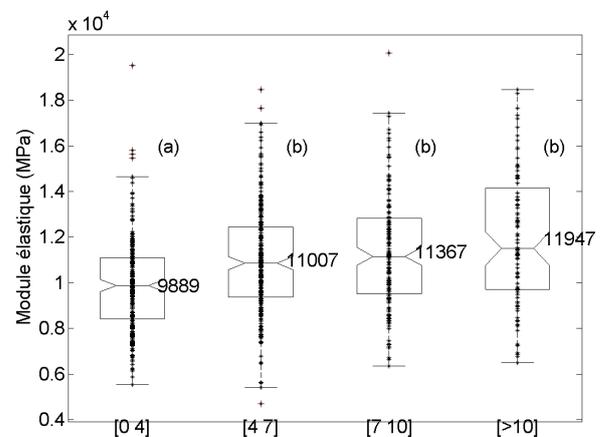
(a) Masse volumique en fonction de la position verticale



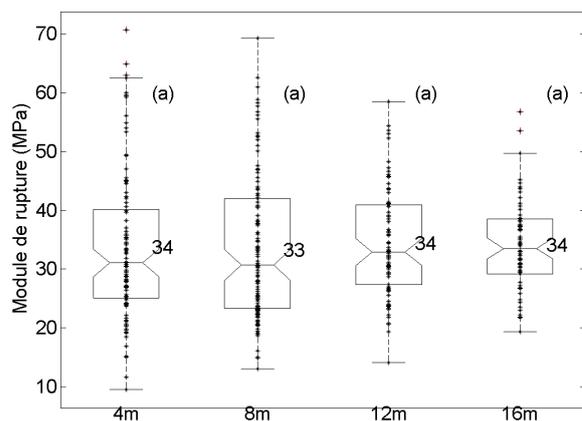
(b) Masse volumique en fonction de la distance à la moelle



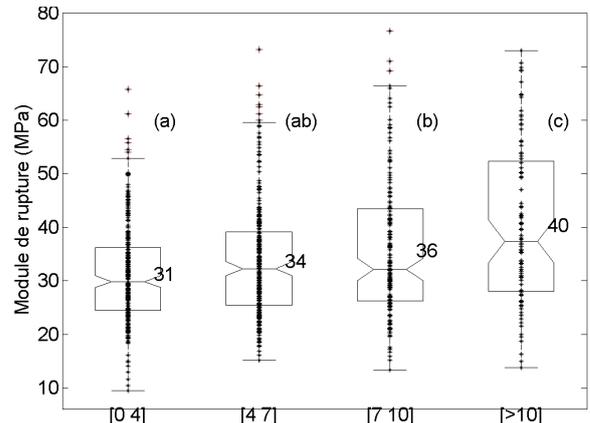
(c) module d'élasticité en fonction de la position verticale



(d) module d'élasticité en fonction de la distance à la moelle



(e) Module à rupture en fonction de la position verticale



(f) Module à rupture en fonction de la distance à la moelle

FIGURE 2.16 – Influence de la localisation du sciage dans la grume sur les propriétés mécaniques du douglas. A gauche, l'influence de la position verticale du sciage; a droite celle de la position du sciage par rapport à la moelle.

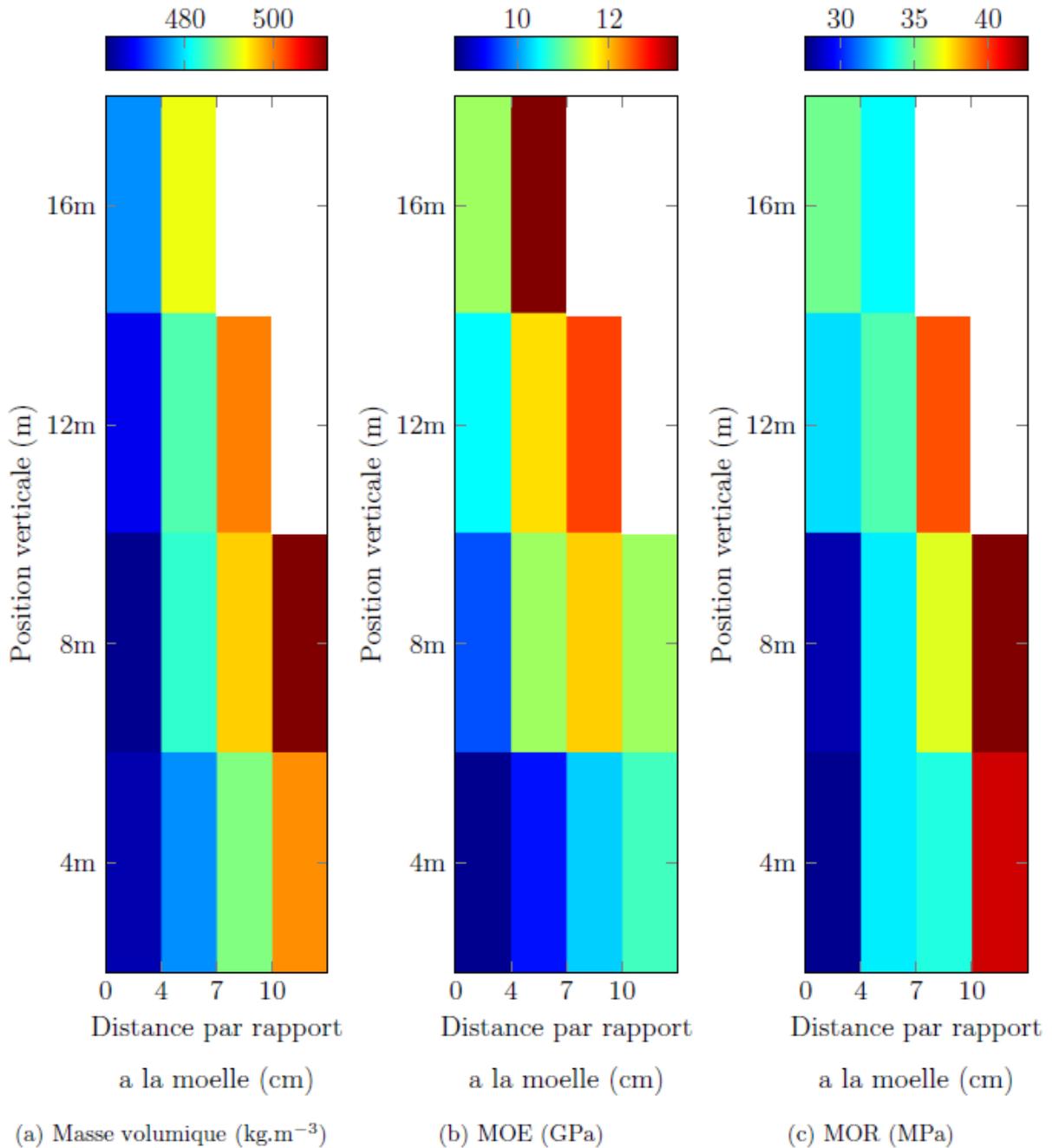


FIGURE 2.17 – Evolution des propriétés mécaniques selon la position par rapport à la moelle et la localisation verticale des sciages.

Le tableau 2.13 présente les coefficients de détermination entre les propriétés mécaniques et les différents tests non destructifs ainsi qu'avec les données de localisation spatiale des sciages. Les corrélations entre les données de localisation des sciages sont en accord avec les résultats de l'analyse de variance présentés précédemment, en effet seul le MOE est corrélé avec la localisation verticale. Cette corrélation est cependant extrêmement faible ($r^2 = 0.03$) bien que restant significative. Cette très faible corrélation indique

que cette variable n'aura qu'un intérêt très limité pour l'amélioration des prédictions des propriétés mécaniques. Concernant la position par rapport à la moelle, les différentes corrélations observées sont ici aussi en accord avec les observations faites précédemment. Les coefficients de détermination étant respectivement égaux à 0.06, 0.08 et 0.09 pour le MOR, le MOE et la masse volumique. Ces faibles valeurs montrent bien l'influence de la position par rapport à la moelle bien qu'expliquant qu'un très faible pourcentage de la variation des propriétés mécaniques.

Les mesures de module d'élasticité possèdent quant à elles de très bonnes corrélations avec le MOE : r^2 égaux à 0.80 et 0.84 pour les deux méthodes vibratoires et r^2 égal à 0.68 pour la méthode ultrasonore. Ces mesures possèdent aussi une plutôt bonne corrélation avec le MOR avec des r^2 égaux à 0.44 et 0.46 pour l'E-Scan et le MTG se rapprochant de la corrélation intrinsèque existante entre le MOE et le MOR de 0.58. La corrélation de la méthode basée sur les ultrasons est un peu plus faible ce qui est très certainement la conséquence directe de la moins bonne corrélation observée avec le MOE.

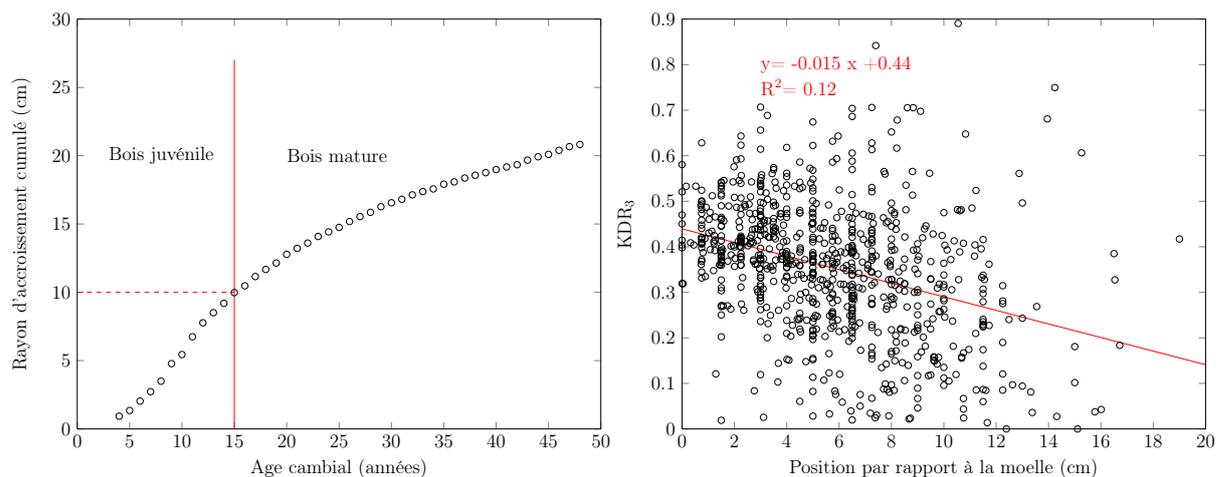
Enfin les corrélations entre les données de nodosité et de pente de fil issues du scanner sont aussi rappelées montrant que ces paramètres possèdent de plutôt bonnes corrélations tant avec le MOE qu'avec le MOR avec cependant de plus fortes corrélations pour les indices de nodosité. De plus il apparait que la nodosité est corrélée avec la position par rapport à la moelle avec un r^2 égal à 0.12. Cette relation (illustrée sur la partie (b) de la figure 2.18) indique donc que l'éventuelle présence de bois juvénile n'explique pas à elle seule les différences observées sur les propriétés mécaniques selon la position des sciages par rapport à la moelle.

| Donnees Sylvicoles | | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------|
| | MOE | DENS | Dbh | Position / à la moelle | Localisation verticale | | |
| MOR | 0.58 (***) | 0.23 (***) | 0.00 (x) | 0.06 (***) | 0.00 (x) | | |
| MOE | - | 0.53 (***) | 0.00 (x) | 0.08 (***) | 0.03 (***) | | |
| DENS | - | - | 0.04 (***) | 0.09 (***) | 0.00 (x) | | |
| Mesure de module d'élasticité | | | | | | | |
| | MOE | DENS | MOE E-Scan | MOE Sylvatest | MOE MTG | | |
| MOR | 0.58 (***) | 0.23 (***) | 0.44 (***) | 0.34 (***) | 0.46 (***) | | |
| MOE | - | 0.53 (***) | 0.80 (***) | 0.68 (***) | 0.84 (***) | | |
| DENS | - | - | 0.55 (***) | 0.52 (***) | 0.55 (***) | | |
| Donnees Scanner | | | | | | | |
| | MOE | DENS | Dens RX | KDR ₃ | KDR ₄ | SoG ₃ | SoG ₄ |
| MOR | 0.58 (***) | 0.23 (***) | 0.23 (***) | 0.31 (***) | 0.30 (***) | 0.24 (***) | 0.28 (***) |
| MOE | - | 0.53 (***) | 0.54 (***) | 0.41 (***) | 0.37 (***) | 0.19 (***) | 0.21 (***) |
| DENS | - | - | 0.96 (***) | 0.20 (***) | 0.16 (***) | 0.01 (x) | 0.01 (x) |
| Position / à la moelle | - | - | - | 0.12 (***) | 0.14 (***) | 0.00 (x) | 0.00 (x) |

TABLE 2.13 – Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées dans le cas du douglas. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation

La figure 2.18 montre à la fois les caractéristiques de notre lot pour l'étude de la

distance par rapport à la moelle comme un indicateur de la présence de bois juvénile ainsi qu'une des causes probables du fait qu'il est tout de même observée une différence de propriétés mécaniques en fonction de l'éloignement par rapport à la moelle. La période de formation du bois juvénile est variable (souvent compris entre 10 et 20 ans) et la transition entre bois juvénile et bois mature dépend du critère pris en compte pour sa détermination. Cependant, nous considérons que le bois juvénile de douglas se forme lors des 15 premières années. Afin de déterminer le diamètre de la zone juvénile dans le tronc correspondant aux 15 premières années de croissance, nous utiliserons la figure 2.18 qui met en évidence les rayons d'accroissement cumulés en fonction des années de croissance. Ces mesures ont été réalisées par le Lerfob à l'aide d'un stéréomicroscope sur des rondelles prélevées sur les grumes. Sur cette figure, la droite verticale rouge marque la transition hypothétique entre bois juvénile et bois mature. Il apparaît alors qu'avec cette hypothèse, que seuls les sciages prélevés à plus de 10cm de la moelle seraient composés de bois mature, or il a été montré précédemment que seul 10% de l'échantillon total répondait à ce critère (97% du lot est de plus situé à moins de 12cm de la moelle). Ce constat sur la répartition des distances du lot par rapport à la moelle est la conséquence directe de la combinaison de l'approvisionnement d'arbres jeunes recherchés par les industriels. Il apparaît alors difficile d'étudier l'influence de la présence ou non de bois juvénile sur les propriétés mécaniques à partir de ce lot. Il a cependant été observé des différences que ce soit par le biais d'analyse de variance ou grâce à l'étude des corrélations. La partie (b) de la figure illustre qu'une des causes probables de la différence observée serait liée à la nodosité plus faible lorsque les sciages sont éloignés de la moelle, qui pourrait expliquer que les propriétés mécaniques soient moins bonnes à mesure que les sciages sont proches de la moelle.



(a) Rayon d'accroissement cumulé en fonction de l'âge cambial (b) Nodosité en fonction de la distance par rapport à la moelle

FIGURE 2.18 – Limite du bois juvénile et variation de la nodosité en fonction de localisation du sciage dans l'arbre

Les différentes observations faites dans cette partie montrent bien que les informations sylvicoles expliquent une partie de la variation des propriétés mécaniques. Cette part est cependant beaucoup trop faible pour pouvoir améliorer les prédictions de ces propriétés mécaniques pour notre lot [65]. Ces résultats mettent en avant que dans un contexte industriel dont notre lot est fortement représentatif, ces informations individuelles ne semblent pas présenter d'intérêt pour améliorer la prédiction des propriétés mécaniques mais peuvent être utiles lorsqu'elles sont moyennées.

2.6.4 Analyse des données non destructives dans le cas de l'épicéa

Comme évoqué précédemment, aucune donnée sylvicole n'a été recueillie sur les sciages d'épicéa. Les sciages de ce lot sont directement issus de la production courante du fournisseur. Les différentes informations disponibles sur ce lot sont présentées dans le tableau 2.14. La première observation concerne les propriétés mécaniques qui sont plus faibles que celles du douglas. Concernant les mesures non-destructives du module d'élasticité les mêmes remarques que celles dans le cas du douglas peuvent être formulées; la mesure ultrasonore semble sur-estimer le MOE et les deux autres méthodes (vibratoires) sont quant à elles très proches. De même, ces trois méthodes ne semblent pas forcément adaptées pour prédire des module d'élasticité très forts (voir les différences observées sur les valeurs maximales) ou très faibles (voir les différences observées sur la valeur du fractile à 5%). Concernant les données issues du scanner, il apparaît que dans ce cas aussi la mesure de masse volumique effectué à l'aide de la source rayons X donne des résultats très proches de la masse volumique mesurée «manuellement». Les indices de nodosité sont quand à eux plus faibles que les valeurs observées dans le cas du douglas, signe de noeuds plus petits et/ou moins nombreux. Les valeurs des paramètres de pente de fil sont quant à eux très proches de ceux observés dans le cas du douglas. Compte tenu de la plus faible nodosité, cette dernière remarque peut paraître surprenante mais provient simplement du caractère non linéaire de la relation de Hankinson qui impacte très rapidement les propriétés mécaniques pour des angles de pente de fil relativement faibles.

L'analyse des corrélations entre les différents paramètres est donnée dans le tableau 2.15. Les mesures non-destructives de mesure de module d'élasticité possèdent de très bonnes corrélations avec le MOE légèrement meilleures que dans le cas du douglas. Cela peut être due à l'observation faite précédemment sur la taille des noeuds, ces mesures vibratoires ne prenant que partiellement en compte les singularités telles que les noeuds. Les corrélations de ces mesures avec le MOR sont quant à elles bien meilleures. Elles profitent en effet de la combinaison de deux phénomènes; la meilleure corrélation avec le MOE ainsi que de l'excellente corrélation intrinsèque existante entre le MOE et le MOR ($r^2=0.71$) dans le cas de l'épicéa. Pour les informations de nodosité et de pente de fil, la tendance observée dans le cas du douglas est ici inversée. En effet l'information

CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION
DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

| | Min | Max | Moyenne | Fractile à 5% | Ecart-type | CV |
|---------------------------------------|-------|--------|---------|---------------|------------|------|
| Masse volumique (kg.m ⁻³) | 325 | 577 | 426 | 359 | 47.8 | 11.2 |
| MOE (MPa) | 3 756 | 19 849 | 8 799 | 5 188 | 2 615 | 29.7 |
| MOR (MPa) | 10 | 70 | 31 | 15 | 11.4 | 36.5 |
| MOE E-Scan (MPa) | 5 384 | 18 164 | 9 751 | 6 649 | 2 247.4 | 23.1 |
| MOE Sylvatest (MPa) | 5 474 | 18 621 | 10 358 | 6 982 | 2 434.4 | 23.5 |
| MOE MTG (MPa) | 5 043 | 17 417 | 9 149 | 6 182 | 2 105.8 | 23.0 |
| MV scanner (kg.m ⁻³) | 327 | 595 | 426 | 357 | 49.3 | 11.6 |
| KDR ₃ | 0 | 0.52 | 0.25 | 0.07 | 0.10 | 38.8 |
| KDR ₄ | 0 | 0.55 | 0.24 | 0.07 | 0.10 | 40.9 |
| SoG ₃ | 0.43 | 0.90 | 0.66 | 0.52 | 0.09 | 13.5 |
| SoG ₄ | 0.38 | 0.90 | 0.65 | 0.51 | 0.09 | 14.4 |

TABLE 2.14 – Récapitulatif des variables mesurées pour l'épicéa

de pente de fil est la mieux corrélée avec le MOE et le MOR. Les paramètres SoG₃ et SoG₄ expliquent un pourcentage plus important de la variation du MOR que la masse volumique et un pourcentage très proche pour la variation du MOE. L'indice de nodosité KDR₃ explique quant à lui pratiquement le même pourcentage de variation du MOR que la masse volumique (0.32 pour 0.33). Ces observations montrent que dans le cas de l'épicéa les indices de nodosité et de pente de fil peuvent aussi être de très bon indicateurs de la qualité mécanique d'un sciage.

| Mesure de module d'élasticité | | | | | | |
|-------------------------------|------------|------------|------------|------------------|------------------|-----------------------------------|
| - | MOE | DENS | MOE E-Scan | MOE Sylvatest | MOE MTG | |
| MOR | 0.71 (***) | 0.33 (***) | 0.60 (***) | 0.50 (***) | 0.59 (***) | |
| MOE | - | 0.52 (***) | 0.87 (***) | 0.78 (***) | 0.89 (***) | |
| DENS | - | - | 0.54 (***) | 0.61 (***) | 0.55 (***) | |
| Donnees Scanner | | | | | | |
| - | MOE | DENS | Dens RX | KDR ₃ | KDR ₄ | SoG ₃ SoG ₄ |
| MOR | 0.71 (***) | 0.33 (***) | 0.31 (***) | 0.32 (***) | 0.27 (***) | 0.49 (***) 0.48 (***) |
| MOE | - | 0.52 (***) | 0.50 (***) | 0.34 (***) | 0.26 (***) | 0.47 (***) 0.45 (***) |
| DENS | - | - | 0.99 (***) | 0.06 (***) | 0.03 (***) | 0.09 (***) 0.08 (***) |

TABLE 2.15 – Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation

2.7 Régressions linéaires

Pour prédire le module d'élasticité et la résistance des différents sciages, il a été choisi dans un premier temps d'utiliser des régressions linéaires en considérant chacune des données d'entrée du modèle comme indépendante, en d'autres termes il est recherché une prédiction Y (MOE ou MOR) à partir de k données d'entrée indépendantes qui suit une relation de la forme :

$$Y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_kx_k + \epsilon \quad (2.9)$$

Les coefficients a_i de la régression sont tels que le carré de la distance entre les valeurs prédites et les valeurs expérimentales est minimisé. La différence entre la prédiction du modèle et la valeur expérimentale est appelée résidu. La qualité de la relation prédite par le modèle peut être calculée à partir de ces résidus par exemple en calculant : la somme des carrés des résidus ou bien la racine carré de la somme des carrés des résidus. Le coefficient de détermination r^2 est quant à lui un estimateur du pourcentage de variation de Y expliquée par les données d'entrée. Le problème de cet indicateur est qu'ajouter de nouvelles variables conduira toujours à son augmentation, c'est pourquoi dans cette partie sera considéré un r^2 ajusté prenant en compte ce phénomène.

Dans cette étude le nombre de paramètres à inclure dans le modèle de prédiction pouvant être grand, il est nécessaire d'utiliser des outils statistiques pour déterminer le choix ou non de l'ajout d'un paramètre au modèle. Il a pour cela été choisi d'utiliser la méthode de régression pas à pas. Cette méthode consiste à juger de la significativité de l'ajout d'un paramètre sur la diminution des résidus. En effet, l'algorithme utilisé procède de la manière suivante : le coefficient de détermination r^2 de chaque variable considérée seule est calculé, la régression pas à pas intègre la variable avec le plus grand r^2 puis des variables sont ajoutées au modèle à la condition que la différence de la somme des résidus au carré obtenue en ajoutant la variable soit statistiquement significative. Cette significativité est déterminée par la valeur de la p-value d'un test de Fisher. Le seuil choisi sur la p-value est ici de 0.05.

2.7.1 Chêne

Le tableau 2.16 présente les résultats de la prédiction du MOE et du MOR à l'aide de régressions linéaires multiples. Plusieurs modèles ont été testés intégrant différents paramètres en données d'entrée, la désignation du modèle et les données d'entrée correspondantes sont respectivement données dans la première et deuxième colonne. Les variables retenues sont dans la troisième colonne. Enfin la qualité de la prédiction est donnée par le coefficient de détermination (r^2) et la racine carré de la somme du carré

CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION
DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

des erreurs (RMSE). La partie supérieure du tableau concerne la prédiction du MOE et la partie inférieure celle du MOR.

Les deux premiers modèles testés (MV1 et MV2) montrent que l'apport de données de nodosité issues du scanner permet une forte amélioration de la prédiction du MOE (r^2 passant de 0.19 à 0.41) et du MOR (r^2 passant de nul à 0.28) en addition à la masse volumique seule comme données d'entrée. Il apparait que l'apport de la nodosité est beaucoup plus important pour la prédiction du MOR ($r^2=0.22$ à 0.35) que pour le MOE ($r^2=0.74$ à 0.76). Le modèle MV1 ne donne aucun résultat car la masse volumique seule n'atteint pas le seuil de significativité statistique nécessaire pour rentrer dans le modèle pour la prédiction du MOR.

Ces résultats montrent que la prédiction de la résistance du chêne est peu concluante à partir des données non destructives disponibles dans cette étude. En effet, le coefficient de détermination maximum obtenu est de seulement 0.35, ces résultats font présager des difficultés qui seront rencontrées lors du classement mécanique du chêne par machine. Les résultats qui vont être présentés sur le douglas et l'épicéa dans les parties suivantes montrent qu'il serait possible d'améliorer cette prédiction par la mesure de la pente de fil.

| MOE | | | | |
|-------------|--|--|-------|---------|
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | MV | 0.19 | 994.2 |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | 0.41 | 1 238.5 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.72 | 1 132.2 |
| E-Control | E-Control | E-Control | 0.76 | 1 072.3 |
| MTG | MTG | MTG | 0.80 | 1 014.3 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.74 | 1 103.2 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₃ | 0.76 | 1 075.7 |
| MOR | | | | |
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | - | - | - |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | KDR ₄ | 0.28 | 6.9 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.18 | 5.9 |
| E-Control | E-Control | E-Control | 0.23 | 6.5 |
| MTG | MTG | MTG | 0.24 | 6.6 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.22 | 6.4 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₄ | 0.35 | 7.4 |

TABLE 2.16 – Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (chêne)

2.7.2 Douglas

Le tableau 2.17 présente les mêmes types de résultats que ceux réalisés sur le chêne mais avec en plus la mesure de pente de fil (le calcul des paramètres SoG3 et SoG4 a pu être effectué). Ainsi les modèles MV3 et MV4 s'ajoutent aux modèles présentés précédemment. Le modèle MV3 correspond à l'ajout des paramètres de pente de fil à la masse volumique et le modèle MV4 à la combinaison des données de nodosité et des données de pente de fil. En suivant la même logique, les modèles E-Scan3 et E-Scan4 ont eux aussi été ajoutés. L'analyse des résultats obtenus pour les coefficients de détermination des modèles MV1 à MV4 montre que l'ajout de la pente de fil ou de la nodosité seule conduit à une amélioration du même ordre de grandeur de la prédiction du MOE. Le r^2 passe de 0.53 à 0.72 après ajout de la nodosité et de 0.53 à 0.75 après ajout de la pente de fil. Enfin la combinaison des deux à la masse volumique permet de nouveau une légère amélioration. Concernant la prédiction du MOR, l'apport de la pente de fil semble ici beaucoup plus intéressant, en effet le coefficient de détermination passe de 0.23 à 0.42 après ajout de la nodosité et de 0.23 à 0.53 après ajout de la pente de fil. Enfin de la même façon que pour le MOE, l'ajout des deux paramètres ne permet qu'une faible amélioration par rapport à l'ajout de la pente de fil seul.

En ce qui concerne les modèles composés de méthode de mesure du module d'élasticité et de données de nodosité et de pente de fil (les modèles E-Scan1 à E-Scan4) les observations faites précédemment ne sont plus valables sur la prédiction du MOE. En effet, ajouter des mesures de nodosité ou de pente de fil à la mesure réalisée par l'E-Scan ne permet aucune amélioration de la prédiction du MOE. En revanche, pour la prédiction du MOR ajouter des paramètres de nodosité améliore sensiblement la prédiction ($r^2=0.44$ à 0.51 entre les modèles E-Scan 1 et E-Scan2). L'amélioration apportée par la mesure de pente de fil est encore plus importante ($r^2=0.44$ à 0.58 entre les modèles E-Scan1 et E-Scan3) et enfin comme pour les modèles à base de masse volumique, la combinaison des deux n'apporte quasiment aucune amélioration par rapport au modèle avec la pente de fil seule.

2.7.3 Epicéa

Le tableau 2.18 présente les résultats des différents modèles de régression linéaire multiple dans le cas de l'épicéa. Les modèles sont composés des mêmes données d'entrée que ceux du douglas. Concernant la prédiction du MOE, les conclusions faites dans le cas du douglas sont aussi valables ici: les données de pente de fil permettent une amélioration plus forte que les données de nodosité, et la combinaison des deux ne présente quasiment aucune différence en comparaison au modèle pente de fil seul. L'ajout des singularités locales à une mesure de module ne permet ici aussi quasiment aucune amélioration. L'apport plus

CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION
DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

| MOE | | | | |
|-------------|--|--|-------|---------|
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | MV | 0.53 | 1 256.8 |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | 0.72 | 1 145 |
| MV3 | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & SoG ₄ | 0.75 | 1 106.4 |
| MV4 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | 0.78 | 1 067.2 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.68 | 1 210.5 |
| MTG | MTG | MTG | 0.84 | 901.30 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.80 | 946.80 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | 0.84 | 932.80 |
| E-Scan3 | E-Scan & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & SoG ₃ | 0.84 | 934.50 |
| E-Scan4 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₄ | 0.84 | 922.2 |
| MOR | | | | |
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | MV | 0.23 | 5.1 |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | 0.42 | 6.0 |
| MV3 | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | 0.53 | 6.1 |
| MV4 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | 0.55 | 6.0 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.34 | 5.8 |
| MTG | MTG | MTG | 0.46 | 6.1 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.44 | 6.1 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₄ | 0.51 | 6.1 |
| E-Scan3 | E-Scan & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & SoG ₃ | 0.58 | 6 |
| E-Scan4 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & SoG ₃ & SoG ₄ | 0.58 | 6 |

TABLE 2.17 – Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (douglas)

important des paramètres de pente de fil sur la prédiction du MOR peut aussi être mis en évidence au vu de ces différents résultats. Enfin, les coefficients de détermination observés entre les différents modèles et le MOR sont tous plus élevés que ceux obtenus dans le cas du douglas.

| MOE | | | | |
|-------------|--|---|-------|---------|
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | MV | 0.52 | 1 307.3 |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | MV & KDR ₃ | 0.70 | 1 203.2 |
| MV3 | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | 0.77 | 1 099 |
| MV4 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & KDR ₄ & SoG ₃ | 0.78 | 1 089 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.78 | 1 077.1 |
| MTG | MTG | MTG | 0.89 | 833.8 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.87 | 871.8 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₄ | 0.87 | 867.1 |
| E-Scan3 | E-Scan & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & SoG ₄ | 0.88 | 847.1 |
| E-Scan4 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ | 0.88 | 844 |
| MOR | | | | |
| Désignation | Données d'entrée | Variables retenues | r^2 | RMSE |
| MV1 | MV | MV | 0.33 | 5.4 |
| MV2 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ | MV & KDR ₃ | 0.51 | 5.7 |
| MV3 | MV & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & SoG ₄ | 0.63 | 5.5 |
| MV4 | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | MV & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ | 0.64 | 5.5 |
| Sylvatest | Sylvatest | Sylvatest | 0.50 | 5.7 |
| MTG | MTG | MTG | 0.59 | 5.6 |
| E-Scan1 | E-Scan | E-Scan | 0.60 | 5.6 |
| E-Scan2 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ | E-Scan & KDR ₄ | 0.62 | 5.5 |
| E-Scan3 | E-Scan & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & SoG ₄ | 0.67 | 5.4 |
| E-Scan4 | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₃ & SoG ₄ | E-Scan & KDR ₃ & KDR ₄ & SoG ₄ | 0.67 | 5.4 |

TABLE 2.18 – Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (épicéa)

2.7.4 Conclusion sur les régressions linéaires multiples

Les modèles utilisant des régressions linéaires multiples permettent d'obtenir des résultats satisfaisant à condition de prendre en compte les mesures de nodosité et de pente de fil. Il a été montré que dans le cas des résineux ces mesures s'avèrent très intéressantes pour améliorer la prédiction de la résistance quelque soit les autres paramètres d'entrée. En revanche, l'ajout de la mesure de singularités à une mesure vibratoire du module d'élasticité n'améliore quasiment pas la prédiction du MOE; cette dernière étant déjà très bonne. De plus ces résultats ont mis en évidence que la pente de fil semble être un meilleur indicateur que le calcul du KDR. La combinaison des deux n'apporte quasiment aucune amélioration, ce phénomène étant dû au fait que ces deux paramètres sont fortement liés l'un à l'autre. La déviation de la pente de fil autour des noeuds fait de cette mesure un excellent indicateur de la nodosité tout en prenant en compte la zone de faiblesse mécanique

autour des noeuds. Les prédictions des propriétés mécaniques sont meilleures dans le cas de l'épicéa que du douglas. Enfin, la prédiction du MOR dans le cas du chêne est très peu précise puisque le coefficient de détermination est de seulement 0.35 entre la meilleure prédiction et la valeur destructive.

Une autre méthode de prédiction des propriétés mécaniques va maintenant être détaillée. Elle est basée sur des principes physiques et sur la théorie de l'élasticité pour intégrer les mesures des différentes singularités de manière plus précises et plus locales que les différents paramètres utilisés jusqu'à présent. La vitesse de calcul doit cependant rester compatible avec les cadences imposées par l'industrie.

2.8 Modèle analytique

Le modèle proposé est basé sur la théorie de l'élasticité linéaire et utilise les informations locales issues du scanner CombiScan+ décrites dans le chapitre précédent. Pour rappel, ces mesures consistent en une mesure locale de masse volumique, de nodosité et de pente de fil. Ces informations locales étant en fait des images, la modélisation consiste à considérer chacun des pixels comme un élément possédant des propriétés mécaniques et géométriques uniques et dépendantes des mesures locales. Il est aussi à noter qu'il n'a été considéré aucune différence entre le comportement mécanique du bois en compression et en traction. Cette lourde hypothèse reste cependant nécessaire puisque l'objectif de ce modèle est de prédire les propriétés mécaniques de sciages en vue de leur classement mécanique; or au moment du classement, il n'est pas possible de connaître les sollicitations qui leur seront appliquées lors de leur utilisation. Le système de coordonnées utilisé dans cette partie est décrit figure 2.19.

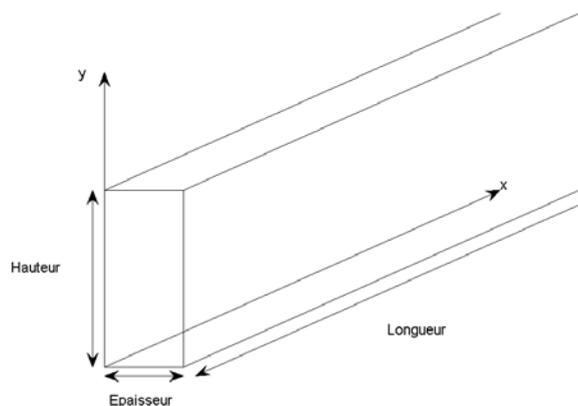


FIGURE 2.19 – Système de coordonnées

2.8.1 Prise en compte de la pente de fil

Dans un premier temps le modèle va être décrit dans sa version prenant en compte la mesure de la pente de fil. La non prise en compte de cette variable sera alors une simplification de certaines des équations qui vont maintenant être décrites.

2.8.1.1 Estimation du module d'élasticité local

La première étape consiste à assigner un module d'élasticité $E(x, y)$ à chaque élément du sciage. Pour cela, il est considéré que le module dépend de la masse volumique et de la pente de fil. Il a été choisi d'utiliser une relation linéaire suivant le formalisme des formules de Guitard. Concernant l'influence de la pente de fil, une formule (détaillée ci-après) basée sur la formule de Hankinson est utilisée. $E(x, y)$ est calculé à l'aide de l'équation 2.10.

$$E(x, y) = g_1 + g_2 \times (\rho(x, y) - g_3) \times \frac{H[\theta_{top}(x, y)] + H[\theta_{bot}(x, y)]}{2} \quad (2.10)$$

Où :

- g_1 , g_2 et g_3 sont les coefficients de la relation linéaire entre la masse volumique et le module d'élasticité,
- θ_{top} et θ_{bot} sont respectivement les valeurs de pente de fil mesurées localement sur les deux faces des sciages,
- H est une fonction donnant le facteur de réduction entre le module d'élasticité parallèle au fil et le module d'élasticité à l'angle mesuré (voir equation 2.11).

La fonction H est définie équation 2.11 où E_0 est le module d'élasticité parallèle au fil, k une constante représentant le rapport $\frac{E_{90}}{E_0}$ avec E_{90} le module d'élasticité perpendiculaire au fil et n une constante. La réduction de module d'élasticité due à la pente de fil est prise comme la moyenne des réductions induites sur chacune des faces. La démarche de calcul du module d'élasticité local est illustrée figure 2.20.

$$H(\theta) = \frac{E(\theta)}{E_0} = \frac{k}{\sin^n(\theta) + k\cos^n(\theta)} \quad (2.11)$$

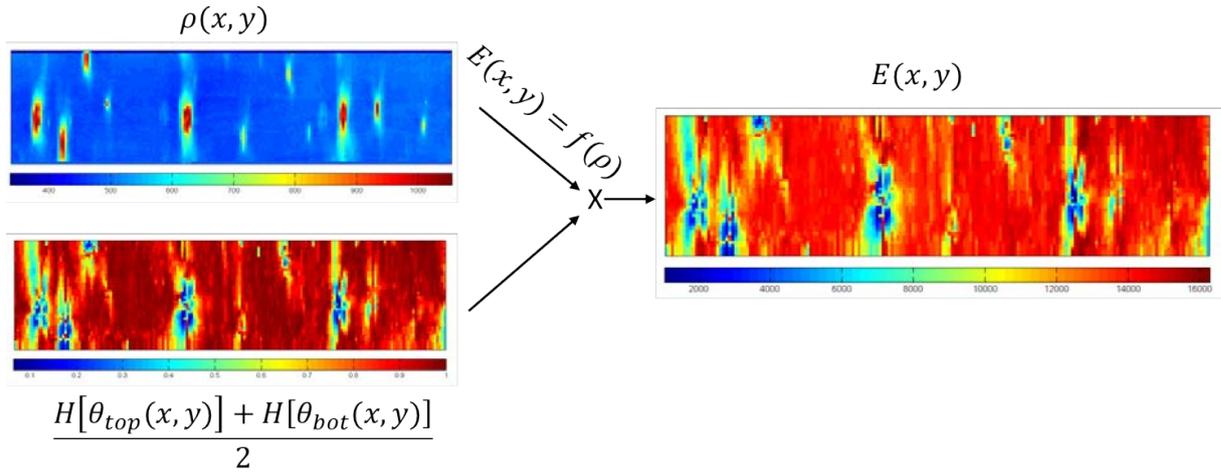


FIGURE 2.20 – Illustration de la démarche de calcul du module d'élasticité local

2.8.1.2 Calcul de la rigidité efficace en flexion

La deuxième étape consiste à calculer la rigidité efficace en flexion $(EI)_{ef}$ pour chaque section de poutre. C'est à dire la rigidité efficace sur chaque "colonne" de pixels de l'image et cela pour tout x . $(EI)_{ef}$ est donnée par l'équation 2.12 où E_i , I_i , A_i et a_i sont respectivement le module d'élasticité, le moment d'inertie, l'aire et la distance à la fibre neutre de chaque élément.

$$(EI)_{ef}(x) = \sum_{i=1}^{ny} (E_i I_i + E_i A_i a_i^2) \quad (2.12)$$

L'inertie de chaque élément va être impactée en fonction de la valeur du KDR . En effet, il est défini une épaisseur locale du sciage $e(x, y)$ à l'aide de l'équation 2.13, où α est un paramètre qui permet d'accorder un poids plus ou moins important à la présence de noeuds.

$$e(x, y) = 1 - \alpha \times KDR(x, y) \quad (2.13)$$

Du fait de cette variation d'épaisseur, la position de la fibre neutre est elle aussi variable le long de l'axe x .

2.8.1.3 Estimation du module d'élasticité global

La flèche à mi-travée du sciage équivalent peut maintenant être calculée en utilisant le principe des travaux virtuels (voir équation 2.14). M_{f_i} représente le moment de flexion dû à un essai de flexion 4 points auquel est soumis chaque élément le long de l'axe x , M_{v_i} est le moment de flexion dû à un effort unitaire à mi-travée et $(EI)_{ef}(i)$ est la rigidité efficace en flexion calculée précédemment en chaque x . Enfin, Δl_i est la longueur d'un élément (en pratique $\Delta l_i=1\text{cm}$ et représente la résolution des images suivant la direction x).

$$Fleche\left(\frac{L}{2}\right) = \sum_{i=1}^{nx} \frac{M_{f_i} M_{v_i}}{(EI)_{ef}(i)} \Delta l_i \quad (2.14)$$

Finalement, le module d'élasticité global est calculé par l'application directe de la théorie des poutres en utilisant l'équation 2.15 où F est le chargement ayant induit le moment de flexion M_{f_i} , l est la portée et I l'inertie du "vrai" sciage.

$$MOE = \frac{23Fl^3}{648IFleche\left(\frac{L}{2}\right)} \quad (2.15)$$

2.8.1.4 Estimation des contraintes admissibles locales

Afin d'estimer le module à rupture, il est nécessaire de définir une contrainte limite à chacun des éléments. Cette valeur a été choisie comme dépendante du module d'élasticité (directement proportionnelle en pratique) ainsi que de la pente de fil et est donnée par l'équation 2.16. L'influence de la pente de fil est prise en compte en utilisant la même fonction H décrite précédemment mais en utilisant un jeu de paramètres différents pour prendre en compte l'influence différente de la pente de fil selon la propriété mécanique étudiée.

$$\sigma_{lim}(x, y) = K \times MOE \times \frac{H[\theta_{top}(x, y)] + H[\theta_{bot}(x, y)]}{2} \quad (2.16)$$

2.8.1.5 Calcul des contraintes normales

Les contraintes normales présentées dans chaque élément sont ensuite calculées en utilisant l'équation 2.17 où $E_i(x, y)$ est le module d'élasticité local défini précédemment, M_{f_i} le moment de flexion, a_i la distance de l'élément à la fibre neutre et h_i la hauteur de l'élément.

$$\sigma(x, y) = \frac{E_i(x, y)a_i M_{f_i}(x)}{(EI)_{ef}(x)} + \frac{E_i(x, y)\left(\frac{h_i}{2}\right) M_{f_i}(x)}{(EI)_{ef}(x)} \quad (2.17)$$

2.8.1.6 Estimation de la résistance à la flexion

Finalement, l'estimation du module à rupture consiste à augmenter le moment de flexion jusqu'à ce qu'un pourcentage N de pixels de l'image soient "cassés"; c'est à dire jusqu'à ce qu'un pourcentage N d'éléments voient leur contrainte normale dépasser la contrainte limite qui leur avait été assignée. Lorsque ce pourcentage est atteint (à un moment de flexion désigné par $M_{f_{lim}}$, le MOR est alors calculé via l'équation 2.18, où I et h représentent respectivement l'inertie et la hauteur du "vrai" sciage.

$$MOR = \frac{M_{f_{lim}}}{\frac{I}{h/2}} \quad (2.18)$$

2.8.2 Sans prise en compte de la pente de fil

Dans le cas du chêne où la mesure de pente de fil n'est pas disponible ou simplement pour quantifier l'apport de la pente de fil sur la prédiction, une version du modèle sans pente de fil a été créé. Dans ce cas les équations 2.10 et 2.16 sont respectivement remplacées par les équations 2.19 et 2.20.

$$E(x, y) = g_1 + g_2 \times (\rho(x, y) - g_3) \quad (2.19)$$

$$\sigma_{lim}(x, y) = K \times E(x, y) \quad (2.20)$$

2.8.3 Combiné avec une mesure de module d'élasticité non-destructive

Il peut être intéressant dans certains cas de profiter de la très bonne prédiction du module d'élasticité par des méthodes non-destructives en les intégrant dans la formulation du modèle. Dans ce cas, l'équation 2.10 est simplement remplacée par l'équation 2.21. La dépendance du module d'élasticité avec la masse volumique est ainsi déplacée dans l'estimation du module d'élasticité par la machine non-destructive. Le module d'élasticité global estimé est modifié localement par la mesure de la pente de fil.

$$E(x, y) = MOE_{non-destructif} \times \frac{H[\theta_{top}(x, y)] + H[\theta_{bot}(x, y)]}{2} \quad (2.21)$$

2.8.4 Résultats de la prédiction du modèle analytique

Les figures 2.21 à 2.23 montrent les résultats de la modélisation pour différentes variantes du modèle pour les trois essences étudiées. La dénomination (X) correspond au modèle sans prise en compte de la pente de fil, (X+pdf) la version avec et enfin les modèles (X) & E-Scan et (X+pdf) & E-Scan correspondent aux deux versions précédentes combinées à la mesure de module d'élasticité estimé par l'E-Scan.

