

Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles

Rémy Frayssinhes

▶ **To cite this version:**

Rémy Frayssinhes. Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles. Génie des procédés. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE056 . tel-03132767

HAL Id: tel-03132767
https://pastel.hal.science/tel-03132767

Submitted on 5 Feb 2021

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

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

HESAM UNIVERSITÉ

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
[Laboratoire Bourguignon des Matériaux et Procédés – Campus de Cluny]

THÈSE

présentée par : **Rémy FRAYSSINHES**

soutenue le : **08 décembre 2020**

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

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

Spécialité : **Génie mécanique - procédés de fabrication**

Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et Modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles

THÈSE dirigée par :
Monsieur Robert COLLET

et co-encadrée par :
Monsieur Stéphane GIRARDON et Monsieur Louis DENAUD

Jury

M. Laurent BLERON, Professeur, ENSTIB, Université de Lorraine	Président
Mme. Sandrine BARDET, Maître de conférences (HDR), LMGC, Montpellier	Rapporteure
M. Jean-Michel LEBAN, Directeur de recherche, INRAE, Nancy	Rapporteur
Mme. Évelyne TOUSSAINT, Professeure, Institut Pascal, Université Clermont Auvergne	Examinatrice
M. Robert COLLET, Maître de conférences (HDR), LaBoMaP, Arts et Métiers	Examinateur
M. Stéphane GIRARDON, Maître de conférences, LaBoMaP, Arts et Métiers	Examinateur
Mme. Christine DELEUZE, Docteure, ONF, Dole	Invitée
M. Louis DENAUD, Maître de conférences (HDR), LaBoMaP, Arts et Métiers	Invité

THÈSE

Remerciements

Ce mémoire de thèse n'aurait pu être réalisé sans l'aide de nombreuses personnes. Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de thèse, Robert Collet, qui a eu confiance en moi dans la réalisation de ce projet malgré mes difficultés en rédaction. Il a su me montrer qu'il est toujours possible de s'améliorer, et, de développer ses propres outils afin de réaliser ce travail de thèse. Je tiens aussi à le remercier pour sa sympathie, ses conseils, sa franchise et aussi pour les nombreuses relectures de mes travaux.

Stéphane Girardon et Louis Denaud, mes deux co-encadrants ont également été une aide précieuse pour la rédaction de ce mémoire. Merci à Stéphane pour son approche très rigoureuse de la rédaction et de l'approche scientifique, son goût pour la programmation et pour ces nombreux questionnements sur différentes approches mathématiques. Un grand merci aussi à Louis pour son recul scientifique, sa connaissance fine du procédé de déroulage, sa convivialité et sa joie de vivre.

Je n'aurais pas débuté une thèse, si en 2016, je n'avais pas découvert l'équipe bois de Cluny, grâce à l'appui de Laurent Bléron (président du jury de ma soutenance de thèse). J'ai découvert, à ce moment-là, leur convivialité et leur esprit d'équipe qui a appuyé mon choix.

Je remercie Joffrey Viguier pour sa sympathie, son attention et son approche fine des phénomènes mécaniques et de la programmation (Python).

Je remercie également Benjamin Roux pour son aide précieuse lors de nombreuses manipulations et pour la mise en œuvre rapide de solutions électroniques ou informatiques.

Bertrand Marcon et Jean-Claude Butaud ont aussi été essentiels afin de créer les manipulations et de réaliser les différentes éprouvettes nécessaires dans mes travaux de ma thèse.

Puis toute l'équipe Bois (Rémy Marchal, Guillaume Pot, Fabrice Cottin, Roger Letourneau) toujours disponible afin de m'aider dans mes travaux de thèse.

Une pensée à Rémi Curti, partenaire cycliste dans les forêts clunysoises.

Une pensée également à mes collègues doctorants, Benoit Besseau (doctorant chez un Ducerf) et Robin Duriot (doctorant qui va poursuivre une partie des travaux de ce mémoire).

Et de façon générale, à toutes les personnes que j'ai croisées au LaBoMaP.

Je voudrais également remercier Sandrine Bardet et Jean-Michel Leban d'avoir accepté de rapporter ce mémoire, et, Evelyne Toussaint pour sa disponibilité lors de la soutenance.

Je tiens aussi à remercier Christine Deleuze, Frédéric Mothe et Francis Colin pour toutes les données relevées sur une forêt expérimentale.

Je remercie ensuite les habitués de « Chez La Louise » (Richard et Dominique Brun, Loï et Noucka Thuel, Christophe Coudon, Jean-Marc Clément et France Cochy, et tous les autres) qui m'ont permis d'avoir un regard extérieur, de penser à d'autres choses et de passer du bon temps durant mes années à Cluny.

Je remercie également tous les Aveyronnais qui m'ont toujours soutenu tout au long de cette thèse.

Pour terminer, je remercie tous mes soutiens et relecteurs de l'ombre, Sonia et toute ma famille.

Je garde, enfin, une pensée émue pour ma grand-mère qui nous a quitté en 2019…

« Entre Ce que je pense, Ce que je veux dire, Ce que je crois dire, Ce que je dis, Ce que vous avez envie d'entendre, Ce que vous entendez, Ce que vous comprenez... il y a dix possibilités qu'on ait des difficultés à communiquer. Mais essayons quand même... »
Bernard Werber

A ma famille, mes amis et à tous ceux qui liront ce mémoire

Résumé

Le douglas, essence originaire du nord-ouest du continent américain, a été implantée massivement sur le territoire français il y a une 50^{aine} d'années. La part de gros bois, en raison du vieillissement des peuplements, va s'accroître dans les années à venir. Une part de cette ressource ne correspondra pas aux approvisionnements recherchés par les plus grosses scieries (diamètre limité à 55 cm) et, sans débouchés conséquents, elle va se déprécier. Un procédé de transformation du bois bien adapté pour la valorisation des gros et très gros bois est le déroulage. En France, le douglas n'est pas une essence traditionnellement déroulée dû, pour partie, à sa récente importation, mais également, à sa récente maturité. Les placages peuvent servir à réaliser des panneaux de contreplaqué, mais aussi de LVL (Laminated Veneer Lumber). Les panneaux sont réalisés le plus souvent en continu permettant de réaliser des poutres de grandes dimensions. Ces poutres sont composées de placages dont la direction des fibres est orientée, principalement, dans la direction longitudinale de la poutre afin de privilégier les hautes performances mécaniques. Dans le cadre de cette thèse, une étude des paramètres optimaux de déroulage a été nécessaire afin d'obtenir des placages de qualité. Ensuite, un modèle prenant en compte la branchaison, le diamètre et l'âge d'un peuplement a été développé afin d'estimer les propriétés mécaniques locales des placages issus de ce peuplement. En assemblant des placages virtuels, les propriétés mécaniques de poutres LVL ont pu être déterminées. Ce modèle a permis d'estimer les propriétés mécaniques de poutres fabriquées à partir des données fournies par l'ONF et l'INRAE de Champenoux d'arbres issus de trois placettes d'expérimentation de la forêt domaniale du Grison avec des itinéraires sylvicoles « contrastés ». Une campagne expérimentale de grande importance (100 m^3) portée par France Douglas, a permis de confirmer les ordres de grandeur des performances mécaniques de poutres LVL avec les prédictions du modèle. La simulation d'un élagage à 20 ans sur les arbres de la forêt domaniale du Grison montre l'intérêt pour les forestiers d'utiliser ce modèle comme un outil d'aide à la décision pour la conduite des peuplements, mais aussi pour les acheteurs d'apprécier le potentiel d'une parcelle destinée au déroulage.

Résumé en anglais

Douglas fir is a species native from the northwest of the American continent. It was established on French territory 50 years ago. The proportion of large tree will increase in the next years. Part of this resource will not correspond to the supplies sought by the largest sawmills (55-cm limited diameter) and it will be depreciated without significant outlets. Peeling process is suitable for upgrading large and very large tree. Douglas fir is not traditionally peeled in France, partly due to its recent importation, but also, to its recent maturity. The veneers can be used to make plywood panels, but also LVL (Laminated Veneer Lumber). The panels are usually produced continuously, which makes it possible to produce long beams, which have a mainly oriented in the longitudinal direction to reach high mechanical performance. As a first step, a study of the optimal parameters of peeling process was necessary to obtain the highest quality veneers. Then, a model considering the branch, the diameter and the age of a stand was developed in order to estimate the local mechanical properties of the produced veneers. The LVL-beam mechanical properties could be determined by virtually assembling these veneers. This model can estimate the mechanical properties of beams made with trees from three representative plots and "contrasting" silvicultural routes. ONF and INRAE teams gave us the opportunity to work on trees in the Grison state forest (from the DOUGLAS group network of the “GIS Coopérative de donées”), which fulfilled these characteristics. A large-scale experimental campaign made it possible to confirm the orders of magnitude and variation of the model results. A simulation of a 20-year pruning on trees in the Grison national forest shows the interest of using this decision-support tool for the management of forest stands, but also for buyers who can estimate the potential for a plot intended for peeling process.

Table des matières

INTRODUCTION **1**

1 - CONTEXTE **3**

2 - ENJEUX DE LA THESE **5**

PREMIERE PARTIE : OPTIMISATION DES PARAMETRES DE DEROULAGE **9**

1 - ÉTAT DE L'ART **10**

1.1 - DESCRIPTION DU DOUGLAS ET DE SES PROPRIETES MACRO ET MICROSCOPIQUES 10

1.2 - LE LVL 15

1.3 - PARTICULARITE DU PROCEDE DE DEROULAGE 19

2 - ÉTUDE DES PARAMETRES DE DEROULAGE **33**

2.1 - PARAMETRES POUVANT INFLUENCER LA QUALITE DES PLACAGES 33

2.2 - LA RUGOSITE, UN INDICE DE LA BONNE DEROULABILITE DES PLACAGES 33

2.3 - ÉTUDE DE LA VITESSE D'ELEVATION DE LA TEMPERATURE DES BILLONS 49

2.4 - SYNTHESE SUR L'OPTIMISATION DES PARAMETRES DE DEROULAGE 61

DEUXIEME PARTIE : MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES DE PANNEAUX DE LVL INTEGRANT LES DONNEES SYLVICOLES **63**

1 - MODELISATION DE L'ARBRE, ETAT DE L'ART **64**

1.1 - MODELES DE CROISSANCES 64

1.2 - DESCRIPTION ET MODELISATION DES BRANCHES 65

1.3 - BASE DE DONNEES « *MODELFOR* » 72

1.4 - RECAPITULATIF DES CONNAISSANCES SUR LA MODELISATION DU DOUGLAS 73

2 - MODELISATION DE LA DISPOSITION ET DE LA TAILLE DES NŒUDS D'UN PLACAGE EN FONCTION DE LA BRANCHAISON **75**

2.1 - DESCRIPTION DES BILLONS 75

2.2 - MODELISATION NUMERIQUE DU BILLON ET POSITIONNEMENT DES NŒUDS 77

2.3 - VALIDATION 79

2.4 - MODELISATION D'ARBRES ISSUS DE LA BASE DE DONNEES « *MODELFOR* » 82

2.5 - SYNTHESE 84

3 - MODELISATION DE LA PERTURBATION DE L'ORIENTATION DES FIBRES AUTOUR DES NŒUDS **85**

3.1 - LES NŒUDS ET LEURS INFLUENCES SUR L'ORIENTATION DES FIBRES 85

3.2 - PRINCIPE DU SCANNER LOOBAR 88
3.3 - MODELE DE DEVIATION BASE SUR LA METHODE DE L'OVALE DE RANKINE 91
3.4 - VALIDATION DU MODELE ET AJUSTEMENT DES PARAMETRES 92
3.5 - SYNTHESE 97
4 - MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES D'UN PANNEAU MULTI-PLI 99
4.1 - LES FACTEURS INFLUENÇANT LES CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES PLACAGES 99
4.2 - DETERMINATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES PLACAGES EN PRENANT EN COMPTE LA MASSE VOLUMIQUE ET L'ORIENTATION DES FIBRES 103
4.3 - ASSEMBLAGE DES PLACAGES POUR CALCUL DES PROPRIETES MECANIQUES DE POUTRES LVL 104
4.4 - VALIDATION DU CALCUL ANALYTIQUE 105
4.5 - SYNTHESE 112
5 - PROPRIETES MECANIQUES DE PANNEAUX DE LVL ISSUS DE LA FORET DOMANIALE DU GRISON 113
5.1 - MODELISATION DE LA MASSE VOLUMIQUE DES ARBRES 113
5.2 - MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES PLACAGES 115
5.3 - MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES DES POUTRES LVL 117
5.4 - RESULTATS DE LA MODELISATION 119
5.5 - APPLICATION DU MODELE GLOBAL A DES ARBRES ELAGUES VIRTUELLEMENT 121
5.6 - COMPARAISON AVEC LES RESULTATS D'UNE ETUDE DE GRANDE AMPLEUR 122
5.7 - SYNTHESE 131

CONCLUSION ET PERSPECTIVES 133

1 - ÉTUDE DES PARAMETRES DU PROCEDE DE DEROULAGE 134
2 - MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES DE PANNEAUX DE LVL INTEGRANT LES DONNEES SYLVICOLES. 135
3 - PERSPECTIVES 137

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 139

ANNEXES A-1

Liste des tableaux

Tableau 1 : Catégorie de diamètres selon l'IFN [9] 4
Tableau 2 : Production LVL par continents et principaux fabricants [11] 18
Tableau 3 : Caractéristiques densitométriques moyennes du bois de douglas français selon différents auteurs 28
Tableau 4 : Résultats des paramètres de rugosité dépendant de la température de déroulage 36
Tableau 5 : Analyse de Kruskall-Wallis sur le Sa, Sq et Sz pour l'aubier et le duramen 41
Tableau 6 : Effet de la température sur la rugosité surfacique pour l'aubier et sur le duramen normalisé par la médiane à 50°C pour l'aubier 41
Tableau 7 : Résultats des paramètres de rugosité dépendants de la vitesse de déroulage 44
Tableau 8 : Résultats des paramètres de rugosité pour un billon centré et un billon excentré 47
Tableau 9 : Position des thermocouples dans le but de déterminer le ratio (χ) 51
Tableau 10 : Définition des billons et des diffusivités thermiques 58
Tableau 11 : Coefficients pour le modèle de diamètre de branche [72] 67
Tableau 12 : Coefficients pour le modèle de prédiction de l'angle des branches [72] 69
Tableau 13 : Mesure des branches pour les deux billons (les branches surlignées représentent les branches élaguées) 76
Tableau 14 : Calibration des valeurs $Aflow$ *et* $Bflow$ *par Foley* 87
Tableau 15 : Information sur la taille des nœuds du billon 1 94
Tableau 16 : Facteurs d'ajustement pour le modèle d'orientation des fibres pour du douglas 95
Tableau 17 : Prédiction des propriétés mécaniques du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12% 100
Tableau 18 : Paramètres de la modélisation de la densité selon Kimberley [100] 102
Tableau 19 : Prédiction des du module d'élasticité du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12% suivant Pollet optimisé 109
Tableau 20 : Erreur relative sur les modules d'élasticité avant et après optimisation 109
Tableau 21 : Prédiction des du module de rupture du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12% suivant Pollet optimisé 111
Tableau 22 : Erreur relative sur les modules de rupture avant et après optimisation 111
Tableau 23 : Population de chaque modalité 120
Tableau 24 : Longueurs de base de rugosité pour le mesurage de Ra, Rq, Rsk, Rku, RDq et pour les courbes et paramètres associés de profils non périodiques (Extrait de la norme NF EN 4288) A-3

Liste des figures

Figure 1 : Augmentation mondiale de température - Écart par rapport à la moyenne des années 1850-1900 en degrés Celsius _____ *2*
Figure 2 : (a) Répartition de l'âge du peuplement de douglas français en 2008 et en 2014 [7] ; (b) Evolution du volume sur pied de douglas [7] _____ *4*
Figure 3 : (a) Exemple des premières étapes d'une ligne de sciage industrielle[Scierie Feidt]; (b) Géométrie de déroulage pour une barre cylindrique [11] _____ *5*
Figure 4 : Production de contreplaqué aux États Unis de 1947-1975 [3] _____ *6*
Figure 5 : Modèle complet pour la prédiction des propriétés mécaniques d'une poutre de LVL _____ *8*
Figure 6 : Différentes parties d'un arbre selon Pépinière Thuilleaux _____ *11*
Figure 7 : Structure d'un tronc d'arbre [16] _____ *12*
Figure 8 : Vue 3D MEF de la structure interne du douglas [17] _____ *13*
Figure 9 : Principale direction du bois [18] _____ *13*
Figure 10 : Schéma simplifié d'une ligne de fabrication de LVL (Metsawood®) _____ *15*
Figure 11 : Assemblage et décalage des placages [11] _____ *16*
Figure 12 : Pressage à chaud de panneaux de LVL [11] _____ *16*
Figure 13 : Schéma simplifié de la fabrication de panneau de LVL [11] _____ *17*
Figure 14 : Production mondiale de LVL [11] _____ *17*
Figure 15 : Modes principaux de coupe du bois [21] _____ *19*
Figure 16 : Schéma du processus de déroulage [26] _____ *20*
Figure 17 : Diagramme (type Ishikawa) des paramètres influençant le déroulage _____ *21*
Figure 18 : Différents types de barres de pression [29] _____ *23*
Figure 19 : Température de transition vitreuse : (a) Des constituants isolés en fonction de la teneur en eau [selon [30]], (b) De la matrice hémicelluloses-lignine native en fonction de l'humidité relative de l'ambiance [selon [30]] _____ *24*
Figure 20 : Ouverture de fissures de déroulage [37] _____ *26*
Figure 21 : Fissuration classique (Mothe 1988) _____ *27*
Figure 22 : Profil de densité dans un cerne de douglas et de chêne [41] _____ *28*
Figure 23 : Enfoncement de l'outil dans la structure du bois [24] _____ *29*
Figure 24 : Schéma de microfissure radiale [48] _____ *30*
Figure 25 : Fissuration radiale sur bois vivant [49] _____ *31*
Figure 26 : Billon de douglas avec fissure radiale _____ *31*
Figure 27 : Passage d'un placage sous le portique instrumenté en sortie de la dérouleuse du LaBoMaP (profilomètre et mesure d'épaisseur) _____ *35*
Figure 28 : Distribution du Ra et du Rz en fonction de la température de déroulage [53] _____ *36*
Figure 29 : Echantillonnage des rondelles [54] _____ *37*
Figure 30 : Microdérouleuse avec profilomètre laser [54] _____ *38*

Figure 31 : Traitement des données brutes avant le calcul des paramètres de rugosité [54] _____ *39*
Figure 32 : Axe des efforts sur le couteau _____ *39*
Figure 33 : Rugosité surfacique des rubans d'aubier déroulés à différentes températures [54] _____ *40*
Figure 34 : Efforts de coupe sur le couteau normalisé par l'épaisseur des placages [54] _____ *42*
Figure 35 : Distribution du Ra et du Rz pour 2 vitesses de déroulage [53] _____ *44*
Figure 36 : Procédure de préparation de billon excentré _____ *46*
Figure 37 : Distribution du Ra et du Rz pour un billon centré et un billon excentré [53] _____ *46*
Figure 38 : Billon instrumenté dans le but de déterminer le ratio (χ) [60] _____ *50*
Figure 39 : Evolution de la température enregistrée pour les six thermocouples [60] _____ *51*
Figure 40 : a) Modèle éléments finis et position des points de mesure utilisés pour déterminer χ (point de mesure T2 confondue avec T5); b) Evolution de la température pour les points de mesures pendant un étuvage à 60°C [60] _____ *52*
Figure 41 : Méthode d'optimisation utilisée pour déterminer la plus petite différence entre les pentes ; $Pexp,8$ représente la pente du 8ème segment de la courbe expérimentale, $Pmod,8$ représente la pente du 8ème segment de la modélisation [60] _____ *53*
Figure 42 : Evolution expérimentale de la température en fonction du temps (heure) comparée au modèle éléments finis [60] _____ *54*
Figure 43 : Moyenne de l'erreur quadratique moyenne εr en fonction de la diffusivité radiale et du ratio χ ___ *55*
Figure 44 : Schéma d'un billon avec un thermocouple centré _____ *56*
Figure 45 : Comparaison entre le modèle analytique et éléments finis et les valeurs extraites de la littérature [64] _____ *58*
Figure 46 : Matrice des corrélations entre différentes variables _____ *59*
Figure 47 : Coupe LR d'un douglas montrant la moelle d'un nœud [70] _____ *65*
Figure 48 : Représentation des critères retenus pour la modélisation d'une branche _____ *66*
Figure 49 : Présentation du diamètre vertical en fonction du diamètre horizontal des branches [72] _____ *67*
Figure 50 : Diamètre de branches modélisées en fonction de la hauteur relative [72] _____ *68*
Figure 51 : Modélisation de l'angle d'insertion des branches suivant la hauteur relative de l'arbre [72] _____ *69*
Figure 52 : Modélisation de l'angle d'insertion suivant la position dans le rayon [74] _____ *70*
Figure 53 : Modélisation du statut des branches en fonction de la hauteur relative de l'arbre [72]. _____ *71*
Figure 54 : Modélisation du statut de la branche en fonction de sa position radiale [74] _____ *71*
Figure 55 : Photo des deux billons après tronçonnage _____ *75*
Figure 56 : Interface graphique présentant la modélisation et permettant d'effectuer le déroulage virtuel des billons _____ *77*
Figure 57 : Modélisation 3D du billon 1 (a) et du billon 2 (b) _____ *78*
Figure 58 : Exemple d'une cartographie de nœuds issue de la méthode de déroulage virtuel _____ *79*
Figure 59 : Exemple de nœuds considérés comme des cercles _____ *79*
Figure 60 : Nœuds prédits en vert et nœuds mesurés en rouge pour le début et la fin du ruban de déroulage du billon 1 (a) et du billon 2 (b) _____ *80*

Figure 61 : (a) Histogramme des rayons des nœuds ; (b) Histogramme des distances entre les centres des nœuds modélisés et de nœuds mesurés ; (c) Histogramme des erreurs relatives entre le rayon des nœuds modélisés et des nœuds mesurés [80]. _____ *81*
Figure 62 : Modélisation d'un arbre entier issu de la base de données de la forêt du Grison _____ *83*
Figure 63 : Illustration de la théorie de Shigo sur la formation des nœuds _____ *86*
Figure 64 : Illustration de la fonction de flux d'après Foley [82] _____ *87*
Figure 65 : (a) Motif de déviation des fibres de type α, (b) Motif de déviation des fibres de type β, calibré et calculé par Foley [82] _____ *88*
Figure 66 : Image du scanner laser LOOBAR _____ *89*
Figure 67 : Implantation du LOOBAR sur la ligne de déroulage Equipex du LaBoMaP _____ *89*
Figure 68 : Acquisition et traitement réalisés sur les images prises par les caméras du LOOBAR _____ *90*
Figure 69 : Paramètres d'une ellipse _____ *90*
Figure 70 : Cartographie d'orientation des fibres pour les six premiers placages du premier billon (en degrés). *91*
Figure 71 : (a) Orientation des fibres avec le seuillage autour des nœuds ; (b) Agrandissement d'un nœud avec un exemple d'une zone de mesure annulaire ; (c) Ecart type des angles sur les zones annulaires pour différentes tailles de nœuds (en mm)[80]. _____ *93*
Figure 72 : Comparaison entre l'orientation des fibres mesurées, modélisées sans ajustement du modèle et modélisées avec un ajustement du modèle. Données : (a) mesurées, (b) modélisées sans ajustement, (c) modélisées après ajustement ; Données interpolées sur une grille régulière : (d) mesurées, (e) modélisées sans ajustement du modèle, (f) modélisées après ajustement du modèle [80] _____ *96*
Figure 73 : Modèle de prédiction du MOE et du MOR en fonction de la masse volumique à 12% d'humidité _ *101*
Figure 74 : Modélisation de la masse volumique en fonction du numéro de cerne selon Kimberley [100] ____ *102*
Figure 75 : Assemblage des placages d'aubier _____ *106*
Figure 76 : Montage d'essais de flexion 4 points selon la norme NF EN 408 _____ *107*
Figure 77 : Comparaison du module d'élasticité du modèle et des essais pour les poutres d'aubier et de duramen (à gauche non optimisé et à droite optimisé) _____ *108*
Figure 78 : Comparaison du module de rupture entre la modélisation et les essais pour les poutres d'aubier et de duramen (à gauche non optimisé et à droite optimisé) _____ *110*
Figure 79 : Masse volumique des arbres de la forêt du Grison mesurée sur les premières rondelles et modélisée. _____ *114*
Figure 80 : Exemple d'une cartographie de la masse volumique modélisée de placages issus d'un arbre de la forêt du Grison _____ *114*
Figure 81 : Module d'élasticité local et moyen modélisé pour les placages issus d'un arbre de la forêt du Grison (MPa) _____ *115*
Figure 82 : Impact des nœuds sur les propriétés mécaniques moyennes des placages (en %) _____ *116*
Figure 83 : Modalités de déroulage des billons _____ *117*
Figure 84 : Cartographie du module d'élasticité modélisé d'une poutre en flexion sur chant (MPa) _____ *118*
Figure 85 : Variation de la fibre neutre en fonction de la cartographie du module d'élasticité local. _____ *118*

Figure 86 : Spécification de l'essai de flexion virtuel suivant la norme EN 408 _____ *118*
Figure 87 : Prédiction des propriétés mécaniques des poutres issues de la forêt domaniale du Grison suivant les différentes modalités et stratégies d'assemblages _____ *119*
Figure 88 : Comparaison des propriétés mécaniques modélisées entre les poutres LVL constituées d'arbres élagués et les poutres LVL constituées d'arbres non élagués _____ *121*
Figure 89 : Répartition des qualités des billons suivant leur diamètre et leur provenance _____ *123*
Figure 90 : Pile de placages triés _____ *124*
Figure 91 : Mise en place des piles de placages pour le processus de séchage des plis _____ *124*
Figure 92 : Piles de placages triées selon leur position dans la bille et leur provenance _____ *125*
Figure 93 : Répartition des qualités suivant les modalités [50] _____ *125*
Figure 94 : Modalités retenues pour la composition des panneaux LVL de l'étude _____ *126*
Figure 95 : Scie à panneau (à gauche) et poutres délignées (à droite) _____ *127*
Figure 96 : Schéma de positionnement de l'éprouvette d'essai en flexion 4 (norme NF EN 408) _____ *128*
Figure 97 : Poutre de LVL sur banc de flexion 4 points du LaBoMaP _____ *128*
Figure 98 : Propriétés mécaniques des poutres issues du lot de France Douglas _____ *129*
Figure 99 : Exemple du profil de hauteur pour a) le profil primaire non filtré ; b) le profil d'ondulation ; c) le profil de rugosité [53] _____ *A-2*
Figure 100 : Comparaison de deux profils (Extrait de « Digital Surf, Analyse des états de surface selon ISO 25178 ») _____ *A-4*
Figure 101 : Ovale de Rankine _____ *B-6*
Figure 102 : Procédure analytique pour la modélisation du module d'élasticité _____ *C-8*
Figure 103 : Procédure analytique pour la modélisation du module de rupture _____ *C-9*

Liste des annexes

ANNEXE A : PARAMETRES DE RUGOSITE A-2

ANNEXE B : OVALE DE RANKINE B-5

ANNEXE C : MODELISATION DES PROPRIETES MECANIQUES C-8

C.1 - PROCEDURE ANALYTIQUE POUR LA PREDICTION DU MODULE D'ELASTICITE C-8

C.2 - PROCEDURE ANALYTIQUE POUR LA PREDICTION DU MODULE DE RUPTURE C-9

Introduction

La décennie 2010-2020 sera la plus chaude jamais enregistrée depuis 1850 (Figure 1 et Référence [1]). Depuis la signature de l'accord de Paris en 2015, les émissions de gaz à effets de serre mondiaux ont continué à augmenter (14% entre 2008 et 2018 [2]). Le paragraphe 1 de l'article 5 de cet accord précise : *« Les parties devraient prendre des mesures pour conserver et, le cas échéant, renforcer les puits et réservoirs de gaz à effet de serre […], notamment les forêts. »*. L'utilisation du bois en structure, issu de la ressource forestière, représente un stockage de carbone sur le long terme. En effet, la photosynthèse nécessaire à la croissance des arbres transforme une partie du gaz carbonique atmosphérique en oxygène et en sucres. Ces éléments nécessaires à la croissance de la matière végétale, sont composés essentiellement de carbone. L'utilisation du bois permet de stocker le dioxyde de carbone (CO_2) atmosphérique dans la structure des bâtiments.

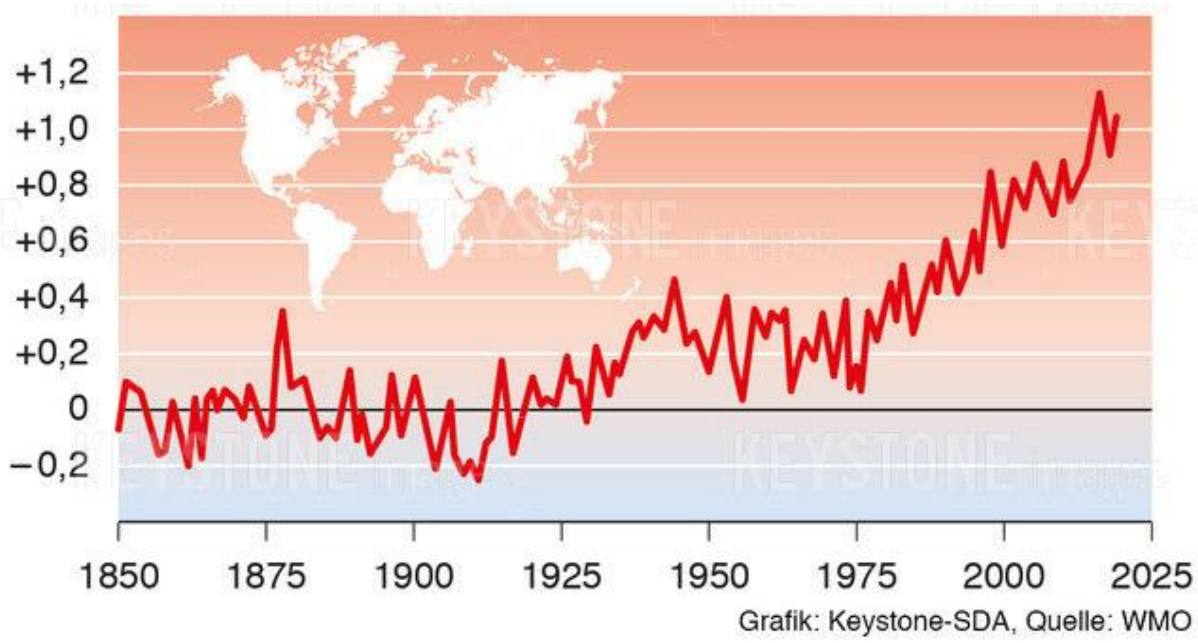


Figure 1 : Augmentation mondiale de température - Écart par rapport à la moyenne des années 1850-1900 en degrés Celsius

Pourtant, des équilibres économiques toujours précaires et changeants peuvent amener à privilégier la filière énergétique plutôt que la construction, dans l'utilisation des bois de qualité secondaire. Cette situation intervient quand le coût de l'énergie rend plus intéressant de brûler le bois, et donc de libérer son carbone dans l'atmosphère, plutôt que de l'utiliser de manière plus pérenne en tant que matériau. Ce mémoire de thèse s'intéresse à la valorisation du douglas de qualité secondaire en matériau d'ingénierie bois pour la construction.

1 - Contexte

Rémy Claire, dans son livre « *Le douglas un arbre* exceptionnel » [3] précise que le douglas (*Pseudotsuga menziesii)*, essence résineuse originaire de la côte Ouest du continent Nord-Américain, a été récolté pour la première fois par Archibald Menzies lors de l'expédition du capitaine Vancouver (1791-1795). Il a par la suite été introduit en Europe en 1827 par David Douglas lors d'une expédition dans l'Ouest américain (1825-1827). Son nom commun français est douglas et son nom scientifique est *Pseudotsuga menziesii*. En France, les premiers douglas auraient été plantés dès 1828 dans les anciennes pépinières Turgo sûrement grâce aux graines récoltées par David Douglas. Il restera durant de nombreuses années un arbre exotique d'ornement avant d'être timidement introduit en forêt sur les Monts du Beaujolais autour de pépinières entre 1860 et 1914. Par la suite, le Fonds Forestier National (FFN), créé en 1946 pour encourager le reboisement et aider la filière à se développer, a permis de boiser ou reboiser 2,3 million d'hectares de forêt dont 83% de résineux. Parmi ces résineux, environ 60% de pin (65% pin maritime, 25% pin laricio, 5% pin noir d'Autriche, 5% pin sylvestre), 25% de douglas et 15% d'épicéas [4].

Aujourd'hui la ressource française de douglas arrive à maturité et se stabilise à 400 000 ha (399 000 ha en 2018 [5]– 404 000 ha en 2019 [6]), soit 3% de la surface totale de la forêt française métropolitaine ou 9% de la surface en résineux. Le stock sur pied de douglas continue à vieillir, la majorité des peuplements ont entre 30 et 50 ans, ce qui s'accompagne d'une augmentation du stock sur pied qui est passé de 45 millions de m^3 en 1995 à 120 millions de m^3 en 2014 (Figure 2-a et b). Actuellement les nouvelles surfaces plantées sont en nette diminution [7]. La récolte de douglas est en progression et atteint 3 millions de m^3 avec plus de 80% de bois d'œuvre. Quatre régions jouxtant le Massif Central rassemblent les trois quarts de la surface de douglas : Auvergne Rhône-Alpes, Nouvelle Aquitaine, Bourgogne Franche-Comté et Occitanie. La disponibilité va continuer d'augmenter dans les prochaines années pour atteindre 6 millions de m^3 en 2035. La part de gros bois du fait du vieillissement des peuplements va, elle-aussi, s'accroître.

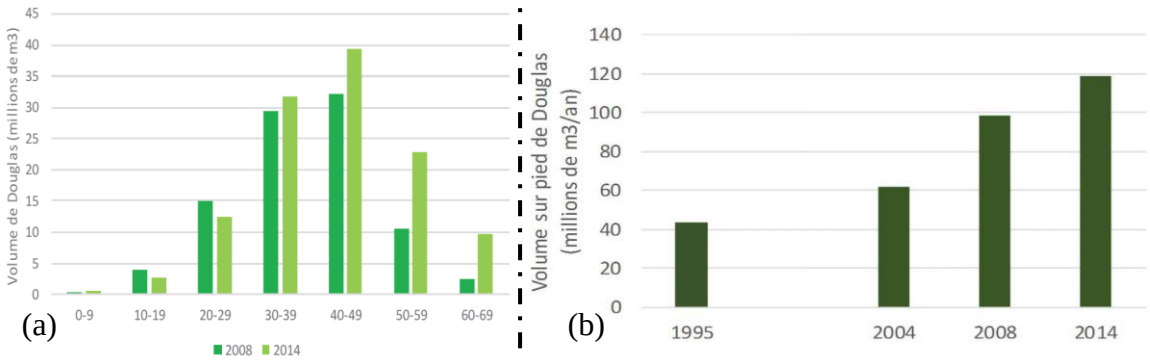


Figure 2 : (a) Répartition de l'âge du peuplement de douglas français en 2008 et en 2014 [7] ; (b) Evolution du volume sur pied de douglas [7]

Une répartition des diamètres (à hauteur d'homme) des arbres est donnée par l'IFN et récapitulée dans le Tableau 1 ci-dessous.

Tableau 1 : Catégorie de diamètres selon l'IFN [9]

Petit Bois (PB)	**Moyen Bois (MB)**	**Gros Bois (GB)**	**Très Gros Bois (TGB)**
Entre 7.5 et 22.5 cm	Entre 22.5 et 47.5 cm	Entre 47.5 et 67.5 cm	Supérieur à 67.5 cm

2 - Enjeux de la thèse

Les scieries industrielles utilisent des lignes de sciage à haut rendement basées sur un équarrissage des billes avec des canters et un sciage des produits à partir de scies circulaires (Figure 3-a). Cette technologie standardisée par les pays nordiques (Amérique et Europe du Nord) permet d'atteindre une excellente productivité, mais elle n'est qu'adaptée à la transformation de bois de diamètres limités (<55cm) et pour la production de sciages de faibles sections qui constituent, aujourd'hui, l'essentiel du marché. Comme la proportion de gros bois de douglas va continuer de progresser, cette ressource ne correspondra pas aux approvisionnements recherchés par les plus grosses scieries et sans débouchés conséquents, elle va se déprécier [10].

La recherche de valorisation de cette matière ligneuse en matériaux de construction, ayant la capacité de stocker du carbone sur le long terme, plutôt qu'en bois énergie, constitue un des objectifs essentiels de cette thèse.

Un procédé de transformation du bois bien adapté pour la valorisation des gros et très gros bois est le déroulage (Figure 3-b). Le principe est de faire tourner une bille de bois entre deux broches coaxiales et d'appliquer un couteau afin de créer un copeau continu. Le copeau sera massicoté puis collé en produits reconstitués.

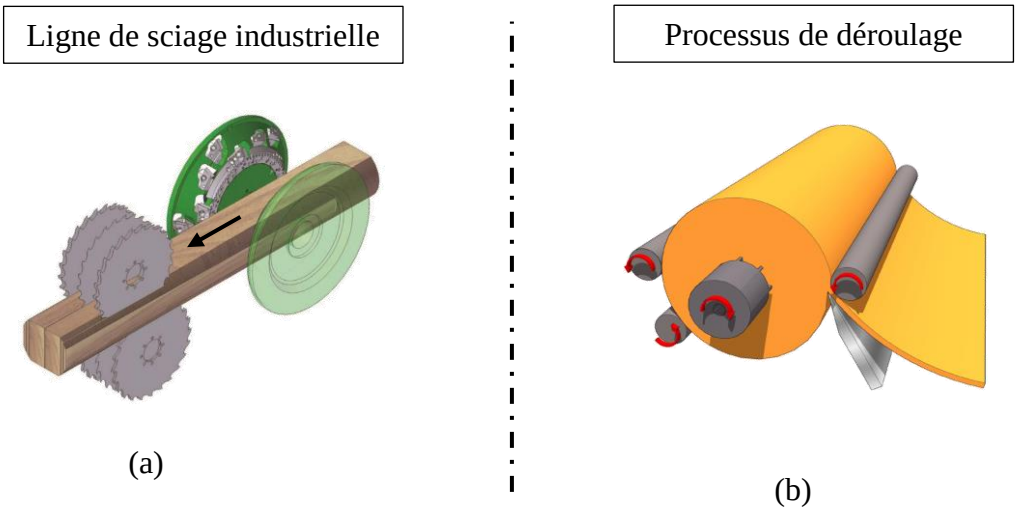


Figure 3 : (a) Exemple des premières étapes d'une ligne de sciage industrielle[Scierie Feidt]; (b) Géométrie de déroulage pour une barre cylindrique [11]

Le déroulage du douglas débute en 1905 dans l'ouest américain pour construire des panneaux de contreplaqué. Lors de l'exposition Lewis et Clark la même année, la Portland Manufacturing Company présenta son panneau 3 plis. Dès 1929, on comptait 29 usines de contreplaqués aux États Unis avec une production totale dépassant les 300 000 m^3 [3]. La Douglas-fir Plywood Association fut créée en 1933 et en 1934 la première colle hydrofuge fut découverte par le Dr James Nevin. En 1944, lors de la Deuxième Guerre mondiale, le contreplaqué a participé à la fabrication de canots, d'avions, de bateaux… Sa production dépassa 1 200 000 les de m^3. Après la guerre, la production continua d'augmenter pour passer de 3 500 000 m^3 en 1954 à 10 000 000 m^3 en 1965 (Figure 4). La production s'est ensuite stabilisée avant de connaître une légère décroissance, due au manque de billes de gros diamètres et de bonnes qualités, mais, aussi, à la concurrence de l'OSB (Oriented Strand Board, panneaux de particules orientées).

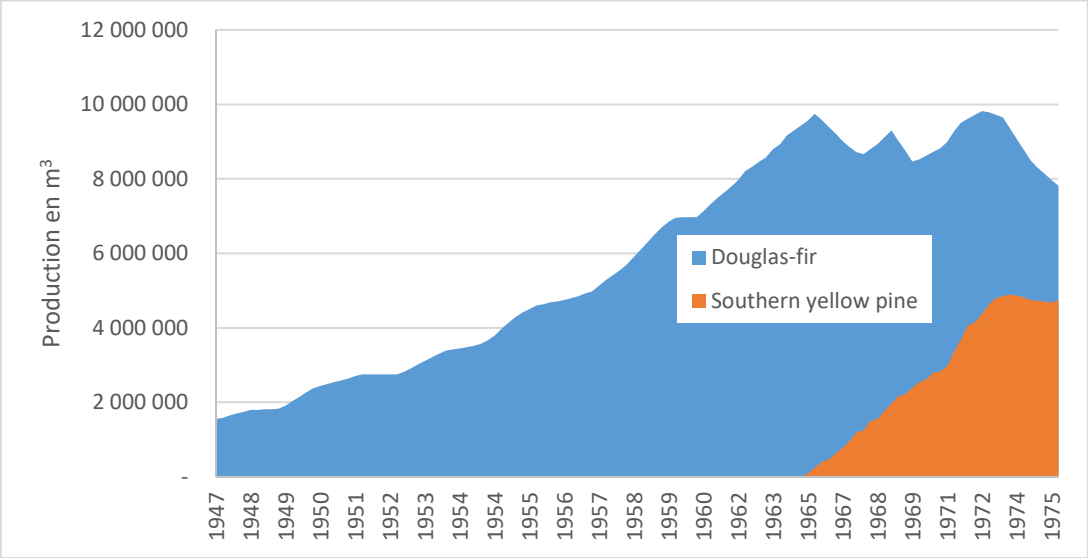


Figure 4 : Production de contreplaqué aux États Unis de 1947-1975 [3]

En France, le douglas n'est pas une essence traditionnellement déroulée dû, pour partie à sa récente importation, mais également, à sa récente maturité.

Le déroulage du douglas pourrait représenter une alternative au sciage pour la transformation des bois de gros diamètres. Les placages peuvent servir à réaliser des panneaux de contreplaqué, mais aussi de LVL (Laminated Veneer Lumber). Les panneaux de LVL sont réalisés le plus souvent en continu ce qui permet de réaliser des poutres de grandes dimensions. Ces poutres sont composées de placages dont la direction des fibres est orientée, principalement, dans la direction longitudinale de la poutre afin de privilégier les hautes performances mécaniques. Le LVL est un produit d'ingénierie utilisé de plus en plus en structure. Il permet d'atteindre de

grandes portées par la possibilité de fabriquer des sections de grandes hauteurs. Il est généralement constitué de placages de 3 mm d'épaisseur, collés entre eux par une résine phénolique résistante à l'eau. Lors de la composition des panneaux, les défauts naturels du bois sont dispersés et la lamellation permet d'homogénéiser et de stabiliser les variations hydriques de dimensions du produit final. Les poutres ainsi réalisées ont une résistance mécanique supérieure à celle du bois massif dont ils sont issus, car les nœuds auront été répartis dans le matériau [12]. De plus, le procédé de déroulage pour le douglas permet de bien séparer les parties de bois aubieuses et duraminisées (plus durables), ainsi que la partie de bois sans nœuds des arbres élagués [10].

En connaissant les propriétés mécaniques des placages composant la poutre, il est possible de prévoir et d'optimiser les caractéristiques mécaniques de la poutre reconstituée. Ce type de procédé de fabrication de poutre offre la possibilité de connaitre précisément les propriétés mécaniques à l'intérieur de la poutre du fait de la faible épaisseur relative des placages par rapport à des produits comparables issu de bois massif reconstitués (Bois Laméllés-Collés ou le Cross Laminated Timber). Cette approche permet d'envisager d'utiliser des bois qui seraient destinés à l'emballage, la trituration ou l'énergie, pour des applications dans la construction en garantissant un plus haut niveau de performances et de fiabilités.

Ce mémoire de thèse est structuré en deux parties. La première rapporte les travaux réalisés pour définir et valider les paramètres optimaux de déroulage de billons de douglas issus du territoire français, afin de garantir la qualité des placages. La seconde partie présente l'étude d'un modèle complet capable d'estimer quantitativement et qualitativement le potentiel d'une parcelle de douglas, dont on connait certaines données sylvicoles, à produire des poutres LVL destinées au marché de la construction.

Le modèle développé, schématisé sur la Figure 5, permet, en partant de la description d'un arbre (1), de réaliser un déroulage virtuel des billons tout en déterminant la position des nœuds sur les placages (2). Ensuite, une estimation des propriétés mécaniques locales est effectuée sur chaque placage en modélisant la déviation du fil autour des nœuds et la densité du bois (3). Une fois les placages assemblés, il est alors possible de déterminer les propriétés mécaniques globales de la poutre LVL (4).

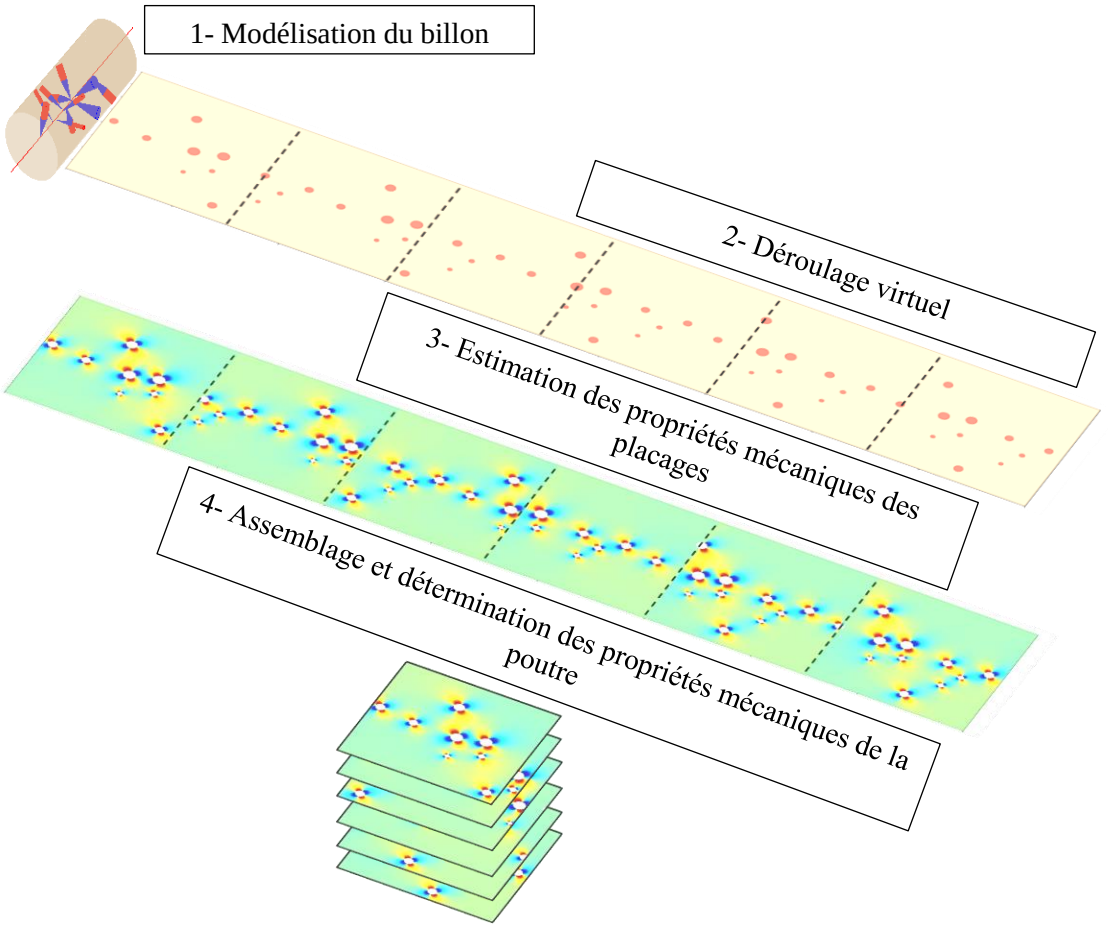


Figure 5 : Modèle complet pour la prédiction des propriétés mécaniques d'une poutre de LVL

Il s'agit donc d'une approche permettant d'apprécier le potentiel de valorisation par déroulage des plus gros douglas en produits techniques, de type LVL, destinés à la construction, qui devra être complétée par un volet économique.

Première partie : Optimisation des paramètres de déroulage

Le déroulage du douglas, bien que faisant partie d'une des essences les plus déroulées au monde, nécessite une bonne maitrise du processus afin d'obtenir des placages de qualité acceptable pour fabriquer des panneaux. Dans cette première partie de la thèse, les paramètres optimaux ont été recherchés afin de valider l'état de l'art et d'affiner certains paramètres dans le but de dérouler efficacement des douglas français.

1 - État de l'art

1.1 - Description du douglas et de ses propriétés macro et microscopiques

1.1.1 - Anatomie du douglas

Les arbres, de manière générale, se divisent en deux groupes, les gymnospermes, plus connus sous le nom de bois résineux, et les angiospermes, connus sous le nom de bois feuillus. Le douglas fait partie de la famille des gymnospermes. Il comporte des feuilles sous forme d'aiguilles. Le douglas existe sous plusieurs variantes. Celui étudié dans ce mémoire se nomme le douglas vert : *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco var. *menziessi*. Il existe également le douglas bleu : *Pseudotsuga menziesii* (Beissn.) Franco var. *glaucai* ainsi que le douglas gris : *Pseudotsuga menziesii* (Schweirn.) Franco var. *caesia* [3].
En France, la majorité de la ressource disponible en douglas est issue de plantations traitées en monoculture et en futaie régulière. Ce type de sylviculture permet de réaliser une rotation rapide, mais il est de plus en plus critiqué en France pour des raisons d'impacts visuel et environnemental. Pourtant plusieurs auteurs ([13], [14]) montrent que le douglas n'a pas d'impact majeur vis-à-vis de la biodiversité du milieu forestier.

Le douglas est constitué, comme la majorité des arbres, de plusieurs parties (voir Figure 6). En partant de bas en haut, il est possible de distinguer :

- Un système racinaire qui permet l'ancrage et la captation d'eau et de nutriments dans le sol.
- Un collet désignant la liaison entre la partie souterraine et la partie aérienne.
- Un tronc qui contribue au soutien mécanique, au stockage de nutriments, à la conduction de sève. Il constitue la partie transformée en bois d'œuvre.
- Un houppier englobant les branches et les feuilles qui servent à la photosynthèse de l'arbre.

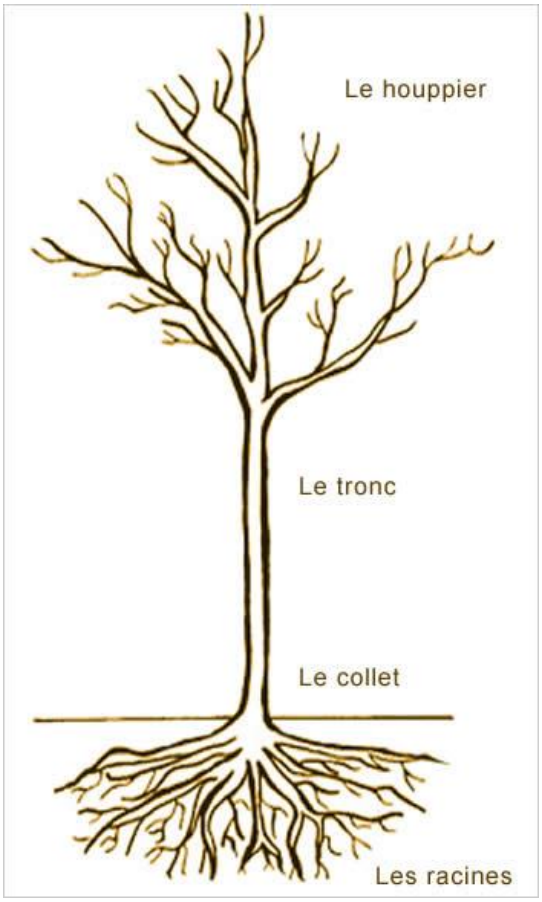


Figure 6 : Différentes parties d'un arbre selon Pépinière Thuilleaux

Le tronc, aussi appelé grume ou bille dans l'industrie de la première transformation du bois, se distingue par plusieurs zones (voir Figure 7). En partant du cœur jusqu'à l'écorce :

- La moelle, ou le cœur, est un tissu végétal un peu mou au centre du tronc qui se forme au début de la croissance et qui ne se modifie pas. Les premiers cernes autour de la moelle sont constitués de bois juvénile.
- Le bois juvénile est le bois créé par le cambium jeune. Il a une densité et un module d'élasticité inférieurs au bois mature.
- Le duramen, aussi appelé bois de cœur ou bois parfait, est la partie rose à rouge, pour le douglas, plus proche du centre. Il est principalement constitué de trachéides embolisées chargées d'extractibles (tanin, polyphénol). Il présente généralement une humidité plutôt faible (≈ 30% d'humidité) pour du bois vert.
- L'aubier, bien différencié dans le cas du douglas, est la partie claire. Principalement constitué de trachéides, il permet de véhiculer la sève brute et sert de lieu de stockage dans les parenchymes. L'humidité de l'aubier varie suivant la saison, le climat, le sol et elle est bien supérieure au duramen (≈ 100 à 120 % d'humidité) [15].
- Le cambium est une fine couche de cellules méristématiques qui permet la croissance radiale du bois.
- Le liber est une couche sombre pour le douglas. Elle sert principalement à la conduction de la sève élaborée.

- Le suber, ou l'écorce, dont le rôle principal est la protection contre les agressions extérieures.

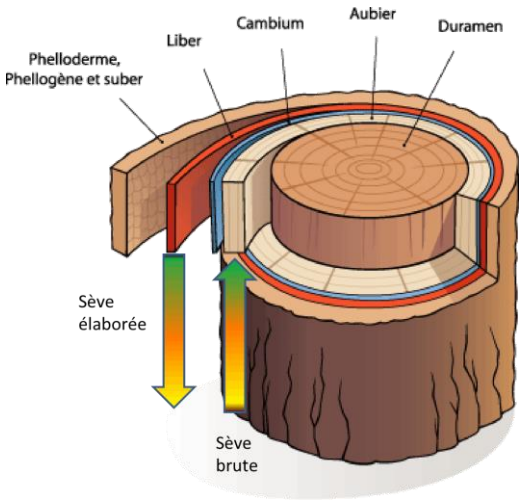


Figure 7 : Structure d'un tronc d'arbre [16]

Le bois, aussi appelé xylème, utilisé pour la construction est issu des couches d'aubier et de duramen.

Le long d'un cerne de croissance on observe, en général, des changements dans la qualité du bois. En raison de ces changements, un cerne est généralement divisé en deux grandes parties :

- Le **bois initial,** ou bois de printemps, qui correspond à l'ensemble du bois produit au début de la saison, donc positionné au début du cerne. Ce bois est peu dense (de l'ordre de 0.3) dans le cas du douglas.
- Le **bois final,** ou bois d'été, qui correspond à l'ensemble du bois produit plus tard dans la saison, donc positionné vers la fin du cerne. Ce bois est beaucoup plus dense (de l'ordre de 0.7) que le bois initial.

La structure du bois des résineux est similaire à celle d'un nid d'abeille (Figure 8) dont le motif de base est une cellule fortement allongée et plus ou moins rectangulaire appelée trachéide. Ces trachéides sont reliées entre elles par des ajournements, les ponctuations aréolées. Elles forment des canalisations permettant de conduire la sève jusqu'aux feuilles, mais assurent aussi le soutien mécanique de l'arbre. Cette microstructure explique des propriétés mécaniques différentes suivant la direction et le type de sollicitation appliquée (anisotropie mécanique).

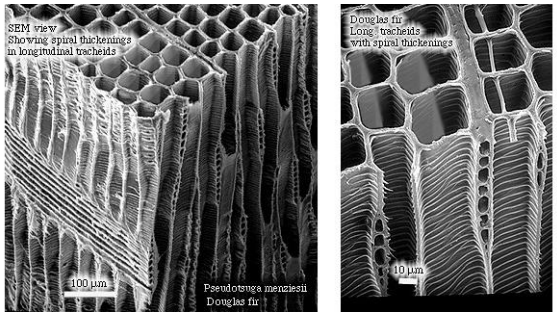


Figure 8 : Vue 3D MEF de la structure interne du douglas [17]

Le bois comporte trois directions principales (Figure 9), orthogonales, directement issues de la croissance de l'arbre et de la forme de ses cellules :

- Une direction longitudinale (L), celle de la tige, la plus résistante en compression et en traction. Les parois cellulaires doivent soutenir le poids propre de tout le houppier et reprendre un effort de flexion appliqué par le vent, essentiellement sur le houppier.
- Une direction radiale (R), orthogonale à la direction radiale, qui part de la moelle vers l'écorce.
- Une direction tangentielle (T), perpendiculaire aux deux autres, et qui suit les cernes d'accroissement.