Les différents résultats présentés sont ceux obtenus après optimisation des différents paramètres décrits dans les équations constitutives du modèle. Cette optimisation consiste en une minimisation de la somme des erreurs au carré entre les résultats de la modélisation et les valeurs obtenues de manières destructives. Ces différents paramètres pour le cas du modèle (X+pdf) sont présentés dans le tableau 2.19.

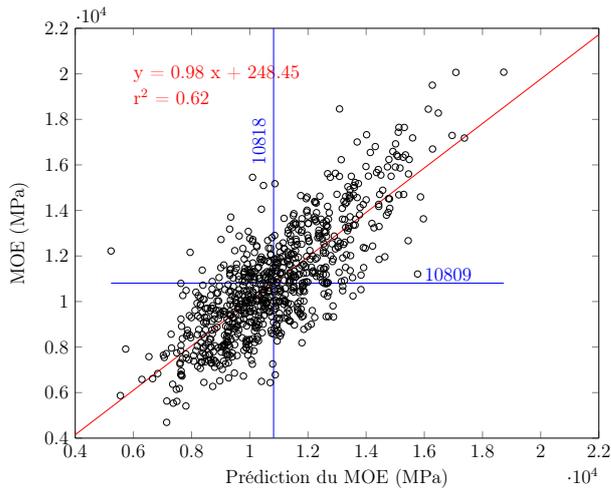
| | | Epicéa | | Douglas | |
|---|----------|--------|------|---------|------|
| | | MOE | MOR | MOE | MOR |
| Coefficient multiplicatif entre E et σ | K | - | 4.87 | - | 4.67 |
| Pourcentage d'éléments «cassés» | N | - | 0.93 | - | 1.17 |
| Paramètres de la relation entre E et ρ | g_1 | 15 898 | - | 13 722 | - |
| | g_2 | 35 169 | - | 35 555 | - |
| | g_3 | 0.52 | - | 0.48 | - |
| Coefficient de réduction de l'épaisseur | α | 0.88 | 0.89 | 0.70 | 0.84 |
| Paramètres de la formule de Hankinson | k | 0.015 | 0.02 | 0.010 | 0.03 |
| | n | 1.95 | 2.26 | 2.20 | 2.22 |

TABLE 2.19 – Paramètres du modèle (X+pdf) pour les deux essences étudiées

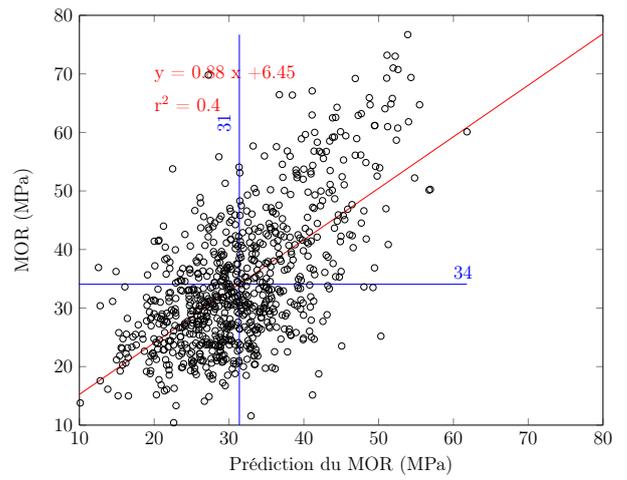
A titre d'exemple, pour le douglas, les paramètres g_1 , g_2 et g_3 valent respectivement 13 722, 35 555 et 0.48, ce qui correspond à un module d'élasticité égal à 13722 pour une masse volumique égale à 480 kg.m^{-3} et une augmentation linéaire en fonction de la masse volumique. Les paramètres peuvent sembler différents pour les deux essences mais décrivent en réalité presque la même relation. Le coefficient α de la réduction d'épaisseur est quant à lui proche de 0.8 et les paramètres de Hankinson sont respectivement égaux à 0.03 pour le coefficient k représentant le rapport $\frac{E_{90}}{E_0}$ et 2.22 pour le coefficient n . Ces valeurs sont assez proches de ce qui peut être trouvé dans la littérature même si le coefficient k semble être faible [4]. Enfin le coefficient multiplicatif reliant le module d'élasticité et la résistance admissible est égale à environ 5, ce qui correspond à une résistance de 50 MPa pour du bois sans défaut possédant un module de 10 000 MPa. Enfin le dernier paramètre N représente un pourcentage d'environ 1.17% de la surface du sciage. Dans toutes les autres variantes du modèle dans le cas des deux essences résineuses, les différents paramètres possèdent des ordres de grandeur similaires.

Les figures 2.21 et 2.22 montrent que quelque soit l'essence, l'apport de la pente de fil permet une très forte amélioration de la prédiction tant pour le MOE (passant de 0.62 à 0.75 et de 0.62 à 0.79 pour le douglas et l'épicéa respectivement) que pour le MOR (de 0.4 à 0.58 pour le douglas et de 0.48 à 0.67 pour l'épicéa). Le modèle avec prise en compte de la pente de fil permet même une meilleure prédiction du MOE que la méthode ultrasonore testée. Cependant, la modélisation et l'ajout de singularités dans le cas des résineux ne permet aucune amélioration de la prédiction du MOE par rapport à l'E-Scan seul. Les coefficients de détermination avec le MOE sont les même que ceux de l'E-Scan utilisé seul, en revanche dans le cas du MOR l'amélioration est quant à elle importante. Les coefficients obtenus passent de 0.47 à 0.62 dans le cas du douglas et de 0.60 à 0.68 pour l'épicéa. Cette amélioration est donc plus importante dans le cas du douglas. Enfin, les résultats de la prédiction du MOR est bien meilleure dans le cas de l'épicéa, cela

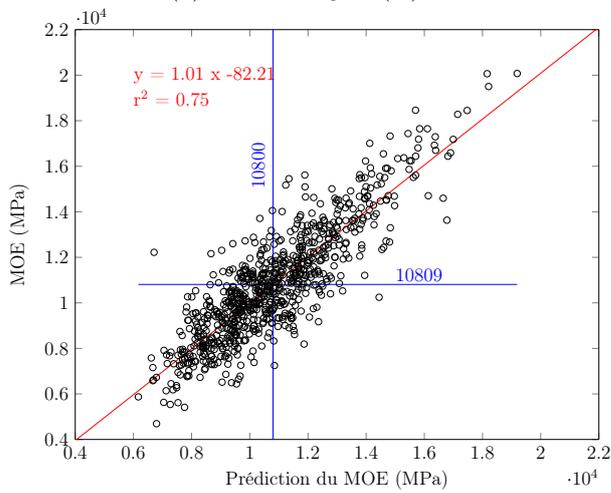
est directement dû à la construction du modèle et au fait que les résistances limites sont directement proportionnelles au module d'élasticité et donc totalement dépendant de la corrélation intrinsèque entre MOE et MOR. Pour rappel cette corrélation est bien meilleure dans le cas de l'épicéa (0.71 contre 0.58). Une autre manière de juger de la qualité de la modélisation est de calculer la racine carré de la somme des erreurs au carré (RMSE), pour le modèle ($X + pdf$) cette valeur est égale à environ 1 200 MPa (1 188MPa pour l'épicéa et 1 224MPa pour le douglas), cela ne représente qu'environ 12% de la valeur moyenne observée sur le MOE. Concernant le MOR cette erreur représente environ 21% de la valeur moyenne et est égale à 6.5MPa pour l'épicéa et 7.9MPa pour le douglas.



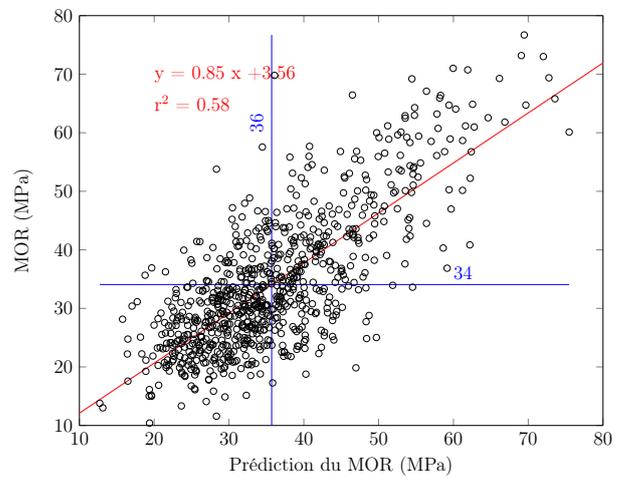
(a) MOE douglas (X)



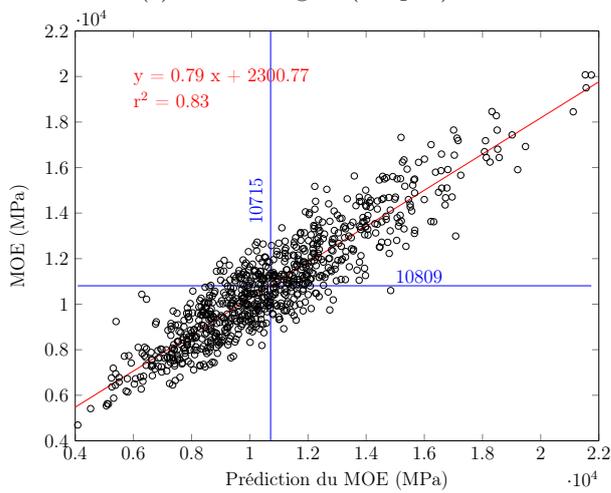
(b) MOR douglas (X)



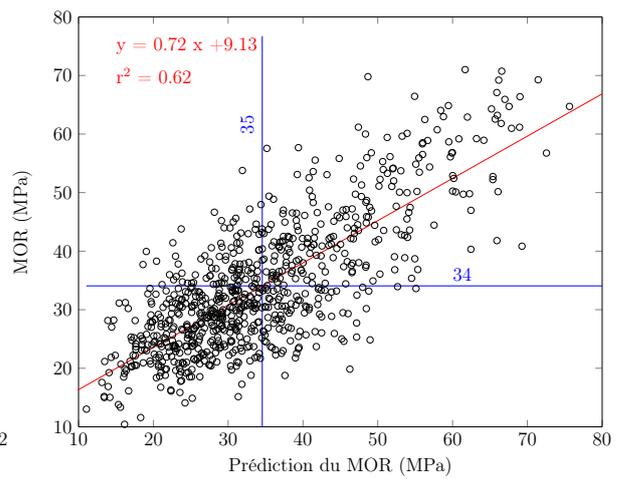
(c) MOE douglas (X+pdf)



(d) MOR douglas (X+pdf)



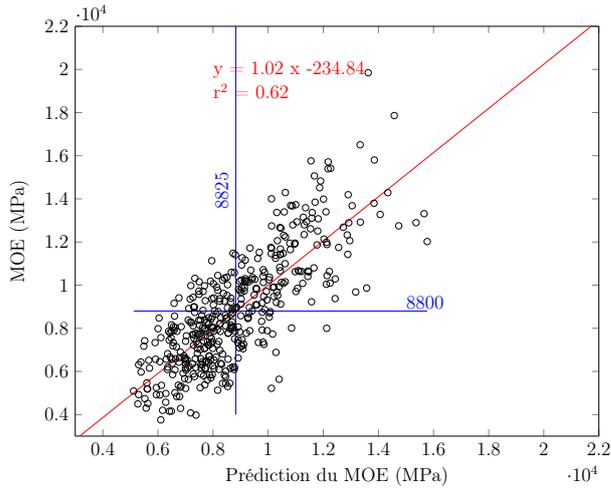
(e) MOE douglas (X+pdf) & E-Scan



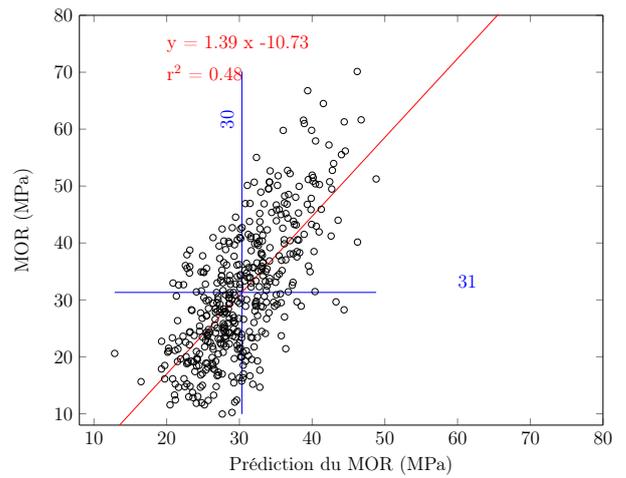
(f) MOR douglas (X+pdf) & E-Scan

FIGURE 2.21 – Résultats modélisation douglas

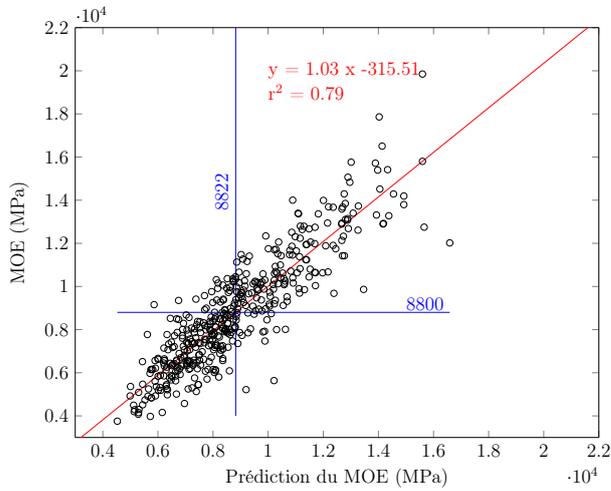
CHAPITRE 2. CONTRÔLES NON DESTRUCTIFS ET MODÈLES DE PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES



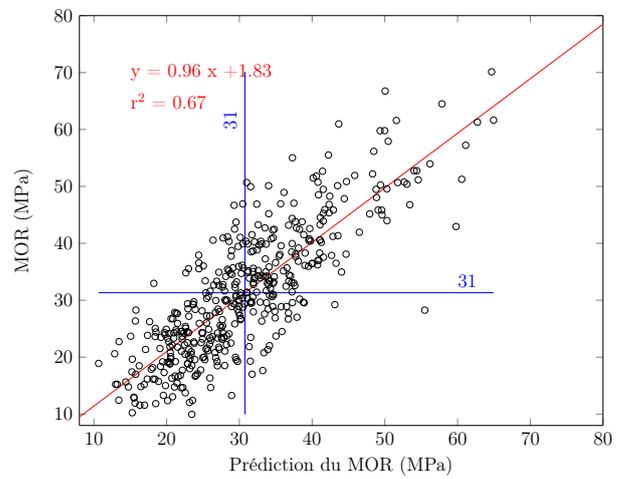
(a) MOE épicéa (X)



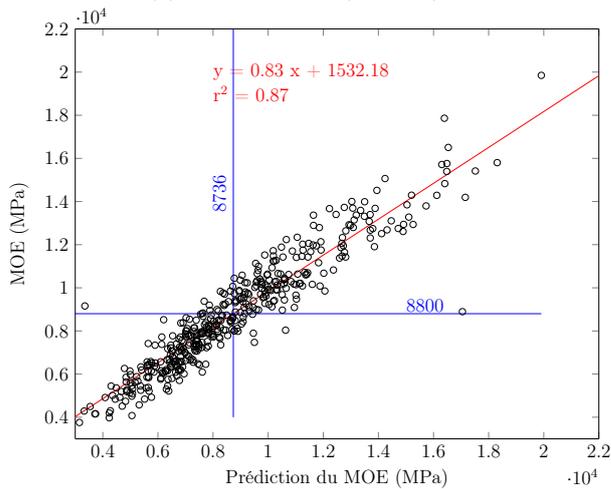
(b) MOR épicéa (X)



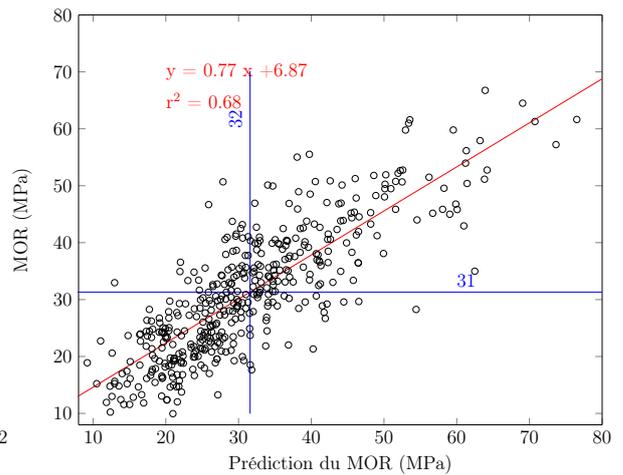
(c) MOE épicéa (X+pdf)



(d) MOR épicéa (X+pdf)



(e) MOE épicéa (X+pdf) & E-Scan



(f) MOR épicéa (X+pdf) & E-Scan

FIGURE 2.22 – Résultats modélisation épicéa

La figure 2.23 montre quant à elle les résultats de la modélisation dans le cas du chêne où seules les variantes sans pente de fil ont pu être testées. Les résultats sont beaucoup moins bons que dans le cas des résineux. Dans le cas où le scanner est utilisé seul, les coefficients de détermination sont respectivement égaux à 0.34 et 0.11 pour le MOE et le MOR. Les résultats très faibles s'expliquent par les faibles corrélations entre la masse volumique et le MOE ($r^2=0.19$) et entre le MOE et le MOR ($r^2=0.36$). Cependant, la modélisation permet d'améliorer ces corrélations alors que la seule information disponible dans ce cas est la mesure locale de la masse volumique. En effet, les coefficients de détermination passent de 0.19 à 0.34 pour le MOE et d'une corrélation non significative à un coefficient de détermination égal à 0.11 pour le MOR. Cette amélioration est possible grâce au caractère local de la mesure qui permet le calcul du KDR. Enfin, l'ajout de la mesure de l'E-Scan au modèle permet seulement une amélioration du MOR par rapport à l'utilisation de l'E-Scan seul; le r^2 passe de 0.22 à 0.26 pour le MOR et est égale dans les deux cas à 0.74 pour le MOE.

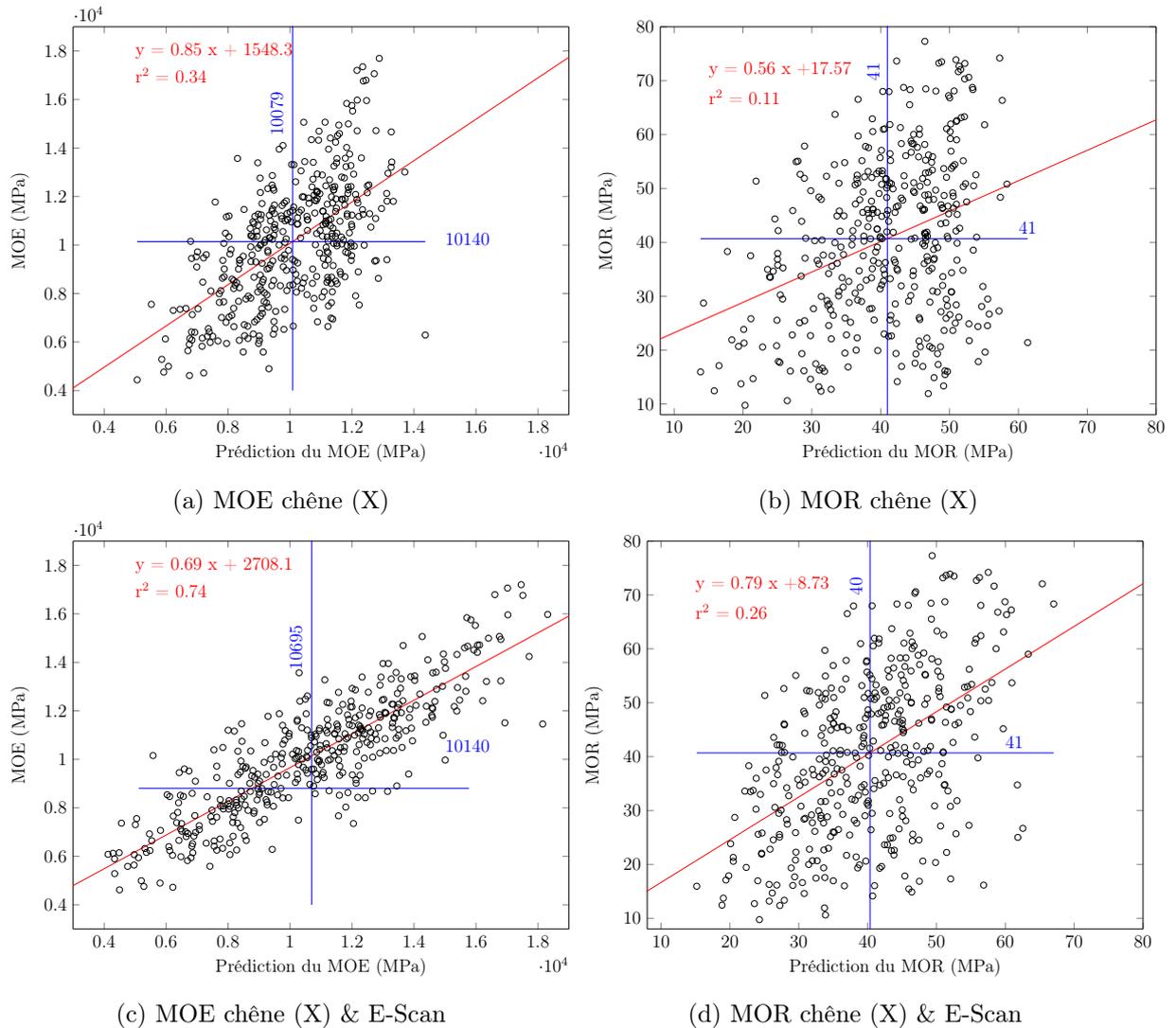


FIGURE 2.23 – Résultats modélisation chène

2.9 Conclusion sur la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques

Le tableau 2.20 présente les coefficients de détermination entre toutes les méthodes utilisées et présentées lors de ce chapitre et les valeurs de MOE et MOR obtenues de manière destructive. La première partie rappelle, à titre de comparaison, les relations intrinsèques existantes entre la masse volumique, le MOE et le MOR. La deuxième partie montre les corrélations observées pour les méthodes d'estimation du module d'élasticité. Enfin, les deux dernières parties permettent de comparer l'approche par régression linéaire et par modèle analytique. Les modèles analytiques (X) et (X+pdf) correspondent respectivement aux modèles par regressions linéaires MV2 et MV4, et les modèles (X) & E-Scan et (X+pdf) & E-Scan aux modèles E-Scan2 et E-Scan4 décrits dans la partie 2.7.

2.9. CONCLUSION SUR LA QUALITÉ DE LA PRÉDICTION DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES

| | | Douglas | | Epicéa | | Chêne | |
|--|--------------------|---------|------|--------|------|-------|------|
| | | MOE | MOR | MOE | MOR | MOE | MOR |
| Corrélations intrinsèques destructives | | | | | | | |
| Masse volumique | | 0.53 | 0.23 | 0.52 | 0.33 | 0.19 | 0 |
| MOE | | - | 0.58 | - | 0.71 | - | 0.36 |
| Machines/Méthodes | | | | | | | |
| Mesure de module | Sylvatest | 0.68 | 0.34 | 0.78 | 0.50 | 0.72 | 0.18 |
| | E-Control | - | - | - | - | 0.76 | 0.23 |
| | MTG | 0.84 | 0.46 | 0.89 | 0.59 | 0.80 | 0.24 |
| | E-Scan | 0.80 | 0.44 | 0.87 | 0.60 | 0.74 | 0.22 |
| Régression linéaire | (X) | 0.72 | 0.42 | 0.70 | 0.51 | 0.41 | 0.28 |
| | (X + pdf) | 0.78 | 0.55 | 0.78 | 0.64 | - | - |
| | (X) & E-Scan | 0.84 | 0.51 | 0.87 | 0.62 | 0.76 | 0.35 |
| | (X + pdf) & E-Scan | 0.84 | 0.58 | 0.88 | 0.67 | - | - |
| Modèle analytique | (X) | 0.62 | 0.40 | 0.62 | 0.48 | 0.34 | 0.11 |
| | (X + pdf) | 0.75 | 0.58 | 0.79 | 0.67 | - | - |
| | (X) & E-Scan | 0.83 | 0.48 | 0.87 | 0.61 | 0.74 | 0.26 |
| | (X + pdf) & E-Scan | 0.83 | 0.62 | 0.87 | 0.68 | - | - |

TABLE 2.20 – Qualité de la prédiction des propriétés mécaniques selon les différentes méthodes et machines proposées (coefficient de détermination r^2)

Les conclusions de ce chapitre sont que, quelque soit l'essence, les méthodes vibratoires de mesure de module d'élasticité possèdent de meilleurs coefficient de détermination que la méthode ultrasonore testée et ce à la fois pour le MOE et le MOR. De plus que la machine vibratoire utilisée soit portative ou intégrée dans une chaîne de production ne semble pas avoir d'influence; les coefficients de détermination de ces machines sont très proches les uns des autres.

L'ajout de la mesure de pente de fil permet une amélioration sensible des coefficients de détermination par rapport à des modèles utilisant seulement une information de masse volumique locale (permettant le calcul du KDR) et cela quelque soit l'essence de résineux testée ou la méthode utilisée (régression linéaire ou modèle analytique) aussi bien pour le MOE que le MOR.

Concernant l'ajout de mesures locales (nodosité ou pente de fil) à des estimations de module d'élasticité, l'amélioration est quasi-nulle pour la prédiction du MOE alors qu'elle est significative pour la prédiction du MOR. L'apport de la pente de fil apparait plus bénéfique que la mesure de masse volumique locale. Cela peut être dû à deux phénomènes : le premier étant que l'information de de pente de fil et plus particulièrement celle correspondante à sa déviation autour des noeuds est à la fois un indicateur de la nodosité et

prend mieux en compte la faiblesse mécanique de la zone de transition autour des noeuds, le deuxième phénomène provient des hypothèses faites pour le calcul du KDR qui peuvent entraîner des erreurs sur sa détermination.

La comparaison des modèles utilisant des régressions linéaires et les modèles analytiques montre que ceux prenant en compte la pente de fil permettent d'améliorer la prédiction du MOR de manière assez significative particulièrement dans le cas du douglas. Concernant la prédiction du MOE, les méthodes de régressions linéaires donnent de meilleurs résultats pour le modèle sans la mesure du module d'élasticité, ici aussi plus particulièrement dans le cas du douglas. Concernant le chêne, les coefficients de détermination obtenus sont faibles dans le cas du MOR, cela étant dû aux très faibles corrélations intrinsèques entre les différentes propriétés et à la construction des différents modèles qui sont basés sur ces relations.

Enfin, l'avantage des régressions linéaires étant la meilleure prédiction du MOE (qui peut déjà être assurée par des méthodes vibratoires), il a été choisi pour la suite de nos travaux de ne considérer uniquement les résultats du modèle analytique pour quantifier l'intérêt de ce type de machine du point de vue du classement mécanique final.

Pour comparer les différentes machines, la seule qualité de la prédiction des propriétés n'est pas suffisante, en effet dans le cadre du classement mécanique, l'information la plus importante est le résultat du classement. C'est pourquoi la comparaison de ces différentes machines selon la qualité mécanique et l'essence à classer va maintenant faire l'objet du chapitre suivant. Certains aspects inhérents au cadre normatif du classement mécanique par machine sont détaillés, puis les différents rendements et efficacités obtenus avec les différentes machines sont présentés. Une analyse économique est également effectuée permettant de répondre à la problématique du choix de la machine de classement selon la spécificité de production de la scierie souhaitant classer mécaniquement sa production par machine.

Chapitre 3

Classement mécanique du bois massif

3.1 Algorithme du réglage machine

Un algorithme de réglage machine a été développé puis a été utilisé pour obtenir les résultats présentés dans cette partie. Il permet le réglage d'une machine pour des combinaisons formées de 1,2 ou 3 classes, calculé sur 1,2 ou 3 propriétés indicatrices (IPs) en accord avec les recommandations de l'EN 14081. Les réglages devront cependant être vérifiés lors de tests de répétabilité des différentes machines qui n'ont pas été effectués dans cette étude. Le réglage machine peut se faire sur la base d'une seule IP, dans ce cas il est considéré qu'une seule valeur est attribuée à chaque sciage du lot utilisé pour effectuer le réglage machine. C'est le cas le plus simple et il correspond notamment aux machines de classement de mesure de module d'élasticité. Les sciages sont considérés comme appartenant à une classe donnée lorsque les valeurs d'IP de ce sous-lot sont supérieures au seuil sur l'IP calculé à partir des règles définies par l'EN 14081. Un exemple complet de la démarche sur la combinaison C24/C18/Rejet est décrit figure 3.1. Il apparaît sur cette figure que l'algorithme a pour objectif de placer le nombre de sciages maximum dans les classes les plus hautes. Le réglage doit de plus respecter trois conditions; les valeurs des propriétés mécaniques doivent être supérieures aux bornes définies dans l'EN338. Il faut aussi que la méthode de la matrice coût de l'EN 14081 soit vérifiée et enfin il faut plus de 20 sciages dans chaque classe. Cette dernière directive implique une impossibilité de procéder au réglage s'il n'est pas possible d'obtenir au minimum 20 pièces dans la classe la plus haute. Elle peut aussi conduire au déclassement de sciages si la condition n'est pas respectée pour les classes inférieures puisqu'il est permis dans la norme d'augmenter le seuil sur la classe supérieure jusqu'à obtenir un réglage correct. Au terme de la démarche deux seuils sont alors définis et permettront d'assigner de futurs sciages à la bonne classe. Il est à noter que les bornes sont légèrement modifiées par rapport à celles de l'EN338 pour prendre en compte la fiabilité du classement machine en comparaison avec le classement visuel. Ainsi la borne peut être divisée par 1.12 pour les classes inférieures ou égales à C30

et le module moyen d'élasticité doit être supérieur à seulement 95 % de la borne. Cette modification est équivalente à la définition d'un coefficient γ_m (coefficient de sécurité de l'Eurocode 5) différent entre du bois classé visuellement et par machine. Dans un cadre normatif global il a été choisi par les instances normatives de prendre ce phénomène en compte lors du réglage des machines de classement.

3.1. ALGORITHME DU RÉGLAGE MACHINE

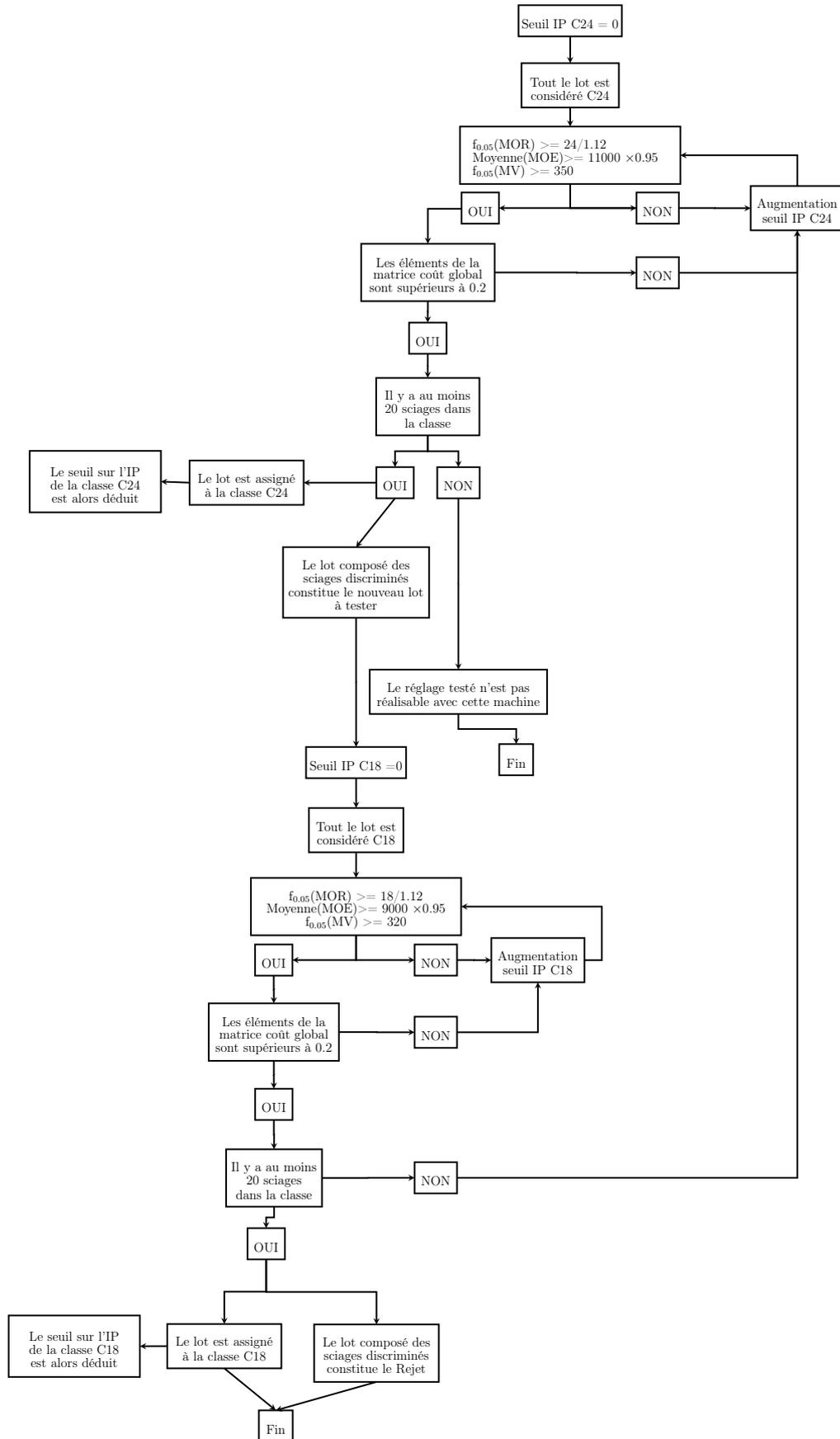


FIGURE 3.1 – Algorithme de réglage machine à une seule IP pour la combinaison C24/C18/Rejet

Il est aussi possible d'effectuer un réglage machine sur la base de plusieurs IPs, un exemple d'algorithme pour le réglage d'une machine pour classer la combinaison C24/Rejet à partir de deux IPs, l'une la mieux corrélée avec le MOE (IPMOE) et l'autre avec le MOR (IPMOR), est décrit figure 3.2. Le principe utilisé ici est de vérifier les propriétés de l'EN338 avec l'IP la mieux adaptée. Il faut remarquer que la propriété de masse volumique doit quand même être vérifiée. L'avantage du classement à plusieurs IPs est qu'il permet de ne vérifier la propriété mécanique qu'à partir de l'IP la plus appropriée (et donc possédant la meilleure corrélation). Malgré cela, il reste à définir l'ordre des propriétés dans lesquelles elles vont être testées, il a été choisi de tester toutes les combinaisons possibles et de garder la solution qui au final donnerait le plus grand nombre de sciages dans la classe supérieure. Ainsi dans le cas présenté, seules deux solutions sont possibles : commencer soit par le MOE soit par le MOR et finir par la propriété restante. La méthode de la matrice coût doit elle aussi toujours être vérifiée à l'issue de la procédure, si ce n'est pas le cas, il a été choisi d'augmenter les deux IPs de la classe concernée simultanément jusqu'à ce qu'elle soit vérifiée. L'attribution d'un sciage à une classe est alors régie par le fait que les deux IPs assignées au sciage soient toutes les deux supérieures aux seuils définis à l'issue de la procédure. L'exemple détaillé figure 3.2 montre le classement à 2 IPs pour une combinaison à une seule classe, le principe pour une combinaison à plusieurs classes reprend la même démarche que celle décrite figure 3.1 mais cette fois en considérant les deux IPs.

Dans la majeure partie des cas (et en particulier pour les essences étudiées) la masse volumique n'est pas discriminante, aussi l'algorithme du réglage à 3IPs n'est pas présenté. Le nombre d'ordres possibles pour le choix des IPs est alors de 6 et l'ordre retenu celui qui donne la proportion de sciages la plus élevée dans la classe supérieure.

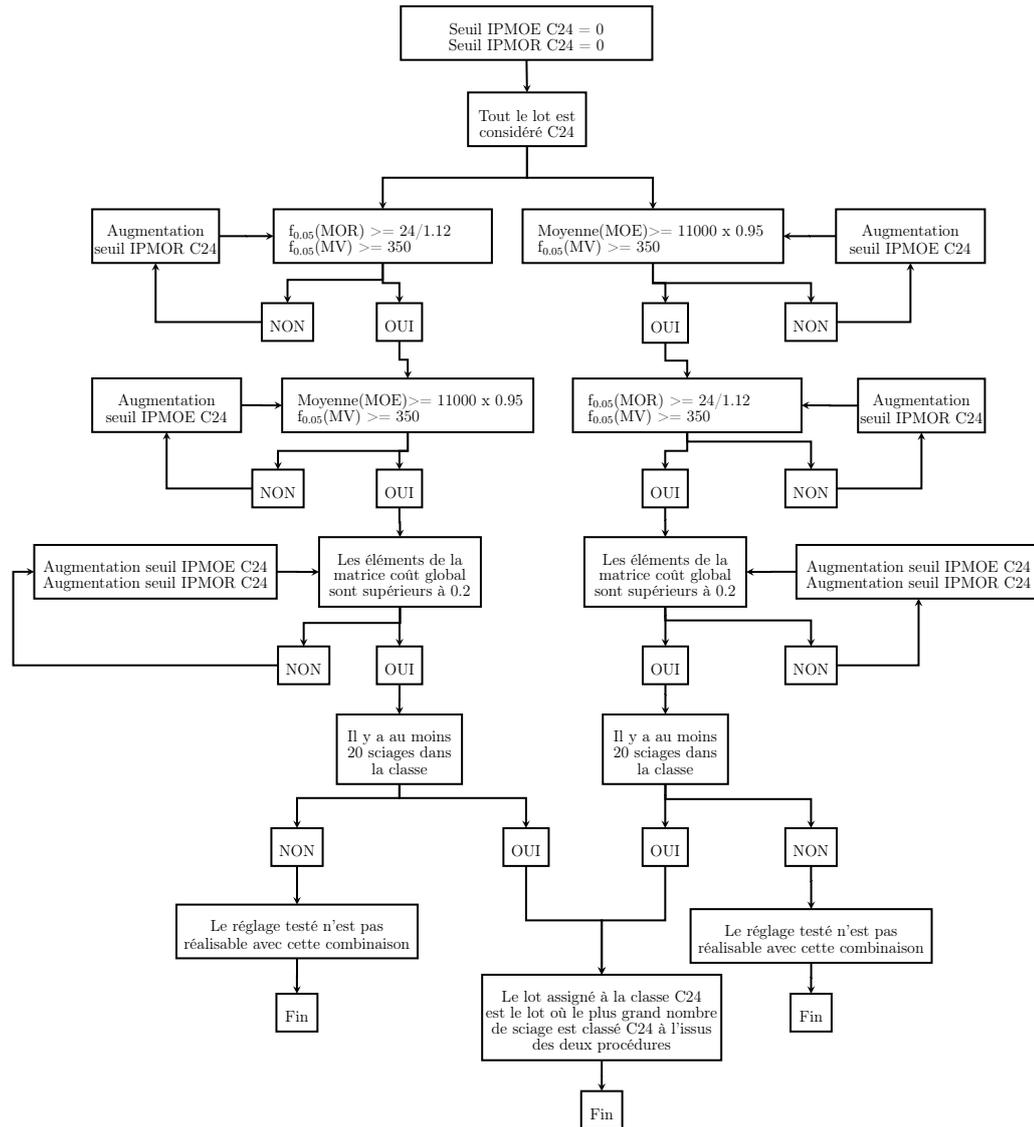


FIGURE 3.2 – Algorithme de réglage machine à deux IPs pour la combinaison C24/Rejet

3.2 Problèmes rencontrés lors du réglage d'une machine

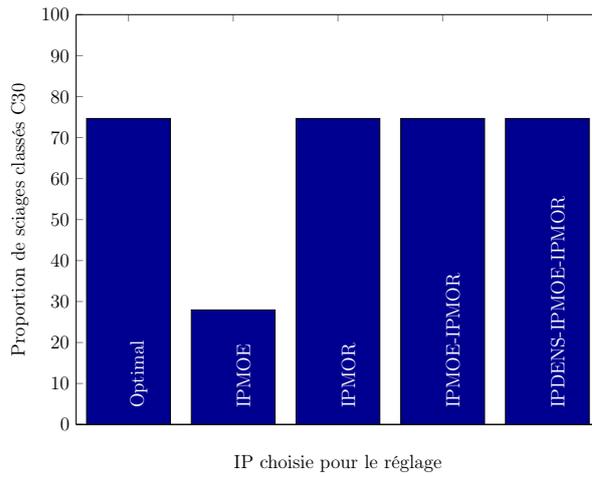
Cette partie a pour but de poser les jalons nécessaires à l'interprétation des résultats qui vont suivre. Afin de se détacher complètement des considérations dues à la prédiction mécanique des différentes machines qui vont être étudiées, la norme appliquée pour effectuer le réglage machine a été utilisée avec les données destructives afin d'identifier les phénomènes qui peuvent apparaître et qui sont uniquement le résultat de l'application de la norme.

3.2.1 Influence du nombre d'IP

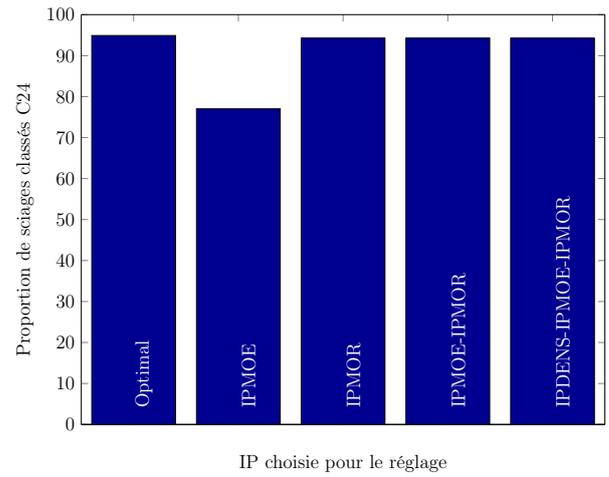
Afin de réaliser les réglages machines, il est donc possible d'utiliser 1, 2 ou 3 IPs. Ainsi, si la machine de classement utilisée était une simple balance, il serait possible de réaliser un réglage à partir de la seule mesure de masse volumique (IPDens). Dans de nombreuses applications, seule une estimation du module d'élasticité est utilisée pour effectuer le classement mécanique par machine, on parle alors d'un réglage machine basé sur l'IPMOE. Il est aussi possible de donner une prédiction de la rupture notée IPMOR. Enfin le réglage machine est réalisable à partir d'une ou de toute combinaisons de ces IPs. De part la procédure de détermination des réglages, le fait de ne choisir qu'une seule de ces IPs utilise implicitement les relations existantes entre les différentes propriétés mécaniques : les relations entre masse volumique, module d'élasticité et module à rupture. Le réglage machine obtenu est alors totalement dépendant des relations existantes entre ces grandeurs.