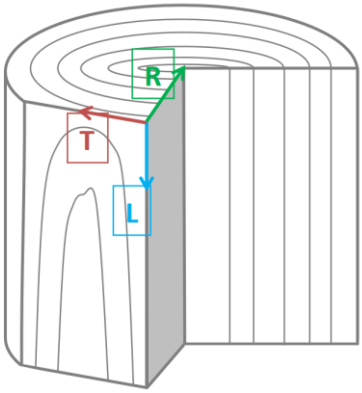


Figure 9 : Principale direction du bois [18]

1.1.2 - L'anisotropie du matériau et les propriétés mécaniques du douglas

La structure particulière du bois, constituée de cellules principalement orientées dans une direction, permet de faire une analogie avec un matériau composite. Il est possible de distinguer trois plans de symétrie (LT, LR, TR) orthogonaux, ce qui donne pour le matériau :

- 3 modules d'élasticité E_L, E_R et E_T dans les trois directions principales,
- 3 modules de cisaillement dans les plans de symétrie G_{LT}, G_{LR} et G_{RT}
- 6 modules de poisson v_{RL}, v_{RT}, v_{LR}, v_{LT}, v_{TL}, v_{TR} .

Bodig et Jayne [19] propose, en accord avec la loi de Hooke, dans le repère RLT, la matrice de souplesse suivante :

$$\begin{bmatrix} \gamma_L \\ \gamma_R \\ \gamma_T \\ \gamma_{RT} \\ \gamma_{LT} \\ \gamma_{LR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_L} & -\frac{v_{RL}}{E_R} & -\frac{v_{TL}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{LR}}{E_L} & \frac{1}{E_R} & -\frac{v_{TR}}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{v_{LT}}{E_L} & -\frac{v_{RT}}{E_R} & \frac{1}{E_T} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{RT}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LT}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_{LR}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_L \\ \sigma_R \\ \sigma_T \\ \sigma_{RT} \\ \sigma_{LT} \\ \sigma_{LR} \end{bmatrix}$$

Le ratio est de 15 entre le module d'élasticité longitudinal et le module d'élasticité radial, et de 23 entre le module d'élasticité longitudinal et le module d'élasticité tangentiel, ce qui montre la très forte anisotropie du matériau.

1.2 - Le LVL

1.2.1 - Principe et description du procédé

Le LVL pour « Laminated Veneer Lumber » a pour traduction officielle, en français, le terme « Lamibois ». Il désigne un matériau composé de placages minces de bois recollés. La production de ce produit nécessite de maitriser plusieurs étapes du procédé de fabrication.

Le LVL est fabriqué en collant et en superposant des placages de bois, majoritairement dans le même sens, pour produire un panneau de bois homogène. Le processus permet de répartir les défauts naturels du bois de manière homogène dans le produit, en éliminant les points de fragilité locaux [10]. Le schéma simplifié (Figure 10) illustre le processus industriel de production du LVL. Les grumes sont écorcées, étuvées et coupées en billons. Ces billons sont déroulés pour former un ruban continu de placage. Ce placage est massicoté à la largeur désirée, puis séché et calibré. La colle est ensuite appliquée sur la face supérieure de chaque placage et les placages sont superposés et décalés pour former un panneau de LVL continu. Pour chaque mètre cube de LVL, environ 2,5 m^3 de grumes (mesurés sur l'écorce) sont transformées (chiffre issu de *« LVL Handbook »* [11]), ce qui représente un rendement en matière première similaire à la production de contreplaqué.

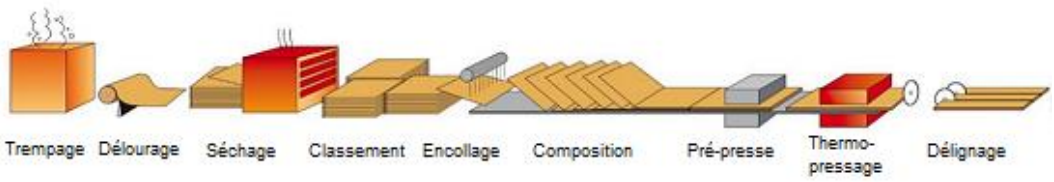


Figure 10 : Schéma simplifié d'une ligne de fabrication de LVL (Metsawood®)

Pour la production de LVL, l'épaisseur nominale courante du placage est de 3 mm. Selon la norme EN14374, l'épaisseur maximale des placages en LVL structurel est de 6 mm.

Dans la fabrication de LVL, les résines de type phénol-formaldéhyde sont principalement utilisées. Les placages sont normalement collés dans la direction des fibres, bien que certains placages soient posés en travers dans certains produits afin d'assurer la stabilité dimensionnelle des produits. Le LVL est généralement assemblé à partir d'un nombre impair de plis. Les placages sont posés et décalés d'environ 120 mm (voir Figure 11). L'assemblage qui en résulte maximise les propriétés mécaniques du LVL.



Figure 11 : Assemblage et décalage des placages [11]

Un pressage à chaud et continu permet de produire des poutres de longue portée (voir Figure 12). La longueur maximale des LVL (18-25 m) est limitée soit par le bâtiment de l'usine, soit par la livraison au client par transport routier. Le pressage à chaud doit garantir que toutes les couches de colle atteignent la température de durcissement appropriée.



Figure 12 : Pressage à chaud de panneaux de LVL [11]

Les panneaux LVL sont coupés sur mesure en fonction des besoins de largeur et de longueur du client (voir Figure 13).



Figure 13 : Schéma simplifié de la fabrication de panneau de LVL [11]

1.2.2 - Production mondiale de LVL

Le LVL est un matériau assez récent, ayant une cinquantaine d'année. Les volumes de production ont augmenté dans le monde entier et la disponibilité s'améliore à mesure que de nouveaux fabricants apparaissent sur le marché. La demande de LVL continue d'augmenter en même temps que la construction résidentielle et la sensibilisation au respect de l'environnement. La production mondiale avoisine aujourd'hui les 4 millions de m^3 (voir Figure 14).

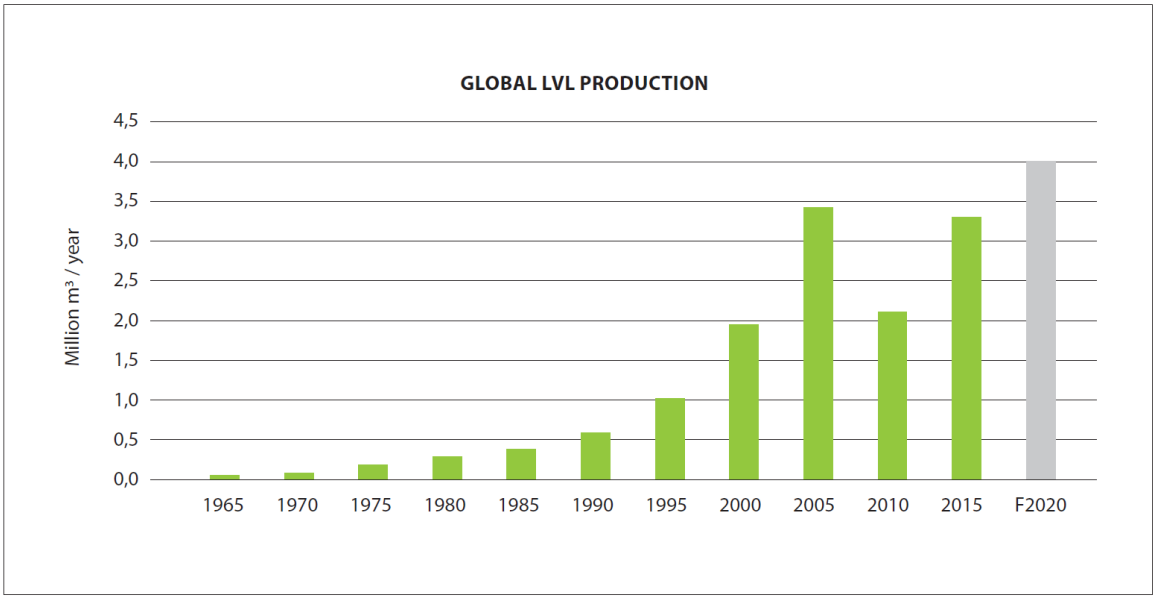


Figure 14 : Production mondiale de LVL [11]

Le Tableau 2 présente la production de LVL par zone géographique et par fabricant. La plus grande production provient du continent Nord-Américain. Les seules productions de Boise Cascade et de Weyerheauser additionnées dépassent la production de tous les autres continents avec près de 1,4 million de m^3.

Tableau 2 : Production LVL par continents et principaux fabricants [11]

Europe			North America			Asia & Oceania		
Manufacturer	**Mills**	**Capacity 1000 m³/year**	**Manufacturer**	**Mills**	**Capacity 1000 m³/year**	**Manufacturer**	**Mills**	**Capacity 1000 m³/year**
Metsä Wood	2	300	Boise Cascade	3	890	JNL	2	140
Steico	1	160	Weyerhaeuser	4	530	Carter Holt Harvey	1	100
Stora Enso	1	100	Lousiana Pacific	2	260	Nelson Pine	1	100
MLT	1	100	Pacific Woodtech	1	220	First plywood	1	100
Pollmeier	1	80	Roseburg	1	200	Wesbeam	1	60
LVL Ugra	1	40	Forex Amos Inc.	1	140	Keyteck	1	60
			Murphy	1	120	Shin Yang	1	20
			West Fraser	1	90			
			RedBuilt	1	70			
			Global LVL	1	20			
Total	**7**	**780**		**16**	**2540**		**8**	**580**

1.3 - Particularité du procédé de déroulage

1.3.1 - Généralités

Afin de préciser le mode de coupe, McKenzie [20] propose une nomenclature détaillée du le processus de formation d'un copeau. Le premier terme correspond à l'angle entre l'arête de l'outil et les fibres de bois ; le second caractérise l'angle entre la direction de coupe et ces mêmes fibres.

Le mode 0-90 T (Figure 15) représente la formation du copeau lors du déroulage. C'est le mode de coupe nécessitant les plus faibles efforts et qui s'accompagne d'un endommagement minimal du copeau.

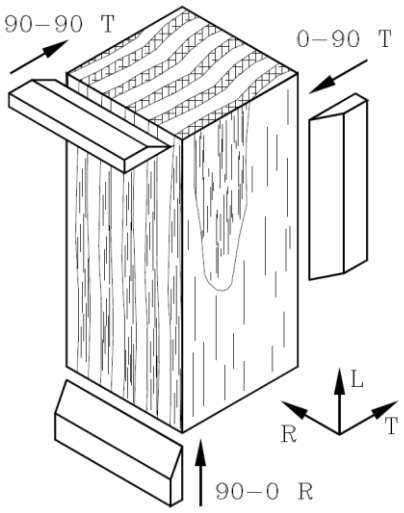


Figure 15 : Modes principaux de coupe du bois [21]

Principe de formation du placage

Le principe même du déroulage (Figure 16) et les mécanismes mis en jeu ont déjà été décrits par de nombreux auteurs [15], [22]–[24].

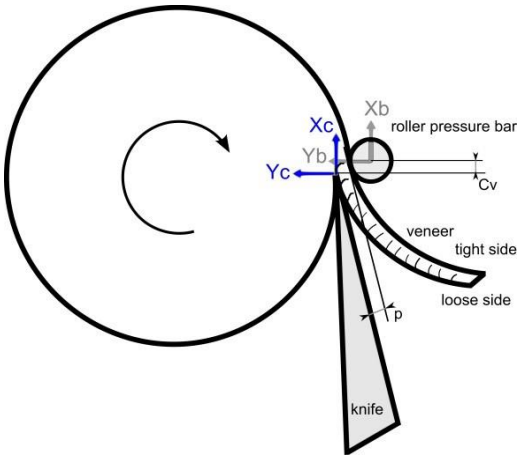


Figure 16 : Schéma du processus de déroulage [25]

Thibault [24] explique : « *Parmi les processus de coupe du bois, le déroulage et le tranchage ont ceci de particulier, que le copeau lui-même est le produit fini : c'est donc la qualité de ce copeau (le placage) qui est déterminante* ». De nombreux paramètres présentés dans les chapitres suivants peuvent influencer cette qualité.

Un diagramme d'Ishikawa (Figure 17) résume les différents facteurs, relevés dans la littérature, qui peuvent impacter la qualité. Ce diagramme illustre bien qu'en réalité le réglage de la dérouleuse avec les paramètres optimaux ne représente qu'une partie du processus complet pour l'obtention d'un placage de haute qualité.

Le type de matériel et la méthode (machine et réglages du procédé) sont choisis en fonction de l'essence transformée. Dans le cas du déroulage du douglas, considéré comme un bois très hétérogène, on cherche le meilleur compromis pour dérouler à la fois du bois tendre et peu dense (bois initial), du bois rigide et plus dense (bois final), ainsi que du bois très humide dans sa partie aubieuse, et relativement sec dans sa partie duraminisée (proche de 30%).

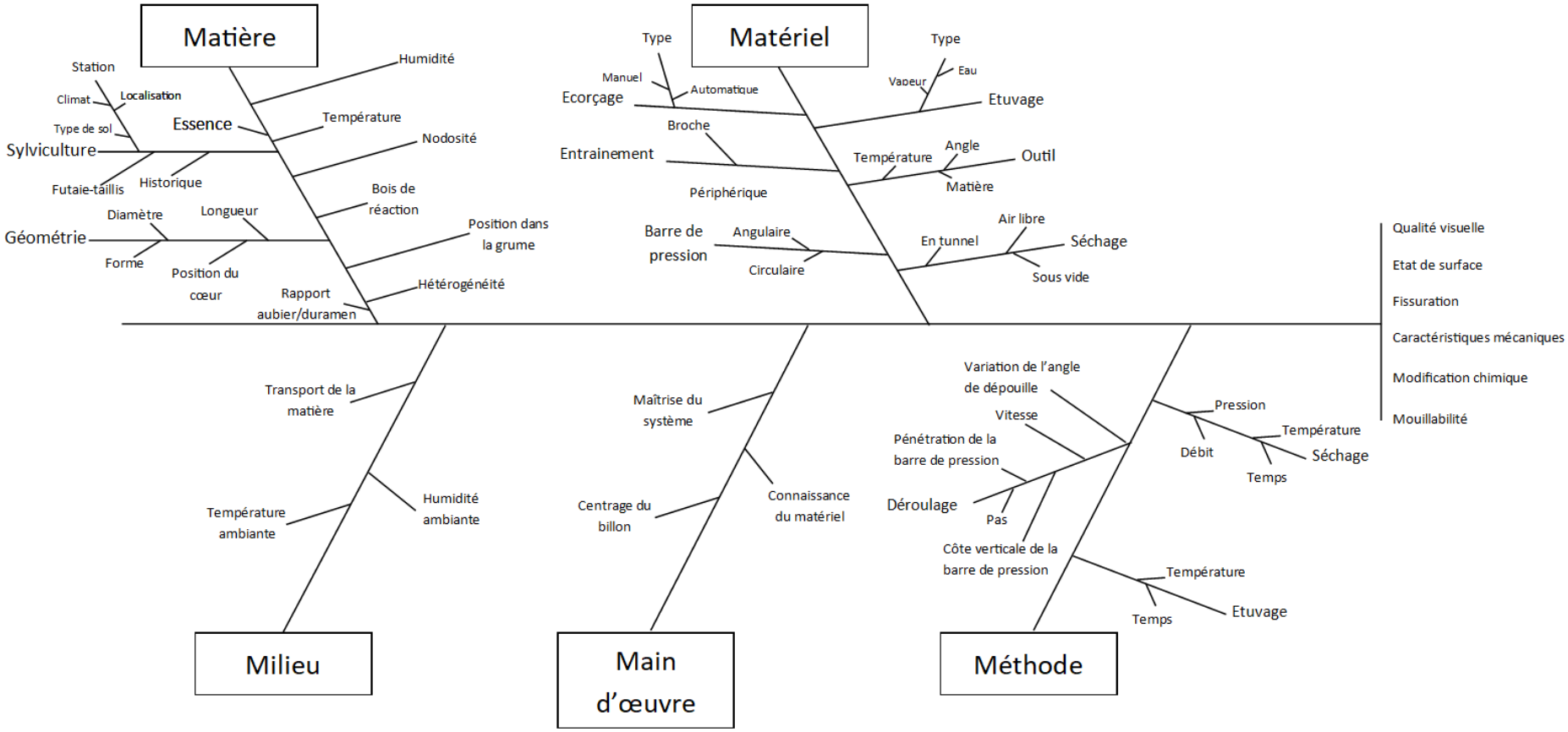


Figure 17 : Diagramme (type Ishikawa) des paramètres influençant le déroulage

Les outils :

Le couteau

Le couteau de la dérouleuse est un outil avec un angle de bec particulièrement faible (entre 19 et 21°) qui permet la formation d'un copeau continu en limitant son endommagement. L'angle de coupe est généralement très élevé (de l'ordre de 70°) et l'angle de dépouille associé est donc faible (de 2° à -2°). Bouarab et al. [26] a effectué une étude numérique afin d'optimiser l'angle de bec du couteau et trouve un angle compris entre 19° et 23°. Un micro-biseau peut être réalisé localement sur l'arête de l'outil afin d'améliorer sa durée de vie et prévenir les retournements d'arêtes. Ils sont très problématiques dans le cas du déroulage, car ils dégradent fortement l'aspect esthétique du placage en laissant un bourrelet sur toute la largeur du placage. Certains couteaux peuvent recevoir un revêtement de surface afin d'augmenter la résistance de l'arête [27], mais en pratique, ces revêtements sont encore très peu utilisés par les dérouleurs professionnels.

Le couteau doit toujours être parfaitement affûté. En industrie, suivant l'essence déroulée, les couteaux sont réaffûtés toutes les 4 à 10h d'utilisation, en général la durée d'un poste de travail.

La barre de pression

Le processus de déroulage par son mode de coupe génère une fissuration régulière. La barre de pression est un dispositif permettant de contrôler celle-ci. Mothe [15] explique que : *« Le rôle principal de la barre de pression est d'exercer en avant du couteau un effort de compression orthogonal au plan de coupe, créant ainsi des contraintes antagonistes aux contraintes de traction responsables de l'ouverture des fissures »*. Différents types de barres de pression sont utilisés : la barre angulaire simple, la barre angulaire avec facette de décompression, la barre ronde fixe, libre en rotation (folle) ou motorisée avec une vitesse périphérique légèrement supérieure à celle du bois (Figure 18).

Dans le cas des résineux, et en particulier du douglas, l'emploi d'une barre de pression angulaire provoque l'accumulation, contre la barre de pression, de fibres arrachées au bois tendre (« chiquettes ») produisant une surépaisseur locale au niveau du placage. Grâce à la barre de pression rotative, ces fibres sont évacuées ce qui limite ce phénomène de surépaisseur locale. L'inconvénient de ce type de barre est que la pression ne peut pas être aussi importante et localisée qu'avec une barre angulaire.

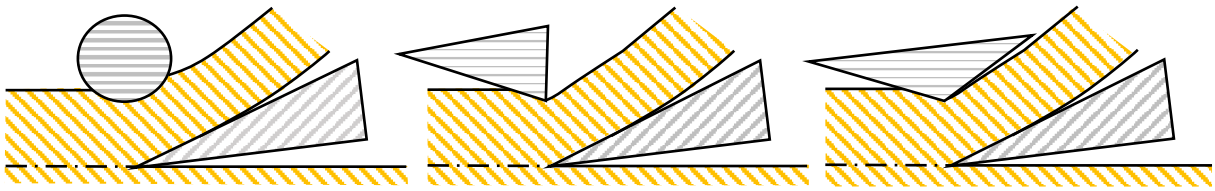


Figure 18 : Différents types de barres de pression [28]

L'augmentation de la compression par la barre de pression est bénéfique sur l'ensemble des critères de qualité du placage (rugosité, régularité d'épaisseur, fissuration), mais une compression trop importante ne supprime pas la fissuration et peut même l'aggraver du côté de la barre [24].

Les paramètres clef du déroulage :

La température et l'humidité du bois

Les parois cellulaires du bois sont constituées d'un matériau composite naturel composé de microfibrilles de cellulose enchâssées dans une matrice d'hémicellulose. Ces parois sont collées par une résine naturelle, la lignine, spécificité des arbres dans le monde végétal. Le comportement mécanique de ces polymères dépend plus ou moins fortement de la température et de l'humidité.

Le procédé de cintrage du bois est connu depuis l'Antiquité : plus le bois est humide, et plus il est chaud, plus il est malléable. Salmén [29] présente (Figure 19) la transition vitreuse des principaux composants du bois en fonction de l'humidité et de la température.

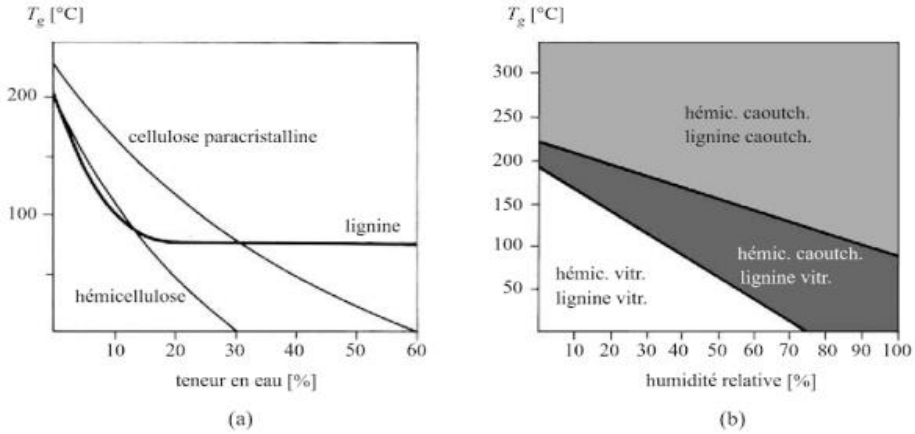


Figure 19 : Température de transition vitreuse : (a) Des constituants isolés en fonction de la teneur en eau [selon [29]], (b) De la matrice hémicelluloses-lignine native en fonction de l'humidité relative de l'ambiance [selon [29]]

Beauchêne [30] montre un effet assez net de la température d'étuvage sur les efforts de coupe et sur la bonne déroulabilité de certaines essences de densités contrastées. En effet, la température abaisse fortement les modules d'élasticité et de résistance du matériau tout en affectant peu la résistance à l'ouverture de fissure en amont de l'outil. Ainsi, pour avoir un déroulage de qualité sur un bois très dense, il est utile de l'étuver pour limiter l'endommagement du copeau et en particulier la fissuration. En revanche, pour des bois peu denses, l'étuvage est à proscrire car le matériau devient trop tendre pour être coupé. Il se comporte comme une éponge et des déformations importantes vont se créer en amont de l'outil, conduisant à la fabrication de surfaces pelucheuses. Il est donc important de déterminer la température d'étuvage la plus adaptée en fonction de l'essence déroulée.

La rugosité de surface des placages est impactée par la température de déroulage [31]–[34]. Le douglas étant un bois hétérogène en densité (bois initial/bois final), la température doit être assez élevée pour couper dans les meilleures conditions possibles le bois d'été et les nœuds, mais pas trop élevée pour ne pas endommager le bois de printemps. Corder and Atherton [35] indique que la rugosité varie en fonction de la température du bois et que la température optimale pour dérouler du douglas « américain » est proche de 60°C.

L'étuvage va aussi faciliter l'écorçage des grumes [23], plastifier les nœuds et ramollir la résine durcie, ce qui va permettre de préserver plus longtemps une bonne acuité de coupe du couteau.

La vitesse de déroulage

Thibaut [24] précise que les données de la littérature sont contradictoires en ce qui concerne l'influence de la vitesse sur les efforts de coupe ou la qualité des placages. La vitesse de coupe peut cependant avoir un impact sur la profondeur des fissures de déroulage. D'après l'auteur, dans la majorité des cas, la profondeur des fissures augmente avec la vitesse de coupe sans avoir d'effet sur les variations d'épaisseur du placage. Mothe [15] écrit : *« …, la disparition de l'effet Horner (1.3.2.1) à vitesse rapide suffit probablement à expliquer la diminution de l'effort de dépouille dont une partie est engendrée par le « roulement » des fibres arrachées dans le bois tendre. »*. Pour lui, la coupe du bois peu dense s'effectue mieux à vitesse rapide, mais semble contribuer à aggraver la fissuration du bois très dense. D'après Movassaghi [23], la rugosité des deux faces du placage et les variations d'épaisseur sont toujours meilleures pour les placages déroulés à grande vitesse. Rohumaa [34] montre, sur le hêtre, qu'il n'y a pas d'influence significative de la vitesse de coupe sur la fissuration.

Dans le cas du douglas, un déroulage à vitesse élevée (>1m/s) semble donc préférable à un déroulage à faible vitesse.

1.3.2 - La fissuration

La fissuration du placage lors du déroulage est un des problèmes les plus étudiés par les chercheurs qui s'intéressent à ce procédé. Cette fissuration induit une hétérogénéité dans le placage entre la face fissurée dite « ouverte » et la face non fissurée dite « fermée » (Figure 20). Elle influence la déformation au séchage, modifie la résistance mécanique du placage, impacte le collage et représente l'un des facteurs les plus influents sur la rugosité.

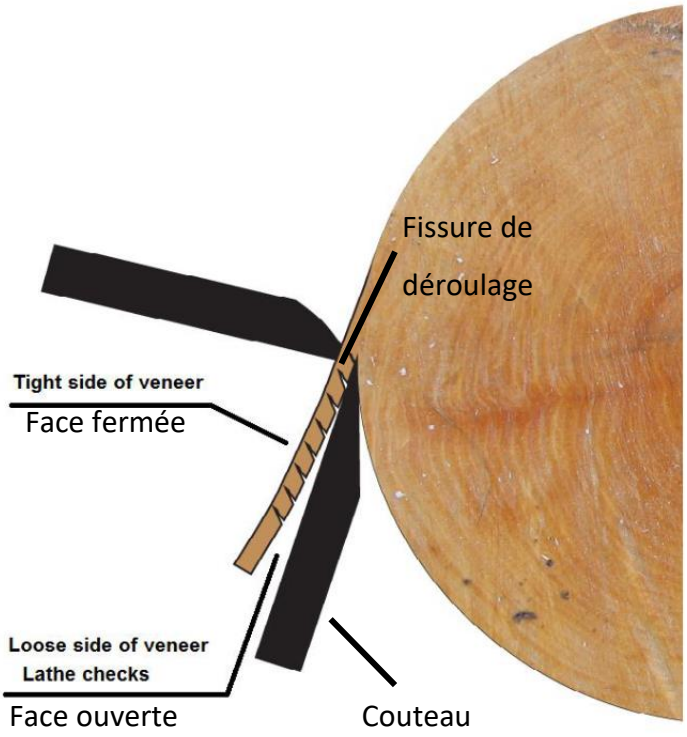


Figure 20 : Ouverture de fissures de déroulage [36]

Plusieurs paramètres, maîtrisables ou non, ont une influence forte sur la fissuration et, en particulier, sur la profondeur des fissures qui peut être très pénalisante vis-à-vis des propriétés mécaniques des LVL [37]. On peut citer : les réglages de la barre de pression et du couteau, la température du bois qui doivent être choisis au mieux.

Les caractéristiques des fissures (fréquence, profondeur…) sont cependant difficiles à évaluer sans un matériel sophistiqué. La solution classique, mais « besogneuse », est de les mesurer et de les compter au microscope. Le SMOF (Système de Mesure d'Ouverture des Fissures) [38] a été conçu et réalisé au LaBoMaP afin de mesurer la fréquence et la profondeur des fissures de petites bandes de placages de manière quasi automatisée. Denaud [39] basé sur une approche vibratoire, recherche en temps réel la fréquence d'apparition des fissures.

Comment ces fissures se créent-elles ?

1.3.2.1 - Fissuration systémique

La genèse

Thibaut [24], dans le cas général, et Mothe [15], dans le cas particulier du douglas, ont réalisé une analyse particulièrement détaillée du phénomène de fissuration. Pour Thibaut [24] la fissuration, arrive forcément : *« Au-delà d'une épaisseur maximale, d'autant plus élevée que le bois est plus tendre, le phénomène de macro-fissuration apparaît et s'amplifie rapidement lorsque l'épaisseur du placage augmente »*.

La Figure 21 décrit les 3 étapes de la formation des fissures :

Étape A : Une fissure s'amorce lorsque le facteur d'intensité de contrainte (K_{IC} défini par Thibaut [24]) dépasse un seuil critique. La rupture prend presque instantanément une direction tangentielle légèrement inclinée vers le cœur.

Étape B : La fissure s'ouvre, d'autant plus que le placage est épais ou que l'angle de dépouille est important. Elle se propage beaucoup plus lentement en s'orientant progressivement vers la surface supérieure sous l'action combinée des contraintes de cisaillement quasi perpendiculaires au plan de coupe ainsi que des contraintes de traction tangentielle. Les contraintes de cisaillement sont induites par le frottement de la face d'attaque et les contraintes de traction tangentielle sont induites par la flexion du copeau. Le rôle de la barre de pression est d'exercer un champ de contrainte en compression qui permet de rééquilibrer le champ de contraintes en amont de l'outil, et de limiter la croissance, voire la genèse, en faible épaisseur des fissures.

Étape C : Le copeau peut fléchir et la fissuration va terminer son chemin dans une direction radiale, de manière plus lente, sous l'effet des contraintes de traction tangentielle.

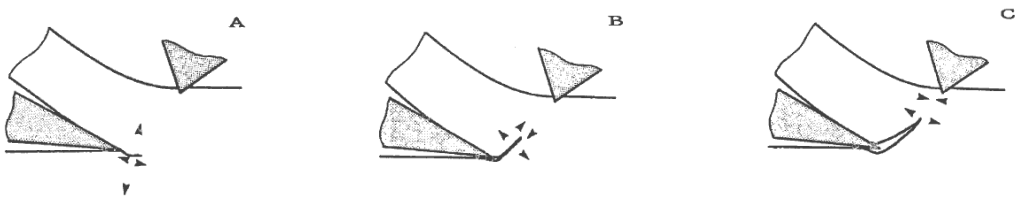


Figure 21 : Fissuration classique (Mothe 1988)

Le cas particulier des bois hétérogènes

Le douglas est un bois avec une densité très différente entre le bois de printemps et le bois d'été. La Figure 22 propose deux profils de densité pris sur un cerne de douglas et de chêne. On peut observer que le douglas à une variation bien plus brutale que le chêne.

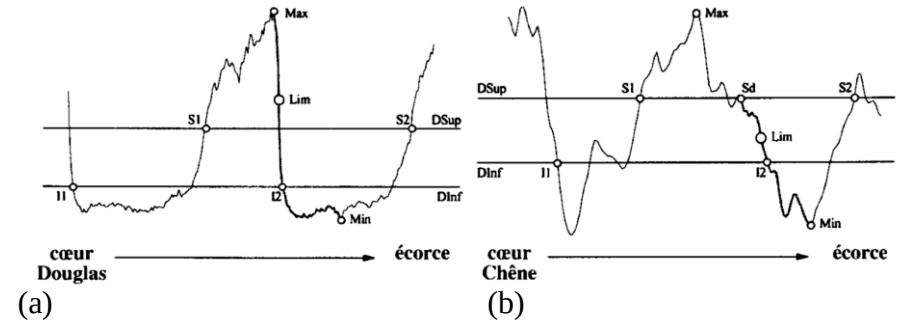


Figure 22 : Profil de densité dans un cerne de douglas (a) et de chêne(b) [40]

Mothe [15] a réalisé une synthèse des caractéristiques densitométriques du douglas en France selon différents auteurs (Tableau 3).

Tableau 3 : Caractéristiques densitométriques moyennes du bois de douglas français selon différents auteurs (d'après Mothe [15])

Auteur	Localisation et âge		Largeur de cernes	Microdensitométrie		
				ρ_{moy}	ρ_{min}	ρ_{max}
THOBY 75 + 10 cernes juvéniles 10 cernes adultes	Rhône	Juvénile	6,6	409	218	753
	62 ans	Adulte	2	506	253	820
	Haut Rhin	Juvénile	4	486	276	803
	65 ans	Adulte	2,5	564	275	897
	Hérault	Juvénile	7,3	435	229	815
	30 ans	Adulte	4,8	471	211	892
BIROT & al 83 THOBY 75 (17 prov.) 8-11 ou 11-14 ans après la graine	Limousin	Juvénile	7,7	423	243	685
	14 ans	Adulte	7,5	397	217	661
	Vosges	Juvénile	9,7	408	223	671
	14 ans	Adulte	6	418	217	642
VONNET 83 (10 prov.)	Dordogne					
	14 ans		6,8	481	232	932

La différence entre densité minimale et maximale est très importante pour le douglas (ratio de 3 en moyenne). Comparativement pour un chêne (ρ_{min} = 500 kg/m^3 et ρ_{max} = 800 kg/m3 [41]), le ratio entre la densité maximale (bois final) et la densité minimale (bois initial) est proche de

1,6. Cette forte variabilité de densité est à l'origine de nombreuses recherches pour optimiser les paramètres de déroulabilité de cette essence.

Le bois de printemps se présente comme un bois très tendre. Sa coupe requiert un étuvage très modéré, voir pas d'étuvage, pour éviter l'écrasement des trachéides (Figure 23), et, une vitesse de déroulage rapide et une pression modérée avec la barre pour éviter la fissuration [24]. Sans ces conditions de coupe, un phénomène pénalisant appelé effet Horner [15], nommé ainsi à cause d'un mécanisme de coupe en accordéon, peut apparaître.

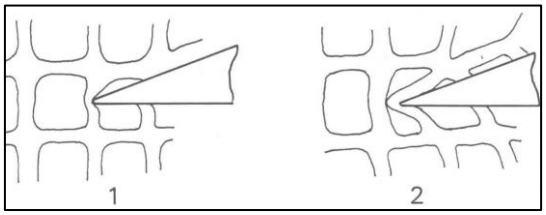


Figure 23 : Enfoncement de l'outil dans la structure du bois [24]

Par contre, le bois d'été se présente comme un bois très dur avec des paramètres de coupe qui doivent être adaptés : température d'étuvage élevée, pression soutenue sur la barre, vitesse de déroulage modérée.

Les paramètres de déroulage optimisés à retenir sont donc presque à l'opposé dans un même cerne de croissance, ce qui impose un compromis avec des paramètres intermédiaires. Mothe [15] écrit : *« Les conséquences d'un réglage inadapté de la dérouleuse pour le bois le plus tendre peuvent être catastrophiques : surface profondément détériorée et pelucheuse, fortes variations d'épaisseurs, fissuration des deux faces du placage dans les zones où les propriétés mécaniques sont les plus faibles. [..] Les défauts observés dans le bois dense (fissuration essentiellement) paraissent bien mineurs en comparaison ; les chercheurs américains considèrent même l'absence totale de fissuration comme un défaut (la raideur excessive entraîne un surcroît d'ondulations au séchage selon* [42]*). Il serait néanmoins dangereux de négliger complètement l'existence de zones à forte densité, dans lesquelles les efforts de coupe deviennent très importants. L'étuvage, par exemple, bien qu'il soit dommageable à la qualité dans le bois tendre, peut difficilement être supprimé en raison de l'existence des nœuds denses et de poches de résine. »*. Il est donc essentiel pour obtenir des placages de bonne qualité de déterminer les paramètres les mieux adaptés au déroulage de cette essence hétérogène.

1.3.2.2 - Fissuration radiale naturelle

Polge [43] remarque des fissures radiales présentent naturellement dans des carottes prélevées dans des douglas d'une station expérimentale de la forêt d'Amance (54). Précédemment à Polge, Day [44] signale, après une période sèche en Angleterre (1947), la présence de fissures internes dans 8 résineux, dont le douglas. Ces fissures sont soit limitées au cerne d'accroissement, dans ce cas la cavité semble vide, soit à cheval entre deux cernes d'accroissement et la cavité est, alors, remplie de résine. Par la suite Melin [45] et Polge [46] étudient de plus près ce phénomène sur d'autres peuplements afin d'en comprendre les causes. Ces fentes radiales sont présentes sur la largeur d'un cerne (Figure 25) et dans la hauteur du billon. Elles ont une forme fusiforme et une direction radiale. Elles ont une largeur de 3 à 5 mm, par contre, dans la direction longitudinale, elles peuvent être très longues : 12 cm en moyenne d'après Polge, certaines peuvent être suivies sur plus d'un mètre. Ces fentes n'affectent presque que le bois initial et ne traversent presque jamais le bois final.

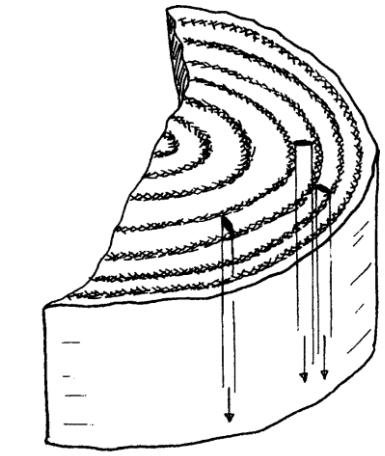


Figure 24 : Schéma de microfissure radiale [47]

Elles sont la conséquence de divers facteurs. Le déficit hydrique estival explique assez bien les principales périodes où sont observées les fissures. Lors d'une sécheresse estivale marquée, la fissuration pourrait affecter jusqu'aux 5ème ou 6ème cernes dernièrement formés. La station aurait aussi un impact sur ces fissures radiales. Une station non adaptée au douglas serait susceptible d'accroître le risque de fissuration. Une densité particulièrement faible du bois initial pourrait augmenter l'apparition de ces fissures puisque la résistance mécanique d'un bois est, en général, liée à sa densité. Les douglas, ayant une densité très faible dans le bois initial, sont donc plus susceptibles de comporter ces fissures radiales.

Dans Melin [47], l'auteur explique que le problème des microfissures n'affecte principalement que le bois juvénile et que ce problème n'a donc que peu d'impact sur l'emploi de cette essence ce qui est plus contestable. En revanche, Carvalho [48] qui étudie de déroulage du douglas portugais se heurte à ce problème, car seuls 10 billons sur 30 ont pu être déroulés. Il était impossible d'obtenir un ruban continu en raison de ces fissures radiales. Pour lui, les causes de ces fissures radiales sont similaires à celles évoquées précédemment, mais elles ne se retrouvent pas seulement dans le bois juvénile. On peut voir sur la rondelle de la Figure 25 que certains arbres peuvent comporter de très nombreuses fissures.

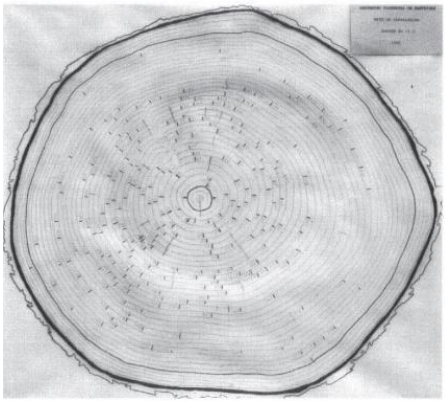


Figure 25 : Fissuration radiale sur bois vivant [48]

Lors d'une étude d'optimisation du procédé de déroulage du douglas de gros diamètre [49], nous avons été nous-mêmes confrontés à ce problème de fissures radiales. En effet, la dérouleuse expérimentale disponible à l'ENSAM de Cluny a une longueur de coupe maximale de 920 mm, ce qui est très problématique car certaines fissures radiales ont une longueur proche de la longueur des billons. Sur les billons approvisionnés pour cette étude nous avons pu clairement observer ces fissures quelques heures après le tronçonnage des billons (Figure 26).

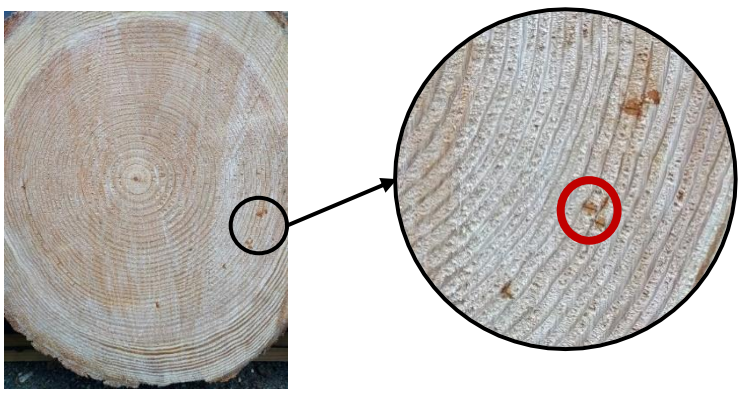


Figure 26 : Billon de douglas avec fissures radiales

La suite de l'étude ayant été réalisée sur une dérouleuse industrielle avec des billons d'une longueur supérieure à 2,7 m, la présence de fissures radiales, bien que pénalisante, n'interdisait pas de générer un ruban continu de bois.

1.3.3 - Récapitulatif des connaissances sur le processus de déroulage

Le douglas n'est pas une essence simple à dérouler. Les paramètres doivent être adaptés afin d'obtenir la meilleure qualité de placage. Pour résumer, les différents paramètres importants identifiés dans la littérature sont :

- Les billons doivent être sélectionnés dans une station limitant le risque de fissuration radiale.
- Les billons doivent être chauffés à une température proche de 60°C.
- Avoir un couteau bien affuté à un angle proche de 20°.
- Une barre de pression rotative est nécessaire.
- Une vitesse de déroulage rapide, supérieure à 1m/s, permet de conserver une rugosité faible.

2 - Étude des paramètres de déroulage

2.1 - Paramètres pouvant influencer la qualité des placages

Comme nous l'avons vu lors du chapitre précédent, la qualité des placages est influencée par de multiples facteurs. Certains, comme ceux liés à l'approvisionnement en matière première, au matériel utilisé, ou encore à l'environnement de travail, sont non modifiables, mais d'autres sont ajustables. Parmi les critères ajustables, nous nous sommes particulièrement intéressés à trois facteurs d'influence, afin d'améliorer la production de placages de qualité à partir de la matière première disponible en France : la température du bois lors du déroulage, la vitesse de coupe et l'excentricité des billons. Ces paramètres ont été choisis car leur impact sur la qualité des placages semble important et leurs ajustements sont relativement aisés en fabrication.

Nous avons étudié l'effet de la température de déroulage à l'occasion de deux campagnes d'essais réalisées au LaBoMaP. En parallèle, la vitesse de chauffe et de refroidissement des billons a fait l'objet d'une étude supplémentaire. Son objectif était de garantir la bonne température au cœur des billons déroulés, sans avoir besoin de chauffer le bois trop longtemps, permettant ainsi d'optimiser le procédé d'étuvage (gain de productivité et économie d'énergie).

La vitesse de déroulage a également été étudiée dans le but d'observer l'effet de la dynamique de coupe sur les propriétés du placage.

Enfin, l'influence de l'excentricité des billons sur la qualité des placages a été analysée.

2.2 - La rugosité, un indice de la bonne déroulabilité des placages

Peu de critères objectifs sont disponibles pour quantifier la qualité d'un placage afin de définir des paramètres de déroulage optimaux. Parmi les critères objectifs à notre disposition, la rugosité du ruban de placage est un bon indicateur. En effet, les placages de douglas présentent généralement une forte fissuration et des détériorations dues à son hétérogénéité et à l'effet Horner [24]. Plusieurs études ont cherché à améliorer la qualité des placages en ajustant les paramètres du procédé [35], [50].

Différentes solutions pour mesurer l'état de surface ont été proposées dans la littérature allant de la mesure à l'aide d'un stylet, à une information plus globale comme la quantité de fuites d'air à partir du fuitomètre. Ces méthodes ont toutes des limites, aussi notre choix s'est porté vers un système de mesure laser sans contact, à très haute fréquence d'acquisition, un profilomètre Keyence LJ-V7080, qui permet de s'affranchir des principales limitations des techniques citées. Il a été monté sur la ligne de déroulage du LaBoMaP et sur une machine expérimentale développée au LaBoMaP : la micro-dérouleuse [51].

Les différents paramètres de rugosité utilisés pour ce chapitre sont présentés en Annexe A.

2.2.1 - Impact de la température de déroulage

2.2.1.1 - Première étude en laboratoire

Echantillonnage et matériel utilisé

Dans cette étude, la rugosité des placages a été contrôlée sur deux billons contigus provenant d'un arbre d'une parcelle située dans une forêt de la commune de Saint Germain la Montagne, dans la Loire, à une altitude de 600 m. Ces deux billons ont été chauffés respectivement à 55°C et 80°C. La vitesse de déroulage a été fixée à 2 m/s, conformément aux préconisations de la littérature, et les deux billons ont été centrés sur la dérouleuse par rapport à l'axe de leur moelle. Le couteau a été affuté avec un angle de bec de 21° et l'angle de dépouille varie entre 0 et 1° (mode standard de la dérouleuse permettant la compensation de la diminution du rayon du billon en cours de déroulage).

Un profilomètre laser, installé entre la dérouleuse et le massicot, permet de scanner le profil du placage déroulé sur une bande de 32 mm. Grâce à ce dispositif, il est possible de déterminer la rugosité du ruban de placage (Figure 27).

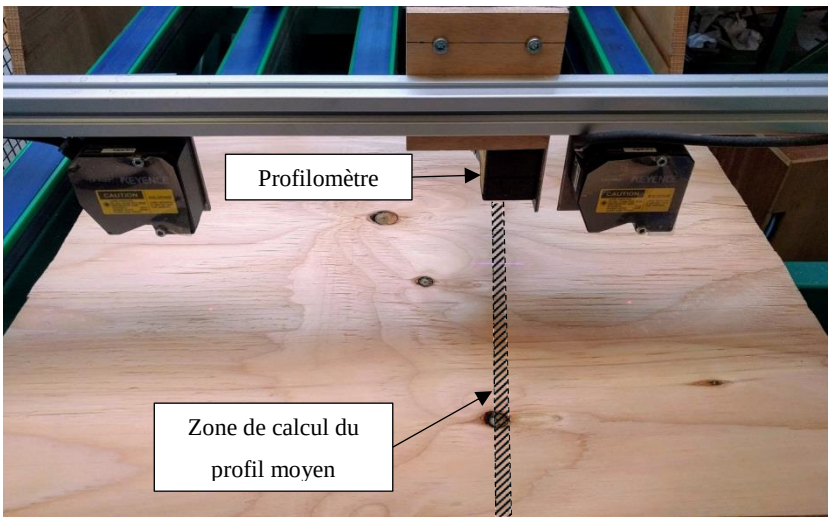


Figure 27 : Passage d'un placage sous le portique instrumenté en sortie de la dérouleuse du LaBoMaP (profilomètre et mesure d'épaisseur)

Les données obtenues grâce au profilomètre ont été filtrées afin d'éliminer l'ondulation du placage grâce à un filtre passe-haut avec une longueur de coupure de 8 mm. Cette valeur a été choisie en accord avec la norme ISO 4288 (1996). La longueur de mesure (d'après la norme) est fixée à 40 mm. Pour cette étude, uniquement les paramètres de rugosité linéaire ont été étudiés (R) (voir Annexe A). Ces paramètres de rugosité ont été moyennés sur les 10 profils centraux. La distance entre ces 10 profils étant de 0.1 mm, un profil moyen a été calculé sur une bande de 1 mm de large.

Résultats

La Figure 28 présente les distributions des paramètres de rugosité Ra et Rz pour les billons déroulés aux deux températures différentes. La rugosité étant calculée par intervalle de 40 mm, elle n'est pas constante et varie suivant la zone mesurée (bois initial/final, nœud, aubier/duramen…). Cette représentation permet de montrer la variabilité de la mesure de l'état de surface sur 5 m de placages dans une zone de coupe « stable ». Le billon déroulé à une température de 55°C présente un plus grand nombre de zones de valeurs de faible rugosité que le billon déroulé à 80°C.

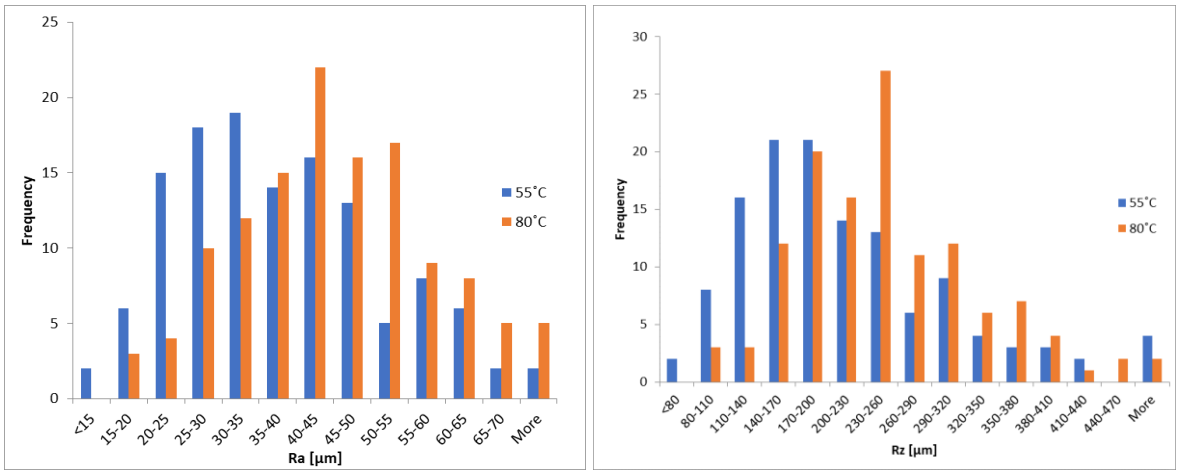


Figure 28 : Distribution du Ra et du Rz en fonction de la température de déroulage [52]

Les moyennes du Ra et du Rz sont plus faibles pour un billon déroulé à 55°C qu'à 80°C (Tableau 4).

Tableau 4 : Résultats des paramètres de rugosité dépendant de la température de déroulage

	Soaking temp. 55°C		**Soaking temp. 80°C**	
	R_a	R_z	R_a	R_z
Average (µm)	38,0	216,9	45,8	250,5
Standard deviation (µm)	14,2	105,2	14,8	80,5

Cette première étude nous a permis de vérifier que la température avait une influence mesurable sur la rugosité du placage. On observe qu'une température de 55°C améliore la qualité des placages. Ces résultats confirment, dans un premier temps, ceux des études précédentes [35], réalisées sur des douglas nord-américains.

2.2.1.2 - Deuxième étude en laboratoire

Une seconde étude, plus fine, a été réalisée sur la micro-dérouleuse, une autre machine du laboratoire [53], afin de déterminer une température optimale de déroulage le plus précisément possible.

Echantillonnage et matériel utilisé

Nous avons choisi pour cette étude d'utiliser une dérouleuse expérimentale développée au laboratoire [53] permettant de dérouler des rondelles de bois, afin de limiter l'effet de la variabilité naturelle du bois. 16 rondelles de douglas, d'un diamètre de 420 mm et d'une épaisseur de 40 mm, ont été débitées dans un arbre provenant de la forêt d'Anost (Nièvre). Cet arbre était frais d'abatage, sans nœuds, centré sur la moelle et sans fissures radiales apparentes. Ces 16 rondelles ont été chauffées dans l'eau chaude à des températures allant de 20 à 80°C (Figure 29).

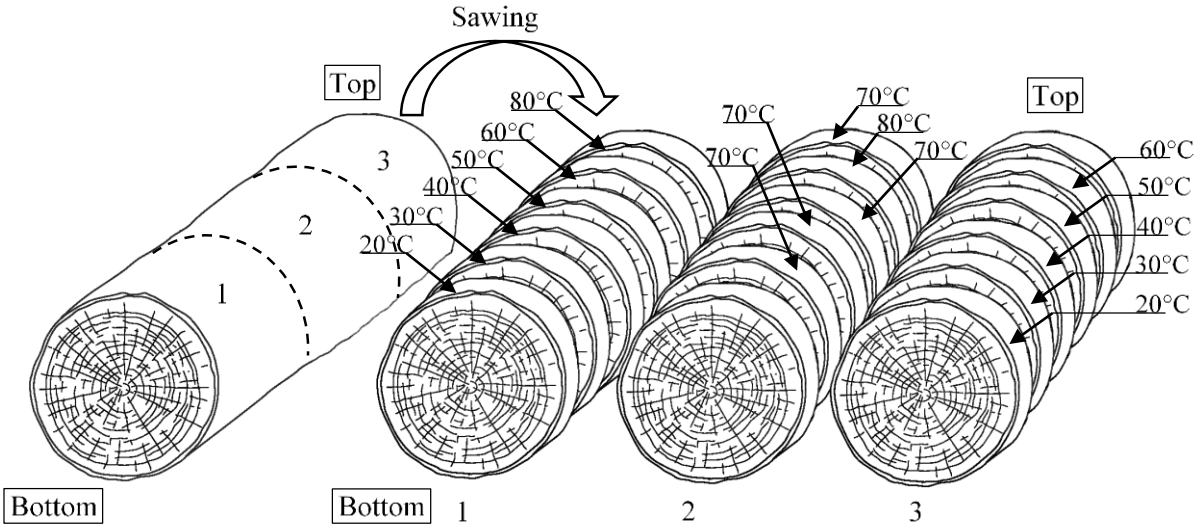


Figure 29 : Echantillonnage des rondelles [54]

La microdérouleuse, décrite dans la Figure 30, est équipée du profilomètre laser (*Keyence LJ-V7080*), d'une platine piézoélectrique (Kistler), spécifiquement conçue afin de mesurer les efforts sur le couteau, et d'un codeur incrémental, afin de déterminer la position de chaque profil du ruban déroulé.

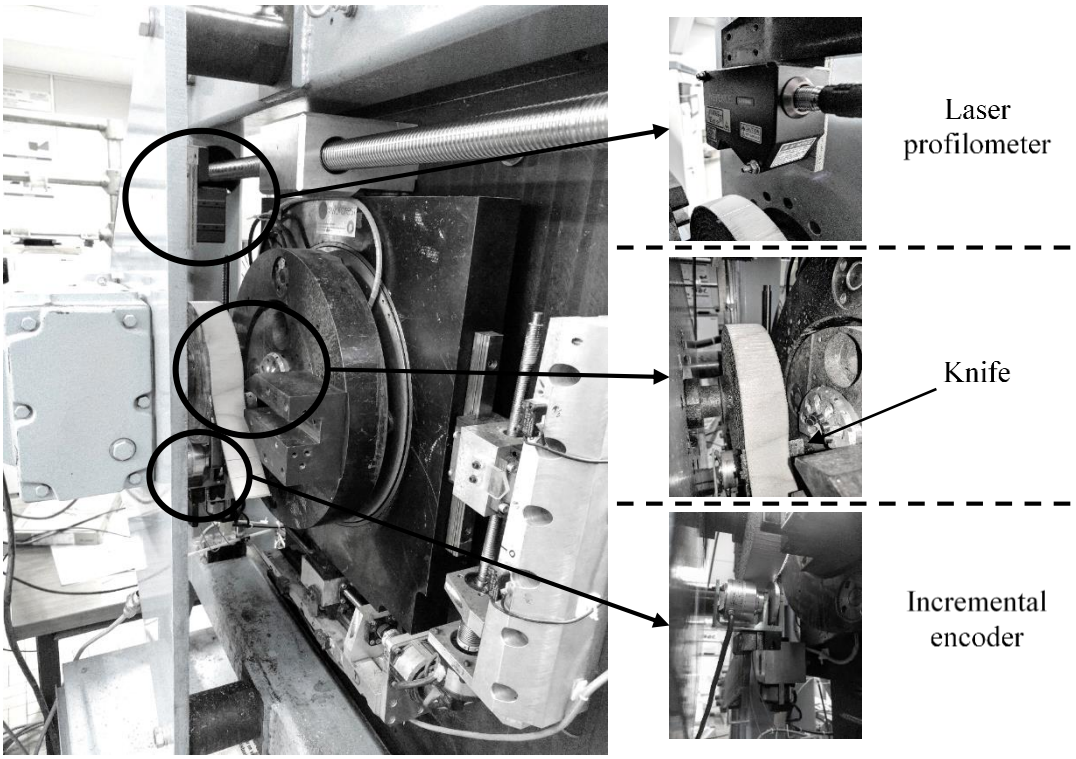


Figure 30 : Microdérouleuse avec profilomètre laser [54]

Toutes les rondelles ont été déroulées à une épaisseur de 3 mm et avec une vitesse de coupe de 1,6 m/s qui constituait un bon compromis entre résolution spatiale et longueur mesurée. La fréquence d'acquisition du profilomètre a été fixée à 16 kHz. Ainsi, avec une vitesse de déroulage de 1,6 m/s, un profil peut être enregistré tous les 100 µm dans le sens de déroulage (axe Y). La résolution du profilomètre dans le sens perpendiculaire au sens de déroulage (axe X) est aussi de 100 µm pour une largeur de 30 mm. Le nombre maximum de profils pouvant être enregistrés lorsque le profilomètre est cadencé à 16 kHz est de 15 000 profils. 1,5 m de ruban a donc été enregistré à chaque acquisition.

Le couteau a été réaffuté avec une pierre entre chaque rondelle à un angle de 20° et l'angle de dépouille a été fixé à 1° pour toutes les rondelles. Le profilomètre a été installé sur un bras, connecté au chariot par un câble et des poulies, lui permettant de rester à une distance constante de 80 mm au-dessus du billon pendant tout le déroulage.