Pour illustrer ce phénomène, un réglage machine a été effectué pour les trois essences étudiées pour les combinaisons C30(ou D30)/Rejet et C24(ou D24)/Rejet. Ces résultats sont décrits figure 3.3. Il est précisé le pourcentage de sciages attribués à la classe recherchée en fonction du choix de l'IP. Ce résultat est à comparer à celui du classement optimal. Il apparaît alors clairement que dans le cas du chêne et du douglas, le classement est beaucoup plus efficient lorsqu'il est réalisé avec l'IPMOR. En effet la proportion de sciages classés C30 n'est que de 30% dans le cas du douglas lorsque l'IPMOE est utilisée, alors que le réglage machine basé sur l'IPMOR permet de classer plus de 70% de sciages en C30. Cette différence est encore plus forte dans le cas du chêne (20% avec l'IPMOE contre 80% avec l'IPMOR). Elle diminue pour la combinaison C24(ou D24)/Rejet dû au simple fait qu'il est beaucoup plus facile de classer des sciages dans de plus faibles classes. L'effet observé est complètement contraire dans le cas de l'épicéa puisque l'utilisation de l'IPMOE conduit à de bien meilleurs résultats que celle de l'IPMOR. Enfin, il apparaît que l'ajout d'une IP sur la masse volumique n'améliore jamais le classement final. Ce résultat est valable pour les trois essences de notre étude et pour les deux combinaisons étudiées.

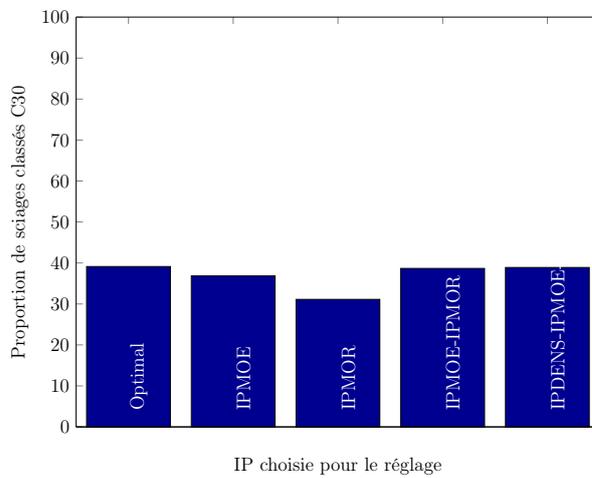
3.2. PROBLÈMES RENCONTRÉS LORS DU RÉGLAGE D'UNE MACHINE



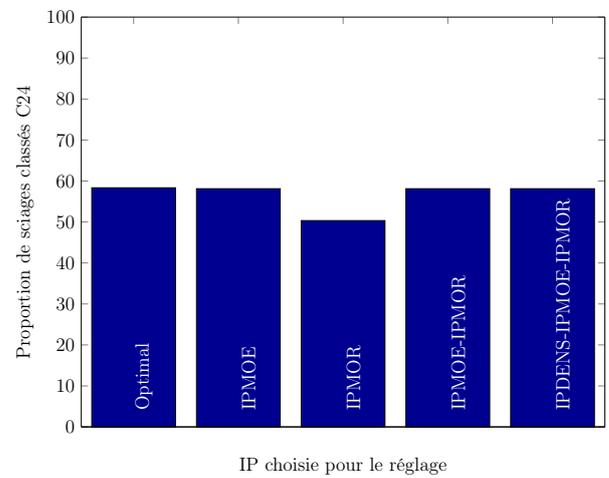
(a) Douglas C30/Rejet



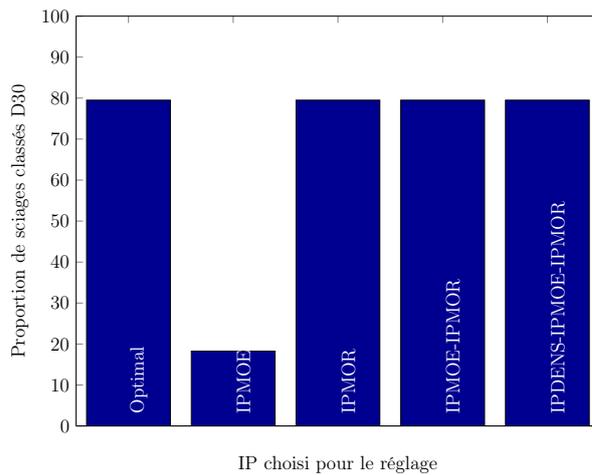
(b) Douglas C24/Rejet



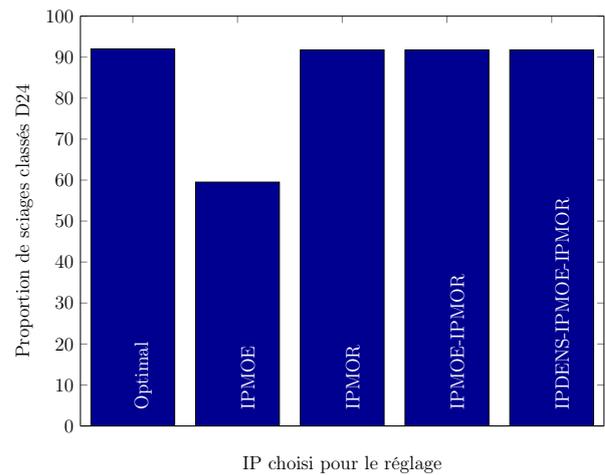
(c) Epicéa C30/Rejet



(d) Epicéa C24/Rejet



(e) Chêne D30/Rejet

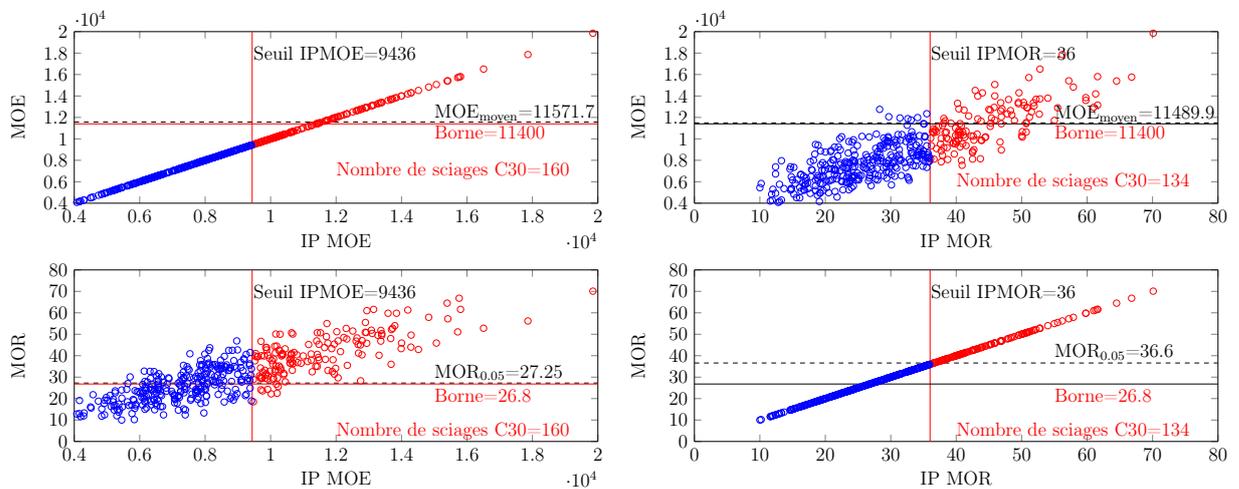


(f) Chêne D24/Rejet

FIGURE 3.3 – Influence du nombre et du type d'IP sur le réglage machine. Réglage théorique sur la base des données destructives.

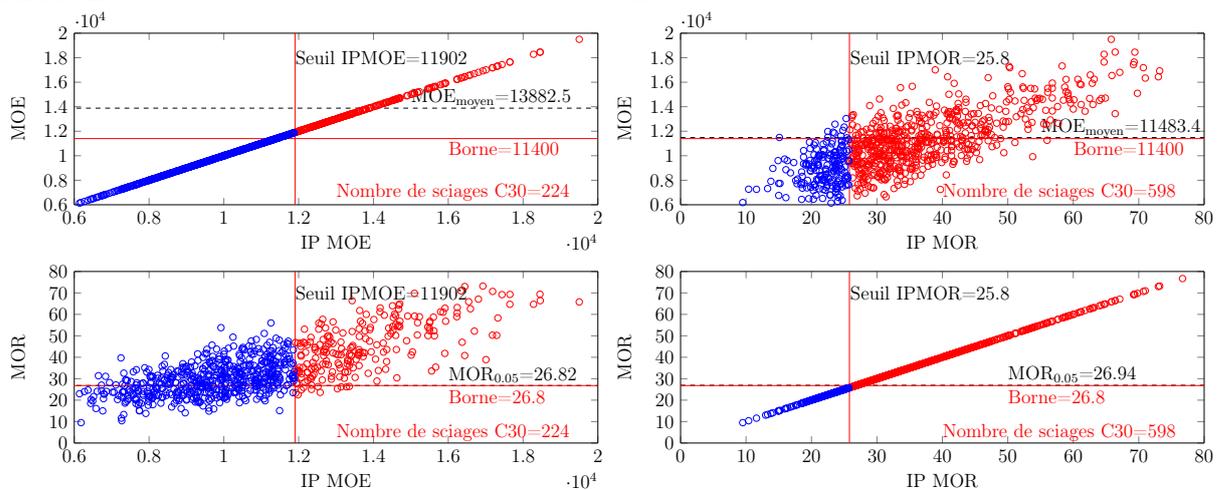
L'origine des résultats décrits précédemment est présentée figure 3.4. Les parties (a) et (b) montrent le réglage machine avec l'IPMOE ou l'IPMOR sur le lot d'épicéa. Les résultats montrés précédemment peuvent alors être observés. Il apparait que le réglage avec l'IPMOR décline près de 30 sciages de plus. La valeur fractile $MOR_{0.05}$ est de plus bien supérieure à la borne imposée. La propriété discriminante pour le cas de l'épicéa et de cette combinaison est le MOE, ce qui explique que le réglage avec l'IPMOE donne de meilleurs résultats. Dans le cas du douglas, le contraire est observé, cela est dû à la meilleure corrélation entre MOE et MOR pour l'épicéa ($r^2=0.71$ contre 0.58 pour le douglas).

Ces résultats montrent que le classement le plus efficace est obtenu avec l'IP qui possède le plus fort degré de corrélation avec la propriété discriminante pour l'essence et la combinaison considérée.



(a) Epicéa C30/Rejet; réglage machine effectué avec l'IPMOE

(b) Epicéa C30/Rejet; réglage machine effectué avec l'IPMOR



(c) Douglas C30/Rejet; réglage machine effectué avec l'IPMOE

(d) Douglas C30/Rejet; réglage machine effectué avec l'IPMOR

FIGURE 3.4 – Influence du type d'IP sur le réglage machine dans le cas de l'épicéa et du douglas

3.2.2 Problème inhérent au cadre normatif

Cette partie traite de deux préconisations normatives garantissant la fiabilité du réglage machine et de leur influence sur ce dernier :

- recommandation 1 : *«Les réglages de production doivent ensuite être utilisés pour classer chaque pièce selon sa valeur de propriété indicatrice. Si il y a moins de vingt pièces dans la classe, le réglage doit être ajusté pour obtenir au moins vingt pièces de la classe. Ces classes sont connues comme étant les classes assignées. Lors de la détermination des classes assignées, il est permis de modifier la valeur de réglage de la classe supérieure de manière à augmenter le nombre de pièces dans la classe inférieure,»*
- recommandation 2 : *«... le réglage de la classe inférieure à classer doit être vérifié et la condition suivante doit être satisfaite : il doit y avoir cinq pièces et il ne doit pas y avoir moins de 0,5 % de l'échantillon total dans le nombre de refus assignés.»*

Le premier point impose donc qu'au terme du réglage machine, le nombre de sciages dans chacune des différentes classes doit être supérieur à 20. Pour cela il est indiqué qu'il est possible de relever le seuil de la classe supérieure pour reverser des sciages dans la classe inférieure. Lors de cette opération les valeurs caractéristiques des sous-lots doivent cependant toujours être respectées. Le respect de cette recommandation peut alors entraîner un très fort déclassement. L'ampleur que peut prendre ce déclassement est illustrée dans le tableau 3.1. La partie gauche du tableau montre les résultats qui seraient obtenus sans prendre en compte cette recommandation, le classement conduirait à déclarer 327 planches en D30 et 19 en D24. Les valeurs caractéristiques des différents lots et les bornes sont aussi reportées. Il apparaît alors qu'il manque une planche à la classe D24 pour que le réglage soit acceptable (puisque'il n'y a que 19 sciages dans la classe D24 alors que la recommandation impose un minimum de 20) pourtant la partie droite du tableau montre que le classement obtenu en respectant la recommandation conduit au déclassement d'un nombre beaucoup plus important de planches. Cela vient du fait que la planche déclassée en premier (et les suivantes proches) déterminée en augmentant le seuil de la classe supérieure possède un module d'élasticité très bas (4 757 MPa en particulier pour ce cas) et cela à pour conséquence de faire diminuer la moyenne des modules de la classe D24 la rendant non conforme aux recommandations de l'EN 338. Il apparaît alors qu'il est nécessaire de déclasser un plus grand nombre de sciages.

| Classe | Sans la recommandation | | | Avec la recommandation 1 | | |
|-----------------------|------------------------|-------|-------|--------------------------|-------|--------|
| | D30 | D24 | Rejet | D30 | D24 | Rejet |
| Borne masse volumique | 530 | 485 | x | 530 | 485 | x |
| ρ_k | 624.9 | 632.3 | 596.6 | 717.1 | 608.7 | 596.64 |
| Borne MOE | 10 450 | 9 500 | x | 10 450 | 9 500 | x |
| MOE moyen | 10 531 | 9 517 | 7 994 | 11 663 | 9 518 | 7 994 |
| Borne MOR | 26.8 | 21.4 | x | 26.8 | 21.4 | x |
| $f_{m,k}$ | 27.47 | 21.48 | 10.86 | 34.8 | 21.9 | 10.86 |
| Nombre de sciages | 327 | 19 | 54 | 152 | 194 | 54 |

TABLE 3.1 – Cas d’un déclassement excessif dû à la recommandation normative sur le nombre minimal de sciage par classe. Exemple d’un réglage machine sur du chêne et la combinaison D30/D24/Rejet.

Le processus itératif menant à respecter de nouveau toutes les recommandations est décrit figure 3.5. Les sous-figures (a) et (b) montrent l’évolution des valeurs observées sur le module moyen et la valeur caractéristique de la résistance pour le lot assigné D30 à mesure que le seuil de l’IP augmente (et donc à mesure que le nombre de sciages diminue dans cette classe et sont reversés dans la classe D24). Il apparait alors que le MOE_{moyen} et la valeur de $f_{0.05}$ ne cessent d’augmenter et sont toujours supérieurs aux bornes de la classe. Les sous-figure (c) et (d) montrent les mêmes propriétés et bornes pour la classe D24 à mesure que viennent s’ajouter les sciages déclassés de la classe D30. La valeur $f_{0.05}$ est toujours supérieure à la borne alors que ce n’est pas le cas pour la moyenne des modules élastiques qui diminue fortement lors des premières itérations. Ce phénomène est dû au fait que les planches déclassées sont celles possédant les plus faibles modules et ont de plus une influence très forte sur un nombre modeste de planches, alors que ces faibles valeurs n’avaient que peu d’influence sur la valeur moyenne des plus de 327 planches assignées initialement à la classe D30.

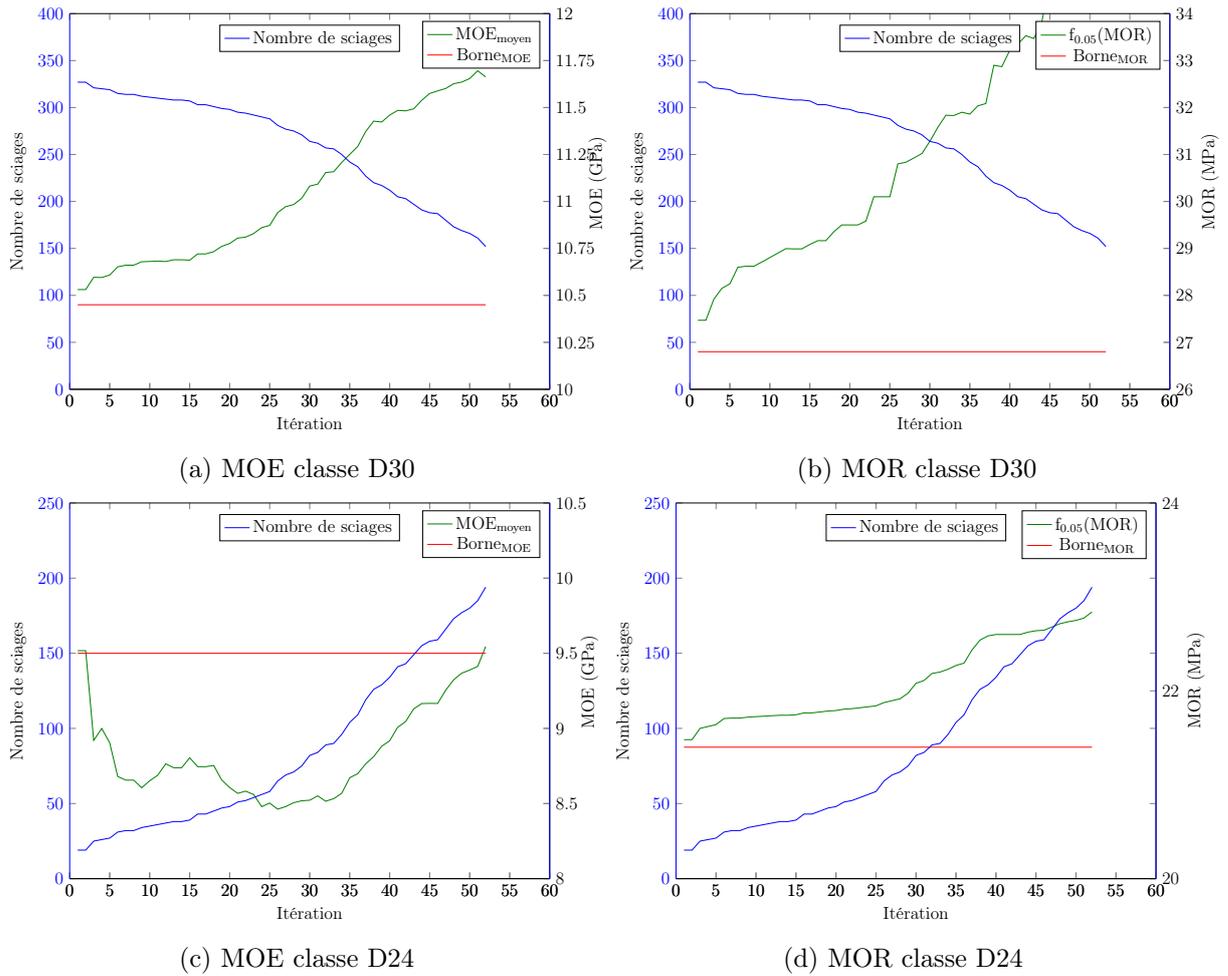


FIGURE 3.5 – Processus itératif responsable d'un fort déclassement : augmentation très forte de l'IP sur la classe D30 pour satisfaire la recommandation 1.

3.2.3 Influence de la combinaison choisie et de la stratégie du réglage

En plus des propriétés mécaniques propres à chaque sciage, la classe assignée dépend aussi du réglage machine effectué et en particulier de la combinaison de classe choisie. Pour illustrer ce phénomène la figure 3.6 montre le résultat du classement du même lot de sciages avec une seule IP et cela pour différentes combinaisons de classes. Le seul point commun entre les combinaisons est que la classe la plus basse est toujours C24. Il apparaît alors que la combinaison pour laquelle le rejet est le moins important est celle où la classe C24 est seule. La présence d'un rejet plus fort est due au fait que retirer les sciages possédant les meilleures propriétés mécaniques fait diminuer de manière drastique les valeurs moyennes du MOE et fractiles du MOR. Cela a donc pour conséquence directe de limiter le nombre de sciages de qualité mécanique plus faible dans la classe inférieure. De plus, la deuxième observation qui peut être faite, est que le rejet est d'autant plus

important si la classe immédiatement supérieure est proche. Dans l'exemple, présenté cela correspond au fait que la combinaison C30/C24/Rejet génère plus de perte que la combinaison C35/C24/Rejet. Pour les mêmes raisons, augmenter le nombre de classes dans la combinaison entraînera fatalement plus de rejet. Ce résultat soulève une faiblesse de la norme, en effet si une machine de classement permet le classement d'une plus grande proportion de sciages dans les hautes classes mécaniques par rapport à une autre machine, cela conduira à une proportion de rejet plus importante qui peut être préjudiciable. En d'autres termes, une meilleure valorisation de la ressource peut entraîner un préjudice économique. En effet la valeur économique des sciages varie selon leur qualité mécanique et bien évidemment les sciages rejetés possèdent une valeur marchande beaucoup plus faible que du bois de structure. Ce phénomène peut être atténué en modifiant la stratégie lors du réglage des différents seuils. C'est l'objet de la partie suivante. Une analyse économique sera présentée ultérieurement (partie 3.4) dont certains principes sont repris ici pour illustrer les différentes stratégies de réglage des seuils.

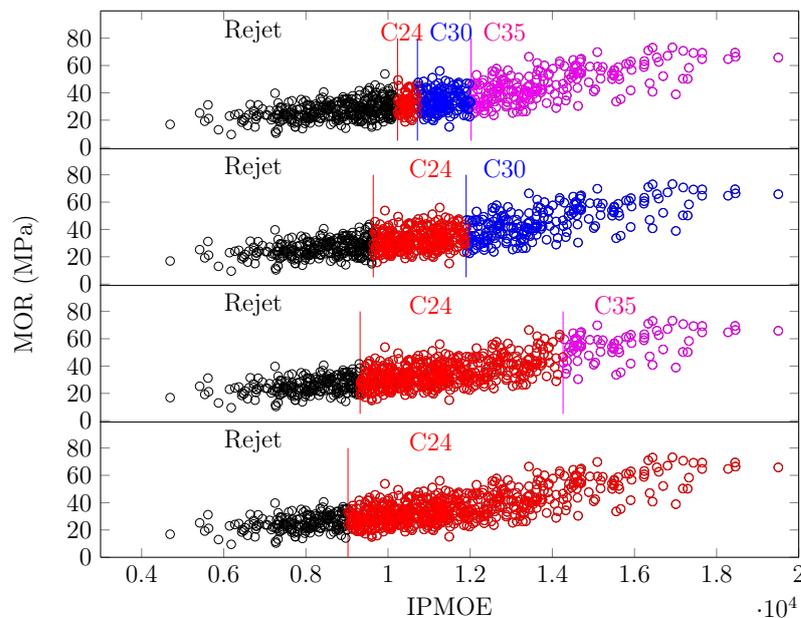


FIGURE 3.6 – Influence du nombre de classes dans la combinaison pour le lot de douglas.

La figure 3.7 représente tous les couples de seuils qui conduiraient à un classement acceptable d'un point de vue strictement normatif. En ordonnée, le seuil IPMOE1 représente la valeur seuil d'attribution d'un sciage à la classe supérieure alors que le seuil IPMOE2 représente celui de l'attribution à la classe inférieure. Dans l'exemple présenté, la combinaison choisie est la combinaison C30/C18/Rejet sur le lot d'épicéa avec le modèle décrit au chapitre précédent. La sous-figure (a) montre le pourcentage de sciages rejetés pour chacun des couples de valeurs de seuils (le rejet est important pour les tons rouges et faible dans les tons bleus). Il est alors possible d'observer qu'à une valeur de seuil d'IPMOE2

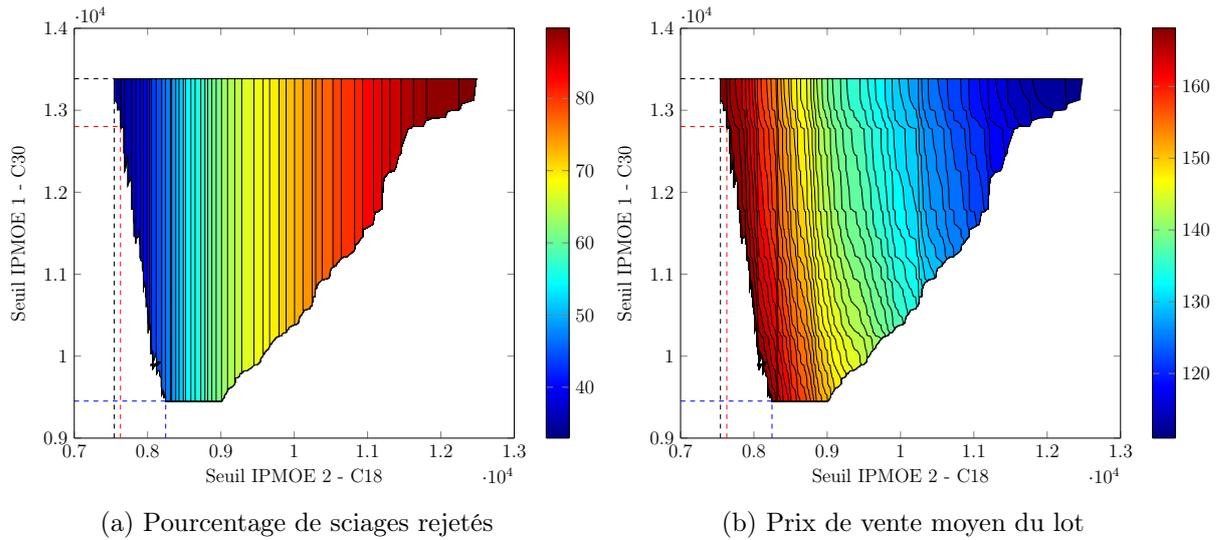
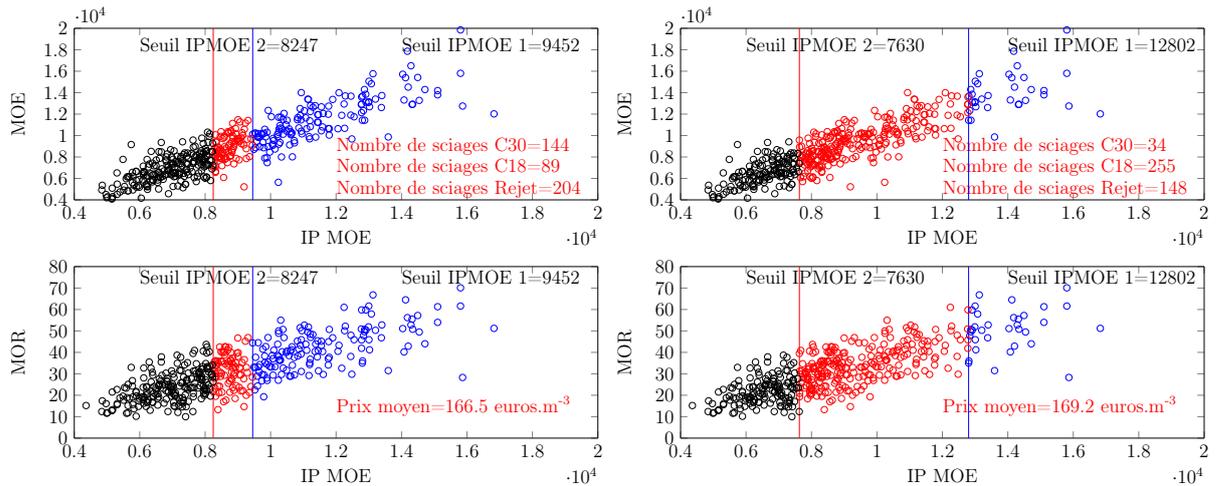


FIGURE 3.7 – Couples de valeurs seuils acceptables du point de vue normatif pour une combinaison C30/C18/Rejet à une seule IP (Exemple présenté : (X+pdf) pour le lot d'épicéa)

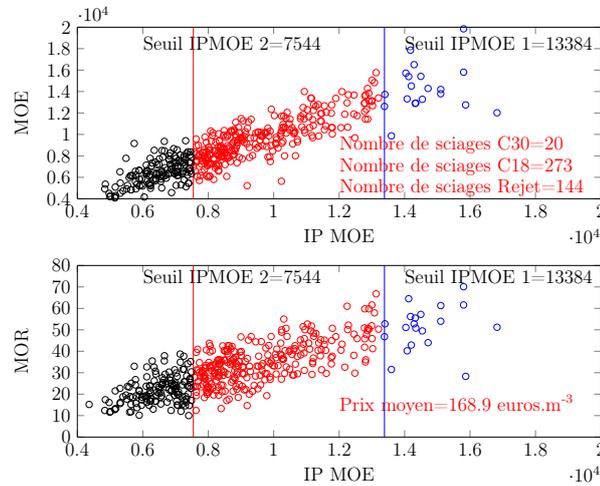
constant le pourcentage de sciages rejetés est constant et qu'il existe un grand nombre de valeur de seuil d'IPMOE1 possible. La sous-figure (b) montre quant à elle le prix de vente moyen du lot en fonction du couple de seuil, la meilleur valorisation économique se trouve dans les tons rouges alors qu'une plus faible valorisation se trouve dans les tons bleus. En comparaison avec la sous-figure (a), cette fois la valorisation n'est pas constante à seuil d'IPMOE2 constant. Ceci est dû à la différence de prix entre un sciage de qualité C30 et C18. Cela démontre aussi que la meilleure valorisation économique ne consiste pas nécessairement à minimiser le rejet. Sur ces figures sont aussi présentées trois approches présentant un intérêt sur le classement final. Les pointillés bleus correspondent au couple de seuils valorisant au mieux la ressource (c'est à dire obtenir le plus grand nombre de sciages possibles dans les hautes classes). Les pointillés rouges donnent quant à eux le couple de seuils donnant la meilleure valorisation économique et enfin les pointillés noirs ceux minimisant le rejet. Par rapport aux conclusions précédentes, la combinaison minimisant le rejet est celle où l'IPMOE1 est le plus grand permettant de mettre que le nombre minimum de sciages dans la classe la plus haute et ainsi de pouvoir abaisser le seuil IPMOE2 au maximum.

Le résultat du classement selon ces trois approches est décrit figure 3.8. La sous-figure (a) montre le résultat du réglage machine lorsque l'objectif est de valoriser au mieux la ressource, il apparait alors que le seuil IPMOE1 est très faible acceptant alors une grande proportion de sciage dans la classe la plus haute (47%). La valorisation économique pour ce réglage est alors de 166.5 euros/ m^3 , et la proportion de sciage C18 est faible (20%) et le rejet le plus important des trois approches (47%). La sous-figure (b) présente quant à elle le réglage machine donnant la meilleure valorisation économique (169.2 euros/ m^3). La proportion de sciages C30 est dans ce cas beaucoup plus faible (7.8%) et permet



(a) Valorisation de la ressource

(b) Valorisation économique



(c) Minimisation du rejet

FIGURE 3.8 – Influence de la stratégie de réglage machine pour une combinaison C30/C18/Rejet à une seule IP (C30/C18/Rejet modèle X+pdf épicea).

de diminuer le rejet. Enfin la dernière sous-figure montre les réglages donnant le moins de rejet possible, à la suite de ce réglage seulement 33% des sciages sont rejetés. Ce résultat est très proche de celui décrit sur la sous-figure (b); la différence entre les deux montre simplement qu'il était plus rentable de mettre 14 sciages dans la classe supérieure puisque cela a conduit au rejet de seulement 4 sciages de plus. Le principal inconvénient de l'approche par valorisation économique est que le résultat du classement est totalement dépendant des prix du marché et du niveau de valorisation des sciages rejetés.

3.3 Classement mécanique des résineux

Il a été choisi de traiter le cas du chêne à part des deux essences résineuses, notamment car peu d'études existent sur le classement mécanique par machine du chêne et qu'il a été vu aux chapitres précédents que la qualité de la prédiction du MOR était très mauvaise alors que dans le même temps la qualité du classement était dépendante du MOR.

3.3.1 Rendements selon la stratégie de réglage machine

Les principes du classement mécanique par machines ayant été décrits, les résultats du classement des lots d'épicéa et douglas avec les différentes machines étudiées lors de cette étude vont être présentés. Dans le chapitre précédent seule la prédiction des propriétés mécaniques a été abordée, or dans un contexte industriel cette information n'a finalement que peu d'intérêt. L'objectif de cette partie est de répondre concrètement à la demande industrielle sur les différences de performances des différentes machines en terme de classement. La machine (X) fait référence au modèle décrit précédemment utilisant des données obtenues par rayons X sans la prise en compte de la pente de fil et la machine (X+pdf) au modèle prenant en compte la mesure de pente de fil. Ces mêmes modèles ont aussi été combinés avec l'E-Scan comme décrit au chapitre précédent. Il a été choisi de ne combiner ces modèles qu'avec l'E-Scan comme mesure de module d'élasticité global car seule cette machine possède une cadence de classement compatible avec le scanner utilisé. Il faut cependant noter que la combinaison du modèle avec la mesure du module effectuée par le MTG utilisant le même principe physique donnerait des résultats très similaires. Enfin, l'étude s'est portée sur des combinaisons comportant les classes mécaniques les plus utilisées sur le marché français. Les rendements des différentes machines pour différentes combinaisons et différentes stratégies de réglage vont ainsi être présentés. Le réglage avec 3IPs a systématiquement été utilisé : l'IPMOR dans le cas des mesures de module d'élasticité est simplement le résultat de la régression linéaire entre l'IPMOE et le module à rupture. Enfin, l'efficacité et la justesse du classement seront aussi comparées.

La figure 3.9 présente les rendements obtenus par les différentes machines sur la combinaison C24/Rejet pour l'épicéa (en noir) et le douglas (en bleu). La première remarque concerne le classement optimal (celui réalisé à partir des données destructives): le lot de douglas étudié possède une proportion beaucoup plus importante de C24 que le lot d'épicéa (95% contre 58%). De plus le rendement des différentes machines de classement est meilleur pour l'épicéa, en moyenne les machines parviennent à classer pour le douglas environ 61% des sciages du lot en C24 (à comparer aux 95% du classement optimal) alors que dans le cas de l'épicéa les rendements sont très proches du classement optimal. Pour l'épicéa, à l'exception du sylvatest et du modèle (X) (qui donnent des résultats beaucoup

moins bons), toutes les machines donnent des résultats très proches, l'ajout de singularités locales mesurées à l'aide du scanner apporte peu, voire aucune amélioration sur le classement final. Ce résultat est conforme aux attentes puisque dans le cas de l'épicéa, le classement donne de meilleurs résultats grâce à l'IPMOE (r^2 des corrélations avec le MOE allant de 0.87 à 0.89). Dans le cas du douglas, il apparaît clairement que l'ajout de singularités contribue de manière plus importante à améliorer le rendement, ce qui n'est pas surprenant puisque l'ajout de ces singularités conduit à l'amélioration de la corrélation avec le module à rupture. Or dans le cas du douglas, l'IPMOR permet de classer de la manière la plus efficiente. Pour rappel et à titre d'exemple, le coefficient de détermination entre l'IPMOR et le MOR est de 0.58 pour le modèle (X+pdf) et de 0.47 pour l'E-Scan, cette différence de r^2 permet le passage d'un pourcentage de sciage classé C24 égal à 69% pour l'E-Scan à 77% pour le modèle (X+pdf). Enfin, il apparaît que quelque soit l'essence, l'ajout de la mesure de pente de fil au modèle permet une très nette amélioration sur le classement final. En effet, l'ajout de ce paramètre permet de passer de 42 à 55% de sciages classés C24 pour l'épicéa et de 62 à 77% pour le douglas. Pour cette combinaison, aucune différence ne peut être faite selon une quelconque stratégie de réglage machine. En effet, pour n'importe quelle combinaison à une seule classe, toutes les stratégies sont équivalentes. Valoriser au mieux la ressource conduit directement à minimiser le rejet et à maximiser la valeur économique du lot.

3.3. CLASSEMENT MÉCANIQUE DES RÉSINEUX

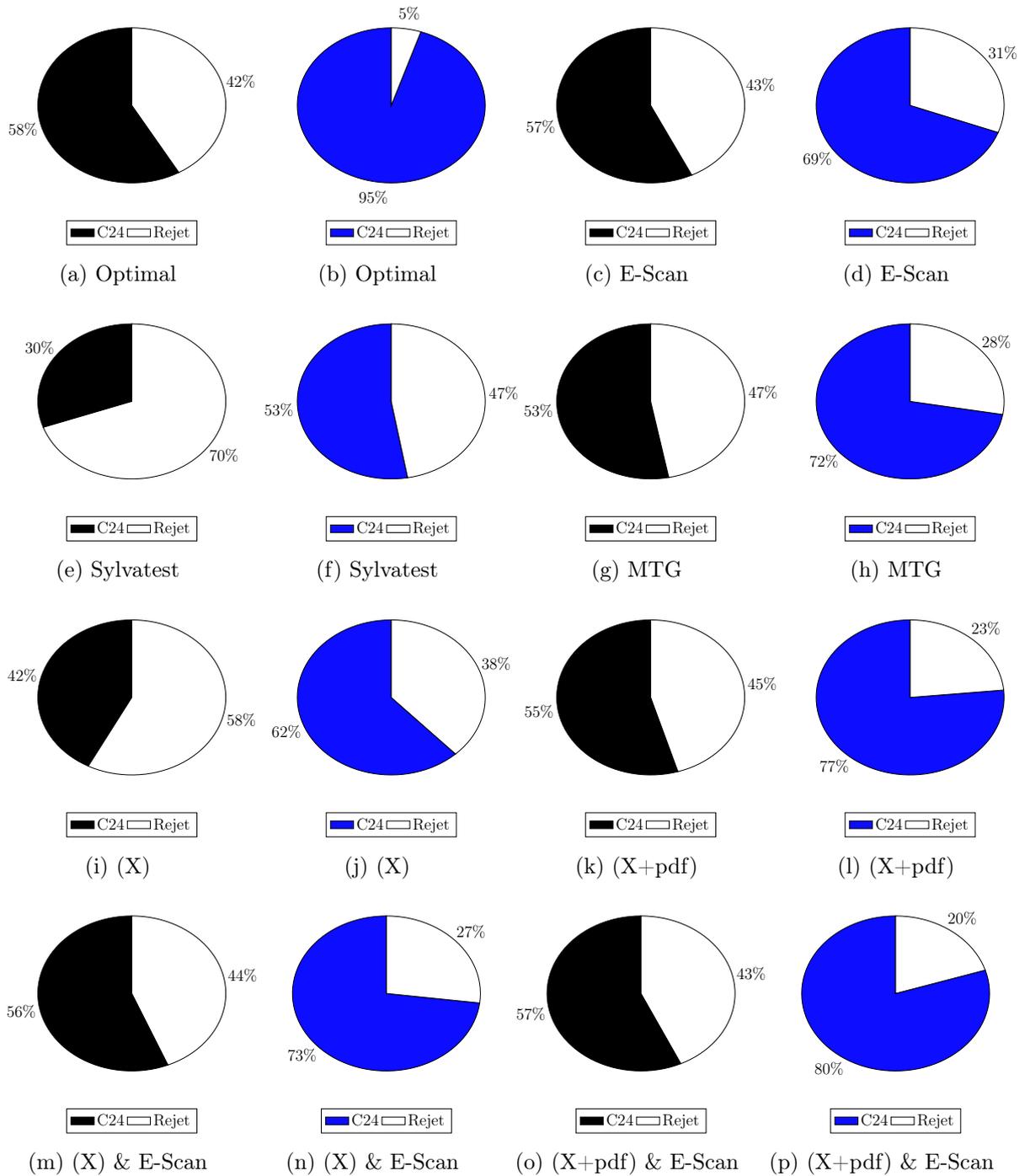


FIGURE 3.9 – Comparaison du classement machine de la combinaison C24/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa (en noir) et le douglas (en bleu)

La figure 3.10 présente maintenant les résultats du classement machine pour la combinaison C30/C18/Rejet, obtenus en adoptant une stratégie de réglage basée sur la valorisation de la ressource. La remarque sur la meilleure qualité mécanique du lot de douglas par rapport à l'épicéa faite précédemment est elle aussi valable, à tel point que le rejet est quasi nul alors qu'il est de 41% pour l'épicéa. De plus, la proportion de sciages classés C30 est beaucoup plus importante. De la même manière que précédemment l'écart entre classement optimal et le classement par les différentes machines est bien plus faible dans le cas de l'épicéa. Contrairement à la combinaison C24/Rejet, l'ajout de singularités apporte cette fois beaucoup plus pour le classement de sciages d'épicéa en qualité C30. En effet, là où aucune amélioration n'était visible, le pourcentage de sciage classé C30 passe d'environ 25% à 34% pour les machines prenant en compte les singularités locales. Malheureusement, et conformément à ce qui a été décrit précédemment cela entraîne un rejet plus important (de 41% à 52% contre environ 38%). Ceci est la conséquence directe de la moindre proportion de sciages classés C30 attribuée par les machines d'estimation de module, ce qui entraîne une augmentation de la proportion de sciages classés C18. Ces observations montrent d'ores et déjà l'intérêt que pourrait apporter une stratégie différente de réglage des seuils sur les IPs. En nuances de bleu sont présentés les résultats de classement de cette même combinaison dans le cas du douglas. La première remarque concerne le fait que quelque soit la machine utilisée, le rejet généré est extrêmement faible et correspond simplement à la recommandation de la norme. Ensuite, bien que le classement optimal indique que 70% des sciages sont de qualité C30, la valorisation maximale est de seulement 27%. Étant donné la non-présence de rejet dans cette combinaison, seule la proportion de sciage classés C30 sera discutée. Sur ce point, il apparaît que seul l'ajout de la pente de fil apporte une amélioration significative de la quantité de sciages C30. Ainsi la proportion de sciages classés C30 atteint plus de 25% pour le modèle (X+pdf) et sa combinaison avec l'E-Scan alors qu'elle est au maximum de 20% pour l'E-Scan seul qui présente la meilleure valorisation des autres méthodes de mesure de module. Le MTG donne quant à lui des résultats très similaires à l'E-Scan. La plus faible valorisation du MTG peut cependant paraître surprenante vue la plus forte corrélation observée ($r^2=0.85$ pour le MTG et 0.83 pour l'E-Scan), mais ce résultat met en lumière le fait qu'une augmentation du coefficient de détermination r^2 ne conduit pas automatiquement à une meilleure valorisation de la ressource. Les modèles sans pente de fil et le sylvatest donnent quant à eux des résultats beaucoup plus faibles.