Les points aberrants, inférieurs à -2 ou supérieurs à 2 mm dans la direction verticale (axe Z), ont été remplacés par les valeurs minimales ou maximales. Les valeurs manquantes ont été remplacées par les valeurs des plus proches voisins. Le plan moyen a été calculé et soustrait aux valeurs brutes afin d'éliminer les problèmes de positionnement du profilomètre

laser (Figure 31). Les points 3D corrigés ont ensuite été interpolés sur une grille régulière de 100 µm dans le sens de déroulage grâce à la position réelle enregistrée par le codeur (le codeur donnant un top tous les 50 µm).

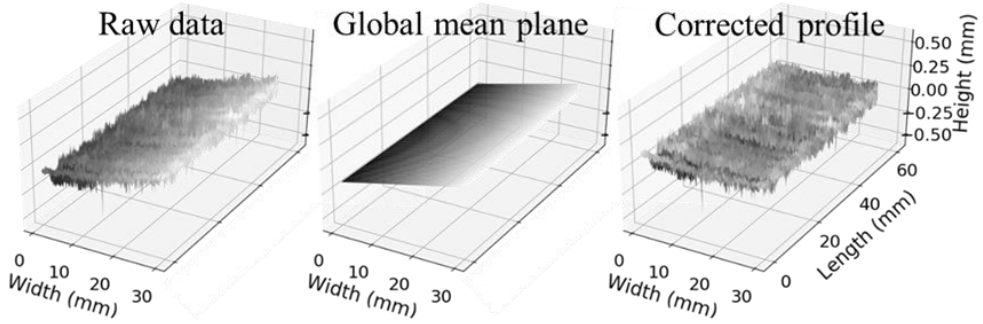


Figure 31 : Traitement des données brutes avant le calcul des paramètres de rugosité [54]

Pour cette étude, les paramètres de rugosité surfacique (S) ont été pris en compte en accord avec la norme ISO 25178 car ils étaient disponibles sur cette expérimentation. Les paramètres de rugosité de surface ont été calculés sur les profils interpolés pour chaque surface de 30 x 30 mm^2. Pour chaque ruban d'1,5 m de longueur, 150 mm ont été retirés au début pour assurer des conditions de coupe stables et une vitesse de déroulage constante. Au final, 44 zones par ruban ont pu être caractérisées en rugosité surfacique. Pour chaque rondelle, trois rubans d'aubier et trois rubans de duramen ont été déroulés, afin de garantir une répétabilité dans la mesure.

Grâce à la platine dynamométrique, nous avons pu, en parallèle des mesures de rugosité, réaliser des mesures d'effort sur le couteau afin d'estimer la variation de l'effort en fonction de la température. Les efforts (Figure 32) sont décomposés en deux : l'effort vertical (V) selon l'axe X et l'effort horizontal (H) selon l'axe Y. Une carte d'acquisition (*NI PCIe-6351*), cadencée à une fréquence de 50 kHz, a permis d'enregistrer les signaux amplifiés ainsi que les signaux en provenance du codeur incrémental. Tous les types de signaux, analogiques (efforts), numériques (codeur), ont été synchronisés sur le premier front montant du codeur.

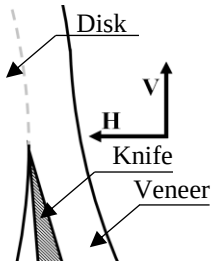


Figure 32 : Axes des efforts sur le couteau

Résultats

La densité de la distribution des différents paramètres de la rugosité de surface a été tracée grâce à la fonction « *distplot* » de la librairie *Seaborn* en langage de programmation Python (Figure 33). De 20 à 60°, la moyenne arithmétique (Sa) et la moyenne quadratique (Sq) des hauteurs semblent similaires. Seules les rondelles déroulées à une température de 70°C et 80°C présentent une rugosité surfacique supérieure (voir Figure 33).

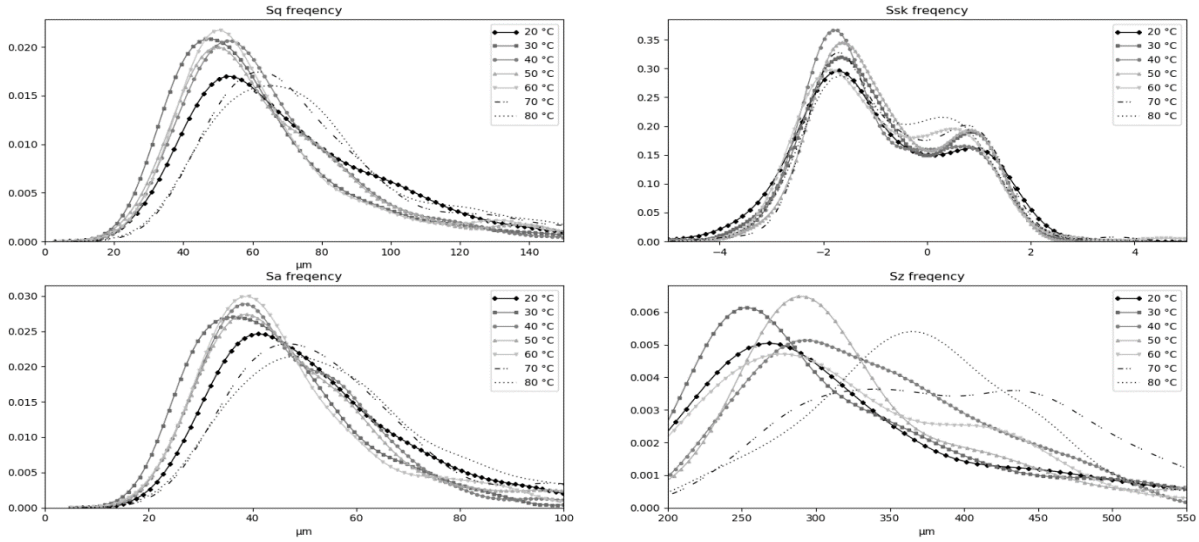


Figure 33 : Rugosité surfacique des rubans d'aubier déroulés à différentes températures [54]

Une analyse statistique a été réalisée sur les données de rugosité surfacique. Le test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été effectué sur ces données. Ce test est non paramétrique et n'implique pas que les distributions soient normales. Il permet de tester l'hypothèse selon laquelle les médianes de chacun de deux groupes de données sont proches. Le test généralisé à plusieurs populations (Kruskall-Wallis) est présenté dans le Tableau 5.

Ce test fait ressortir trois groupes différents pour l'aubier. Un groupe avec des températures en dessous de 30°C, un groupe avec des températures comprises entre 30°C et 60°C et un groupe avec des températures supérieures à 60°C. Cette différence peut être expliquée par la température de transition vitreuse de la lignine qui est proche de 60°C [55]. Pour le duramen, on voit que les rondelles déroulées à 40°C présentent une similitude avec les déroulages supérieurs ou égaux à 60°C.

Tableau 5 : Analyse de Kruskall-Wallis sur le Sa, Sq et Sz pour l'aubier et le duramen

Sq Sapwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,000	0,010	0,017	0,026	0,016	0,006
30	0,000	1,000	0,024	0,081	0,072	0,000	0,000
40	0,010	0,024	1,000	0,757	0,863	0,000	0,000
50	0,017	0,081	0,757	1,000	0,905	0,000	0,000
60	0,026	0,072	0,863	0,905	1,000	0,000	0,000
70	0,016	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,708
80	0,006	0,000	0,000	0,000	0,000	0,708	1,000

Sa sapwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,000	0,004	0,035	0,013	0,012	0,002
30	0,000	1,000	0,060	0,039	0,103	0,000	0,000
40	0,004	0,060	1,000	0,703	0,984	0,000	0,000
50	0,035	0,039	0,703	1,000	0,763	0,000	0,000
60	0,013	0,103	0,984	0,763	1,000	0,000	0,000
70	0,012	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,582
80	0,002	0,000	0,000	0,000	0,000	0,582	1,000

Sz sapwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,071	0,007	0,044	0,746	0,000	0,000
30	0,071	1,000	0,000	0,000	0,055	0,000	0,000
40	0,007	0,000	1,000	0,426	0,043	0,000	0,000
50	0,044	0,000	0,426	1,000	0,198	0,000	0,000
60	0,746	0,055	0,043	0,198	1,000	0,000	0,000
70	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,129
80	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,129	1,000

Sq heartwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,002	0,032
30	0,000	1,000	0,000	0,354	0,002	0,000	0,000
40	0,000	0,000	1,000	0,005	0,901	0,276	0,131
50	0,000	0,354	0,005	1,000	0,043	0,000	0,000
60	0,001	0,002	0,901	0,043	1,000	0,314	0,163
70	0,002	0,000	0,276	0,000	0,314	1,000	0,563
80	0,032	0,000	0,131	0,000	0,163	0,563	1,000

Sa heartwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,003
30	0,000	1,000	0,000	0,399	0,000	0,000	0,000
40	0,000	0,000	1,000	0,000	0,784	0,934	0,766
50	0,000	0,399	0,000	1,000	0,008	0,000	0,000
60	0,001	0,000	0,784	0,008	1,000	0,817	0,561
70	0,000	0,000	0,934	0,000	0,817	1,000	0,813
80	0,003	0,000	0,766	0,000	0,561	0,813	1,000

Sz heartwood	20	30	40	50	60	70	80
20	1,000	0,000	0,291	0,010	0,164	0,162	0,013
30	0,000	1,000	0,000	0,032	0,000	0,000	0,000
40	0,291	0,000	1,000	0,001	0,217	0,218	0,010
50	0,010	0,032	0,001	1,000	0,000	0,000	0,000
60	0,164	0,000	0,217	0,000	1,000	0,980	0,384
70	0,162	0,000	0,218	0,000	0,980	1,000	0,270
80	0,013	0,000	0,010	0,000	0,384	0,270	1,000

p-value < 0,05 : Different distribution p-value > 0,05 : Similar distribution

Le Tableau 6 présente les différents paramètres de rugosité surfacique comparés à la rugosité de l'aubier à une température de 50°C. Cette température de comparaison a été choisie, car elle représente la valeur médiane des températures testées. La faible humidité présente dans le duramen peut aussi gommer l'effet de la température sur la rugosité. Le duramen présente, en effet, une rugosité toujours supérieure à l'aubier.

Tableau 6 : Effet de la température sur la rugosité surfacique pour l'aubier et sur le duramen normalisé par la médiane à 50°C pour l'aubier

	Temperature	*Sq*	*Sa*	*Sz*
Sapwood	20 °C	14%	11%	-4%
	30 °C	-2%	-5%	-9%
	40 °C	5%	-2%	6%
	50 °C	0%	0%	0%
	60 °C	0%	-2%	-2%
	70 °C	23%	20%	24%
	80 °C	29%	23%	21%
Heartwood	20 °C	23%	18%	19%
	30 °C	4%	0%	5%
	40 °C	13%	9%	-18%
	50 °C	4%	-2%	8%
	60 °C	13%	11%	20%
	70 °C	18%	11%	20%
	80 °C	18%	9%	19%

La température de déroulage a aussi un effet important sur l'effort appliqué sur le couteau (Figure 34). Une réduction de l'effort vertical sur le couteau est observable avec l'élévation de la température. Ces observations sont en accord avec la littérature pour d'autres essences [30]. Au-dessus de 60°C, les efforts semblent atteindre une asymptote. Les efforts sur l'axe horizontal dépendent principalement de l'angle de dépouille. Ici, ces efforts sont principalement

positifs, ce qui confirme que le couteau est toujours tiré dans le bois (en plongée). Aucun refus de coupe n'a été observé.

Une température de déroulage supérieure à 40°C est donc préférable, car elle limitera les efforts sur le couteau, ce qui préservera sa durée de service. Même si l'étude n'a pas portée sur l'influence de la température sur les nœuds, d'autres Corder et Atherton [35] ont mis en évidence leur « ramollissement », préservant ainsi la bonne acuité de l'arête du couteau.

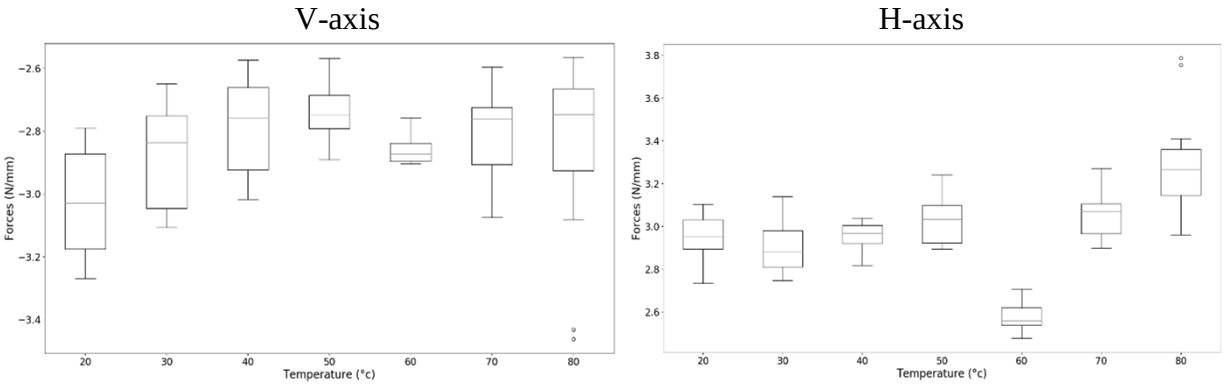


Figure 34 : Efforts de coupe sur le couteau normalisé par l'épaisseur des placages [54]

2.2.1.3 - Récapitulatif

Lors d'une première étude, deux températures ont été testées (55°C et 80°C) afin de vérifier que la température de déroulage avait un réel impact sur la rugosité des placages de douglas et, donc, sur la qualité finale des placages. Les placages déroulés à une température de 55°C présentent une rugosité inférieure aux placages déroulés à 80°C. Afin de confirmer ces résultats et d'optimiser plus finement la température de déroulage, une seconde étude a été effectuée. Celle-ci a été réalisée sur la microdérouleuse permettant de limiter la variabilité naturelle du bois en déroulant uniquement des rondelles issues d'un même arbre. Cette seconde étude a permis de montrer qu'une température comprise en 30°C et 60°C est nécessaire pour limiter la rugosité. De plus, une température au-dessus de 40°C est préférable afin de réduire les efforts sur le couteau et, ainsi, allonger sa durée de service.

La température recommandée pour dérouler du douglas français se situe donc autour de 50°C $\pm$10° afin d'assurer de bonnes conditions de coupe et de limiter la rugosité des placages.

2.2.2 - Impact de la vitesse de déroulage

2.2.2.1 - Introduction

La vitesse du déroulage a été peu étudiée dans le cas du déroulage du douglas, mais semble cependant permettre de limiter certains phénomènes de coupe comme l'effet « Horner » [15], [56], [57]. En effet, pour un matériau très tendre (comme une mousse), on peut facilement imaginer arriver à couper la surface sans trop de dégradation, si la vitesse est élevée, alors que le matériau va s'écraser pour de faible vitesse de coupe. Inversement, pour un matériau dur, si la vitesse de coupe est trop importante, le couteau et le matériau risquent d'être fortement dégradés. Nous avons donc essayé, avec les moyens du laboratoire, de déterminer la vitesse de coupe adaptée ou, du moins, la tendance à adopter afin de tendre vers une amélioration de l'état de surface.

Cette étude a été effectuée avec la ligne de déroulage instrumentée du LaBoMaP et en utilisant le profilomètre laser.

2.2.2.2 - Echantillonnage

Pour cette étude, la rugosité des placages a été contrôlée sur deux billons provenant d'une parcelle située dans la forêt de Matour (Saône et Loire), à une altitude de 600 m. Ces deux billons ont été chauffés à 65°C, car ils ont été déroulés avant l'étude de l'influence de la température sur la rugosité (voir chapitre 2.2.1). Cette température n'est finalement pas trop dégradante vis-à-vis de la rugosité (voir Figure 33). La vitesse de déroulage a été fixée à 1 m/s pour le premier billon, et à 2 m/s pour le second billon. Les deux billons ont été centrés sur la moelle. Le couteau a été affuté avec un angle de bec de 21° et l'angle de dépouille a varié linéairement entre 0 et 1°. Aucune barre de pression n'a été utilisée.

2.2.2.3 - Résultats

La Figure 35 présente les distributions des paramètres de rugosité Ra et Rz pour les billons déroulés à des vitesses différentes avec la méthodologie de calcul décrite en (Annexe A). Le billon déroulé à une vitesse de 1 m/s présente une distribution plus uniformément répartie. Cependant, la distribution obtenue avec une vitesse de 1m/s présente une proportion importante de mesures avec un fort Rz.

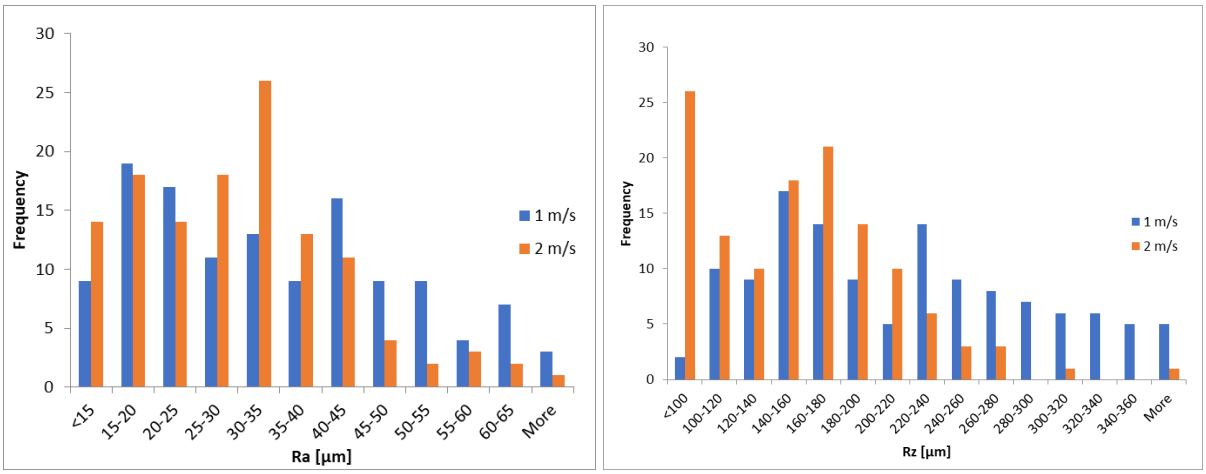


Figure 35 : Distribution du Ra et du Rz pour 2 vitesses de déroulage [52]

Le Tableau 7 montre que la moyenne du Ra et du Rz est plus faible pour un billon déroulé à une vitesse de 2 m/s qu'à 1 m/s.

Tableau 7 : Résultats des paramètres de rugosité dépendants de la vitesse de déroulage

	Cutting speed 2 m/s		**Cutting speed 1 m/s**	
	R_a	R_z	R_a	R_z
Average (µm)	29,8	154,8	34,4	217,2
Standard deviation (µm)	12,5	55,7	15,9	80,0

En revanche, nous n'avons pas pu étudier plus finement cet effet, car la vitesse maximale de ligne de déroulage du LaBoMaP est proche de 2 m/s. Il serait intéressant de réaliser une nouvelle campagne d'essais sur la microdérouleuse permettant de dérouler à des vitesses bien plus élevé.

On observe qu'une vitesse élevée permet d'avoir un meilleur état de surface et de limiter l'effet « Horner », surtout pour les zones de faible densité (bois de printemps).

2.2.3 - Influence de l'excentricité du billon

2.2.3.1 - Introduction

L'hétérogénéité du douglas influence beaucoup son comportement à la coupe. Movassaghi dans sa thèse [23] différencie quatre types de placages :

- Les placages hétérogènes qui présentent la limite de cerne à l'intérieur du placage (du bois d'été au bois de printemps). En général, la rugosité de ces placages est relativement élevée et est liée principalement au phénomène de fissuration qui affecte ce type de placage.
- Les placages semi-hétérogènes contenant la zone de transition du bois de printemps au bois d'été. La rugosité de ces placages est relativement faible.
- Les placages homogènes formés complètement de bois d'été. Ces placages présentent la rugosité la plus faible.
- Les placages homogènes de bois de printemps. Ces placages présentent une rugosité relativement élevée.

Cette étude vise à observer la qualité du placage selon que le billon est excentré ou bien centré sur la moelle. Si le billon est excentré, le couteau va rencontrer de nombreuses zones de transition, mais sur une courte distance. Si le billon est bien centré sur la moelle, le couteau va traverser pendant de plus longues périodes les quatre types de placages décrits par Movassaghi.

Cette étude a été effectuée sur la ligne de déroulage instrumentée du LaBoMaP et en utilisant le profilomètre laser.

2.2.3.2 - Echantillonnage

Pour cette étude, la rugosité des placages a été contrôlée sur deux billons, issus d'un même arbre, provenant d'une parcelle située dans la forêt de Matour (Saône et Loire), à une altitude de 600 m. Les deux billons ont été chauffés à 65°C, car ils ont été déroulés avant l'étude de l'influence de la température sur la rugosité (voir chapitre 2.2.1). La vitesse de déroulage a été fixée à 2 m/s pour les deux billons. Aucune barre de pression n'a été utilisée. Un des billons a été volontairement excentré et l'autre a été centré. Pour réaliser ceci, le premier billon, qui était légèrement excentré, a été débité sur la partie extérieure la plus proche de la moelle, afin d'excentrer fortement celui-ci (Figure 36). Pour bien centrer le second billon, la procédure était similaire, sauf que la partie extérieure débitée a été la partie la plus éloignée de la moelle.

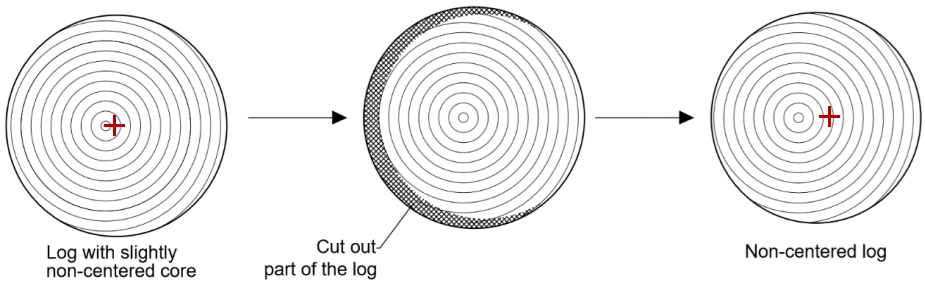


Figure 36 : Procédure de préparation de billon excentré

2.2.3.3 - Résultats

La Figure 37 présente les distributions des paramètres de rugosité Ra et Rz pour le billon centré et pour le billon excentré. Le billon excentré présente une distribution beaucoup plus étendue et particulièrement pour les hautes valeurs de rugosité, due au nombre de placages hétérogènes plus important obtenus lors du déroulage de billons excentrés.

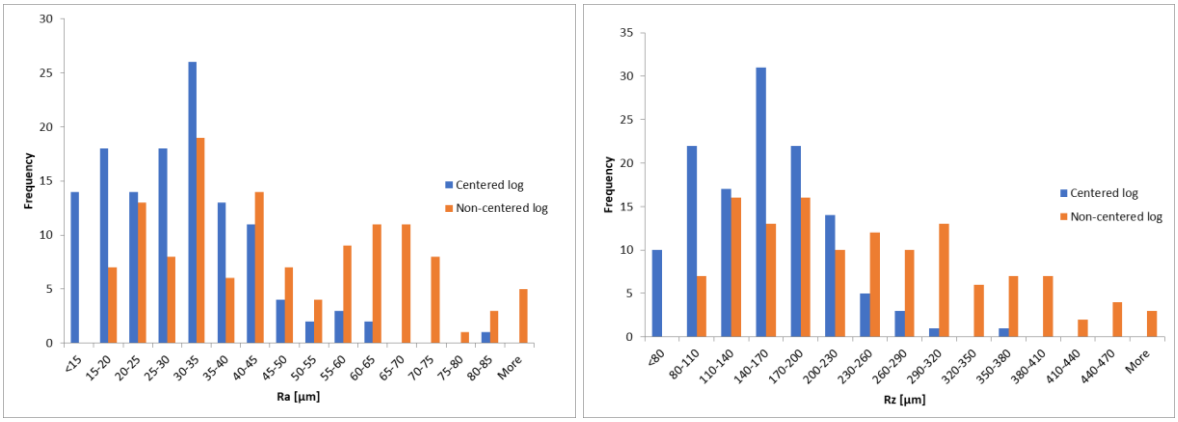


Figure 37 : Distribution du Ra et du Rz pour un billon centré et un billon excentré [52]

Le Tableau 8 montre que la moyenne du Ra et du Rz est plus faible pour le billon centré sur la moelle que pour le billon excentré.

Tableau 8 : Résultats des paramètres de rugosité pour un billon centré et un billon excentré

	Centered log		**Non-centered log**	
	R_a	R_z	R_a	R_z
Average (µm)	29,8	154,8	46,8	246,1
Standard deviation (µm)	12,5	55,7	19,8	102,7

Il est donc préférable de centrer sur la dérouleuse le billon sur la moelle. Les placages obtenus seront de meilleures qualités. Cette recommandation va cependant à l'encontre des pratiques des fabricants de placages qui, pour optimiser le rendement matière, recherchent le centre géométrique du billon plutôt que sa moelle. Dans certaines applications et pour le cas de ressources présentant des billons ayant une courbure importante provoquant une excentricité de leur moelle, on pourrait donc envisager de privilégier la production de placages de qualité au volume.

2.2.4 - Conclusion sur la rugosité

Nous avons retenu la rugosité, comme critère principal, permettant d'estimer la qualité du déroulage. Trois paramètres supposés influencer la rugosité des placages ont été testés : la température des billons, la vitesse de déroulage et le centrage du billon. Deux études ont été réalisées. La première a fait l'objet d'une publication scientifique dans un journal [52], la seconde a été présentée lors d'une conférence internationale [54]. Ces deux études proposent des paramètres de déroulage optimisés pour du douglas français. Les paramètres retenus sont :

- Une température de déroulage de 50°C±10°
- Une vitesse de déroulage rapide (≳2 m/s)
- Un billon centré au maximum sur la moelle

Ces résultats constituent un préalable indispensable à un des objectifs de ce travail de thèse qui vise à mieux valoriser la ressource de gros douglas à forte nodosité dont les marchés de valorisation restent limités [10]. Ils permettent aussi de monter qu'il est possible d'obtenir des placages de qualité acceptable à partir de douglas français en optimisant les paramètre de coupe [49]. Les industriels qui s'intéressent à ce type de transformation pourront utiliser ces informations pour optimiser leur procédé.

Dans le cadre d'une étude de grande ampleur [49], [58] (100m3 de douglas déroulés), conduite avec le soutien de France Douglas, des coopératives forestières CFBL, Alliance Forêt Bois ainsi qu'un partenariat du groupe Thébault, il est apparu fondamental de maîtriser la température réelle de déroulage des bois, d'autant plus que la cible s'adresse aux gros bois réputés plus longs à étuver.

Pour parvenir à cet objectif, une première étude a été réalisée en laboratoire afin d'estimer la diffusivité thermique moyenne des billons de douglas. Cette approche a permis de proposer un modèle de chauffe des billons de douglas simple et fidèle, qui pourra être utilisé par les industriels afin de mieux maîtriser leur cycle d'étuvage. Ces travaux font l'objet du prochain chapitre.

2.3 - Étude de la vitesse d'élévation de la température des billons

La diffusivité thermique est une caractéristique thermique des matériaux qui permet d'estimer leur rapidité pour changer de température. Elle est notée (α) et elle est définie comme le ratio de la conductivité thermique (λ) sur sa densité (ρ) et sa chaleur spécifique (C_p) (Equation (1)) :

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \qquad (1)$$

Maku [59] montre que la diffusivité thermique du bois est très peu affectée par la température dans une gamme de 0 à 100°C. L'humidité du bois, sa masse volumique et sa structure interne sont les principaux facteurs influençant la diffusivité thermique du matériau bois dans le cas du déroulage. Le bois étant un matériau orthotrope, la diffusivité est différente dans le sens longitudinal et dans le sens radial.

Nous avons développé une méthode au LaBoMaP afin de caractériser la diffusivité thermique d'un billon, avec peu de matériel, pouvant être directement transférée dans l'industrie, et ne dégradant pas le billon étudié pour le déroulage. Cette méthode nécessite seulement un long foret (environ 400 mm) et quelques thermocouples. Elle est basée sur une identification inverse de la diffusivité thermique. La conductivité thermique, la densité et la chaleur spécifique n'ont donc pas besoin d'être déterminées. Seuls la position du thermocouple, la géométrie du billon et l'enregistrement de la température sont nécessaires pour déterminer la diffusivité thermique. Cette configuration peut être facilement transférable en entreprise.

La méthode se décompose en deux étapes [60]. La première étape consiste à déterminer le ratio (χ) entre la diffusivité radiale et la diffusivité longitudinale. La seconde étape a pour but de déterminer la diffusivité radiale moyenne pour du douglas à partir du ratio déterminé dans la première étape.

2.3.1 - Détermination du ratio

Echantillonnage et expérimentation

Le ratio (χ) entre la diffusivité radiale et la diffusivité longitudinale est exprimé suivant l'équation (2) :

$$\chi = \frac{\alpha_r}{\alpha_l} \qquad (2)$$

ou α_r et α_l sont respectivement la diffusivité thermique dans le sens radial et longitudinal. Afin de déterminer ce ratio, un billon de douglas a été chauffé dans la bouilloteuse régulée en température ($\pm$ 1 °C) du LaBoMaP. Le billon a été chauffé à une température de 60°C. La température a été mesurée à 3 profondeurs et positions radiales différentes, à partir de chaque extrémité du billon (Figure 38). Ces températures ont été relevées en utilisant des thermocouples de type K, à gaine en acier inoxydable de 5 mm de diamètre, et ont été enregistrées grâce à une station d'acquisition *Agilent 34970A* avec une carte d'acquisition *Agilent 34901A*. La température des six thermocouples et celle de l'eau de l'étuve ont été, pendant environ 32 heures, enregistrées chaque minute jusqu'à ce que tout le billon atteigne une température homogène (Figure 39). Le billon de douglas instrumenté a un diamètre compris entre 345 mm et 380 mm et une longueur de 680 mm. La masse du billon est de 53,42 kg, ce qui lui confère une masse volumique de 770 kg/m^3, en accord avec les données de la littérature [61] pour du douglas à l'état vert.

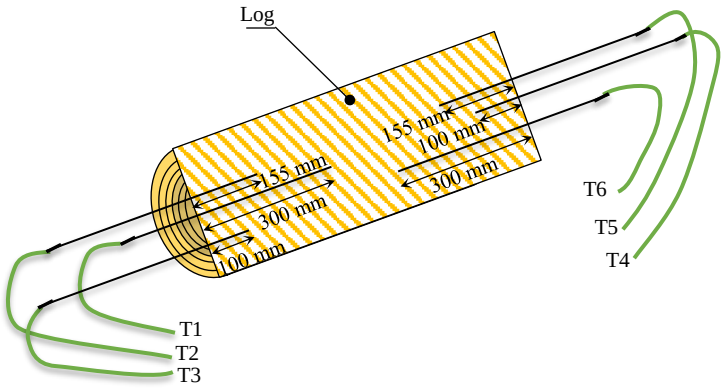


Figure 38 : Billon instrumenté dans le but de déterminer le ratio (χ) [60]

La position des thermocouples a été choisie grâce aux résultats issus du modèle éléments finis présenté ci-après. Ils ont été placés selon les positions décrites dans le Tableau 9 de façon à

maximiser la différence de température entre chaque thermocouple et, ainsi, à améliorer la mesure du ratio (χ). Deux thermocouples (n°2 et n°5) ont été positionnés symétriquement afin de vérifier que l'élévation de la température était similaire de chaque côté.

Tableau 9 : Position des thermocouples dans le but de déterminer le ratio (χ)

	Thermocouple N°	Profondeur (mm)	Rayon (mm)
Face 1	1	300	0
	2	155	50
	3	100	100
Face 2	4	100	0
	5	155	50
	6	300	100

La Figure 39 présente l'évolution de la température pour chaque thermocouple. Les thermocouples 2 et le 5 présente une évolution très proche. L'évolution de la température mesurée par le thermocouple 1, positionné au centre du billon et en profondeur, est logiquement la plus lente. Au contraire, l'évolution de la température mesurée par le thermocouple 3, positionné plus proche de la périphérie du billon et à une moindre profondeur, est la plus rapide.

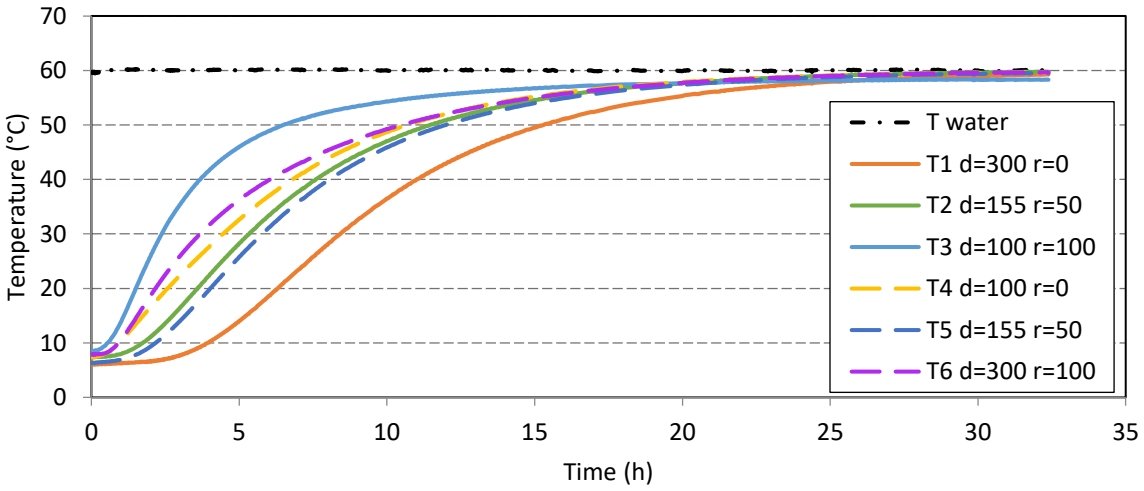


Figure 39 : Evolution de la température enregistrée pour les six thermocouples [60]

Méthode d'identification inverse

Un modèle éléments finis a été construit afin de déterminer l'évolution de la température dans un billon. Ce modèle a été créé sous *CAST3M* [62]. Le billon étant considéré comme parfaitement cylindrique (Figure 40), il a pu être simplifié comme une géométrie axisymétrique avec un axe d'axisymétrie au centre géométrique. Un second plan de symétrie, normal à l'axe du billon et positionné au milieu du billon, a permis de réduire d'avantage la zone à étudier et le temps de calcul. Le modèle est composé de quatre nœuds quadrangle (*QUA4*) avec une interpolation linéaire. Les paramètres d'entrée du modèle sont la température de l'eau, la température initiale du billon, le rayon du billon, les positions de mesures, le ratio χ et la diffusivité radiale du bois α_r.

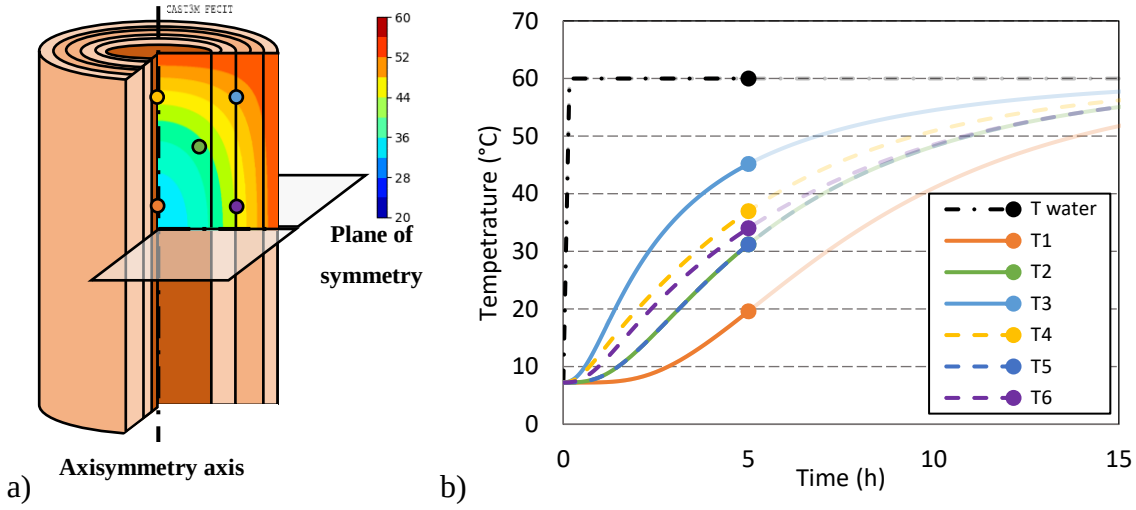


Figure 40 : a) Modèle éléments finis et position des points de mesure utilisés pour déterminer χ (point de mesure T2 confondue avec T5); b) Evolution de la température pour les points de mesures pendant un étuvage à 60°C [60]

Le ratio χ et la diffusivité radiale α_r ont été optimisés en minimisant la moyenne de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre la pente $\left(\frac{\Delta T}{\Delta t}\right)$ du modèle et la pente des valeurs expérimentales. Cette méthode a été choisie afin de ne pas prendre en compte les décalages entre les deux courbes qui peuvent être dus à un effet transitoire au début de la mesure. Grâce à cela, il n'est pas nécessaire de synchroniser la courbe expérimentale et la courbe modélisée car l'erreur est relative à une différence de pente. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) est calculée en séparant chaque courbe en 9 parties égales entre 20% et 80% de la variation de température ($\Delta T = T_{\max} - T_{\text{ini}}$). La Figure 41 présente deux courbes d'évolution de température. La première est issue d'une courbe expérimentale, la seconde est issue du modèle

non optimisé. Les segments surlignés sur la figure représentent la huitième partie étudiée des courbes d'évolution de la température.

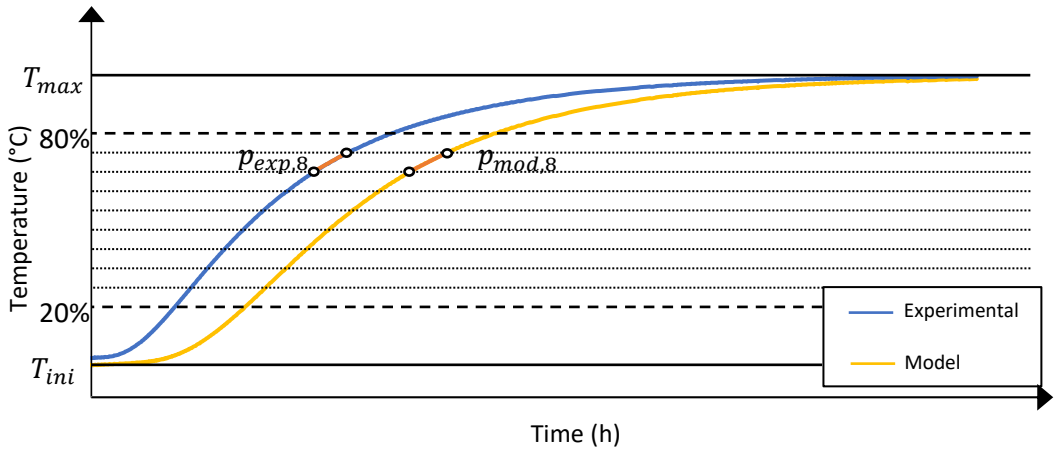


Figure 41 : Méthode d'optimisation utilisée pour déterminer la plus petite différence entre les pentes ; $P_{exp,8}$ représente la pente du 8ème segment de la courbe expérimentale, $P_{mod,8}$ représente la pente du 8ème segment de la modélisation [60]

L'erreur quadratique moyenne des pentes est calculée en utilisant l'équation (3) pour les neuf parties.

$$\varepsilon_r(\alpha,\chi) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^{9}\left(p_{exp,i} - p_{mod,i}\right)^2}}{9} \qquad (3)$$

où $p_{exp,i}$ est la pente de la $i^{éme}$ partie de la courbe expérimentale, $p_{mod,i}$ est la pente de la $i^{éme}$ partie de la courbe modélisé et ε_r est l'erreur à minimiser pour chaque température. De plus, l'erreur moyenne (ε_{mean}) est calculée de façon à indiquer si le modèle surestime ou sous-estime la température pour chaque thermocouple (Equation (4)) :

$$\varepsilon_{mean}(\alpha,\chi) = \frac{\sum_{i=1}^{9}\left(p_{exp,i} - p_{mod,i}\right)}{9} \qquad (4)$$

Afin de déterminer le ratio χ, la moyenne de l'erreur quadratique (ε_r) est minimisée en utilisant l'équation (5) :

$$\overline{\varepsilon_r}(\alpha,\chi) = \min\left(\frac{\sum_{i=1}^{6}\varepsilon_{r,j}}{6}\right) \qquad (5)$$

où est $\varepsilon_{r,j}$ l'erreur quadratique du $j^{éme}$ thermocouple. Cette méthode de minimisation a été employée afin de rechercher le meilleur couple (α,χ) pour la totalité des thermocouples.

Résultats

Le modèle éléments finis a été utilisé pour un ratio χ allant de 1 à 7 avec un pas de 0.1 et pour une diffusivité radiale allant de 0,1 $mm^2.s^{-1}$ à 0,3 $mm^2.s^{-1}$ avec un pas de 0,003 $mm^2.s^{-1}$. Un total de 2 700 simulations a été testé dans le but de trouver la meilleure combinaison en minimisant l'erreur (ε_r). La Figure 42 présente l'évolution de la température modélisée avec les paramètres optimisés sur les valeurs expérimentales. La diffusivité thermique radiale optimisée est de 0,208 $mm^2.s^{-1}$ et le ratio χ optimisé de 2,4 pour ce billon de douglas chauffé à 60°C. Le ratio déterminé ici est comparable à ceux de la littérature compris entre 2 et 2,5 pour des résineux [59], [63]–[65]. On observe que les pentes des courbes d'élévation de température correspondent bien avec les valeurs expérimentales, ce qui montre que l'approche est assez robuste malgré les fortes hypothèses (bois homogène, parfaitement cylindrique, diffusivité thermique pas influencée par la température…).

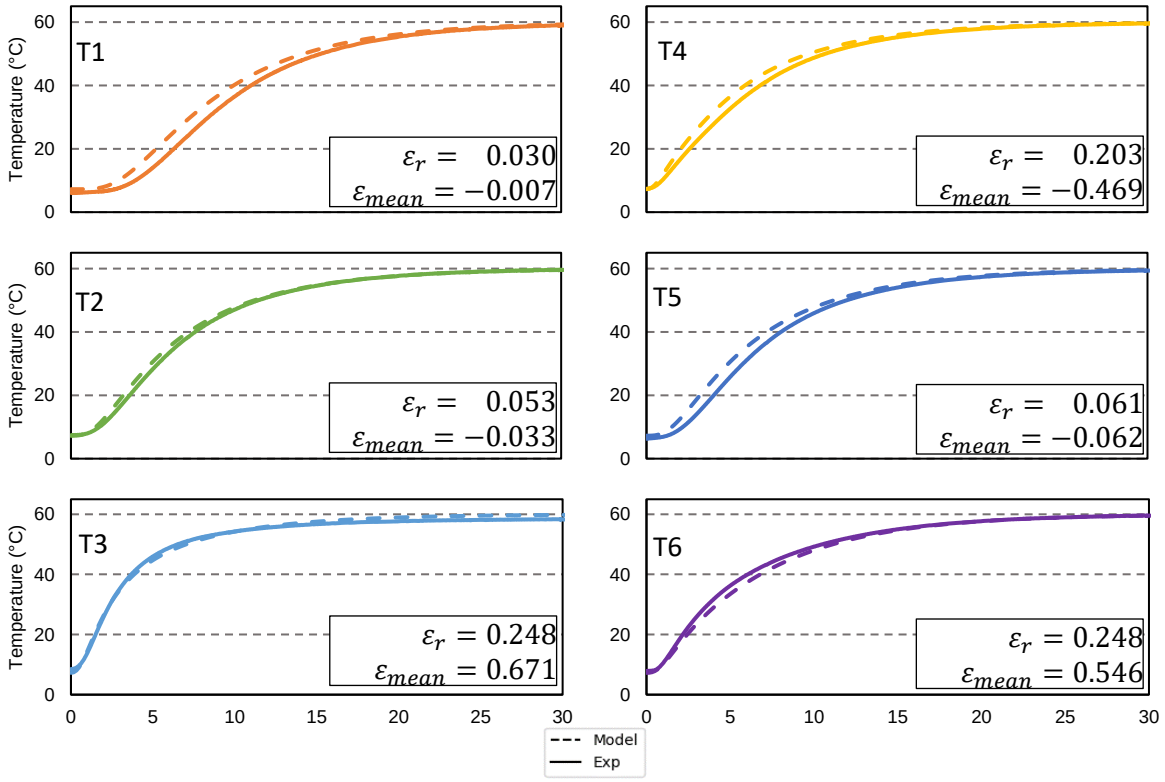


Figure 42 : Evolution expérimentale de la température en fonction du temps (heure) comparée au modèle éléments finis [60]

La Figure 43 illustre la procédure de minimisation en présentant une cartographie de la moyenne de l'erreur moyenne quadratique $\overline{\varepsilon_r}$. Cette dernière montre que, pour un ratio de 2,4 et une diffusivité thermique radiale de 0,208 $mm^2.s^{-1}$, l'erreur est la plus faible (0.141 °C.h^{-1}) et qu'il n'y a pas d'autre minimum local. Le ratio de 2,4 a donc été retenu pour le reste de l'étude.

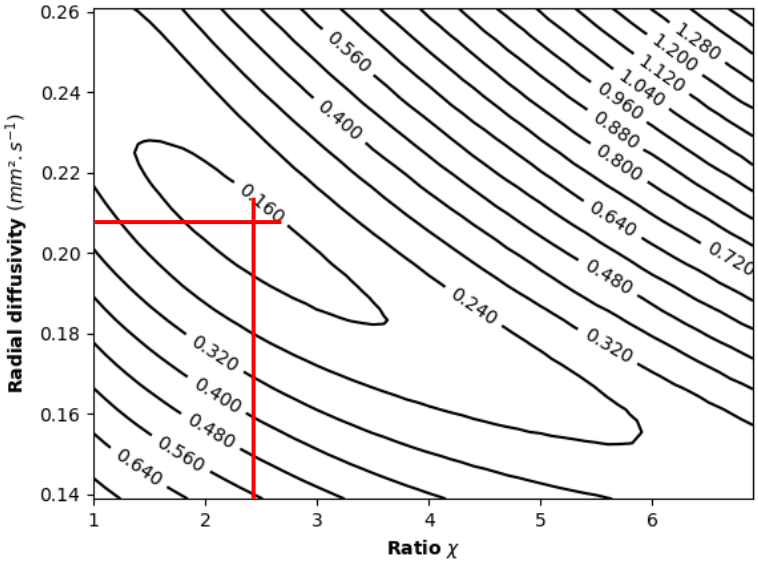


Figure 43 : Moyenne de l'erreur quadratique moyenne $\overline{\varepsilon_r}$ en fonction de la diffusivité radiale et du ratio χ

2.3.2 - Détermination de la diffusivité radiale

Echantillonnage

Dix-huit billons de douglas provenant de 5 arbres différents, avec un diamètre allant de 350 à 500 mm et une longueur de 800 mm, ont été chauffés à différentes températures comprises entre 55 et 80°C. Le numéro des arbres, des billons et le diamètre des billons sont présentés dans le Tableau 10. Le ratio χ retenu entre la diffusivité longitudinale et la diffusivité radiale est égal à 2,4 (0). Grâce à cette hypothèse, un seul thermocouple est nécessaire pour chaque billon afin de déterminer la diffusivité radiale (Figure 44). Le même matériel expérimental (thermocouple et système d'acquisition) est utilisé pour déterminer l'élévation de température au cœur de chaque billon.

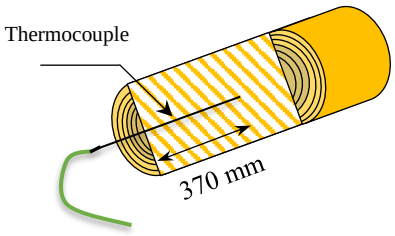


Figure 44 : Schéma d'un billon avec un thermocouple centré

Expérimentation

Le modèle éléments finis (MEF) présenté précédemment a été repris et un second modèle analytique a été développé afin d'améliorer la rapidité du traitement et de comparer les performances des deux approches. Dans ce cas, la température au centre du billon peut être déterminée par l'équation de propagation de chaleur [66] dans le sens radial et longitudinal. Dans le sens radial, la température peut être approximée grâce à l'équation (6),

$$T_{(r,t)} = T_{max} + \frac{2(T_{ini} - T_{max})}{R} \sum_{n=1}^{N} \frac{J_0(\omega_n \cdot r)}{\omega_n \cdot J_1(\omega_n \cdot R)} e^{-a_r \cdot \omega_n^2 \cdot t} \qquad (6)$$

où T_{max} est la température de l'eau d'étuvage, T_{ini} est la température initiale du billon considéré comme homogène, R est le rayon du billon, J_0 et J_1 les fonctions de Bessel du premier ordre, ω_n les $n^{ème}$ racines de l'équation de Bessel J_0 divisées par le rayon R, α_r la diffusivité radiale, r la position radiale du thermocouple et t le temps.

Dans le sens longitudinal, la température peut être approximée grâce à l'équation (7),

$$T_{(x,t)} = T_{max} + \frac{4(T_{ini} - T_{max})}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n+1} \sin\left((2n+1)\frac{\pi}{2}\frac{x}{L}\right) \cdot e^{-(2n+1)^2 \frac{\pi^2}{4} \frac{a_l \cdot t}{L^2}} \quad (7)$$

où x est la position longitudinale du thermocouple, α_l la diffusivité longitudinale et L la longueur du billon.

La température au centre du billon peut donc être déterminée comme une combinaison de ces deux températures grâce au théorème de Von Neumann (Equation (8)) :

$$\left[\frac{T_{(x,r,t)} - T_{max}}{T_{ini} - T_{max}}\right] = \left[\frac{T_{(x,t)} - T_{max}}{T_{ini} - T_{max}}\right] \times \left[\frac{T_{(r,t)} - T_{max}}{T_{ini} - T_{max}}\right] \quad (8)$$

Cette méthode analytique a été codée en langage Python afin de déterminer la température du billon en fonction de la température de l'eau de l'étuve, de la température initiale du billon, du rayon du billon, des positions de mesures, du ratio χ et de la diffusivité radiale du bois α comme pour le modèle MEF.

Résultats

Après une recherche bibliographique, nous n'avons trouvé que MacLean [64] qui donne sept valeurs de mesures de diffusivités thermiques pour du douglas, avec une humidité comprise entre 22.6% et 31.3%, chauffé dans de l'eau. Ces valeurs sont présentées par une boite à moustache dans la Figure 45. La méthode d'identification inverse a été utilisée afin de déterminer la diffusivité de 18 billons de douglas à l'état vert avec un ratio χ fixé à 2,4, déterminé dans le paragraphe précédent. La diffusivité thermique radiale a été calculée en utilisant la méthode éléments finis et la méthode analytique. Les résultats sont donnés dans le Tableau 10.

Tableau 10 : Définition des billons et des diffusivités thermiques

Tree ID	Log n°	Log radius (mm)	Depth of measure (mm)	T_{ini} Before soaking (°C)	T_{max} Soaking temp (°C)	Diffusivity analytical method ($mm^2.s^{-1}$)	Error ε_r analytical method ($°C.h^{-1}$)	Diffusivity FEM method ($mm^2.s^{-1}$)	Error ε_r FEM method ($°C.h^{-1}$)
0	1	210	435	12	70	0.215	0.038	0.222	0.035
0	2	200	435	11	70	0.175	0.028	0.181	0.029
1	2	260	370	13	65	0.179	0.015	0.181	0.014
1	3	245	370	11	65	0.163	0.019	0.164	0.018
1	4	235	370	11	65	0.157	0.015	0.158	0.014
1	5	230	370	11	65	0.16	0.015	0.164	0.015
2	2	255	370	14	65	0.184	0.018	0.186	0.017
2	3	250	370	14	65	0.174	0.016	0.178	0.013
2	4	250	370	13	65	0.189	0.023	0.192	0.022
2	5	240	370	13	65	0.179	0.023	0.183	0.021
2	6	240	370	16	70	0.182	0.046	0.186	0.043
3	2	190	370	19	81	0.187	0.053	0.192	0.047
3	4	175	370	22	67	0.146	0.038	0.150	0.039
3	5	165	370	22	67	0.156	0.034	0.158	0.031
4	1	235	370	20	55	0.146	0.012	0.147	0.014
4	2	225	370	20	55	0.155	0.014	0.156	0.013
4	3	230	370	19	81	0.192	0.056	0.194	0.052
4	4	220	370	21	67	0.155	0.018	0.158	0.019

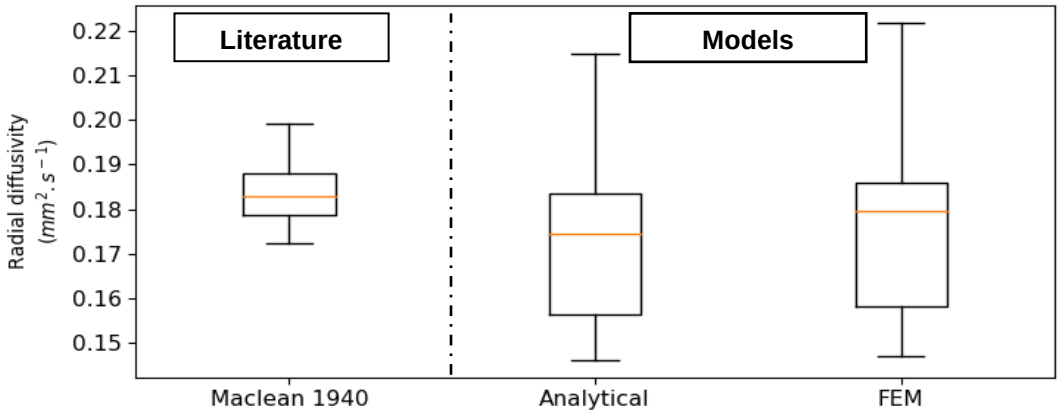


Figure 45 : Comparaison entre le modèle analytique et éléments finis et les valeurs extraites de la littérature [64]

La Figure 46 présente la matrice de corrélation entre les différentes variables prises en compte dans l'étude : le numéro de l'arbre, le rayon du billon, la température initiale, la température d'étuvage, la diffusivité déterminée par la méthode analytique et par la méthode éléments finis avec leurs erreurs respectives. Les deux méthodes (analytique et élément finis) donnent une diffusivité thermique radiale similaire (Figure 45) (coefficient de détermination de 1). Cependant, on remarque un effet de la température d'étuvage significatif sur l'erreur moyenne de mesure.

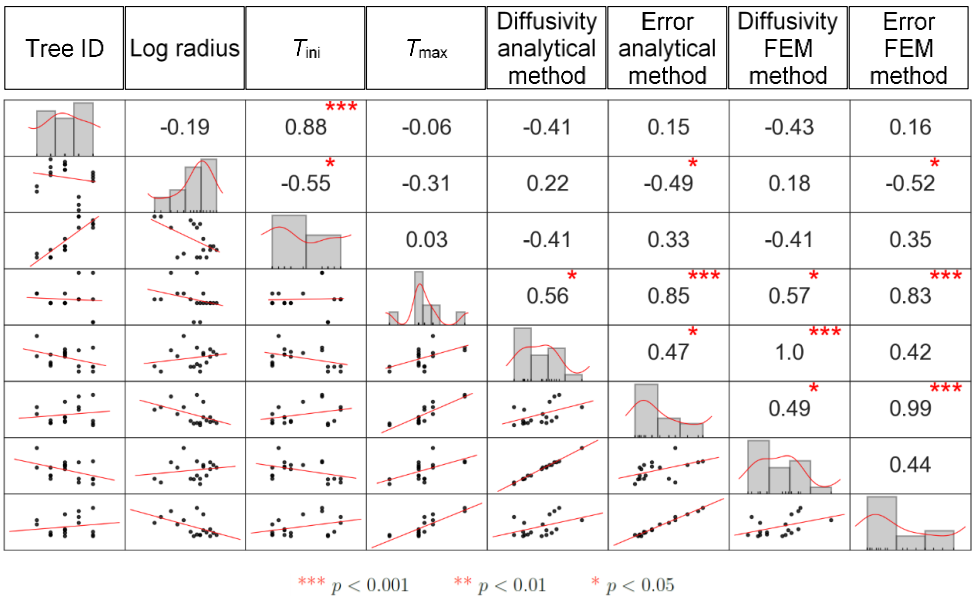


Figure 46 : Matrice des corrélations entre différentes variables

La diffusivité radiale varie suivant les billons et nécessiterait une étude de plus grande envergure pour être clairement définie. Les paramètres d'influence sont nombreux et parfois complexes à appréhender. Cependant, les résultats de cette étude sont cohérents et en accord avec les valeurs issues de la littérature (0,184 $mm^2.s^{-1}$ pour MacLean, 0,171 $mm^2.s^{-1}$ pour la méthode analytique et 0,175 $mm^2.s^{-1}$ pour la méthode éléments finis) avec un ratio χ fixé à 2,4. Il est donc possible de déterminer l'élévation de la température au cœur du billon avec la méthode éléments finis et la méthode analytique, méthode plus facile pour une utilisation en industrie.