3.3. CLASSEMENT MÉCANIQUE DES RÉSINEUX

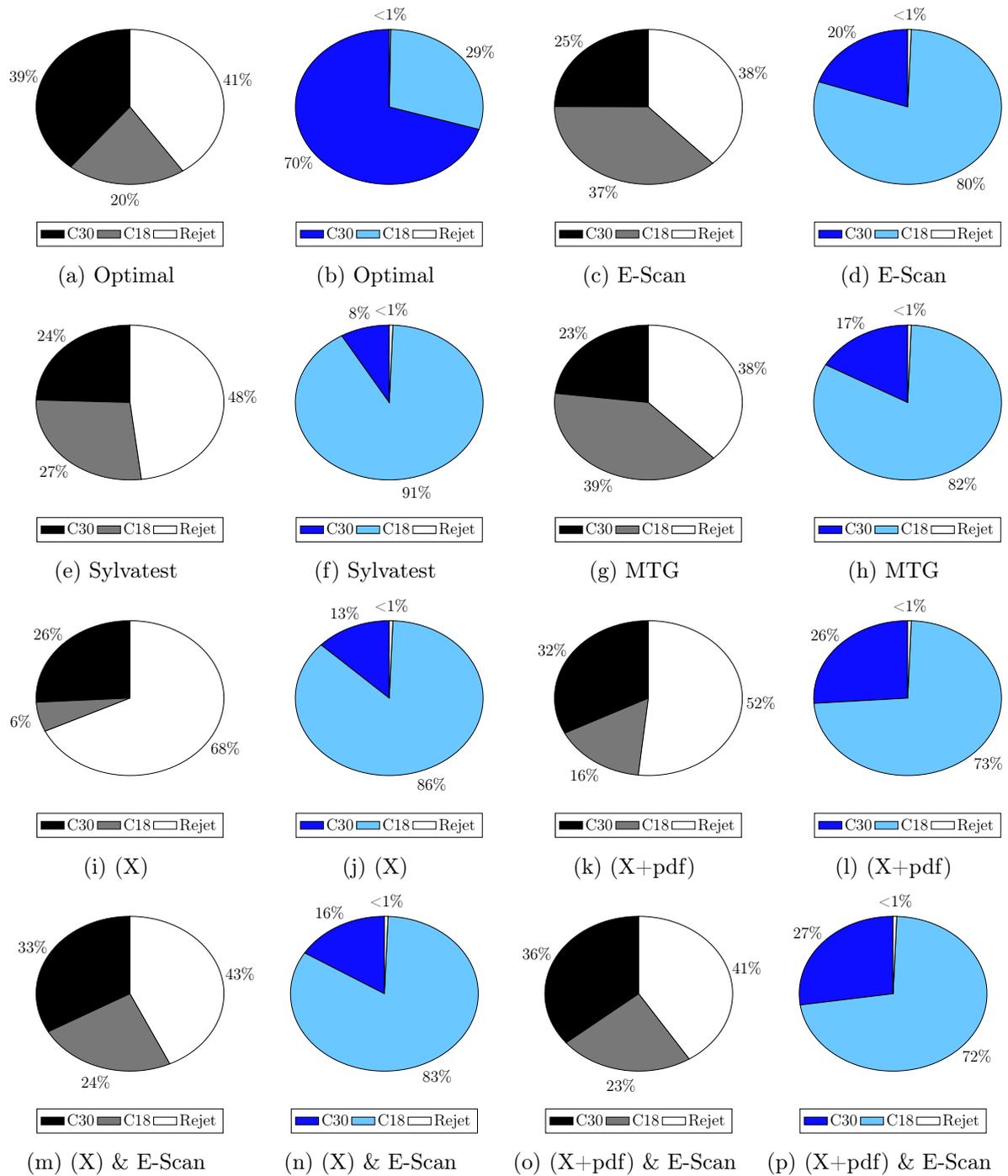


FIGURE 3.10 – Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C18/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa (en noir et gris) et le douglas (en bleus)

La figure 3.11 montre la même combinaison de classe mais cette fois la stratégie de réglage des seuils a été de maximiser le prix de vente du lot tout en respectant les recommandation de la norme. Seuls les résultats pour l'épicéa sont présentés. En effet il vient d'être montré que la combinaison C30/C18/Rejet ne génère quasiment pas de Rejet dans le cas du douglas, par conséquent les résultats précédents représentent aussi la valorisation

économique maximale. Les résultats présentés ici sont donc à comparer à ceux de la figure 3.10 relatif à l'épicéa. Il apparait que quelque soit la machine, la recherche de l'optimum du point de vue économique conduit toujours à une diminution de la proportion de sciages dans la classe supérieure afin de diminuer la proportion de sciages rejetés. Ceci est vrai car la valorisation économique du rejet est basse. Dans une grande majorité de cas on constate même qu'il est possible de rejeter moins de sciages que le classement optimal, ce qui montre les limites de la démarche proposée par la norme. Il faut garder à l'esprit que la solution proposée ici est le cas limite et qu'il est possible de réaliser des réglages améliorant la valorisation économique sans en arriver à ce résultat extrême. L'avantage de cette stratégie est qu'elle permet une meilleure valorisation économique de la ressource.

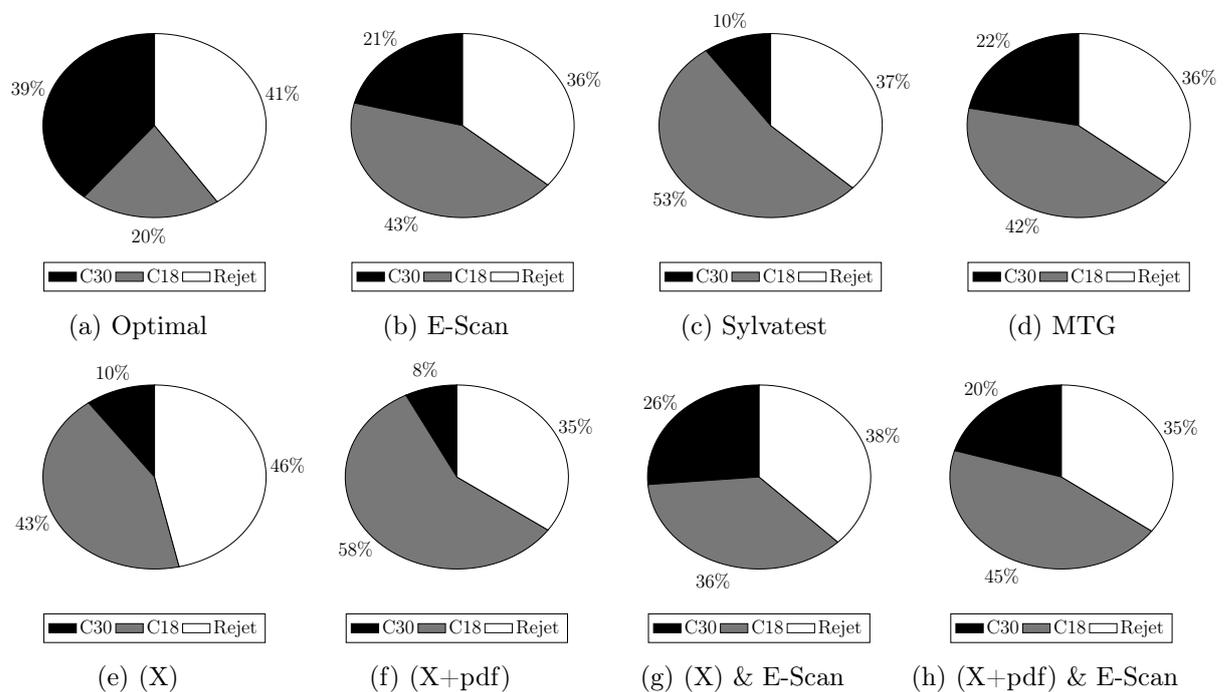


FIGURE 3.11 – Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C18/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa. Stratégie du réglage machine basée sur l'optimisation de la valorisation financière

Il vient d'être montré qu'afin de mieux valoriser économiquement le lot d'épicéa pour la combinaison C30/C18/Rejet, une stratégie de réglage des seuils différente pourraient être utilisée. Les figures 3.12 et 3.13 présente la même analyse pour la combinaison C30/C24/Rejet dans le cas du douglas. En effet, le lot d'épicéa de l'étude ne permet pas de réaliser un réglage machine pour cette combinaison, la recommandation de la présence de plus de 20 sciages par classe ne peut pas être satisfaite. Seuls les résultats sur le douglas sont donc présentés.

La figure 3.12 présente donc le réglage machine du lot de douglas valorisant au mieux la ressource alors que la figure 3.13 montre le résultat du réglage machine maximisant la valorisation économique. Le classement optimal montre de nouveau la très bonne qualité

mécanique du douglas puisque 70% des sciages sont de qualité C30 et seulement 22% du lot est rejeté. La difficulté plus importante de valoriser le douglas est de nouveau mis en avant par la faible proportion de sciages C30 assignés par les différentes machines (seulement 27% pour la meilleure machine parmi les 70% effectivement présente dans le lot). Sur cette combinaison où les classes recherchées sont plus proches que dans le cas de la combinaison C30/C18/Rejet étudiée précédemment, l'influence de la proportion de sciages classés dans la classe supérieure est encore plus forte sur le Rejet. Ce phénomène est observable en comparant les résultats obtenus précédemment entre l'E-Scan et le MTG sur la combinaison C30/C18/Rejet et ceux obtenus pour ces mêmes machines sur la combinaison C30/C24/Rejet. La proportion de sciages assignés C30 est la même quelque soit la combinaison, en revanche le rejet est bien plus important dans le cas de l'E-Scan, cette observation est le résultat direct de la proportion de sciages plus importante dans la classe C30 pour l'E-Scan (20% contre 17% pour le MTG). Il faut aussi noter que le fait que la proportion de sciages classés C30 identique entre les deux combinaisons montre qu'il n'y a pas eu de problème de respect de la recommandation des 20 sciages par classe, et qu'elle ne perturbera donc pas les résultats. Ces différents résultats montrent que la machine permettant le classement d'une proportion de sciage plus importante dans la classe supérieure génère aussi plus de rejet. Cette observation rend encore plus légitime la définition de stratégie de réglage d'IP différente pour ne pas pénaliser une machine permettant une meilleure valorisation de la ressource. Les résultats du réglage maximisant la valorisation économique (figure 3.13) montrent qu'en procédant ainsi, le rejet est le plus faible pour l'E-Scan (32% contre 33% pour le MTG).

Dans les deux cas la valorisation maximale est atteinte en diminuant le rejet, cette diminution est réalisée en acceptant une proportion plus faible de sciages dans la classe supérieure. Les résultats décrits précédemment montrent l'apport très important dans le cas du douglas de la mesure de singularités locales (en particulier la mesure de la pente de fil). Enfin la comparaison entre les deux stratégies de réglage pour les autres machines conduit aux mêmes résultats que ceux montrés dans le cas de l'épicéa pour la combinaison C30/C18/Rejet. C'est à dire que pour diminuer le rejet, il suffit de diminuer la proportion de sciages dans la classe supérieure, afin d'augmenter les valeurs caractéristiques du sous-lot de la classe inférieure, avec pour conséquence l'acceptation de sciages initialement rejetés. De plus, avec cette combinaison, il est aussi possible d'obtenir des réglages rejetant moins de sciages que le classement optimal avec les machines les plus performantes de notre étude pour cette essence et combinaison de classe.

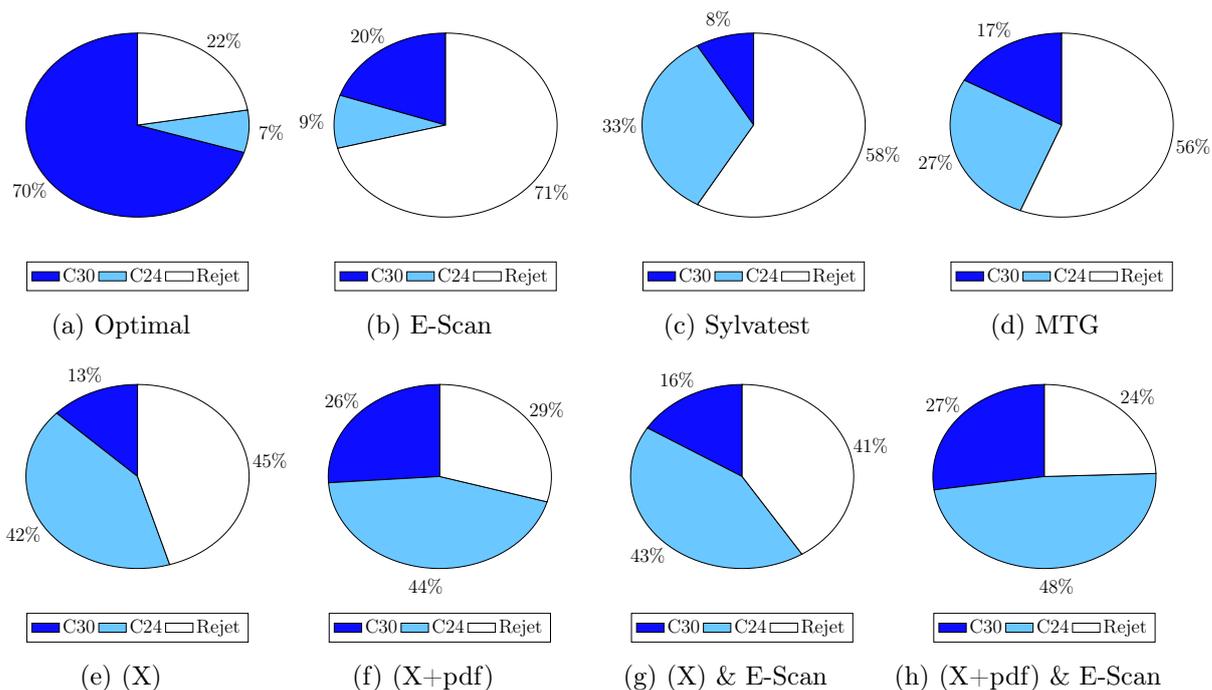


FIGURE 3.12 – Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C24/Rejet pour différentes machines pour le douglas. Stratégie du réglage machine basée sur l’optimisation de la valorisation de la qualité mécanique des sciages du lot.

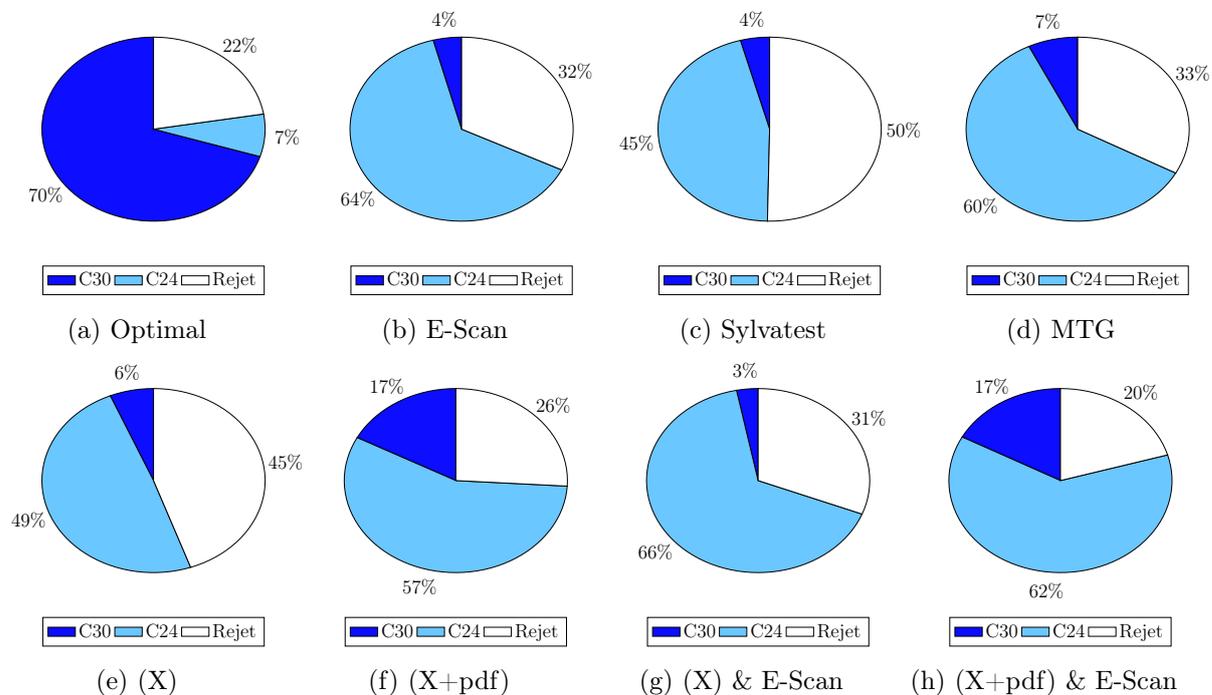


FIGURE 3.13 – Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C24/Rejet pour différentes machines pour le douglas. Stratégie du réglage machine basée sur l’optimisation de la valorisation financière.

3.3.2 Efficience et justesse du classement

La figure 3.14 présente les résultats du calcul d'indice d'efficience et de justesse pour les différentes machines étudiées et pour 4 combinaisons. L'indice d'efficience correspond au calcul direct de l'indice décrit au chapitre 1 (Roblot *et al.*, 2013 [49]). L'indice de justesse correspond au pourcentage de sciages bien classés en comparaison avec le classement optimal. Les sous-figures (a) et (b) montrent l'efficience des différentes machines sur les mêmes combinaisons pour les deux essences étudiées. Il apparaît que les valeurs d'efficience sont plus importantes dans le cas de l'épicéa, cette observation est bien en accord avec celles faites sur les rendements qui étaient meilleurs pour l'épicéa en comparaison avec le classement optimal. Quelque soit l'essence, l'efficience dépend plus de la combinaison étudiée que de la machine utilisée, cela met en évidence l'importance du lot initial sur les résultats de classement.

Dans le cas du douglas aucune différence d'efficience n'est observée entre les machines pour la combinaison C18/Rejet. Par contre dès que la classe de résistance augmente, des différences apparaissent et les machines intégrant des singularités locales (plus exactement la pente de fil) sont plus efficaces pour les combinaisons C24/Rejet, C30/Rejet et C30/C18/Rejet. L'efficience diminue pour la combinaison C30/C18/Rejet car le calcul de cet indice prend en compte le sous-classement, et par rapport aux rendements montrés précédemment, un nombre important de sciages est attribué à la classe C18 par les machines alors que ces sciages sont en réalité de qualité C30.

Pour le cas de l'épicéa, les résultats observés sur les rendements sont aussi visibles sur l'efficience, à savoir que l'ajout de singularités locales ne permet une amélioration de l'efficience que sur les combinaisons comportant les plus hautes classes mécaniques. En effet l'efficience des combinaisons de machines X & E-Scan et X+pdf & E-Scan est plus importante seulement pour les combinaisons C30/Rejet et C30/C18/Rejet. Pour les autres combinaisons, des machines estimant le module d'élasticité de manière vibratoire sont tout aussi efficaces.

Concernant la justesse, la remarque sur la dépendance de la combinaison choisie est ici aussi très forte. En moyenne, plus la combinaison choisie comporte des hautes classes, plus la justesse du classement est faible. Cela reflète bien le fait qu'il est plus facile de classer des sciages dans des basses classes. De même que pour l'efficience, il apparaît là aussi que la justesse du classement est meilleure dans le cas de l'épicéa. L'ajout de singularités pour le douglas profite aussi à la justesse dès la combinaison C24/Rejet alors que dans le cas de l'épicéa l'apport n'est visible qu'à partir des combinaisons de classe comportant la classe C30. Enfin, il est de plus possible de voir que dans le cas du douglas, il n'est pas utile de combiner le scanner à l'E-Scan pour observer un gain d'efficience ou de justesse. La qualité du classement du douglas dépendant de la qualité de la prédiction de la résistance alors que c'est celle du module d'élasticité dans le cas de l'épicéa.

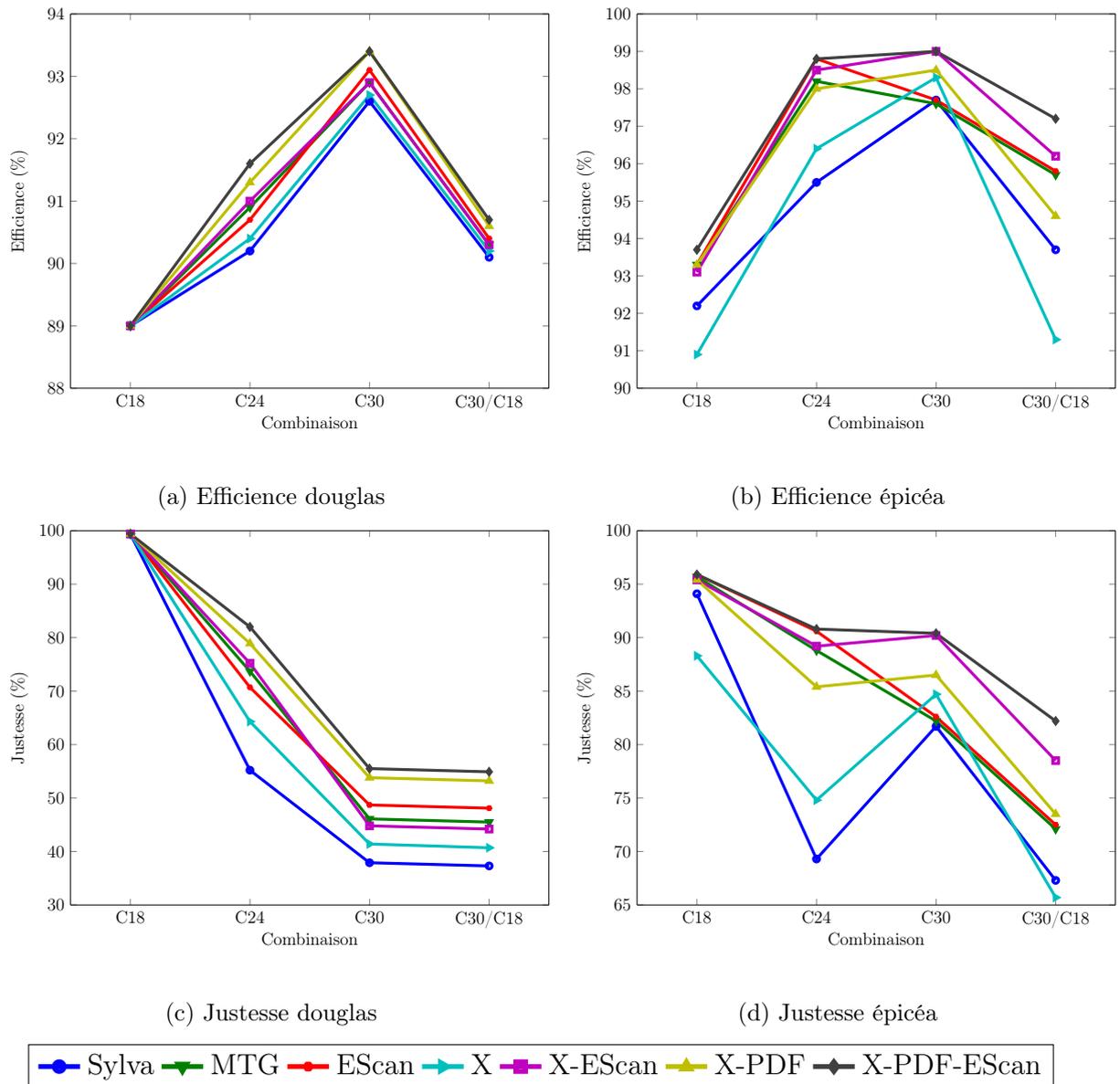
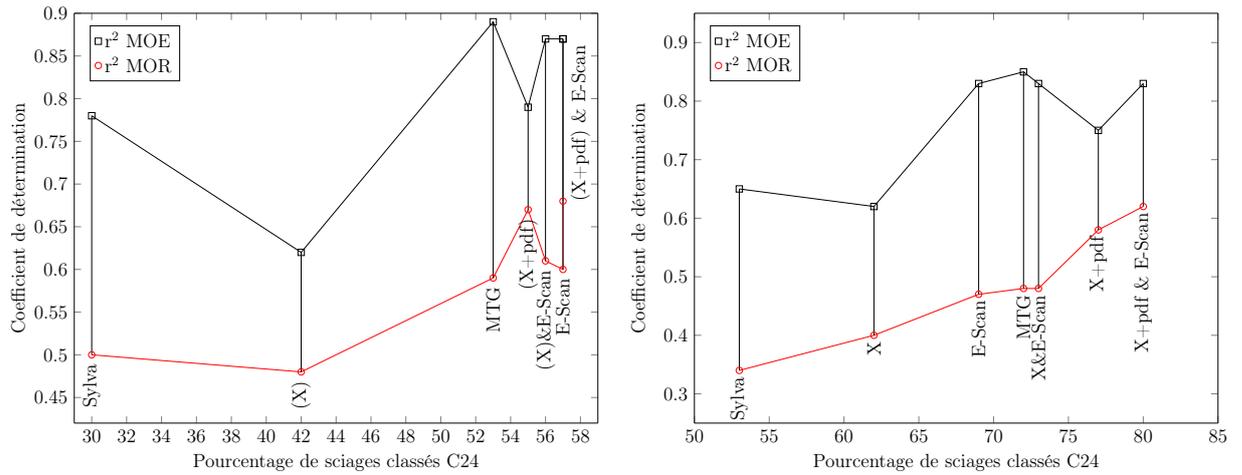


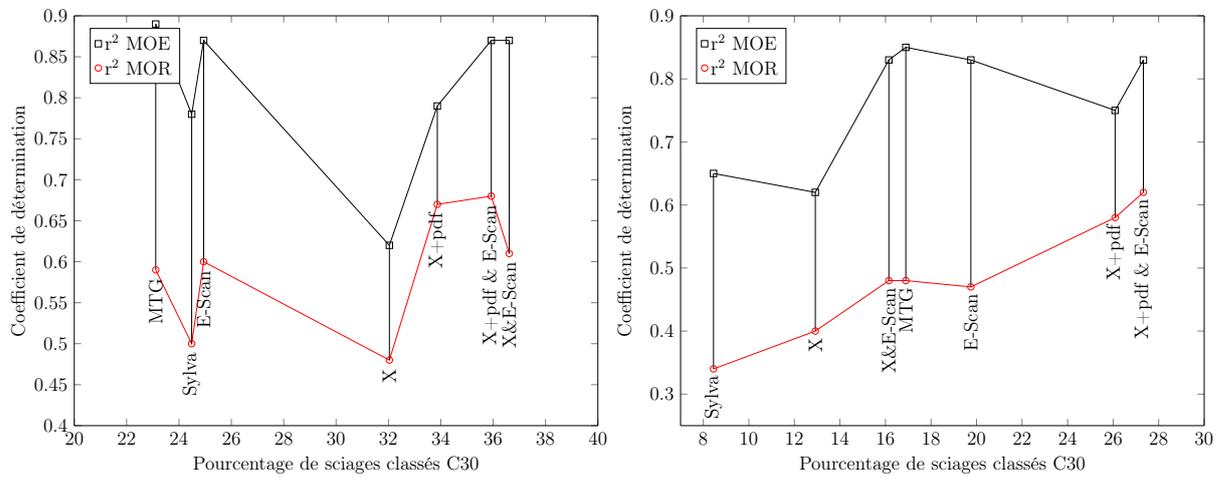
FIGURE 3.14 – Efficacité et justesse du classement machine pour différentes combinaisons et machines pour l'épicéa et le douglas

La figure 3.15 met en évidence que la qualité de la prédiction (via les coefficients de détermination r^2) ne suffit pas à expliquer la qualité du classement final après réglage de la machine selon l'EN 14081. En effet, sur cette figure sont représentés les coefficients de détermination des prédictions des différentes machines avec le MOE et le MOR et les pourcentages de sciages classés obtenus pour deux combinaisons de classe différentes. Il apparaît qu'en moyenne, l'augmentation de la qualité de la prédiction conduira à de bien meilleurs rendements, mais que cette amélioration est loin d'être systématique.



(a) C24/Rejet Epicéa

(b) C24/Rejet Douglas



(c) C30/Rejet Epicéa

(d) C30/Rejet Douglas

FIGURE 3.15 – Coefficients de détermination et qualité du classement

3.3.3 Conclusion sur le classement mécanique par machine des résineux

Il vient d'être montré que le résultat du classement mécanique par machine pour les lots de résineux de l'étude est dépendant de nombreux paramètres. En particulier, dans le cas du douglas, l'obtention des meilleurs résultats nécessite de prédire de manière la plus précise possible le MOR alors que l'attention doit être portée sur le MOE pour l'épicéa. Cela a pour conséquence que les machines mesurant des singularités locales (améliorant donc la prédiction du MOR, voir chapitre précédent) permettent une amélioration plus nette du rendement dans le cas du douglas. Indépendamment de l'essence, un autre phénomène a pu être observé : les machines mesurant des singularités locales sont aussi plus

efficientes pour l'assignation de sciages à des plus hautes classes mécaniques.

Il a de plus été montré qu'une augmentation de la qualité de la prédiction (une augmentation des coefficients de détermination r^2) ne conduit pas systématiquement à une augmentation du rendement du classement final. Il a même été montré que des machines possédant des coefficients de détermination plus faibles pouvait permettre d'obtenir de meilleurs rendements. Cependant, la tendance générale est que l'augmentation des coefficients de détermination permet l'augmentation des rendements.

Il a aussi été montré qu'il est possible de tirer parti des libertés laissées par le cadre normatif sur le réglage des seuils pour aborder le classement selon différentes approches. Ainsi, il est possible de minimiser le rejet d'une combinaison à condition d'être prêt à sacrifier une proportion de sciages dans les plus hautes classes de la combinaison choisie. Évidemment, cette liberté peut être exploitée uniquement dans le cas du réglage de machine pour des combinaisons composées de plus de 2 classes.

Ces résultats montrent aussi l'efficacité des différentes machines pour certaines combinaisons de classe. Un aspect non abordé dans cette partie repose sur le fait que les machines permettant la mesure des singularités locales sont plus coûteuses. De la même manière, les machines portatives sont beaucoup moins chères que leurs versions intégrées dans une chaîne de production mais nécessitent la présence d'opérateurs qui implique un surcout de main d'oeuvre. Il est donc nécessaire de réaliser une étude de rentabilité pour apprécier à partir de quel volume de production les machines les plus performantes, mais aussi plus onéreuses, deviennent plus profitables. Aussi l'objet du chapitre suivant est consacré à la question du choix de la machine de classement la plus rentable selon le volume de production, l'essence, et les classes mécaniques recherchées.

3.4 Analyse économique pour le cas des résineux

3.4.1 Hypothèses et démarche de calcul

Pour toute la partie suivante, un sciage "standard" a été défini pour des raisons de comparaisons notamment pour des machines où le sens de convoyage est différent. Ce sciage possède une section de $50 \times 150 \text{ mm}^2$ pour une longueur de 4m. Les hypothèses des prix au m^3 pour les différentes qualités étudiées sont données tableau 3.2 et sont basées sur des informations recueillies auprès des professionnels partenaires du projet.

| Classe | Prix par m^3 |
|--------|----------------|
| C30 | 240 |
| C24 | 220 |
| C18 | 200 |
| Rejet | 100 |

TABLE 3.2 – Prix en euros d’un m^3 de sciage selon la classe de résistance

Le prix des différentes machines et leur cadence de classement sont donnés tableau 3.3. Enfin pour estimer la capacité de classement d’une machine sur une année de production, il a été considéré 225 jours de travail annuel à raison de 7h de travail par jour.

| | Prix (k€) | Cadence | Capacité annuelle (m^3) | Sens de convoyage |
|--------------------|-----------|------------|-----------------------------|-------------------|
| CombiScan+ (X) | 300-450 | 40pcs/min | 113 400 | Longitudinal |
| CombiScan+ (X+pdf) | 310-460 | 40pcs/min | 113 400 | Longitudinal |
| MTG | 15 | 10pcs/min | 28 350 | Transversal |
| E-Scan | 100 | 180pcs/min | 510 300 | Transversal |
| Sylvatest | 7.5 | 10pcs/min | 28 350 | Transversal |

TABLE 3.3 – Prix (en euros) et cadence des différentes machines de l’étude

Trois tailles de scierie ont été considérées selon le volume de production de sciages par an. Le tableau 3.4 décrit ces catégories et donne la part de la production en France (Étude Agreste, 2005).

| Type scieries | Scieries artisanales | Scieries semi-industrielles | Scieries industrielles |
|--------------------------|----------------------|-----------------------------|---|
| Volume sciage annuel | < 2 000 m^3 | de 2 000 à 6 000 m^3 | de 6 000 à 20 000 m^3 et > 20 000 m^3 |
| Nombre de scieries (%) | 58 | 24 | 14+4 |
| Production de sciage (%) | 8 | 18 | 31 + 43 |

TABLE 3.4 – Classification des scieries françaises selon le volume de leur production

Il apparaît que pour le cas des scieries artisanales et semi-industrielles, la capacité annuelle des différentes machines étudiées ne sera pas discriminante. Pour le cas de la scierie industrielle, les machines de classement sont le plus souvent intégrées directement dans la chaîne de production, les machines portatives avec des cadences plus faibles n’ont alors pas d’intérêt. Une durée de retour sur investissement de 5 ans a été retenue. Enfin, le prix moyen de nos différents lots classés par chaque machine et chaque combinaison a été calculé. Le calcul de ce prix moyen est donné équation 3.1.

$$Prix\ moyen = \frac{\sum_{i=1}^{Nombre\ de\ classes} N_i \times Prix_i}{N} \quad (3.1)$$

Avec :

- *Nombredelclasses* : nombre de classes de la combinaison testée; le Rejet compte comme une classe,
- N_i : nombre de sciages dans la classe i ,
- $Prix_i$: prix au m^3 de la classe i ,
- N : nombre de sciages total du lot classé.

Pour les machines portatives (MTG et Sylvatest) un coût supplémentaire a été ajouté pour prendre en compte le prix de la main d'oeuvre avec les considérations suivantes : les opérateurs sont rémunérés au SMIC, deux sont nécessaires pour le Sylvatest alors qu'un seul suffit pour le MTG. Le salaire chargé à l'année par employé est considéré égal à 25 000 euros. Pour ces deux machines, la cadence est considérée la même et égale à environ 10 sciages par minute soit, en considérant notre sciage référence, une capacité de classement d'environ 28 000 m^3 par an. Un surcoût de 0.89 euros par m^3 (1 employé : $\frac{25\ 000}{28\ 000}$) sera donc appliqué à la valorisation du MTG et de 1.78 euros pour le sylvatest (2 employés : $\frac{2 \times 25\ 000}{28\ 000}$).

Les combinaisons de classe de résistance testées sont parmi les combinaisons les plus utilisées dans l'industrie. Enfin les machines suivantes ont été comparées :

- E-Scan,
- MTG,
- Sylvatest,
- CombiScan+ (X),
- CombiScan+ (X+pdf),
- CombiScan+ (X) & E-Scan,
- CombiScan+ (X+pdf) & E-Scan.

Il a été choisi de ne combiner le CombiScan+ qu'avec l'E-Scan puisque seul ces deux machines possèdent des cadences de classement compatibles. À partir du prix moyen calculé précédemment pour chaque machine, il est possible de calculer la rentabilité des différentes machines à un volume de production donné en utilisant l'équation 3.2.

$$Valorisation = Volume \times Prix\ moyen - Prix\ machine \quad (3.2)$$

Une description de l'analyse de ces différents calculs est donnée tableau 3.5 pour le cas du douglas avec la combinaison C30/C18/Rejet pour une scierie ayant un volume de production annuel égal à 50 000 m^3 . L'évolution de la rentabilité des différentes machines au fil des années à mesure que le volume de sciages produit (et classé) augmente est présentée.

3.4. ANALYSE ÉCONOMIQUE POUR LE CAS DES RÉSINEUX

| | Volume (Prix en k€) | Meilleure machine | | | | Moins bonne machine | | | |
|---------|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|--|
| | | Perte/classement optimal | | | | | | | |
| Année 1 | 50 000 (11 395 k€) | E-Scan (-9.9%) | MTG (-9.9%) | (X+pdf) (-11.3%) | Sylva (-11.5%) | (X+pdf) & E-Scan (-11.9%) | (X) (-13.6%) | (X) & E-Scan (-13.9%) | |
| Année 2 | 100 000 (22 790 k€) | E-Scan (-9.5%) | (X+pdf) (-9.6%) | (X+pdf) & E-Scan (-9.8%) | MTG (-9.9%) | Sylva (-11.5%) | (X) & E-Scan (-11.8%) | (X) (-11.9%) | |
| Année 3 | 150 000 (3 418.5 k€) | E-Scan (-12%) | MTG (-12.2%) | Sylva (-15.6%) | (X+pdf) (-19.1%) | (X) (-21.2%) | (X+pdf) & E-Scan (-21.8%) | (X) & E-Scan (-23.6%) | |
| Année 4 | 200 000 (45 580 k€) | (X+pdf) (-8.8%) | (X+pdf) & E-Scan (-8.8%) | E-Scan (-9.3%) | MTG (-9.8%) | (X) & E-Scan (-10.7%) | (X) (-11.1%) | Sylva (-11.5%) | |
| Année 5 | 250 000 (56 975 k€) | (X+pdf) & E-Scan (-8.6%) | (X+pdf) (-8.6%) | E-Scan (-9.2%) | MTG (-9.8%) | (X) & E-Scan (-10.5%) | (X) (-10.9%) | Sylva (-11.5%) | |

TABLE 3.5 – Valorisation économique pour les différentes machines pour la combinaison C30/C18/Rejet dans le cas du douglas.

Le détail du calcul pour l'E-Scan et le modèle (X+pdf) va maintenant être détaillé. Pour cela les matrices d'effectif des deux machines pour la combinaison C30/C18/Rejet sont présentées figure 3.16. A partir de ces matrices il est possible de calculer le prix moyen du lot classé de manière optimale, à l'aide de l'E-Scan et du modèle (X+pdf) . Ainsi pour $50\,000\text{m}^3$ la valorisation du lot est égale à 11 395k€, 10 365k€ et 10 490k€, respectivement pour le classement optimal, l'E-Scan et le modèle (X+pdf) respectivement (voir équations 3.3). Le prix des machines est ensuite soustrait à ces valeurs, la valorisation est alors de 10 365-100=10 265k€ pour l'E-Scan et 10 490-380=10 110k€ pour le modèle (X+pdf). L'écart (exprimé en pourcentage) entre la valeur du lot classé de manière optimale et la valorisation machine est enfin calculée (voir équations 3.4): c'est la valeur notée entre parenthèses dans le tableau 3.5.

| | E-Scan | | | | X+pdf | | |
|-------|--------|-----|-------|--|-------|-----|-------|
| | C30 | C18 | Rejet | | C30 | C18 | Rejet |
| C30 | 156 | 410 | 0 | | C30 | 202 | 364 |
| C18 | 3 | 230 | 4 | | C18 | 8 | 235 |
| Rejet | 0 | 1 | 1 | | Rejet | 0 | 1 |

FIGURE 3.16 – Matrices d'effectif de deux machines pour la combinaison de classes C30/C18/Rejet dans le cas du douglas

$$\frac{(156 + 410 + 0) \times 240 + (3 + 230 + 4) \times 200 + (0 + 1 + 1) \times 100}{156 + 410 + 3 + 230 + 4 + 1 + 1} = 227.9\text{€}/\text{m}^3 : \text{Classement optimal}$$

$$\frac{(156 + 3 + 0) \times 240 + (410 + 230 + 1) \times 200 + (0 + 4 + 1) \times 100}{156 + 410 + 3 + 230 + 4 + 1 + 1} = 207.3\text{€}/\text{m}^3 : \text{E-Scan}$$

$$\frac{(202 + 8 + 0) \times 240 + (364 + 235 + 1) \times 200 + (0 + 4 + 1) \times 100}{156 + 410 + 3 + 230 + 4 + 1 + 1} = 209.8\text{€}/\text{m}^3 : \text{X+pdf} \quad (3.3)$$

$$\frac{\text{Valorisation (EScan)} - \text{Valorisation optimale}}{\text{Valorisation optimale}} \times 100 = \frac{10\,265\,000 - 11\,395\,000}{11\,395\,000} \times 100 = -9.9\% : \text{E-Scan}$$

$$\frac{\text{Valorisation (X + pdf)} - \text{Valorisation optimale}}{\text{Valorisation optimale}} \times 100 = \frac{10\,110\,000 - 11\,395\,000}{11\,395\,000} \times 100 = -11.3\% : \text{X+pdf} \quad (3.4)$$

Les prix moyens pour différentes machines et combinaisons sont reportés tableau 3.6 pour l'épicéa et le douglas. Entre parenthèses est reporté le classement des différents prix moyen obtenus pour les différentes machines selon la combinaison de classe. Ce tableau donne uniquement une information sur la valorisation économique des différentes machines sans aucune considération de l'investissement initial. Les parties suivantes ont pour but de prendre en compte ces différences d'investissement et d'analyser la rentabilité des différentes machines selon le volume de production.

| Classe | Essence | Optimal | Sylva | MTG | E-Scan | X | X+pdf | X & E-Scan | X+pdf & E-Scan |
|------------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|----------------|
| C18/RJ | douglas | 200 | 199.4 (1) | 199.4 (1) | 199.4 (1) | 199.4 (1) | 199.4 (1) | 199.4 (1) | 199.4 (1) |
| | épicéa | 197.9 | 193.8 (6) | 195.9 (3) | 195.7 (5) | 189.5 (7) | 196.1 (2) | 195.7 (4) | 196.6 (1) |
| C24/RJ | douglas | 213.9 | 163.4 (7) | 186.8 (4) | 183.2 (5) | 174.4 (6) | 191.8 (2) | 187.7 (3) | 195.9 (1) |
| | épicéa | 170 | 136.5 (7) | 163.7 (5) | 168.6 (1) | 150.8 (6) | 165.6 (4) | 167.6 (3) | 168.4 (2) |
| C30/RJ | douglas | 198.4 | 111.8 (7) | 123.7 (4) | 127.7 (3) | 118.1 (6) | 136.5 (2) | 122.6 (5) | 138.3 (1) |
| | épicéa | 154.8 | 134.3 (6) | 132.4 (7) | 134.9 (5) | 144.9 (4) | 147.4 (3) | 151.3 (1) | 150.3 (2) |
| C24/C18/RJ | douglas | 216.9 | 209.9 (7) | 211.7 (6) | 213.2 (4) | 211.8 (5) | 214.7 (1) | 214 (2) | 213.5 (3) |
| | épicéa | 171.6 | 156.7 (6) | 160.7 (5) | 164.9 (2) | 151.8 (7) | 159.4 (4) | 162.4 (3) | 165.9 (1) |
| C30/C18/RJ | douglas | 227.9 | 202.8 (7) | 206.1 (4) | 207.3 (3) | 204.5 (6) | 209.8 (2) | 205.5 (5) | 210.3 (1) |
| | épicéa | 175.1 | 161.7 (5) | 171.5 (3) | 172 (2) | 142.4 (7) | 161.3 (6) | 170.3 (4) | 173.4 (1) |

TABLE 3.6 – Prix moyen des lots classés de manière optimale et pour les différentes machines dans le cas de l'épicéa et du douglas. Entre parenthèses l'ordre pour chaque couple de combinaison et d'essence; 1 : plus grand prix moyen, 7 : plus petit prix moyen.

Pour cette partie, seuls les volumes de production annuels suivant seront considérés : 2 000 , 6 000, 20 000 et 100 000 m^3 de bois sciés ce qui correspond à des volumes sur 5 ans de 10 000 , 30 000, 100 000 et 500 000 m^3 .

Le tableau 3.7 présente les valorisations des différentes machines pour différentes combinaisons de classes avec les volumes de production choisis. La première remarque concerne le fait qu'au plus petit volume de production considéré, le MTG représente la solution la plus intéressante quelque soit la combinaison. Cette première place s'explique à la fois par le faible investissement initial, la plutôt bonne valorisation brute et le coût lié à la main d'oeuvre égal à 8 900 euros pour ce volume de production. Les deux machines qui suivent sont l'E-Scan qui profitent de sa bonne valorisation brute et d'un investissement initial modéré et le sylvatest qui profite exclusivement de son très faible prix d'achat. On constate que les écarts avec la valorisation du classement optimal sont très différents entre les machines, en particulier pour les plus chères, malgré de meilleures valorisations brutes. Ensuite, à mesure que le volume de production augmente, la hiérarchie des machines tend à suivre celle des valorisations brutes, l'investissement initial ne représente plus qu'une part infime de la valorisation totale.