2.3.3 - Résumé sur la vitesse de chauffe

Grâce à cette étude, il est possible de déterminer la diffusivité thermique radiale et longitudinale par une méthode assez simple et transférable en industrie. Une fois cette diffusivité bien connue pour une essence, il est possible d'estimer le temps de chauffe nécessaire pour que les billons atteignent la température désirée à cœur, garantissant ainsi un état de surface optimal ainsi qu'un gain de temps et d'énergie pour les industriels.

Cette information de diffusivité peut être utilisée, en particulier, dans le cas de l'étuvage d'un billon de douglas dans l'étuve du laboratoire. Par exemple, pour un billon d'une longueur de 750 mm et d'un diamètre de 470 mm, avec une température initiale de 10°C, il faudra entre 41 et 43 heures, immergé dans de l'eau à une température de 50°C, pour qu'il atteigne une température de 47,5°C à cœur.

Cet outil a déjà été transféré à la société Brugère qui déroule du hêtre. Le cas du hêtre nécessite non seulement de maîtriser la température de déroulage, mais aussi la durée de maintien en température, afin d'obtenir une coloration homogène du bois.

2.4 - Synthèse sur l'optimisation des paramètres de déroulage

Une température du billon à 50°C±10° semble être un bon compromis pour ne pas trop affaiblir le bois de printemps, tout en améliorant la coupe du bois d'été. Afin d'atteindre et de garantir une température de 50°C±10, une recherche de la diffusivité thermique radiale et longitudinale a permis de déterminer un intervalle compris entre 0,171 et 0,175 $mm^2.s^{-1}$ pour la diffusivité radiale, et entre 0,420 et 0,449 $mm^2.s^{-1}$ pour la diffusivité longitudinale du douglas à l'état vert. Une fonction python téléchargeable à l'adresse (https://gitlab.ensam.eu/2017-2184/mub-temperature-billon) a été développée afin de déterminer analytiquement plus rapidement l'élévation de la température. Cet outil s'avérera particulièrement utile pour l'étuvage de gros bois puisque le rayon du billon est bien le facteur le plus influent sur la cinétique de chauffe, d'après nos mesures et les modèles développés.

Une vitesse de déroulage rapide (≳2m/s), un angle de bec de 20° ainsi que le centrage du billon sur la moelle améliorent la qualité des placages.

Cependant, suivant le matériel utilisé par le dérouleur, certains paramètres peuvent être amenés à changer. Tous les paramètres étudiés au laboratoire ont été déterminés par des déroulages expérimentaux, sans barre de pression, avec une méthode de compensation de l'angle de dépouille linéaire. L'utilisation d'une barre de pression rotative (fortement recommandé) ou une méthode de compensation de l'angle de dépouille différente peuvent modifier légèrement ces paramètres de déroulage.

Une étude de grande envergure [49] réalisée avec un partenaire industriel dans le cadre du partenariat avec France Douglas a permis de valider ces paramètres sur un grand volume de billon (100 m^3 de bois). En même temps, l'élévation de la température des billons a été enregistrée, ce qui a permis de valider le modèle de prédiction de la température au cœur des billons, dans le cadre d'un étuvage industriel de douglas (voir Partie 2 - 5.6).

Deuxième partie : Modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles

Le processus de déroulage étant maintenant maitrisé à l'échelle du laboratoire, mais aussi à l'échelle industrielle, il est possible de s'intéresser à l'objectif principal de la thèse qui concerne la modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL.

Cela a nécessité, dans un premier temps, de valider la modélisation de billons intégrant les branches et de déterminer la position et la taille des nœuds générés par ces branches sur les placages déroulés. Ensuite il a fallu ajouter la modélisation de la perturbation des fibres liée directement aux nœuds et l'ajuster pour le douglas, afin de prédire les propriétés mécaniques locales de chaque placage. Enfin, une modélisation analytique des propriétés mécaniques des poutres a pu être réalisée en se basant sur les propriétés mécaniques locales de chaque placage.

1 - Modélisation de l'arbre, état de l'art

1.1 - Modèles de croissances

Comme rappelé dans l'introduction, le douglas est originaire de la côte ouest nord-américaine. De 1950 à 1980, l'importante exploitation de cette ressource aux États Unis, a suscité une activité de recherche forestière intense. Des forêts expérimentales ont été délimitées et plantées. De nombreuses études sur la sylviculture, les techniques d'exploitation et la protection du douglas, furent menées [67], [68] afin d'améliorer la production. Les premiers modèles numériques ont été développés au sud-ouest de l'Oregon, principalement par la Forest Intensified Research Program (FIR) [68].

En France, une interface et plateforme commune (CAPSIS) [69] a été développée dans le but de pouvoir utiliser plus facilement les différents modèles de croissance des arbres. Cette plateforme logicielle est dédiée à la simulation de la croissance et de la dynamique forestière. Elle est développée par l'INRA depuis 1994. CAPSIS permet d'intégrer différents modèles développés par les principaux chercheurs forestiers français (ONF, ENGREF, Cemagref, Cirad, AFOCEL, IDF, IFN) et Européen (ERTI (Budapest), INIA (Madrid)). Ces modèles de croissances permettent notamment de prédire la hauteur et le diamètre à 1,30 m des arbres en fonction de l'âge de l'individu, du type de sylviculture, de la placette forestière… Certains modèles permettent de prédire la forme du tronc afin d'estimer l'évolution de la quantité ainsi que de qualité du bois au cours du temps et les travaux à effectuer.

1.2 - Description et modélisation des branches

1.2.1 - Description

Les nœuds ont une forme directement liée à la croissance des branches. Osborne et Maguire [70] modélisent la géométrie des nœuds en extrapolant le développement des branches dans le temps, permettant ainsi, de prédire le diamètre et l'angle d'insertion de celles-ci. Les nœuds de douglas ont une forme caractéristique (Figure 47). Dans sa croissance, la branche va pousser assez verticalement dans les premiers cernes, avant de devenir de plus en plus horizontale. De plus, tant que la branche est vivante, son diamètre va grossir à chaque nouveau cerne. Le douglas étant peu sujet à l'élagage naturel, les branches, une fois mortes, vont rester en place et le nœud, engendré par cette branche morte, ne sera plus adhérent au bois et sera cylindrique (Figure 47).

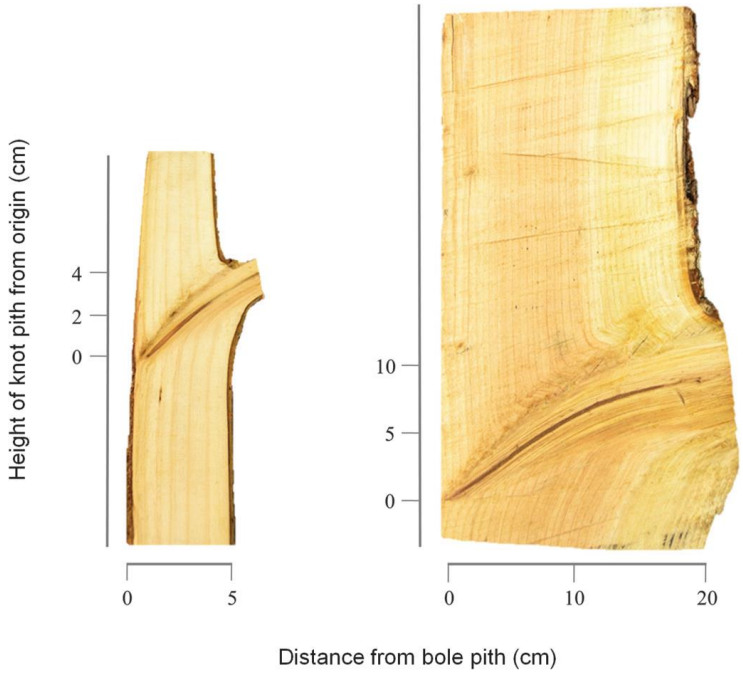


Figure 47 : Coupe LR d'un douglas montrant la moelle d'un nœud [70]

Dans le cas du déroulage, la partie de la branche ayant un angle d'insertion faible (proche de la moelle de l'arbre) n'est en général pas déroulée, car elle se trouve dans le noyau résiduel de déroulage. Mothe [71] modélise ainsi les branches :

- Si la branche est vivante, elle est modélisée comme un cône.
- Si la branche est morte, elle est modélisée par un cône jusqu'à sa mort puis par un cylindre pour la partie morte de la branche.

Il est alors possible de modéliser une branche par cinq critères (Figure 48). Ces critères pour chaque branche sont : l'azimut, l'angle d'insertion, la position suivant l'axe du tronc, le ratio de branche vivante et le diamètre externe (sous l'écorce). La partie du nœud issue de la branche vivante est ici définie par un cône (en bleu) et la partie issue de la branche morte par un cylindre (en rouge).

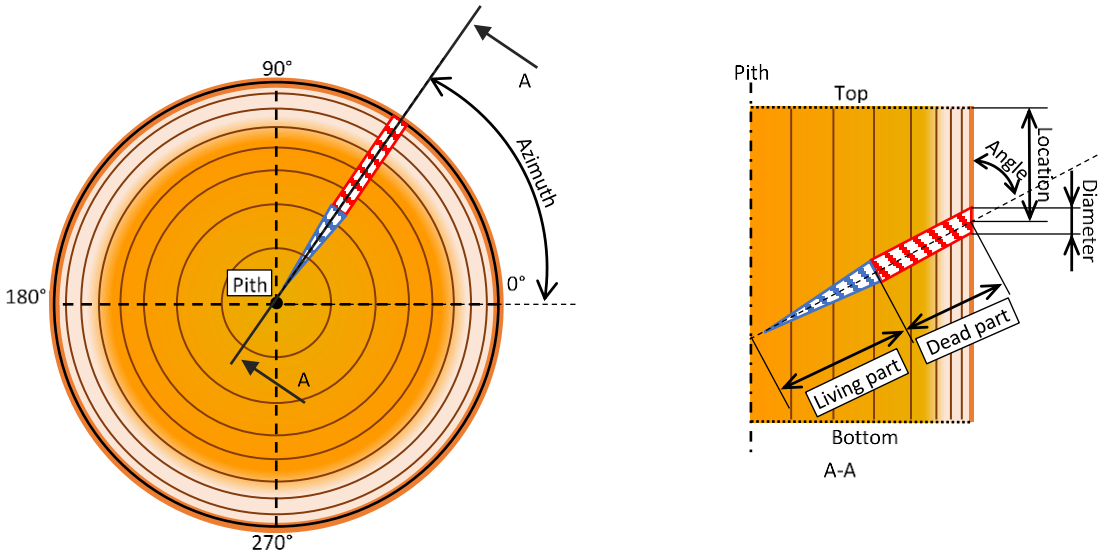


Figure 48 : Représentation des critères retenus pour la modélisation d'une branche

Le diamètre des branches, l'angle d'insertion et le nombre de nœuds varient en fonction de plusieurs paramètres et peuvent être modélisés (Deuxième partie, chapitre 1.2.2 ; 1.2.3 ; 1.2.4). Le ratio de branche vivante défini par l'équation (9) et également modélisé par plusieurs auteurs (Deuxième partie, chapitre 1.2.5).

$$Ratio\ de\ branche\ vivante = \left(\frac{Longeur\ de\ la\ partie\ vivante}{Longeur\ partie\ vivante + partie\ morte}\right) \qquad (9)$$

1.2.2 - Modélisation du diamètre des branches

Comme le montre la Figure 47, la croissance d'une branche a une forme particulière. Drewett [72] a analysé de nombreuses données sur des douglas provenant du Royaume-Uni afin d'ajuster des modèles permettant de prédire les différentes caractéristiques des branches. Dans un premier temps, l'auteur montre que les branches de douglas ont une forme circulaire (Figure 49). La régression (r^2 de 0,99) met en évidence la circularité des branches des douglas cultivés au Royaume-Uni.

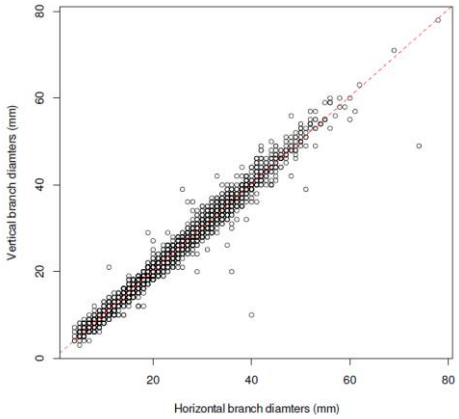


Figure 49 : Présentation du diamètre vertical en fonction du diamètre horizontal des branches [72]

Ensuite, l'auteur ajuste un modèle de prédiction du diamètre de branche dans la hauteur de l'arbre développé par Achim et al. [73] pour de l'Épicéa de Sitka.

Le diamètre des branches peut être estimé avec l'équation (10) :

$$Diamètre\ branche = a + i(1-h) \cdot e^{-b \cdot h} \qquad (10)$$

Où a, i et b sont déterminés empiriquement et h la hauteur relative dans l'arbre. Les différents paramètres sont décrits dans le Tableau 11:

Tableau 11 : Coefficients pour le modèle de diamètre de branche [72]

	Coefficients	a	i	b
Verticillaire	Dominant	4,16887	12,80877	-2,69347
	Co-dominant	2,34121	13,05438	-2,70156
	Sous-dominant	4,88472	13,00339	-2,47672
Inter-verticillaire	Dominant	6,0585	6,2130	-1,6969
	Co-Dominant	4,1987	8,0079	-1,8877
	Sous-dominant	4,4447	7,7001	-1,9891

La Figure 50 illustre le comportement de ce modèle. Elle montre qu'au pied de l'arbre, le diamètre des branches verticillaires et inter-verticillaires sont similaires, mais que le diamètre moyen des branches verticillaires (quelle que soit la classe de dominance) augmente plus rapidement que le diamètre des branches inter-verticillaires, pour atteindre un diamètre bien plus important.

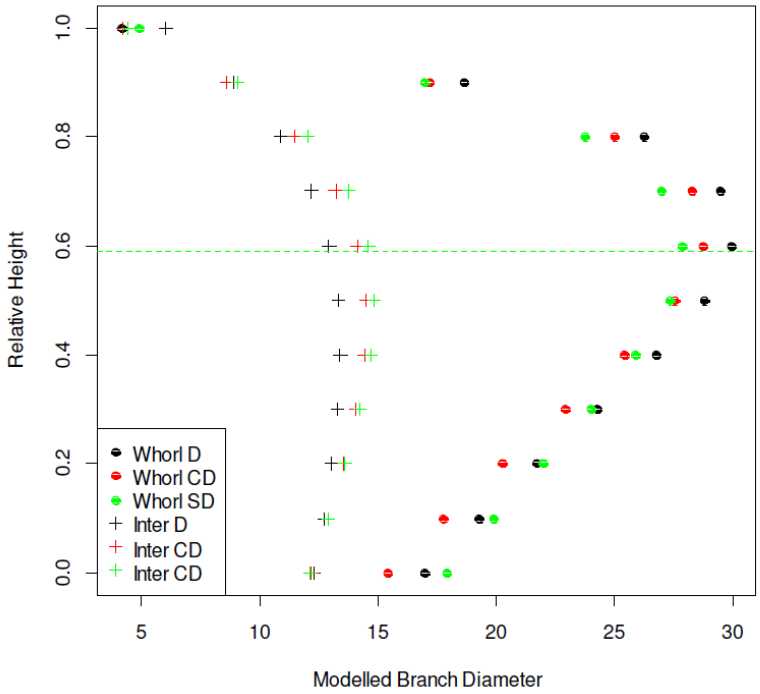


Figure 50 : Diamètre de branches modélisées en fonction de la hauteur relative [72]

Hein [74] pour du douglas allemand et par Maguire [75], [76] pour du douglas américain modélisent le diamètre des branches à l'intérieur du tronc suivant différents diamètre d'arbres et différentes vitesses de croissance. Les arbres de fort diamètre possèdent des branches d'un plus gros diamètre. A l'inverse, plus l'arbre est élancé plus ces branches auront un petit diamètre.

Pour ce mémoire de thèse, les diamètres des différentes branches ont été renseignés dans la base de données « *ModelFor* » (voir chapitre 1.3), il n'a donc pas été nécessaire de déterminer leurs diamètres.

1.2.3 - Modélisation de l'angle d'insertion

Drewett [72] propose un ajustement d'un modèle basé sur Achim et al. [73], pour modéliser l'angle d'insertion des branches.

$$Angle\ des\ branches = i \cdot e^{-\frac{a}{b-h}} \qquad (11)$$

Où a, i et b sont déterminés empiriquement et h la hauteur relative dans l'arbre. Les différents paramètres sont décrits dans le Tableau 12 :

Tableau 12 : Coefficients pour le modèle de prédiction de l'angle des branches [72]

Coefficients	***i***	***a***	***b***
Tout	78,627905	0,015134	1,015814
Verticillaire	76,932053	0,014610	1,017110
Inter-verticillaire	82,966088	0,019036	1,017057

La Figure 51 montre que l'angle d'insertion des branches, prédit sur la base du modèle d'Achim et al. (2006), et ajusté par Drewett, est plutôt faible (raide) vers le sommet de l'arbre, et augmente rapidement (plus horizontal) avant la moitié de la hauteur. A partir du premier verticille vivant (la ligne verte) vers le bas de l'arbre, l'angle prévu n'augmente pas de manière significative. Le modèle prédit que les branches inter-verticillaires ont un angle d'insertion plus élevé que les branches verticillaires, sauf pour le sommet de l'arbre.

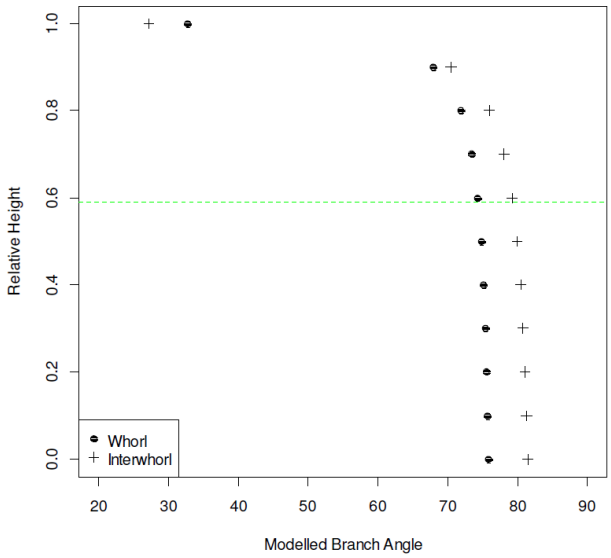


Figure 51 : Modélisation de l'angle d'insertion des branches suivant la hauteur relative de l'arbre [72]

Hein [74] modélise l'angle d'insertion des branches le long du rayon (coupe LR). On voit que les branches jeunes ont un angle d'insertion faible et qu'il devient de plus en plus élevé en vieillissant (Figure 52) (avec hd : Ratio hauteur de l'arbre/ diamètre ; brd : diamètre de branche).

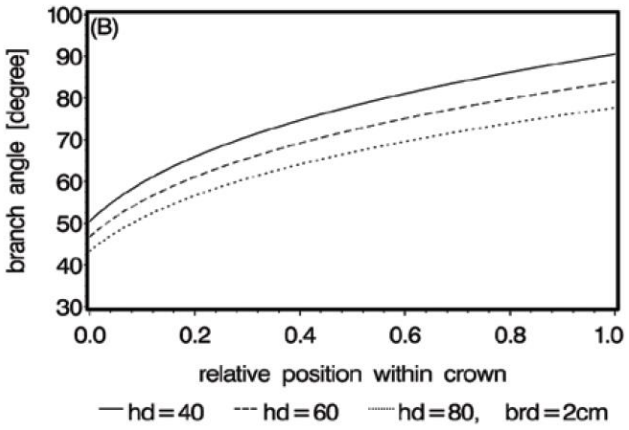


Figure 52 : Modélisation de l'angle d'insertion suivant la position dans le rayon [74]

1.2.4 - Modélisation du nombre de branches

Le nombre de branches verticillaires dépend fortement du taux de croissance annuelle de l'arbre (appelé GU pour « growth unit »). Drewett [72] et Hein [74] proposent des modèles afin de déterminer pour le douglas le nombre de branches par verticille. Ces auteurs montrent que plus l'incrément annuel est important, plus le nombre de branches par cernes est élevé. On voit également que plus les arbres sont élancés moins ils ont de branches par verticille.

La base de données utilisée par la suite nous décrit chaque branche individuellement, il ne sera donc pas nécessaire de déterminer le nombre de branche par verticille.

1.2.5- Mortalité des branches

Pour des douglas ayant été cultivés en forêt, les branches basses meurent au fur et à mesure de la croissance de l'arbre, laissant la place aux branches situées en partie hautes de l'arbre ayant la capacité de faire la photosynthèse et le couvert forestier. Drewett [72] propose deux modèles, basés sur celui présenté dans Achim et al. [73], afin de prédire le statut (vivantes ou mortes) des branches en fonction de leur hauteur dans l'arbre et de la vitesse de croissance de l'arbre.

La Figure 53 présente la hauteur relative (par rapport à la hauteur de l'arbre) de la branche en fonction de sa probabilité d'être vivante. Il est à noter que tout ce qui se trouve au-dessus du premier verticille vivant (trait vert en pointillé) a une forte probabilité d'être vivant.

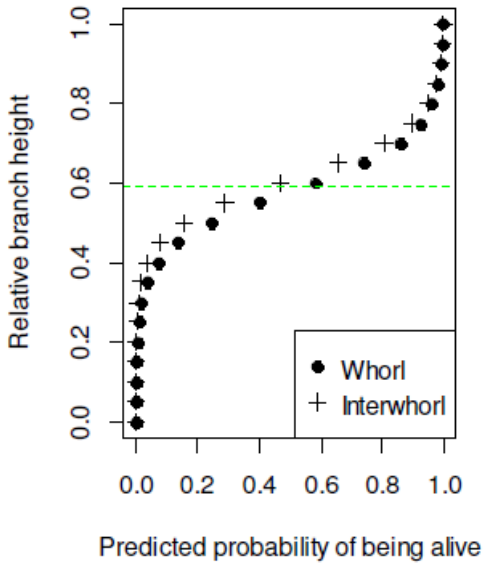


Figure 53 : Modélisation du statut des branches en fonction de la hauteur relative de l'arbre [72].

Hein [74] propose un modèle de prédiction du statut de la branche le long d'un rayon (coupe LR) radiale. La Figure 54 montre que, pour les branches mortes, 0,6 diamètre semble une zone où la branche à de grandes chances d'être vivante.

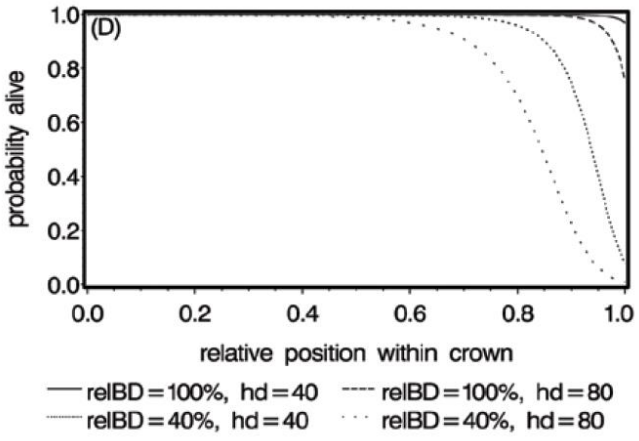


Figure 54 : Modélisation du statut de la branche en fonction de sa position radiale [74]

1.3 - Base de données « *ModelFor* »

Le jeu de données « *ModelFor* » provient d'une étude menée par l'ONF et l'INRAE, ayant pour but d'améliorer les modèles de croissance et de qualité des arbres suivant leurs itinéraires sylvicoles. Pour notre étude, nous avons sélectionné les données du site du Grison (71) appartenant au réseau du groupe GIS Coopérative de données. Ce site a été planté au printemps 1972 et les données arbres ont été relevées en 2015, soit à l'âge de 43 ans (date d'abatage). Trois parcelles aux sylvicultures différentes ont été échantillonnées :

- Une placette témoin : plantée à 1600 plants/ha et, sans aucune intervention depuis, arrive en 2015 à 1045 plants/ha. Son accroissement radial moyen (entre fin 1991 et fin 2017) est de 2.5 mm/an pour finir avec un diamètre moyen, en 2017, de 34.4 cm. La hauteur dominante en 2017 est de 33 m pour cette modalité.
- Une placette à sylviculture très dynamique : plantée à 1300 plants/ha et, éclaircie jusqu'à 167 plants/ha en 2015. Son accroissement radial moyen (entre fin 1991 et fin 2017) est de 6.2 mm/an pour finir avec un diamètre moyen, en 2017, de 51.4 cm. La hauteur dominante en 2017 est de 30.8 m pour cette modalité.
- Une placette à sylviculture intermédiaire : planté à 1300 plants /ha et, éclaircie jusqu'à 446 plants/ha en 2015. Son accroissement radial moyen (entre fin 1991 et fin 2017) est de 3.9 mm/an pour finir avec un diamètre moyen, en 2017, de 39.6 cm. La hauteur dominante en 2017 est de 30.2 m pour cette modalité.

Cinq arbres par placette ont été abattus. Plusieurs mesures ont été effectuées sur ces arbres :

- Longueur totale de l'arbre
- Circonférence à 1,3 m
- Hauteur de chaque verticille et de chaque branche
- Nombre de branches / verticille
- Diamètre de chaque branche mesuré contre le tronc
- Statut mort ou vivant de chaque branche
- La hauteur de la 1ère branche verte et du premier verticille vert

Des rondelles ont aussi pu être extraites à différentes hauteurs afin de déterminer la circonférence le long du tronc, de mesurer la largeur de cernes et la densité du bois.

Ces données ont été remises en forme par Jean Weber [77] dans le cadre du projet ExtraFor'Est de la base de données de l'INRAE puis extraites de celle-ci.

1.4 - Récapitulatif des connaissances sur la modélisation du douglas

Nous avons vu que le douglas est un arbre qui a fait l'objet de nombreuses études et dont les caractéristiques anatomiques et mécaniques sont déjà bien connues. Des travaux ont permis de modéliser sa croissance, sa forme ainsi que sa branchaison. De plus, une base de données contenant les mesures « arbres » de plusieurs douglas issus d'un site d'expérimentation français (Forêt domaniale du Grison) va nous permettre de tester les modèles développés au cours de cette étude sur des arbres ayant subi différents itinéraires sylvicoles.

La disposition et la taille des nœuds présents dans un placage ont un impact de premier ordre sur ses propriétés mécaniques. Elles découlent directement de l'agencement des branches de l'arbre. Il est simple de faire l'analogie avec un rouleau de papier sur lequel on perce un trou, lorsqu'on le déroule le trou va se répéter sur le ruban de papier déroulé et on comprend que la forme, la taille et la répartition dépendent de la forme du perçage et de sa direction vis-à-vis de l'axe du rouleau. Nous avons donc fait le choix de modéliser chaque branche de l'arbre afin d'en déduire le schéma de répartition associé sur le ruban de déroulage. Dans un premier temps nous avons cherché à valider cette approche par une campagne expérimentale dédiée. A partir de la description extérieure de la branchaison des billons, des placages virtuels ont été générés et comparés aux placages réels déroulés sur la ligne du LaBoMaP. Ensuite, nous avons appliqué la méthode sur les arbres issus de la base de données « *ModelFor* ».

2 - Modélisation de la disposition et de la taille des nœuds d'un placage en fonction de la branchaison

2.1 - Description des billons

Deux billons, débités dans le même arbre, issus de la forêt de Cluny (altitude 390 m) et âgés de 29 ans, ont été sélectionnés pour leur proportion de branches vivantes.



Figure 55 : Tronçonnage de deux billons servant à l'étude

La présence de branches vivantes et de branches mortes au moment de l'abatage, permet de mesurer proprement les différents paramètres de branchaison. Ces deux billons présentent une légère conicité (proche de 0,4°) et leur croissance radiale annuelle moyenne est de 5,7 mm. Le premier billon (billon 1) mesure 790 mm de long pour un diamètre de 330 mm fin bout et 340 mm gros bout, il est situé dans l'arbre au-dessus du second billon. Le second billon (billon 2) mesure 790 mm de long pour un diamètre de 340 mm fin bout et 350 mm gros bout.