Cependant cette hiérarchie nécessite un volume de production plus important pour se mettre en place dans le cas des combinaisons à plusieurs classes et pour celles comportant des classes de qualités inférieures. Ces volumes de production sont respectivement égaux à environ 270 000 et 1 300 000 m^3 pour les combinaisons C24/Rejet et C24/C18/Rejet et 58 000 et 790 000 m^3 pour les combinaisons C30/Rejet et C30/C18/Rejet. Ce phénomène est en partie dû au fait que les prix de valorisation du classement entre les machines pour ces combinaisons de classes sont beaucoup plus variables que pour les combinaisons simples (des écart-types de 1.6 et 2.7 sont observés pour les combinaisons C24/C18/Rejet et C30/C18/Rejet contre 11.1 et 9.5 pour les combinaisons C24/Rejet et C30/Rejet). De plus les machines ou combinaisons de machines possédant les meilleures valorisations brutes (souvent les plus chères et celles permettant la mesure de singularités locales) sont plus rapidement rentables pour les qualités les plus fortes. La combinaison avec une classe inférieure permet cependant d'atténuer ces écarts; les sciages ne parvenant pas à être classés dans la classe supérieure se retrouvant valoriser dans la classe inférieure au lieu d'être rejeté.

| | | C24/Rejet | | | | C30/Rejet | | C30/C18/Rejet | |
|------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| Volume (Prix en k€) | Meilleure machine (Perte) | C24/Rejet | | C30/Rejet | | C30/C18/Rejet | | C30/C18/Rejet | |
| | | Meilleure machine (Perte) | Moins bonne machine (Perte) | Meilleure machine (Perte) | Moins bonne machine (Perte) | Meilleure machine (Perte) | Moins bonne machine (Perte) | Meilleure machine (Perte) | Moins bonne machine (Perte) |
| 10 000 (2 139) | MTG (4) (-13.8%) | E-Scan (5) (-19%) | Sylva (7) (-24.8%) | (X+pdf) (2) (-28.1%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-30.9%) | (X+pdf) (2) (-50.4%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-54.5%) | (X) (6) (-34.5%) | (X) & E-Scan (3) (-36%) |
| 30 000 (6 417) | MTG (4) (-13.3%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-15.9%) | E-Scan (5) (-15.9%) | (X+pdf) (2) (-16.3%) | (X) & E-Scan (3) (-19.7%) | MTG (4) (-38.4%) | Sylva (7) (-44.7%) | (X) (6) (-24.3%) | Sylva (7) (-24.6%) |
| 100 000 (21 390) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-10.7%) | (X+pdf) (2) (-12.1%) | MTG (4) (-13.2%) | (X) & E-Scan (3) (-14.5%) | E-Scan (5) (-14.8%) | MTG (4) (-38.2%) | (X) & E-Scan (5) (-40.6%) | (X) (6) (-20.2%) | Sylva (7) (-24.5%) |
| 500 000 (106 950) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-8.9%) | (X+pdf) (2) (-10.7%) | (X) & E-Scan (3) (-12.7%) | MTG (4) (-13.1%) | E-Scan (5) (-14.4%) | MTG (4) (-38.1%) | (X) & E-Scan (5) (-38.7%) | (X) (6) (-18.8%) | Sylva (7) (-24.5%) |
| C30/Rejet | | | | | | | | | |
| 10 000 (1 984) | MTG (4) (-38.9%) | E-Scan (3) (-40.7%) | Sylva (7) (-44.9%) | (X+pdf) (2) (-50.4%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-54.5%) | (X+pdf) (2) (-50.4%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-54.5%) | (X) (6) (-59.4%) | (X) & E-Scan (5) (-62.1%) |
| 30 000 (5 952) | E-Scan (3) (-37.3%) | (X+pdf) (2) (-37.6%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-38.4%) | MTG (4) (-38.4%) | Sylva (7) (-44.7%) | MTG (4) (-38.4%) | Sylva (7) (-44.7%) | (X) & E-Scan (5) (-46.2%) | (X) (6) (-46.8%) |
| 100 000 (19 840) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-32.7%) | (X+pdf) (2) (-33.1%) | E-Scan (3) (-36.1%) | (X+pdf) (2) (-33.1%) | (X) & E-Scan (5) (-40.6%) | MTG (4) (-38.2%) | (X) & E-Scan (5) (-40.6%) | (X) (6) (-42.4%) | Sylva (7) (-44.6%) |
| 500 000 (99 200) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-30.8%) | (X+pdf) (2) (-31.6%) | E-Scan (3) (-35.7%) | (X+pdf) (2) (-31.6%) | (X) & E-Scan (5) (-38.7%) | MTG (4) (-38.1%) | (X) & E-Scan (5) (-38.7%) | (X) (6) (-40.9%) | Sylva (7) (-44.6%) |
| C24/C18/Rejet | | | | | | | | | |
| 10 000 (2 169) | MTG (6) (-3.5%) | Sylva (7) (-4.4%) | E-Scan (4) (-6.3%) | (X+pdf) (1) (-18.5%) | (X) (5) (-19.6%) | (X+pdf) (1) (-18.5%) | (X) (5) (-19.6%) | (X) & E-Scan (2) (-23.2%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-23.7%) |
| 30 000 (6 507) | MTG (6) (-3%) | E-Scan (4) (-3.2%) | Sylva (7) (-4.1%) | (X+pdf) (1) (-6.9%) | (X) (5) (-8.1%) | (X+pdf) (1) (-6.9%) | (X) (5) (-8.1%) | (X) & E-Scan (2) (-8.6%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-8.9%) |
| 100 000 (21 690) | E-Scan (4) (-2.2%) | (X+pdf) (1) (-2.8%) | MTG (6) (-2.9%) | (X) & E-Scan (2) (-3.5%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-3.8%) | (X) & E-Scan (2) (-3.5%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-3.8%) | Sylva (7) (-4%) | (X) (5) (-4.1%) |
| 500 000 (108 450) | (X+pdf) (1) (-1.4%) | (X) & E-Scan (2) (-1.8%) | E-Scan (4) (-1.8%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-2%) | (X) (5) (-2.7%) | (X+pdf) & E-Scan (3) (-2%) | MTG (6) (-2.8%) | MTG (6) (-2.8%) | Sylva (7) (-4%) |
| C30/C18/Rejet | | | | | | | | | |
| 10 000 (2 279) | MTG (5) (-10.6%) | Sylva (7) (-12.1%) | E-Scan (3) (-13.4%) | (X+pdf) (2) (-24.6%) | (X) (6) (-26.7%) | (X+pdf) (2) (-24.6%) | (X) (6) (-26.7%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-28.8%) | (X) & E-Scan (4) (-30.5%) |
| 30 000 (6 837) | MTG (5) (-10.2%) | E-Scan (3) (-10.5%) | Sylva (7) (-11.9%) | (X+pdf) (2) (-13.5%) | (X) & E-Scan (1) (-14.7%) | (X+pdf) (2) (-13.5%) | (X) & E-Scan (1) (-14.7%) | (X) (6) (-15.8%) | (X) & E-Scan (4) (-16.6%) |
| 100 000 (22 790) | E-Scan (3) (-9.5%) | (X+pdf) (2) (-9.6%) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-9.8%) | MTG (5) (-10%) | (X) & E-Scan (4) (-11.8%) | MTG (5) (-10%) | (X) & E-Scan (4) (-11.8%) | Sylva (7) (-11.8%) | (X) (6) (-11.9%) |
| 500 000 (113 950) | (X+pdf) & E-Scan (1) (-8.1%) | (X+pdf) (2) (-8.3%) | E-Scan (3) (-9.1%) | MTG (5) (-10%) | (X) & E-Scan (4) (-10.1%) | MTG (5) (-10%) | (X) & E-Scan (4) (-10.1%) | (X) (6) (-10.6%) | Sylva (7) (-11.8%) |

TABLE 3.7 – Valorisation économique pour les différentes machines dans le cas du douglas pour différents volumes de production et combinaisons de classes mécaniques

Le tableau 3.8 présente la même analyse sur des sciages en épicéa. Les résultats concernant l'évolution de la hiérarchie sont similaires à ceux observés sur le douglas. Les machines les moins chères sont les plus rentables pour le plus faible des volumes de production considéré. La hiérarchie de la valorisation brute est aussi atteinte à des volumes de production plus faible pour les combinaisons à deux classes (290 000 et 385 000 m^3 respectivement pour les combinaisons C30/C18/Rejet et C24/C18/Rejet) que pour les combinaisons à une seule classe (41 000 et 132 000 m^3 respectivement pour les combinaisons C30/Rejet et C24/Rejet). On observe ici la rentabilité plus rapide des machines ayant la plus forte valorisation brute pour les classes supérieures.

En revanche, par rapport au douglas, les machines possédant les meilleures valorisations brutes sont toujours composées d'un dispositif d'estimation du module d'élasticité, alors que dans le cas du douglas, la valorisation brute du dispositif mesurant les singularités locales est meilleure que celle des méthodes d'estimation du module seul (vibratoire ou ultrasonore) dans la quasi majorité des combinaisons de classe (à l'exception de la combinaison C24/C18/Rejet en réalité). Dans le cas de l'épicéa la machine permettant la mesure des singularités est plus rentable que des machines d'estimation du module seul uniquement dans le cas de la combinaison C30/Rejet. Ces résultats montrent que l'estimation du module d'élasticité est de manière générale la solution la plus rentable pour le classement mécanique de l'épicéa. Ces résultats sont en accord avec les résultats qui avaient été observés sur les rendements de classement.

De plus, indépendamment de l'essence, la mesure des singularités permet d'améliorer la valorisation pour les classes supérieures dans des combinaisons seules, dès lors que la combinaison de classes est composée de la classe C18, et ce pour les mêmes raisons que celles décrites concernant le douglas. Il peut aussi être noté que l'origine de ces faibles variations des valorisations brutes provient du fait que les prix au m^3 des sciages de différentes qualités sont très peu différents. Du point de vue économique, le reversement des sciages dans la classe inférieure n'a finalement que peu d'impact sur la valorisation en comparaison du rejet de la pièce (ici le prix au m^3 est divisé par 2).

Enfin, le lot d'épicéa est bien mieux valorisé que le lot de douglas, en moyenne l'écart observé par rapport au classement optimal de la meilleure machine pour les différentes combinaisons et différents volumes de production est de près de 5% pour l'épicéa alors qu'il est d'environ 15% pour le douglas. Ce résultat est aussi en accord avec ce qui avait été montré sur les rendements de classement de la partie précédente.

| | | C24/Rejet | | | | | | | |
|------------------------|------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|--|
| Volume (Prix en k€) | Meilleure machine (Perte) | E-Scan (1) | Sylva (7) | (X+pdf) (4) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X) & E-Scan (3) | Moins bonne machine (Perte) | | |
| 10 000 | MTG (5) | | | | | | (X) (6) | | |
| (1 700) | (-5.1%) | (-6.7%) | (-21.2%) | (-24.9%) | (-29.2%) | (-29.4%) | (-33.4%) | | |
| 30 000 | E-Scan (1) | MTG (5) | (X+pdf) (4) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X) & E-Scan (3) | | Sylva (7) | | |
| (5 100) | (-2.8%) | (-4.5%) | (-10.4%) | (-10.4%) | (-10.7%) | (-18.6%) | (-20.9%) | | |
| 100 000 | E-Scan (1) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X) & E-Scan (3) | MTG (5) | (X+pdf) (4) | (X) (6) | Sylva (7) | | |
| (17 000) | (-1.4%) | (-3.8%) | (-4.2%) | (-4.3%) | (-4.8%) | (-13.5%) | (-20.8%) | | |
| 500 000 | E-Scan (1) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X) & E-Scan (3) | (X+pdf) (4) | MTG (5) | (X) (6) | Sylva (7) | | |
| (85 000) | (-0.9%) | (-1.5%) | (-2%) | (-3%) | (-4.3%) | (-11.7%) | (-20.8%) | | |
| | | C30/Rejet | | | | | | | |
| Volume (Prix en k€) | Meilleure machine (Perte) | MTG (7) | E-Scan (5) | (X+pdf) (3) | (X) (4) | (X) & E-Scan (1) | (X+pdf) & E-Scan (2) | Moins bonne machine (Perte) | |
| 10 000 | Sylva (6) | | | | | | | (X) (7) | |
| (1 548) | (-14.9%) | (-16%) | (-19.3%) | (-29.3%) | (-30.6%) | (-32.9%) | (-33.9%) | | |
| 30 000 | (X) & E-Scan (1) | (X+pdf) (3) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X) (4) | Sylva (6) | E-Scan (5) | MTG (7) | | |
| (4 644) | (-12.5%) | (-13%) | (-13.2%) | (-14.5%) | (-14.6%) | (-15%) | (-15.4%) | | |
| 100 000 | (X) & E-Scan (1) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X+pdf) (3) | (X) (4) | E-Scan (5) | Sylva (6) | MTG (7) | | |
| (15 480) | (-5.3%) | (-6%) | (-7.2%) | (-8.8%) | (-13.5%) | (-14.5%) | (-15.1%) | | |
| 500 000 | (X) & E-Scan (1) | (X+pdf) & E-Scan (2) | (X+pdf) (3) | (X) (4) | E-Scan (5) | Sylva (6) | MTG (7) | | |
| (77 400) | (-2.9%) | (-3.5%) | (-5.3%) | (-6.9%) | (-13%) | (-14.4%) | (-15.1%) | | |
| | | C24/C18/Rejet | | | | | | | |
| Volume (Prix en k€) | Meilleure machine (Perte) | MTG (4) | E-Scan (2) | (X+pdf) (5) | (X+pdf) & E-Scan (1) | (X) & E-Scan (3) | (X) (7) | Moins bonne machine (Perte) | |
| 10 000 | MTG (4) | | | | | | | (X) (7) | |
| (1 716) | (-7.8%) | (-9.7%) | (-10.2%) | (-29.3%) | (-31.3%) | (-33%) | (-33.4%) | | |
| 30 000 | E-Scan (2) | MTG (4) | Sylva (6) | (X+pdf) & E-Scan (1) | (X+pdf) (5) | (X) & E-Scan (3) | (X) (7) | | |
| (5 148) | (-5.8%) | (-7.2%) | (-9.9%) | (-12.6%) | (-14.5%) | (-14.6%) | (-18.8%) | | |
| 100 000 | E-Scan (2) | (X+pdf) & E-Scan (1) | MTG (4) | (X) & E-Scan (3) | (X+pdf) (5) | Sylva (6) | (X) (7) | | |
| (17 160) | (-4.5%) | (-6.1%) | (-7%) | (-8.1%) | (-9.3%) | (-9.8%) | (-13.7%) | | |
| 500 000 | (X+pdf) & E-Scan (1) | E-Scan (2) | (X) & E-Scan (3) | MTG (4) | (X+pdf) (5) | Sylva (6) | (X) (7) | | |
| (85 800) | (-3.9%) | (-4%) | (-5.9%) | (-6.9%) | (-7.6%) | (-9.7%) | (-12%) | | |
| | | C30/C18/Rejet | | | | | | | |
| Volume (Prix en k€) | Meilleure machine (Perte) | MTG (3) | E-Scan (2) | (X+pdf) & E-Scan (1) | (X+pdf) (5) | (X) & E-Scan (4) | (X) (7) | Moins bonne machine (Perte) | |
| 10 000 | MTG (3) | | | | | | | (X) (7) | |
| (1 751) | (-3.4%) | (-7.5%) | (-9.1%) | (-28.4%) | (-29.6%) | (-29.9%) | (-40.1%) | | |
| 30 000 | MTG (3) | E-Scan (2) | Sylva (6) | (X+pdf) & E-Scan (1) | (X) & E-Scan (4) | (X+pdf) (5) | (X) (7) | | |
| (5 253) | (-2.9%) | (-3.7%) | (-8.8%) | (-10.1%) | (-11.8%) | (-15.1%) | (-25.8%) | | |
| 100 000 | E-Scan (2) | MTG (3) | (X+pdf) & E-Scan (1) | (X) & E-Scan (4) | Sylva (6) | (X+pdf) (5) | (X) (7) | | |
| (17 510) | (-2.3%) | (-2.7%) | (-3.7%) | (-5.5%) | (-8.7%) | (-10.1%) | (-20.8%) | | |
| 500 000 | (X+pdf) & E-Scan (1) | E-Scan (2) | MTG (3) | (X) & E-Scan (4) | (X+pdf) (5) | Sylva (6) | (X) (7) | | |
| (87 550) | (-1.5%) | (-1.9%) | (-2.6%) | (-3.3%) | (-8.3%) | (-8.6%) | (-19.1%) | | |

TABLE 3.8 – Valorisation économique pour les différentes machines dans le cas de l'épicéa pour différents volume de production et combinaison de classes mécaniques

3.4.2 Outil d'aide à la décision

La lecture de ces tableaux apparaît fastidieuse et afficher toutes les combinaisons de classes possibles, ou comparer ces valeurs à des matrices d'effectifs d'autres machines, est difficile. C'est pourquoi un outil d'aide à la décision a été développé sous la forme d'une feuille de calcul excel reprenant les principes énoncés en introduction de cette partie.

Dans cette feuille ont été reportées les matrices d'effectif obtenues à l'issue du classement par les 7 machines étudiées et cela pour toutes les combinaisons de classe réalisables avec les classes C40, C35, C30, C24 et C18. Le nombre de combinaison atteint ainsi un total de 25 combinaisons (10 combinaisons à 3 classes, 10 combinaisons à 2 classes et 5 à une seule classe). Le prix de vente moyen est alors calculable pour toutes ces combinaisons pour chaque machine permettant ainsi leur comparaison sur nos différents lots. Il a de plus été choisi de laisser la possibilité à l'utilisateur de renseigner une matrice d'effectif d'une autre machine de son choix.

De plus, les différents calculs étant fortement dépendants des prix attribués aux différentes qualités mécaniques (et la valorisation du rejet pouvant fortement varier selon les scieries), ces prix sont modifiables par l'utilisateur. Les prix des machines sont aussi renseignés ainsi que le coût de la main d'oeuvre lorsqu'elles nécessitent des opérateurs. Ces différents paramètres sont modifiables directement dans un onglet de la feuille excel présenté figure 3.17.

| Prix des sciages (€/m3) | | | | Prix des machines | | |
|-------------------------|---------|--------|-------|--|---------------|---|
| | Douglas | Epicéa | Chêne | Machine | Prix | Salaires annuel opérateur(s) (€) |
| REJET | 100 | 100 | 275 | E-Control (Innodura) | 15000 | 25000 |
| C18/D18 | 200 | 200 | 360 | E-Scan (Weinig) | 100000 | 0 |
| C24/D24 | 220 | 220 | 480 | MTG (Brookhuis) | 15000 | 25000 |
| C30/D30 | 240 | 240 | 600 | Sylvatest (CBS-CBT) | 7500 | 50000 |
| C35/D35 | 240 | 240 | 600 | CombiScan (sans pdf) + E-Scan (Weinig) | 475000 | 0 |
| C40/D40 | 240 | 240 | 600 | CombiScan (sans pdf) (Weinig) | 375000 | 0 |
| | | | | CombiScan (avec pdf) + E-Scan (Weinig) | 480000 | 0 |
| | | | | CombiScan (avec pdf) (Weinig) | 380000 | 0 |
| | | | | Machine à définir | 100000 | 0 |

FIGURE 3.17 – Paramètres modifiables par l'utilisateur

Il ne reste à l'utilisateur qu'à renseigner l'essence, la combinaison de classe, le volume de production annuel et le temps de retour sur investissement sur lequel il souhaite comparer les différentes machines. La forme du choix de ces différents paramètres est présentée figure 3.18.

FIGURE 3.18 – Choix des paramètres de calculs

Les résultats sont alors présentés sous la forme d'un histogramme représentant le rapport entre la valorisation du lot classé de manière optimale et celle des différentes machines. Cela permet visuellement de classer les différentes machines selon les paramètres renseignés précédemment.

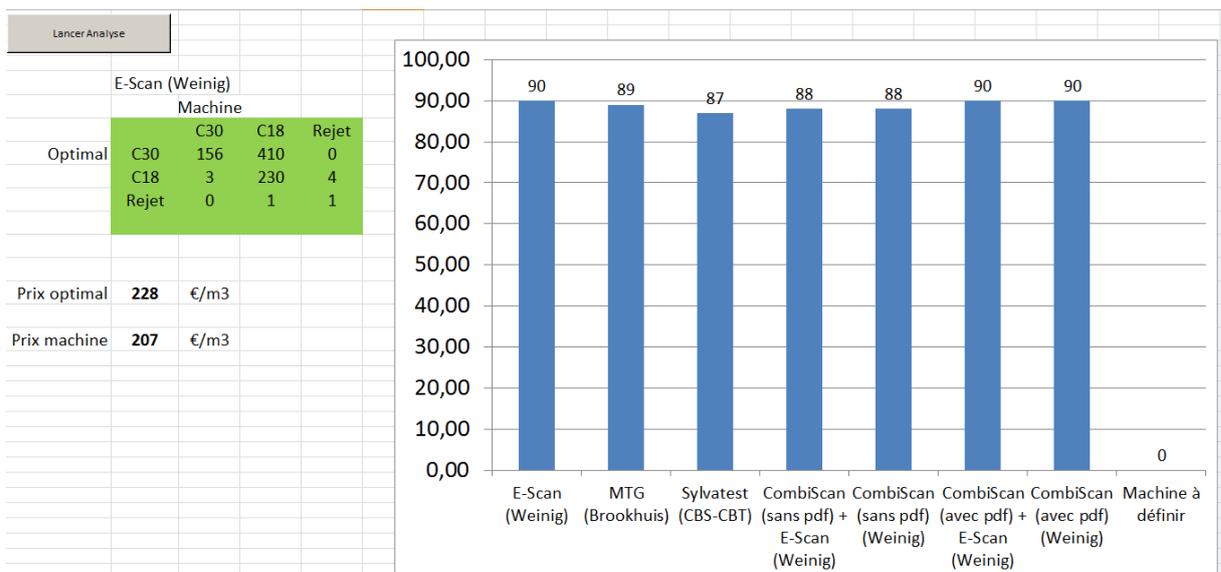


FIGURE 3.19 – Présentation des résultats

L'utilisateur doit cependant être conscient que tous les résultats présentés par cet utilitaire ne sont valables uniquement sur les lots de cette étude et que la hiérarchie de ces machines pourrait être différente sur d'autres lots. Cependant le gros avantage est que toutes les machines ont été testées sur le même lot, et l'utilitaire présenté ici permet de réaliser une analyse économique à la seule condition de connaître la matrice d'effectif. Cette «donnée constructeur» doit donc être connue du client potentiel pour lui permettre d'apprécier l'efficacité de la machine.

3.4.2.1 Influence de la stratégie de réglage

Il a été vu précédemment que différentes approches sont possibles pour le réglage des seuils. L'ensemble de l'analyse économique a été réalisé à partir des résultats de classement issus de la stratégie de réglage des seuils visant à valoriser au mieux la qualité mécanique de la ressource. Le choix a été porté sur cette stratégie puisque l'interprétation de la norme laisse penser que la plupart des machines de classement sont réglées de cette manière. Sachant qu'une autre interprétation pourrait être faite en appliquant la même démarche au cas de la stratégie visant à maximiser la valorisation économique. La figure 3.20 compare le prix de vente moyen des lots pour les combinaisons où les rendements avaient été comparés lors de la partie précédente pour les deux stratégies de réglage des seuils. Dans le cas de l'épicéa, il apparaît que la valorisation économique obtenue en suivant une stratégie de valorisation de la ressource est déjà très proche de celle obtenue par le classement optimal, la marge de progression est donc très faible pour la plupart des machines. En revanche, il apparaît que dans le cas du douglas, la stratégie de valorisation économique permet de grandement améliorer le prix de vente moyen des lots pour la combinaison C30/C24/Rejet pour les trois machines d'estimation du module d'élasticité.

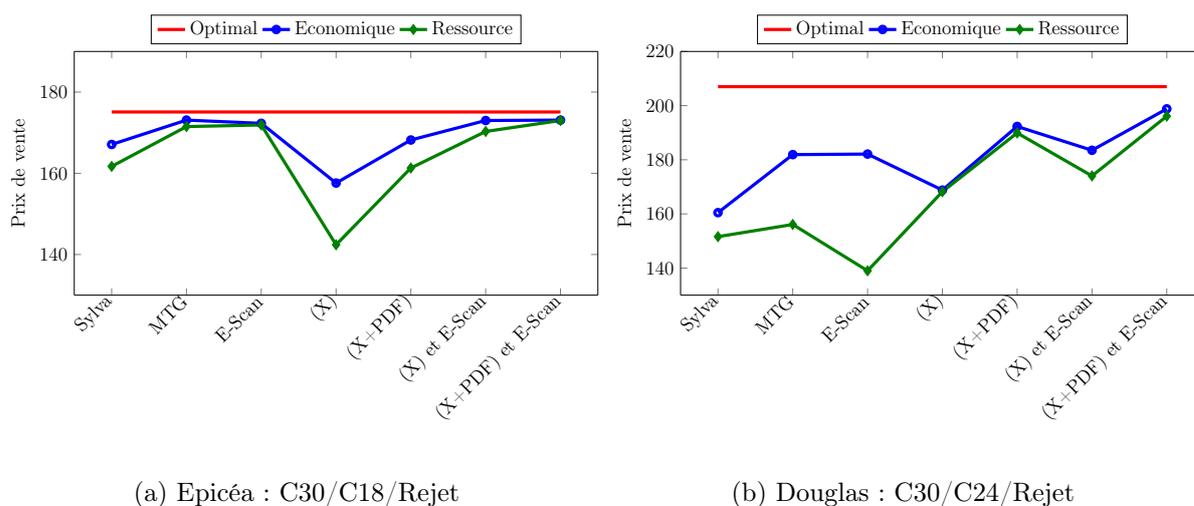


FIGURE 3.20 – Comparaison du prix de vente moyen du lot selon la stratégie de réglage des seuils

Enfin, une version de la feuille excel basée cette fois sur le classement obtenu en suivant la stratégie de valorisation économique a aussi été développée.

3.4.3 Conclusion sur l'analyse économique du classement machine des résineux

Les résultats de l'analyse économique permettent de répondre à la problématique du choix d'une machine de classement. Afin de réaliser ce choix, les paramètres suivants doivent être analysés :

- **l'essence à classer** : il a été montré avec le lot étudié, que le classement du douglas nécessite de porter une attention particulière à la prédiction du MOR et que dans le cas de l'épicéa, elle doit se porter sur celle du MOE. Ce constat est mis en avant par le fait que les machines basées sur la mesure du module d'élasticité sont beaucoup plus rentables dans le cas de l'épicéa et que l'investissement dans des machines permettant la mesure de singularités locales (plus coûteuses mais améliorant la prédiction du MOR) est lui plus rentable pour le douglas,
- **la qualité mécanique recherchée** : l'ajout de la mesure de singularités locales présente un intérêt plus fort pour le classement des sciages dans les plus hautes classes (indépendamment des deux essences étudiées dans le cas de notre étude),
- **le volume de production** : la faible différence de prix observée sur le marché entre des sciages de différentes classes conduit à des prix de vente moyen des lots classés par les différentes machines très proches les uns des autres. De ce fait, il faut un volume de production élevé pour justifier les machines les plus chères,
- **la combinaison de classe** : la combinaison d'une classe forte et d'une plus faible conduit à une meilleure valorisation économique (car générant moins de rejet). Cependant, dans certains cas il n'est pas possible de procéder au tri selon plusieurs combinaisons (pour des raisons de process de production par exemple) et dans ce cas les machines permettant de valoriser au mieux la ressource devront être préférées.

3.5 Classement mécanique du chêne

Les résultats du chapitre 2 indiquent d'ores et déjà que le classement mécanique du chêne par machine avec les technologies actuellement disponibles ne donnera pas de résultats satisfaisants. Cette partie a pour but de mettre en évidence cette faible performance puis de proposer une méthode alternative permettant de tirer parti des bonnes propriétés mécaniques du chêne, et cela même si notre lot est composé de sciages de qualité secondaire.

3.5.1 Classement par machine

La figure 3.21 montre le résultat du classement du lot de chêne pour la combinaison D24/Rejet par différentes machines. On observe déjà les bonnes propriétés mécaniques du chêne puisque 92% du lot peut être classé D24, obtenu lors du classement optimal. Le problème qui apparaît alors est que même dans le cas du classement par machine le plus favorable, il n'est possible de valoriser que 47% du lot en D24. De plus, le fait que des résultats très différents soient observés entre des machines utilisant exactement les mêmes principes physiques conduit à s'interroger sur la fiabilité du classement ainsi obtenu. La faible performance du classement est encore plus prononcée pour des combinaisons de classe de qualité supérieure. Enfin, il est à noter qu'aucune machine de classement homologuée n'est disponible à ce jour.

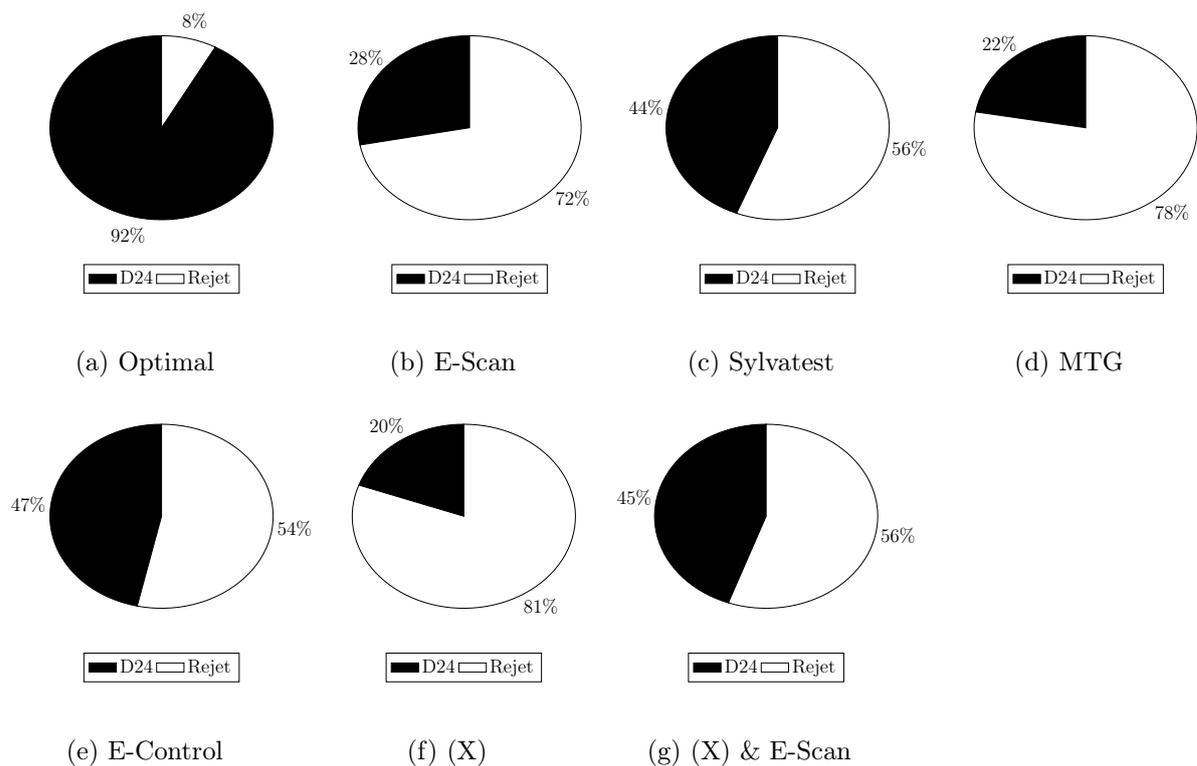


FIGURE 3.21 – Comparaison du classement par différentes machines sur le chêne pour la combinaison D24/Rejet

La figure 3.22 montre les résultats du classement pour la combinaison D30/D18/Rejet; bien que le lot soit composé de 80% de sciages de qualité D30, seul 14% de sciages peut être obtenu par la plus performante des machines étudiées. Pour trois machines (l'E-Scan, le scanner X et la combinaison des deux) il n'est même pas possible de réaliser un réglage machine pour cette combinaison. Cela signifie qu'il n'est pas possible avec ces machines d'assigner des sciages du lot à la classe D30, en revanche grâce à la qualité des propriétés mécaniques, il serait possible de classer le lot dans la classe D18 dans son intégralité avec ces machines. Cette dernière remarque s'applique en fait à toutes les machines présentées. Ce résultat est à prendre avec précaution puisque les valeurs caractéristiques d'admissibilité du lot de sciage à la classe D18 sont respectées lorsque le lot est pris dans son intégralité. Cela implique qu'il serait en fait possible de classer ce lot avec n'importe quelle propriété indicatrice indépendamment des corrélations existantes entre les IPs et les propriétés mécaniques. Pour conclure, les différentes IPs ne prédisent pas avec suffisamment de précision la résistance à la rupture (voir tableau 2.20) pour assurer la fiabilité du classement ainsi que de valoriser de manière raisonnable la ressource. L'analyse de l'efficacité ou de la justesse du classement ne sera donc pas détaillée dans cette partie et une autre approche va être proposée.

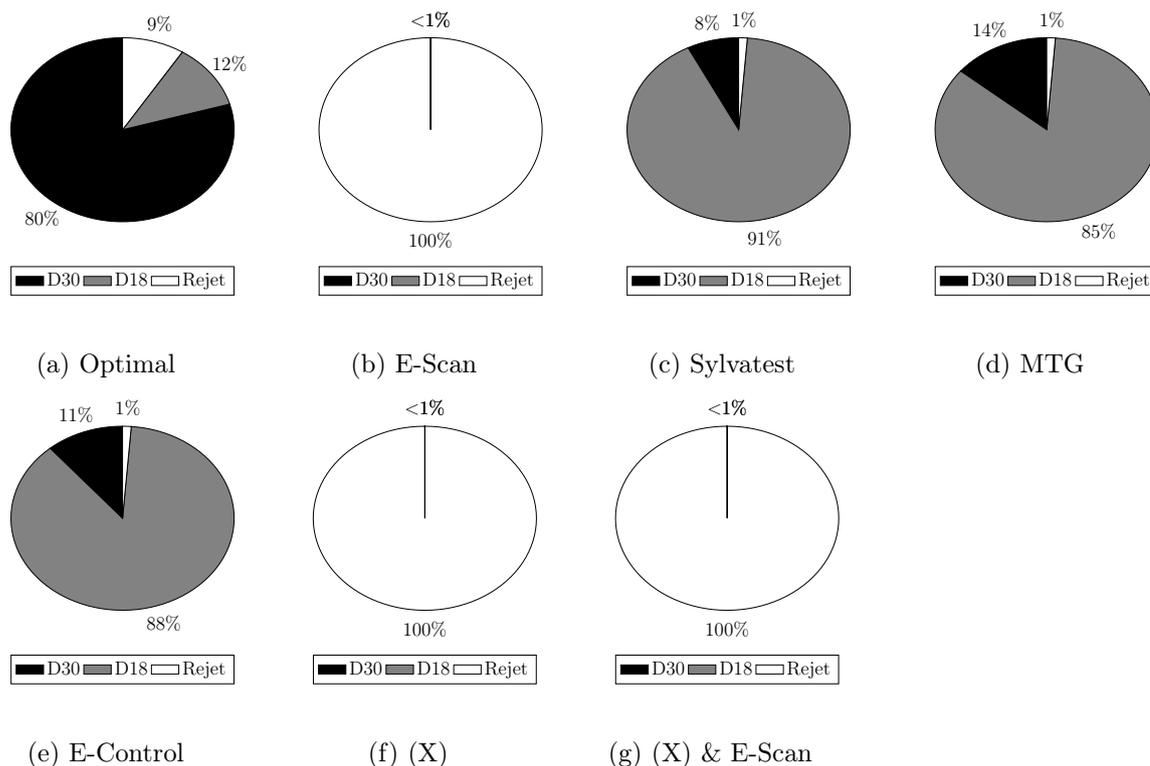


FIGURE 3.22 – Comparaison du classement par différentes machines sur le chêne pour la combinaison D30/D18/Rejet

3.5.2 Approche par machine d'épreuve

Cette approche reste complètement théorique, elle n'a pas été réalisée. Elle consisterait à faire subir un essai de flexion sur l'intégralité de la longueur du sciage à niveau de contrainte imposé. Pour ce faire, il est possible d'imaginer une machine basée sur le même principe que celle présentée lors du chapitre 1 (partie 1.4.2.1) pour estimer le MOE.

À l'issue du passage du sciage dans la machine, il serait alors garanti que le sciage peut supporter un certain niveau de contrainte sur toute sa longueur et aisé de mesurer le module d'élasticité.

Pour estimer les performances d'un tel dispositif sur le lot de chêne, il est considéré que les valeurs obtenues destructivement seraient réellement le minimum observable sur toute la longueur du sciage. Cette hypothèse reste assez réaliste puisqu'en pratique le cadre normatif impose de placer le plus gros défaut au centre du dispositif d'essai. Les autres hypothèses et le résultat obtenu sur notre lot vont maintenant être détaillés.

Il a été rappelé au tout début de ce chapitre (partie 3.1) que pour prendre en compte la meilleure fiabilité du classement par machine (en comparaison à du bois classé visuellement), le coefficient de sécurité γ_m défini dans l'eurocode 5 pour du bois massif classé par machine n'est pas égal à 1.3 mais à $1.3/1.12$ soit $\gamma_m = 1.16$. Bien que ce coefficient ne s'applique qu'aux états limites ultimes, une modification des bornes définies sur le mo-

dule d'élasticité moyen est aussi appliquée en multipliant cette dernière par un coefficient égal à 0.95. Dans l'approche proposée, il sera garanti que le sciage supporte la contrainte demandée par la classe, il est donc possible de se ramener à un cas équivalent du dimensionnement à $\gamma_m = 1$. Cette équivalence est obtenue en diminuant la borne acceptable sur la valeur du fractile à 5% de la résistance d'un facteur 1.3.

L'attribution d'un sciage à une classe donnée est alors régie par la condition que les sciages ont résisté aux niveaux de contraintes décrits dans le tableau 3.9 et possèdent à minima un module d'élasticité donné dans ce même tableau. En comparaison avec le classement effectué par un réglage de la machine sur des lots, il a ici été choisi de fixer la borne en fonction de la valeur fractile du module d'élasticité longitudinal. Si la variabilité considérée dans l'EN338 est proche de notre lot, le module d'élasticité moyen d'un lot ainsi discriminé respectera aussi la condition sur le module d'élasticité moyen.

| Classe | Masse volumique ($kg.m^{-3}$) | MOE (MPa) | MOR (MPa) |
|--------|---------------------------------|-----------|-----------|
| D18 | 475 | 7 600 | 13.85 |
| D24 | 485 | 8 075 | 18.46 |
| D30 | 530 | 8 740 | 23.07 |

TABLE 3.9 – Bornes d'attribution d'un sciage à une classe donnée à l'issu d'essais sur une machine d'épreuve

La figure 3.23 montre ce que donnerait le classement de notre lot en utilisant cette approche en comparaison du classement optimal et de la meilleure des machines de classement non-destructive. Il apparaît alors qu'excepté pour la combinaison D18/Rejet, les rendements obtenus pour la machine d'épreuve seraient bien meilleurs que la meilleure machine de classement utilisée lors de notre étude. La fiabilité d'une telle méthode semble de plus bien meilleure et le Rejet généré reste faible bien que le lot de chêne utilisé soit de qualité secondaire.

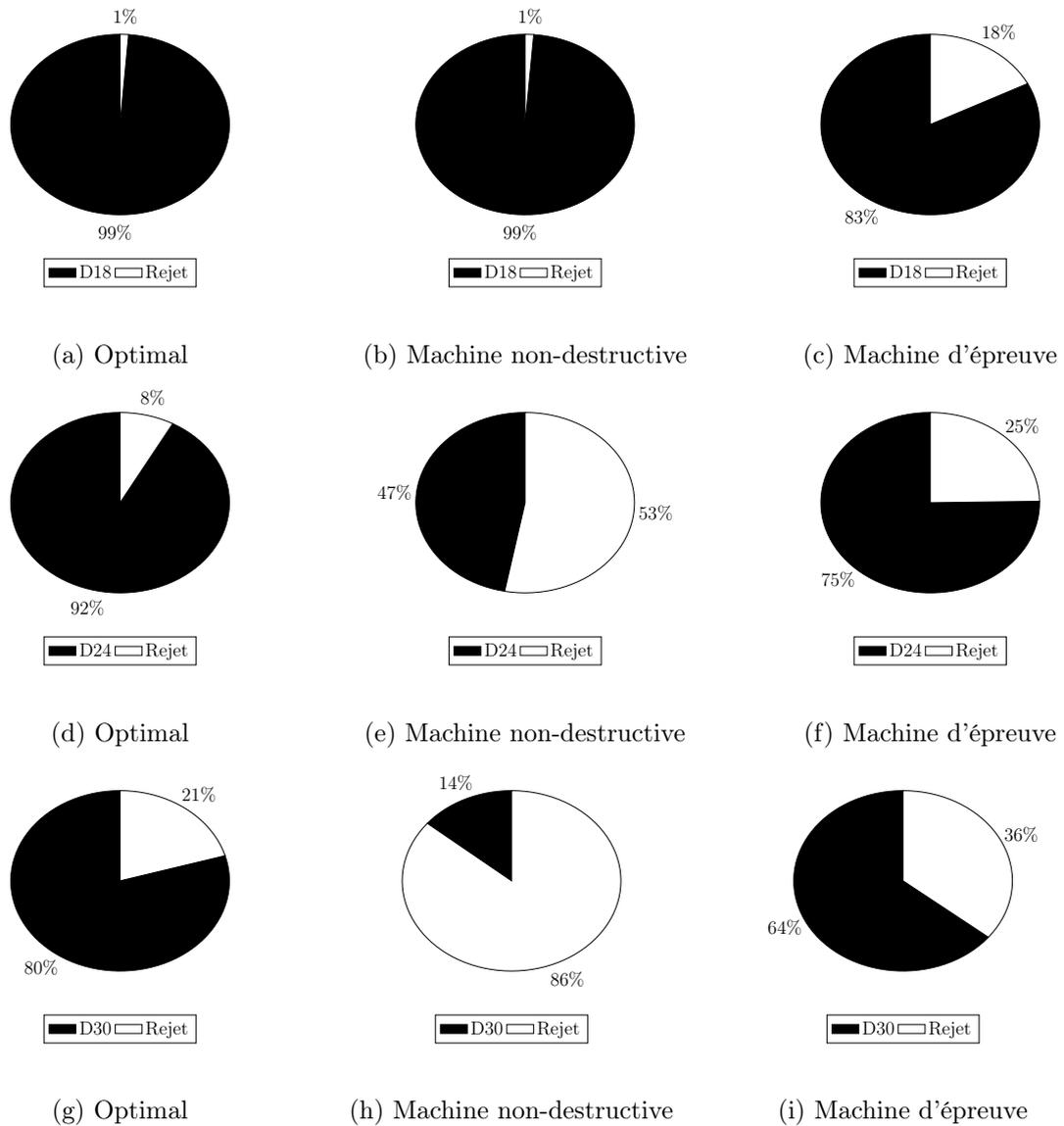


FIGURE 3.23 – Comparaison du classement selon les différentes approches

Le tableau 3.10 montre les valeurs caractéristiques obtenues pour les sciages ainsi classés à l'aide de la machine d'épreuve. La valeur des bornes peut sembler surprenante mais leurs valeurs lors du calcul ELU à l'Eurocode 5 seront bien égales à $1.3 \times 13.9 = 18.07MPa$ pour le D18, $1.3 \times 18.5 = 24.05MPa$ pour le D24 et enfin $1.3 \times 23.1 = 30.03MPa$ pour le D30. Il apparaît que cette démarche permet le respect des valeurs d'attribution d'un sciage à une classe et ce de manière très conservatrice.

| Classe mécanique | Masse volumique | | MOE moyen | | MOR | |
|---------------------|-----------------|-------|-----------|--------|--------|-------|
| | Valeur | Borne | Valeur | Borne | Valeur | Borne |
| D18 | 628.7 | 475 | 10 833 | 9 500 | 21.74 | 13.9 |
| D24 | 630.5 | 485 | 11 026 | 10 000 | 25.14 | 18.5 |
| D30 | 635.6 | 530 | 11 401 | 11 000 | 28.61 | 23.1 |

TABLE 3.10 – Valeurs caractéristiques des lots obtenus et bornes définies

Cette approche permettrait de répondre de manière satisfaisante à la problématique de la valorisation du chêne de qualité secondaire. En effet, elle permet d’assurer de bons rendements pour des classes mécaniques D24 ou D18 tout en assurant un niveau de fiabilité équivalent aux méthodes de classement par machine en vigueur pour le cas des résineux. Les très bonnes propriétés mécaniques du chêne permettent de ne générer finalement que peu de rejet pour ces deux classes.

3.6 Conclusion sur le classement mécanique du bois massif

La première partie de chapitre a permis de mettre en avant les problèmes liés au réglage d’une machine de classement. Ainsi, il a été montré que le réglage est fortement influencé par le nombre et le type des propriétés indicatrices utilisées. Ainsi dans le cas du douglas et du chêne, l’usage d’une propriété indicatrice la mieux corrélée possible avec le MOR donnerait les meilleurs résultats. Dans le cas de l’épicéa, l’amélioration des rendements passe par une meilleure prédiction du MOE. Il a aussi été mis en évidence que les libertés laissées par le cadre normatif pour le réglage des seuils pouvaient être exploitées en définissant des stratégies de réglages. Ces différentes stratégies pouvant alors soit valoriser au mieux la ressource (classer le plus grand nombre de sciages dans les plus hautes classes), soit minimiser le rejet ou encore maximiser la valorisation économique.

C’est pourquoi dans la deuxième partie, l’influence des deux stratégies différentes de réglages a été analysée pour comparer le rendement de l’ensemble des machines de notre étude sur différentes combinaisons de classe (la stratégie de minimisation du rejet a été écartée de cette analyse car elle est très proche de la maximisation de la valorisation économique). Ceci a notamment permis de montrer que maximiser la valorisation économique conduisait le plus souvent à minimiser le rejet en sacrifiant une proportion de sciages dans les plus hautes classes. Les autres résultats sur les différents rendements obtenus sont en accord avec ce qui vient d’être rappelé. En effet, les machines mesurant des singularités (améliorant alors la prédiction du MOR) profitent beaucoup plus au classement du douglas qu’à celui de l’épicéa. Les rendements obtenus sur l’épicéa étant déjà très bons pour

les machines estimant le MOE de manière vibratoire. Il a aussi été mis en évidence que la mesure des singularités permet aussi d'améliorer le rendement pour les combinaisons de classe de qualité supérieure.

La différence de prix des technologies mis en oeuvre de ces deux types de machines étant très importante, leur justification a ensuite été discutée à partir d'une analyse économique visant à répondre à la question du choix d'une machine de classement. Cette analyse met bien en évidence que pour choisir une machine de classement il faut considérer l'essence à classer, la classe de résistance recherchée et le volume de production. La comparaison des rendements de ces différentes machines avec le classement visuel aurait pu présenté un intérêt dans cette analyse (cette méthode étant encore la plus utilisée). Le caractère subjectif du classement visuel et le fait que ce dernier, s'il est effectué en laboratoire et en milieu industriel peut donner des résultats différents, il a été choisi de ne pas réaliser le classement par méthode visuelle sur nos différentes lots.

Enfin, une dernière partie portant sur le classement mécanique du chêne a mis en lumière les très faibles rendements des méthodes couramment utilisées pour le classement des résineux. Cette dernière partie s'est donc attachée à proposer une méthode alternative basée sur une machine d'épreuve. Cette dernière, bien que dans notre cas seulement théorique, semble pouvoir répondre à la problématique de la valorisation du chêne.

Chapitre 4

Classement mécanique de poutres reconstituées

4.1 Refente du bois lamellé-collé

4.1.1 Introduction

Comme il avait été précisé lors du chapitre 1, les formules de la norme EN 14080 relatives à la diminution de propriétés mécaniques à la suite de la refente sont issues de résultats d'essais portant sur des poutres de largeur 90 mm. Notre premier objectif est d'étudier l'influence de la refente sur des largeurs de poutres différentes. Les deux conditions d'application de ces formules ne permettent pas de caractériser des poutres lamellées-collées refendues de qualité inférieure au GL28. Aussi notre second objectif est de quantifier cette influence sur des qualités inférieures et plus précisément le GL24 qui est couramment refendu en France.

Etant donné que la classe de résistance attribuée au bois lamellé-collé est directement donnée par le classement mécanique des lamelles, une approche basée sur l'influence de la refente sur des lamelles a été réalisée. Dans un second temps, des essais destructifs analogues à l'étude présentée ci-dessus ont été menés sur des poutres de sections plus importantes. De plus, ces deux approches ont aussi été analysées à l'aide de modèles numériques.

4.1.2 Essais destructifs à l'échelle de la lamelle

4.1.2.1 Matériel et méthodes

4.1.2.1.1 Echantillon

Deux sections initiales (45x214 and 45x174) et deux qualités (C30 and C24) de lamelles en épicéa ont été choisies pour un total de 200 sciages : 50 pour chaque combinaison (25 entières et 25 refendues).

4.1.2.1.2 Tests destructifs

Les essais ont été effectués selon la norme NF EN 408+A1 et ont permis de mesurer la résistance à la flexion axiale et le module d'élasticité global en flexion. De plus, les corrections de la norme EN 384 ont aussi été appliquées permettant de prendre en compte l'effet d'échelle et les différences de conditions d'essais (coefficient kh et kl).

4.1.2.2 Résultats

Les valeurs moyennes et caractéristiques (EN 14358) obtenues pour la masse volumique, le module d'élasticité et la résistance à la flexion, sont présentées table 4.1. L'information de classe de résistance réelle basée sur les essais destructifs permet de montrer que les bois fournis ne sont pas conformes au classement mécanique à cause de valeurs de modules élastiques trop faibles. De plus, les valeurs de coefficient de variation de la résistance à la flexion de chaque sous lot sont élevées atteignant jusqu'à 33.3%.

| Classe attendue | Désignation | ρ_{mean} $kg.m^{-3}$ | ρ_k | COV (%) | $E_{0,mean}$ (MPa) | $E_{0,k}$ | COV (%) | f_{mean} (MPa) | $f_{m,k}$ | COV (%) | Classe mesurée |
|-----------------|-------------|------------------------------|----------|------------|-----------------------|-----------|------------|---------------------|-----------|------------|----------------|
| C24 | 45x214 | 457 | 385 | 8.4 | 8390 | 8138 | 21.5 | 37.4 | 16.8 | 29.2 | C16 |
| | 45x214 R | 439 | 380 | 7.1 | 8203 | 8012 | 17.1 | 36.2 | 25.7 | 15.4 | C16 |
| | 45x174 | 435 | 375 | 7.4 | 7391 | 7148 | 24.1 | 43.5 | 16.2 | 33.3 | C14 |
| | 45x174 R | 462 | 393 | 7.9 | 10259 | 10058 | 14.7 | 49.7 | 30.2 | 20.9 | C22 |
| C30 | 45x214 | 500 | 444 | 5.9 | 10050 | 9857 | 14.1 | 46.7 | 38.2 | 9.7 | C22 |
| | 45x214 R | 489 | 440 | 5.3 | 9301 | 9092 | 16.8 | 47.8 | 19.6 | 31.4 | C18 |
| | 45x174 | 502 | 443 | 6.1 | 10166 | 10017 | 10.8 | 54.1 | 39.8 | 14.0 | C22 |
| | 45x174 R | 509 | 440 | 7.2 | 9992 | 9786 | 15.4 | 54.3 | 38.3 | 15.7 | C20 |

TABLE 4.1 – Valeurs moyennes, caractéristiques (EN 14358) et coefficient de variation de la masse volumique, du module d'élasticité et de la résistance à la flexion.

La table 4.2 présente la différence entre les propriétés mécaniques des sciages refendus et entiers. Les différences observées concernant la masse volumique sont très faibles. En ce qui concerne le module d'élasticité moyen, une diminution du module d'élasticité est constatée entre les sciages entiers et les sciages refendus dans 3 cas, une importante augmentation a cependant été relevée dans le cas des sciages en C24 pour une section de

45x174 mm². Enfin, les différences entre les valeurs fractiles de résistance à la flexion des 4 cas considérés sont fortement variables avec une perte maximale de 18.5 MPa pour les sciages de section 45x214 mm² de qualité C30 et une augmentation maximale de 14 MPa pour ceux de section 45x174 mm² de qualité C24.

| Classe | Section initiale (mm ²) | Différence de propriétés mécaniques | | | | | |
|--------|-------------------------------------|---|----------|-----------------------|--------------------|---------------------|--------------------|
| | | ρ_{mean} <i>kg.m⁻³</i> | ρ_k | $E_{0,mean}$ (MPa) | $E_{0,k}$ (MPa) | f_{mean} (MPa) | $f_{m,k}$ (MPa) |
| C24 | 45x214 | -18.6 | -4.5 | -186.3 | -125.7 | -1.2 | 8.9 |
| | 45x174 | 26.7 | 18.8 | 2868.3 | 2909.4 | 6.3 | 14 |
| C30 | 45x214 | -10.8 | -3.6 | -749.4 | -765.0 | 1.2 | -18.5 |
| | 45x174 | 7.3 | -3.3 | -174.4 | -230.8 | 0.2 | -1.5 |

TABLE 4.2 – Différences entre les propriétés mécaniques de sciages entiers et refendus

Ces résultats montrent qu'il est difficile de caractériser l'influence de la refente sur les propriétés mécaniques des lamelles de manière expérimentale. En effet, le classement mécanique des sciages et son caractère statistique peut conduire à une très grande variabilité sur des petits effectifs, ainsi la valeur fractile peut se retrouver très influencée en présence d'un ou deux sciages de qualité inférieure. C'est le cas notamment pour les sciages de qualité C24 et de section 45x174 mm². Dans ce sous lot, deux sciages ont cassé à des valeurs inférieures à 18MPa affectant grandement la valeur fractile de la résistance à la flexion. Dans le cas des lots non refendus, on pourrait supprimer ces différents sciages pour se retrouver dans une situation où le classement réel obtenu par les essais destructifs correspond à la qualité attendue, mais cette démarche n'est pas envisageable dans le cas des sous lots refendus puisque les sciages les plus faibles le sont peut-être à cause de la refente. Pour des raisons évidentes, il n'est pas possible de tester des sciages refendus réellement issus de la refente d'un sciage entier. L'exemple sur les sciages de qualité C24 pour une section initiale de 45x174 mm² démontre bien le problème que cela peut poser, les sciages non refendus sont apparemment de bien moins bonne qualité que les sciages refendus et il devient alors difficile de comparer ces deux populations. Ces différentes observations sont en accord avec les résultats d'une analyse de variance sur les valeurs des résistances à la flexion des sciages entiers et refendus. Cette analyse est présentée figure 4.1. Il apparaît alors que les différences observées entre les résistances de sciages entiers et refendus ne sont pas statistiquement significatives (p -value > 0.05). La très grande variabilité au sein des différents sous-lots est aussi visible, ce qui influe grandement la valeur caractéristique de ces sous-lots. Cela montre qu'il est difficile de conclure sur l'influence de la refente sur les propriétés mécaniques des lamelles de manière expérimentale. La partie suivante montre les résultats d'une étude expérimentale menée sur des poutres en bois

lamellé-collé, de manière analogue à l'étude présentée en introduction de ce chapitre, mais sur des poutres ayant des sections plus importantes.

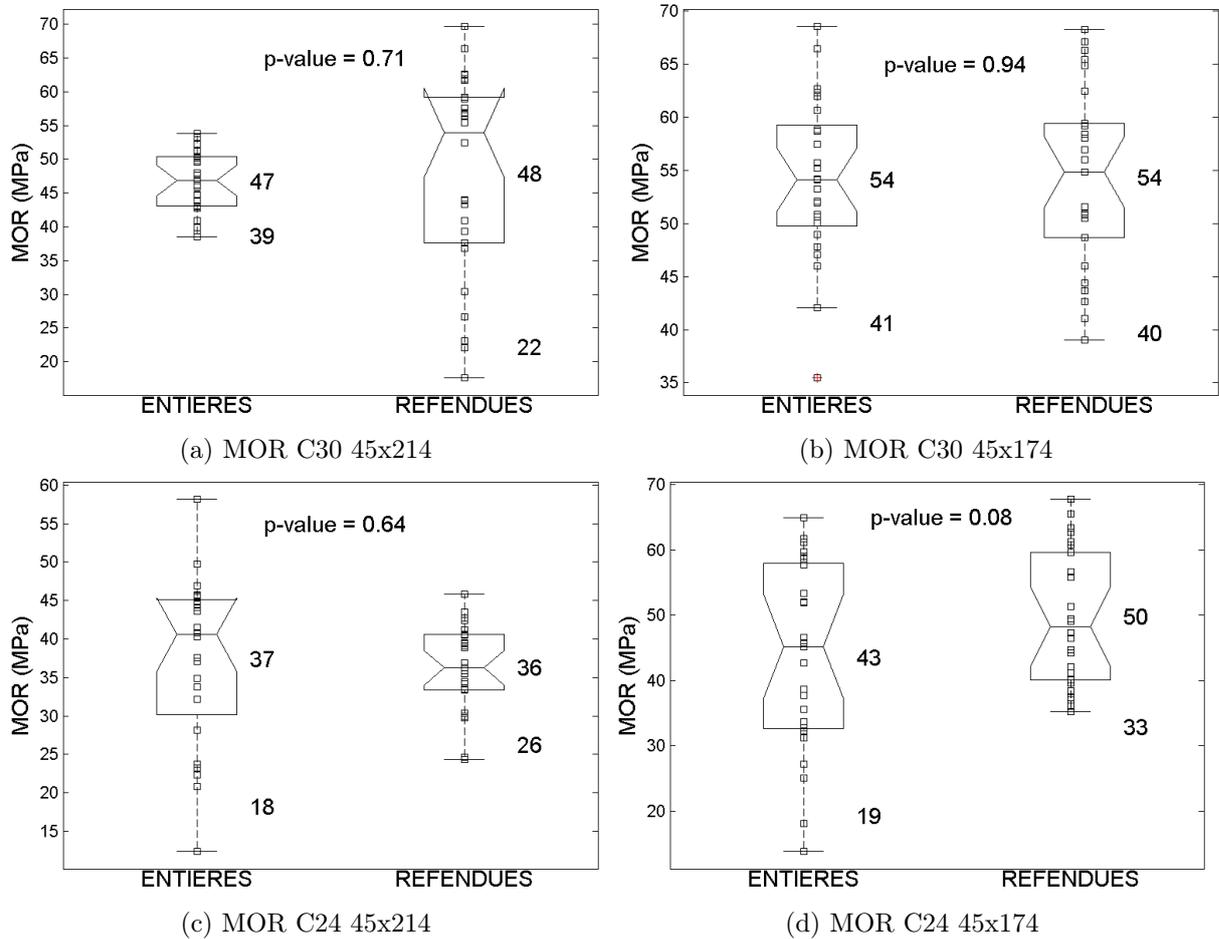


FIGURE 4.1 – Résultats des tests destructifs sur les lamelles C30 et C24 pour les différentes sections initiales : cas de la résistance à la flexion

4.1.3 Essais destructifs sur des poutres lamellées-collées

4.1.3.1 Matériel et méthodes

4.1.3.1.1 Echantillon

Un total de 24 poutres de section 170x400 mm² ont été élaborées à partir de lamelles de qualité mécanique C24, parmi ces 24 poutres 8 ont été refendues pour produire 16 poutres de section 80x400 mm². La même démarche a été appliquée pour des poutres de qualité GL28 à partir de lamelle de qualité C30. L'étude porte donc sur 64 poutres d'épicéa réparties de manière équivalente entre les différentes qualités choisies.

Le choix des dimensions ainsi que les classes mécaniques du lot permettront d'évaluer l'influence de la refente sur des poutres de sections plus importantes et pour une qualité

inférieure aux différents cas couverts par la norme EN 14080.

4.1.3.1.2 Tests destructifs

Les essais ont été effectués à Egletons par le GEMH selon la norme NF EN 408+A1 et ont permis de mesurer la résistance à la flexion, le module d'élasticité global et local en flexion. Le module d'élasticité global est calculé selon deux hypothèses : la première en prenant le module de cisaillement infini (E_g) et la seconde en prenant un module de cisaillement égal à 650 MPa (E_{gc}). Les valeurs de module d'élasticité ont été corrigées pour prendre en compte l'humidité réelle des poutres et ramener ces valeurs de modules à un module équivalent pour une humidité de 12%, selon la norme EN 384. Les valeurs de résistance à la flexion ont quant à elle été corrigées grâce à un facteur d'échelle ramenant la résistance à une valeur équivalente à des poutres de section 150x600 mm², selon la norme EN 1194.

4.1.3.2 Résultats

Les valeurs moyennes constatées, pour les différents modules élastiques et la résistance à la flexion, sont présentées tableau 4.3. La perte observée sur la valeur moyenne des modules élastique locaux E_l est égale à 398 MPa pour les poutres de qualité GL24 alors qu'elle est d'environ 532 MPa pour celles en GL28. Pour les modules E_g et E_{gc} , la perte est du même ordre de grandeur, la valeur moyenne de la perte observée vaut 666 et 243 MPa respectivement pour les poutres de qualité GL24 et GL28. En ce qui concerne la résistance en flexion, on observe une perte de 4 MPa entre les poutres initiales et refendues de qualité GL24. Dans le cas du GL28, la tendance est inversée et la résistance en flexion des poutres refendues est supérieure de 2.4 MPa. Il est cependant préférable, en ce qui concerne la résistance à la flexion, de considérer les valeurs de résistance caractéristiques. La table 4.4. présente les valeurs caractéristiques de la résistance en flexion et de la masse volumique des différents lots, calculées en accord avec l'EN 14358.

| | E_l | COV | E_g | COV | E_{gc} | COV | $f_{m,mean}$ | COV |
|--------|--------|-----|--------|-----|----------|-----|--------------|------|
| GL24 | 12 663 | 9.9 | 11 327 | 8.6 | 11 935 | 9.0 | 37.1 | 17.1 |
| GL24-R | 12 265 | 6.3 | 10 690 | 4.9 | 11 241 | 5.1 | 33.1 | 14.4 |
| GL28 | 14 038 | 7.3 | 12 391 | 6.7 | 13 114 | 7.1 | 37.5 | 15.1 |
| GL28-R | 13 506 | 8.0 | 12 152 | 6.4 | 12 868 | 6.8 | 39.1 | 15.4 |

TABLE 4.3 – Valeurs moyennes et coefficient de variation des propriétés mécaniques mesurées

A partir de ces différents tests, on peut apprécier l'influence de la refente sur la masse volumique caractéristique et la résistance caractéristique à la flexion. En ce qui concerne

la masse volumique, il n’y a pas de différences significatives entre les poutres refendues et initiales. Une perte de 0.8 MPa dans le cas du GL24 est constatée sur la valeur caractéristique de résistance à la flexion alors qu’une augmentation de 1.2 MPa est observée pour les poutres en GL28.

| | $f_{m,k}$ | ρ_k |
|--------|-----------|----------|
| GL24 | 25.3 | 439 |
| GL24-R | 24.5 | 441 |
| GL28 | 27.0 | 460 |
| GL28-R | 28.2 | 466 |

TABLE 4.4 – Valeurs caractéristiques de la résistance à la flexion et de la masse volumique (fractile à 5%)

L’étude présentée met en évidence un manque dans les préconisations de l’EN 14080 relatif à l’effet de la section de la poutre initiale sur l’influence de la refente. Les formules proposées ont été déduite à partir d’essais réalisés sur des poutres de sections environ trois fois inférieures à celles de l’étude présentée. Or selon la qualité choisie, une perte de 0.8 MPa ou un gain de 1.2 MPa est observé, et dans les deux cas, la différence entre les propriétés mécaniques de la poutre initiale et refendue est faible. Les recommandations de l’EN 14080 (une perte de 4MPa dans le cas de poutre GL 28) ne sont donc pas en accord avec les résultats de cette étude. L’influence de la refente sur des poutres de hautes classes mécaniques et de forte section semble être limitée. En suivant la logique des formules proposées par l’EN 14080, la refente d’une poutre en GL24 devrait avoir une influence plus forte sur la résistance à la flexion, or dans le cadre de cette étude, une perte limitée à 0.8 MPa est constatée. Le fait d’une plus grande section initiale semble ici aussi diminuer l’influence de la refente. En ce qui concerne le module d’élasticité local, une perte de 532 MPa est observée expérimentalement sur les poutres GL28 et de 398 MPa pour le GL24 ce qui semble en accord avec la préconisation normative d’une perte de 500 MPa.

Cependant, ces différentes observations sont à prendre avec précaution, en effet la figure 4.2 montre les résultats d’une analyse de variance des différentes propriétés mécaniques dans les différents cas étudiés. Il apparaît alors que les différences observées ne sont pas statistiquement significatives que ce soit : pour la masse volumique, le MOE ou le MOR et quelque soit la qualité des poutres. Cette analyse met en évidence encore une fois qu’il est difficile de traiter ce problème de manière expérimentale, cela nécessiterait un nombre trop important d’échantillons. C’est pourquoi dans la suite il a été choisi de traiter ce problème à l’aide de simulations numériques.

4.1. REFENTE DU BOIS LAMELLÉ-COLLÉ

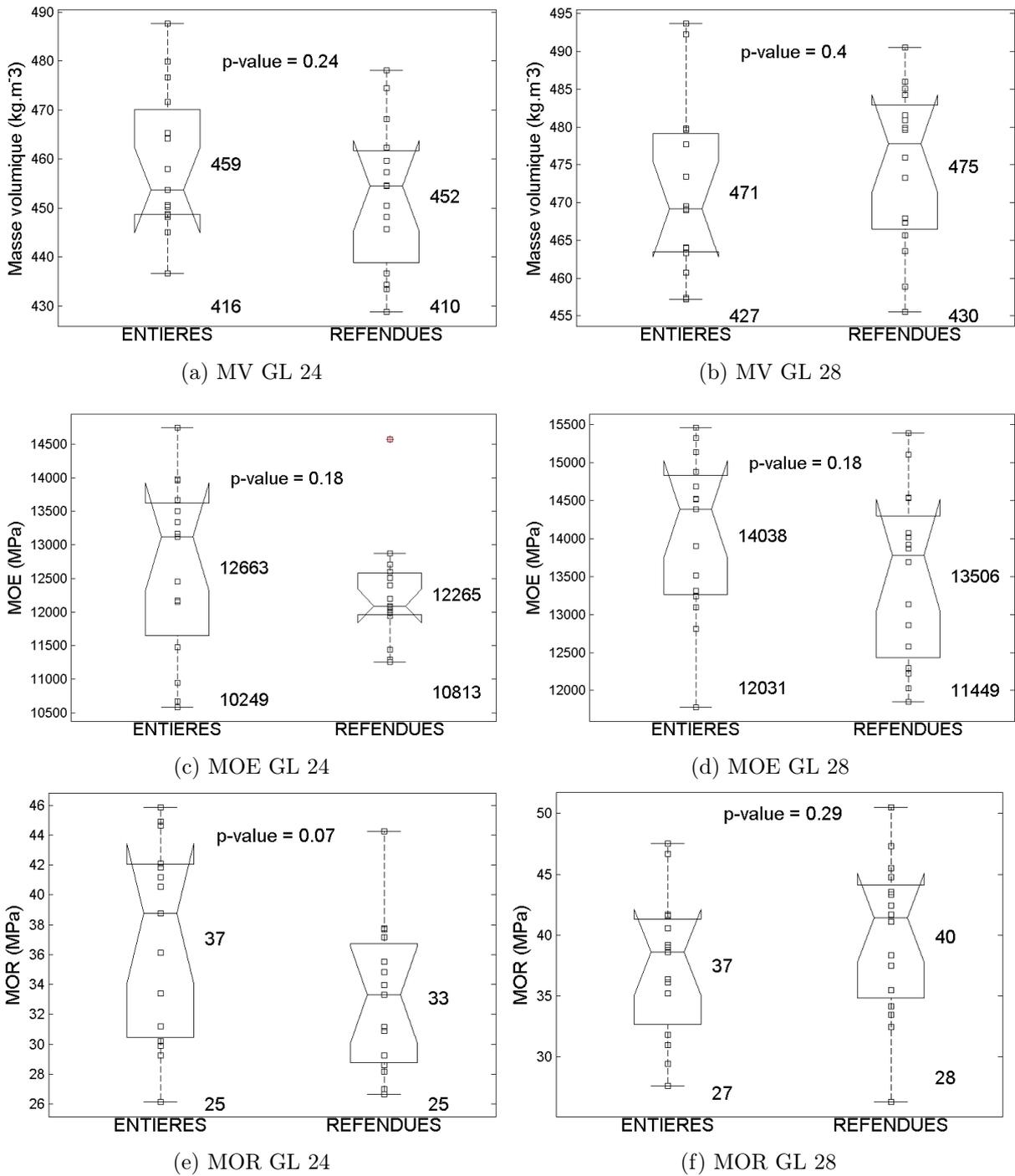


FIGURE 4.2 – Résultats des tests destructifs sur les poutres lamellées-collées

4.1.4 Influence de la refente sur des lamelles : modèle analytique

4.1.4.1 Matériel et méthodes

4.1.4.1.1 Echantillon et essais destructifs

Dans cette partie, l'échantillon est composé du lot de 437 sciages d'épicéa décrit lors des chapitres précédents. Pour rappel il est composé de sciages de longueur 4m répartis en trois sections : 40x100, 50x150 et 65x200 mm².

4.1.4.1.2 Outil de prédiction des propriétés mécaniques

Tous ces sciages ont été analysées avec le scanner CombiScan+ du LaBoMaP permettant d'obtenir différentes informations de manière locale telles que décrites lors du chapitre 2 et un modèle analytique, basé sur la mesure des singularités locales, permet d'estimer le module d'élasticité et la résistance en flexion des sciages.

4.1.4.1.3 Refente numérique

Dans un premier temps, les différents paramètres du modèle sont optimisés pour obtenir la meilleure corrélation possible (en pratique le coefficient de détermination le plus grand possible) entre les valeurs prédites par le modèle et des résultats issus d'essais destructifs. Cette optimisation est donc menée sur des sciages entiers. Ensuite, les données d'entrée du modèle étant des images, les moitiés d'images (dans le cas de la refente simple) ou tiers d'image (refente double) deviennent les nouvelles données d'entrée du modèle. Ainsi pour chaque sciage, il est possible de définir deux (ou trois) sciages issus de la refente du sciage entier. Un exemple de refente simple sur un sciage en épicéa est montré figure 4.3.

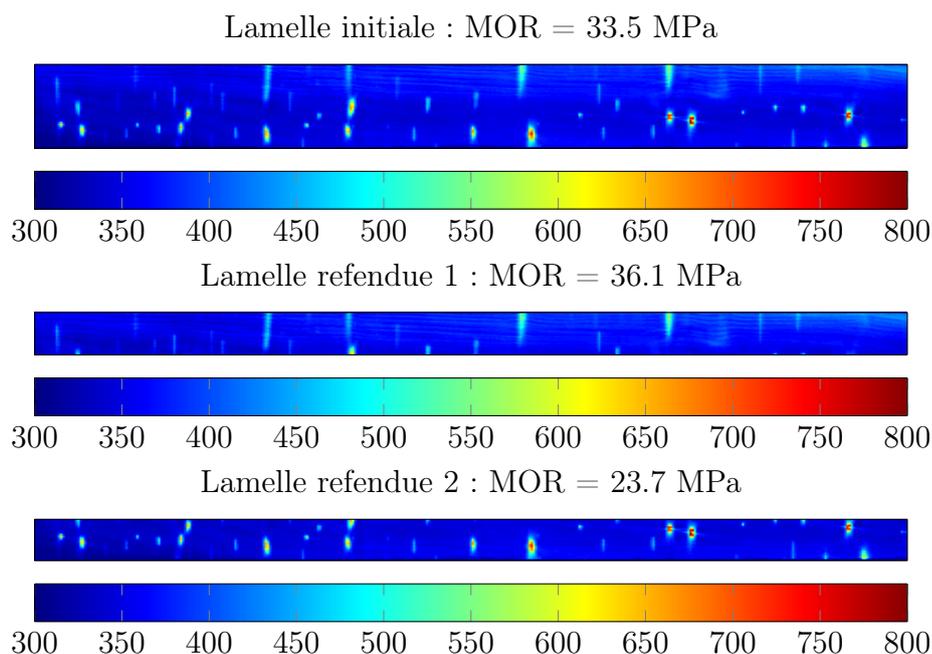


FIGURE 4.3 – Refente numérique simple : résistance à la flexion prédite de la lamelle entière et des deux lamelles refendues.

Finalement pour chaque planche les informations suivantes sont disponibles : la masse volumique moyenne, le module d'élasticité, et la résistance à la flexion de la planche initiale, des deux sciages issus de la refente simple ou des trois sciages issus de la refente double. Différents sous-lots ont ensuite été faits en fonction de leur valeur caractéristique de résistance à la flexion correspondant à des sciages de qualité C40, C35, C30 et C24. De plus, les sciages de section 40x100 ont été supprimés de l'analyse dans le cas de la double refente pour correspondre aux recommandations de l'EN 14080 (la largeur obtenue étant inférieure à la limite autorisée de 38mm). Enfin, pour évaluer l'influence de la hauteur initiale des sciages, des sous-lots ont été constitués dans les groupes de qualités mécaniques différentes, selon la section initiale des sciages. Tout ces sous-lots sont décrits dans la table 4.5.

| Simple refente | | | | | | | | |
|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------------|----------------|
| Classe | 40x100 | | 50x150 | | 65x200 | | Toutes sections | |
| | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ |
| C40 | 44 | 40.14 | 42 | 40.08 | 5 | 42.25 | 91 | 40.23 |
| C35 | 76 | 35.03 | 63 | 35.03 | 20 | 35.04 | 159 | 35.00 |
| C30 | 59 | 30.18 | 47 | 30.10 | 47 | 30.11 | 155 | 30.02 |
| C24 | 52 | 24.56 | 68 | 24.05 | 75 | 24.21 | 196 | 24.11 |

| Double refente | | | | | | | | |
|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|-----------------|----------------|
| Classe | 40x100 | | 50x150 | | 65x200 | | Toutes sections | |
| | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ | N | $f_{m,k}(MPa)$ |
| C40 | - | - | 42 | 40.21 | 5 | 42.36 | 47 | 40.30 |
| C35 | - | - | 63 | 35.18 | 20 | 35.19 | 86 | 35.18 |
| C30 | - | - | 47 | 30.00 | 47 | 30.12 | 100 | 30.05 |
| C24 | - | - | 68 | 24.27 | 75 | 24.04 | 144 | 24.20 |

TABLE 4.5 – Détails des différents sous-lots : nombre de sciages et valeurs caractéristiques de résistance à la flexion

L'influence de la simple ou double refente sur la résistance à la flexion des sciages refendus virtuellement est ensuite évaluée. A partir de ces résultats, une classe de résistance est assignée aux lamelles refendues et la qualité de la poutre en bois lamellé-collé, qui peut être fabriquée à partir de ces lamelles, est déterminée à partir des équivalences de l'EN 14080. Ces équivalences sont rappelés table 4.6. La valeur de résistance caractéristique, des poutres en bois lamellé-collé refendues calculée à partir des formules de la norme est aussi rappelée.

| Classe BLC | Classe lamelle | $f_{m,g,k}$ (MPa) | $f_{m,s,k}$ simple refente | $f_{m,s,k}$ double refente | |
|------------|----------------|-------------------|--|----------------------------|------|
| GL20h | C18/T11 | 20 | Déterminées à partir des propriétés déclarées des lamelles | | |
| GL22h | C22/T13 | 22 | | | |
| GL24h | C24/T14 | 24 | | | |
| GL26h | C27/T16 | 26 | | | |
| GL28h | C30/T18 | 28 | | 24 | |
| GL30h | C35/T21 | 30 | | 27.6 | 23.6 |
| GL32h | C40/T24 | 32 | | 30.7 | 26.7 |

TABLE 4.6 – Equivalences entre classe de résistance des lamelles et classe de résistance de poutre en bois lamellé-collé homogène. Valeur caractéristique de la résistance en flexion de poutres refendues déduite des formules de l'EN 14080.

4.1.4.2 Résultats

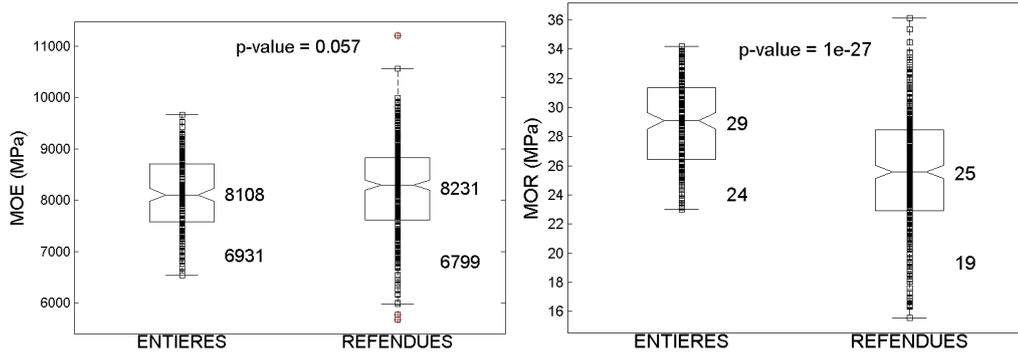
4.1.4.2.1 Influence de la refente sans prise en considération de la hauteur initiale

La figure 4.4 présente les résultats de l'analyse de variance entre les populations de lamelles entières et refendues pour les différentes qualités. Elle montre qu'en moyenne le module d'élasticité des lamelles refendues est le même que celui des lamelles entières et ce quelque soit la classe de résistance ($p\text{-value} > 0.05$). Il apparait cependant que la variabilité est plus forte dans le cas des sciages refendus. Concernant la résistance, elle est plus faible en moyenne d'environ 4 MPa pour les sciages refendus, cette fois cette différence est bien statistiquement significative. La variabilité est elle aussi beaucoup plus importante pour les lamelles refendues.

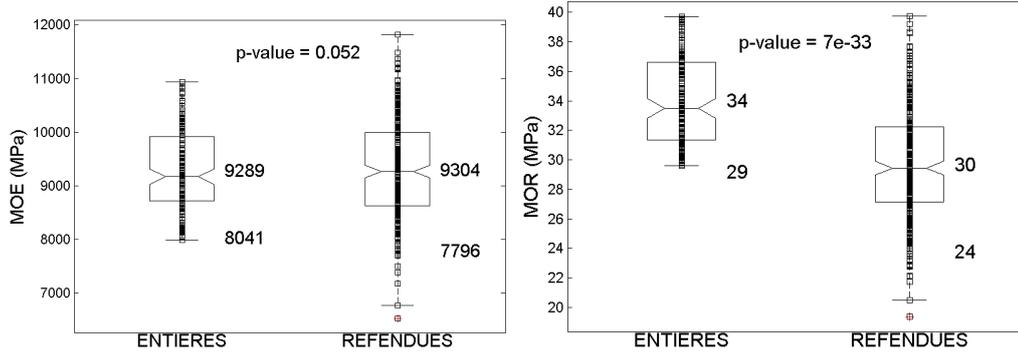
La résistance à la flexion caractéristique des différents sous-lots obtenus après refente numérique des lamelles initiales est décrite tableau 4.7. Dans le cas de la refente simple deux sciages virtuels sont créés, la résistance à la flexion caractéristique pour cette catégorie de lamelle est prise comme la moyenne de la valeur fractile à 5% pour chaque sous-lot. La même méthode est appliquée pour la double refente. Il apparait que le processus de refente induit toujours une diminution de la résistance caractéristique et que cette diminution est plus importante dans le cas de la double refente.

| Simple refente | | | | | | |
|----------------|---------|------------|------------|------------|---------------|----------------|
| Classe | Entière | Refendue 1 | Refendue 2 | Moyenne | Ecart | |
| C40 | 40.23 | 32.83 | 33.44 | 33.14 | -7.1 (-17.6%) | |
| C35 | 35.00 | 28.31 | 27.93 | 28.12 | -6.9 (-19.7%) | |
| C30 | 30.02 | 24.63 | 23.96 | 24.30 | -5.7 (-19.1%) | |
| C24 | 24.11 | 18.86 | 18.57 | 18.71 | -5.4 (-22.4%) | |
| Double refente | | | | | | |
| Classe | Entière | Refendue 1 | Refendue 2 | Refendue 3 | Moyenne | Ecart |
| C40 | 40.30 | 29.89 | 30.76 | 29.93 | 30.19 | -10.1 (-25.1%) |
| C35 | 35.18 | 24.75 | 23.25 | 21.76 | 23.25 | -11.9 (-33.9%) |
| C30 | 30.05 | 18.58 | 20.81 | 17.56 | 18.99 | -11.1 (-36.8%) |
| C24 | 24.20 | 13.30 | 16.62 | 11.14 | 13.69 | -10.5 (-43.4%) |

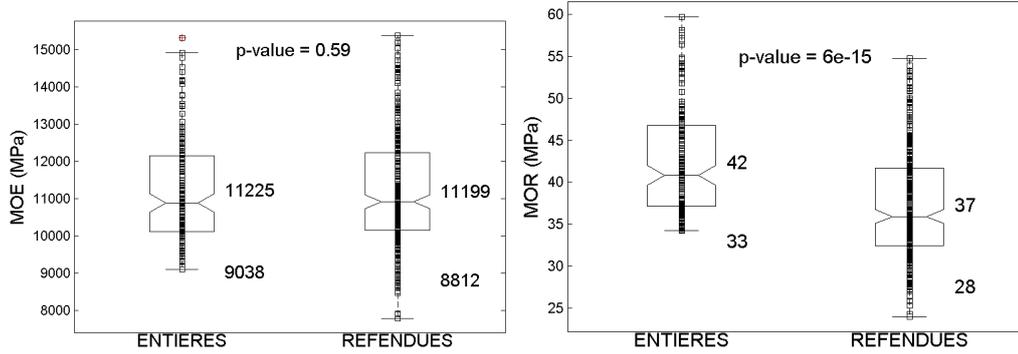
TABLE 4.7 – Influence de la refente simple ou double pour différentes classes mécaniques



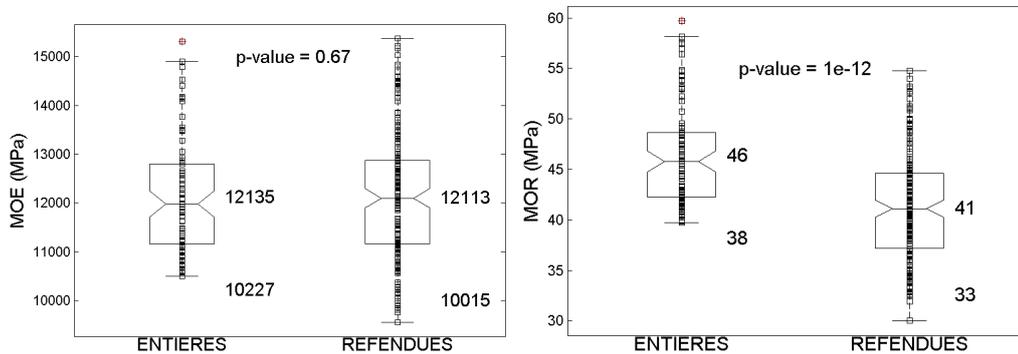
(a) Lamelles de qualité C24



(b) Lamelles de qualité C30



(c) Lamelles de qualité C35



(d) Lamelles de qualité C40

FIGURE 4.4 – Conséquence de la refente simple sur les propriétés mécaniques des lamelles.

A partir de ces résultats il est alors possible de déterminer la classe de résistance du bois lamellé-collé réalisable à partir des lamelles refendues en accord avec l'EN14080. La table 4.8 compare ainsi cette classe à la recommandation des formules de l'EN14080.

| Simple refente | | | Modèle | Norme |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------|----------|
| Classes initiales | $f_{0.05}$ sciages refendus | Classe refendue | Classe GLs | EN 14080 |
| GL32h/C40 | 33.14 | C30 | GL28s | GL30s |
| GL30h/C35 | 28.12 | C27 | GL26s | GL26s |
| GL28h/C30 | 24.30 | C24 | GL24s | GL24s |
| GL24h/C24 | 18.71 | C18 | GL20s | N-C |

| Double refente | | | Modèle | Norme |
|-------------------|-----------------------------|-----------------|------------|----------|
| Classes initiales | $f_{0.05}$ sciages refendus | Classe refendue | Classe GLs | EN 14080 |
| GL32h/C40 | 30.19 | C30 | GL28s | GL26s |
| GL30h/C35 | 23.25 | C22 | GL22s | GL22s |
| GL28h/C30 | 18.99 | C18 | GL20s | GL20s |
| GL24h/C24 | 13.69 | Rejet | Rejet | N-C |

TABLE 4.8 – Poutre lamellée-collée réalisable à partir des lamelles refendues et comparaison par rapport aux recommandations de l'EN 14080

4.1.4.2.2 Influence de la hauteur initiale sur le processus de refente

Il a été choisi d'évaluer de plus l'influence de la hauteur initiale des lamelles sur le processus de refente. La moyenne des valeurs caractéristiques de résistance à la flexion des lamelles refendues pour les sous-lots des trois sections initiales est donnée tableau 4.9. Le nombre de sciages dans chaque sous-lot est indiqué entre parenthèses, les sous-lots composés de moins de 20 sciages sont retirés de l'analyse, la valeur du fractile à 5% n'étant pas représentative dans ce cas.

| | Simple refente | | | Double refente | |
|-----|----------------|------------|------------|----------------|------------|
| | 40x100 | 50x150 | 65x200 | 50x150 | 65x200 |
| C40 | 32.89 (44) | 33.91 (42) | 37.44 (5) | 29.21 (42) | 32.03 (5) |
| C35 | 27.45 (76) | 28.87 (63) | 27.92 (20) | 23.33 (63) | 23.61 (20) |
| C30 | 22.89 (59) | 24.52 (47) | 26.16 (47) | 17.54 (47) | 21.05 (47) |
| C24 | 16.85 (52) | 18.86 (68) | 20.98 (75) | 12.52 (68) | 15.52 (75) |

TABLE 4.9 – Résistance à la flexion caractéristique en fonction de la section initiale pour la simple et double refente. Le nombre de sciages de chaque sous-lot est indiqué entre parenthèses.

La figure 4.5 montre la différence entre la résistance à la flexion caractéristique des lamelles initiales et celle obtenue à l'issue du processus de refente en fonction de la section initiale.

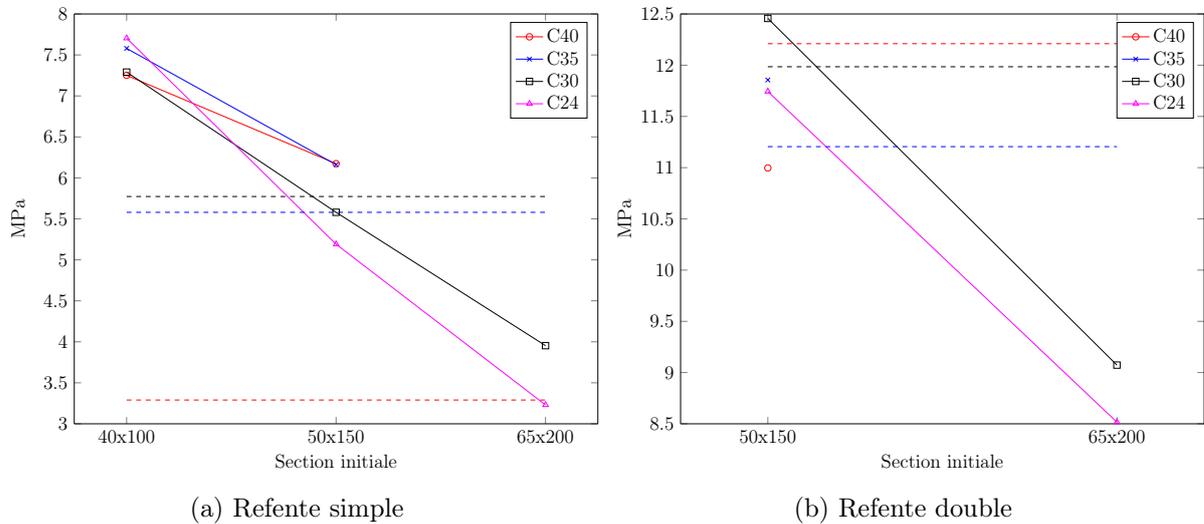


FIGURE 4.5 – Différence entre la résistance à la flexion caractéristique des lamelles initiales et celles obtenues à l'issue du processus de refente en fonction de la section initiale. En pointillé sont reportés les recommandations de l'EN14080.

Les résultats de la première partie sont en accord avec les recommandation de l'EN14080, en effet seulement deux cas ne mènent pas à la même classe de bois laméllé-collé. Le premier de ces cas est plus défavorable que la norme : la simple refente de lamelles C40 permettant la production de poutre GL32h donne des lamelles de qualité C30 permettant seulement la fabrication de poutre GL28 alors que la recommandation indique de déclasser la poutre en GL30. Cependant dans cet exemple précis, la valeur caractéristique en flexion est égale à 33.14 MPa, ce qui est proche de la classe C35, et serait alors en accord avec les formules proposées par la norme. Le deuxième cas semble montrer que la norme est cette fois trop conservative dans le cas de la double refente de poutres GL32. La double refente de poutre de haute classe semble avoir une influence plus faible ce qui peut s'expliquer par des défauts de plus petite taille.

Dans la seconde partie, l'influence de la section initiale a été analysée. Il apparait clairement que le processus de refente a une influence beaucoup plus faible sur des poutres de sections plus grandes. Pour une section initiale de 40x100 la perte de résistance à la flexion due à une simple refente est d'environ 7MPa alors qu'elle se situe à seulement 3MPa pour une section initiale de 65x200. La même observation peut être faite dans le cas de la double refente : la perte est d'environ 12MPa pour la section initiale 50x150 alors qu'elle est de seulement 9MPa pour une section de 65x200.

L'analyse de variance montre que les différences observées sur la résistance à la flexion sont très significatives et que les différences de module d'élasticité ne le sont pas. Cette der-

nière remarque concernant le module d'élasticité est en accord avec les conclusions émises lors de la seconde expérimentation présentée au chapitre 1 [48]. Les auteurs concluaient qu'il n'y avait pas de raison de croire que la refente puisse causer une réduction significative du MOE.

A partir de ces différents résultats, les formules suivantes sont suggérées et la valeur de résistance caractéristique de lamelles refendues $f_{m,k,s}$ peut être calculée à partir des équations 4.1 et 4.2 avec $f_{m,k}$ la résistance à la rupture en flexion de la lamelle initiale et h la hauteur initiale de la lamelle [64].

$$f_{m,k,s} = f_{m,k} - 11 + \frac{h}{27} \quad \text{Refente simple} \quad (4.1)$$

$$f_{m,k,s} = f_{m,k} - 11 + \frac{h}{27} - 6 \quad \text{Double refente} \quad (4.2)$$

La comparaison entre les résultats obtenus avec le modèle développé et ces formules est présentée figure 4.6. A partir de cette valeur caractéristique des lamelles refendues, il ne reste alors qu'à déterminer la classe de poutre lamellée-collée correspondante.

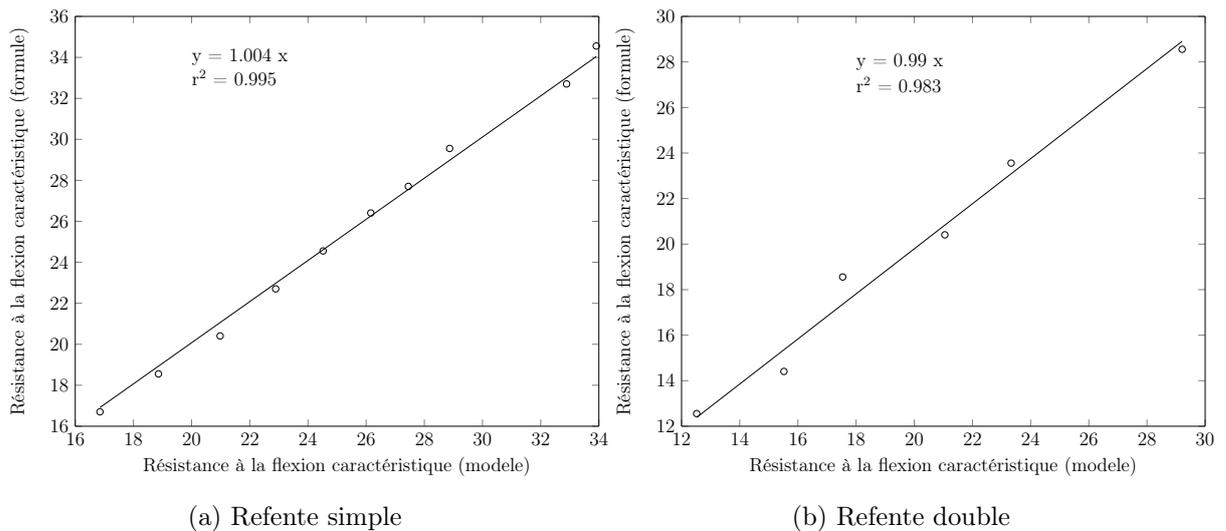


FIGURE 4.6 – Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle analytique et les formules proposées.

Le problème de cette démarche est qu'elle repose uniquement sur l'équivalence entre les classes des lamelles et les classes de poutres données dans l'EN 14080 qui est décrit figure 4.7. Pour des valeurs intermédiaires de valeurs fractiles, il n'est alors pas possible de déterminer la classe exacte de la poutre lamellée-collée. Il est à titre d'exemple reporté le cas de la refente de lamelles C40 (voir tableau 4.8), cette refente conduit à l'obtention d'une valeur fractile à 5% de 33.14MPa. Cette valeur fractile permet d'assigner ces sciages à la classe C30 permettant l'élaboration de poutres de qualité GL28. La courbe d'équivalence entre classe de résistance des lamelles et classe de résistance des poutres (qui n'est pas

linéaire) montre que cette valeur de fractile à 5% correspondrait à une valeur de fractile à 5% de poutre égale à 29.38MPa. Cette valeur se rapprocherait alors de la classe GL30.

L'utilisation des équivalences telle qu'elle a été décrite révèle bien les imprécisions de la méthode proposée. C'est pourquoi la partie suivante propose de traiter le problème en modélisant directement le comportement mécanique de poutres en bois lamellé-collé.

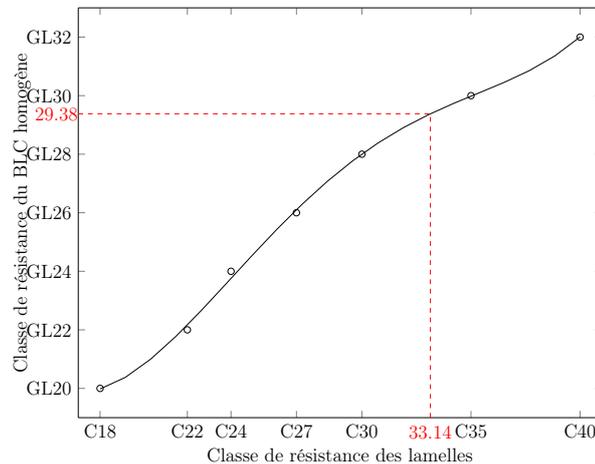


FIGURE 4.7 – Equivalence entre classe lamelles et classe BLC homogène (EN 14080)

4.1.5 Refente numérique de poutres lamellées-collées

4.1.5.1 Matériel et méthodes

4.1.5.1.1 Echantillon et essais destructifs

Afin de valider le modèle, 10 poutres en douglas de section 270x74 et de longueur 5m ont été utilisées. Ces poutres sont issues de la refente de poutre de section 270x150 composées de 6 lamelles aboutées de section 45x150. Les essais destructifs ont été effectués de la même manière que précédemment. Les lamelles ont été aboutées par la société Monnet-Sève avec de la colle de type MUF (AkzoNobel 1255/7555) et la lamellation puis la refente assurée par Arbonis. Le collage des lamelles est lui aussi effectué avec de la colle de type MUF (BASF Kauramin 683/688).

4.1.5.1.2 Caractérisation non-destructive des poutres

Chaque lamelle constitutive des poutres a été préalablement scannée après aboutage de manière à faciliter l'identification de la lamellation. En effet, comme le montre la partie (a) de la figure 4.8, la position des aboutages est facilement repérable à l'aide des images X. Il ne reste alors qu'à connaître l'agencement des différentes lamelles aboutées (voir partie (b) figure 4.8) qui composent les poutres.

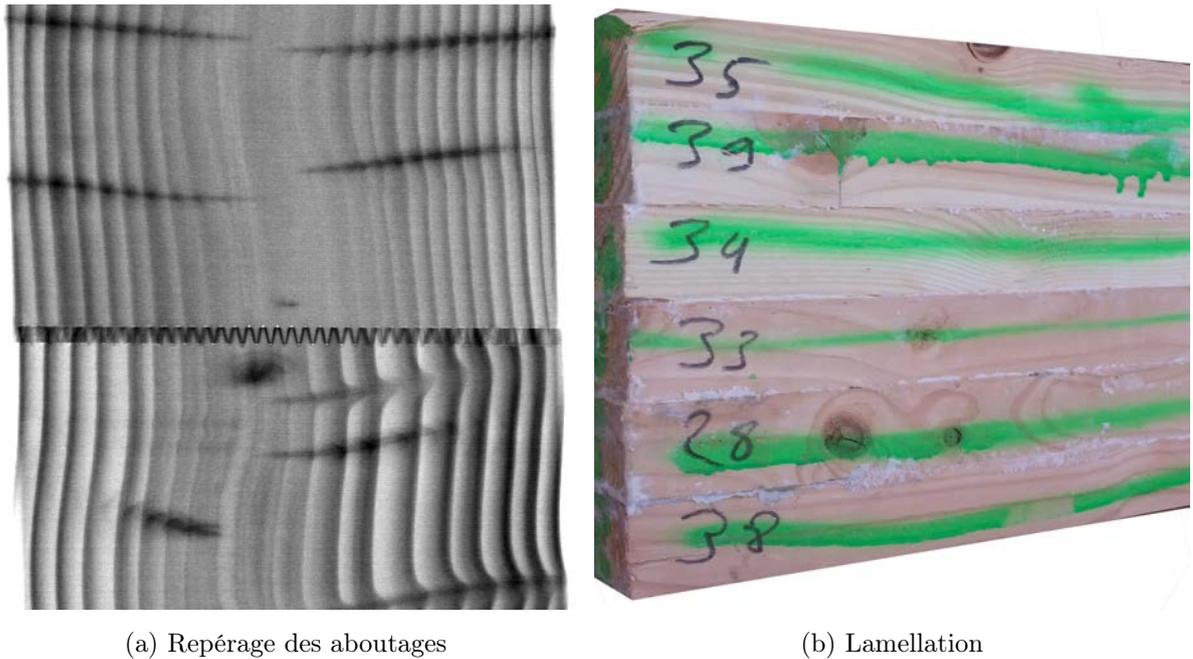


FIGURE 4.8 – Repérage des aboutages et de la lamellation

A partir des données issues du scanner, les mêmes cartographies que celles décrites au chapitre 2 sont calculées. Un exemple de ces cartographies pour une lamelle aboutée est donnée figure 4.9. La sous-figure (a) représente la masse volumique locale le long de la lamelle, elle permet de mettre en évidence les différences de masse volumique entre différents sciages constitutifs de la lamelle, les deux aboutages apparaissent de manière claire sur cette cartographie. La sous-figure (b) montre la cartographie de module d'élasticité $E(x, y)$ et la (c) le passage de cette cartographie 2D à une valeur de module unique le long de la lamelle. Dans ce cas le module d'élasticité unidimensionnel est simplement pris comme la moyenne des modules $E(x, y)$ à x fixé (équation 4.3). Les sous-figures (d) et (e) montrent les mêmes types de données mais cette fois pour la résistance. Dans ce cas le passage de la cartographie $\sigma_{lim}(x, y)$ vers un module à rupture unidimensionnel le long de la poutre est réalisé par l'équation 4.4.

$$E(x) = \frac{\sum_{y=1}^n E(x, y)}{n} \quad (4.3)$$

$$\sigma_{lim}(x) = \frac{\sum_{y=1}^n (E(x, y) \times \sigma_{lim}(x, y))}{\sum_{y=1}^n E(x, y)} \quad (4.4)$$

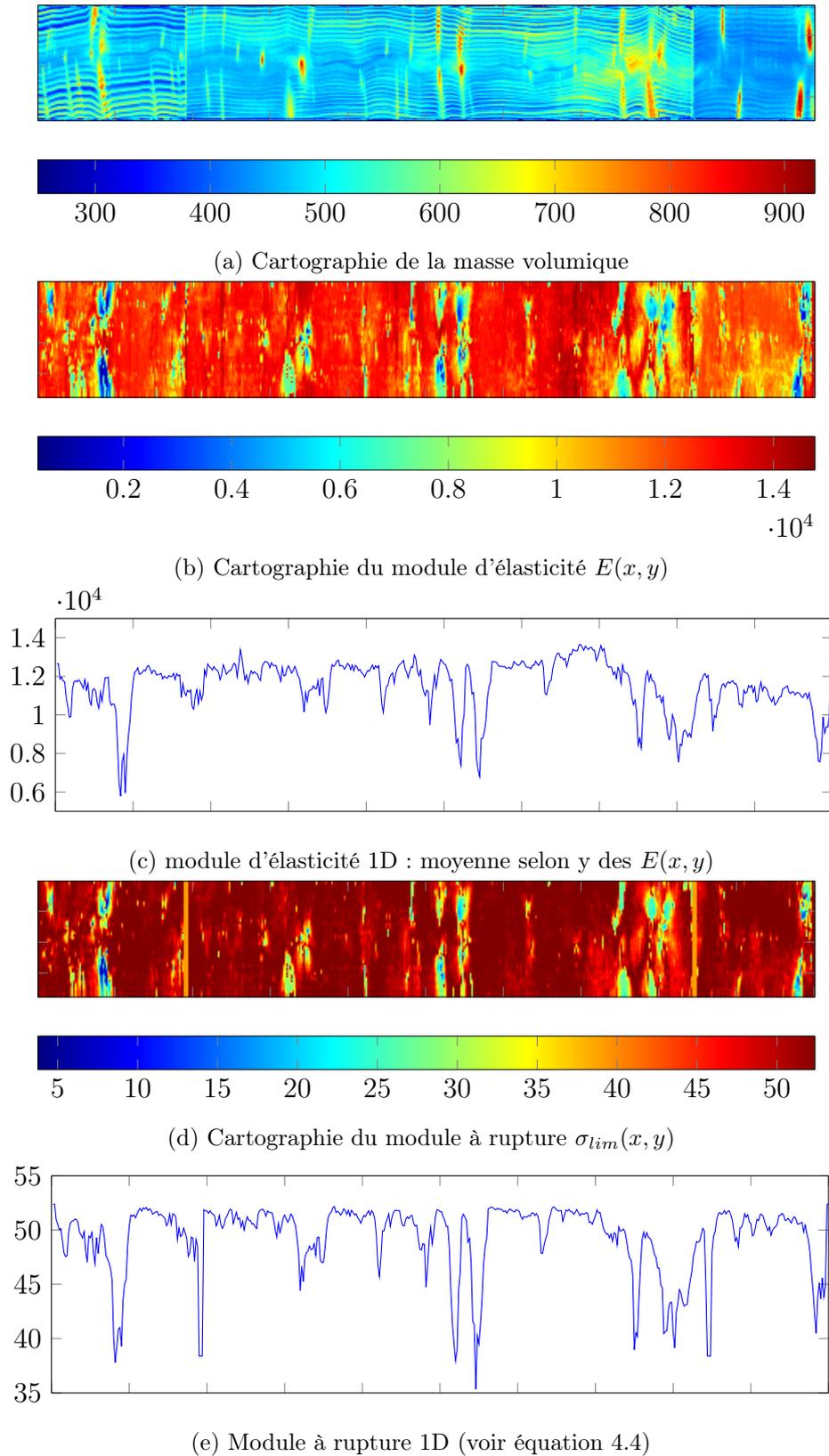
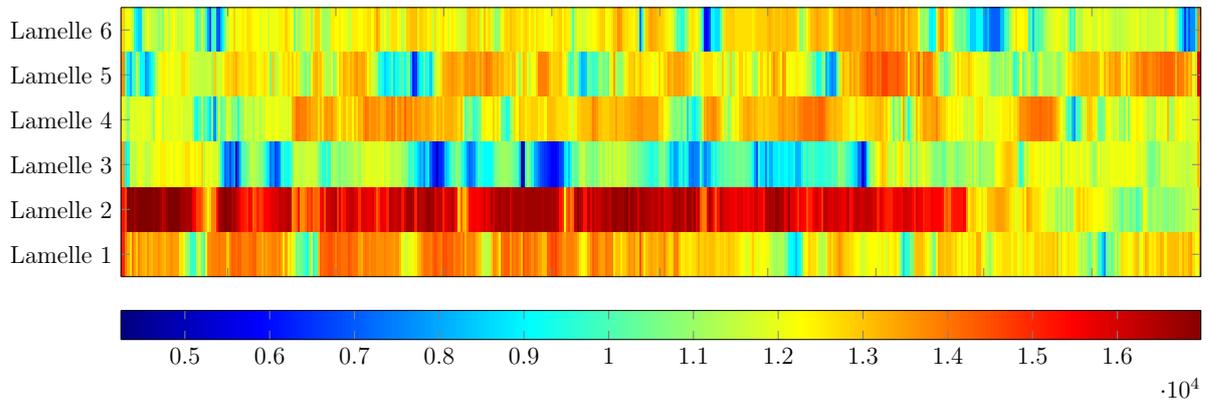


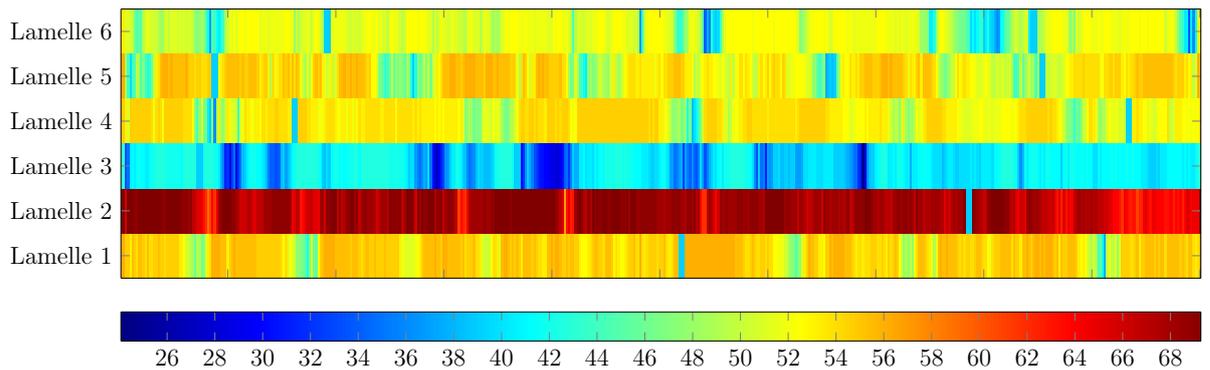
FIGURE 4.9 – Caractérisation non-destructive des lamelles.

Les profils unidimensionnels de chaque lamelle aboutée définis précédemment sont

enfin utilisés pour définir les propriétés mécaniques des différentes poutres. Un exemple de l'attribution de propriétés mécaniques est donné figure 4.10. Ainsi, un module d'élasticité longitudinal local est attribué tous les centimètres à chaque lamelle (a), il en est de même pour la contrainte normale admissible (b). L'empilement des 6 lamelles constitutives des poutres est enfin réalisé. La différence de qualité mécanique entre les différentes lamelles est aisément observable. Dans l'exemple présenté, la lamelle numéro 5 possède clairement de meilleures propriétés mécaniques que les autres. La position des défauts tels que les noeuds ou bien les aboutages sont aussi repérables à l'aide de ces cartographies qui montrent bien leur prise en compte dans la définition des propriétés mécaniques des poutres. Il est à noter que lors de la constitution des profils, en présence d'un aboutage, la contrainte normale admissible a été considérée égale à 38.4MPa sur 3cm. Cette valeur correspond à la moyenne de la résistance des aboutages du fournisseur des lamelles aboutées, issue du contrôle de production.



(a) Modules élastiques longitudinaux locaux de la poutre



(b) Contraintes normales admissibles locales de la poutre

FIGURE 4.10 – Propriétés mécaniques locales des poutres.

4.1.5.1.3 Modélisation éléments finis

Le comportement mécanique des poutres a été étudié à l'aide d'un modèle éléments finis non linéaire en deux dimensions. Le maillage correspond à un élément tous les cen-

timètres dans la longueur de la poutre, ce qui correspond à environ 490 éléments, et un maillage adaptatif a été choisi dans la hauteur de la poutre de manière à augmenter la proportion d'éléments dans les zones les plus sollicitées lors d'un essai de flexion 4 points (le nombre total d'éléments dans la hauteur est de 16).

Le calcul est mené en contraintes planes. Chaque lame est supposée isotrope transverse et les termes de la matrice de complaisance de chaque élément sont déterminés à partir des propriétés élastiques décrites dans le tableau 4.10.

| | | | |
|--------------------------|-----------|-----------|------------|
| E_L | E_R | G_{LR} | ν_{LR} |
| $E(x)$ de l'équation 4.3 | $E(x)/10$ | $E(x)/16$ | 0.39 |

TABLE 4.10 – Propriétés élastiques des éléments du maillage

L'essai simulé est un essai de flexion 4 points suivant la même disposition que celle des essais destructifs. La simulation est pilotée en déplacement et les conditions limites sont les suivantes :

- déplacement horizontal nul en un appui,
- déplacements verticaux nuls aux 2 appuis.

Il est considéré que chaque élément reste dans le domaine élastique tant que la contrainte normale reste inférieure à la contrainte normale admissible qui lui a été attribuée. Lors du dépassement de cette contrainte, la modélisation de l'endommagement est prise en compte de la manière suivante :

- si l'élément est dans la partie comprimée de la poutre, son module d'élasticité est alors divisé par 10 pour simuler le comportement de plastification,
- si l'élément est dans la partie tendue de la poutre, son module d'élasticité est alors fixé comme étant égal à 1MPa.

Une nouvelle itération de calcul linéaire est alors menée sur cette nouvelle poutre «endommagée». Cependant, pour les éléments «cassés» dans la zone tendue de la poutre, des forces nodales équivalentes à l'énergie de déformation stockée dans l'élément au moment de la rupture sont calculées. Ces forces sont alors appliquées aux noeuds de l'élément considéré et une nouvelle itération de calcul est alors effectuée. L'application de ces forces nodales conduit à une diminution des efforts calculés aux points d'applications des déplacements. Un exemple de l'observation de la diminution de l'effort lors de la simulation est présenté sur la figure 4.11.

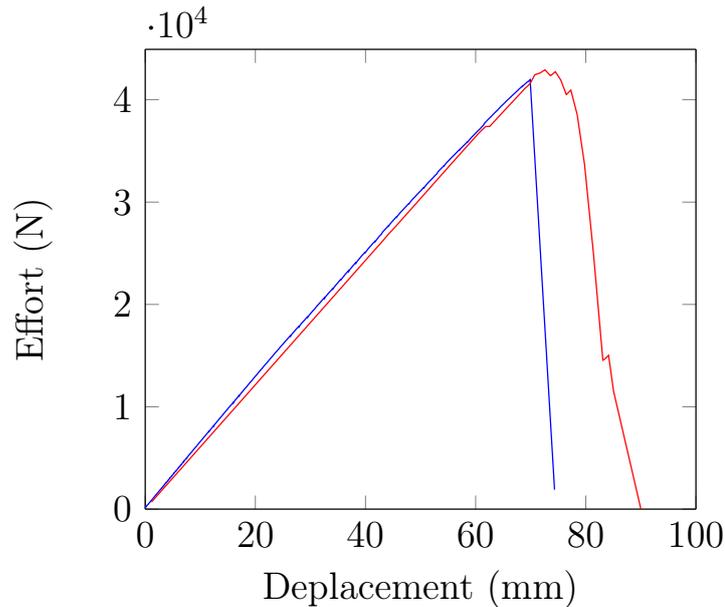


FIGURE 4.11 – Comparaison modèle (en rouge) expérimentation (en bleu) pour la poutre E1.

4.1.5.1.4 Poutres aléatoires

Pour pouvoir étudier l'influence de la refente, il a été choisi de simuler un nombre important de poutres. Les différentes poutres ont été générées à partir des lamelles du lot de douglas décrit dans le chapitre 2. Afin de rester au plus près des conditions du modèle développé, seuls les sciages de section 40x100 et de longueur 4m ont été utilisés. Afin d'obtenir des poutres de qualités différentes, les lamelles constitutives ont été classées dans les classes mécaniques suivantes : C35, C30, C24 et C18. Les poutres sont ensuite générées uniquement à partir de lamelles issues d'une de ces classes mécaniques.

L'attribution des propriétés mécaniques suit exactement la même démarche que celle décrite figure 4.10. Pour simuler la refente, les images des lamelles sont scindées en deux de la même manière que dans la partie précédente. Les profils unidimensionnels de propriétés mécaniques de chaque demi-lamme sont alors calculés à partir de ces demi-images.

Le nombre de lamelles correspondant aux différentes catégories étant limité, afin de générer un maximum de poutres différentes, la démarche suivante a été appliquée :

- une lamelle est tirée aléatoirement dans le paquet correspondant à la classe de résistance choisie,
- les cartographies de propriétés mécaniques sont inversées ou non (aléatoirement) selon l'un ou les deux axes principaux de l'image,
- ces lamelles sont enfin aboutées virtuellement jusqu'à obtenir 6 fois la longueur de la poutre souhaitée (poutre composée de 6 lamelles),
- la poutre est alors constituée en tronçonnant cette grande longueur en 6 morceaux

de 5m, puis la lamellation est ensuite choisie aléatoirement.

Le nombre de lamelles dans les différentes classes est compris entre 12 et 155 et les sciages de qualité supérieure sont en moins grand nombre. Cependant, la démarche décrite précédemment permet tout de même de générer un nombre important de poutres différentes même avec très peu de lamelles. En effet, dans le cas le plus défavorable (celui des lamelles C35), avec environ 8 lamelles de 4m pour réaliser une poutre de 5m, le nombre de combinaison de choix de lamelles est de 8 parmi 12 soit 495. L'opération de retournement selon l'axe médian en x (puisque l'autre n'influe pas sur le comportement de la poutre entière) génère quant à elle 2^8 combinaisons possibles. Enfin, la lamellation aléatoire peut engendrer 720 poutres différentes. Au final, dans ce cas précis le nombre de poutres différentes réalisables est porté à plus de 9 millions.

4.1.5.2 Résultats

4.1.5.2.1 Validation du modèle

Le tableau 4.11 présente la comparaison entre les valeurs de MOE et MOR obtenus expérimentalement et par la modélisation éléments finis. Les résultats obtenus pour le module d'élasticité sont très satisfaisants puisque l'erreur moyenne est de seulement 5%. Elle est en moyenne de 12% concernant la prédiction de la résistance à rupture, ce qui reste acceptable.

| Poutre | MOE _{expe} | MOE _{modele} | Ecart (%) | MOR _{expe} | MOR _{modele} | Ecart (%) |
|----------------|---------------------|-----------------------|-------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| A1 | 10 268 | 10 399 | 1.3 | 32.5 | 35.4 | 8.9 |
| A2 | 11 615 | 10 161 | -12.5 | 36.5 | 31.3 | -14.2 |
| B1 | 12 412 | 11 554 | -6.9 | 43.3 | 36.0 | -16.9 |
| B2 | 12 073 | 11 065 | -8.3 | 32.8 | 37.0 | 12.8 |
| C1 | 11 637 | 11 619 | -0.2 | 49.3 | 37.9 | -23.1 |
| C2 | 12 330 | 11 302 | -8.3 | 39.8 | 36.1 | -9.3 |
| D1 | 11 998 | 11 864 | -1.1 | 43.6 | 48.8 | 11.9 |
| D2 | 11 577 | 11 938 | 3.1 | 38.6 | 41.8 | 8.3 |
| E1 | 10 721 | 10 673 | -0.4 | 38.3 | 38.7 | 1.0 |
| E2 | 11 615 | 10 563 | -9.1 | 38.1 | 42.8 | 12.3 |
| Moyenne | 11 625 | 11 114 | 5.1% | 39.3 | 38.6 | 11.9% |

TABLE 4.11 – Comparaison entre MOE et MOR obtenus expérimentalement et par la modélisation éléments finis.

4.1.5.2.2 Influence de la refente

La démarche décrite précédemment a été utilisée pour générer 1800 poutres (600 poutres et 1200 demi-poutres issues de la refente des 600 poutres). Le comportement mécanique de ces poutres a ensuite été analysé à l'aide du modèle éléments finis.

L'influence de la refente sur le module d'élasticité est décrite sur la partie (a) de la figure 4.12. Les poutres refendues possèdent en moyenne le même module d'élasticité que les poutres entières (résultat analogue à la partie 4.1.4 sur les lamelles). De plus on observe que la distribution des valeurs de module est quasi identique entre celle des poutres entières et refendues.

Concernant la résistance à la rupture une perte moyenne statistiquement significative de plus de 4MPa est observée (de 37.4 à 33.0MPa). Une diminution de la valeur du fractile à 5% d'environ 5MPa est constatée (de 24.2 à 19.0 MPa). De plus le processus de refente augmente aussi la variabilité, le coefficient de variation est de 22% pour les poutres entières et atteint près de 28% pour celles refendues. Les deux distributions sont de plus dans ce cas distinctes.

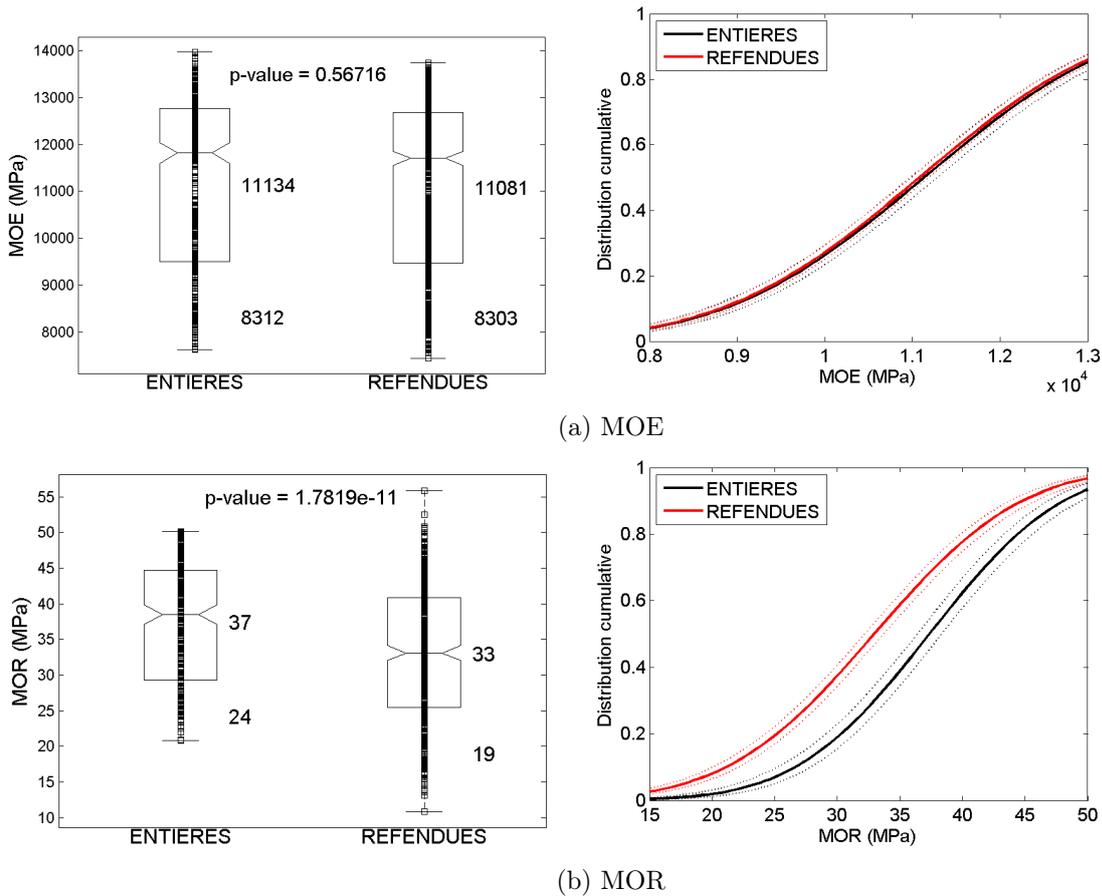


FIGURE 4.12 – Conséquence de la refente simple sur les propriétés mécaniques des poutres.

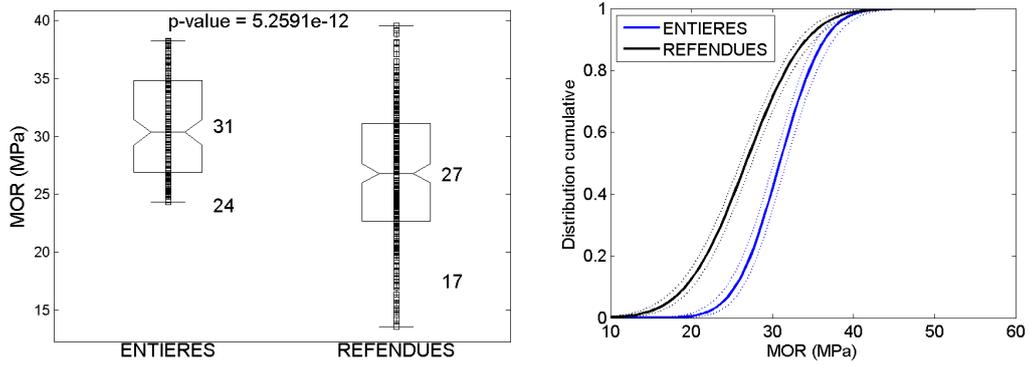
Parmi les 600 poutres entières, quatre groupes de qualité différentes représentatif de poutres GL24, GL28, GL30 et GL32 ont été constitués. Les résistances des deux demi-poutres (celles réellement issues de la refente numérique des poutres entières sélectionnées) sont alors comparées aux valeurs de résistances des poutres entières. Ces comparaisons sont décrites figure 4.13. Pour les quatre groupes, une perte tant en moyenne qu'en terme de fractile à 5% est observée. Les diminutions en valeur moyenne sont statistiquement significatives (p-value très faible pour tous les groupes). La plus grande variabilité des valeurs de résistance des poutres refendues est aussi observable. Les distributions entre poutres entières et poutres refendues sont aussi comparées et apparaissent bien distinctes. Une partie de ces résultats est synthétisée table 4.12.

La perte moyenne de résistance est d'environ 4MPa quelque soit la qualité. Ce qui apparait visuellement concernant l'augmentation de la variabilité sur la figure 4.13 est ici vérifié, le coefficient de variations passe d'environ 14% à 20% entre les poutres entières et refendues. Cette augmentation de la variabilité semble être plus forte pour les plus basses classes, ceci est probablement dû à la taille et à l'occurrence des défauts plus importantes pour ces classes. La diminution en valeur caractéristique est quant à elle d'environ 6MPa et semble être plus importante pour les poutres de plus faible qualité. Ce phénomène peut en partie être expliqué par l'augmentation de la variabilité observée précédemment.

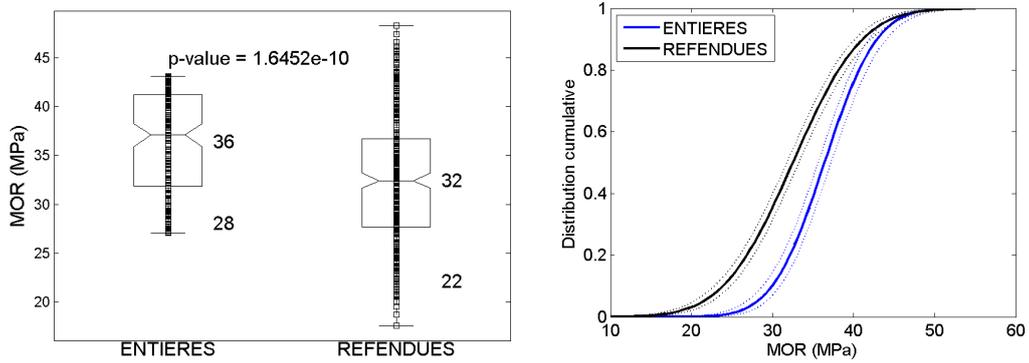
| Poutre | MOR moyen | | | COV (%) | | $f_{m,k}$ | | |
|--------|-----------|-----------|---------------|----------|-----------|-----------|-----------|---------------|
| | Entières | Refendues | Ecart | Entières | Refendues | Entières | Refendues | Ecart |
| GL24 | 30.9 | 26.7 | -4.2 (-13.6%) | 13.9 | 21.9 | 24.0 | 17.5 | -6.6 (-27.3%) |
| GL28 | 36.4 | 32.5 | -3.9 (-10.8%) | 13.9 | 20.7 | 28.1 | 22.2 | -5.9 (-21.1%) |
| GL30 | 39.1 | 35.3 | -3.8 (-9.8%) | 13.8 | 20.5 | 30.1 | 24.1 | -6.0 (-20.1%) |
| GL32 | 41.7 | 37.7 | -4.0 (-9.7%) | 13.9 | 19.3 | 32.1 | 26.2 | -5.8 (-18.2%) |

TABLE 4.12 – Influence de la refente de poutres de différentes qualités

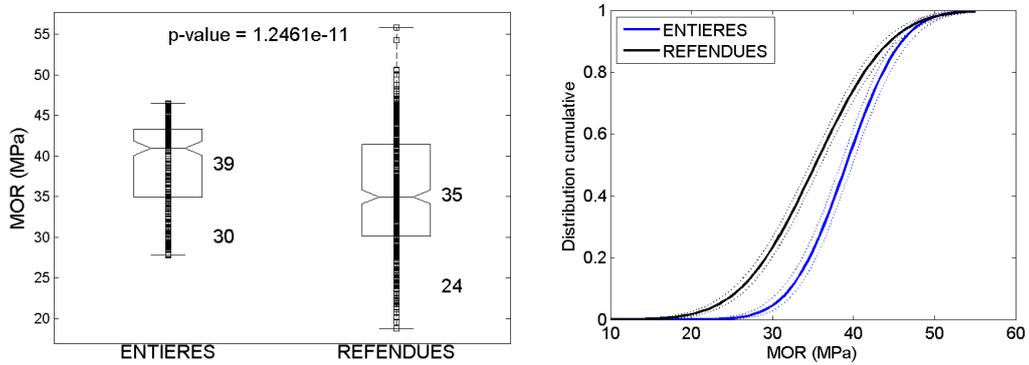
Les pertes observées dans cette partie sont plus importantes que les recommandations de la norme (voir table 4.6). De plus toujours en comparaison à ces recommandations, la perte de résistance semble beaucoup moins dépendante de la qualité des poutres. Cependant, les résultats obtenus dans la partie 4.1.4 ont montré une forte influence de la section initiale. Dans le cas présenté, les résultats sont valables pour la refente de poutres d'épaisseur initiale faible (100mm). Cela explique probablement ces pertes plus importantes et que peu de différences soient observées entre les différentes qualités. La même analyse devrait être menée sur des poutres d'épaisseur plus importante pour valider cette hypothèse.



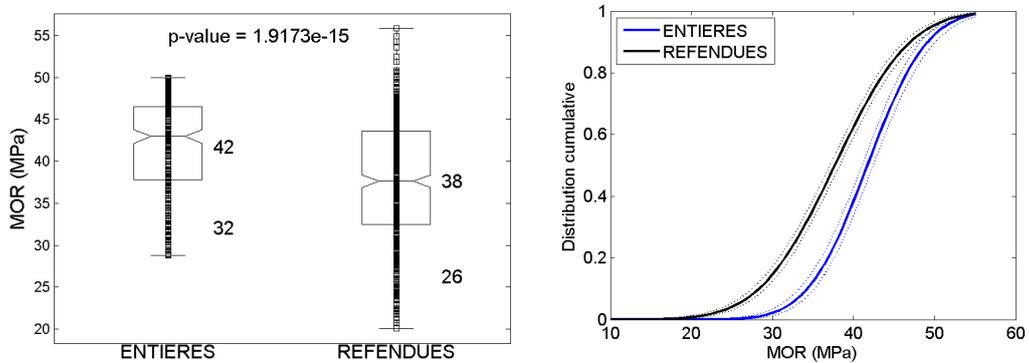
(a) Poutres GL24



(b) Poutres GL28



(c) Poutres GL30



(d) Poutres GL32

FIGURE 4.13 – Conséquence de la refente simple sur le module à rupture pour différentes qualités mécaniques.

4.2 Conclusion

Ce chapitre a permis de mettre en évidence la difficulté de traiter la problématique de la refente de poutres BLC de manière destructive. En effet des problèmes de significativité statistique ont été révélés dus aux faibles effectifs étudiés. Ces problèmes pourraient probablement être réglés en augmentant le nombre d'échantillons mais le coût engendré serait alors très important. Le fait qu'il soit impossible de tester les vrais sous-produits de la refente de manière destructive reste l'inconvénient majeur de cette méthode. C'est pourquoi deux approches numériques ont été proposées : la première s'intéressant à l'influence de la refente sur des lamelles et la deuxième sur des poutres. Ces méthodes permettent bien de simuler le comportement des vrais sous-produits de la refente.

Les résultats de la première approche sont globalement cohérents avec les recommandations de la norme, cependant on ne constate pas que la perte de propriétés mécaniques diminue aussi fortement pour les plus hautes classes. La perte de propriétés mécaniques apparaît même similaire entre les différentes qualités de lamelles. En revanche, un paramètre non pris en compte par les formules de la norme est la section initiale. On constate pourtant qu'elle a un rôle important. On observe que plus la section initiale est importante, plus le processus de refente a un impact faible sur les propriétés mécaniques. Ce qui peut s'expliquer par le fait que la présence de défauts (dont la taille est constante) impacte plus les propriétés mécaniques de produits de faibles sections. Une formule a été proposée permettant de déterminer la résistance en flexion de lamelles refendues à partir de la résistance de lamelle entière et de leur hauteur initiale. Le fait que cette méthode s'intéresse uniquement à la lamelle est problématique car cela implique de s'appuyer sur les équivalences de l'EN 14080 pour en déduire l'influence de la refente de poutres en bois lamellé-collé.

La dernière partie a de nouveau permis à l'aide d'un modèle éléments finis de mettre en évidence que le processus de refente ne semble pas affecter la rigidité des poutres. De même que la partie de l'étude portant sur la refente numérique des lamelles, la qualité initiale semble avoir une influence plus modérée que celle émise dans les recommandations normatives. Les essais expérimentaux pour valider le modèle ayant été menés sur des poutres de petite section ($220 \times 74 \text{ mm}^2$), cette partie s'est limitée à des poutres issues de lamelles ayant une section proche de cette base de validation ($100 \times 40 \text{ mm}^2$). Les pertes de résistance obtenues sont beaucoup plus faibles que celles préconisées par les formules de la norme, la faible hauteur initiale en est très certainement responsable, c'est pourquoi il serait nécessaire de mener la même analyse avec des sections plus importantes.

Conclusions et perspectives

Conclusions

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre du programme Matériaux et Procédés pour des Produits Performants financé par l'Agence Nationale de la Recherche. Ce programme a pour vocation de soutenir des projets multidisciplinaires, fédérant des acteurs scientifiques et industriels dans le but de répondre à des besoins sociétaux avec des contraintes liées au développement durable. La problématique du classement mécanique du bois s'inscrit parfaitement dans ce cadre puisque présentant un intérêt industriel fort et permettant de contribuer à l'atteinte des objectifs du Grenelle de l'environnement. La principale question soulevée par cette problématique est celle du choix de la machine de classement par un industriel pour valoriser au mieux sa production. Ce choix est notamment dépendant de l'essence et du volume de production.

La variabilité du comportement mécanique des sciages, se traduit par la forte complexité de prédire de manière précise les propriétés mécaniques du bois, ce qui est problématique pour son utilisation en structure. C'est pourquoi différentes normes doivent être appliquées pour opérer au classement mécanique du bois afin d'assurer la fiabilité d'une construction lors de son dimensionnement. Le détail de ce cadre normatif a fait l'objet d'une partie de ce rapport, il a ainsi été montré que l'attention devait être portée sur la prédiction de trois propriétés fondamentales dont sont déduites toutes les autres. Ces trois propriétés sont la masse volumique, le module d'élasticité longitudinal (MOE) et le module à rupture en flexion (MOR).

Différentes méthodes permettant l'estimation de ces trois paramètres de manière non destructive ont ainsi été présentées. Cette analyse des différentes méthodes existantes ont mis en évidence le fait que la qualité de l'estimation de la masse volumique et du module d'élasticité est bien maîtrisée. La mesure du MOE en particulier par des méthodes vibratoires donne des résultats très satisfaisants. L'étude a finalement montré que l'effort devait donc être porté sur l'amélioration de l'estimation du MOR. Cette estimation est généralement basée sur la corrélation entre MOE et MOR qui peut être très variable selon les essences. L'amélioration de cette prédiction est cependant possible en mesurant différentes singularités du matériau bois (telle que la pente de fil) pour les intégrer dans

des modèles de prédictions.

Les résultats présentés montrent que la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques est fortement dépendante de l'essence étudiée et même du lot considéré. C'est pourquoi en vue de la valorisation de la ressource nationale française, la comparaison de différentes méthodes de prédiction compatibles avec des cadences industrielles a fait l'objet d'une partie de ce travail.

Ainsi de nombreux résultats de l'analyse bibliographique ont pu être validés sur des bois issus de scieries françaises. Les méthodes vibratoires donnent des résultats très satisfaisants pour la prédiction du MOE et ce pour les trois essences étudiées. Il apparaît de plus qu'elles permettent une prédiction de meilleure qualité que la méthode ultrasonore étudiée. Il a aussi été montré que l'ajout de la mesure de singularités locales permettait une forte amélioration de la prédiction du MOR (en contrepartie d'un investissement plus lourd). La mesure de la pente de fil en prenant en compte à la fois la nodosité et la zone de faiblesse mécanique due à la déviation de la pente de fil autour des noeuds, semble être un meilleur indicateur que le calcul du KDR par analyse d'images rayons X. De plus il a été montré que l'ajout de singularités locales profite de manière plus importante au douglas par rapport à l'épicéa. Malheureusement, en ce qui concerne le chêne, il apparaît qu'aucune des méthodes proposées ne permet une prédiction acceptable du MOR notamment en raison de la faible différence observée entre la masse volumique des noeuds et du bois sain rendant la mesure de la nodosité difficile.

L'intérêt des données sylvicoles a lui aussi pu être discuté et il a été établi qu'elles ne présentaient que peu d'intérêt sur les différents lots étudiés. Cela étant dû à la combinaison de deux facteurs, le premier étant la jeunesse des arbres utilisés et le deuxième, le mode de débit des scieries ayant fournis le lot de sciage. Bien que ce lot ne soit pas adapté pour évaluer l'intérêt des données sylvicoles, il est parfaitement représentatif de sciages provenant de scieries industrielles. L'objectif de ce travail de thèse étant la comparaison de machines de classement, la seule qualité de la prédiction des propriétés mécaniques n'est pas suffisante, l'enjeu pour les industriels étant le rendement du classement des sciages (en accord avec le cadre normatif).

Le troisième chapitre montre que le classement machine est fortement influencé par le type de propriétés indicatrices utilisées. En particulier dans le cas du douglas et du chêne, l'utilisation d'une propriété indicatrice la mieux corrélée possible avec le MOR donnait les meilleurs résultats. A l'inverse, dans le cas de l'épicéa il faut privilégier la prédiction du MOE. Ces résultats couplés au fait que l'ajout de singularités locales profitent le plus au douglas font que les machines capables de les mesurer permettent d'améliorer grandement le classement de cette essence. De la même manière, les machines vibratoires ont une très bonne efficacité pour classer l'épicéa. Il a aussi été mis en évidence que les méthodes vibratoires ne semblent pas efficaces pour prédire des modules élastiques très faibles. Ce phénomène se traduit en terme de classement par de meilleurs rendements

obtenus pour les plus hautes classes avec des machines intégrant des singularités locales indépendamment de l'essence étudiée.

Il est possible d'exploiter les libertés laissées par le cadre normatif afin de définir différentes stratégies de classement. En effet, différents réglages machines peuvent être réalisés afin de maximiser le nombre de sciages dans les plus hautes classes mécaniques ou bien de maximiser la valorisation économique. Cette maximisation économique consiste le plus souvent à diminuer la proportion de sciages rejetés en sacrifiant une proportion de sciages dans les plus hautes classes.

Les prix des différentes machines étudiées sont très variables, en particulier, celles équipées des dispositifs de mesure de singularités locales sont plus onéreuses. Ces différences d'investissement rendent le choix d'une machine de classement complexe cependant pour les machines portatives les moins chères, le coût de la main d'oeuvre doit aussi être pris en compte. Une analyse économique a permis de montrer que le choix dépend aussi de l'essence, de la classe de résistance recherchée et du volume de production à traiter. Pour guider un industriel dans le choix d'une machine de classement, un outil d'aide à la décision a été développé, il permet la comparaison sur un critère économique des différentes machines. Bien que nos résultats soient uniquement représentatifs des lots étudiés, ils présentent l'avantage, comparativement à ceux de la bibliographie, que les performances des différentes machines ont été testées sur les mêmes lots.

Les méthodes utilisées sur les résineux ne sont pas adaptées au cas du chêne et ne permette pas de valoriser ses bonnes propriétés mécaniques (même dans le cas de notre lot de qualité secondaire). Une méthode alternative par la mesure directe du MOE et sous contrainte imposée, a été abordée de manière théorique. Elle semble être prometteuse pour répondre à la problématique de la valorisation du chêne de qualité secondaire.

Enfin plusieurs approches ont été testées pour répondre à la problématique de l'influence de la refente de poutres lamellées-collées sur les propriétés mécaniques. Seules des approches numériques pourraient apporter une réponse fiable. C'est pourquoi l'utilisation des machines mesurant les singularités locales du bois de manière locale ont été utilisées pour traiter cette problématique. Il a notamment été mis en évidence que le processus de refente ne semble pas influencer les propriétés élastiques contrairement à ce qui est préconisé par les formules proposées par la norme. De plus, la section initiale semble avoir une très forte influence bien que n'étant pas du tout prise en compte dans ces même formules.

Perspectives

Le modèle de prédiction mécanique des sciages développé ne fait pas la distinction entre comportement mécanique du bois en traction et en compression. Il serait intéressant de développer cet aspect pour améliorer la prédiction des propriétés mécaniques. L'idée

serait de déduire des propriétés de résistances en traction et compression à partir de la mesure des singularités locales et d'intégrer ces lois de comportement différentes dans la modélisation du comportement de sciages en flexion. Afin de se prémunir des restrictions normatives inhérentes à la méconnaissance du sens de sollicitation du sciage, il serait possible de tester numériquement les sciages dans les deux sens.

Une autre piste consisterait à déterminer de manière non-destructive des propriétés dans la direction transversale, ou au cisaillement, afin d'intégrer des critères de rupture pouvant prendre en compte des phénomènes de couplage entre ces différents phénomènes. Ces critères pourraient alors remplacer le critère de dépassement de la contrainte normale utilisé dans le modèle proposé.

Le caractère local des mesures issues du scanner permettrait de distinguer des zones de classes mécaniques différentes au sein d'une même planche (figure 4.14). Il serait alors nécessaire de procéder à une analyse économique pour justifier ou non l'intérêt de la purge.

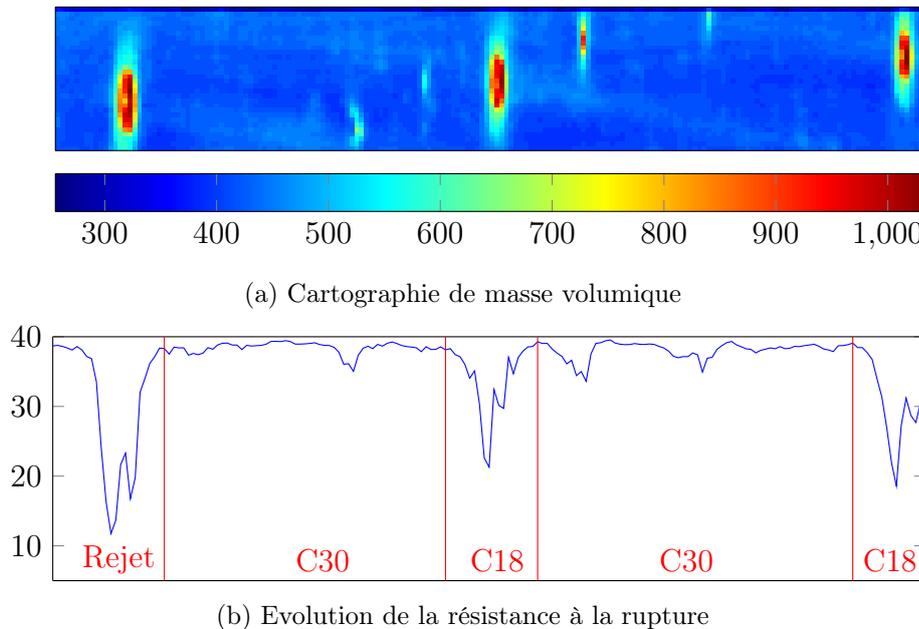


FIGURE 4.14 – Optimisation par tronçonnage

Concernant l'intérêt de données sylvicoles pour le classement mécanique, une nouvelle campagne va être effectuée portant sur des sciages issus de gros bois, la proportion entre bois juvénile et bois mature sera alors mieux répartie. Cette meilleure répartition permettra de statuer sur l'intérêt ou non de tracer ces données sylvicoles dans le cadre du classement mécanique pour des scieries valorisant des bois de plus gros diamètres.

Pour améliorer la prédiction de la résistance des sciages en chêne et compte tenu de l'apport de la mesure de la pente de fil dans le cas des résineux, la possibilité de disposer aussi pour le chêne de cette information serait très utile. Le développement d'un tel capteur est actuellement en cours au LaboMaP de Cluny. L'intégration de ces mesures

dans des modèles permettraient probablement d'améliorer les rendements du classement.

La solution proposée pour valoriser le chêne de qualité secondaire n'ayant pu être vérifié que de manière théorique, le développement d'une machine pour valider cette approche est nécessaire. Cette approche est actuellement en développement à l'ENSTIB.

Concernant la problématique de la refente de poutres BLC, le modèle proposé pourrait être amélioré en prenant en compte notamment les propriétés élastiques et la résistance des joints de colle, considérée ici comme infinie. De plus, la valeur de résistance des aboutages a été considéré comme égale à la valeur moyenne observée par le fournisseur. Il serait pertinent de mener des essais et d'intégrer des valeurs de résistance stochastiques pour prendre en compte la variabilité de la résistance des aboutages.

Pour prendre en compte l'effet de la section initiale des poutres, il serait nécessaire de valider le modèle sur des poutres de sections différentes. Il pourrait aussi être judicieux de faire évoluer le modèle dans une version reprenant les mêmes principes mais cette fois en trois dimensions, afin d'éviter d'avoir recours aux équations du passage de propriétés bi-dimensionnelles à des propriétés unidimensionnelles décrites dans le chapitre 4.

Le modèle développé pourrait de plus être utilisé pour prédire le comportement de poutres constituées de lamelles de qualités différentes. En effet, afin de valoriser des lamelles de plus faibles classes mécaniques, elles peuvent être placées au plus près de la fibre neutre, à condition de positionner des lamelles de qualité supérieure sur les membrures hautes et basses des poutres. De telles dispositions de lamelles sont déjà prévues par le cadre normatif, l'objectif de cette modélisation serait d'évaluer les valeurs limites de ce panachage, tant en terme de gradients de qualité envisageable qu'en proportions entre ces différentes qualités.

Bibliographie

- [1] Jérôme Alteyrac, Alain Cloutier, and S. Y. Zhang. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) BSP) at different stand densities and sampling heights. *Wood science and technology*, 40(2):124–138, 2006.
- [2] NF B52-001-1. Regulations governing the use of timber in structure - Visual classification for the use of French softwood and hardwood species in structures - Part 1 : massive wood, 2011.
- [3] V. Bano, F. Arriaga, A. Soilan, and M. Guaita. Prediction of bending load capacity of timber beams using a finite element method simulation of knots and grain deviation. *Biosystems engineering*, 109(4):241–249, August 2011.
- [4] Richard Bergman, Z Cai, CG Carll, CA Clausen, MA Dietenberger, RH Falk, CR Frihart, SV Glass, CG Hunt, and RE Ibach. Wood handbook: Wood as an engineering material. *Forest Products Laboratory*, 2010.
- [5] Tobias Biechele, Ying Hei Chui, and Meng Gong. Comparison of NDE techniques for assessing mechanical properties of unjointed and finger-jointed lumber. *Holzfor-schung*, 65(3), January 2011.
- [6] J Bodig and B.A Jayne. *Mechanics of wood and wood composites*. New York : Van Nostrand Reinhold Company, 1982.
- [7] Mattias Brannstrom, Janne Manninen, and Johan Oja. Predicting the strength of sawn wood by tracheid laser scattering. *Bioresources*, 3(2):437–451, May 2008.
- [8] Franka Brüchert, Gero Becker, and Thomas Speck. The mechanics of Norway spruce [*Piceaabies* (L.) Karst]: mechanical properties of standing trees from different thinning regimes. *Forest Ecology and Management*, 135(1):45–62, 2000.
- [9] BSI. BS 4978:2007+A1:2011 Visual strength grading of softwood. Specification, 2007.
- [10] CEN. EN 14358 Calculation of characteristic 5-percentile values and acceptance criteria for a sample, 2007.
- [11] CEN. EN 14081-4 Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 4: Machine grading Grading machine settings for machine controlled systems, 2009.

- [12] CEN. EN 338 Structural timber - Strength classes, 2009.
- [13] CEN. EN 384 Structural timber - Determination of characteristic values of mechanical properties and density, 2010.
- [14] CEN. EN 14081-1 Strength graded structural timber with rectangular cross section Part 1: General requirements, 2011.
- [15] CEN. EN 14081-3 Strength graded structural timber with rectangular cross section - Part 3: machine grading; additional requirements for factory production control, 2012.
- [16] CEN. EN 408 Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties, 2012.
- [17] CEN. EN 14081-2 Strength graded structural timber with rectangular cross section Part 2: Machine grading; additional requirements for initial type testing, 2013.
- [18] A Clark and JR Saucier. Influence of initial planting density, geographic location, and species on juvenile wood formation in southern pine. *Forest products journal*, 39:42–48, 1989.
- [19] Takele Deresse, Robert K. Shepard, and Stephen M. Shaler. Microfibril angle variation in red pine (*Pinus resinosa* Ait.) and its relation to the strength and stiffness of early juvenile wood. *Forest Products Journal*, 53(7/8):34, 2003.
- [20] Luis Garcia Esteban, Francisco Garcia Fernandez, and Paloma de Palacios. MOE prediction in *Abies pinsapo* Boiss. timber: Application of an artificial neural network using non-destructive testing. *Computers & Structures*, 87(21):1360–1365, 2009.
- [21] M. Fonselius, C. Lindgren, and O. Makkonen. Lujuuslajittelu nostaa jalostusarvoa. Suomalaisen sahatavaran lujuus. Rakentavaa Tietoa. Technical report, VTT Rakennustekniikka, 1997.
- [22] D. Guitard. *Mécanique du matériau bois et composites*. NABLA. Cepadues edition, 1987.
- [23] DW Haines, JM Leban, and C Herbe. Determination of Young's modulus for spruce, fir and isotropic materials by the resonance flexure method with comparisons to static flexure and other dynamic methods. *Wood science and technology*, 30(4):253–263, August 1996.
- [24] Ségolène Halley des fontaines. Grenelle de l'environnement et Assises de la forêt. Plan d'actions pour la forêt. *Revue Forestière Française*, Vol. 60(N^o 1):p. 7–12, 2008.
- [25] Antti Hanhijarvi, Alpo Ranta-Maunus, and Goran Turk. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. Combigrade-project VTT Publications 568, VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2008.

-
- [26] P. Hoffmeyer. Om konstruktionstraes styrke og styrkesortering. *Dansk Skovforenings Tidsskrift*, 1984.
- [27] Preben Hoffmeyer. *Failure of wood as influenced by moisture and duration of load*. 1990.
- [28] Arnaud Jehl, Laurent Bléron, Fabrice Meriaudeau, and Robert Collet. Contribution of slope of grain information in lumber strength grading. In *17th International Nondestructive Testing and evaluation of wood symposium*, September 2011.
- [29] CJ Johansson, J Brundin, and R Gruber. Stress grading of Swedish and German timber. A comparison of machine stress grading and three visual grading systems. Technical Report SP Report, Swedish National Testing and Research Institute, 1992.
- [30] David E. Kretschmann and David W. Green. Mechanical grading of oak timbers. *Journal of materials in civil engineering*, 11(2):91–97, 1999.
- [31] J.-D. Lanvin, N. Nasri, D. Chambellan, and G. Pascal. Classement des bois de structure au moyen d’un densimètre à rayons X. *Le Journal de Physique IV*, 8(PR5):PR5–561–PR5–567, 1998.
- [32] Jean-Denis Lanvin, Didier Reuling, Y Costrel, and J Ducerf. Evaluation of the French oak for structural use. In *COST E53 Quality Control for Wood and Wood Products*, Warsaw, 2007.
- [33] Jean-Pierre Lasserre, Euan G. Mason, Michael S. Watt, and John R. Moore. Influence of initial planting spacing and genotype on microfibril angle, wood density, fibre properties and modulus of elasticity in *Pinus radiata* D. Don corewood. *Forest Ecology and Management*, 258(9):1924–1931, October 2009.
- [34] Jean-Michel Leban and Daniel W. Haines. The modulus of elasticity of hybrid larch predicted by density, rings per centimeter, and age. *Wood and fiber science*, 31(4):394–402, 1999.
- [35] Clément Libermann. Etude de la faisabilité du classement non destructif des feuillus pour des emplois en structure. Technical report, ENSAM, Cluny, 2013.
- [36] Shawn D. Mansfield, Lazaros Iliadis, and Stavros Avramidis. Neural network prediction of bending strength and stiffness in western hemlock (*Tsuga heterophylla* Raf.). *Holzforschung*, 61(6):707–716, 2007.
- [37] R. H. McAlister and H. R. Powers. Physical and mechanical properties of half-sib families of rust-resistant loblolly and slash pine. *Forest products journal*, 42(11-12):15–20, 1992.
- [38] John Moore, Alexis Achim, Andrew Lyon, Shaun Mochan, and Barry Gardiner. Effects of early re-spacing on the physical and mechanical properties of Sitka spruce structural timber. *Forest Ecology and Management*, 258(7):1174–1180, September 2009.

- [39] Jung-Kwon Oh, Kugbo Shim, Kwang-Mo Kim, and Jun-Jae Lee. Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-ray radiation. *Journal of Wood Science*, 55(4):264–272, May 2009.
- [40] Anders Olsson, Jan Oscarsson, Marie Johansson, and Bo Källsner. Prediction of timber bending strength on basis of bending stiffness and material homogeneity assessed from dynamic excitation. *Wood Science and Technology*, 46(4):667–683, May 2011.
- [41] Anders Olsson, Jan Oscarsson, Erik Serrano, Bo Kallsner, Marie Johansson, and Bertil Enquist. 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):319–333, 2013.
- [42] A. Panshin and C De Zeeuw. *Text book of Wood Technology. Vol. 1.* McGraw Hill Book Co., NY, 1980.
- [43] Young-In (David) Park, Ahmed Koubaa, Suzanne Brais, and Marc J. Mazerolle. Effects of cambial age and stem height on wood density and growth of jack pine grown in boreal stands. *Wood and Fiber Science*, 41(4):346–358, 2009.
- [44] R. G. Pearson and B. E. Ross. Growth rate and bending properties of selected loblolly pines. *Wood and fiber science*, 16(1):37–47, 1984.
- [45] J. C. Piter, R. L. Zerbino, and H. J. Blass. Machine strength grading of Argentinean Eucalyptus grandis. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 62(1):9–15, March 2004.
- [46] B. Rajeshwar, D. A. Bender, D. E. Bray, and K. A. McDonald. An ultrasonic technique for predicting tensile strength of southern pine lumber. *Transactions of the ASAE*, 40(4):1153–1159, 1997.
- [47] H Riberholt and PH Madsen. Strength of timber structures, measured variation of the cross sectional strength of structural lumber. Technical Report Report R 114, Structural Research Laboratory, Technical University of Denmark, 1979.
- [48] Hilmer Riberholt and Roberto Crocetti. Bending strength and stiffness of split glulam beams. Technical report, SP Technical Research Institute of Sweden, 2009.
- [49] Guillaume Roblot, Laurent Bleron, Frederic Mothe, and Robert Collet. Index of efficiency for strength-grading machines for solid wood. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 17(4):263–269, 2013.
- [50] Guillaume Roblot, Laurent Bléron, Fabrice Mériaudeau, and Rémy Marchal. Automatic computation of the knot area ratio for machine strength grading of Douglas-fir and Spruce timber. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 14(10):1317–1332, December 2010.
- [51] Guillaume Roblot, Damien Coudegnat, Laurent Bleron, and Robert Collet. Evaluation of the visual stress grading standard on French Spruce (*Picea excelsa*) and

- Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) sawn timber. *Annals of forest science*, 65(8), December 2008.
- [52] Alena Rohanová, Ratislav Lagana, and Marian Babiak. Comparison of non-destructive methods of quality estimation of the construction spruce wood grown in Slovakia. 17th international nondestructive testing and evaluation of wood symposium, Hungary, September 2011.
- [53] J. L. Sandoz. Grading of construction timber by ultrasound. *Wood Science and Technology*, 23(1):95–108, 1989.
- [54] AP Schniewind and DE Lyon. Tensile strength of redwood dimension lumber II. Prediction of strength values. *Forest products journal*, 21:45–55, 1971.
- [55] John F. Bendtsen Senft and B. Alan. Measuring microfibrillar angles using light microscopy. *Wood and Fiber science*, 17(4):564–567, 1985.
- [56] Simo-Pekka Simonaho, Jari Palviainen, Yrjö Tolonen, and Raimo Silvennoinen. Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. *Optics and Lasers in Engineering*, 41(1):95–103, 2004.
- [57] S Skatter and B Kucera. The cause of the prevalent directions of the spiral grain patterns in conifers. *Trees-structure and function*, 12(5):265–273, April 1998.
- [58] Harald Säll. *Spiral grain in Norway spruce*. PhD thesis, Växjö University, 2002.
- [59] Marcella B. Szymanski and C. G. Tauer. Loblolly pine provenance variation in age of transition from juvenile to mature wood specific gravity. *Forest science*, 37(1):160–174, 1991.
- [60] Trevor Tredwell. Visual Stress Grading of Timber, Explanation and practical interpretation of the visual grading elements of BS 4978:1973. Timber grade for structural uses. *Timber Research and Development Association*, 1973.
- [61] Marie-Christine Trouy-Triboulot and Pascal Triboulot. Matériau bois: Structure et caractéristiques. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, (C925):C925. 1–C925. 26, 2001.
- [62] Arto Usenius and Antti Heikkilä. WoodCIM model system for optimization activities throughout supply chain. In *Conference proceedings on Modelling the Wood Chain Forestry Wood Industry Wood Products Markets.*, pages 173–183, Helsinki, Finland, 2007.
- [63] J-W.G van de Kuilen. Bending strength and stress wave grading of tropical hardwoods. COST E24 Reliability analysis of timber structures, Zurich, October 2002.
- [64] Joffrey Viguier, Jean-François Bocquet, Jérôme Dopeux, Laurent Bléron, Frédéric Dubois, and Stéphane Aubert. Strength Grading of Split Glulam Beams. In *Proceedings of International Network on Timber Engineering Research (INTER)*, Bath (UK), September 2014.

- [65] Joffrey Viguier, Robert Collet, Jean-François Bocquet, Laurent Bleron, and Jean-Denis Lanvin. Interest of forest data for timber grading. In *Forest Products Society International Convention*, Québec city, 2014.
- [66] Joffrey Viguier, Arnaud Jehl, Robert Collet, Laurent Bleron, and Fabrice Meriaudeau. Improving strength grading of timber by grain angle measurement and mechanical modeling. *Wood Material Science & Engineering*, 10(1):145–156, 2015.
- [67] H. H. Wang, J. G. Drummond, S. M. Reath, K. Hunt, and P. A. Watson. An improved fibril angle measurement method for wood fibres. *Wood Science and Technology*, 34(6):493–503, 2001.
- [68] Song-Yung Wang, Jin-Hau Chen, Ming-Jer Tsai, Cheng-Jung Lin, and Te-Hsin Yang. Grading of softwood lumber using non-destructive techniques. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3):149–158, November 2008.
- [69] Bruce Zobel and John Talbert. *Applied forest tree improvement*. John Wiley & Sons, 1984.
- [70] Bruce Zobel, Charles Webb, and Faye Henson. *Core or juvenile wood of loblolly and slash pine trees*. Technical Association of the Pulp and Paper Industry, 1959.

Table des figures

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Vue en coupe d'un tronc d'arbre | 18 |
| 1.2 | Différences structurelles entre bois d'été et bois de printemps [22] | 19 |
| 1.3 | Différences entre bois d'été et bois de printemps dans la direction radiale [43] | 20 |
| 1.4 | Organisation microscopique de la paroi cellulaire [61] | 21 |
| 1.5 | Comportement du bois en traction/compression dans la direction longitudinale [61] | 24 |
| 1.6 | Influence du taux d'humidité sur différentes propriétés de résistance du bois. A : résistance en traction dans le sens des fibres; B : résistance en flexion; C : résistance en compression dans le sens des fibres; D : résistance en compression perpendiculaire aux fibres; E : résistance en traction perpendiculaire aux fibres [4] | 26 |
| 1.7 | Évolution des trois modules d'élasticité en fonction de la masse volumique pour des feuillus et résineux (Guitard, 1987) [22] | 28 |
| 1.8 | Déviations des fibres autour des noeuds (Baño <i>et al.</i> , 2011) [3] | 30 |
| 1.9 | Évolution de la résistance relative en flexion en fonction de la pente de fil pour différentes valeurs de paramètres de la formule de Hankinson [4] | 30 |
| 1.10 | Répartition du bois juvénile quasi cylindrique du bois juvénile dans la hauteur de l'arbre. Etude réalisée des pins de 17 ans [69]. | 32 |
| 1.11 | Comparaison de la densité, du module d'élasticité et de rupture en flexion entre des éprouvettes issues de bois juvénile (JW) et de bois mature (MW)(Moore <i>et al.</i> , 2009) [38] | 34 |
| 1.12 | Évolution des propriétés mécaniques selon l'âge des arbres et la position par rapport à la moelle; indicateurs des différences de propriétés mécaniques entre bois mature et bois juvénile (Pearson and Ross, 1984) [44] | 35 |
| 1.13 | Evolution du module d'élasticité et de la résistance en fonction de la densité de peuplement des sites de récolte (Moore <i>et al.</i> , 2009) [38]. | 37 |
| 1.14 | Evolution du module d'élasticité en fonction de l'élanement. Les cercles pleins représentent des arbres issus d'une placette ou la densité est de 833 arbres par hectare, les vides à 2500 arbres par hectare (Lasserre <i>et al.</i> , 2009) [33] | 37 |

| | | |
|------|---|----|
| 1.15 | Evolution du module d'élasticité en fonction de nombres de cernes par cm (à gauche) et en fonction de l'âge de l'arbre (à droite) pour le mélèze (Leban et Haines, 1999)[34] | 38 |
| 1.16 | Evolution du module d'élasticité en fonction de la hauteur dans l'arbre (exprimée en pourcentage de la hauteur totale) pour des arbres dominants (carrés pleins) et dominés (carrés vides) d'épicéa (Brüchert <i>et al.</i> , 2000) [8]. | 39 |
| 1.17 | Démarche générale du classement mécanique des bois de structures | 43 |
| 1.18 | Comparaison entre classement optimal et classement visuel pour deux espèces résineuses testées (Roblot <i>et al.</i> , 2008)[51] | 47 |
| 1.19 | Comparaison entre classement optimal obtenu par essais destructifs et classement visuel sur du chêne (Lanvin <i>et al.</i> , 2007) [32] | 48 |
| 1.20 | Illustration du calcul du KAR (Tredwell, 1973) [60] | 63 |
| 1.21 | Variante du KAR (Roblot <i>et al.</i> , 2010) [50] | 63 |
| 1.22 | Résultats de la mise en correspondances des noeuds (Roblot <i>et al.</i> [50]) | 65 |
| 1.23 | Méthode de calcul du KDR (Jehl <i>et al.</i> , 2011 [28]) | 66 |
| 1.24 | La figure (a) représente les différents plans du bois : A, B et C sont respectivement les plans transversal, radial et tangentiel. La figure (b) définit quant à elle les deux angles mesurables par cette méthode : α l'orientation de la pente de fil et β l'angle de plongée. Le plan où est projeté le faisceau de laser est le plan x-y dans la figure (b) et correspond le plus souvent au plan B de la figure (a) [56]. | 67 |
| 1.25 | Illustration des tâches de diffusion obtenus selon différents cas possibles d'orientation de la pente de fil [66]. | 68 |
| 1.26 | Illustration de la mesure de la pente de fil grâce à un faisceau de plusieurs lasers (Scanner Luxscan) | 69 |
| 1.27 | Représentation schématique d'un neurone formel | 72 |
| 1.28 | Propriétés mécaniques de poutres entières et de poutres refendues (qualité initiale GL30) [48]. | 77 |
| 2.1 | Repérage de la localisation radiale des sciages | 82 |
| 2.2 | Répartition des sciages selon leurs module d'élasticité et module à rupture obtenus lors des essais destructifs. Les lignes verticales représentent les bornes des classes C18 (ou D18) en noir, C24 en rouge (ou D24) et C30 (ou D30) en bleu. | 84 |
| 2.3 | Mesure de masse volumique par rayons X | 87 |
| 2.4 | Exemple de cartographie de la masse volumique d'un sciage d'épicéa | 87 |
| 2.5 | Utilisation du sylvatest | 88 |
| 2.6 | Photographie de l'E-scan | 89 |
| 2.7 | Photographie du MTG | 90 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.8 | Photographie E-Control | 90 |
| 2.9 | Séparation des zones de noeuds et de bois sain pour le calcul des paramètres f_1 et f_2 | 91 |
| 2.10 | Cartographie du KDR sur un sciage en chêne | 92 |
| 2.11 | Mesure de la pente de fil sur un sciage d'épicéa | 93 |
| 2.12 | KDR en fonction des propriétés mécaniques; à gauche en fonction du module à rupture et à droite en fonction du module d'élasticité; de haut en bas : pour le chêne, le douglas et l'épicéa | 98 |
| 2.13 | SoG en fonction des propriétés mécaniques; à gauche en fonction du module à rupture et à droite en fonction du module d'élasticité; de haut en bas : pour le douglas et l'épicéa | 100 |
| 2.14 | Influence de la position verticale du sciage sur les propriétés mécaniques du chêne | 102 |
| 2.15 | Répartition des sciages selon leur position par rapport à la moelle et leur localisation verticale. | 105 |
| 2.16 | Influence de la localisation du sciage dans la grume sur les propriétés mécaniques du douglas. A gauche, l'influence de la position verticale du sciage; a droite celle de la position du sciage par rapport à la moelle. | 107 |
| 2.17 | Evolution des propriétés mécaniques selon la position par rapport à la moelle et la localisation verticale des sciages. | 108 |
| 2.18 | Limite du bois juvénile et variation de la nodosité en fonction de localisation du sciage dans l'arbre | 110 |
| 2.19 | Système de coordonnées | 118 |
| 2.20 | Illustration de la démarche de calcul du module d'élasticité local | 120 |
| 2.21 | Résultats modélisation douglas | 125 |
| 2.22 | Résultats modélisation epicéa | 126 |
| 2.23 | Résultats modélisation chêne | 128 |
| 3.1 | Algorithme de réglage machine à une seule IP pour la combinaison C24/C18/Rejet | 133 |
| 3.2 | Algorithme de réglage machine à deux IPs pour la combinaison C24/Rejet | 135 |
| 3.3 | Influence du nombre et du type d'IP sur le réglage machine. Réglage théorique sur la base des données destructives. | 137 |
| 3.4 | Influence du type d'IP sur le réglage machine dans le cas de l'épicéa et du douglas | 138 |
| 3.5 | Processus itératif responsable d'un fort déclassement : augmentation très forte de l'IP sur la classe D30 pour satisfaire la recommandation 1. | 141 |
| 3.6 | Influence du nombre de classes dans la combinaison pour le lot de douglas. | 142 |

| | | |
|------|---|-----|
| 3.7 | Couples de valeurs seuils acceptables du point de vue normatif pour une combinaison C30/C18/Rejet à une seule IP (Exemple présenté : (X+pdf) pour le lot d'épicéa) | 143 |
| 3.8 | Influence de la stratégie de réglage machine pour une combinaison C30/C18/Rejet à une seule IP (C30/C18/Rejet modèle X+pdf épicéa). | 144 |
| 3.9 | Comparaison du classement machine de la combinaison C24/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa (en noir) et le douglas (en bleu) | 147 |
| 3.10 | Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C18/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa (en noir et gris) et le douglas (en bleus) | 149 |
| 3.11 | Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C18/Rejet pour différentes machines pour l'épicéa. Stratégie du réglage machine basée sur l'optimisation de la valorisation financière | 150 |
| 3.12 | Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C24/Rejet pour différentes machines pour le douglas. Stratégie du réglage machine basée sur l'optimisation de la valorisation de la qualité mécanique des sciages du lot. | 152 |
| 3.13 | Comparaison du classement machine de la combinaison C30/C24/Rejet pour différentes machines pour le douglas. Stratégie du réglage machine basée sur l'optimisation de la valorisation financière. | 152 |
| 3.14 | Efficience et justesse du classement machine pour différentes combinaisons et machines pour l'épicéa et le douglas | 154 |
| 3.15 | Coefficients de détermination et qualité du classement | 155 |
| 3.16 | Matrices d'effectif de deux machines pour la combinaison de classes C30/C18/Rejet dans le cas du douglas | 159 |
| 3.17 | Paramètres modifiables par l'utilisateur | 165 |
| 3.18 | Choix des paramètres de calculs | 166 |
| 3.19 | Présentation des résultats | 166 |
| 3.20 | Comparaison du prix de vente moyen du lot selon la stratégie de réglage des seuils | 167 |
| 3.21 | Comparaison du classement par différentes machines sur le chêne pour la combinaison D24/Rejet | 170 |
| 3.22 | Comparaison du classement par différentes machines sur le chêne pour la combinaison D30/D18/Rejet | 171 |
| 3.23 | Comparaison du classement selon les différentes approches | 173 |
| 4.1 | Résultats des tests destructifs sur les lamelles C30 et C24 pour les différentes sections initiales : cas de la résistance à la flexion | 180 |
| 4.2 | Résultats des tests destructifs sur les poutres lamellées-collées | 183 |

| | | |
|------|---|-----|
| 4.3 | Refente numérique simple : résistance à la flexion prédite de la lamelle entière et des deux lamelles refendues. | 185 |
| 4.4 | Conséquence de la refente simple sur les propriétés mécaniques des lamelles. | 188 |
| 4.5 | Différence entre la résistance à la flexion caractéristique des lamelles initiales et celles obtenues à l'issu du processus de refente en fonction de la section initiale. En pointillé sont reportés les recommandations de l'EN14080. | 190 |
| 4.6 | Comparaison entre les résultats obtenus par le modèle analytique et les formules proposées. | 191 |
| 4.7 | Equivalence entre classe lamelles et classe BLC homogène (EN 14080) . . . | 192 |
| 4.8 | Repérage des aboutages et de la lamellation | 193 |
| 4.9 | Caractérisation non-destructive des lamelles. | 194 |
| 4.10 | Propriétés mécaniques locales des poutres. | 195 |
| 4.11 | Comparaison modèle (en rouge) expérimentation (en bleu) pour la poutre E1. | 197 |
| 4.12 | Conséquence de la refente simple sur les propriétés mécaniques des poutres. | 199 |
| 4.13 | Conséquence de la refente simple sur le module à rupture pour différentes qualités mécaniques. | 201 |
| 4.14 | Optimisation par tronçonnage | 206 |

Liste des tableaux

| | | |
|------|---|----|
| 1.1 | Valeur de n selon les différents modes de sollicitation (Wood Handbook [4]) | 29 |
| 1.2 | Valeurs caractéristiques des différentes classes définies par l'EN 338. En rouge, les propriétés requises pour l'attribution de sciages à une classe . . . | 42 |
| 1.3 | Critères de classement visuel du douglas (extrait de la norme NF B52-001 partie 1) | 46 |
| 1.4 | Correspondance des classes obtenues par classement visuel et celles données par la norme EN 338. | 46 |
| 1.5 | Exemple de matrice d'effectif de la norme EN 14081. En vert sont représentés les sciages bien classés (sur la diagonale), en rouge les sciages sur-classés (sous la diagonale) et en bleu ceux sous-classés (au dessus de la diagonale) | 50 |
| 1.6 | Matrice coût élémentaire pour chaque couple de classe optimale/classe assignée (EN 14081). | 51 |
| 1.7 | Matrice de coût global EN 14081 | 52 |
| 1.8 | Matrice d'effectif d'efficience | 54 |
| 1.9 | Matrice de poids élémentaires d'efficience | 54 |
| 1.10 | Matrice de poids élémentaires d'efficience pour les classes de rejets | 55 |
| 1.11 | Matrice d'efficience globale | 55 |
| 1.12 | Coefficients de détermination entre masse volumique et module d'élasticité et résistance obtenus dans différentes études. | 57 |
| 1.13 | Coefficients de détermination entre l'estimation du module d'élasticité et des valeurs de module d'élasticité et de rupture obtenues lors d'essais destructifs issues de différentes études | 62 |
| 1.14 | Coefficient de détermination entre module de rupture estimé à l'aide de plusieurs méthodes et le module de rupture issu d'essais destructifs (Piter <i>et al.</i> , 2004) [45] | 70 |
| 1.15 | Apport du KAR sur le classement mécanique d'épicéa et de douglas [50] . . | 70 |
| 1.16 | Apport de la mesure de la pente de fil au classement mécanique par machine. Coefficients de détermination r^2 pour différents jeux de paramètres sur un lot d'épicéa (Jehl <i>et al.</i> , 2011) [28] | 74 |

| | | |
|------|---|-----|
| 1.17 | Coefficient de détermination entre module de rupture estimée à l'aide de plusieurs méthodes et module de rupture issu d'essais destructifs pour différentes études | 75 |
| 2.1 | Composition du lot en chêne, la dénomination de la qualité est celle utilisée par les fournisseurs. | 80 |
| 2.2 | Composition du lot de douglas. | 81 |
| 2.3 | Composition du lot d'épicéa. | 81 |
| 2.4 | Descriptif des codes couleurs utilisés pour les mires et les distances à la moelle relative à chaque couleur | 82 |
| 2.5 | Valeurs moyennes des paramètres de calcul du KDR pour les trois essences étudiées | 92 |
| 2.6 | Données disponibles en fonction des essences | 94 |
| 2.7 | Signification des différents paramètres calculés à partir des singularités locales | 95 |
| 2.8 | Coefficient de détermination r^2 entre les différents paramètres pour les mesures de nodosité. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative; * : corrélation significative et x : pas de corrélation | 96 |
| 2.9 | Coefficient de détermination r^2 entre les différents paramètres pour les mesures de pente de fil. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative; * : corrélation significative et x : pas de corrélation | 99 |
| 2.10 | Statistiques descriptives des grandeurs disponibles sur le lot de chêne. . . . | 101 |
| 2.11 | Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées et les propriétés mécaniques dans le cas du chêne. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative;, ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation | 103 |
| 2.12 | Récapitulatif des variables mesurées pour le lot de douglas. | 104 |
| 2.13 | Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées dans le cas du douglas, seul le lot dont les paramètres sont détaillés tableau 2.12 est ici étudié. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative;, ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation | 109 |
| 2.14 | Récapitulatif des variables mesurées pour l'épicéa | 112 |

| | | |
|------|---|-----|
| 2.15 | Coefficient de détermination r^2 entre les différentes grandeurs mesurées. Entre parenthèses, la significativité des corrélations : *** : corrélation extrêmement significative; ** : corrélation très significative, * : corrélation significative et x : pas de corrélation | 112 |
| 2.16 | Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (chêne) | 114 |
| 2.17 | Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (douglas) | 116 |
| 2.18 | Variables retenues dans la régression linéaire et qualité de la prédiction (épicéa) | 117 |
| 2.19 | Paramètres du modèle (X+pdf) pour les deux essences étudiées | 123 |
| 2.20 | Qualité de la prédiction des propriétés mécaniques selon les différentes méthodes et machines proposées (coefficient de détermination r^2) | 129 |
| 3.1 | Cas d'un déclassement excessif dû à la recommandation normative sur le nombre minimal de sciage par classe. Exemple d'un réglage machine sur du chêne et la combinaison D30/D24/Rejet. | 140 |
| 3.2 | Prix en euros d'un m^3 de sciage selon la classe de résistance | 157 |
| 3.3 | Prix (en euros) et cadence des différentes machines de l'étude | 157 |
| 3.4 | Classification des scieries françaises selon le volume de leur production . . . | 157 |
| 3.5 | Valorisation économique pour les différentes machines pour la combinaison C30/C18/Rejet dans le cas du douglas. | 159 |
| 3.6 | Prix moyen des lots classés de manière optimale et pour les différentes machines dans le cas de l'épicéa et du douglas. Entre parenthèses l'ordre pour chaque couple de combinaison et d'essence; 1 : plus grand prix moyen, 7 : plus petit prix moyen. | 160 |
| 3.7 | Valorisation économique pour les différentes machines dans le cas du douglas pour différents volumes de production et combinaisons de classes mécaniques | 162 |
| 3.8 | Valorisation économique pour les différentes machines dans le cas de l'épicéa pour différents volume de production et combinaison de classes mécaniques | 164 |
| 3.9 | Bornes d'attribution d'un sciage à une classe donnée à l'issu d'essais sur une machine d'épreuve | 172 |
| 3.10 | Valeurs caractéristiques des lots obtenus et bornes définies | 174 |
| 4.1 | Valeurs moyennes, caractéristiques (EN 14358) et coefficient de variation de la masse volumique, du module d'élasticité et de la résistance à la flexion. | 178 |
| 4.2 | Différences entre les propriétés mécaniques de sciages entiers et refendus . . | 179 |

| | | |
|------|--|-----|
| 4.3 | Valeurs moyennes et coefficient de variation des propriétés mécaniques mesurées | 181 |
| 4.4 | Valeurs caractéristiques de la résistance à la flexion et de la masse volumique (fractile à 5%) | 182 |
| 4.5 | Détails des différents sous-lots : nombre de sciages et valeurs caractéristiques de résistance à la flexion | 186 |
| 4.6 | Equivalences entre classe de résistance des lamelles et classe de résistance de poutre en bois lamellé-collé homogène. Valeur caractéristique de la résistance en flexion de poutres refendues déduite des formules de l'EN 14080. | 186 |
| 4.7 | Influence de la refente simple ou double pour différentes classes mécaniques | 187 |
| 4.8 | Poutre lamellée-collée réalisable à partir des lamelles refendues et comparaison par rapport aux recommandations de l'EN 14080 | 189 |
| 4.9 | Résistance à la flexion caractéristique en fonction de la section initiale pour la simple et double refente. Le nombre de sciages de chaque sous-lot est indiqué entre parenthèses. | 189 |
| 4.10 | Propriétés élastiques des éléments du maillage | 196 |
| 4.11 | Comparaison entre MOE et MOR obtenus expérimentalement et par la modélisation éléments finis. | 198 |
| 4.12 | Influence de la refente de poutres de différentes qualités | 200 |

Résumé

Pour le calcul de structures en bois, il convient d'appliquer les méthodes décrites dans l'Eurocode 5. L'application de ces méthodes oblige les prescripteurs à utiliser du bois classé, c'est à dire du bois dont les propriétés mécaniques sont garanties. L'attribution d'un sciage à une classe nécessite de garantir trois propriétés : la masse volumique, le module d'élasticité (MOE) et la résistance à la flexion (MOR). La détermination de la masse volumique et du MOE est relativement bien maîtrisée, le verrou technologique restant concerne la prédiction du MOR. La possibilité d'améliorer cette prédiction par l'ajout de la mesure de singularités (nodosité ou pente de fil) ou de données sylvicoles dans des modèles a ainsi été étudiée.

L'attribution d'un sciage à une classe de résistance est régie par des normes et la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques n'est pas suffisante pour juger du rendement réel du classement d'un lot de sciages. C'est pourquoi les rendements de classement obtenus entre différentes technologies ont été comparés sur des essences présentant un fort potentiel de récolte en France (le douglas, l'épicéa et le chêne).

La problématique de la refente de poutres en bois lamellé-collé a elle aussi été abordée. La perte de résistance engendrée par le processus de refente a ainsi été détaillée et confrontée aux recommandations normatives.

Abstract

The methods described in Eurocode 5 must be applied to the calculation of timber structures. The application of these methods requires prescribers to use wood whose mechanical properties are guaranteed. To assign a board to a class, three properties must be guaranteed : the density, the modulus of elasticity (MOE) and bending strength (MOR). The determination of the density and MOE is already mastered, the remaining technological obstacle concerns the prediction of MOR. The possibility to improve the prediction by measuring singularities (knot or slope of grain) or keeping the traceability of forest data has been investigated.

Strength grading is governed by standards and the predictions quality of mechanical properties is not sufficient to evaluate the grading efficiency. Therefore the efficiency between different technologies has been compared on species with high harvest potential in France (Douglas fir, spruce and oak).

The problems encountered when glulam beams are split has been analyzed. Particularly, the strength loss caused by the splitting process has been detailed and compared to the normative recommendations.