Les cinq critères retenus pour modéliser les branches ont été mesurés à l'aide de rapporteur, pied à coulisse et mètre ruban. L'angle d'insertion pour les branches élaguées au bord de l'écorce, et donc non mesurable, a été fixé à 80° en se basant sur les données de [72]. Le ratio de branche vivante a été fixé à 1 pour les branches vivantes et à 0,6 pour les branches mortes conformément aux données de la littérature.

Onze branches sont visibles sur le billon 1. Ce billon comporte un verticille entre 400 mm et 450 mm depuis la base. Neuf branches sont visibles sur le billon 2. Il contient un verticille entre 350 mm et 450 mm depuis la base (Tableau 13).

Tableau 13 : Mesure des branches pour les deux billons (les branches surlignées représentent les branches élaguées)

	Position verticale (mm)	**Diamètre (mm)**	**Angle d'insertion (°)**	**Azimut (°)**	**Ratio de branche vivante (-)**
Billon 1	617.0	42.0	78.0	101	0.6
	444.7	60.6	80.5	182	1.0
	424.1	35.9	80.0	344	0.6
	410.2	61.6	82.0	133	1.0
	417.1	37.8	80.0	264	0.6
	393.6	34.9	71.0	50	0.6
	338.2	25.6	80.0	306	0.6
	328.3	25.5	80.0	182	0.6
	259.9	20.1	80.0	141	0.6
	238.8	20.5	80.0	283	0.6
	115.5	39.0	80.0	221	0.6
Billon 2	450.7	38.6	80.0	190	0.6
	429.5	41.0	87.0	21	0.6
	428.2	33.7	80.0	315	0.6
	418.4	33.2	80.0	254	0.6
	372.5	55.0	81.0	120	1.0
	347.5	35.0	80.0	38	0.6
	277.2	25.6	80.0	110	0.6
	225.0	30.0	80.0	38	0.6
	140.0	20.0	80.0	101	0.6

2.2 - Modélisation numérique du billon et positionnement des nœuds

En connaissant les différents paramètres de branchaison, il est possible de reconstruire l'arbre en 3 dimensions grâce à la librairie OpenGl [78]. Une interface graphique utilisant la librairie QT5 [79] (Figure 56) a été développée afin d'interagir directement sur les paramètres de branchaison et de modifier le billon virtuel.



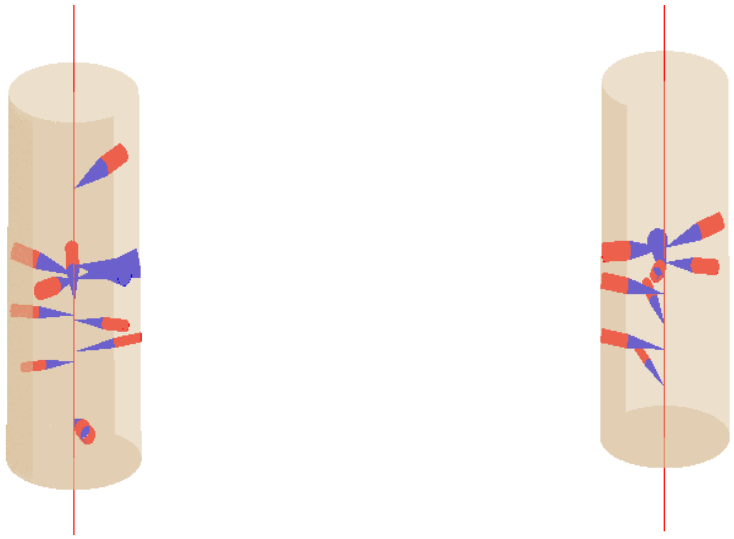
Figure 56 : Interface graphique présentant la modélisation et permettant d'effectuer le déroulage virtuel des billons

Pour cela, toutes les surfaces sont représentées par des polygones triangulaires (élément *GL_TRIANGLE_STRIP* de la librairie OpenGL [78]). Les fichiers sont disponibles à l'URL suivant : « https://gitlab.ensam.eu/2017-2184/mub-virtual-peeling ». La fonction « *makeLog* » permet de générer le fût du billon. Celui-ci est construit par un ensemble de cercles définis à différentes hauteurs (Figure 56-Table 1). Une autre fonction (« *makeBranche* ») permet de générer les branches. Ici, les branches sont définies individuellement par leur hauteur dans

l’arbre, leur rayon, leur angle d’insertion, leur azimut et leur ratio de branche vivante (Figure 56 - Table 2). Cette fonction crée un cylindre et/ou un cône comme décrit dans le chapitre 1.2.

Cette interface graphique permet de valider visuellement la forme de l’arbre et la répartition des branches dans l’arbre. Il est possible d’importer rapidement toute une base de données afin de vérifier sa cohérence.

Il est aussi possible de représenter uniquement un billon défini entre deux cercles avec ses branches associées. La Figure 57 représente les deux billons décrits dans le chapitre 2.1 et déroulés au laboratoire dans le but de valider la méthode. Les cylindres rouges représentent la partie morte des branches et les cônes bleus la partie vivante des branches



(**a**) (**b**)

Figure 57 : Modélisation 3D du billon 1 (a) et du billon 2 (b)

Ensuite, un déroulage virtuel du billon a été implémenté. Pour cela, on représente la position du bec du couteau par une ligne suivant une trajectoire en spirale d’Archimède. Les intersections entre cette ligne et les cylindres et/ou cônes des branches sont détectées. En connaissant les points d’intersection, il est possible de reconstruire la forme, la taille et la répartition des nœuds sur le ruban de déroulage.

Le ruban est ensuite virtuellement massicoté afin de produire des placages virtuels issus des billons ou des arbres modélisés.

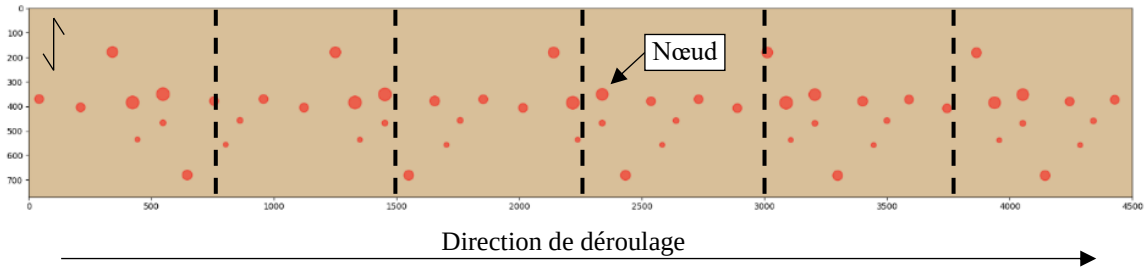


Figure 58 : Exemple d'une cartographie de nœuds issue de la méthode de déroulage virtuel

2.3 - Validation

Les deux billons présentés au chapitre 2.1 ont été déroulés sur la dérouleuse instrumentée du LaBoMaP. L'épaisseur de déroulage a été réglée à 3 mm (valeur standard pour la fabrication de LVL). La vitesse de déroulage a été fixée à une valeur constante de 1,5 $m.s^{-1}$. Les placages ont ensuite été massicotés à une dimension de 750 mm.

Après déroulage, chaque placage a été photographié (LG Nexus 5X - 12.3 mégapixels) afin de détecter la position des nœuds. En effet, la couleur des nœuds diffère du bois sain permettant ainsi leur détection. Chaque image a été corrigée afin d'enlever l'effet de distorsion liée à l'objectif grâce à la librairie OpenCV et aux fonctions « *findHomography* » et « *wrapPerspective* ». Les nœuds ont été positionnés manuellement sur ces images couleur. Comme l'angle d'insertion des branches est proche de 80°, la forme des nœuds est considérée comme parfaitement circulaire (Figure 59). Cette approximation est acceptable, en mode de coupe (0-90°) car les branches sont presque horizontales dans la zone déroulée d'après la littérature.

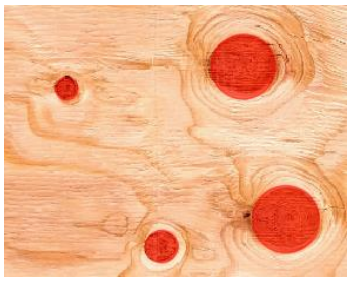


Figure 59 : Exemple de nœuds considérés comme des cercles

Le centre et le rayon des nœuds, modélisés grâce au déroulage virtuel, ont été comparés à ceux détectés sur les photographies. La Figure 60-a et b présente les nœuds mesurés en rouge et les nœuds prédits en vert, superposés sur l'image couleur pour les trois premiers et les trois derniers placages des deux billons. La synchronisation entre le ruban de placage virtuel et le ruban de placage réel est réalisée sur le premier placage.

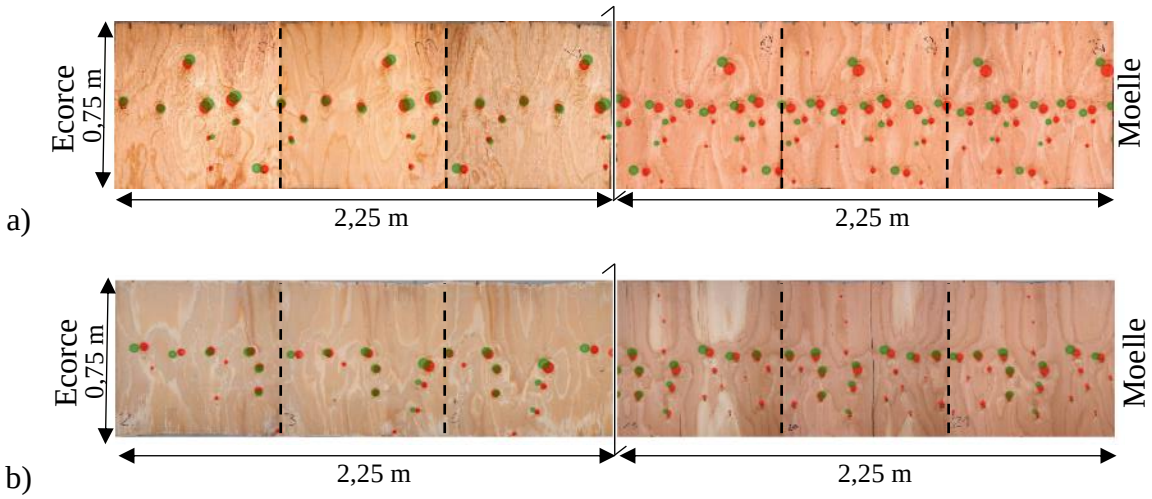


Figure 60 : Nœuds prédits en vert et nœuds mesurés en rouge pour le début et la fin du ruban de déroulage du billon 1 (a) et du billon 2 (b)

Seules les branches visibles avant le déroulage ont pu être modélisées, les branches mortes et recouvertes n'ont pas pu l'être. Sur tous les placages déroulés avec les deux billons, 369 nœuds ont été prédits sur un total de 537 nœuds ce qui représente 69% du total. Cependant, les nœuds non modélisés sont principalement petits, 90% ont un rayon inférieur à 11 mm. Le rayon moyen des nœuds non modélisés est de 7,88 mm alors qu'il est de 17,12 mm pour les nœuds modélisés (Figure 61-a).

La distance entre le centre les nœuds mesurés et les nœuds prédits a été représentée (Figure 61-b). L'erreur de positionnement des nœuds peut être due à un léger excentrement des billons sur la dérouleuse ou à l'incertitude de mesure des branches. Le modèle (cône-cylindre) a aussi pu affecter l'estimation du rayon. La distance médiane est de 19,91 mm. Les écarts sur la position du centre des nœuds sont donc tout à fait acceptables pour permettre de prédire l'effet de la position de ces nœuds sur les propriétés mécaniques des placages et des poutres reconstituées.

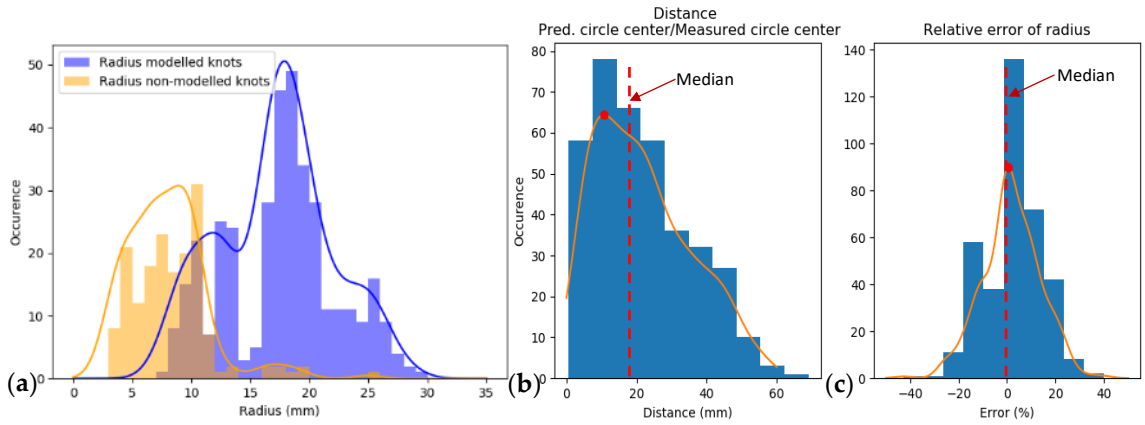


Figure 61 : (a) Histogramme des rayons des nœuds ; (b) Histogramme des distances entre les centres des nœuds modélisés et de nœuds mesurés ; (c) Histogramme des erreurs relatives entre le rayon des nœuds modélisés et des nœuds mesurés [80].

L'erreur relative médiane entre le rayon mesuré et le rayon modélisé est proche de 0% (Figure 61-c) et sa distribution est symétrique. L'hypothèse prise pour ces deux billons (ratio de 0,6 entre la partie vivante et la partie morte de la branche pour les branches mortes) semble donc acceptable. La taille et le nombre de défauts seront donc bien pris en compte afin de mesurer les propriétés mécaniques des poutres.

Cette approche permet donc de dérouler virtuellement un billon à partir de la connaissance d'informations basiques de la branchaison et de la sylviculture appliquée. Nous avons donc recherché des placettes avec des itinéraires sylvicoles « contrastés » dont la définition, en particulier de la branchaison, permettrait d'utiliser ce modèle. Les équipes de l'ONF et de l'INRAE à Champenoux nous ont offert la possibilité de travailler sur des arbres de la forêt du Grison (parcelle expérimentale de l'ONF), issus de la base de données « *ModelFor* » qui remplissaient ces caractéristiques.

2.4 - Modélisation d'arbres issus de la base de données « *ModelFor* »

Comme décrit dans le chapitre 1.3 nous avons à notre disposition les données suivantes relevées pour chaque arbre de chaque parcelle :

- Longueur totale de l'arbre
- Circonférence à 1,3 m
- Hauteur de chaque branche et de chaque verticille
- Nombre de branches / verticille
- Diamètre de chaque branche
- Statut mort ou vivant de chaque branche

Pour construire chaque arbre, les branches ont été réparties aléatoirement pour chaque verticille sur la périphérie de l'arbre (l'azimut des branches n'étant pas connu sur cette placette). Une valeur aléatoire (entre -180 et +180°) a été ajoutée à l'azimut des branches de chaque verticille, de manière à éviter l'alignement des branches dans la hauteur. Ensuite, les branches sont réparties autour du verticille et une nouvelle valeur aléatoire (entre 0 et 10°) est ajoutée à l'azimut de chaque branche, afin qu'elles soient réparties aléatoirement au sein même du verticille.

Les hypothèses sur l'angle d'insertion et le ratio de branche vivante, validées dans la partie précédente, sont utilisées pour la modélisation des arbres issus de la base de données ModelFor. Le ratio de branche vivante est fixé à 1 pour les branches vivantes et à 0.6 pour les branches mortes car il n'a pas pu être relevé. Cette hypothèse, validée pour les deux billons précédents, est en adéquation avec la littérature (voir 1.2.5). L'angle d'insertion, nécessaire à la modélisation et manquant dans le jeu de données, est fixé à 80° pour toutes les branches. En effet, la modélisation de Drewett [72] sur l'angle d'insertion montre que jusqu'à 80% de la hauteur de l'arbre, cette valeur d'angle d'insertion est cohérente. L'arbre est tronçonné virtuellement en billon de 2 500 mm (largeur d'une dérouleuse industrielle) jusqu'à ce que le diamètre de l'arbre soit inférieur à 200 mm (en deçà le procédé de déroulage n'est plus rentable), les billons ayant un diamètre inférieur à 200 mm seront souvent issus du houppier. Les placages sont ensuite massicotés à une largeur de 1 250 mm. La Figure 62 représente : à gauche l'arbre modélisé en 3D avec la longueur des branches multipliées par un facteur 15 afin de mieux les visualiser, à droite les placages de cet arbre déroulés et assemblés, et un zoom sur une feuille de placage. On reconnait plusieurs verticilles, mais aussi certaines branches inter-verticillaires. Cet arbre a pu être tronçonné en 7 billons avec un diamètre supérieur à 200 mm. Le déroulage virtuel commence pour chaque billon par une mise au rond (non représentée) au diamètre fin bout.

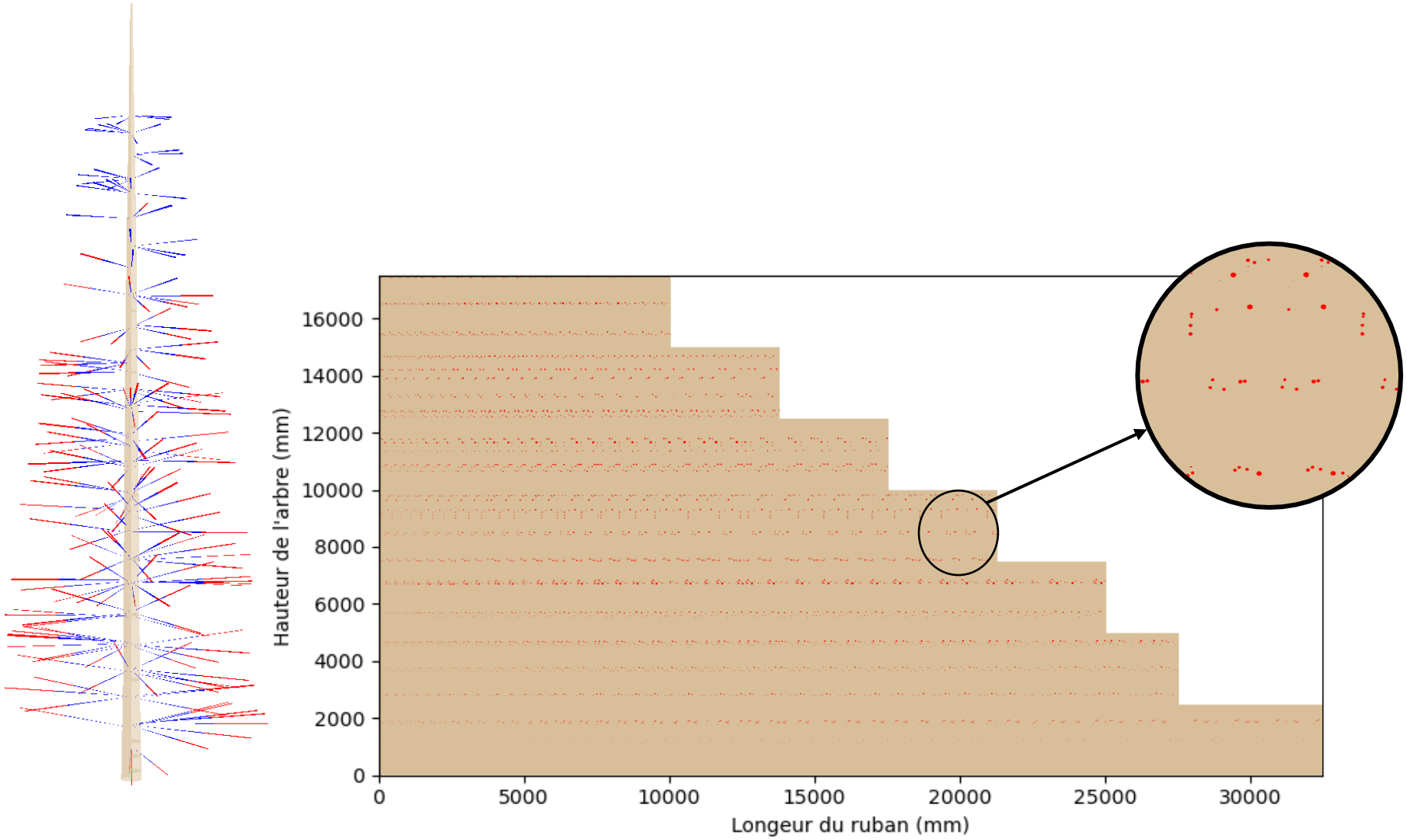


Figure 62 : Modélisation d'un arbre entier issu de la base de données de la forêt du Grison

2.5 - Synthèse

Nous avons validé que le modèle cône-cylindre pour modéliser un nœud, bien que perfectible, permet, en vue de la prédiction des propriétés mécaniques de placages, une estimation acceptable de la position et du diamètre des nœuds, avec une erreur moyenne de positionnement inférieur à 20 mm et une faible erreur de diamètre.

Une interface graphique a été développée afin de visualiser les arbres modélisés, et un déroulage virtuel a été implémenté afin de définir la position et le diamètre de chaque nœud sur les placages.

Il est ainsi possible d'importer en particulier les 15 arbres issus de la base de données « *ModelFor* » afin d'estimer la position et le diamètre des nœuds de chaque placage.

La localisation et la taille des nœuds déterminés, il est maintenant possible de modéliser une cartographie d'orientation des fibres. En effet, les branches dévient les fibres du bois affaiblissant localement les propriétés du bois. Nous allons maintenant voir une méthode permettant de modéliser cette déviation. Cette méthode a été ajustée pour le cas du douglas.

3 - Modélisation de la perturbation de l'orientation des fibres autour des nœuds

Comme nous l'avons vu dans la première partie de cette thèse, le bois est un matériau anisotrope dont les propriétés mécaniques sont optimales dans la direction de ses fibres. Les propriétés mécaniques transverses sont approximativement 20 fois inférieures à celles dans le sens des fibres. La connaissance de leur direction est donc essentielle pour estimer efficacement les propriétés mécaniques. Les nœuds engendrent une déviation de la direction des fibres à leur voisinage, ce qui va localement affaiblir les propriétés mécaniques du matériau. Un modèle basé sur la mécanique des fluides décrit dans [81], et développé par la suite par Foley [82], propose une prédiction de l'orientation des fibres au voisinage des nœuds. Ce modèle apparait bien adapté pour décrire la déviation de la direction des fibres dans le cas d'une coupe par déroulage

Dans un premier temps, nous avons adapté ce modèle pour des placages issus de données de billons artificiels. Afin de valider et d'optimiser ce modèle, pour des billons de douglas, nous devions disposer d'une cartographie complète de l'orientation locale des fibres des placages. La plateforme de mesure du LaBoMaP étant plutôt dédiée à la caractérisation de planches, un scanner (LOOBAR) a été conçu et réalisé, par les ingénieurs de l'équipe d'AMVALOR adossée au LaBoMaP, pour cartographier spécifiquement des placages sur la ligne de déroulage du laboratoire.

3.1 - Les nœuds et leurs influences sur l'orientation des fibres

Les nœuds, comme expliqués au chapitre 1.2.1, sont directement liés à la taille et à la forme des branches. Les branches vivantes grossissent chaque année grâce à la croissance secondaire. Shigo [83] a présenté une théorie sur la connexion entre les fibres du tronc et les branches. Il affirme que les fibres des nœuds se forment au début de la saison de croissance et que la croissance des branches est presque complète avant que la croissance de la tige ne commence. Selon Shigo [83], les couches de fibres créées lors de la croissance annuelle de la tige passent autour de la branche de manière à la maintenir fermement en place, ce qui explique la résistance des attaches de la branche malgré la faible connexion de fibres (Figure 63). Les fibres vont ainsi

avoir deux types de déviation autour des nœuds suivant la période de croissance du bois. Ces deux types sont nommés par Foley [82] motif α et motif β respectivement.

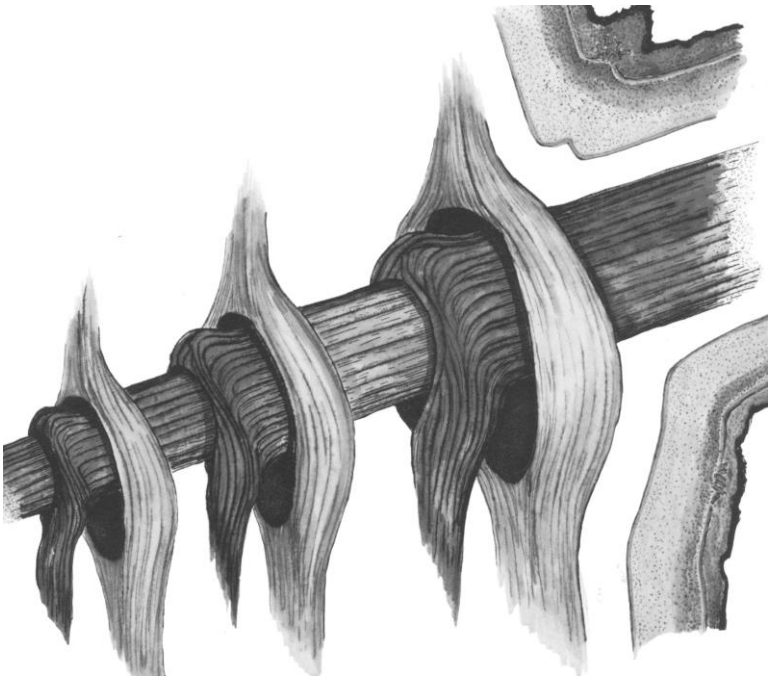


Figure 63 : Illustration de la théorie de Shigo sur la formation des nœuds

Foley [82] adapte le modèle de Goodman and Bodig [81], nommée « *Flow-grain analogy* », permettant de modéliser la déviation des fibres autour des nœuds. Ce modèle est basé sur l'ovale de Rankine, une théorie issue de la mécanique des fluides qui permet de modéliser l'écoulement d'un fluide autour d'un ovale. Pour ce faire, l'ovale est généré par une source et un puits de débit (m) équivalent, séparé d'une distance (a) du centre de l'ovale (voir Figure 64). La distance et le débit sont ajustés de façon à avoir une ligne de flux (ψ) nulle au niveau de la périphérie du nœud. L'orientation des fibres sera donc calculée comme l'angle du vecteur vitesse. Les explications mathématiques des calculs sont données en Annexe B et la fonction développée en langage Python à l'adresse : https://gitlab.ensam.eu/2017-2184/mub-rankine-oval.

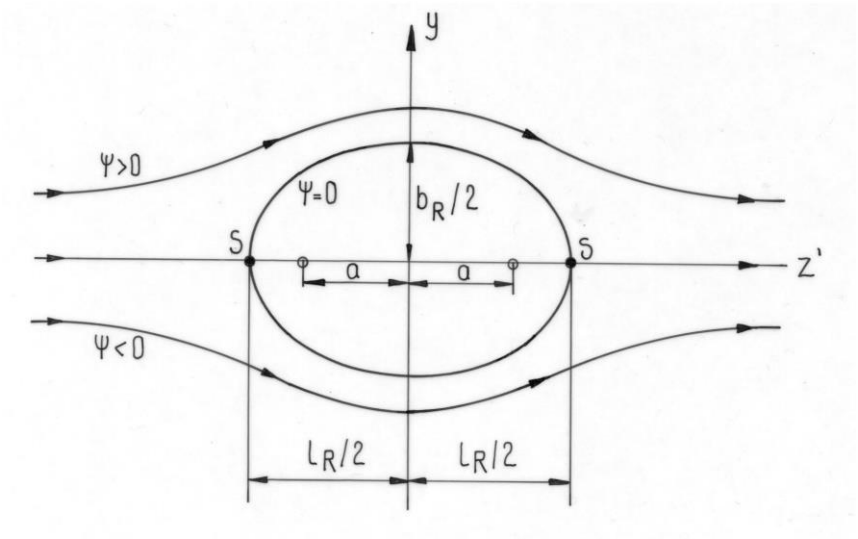


Figure 64 : Illustration de la fonction de flux d'après Foley [82]

L'auteur définit ensuite plusieurs critères, listés dans le Tableau 14, lui permettant de modifier la déviation des fibres autour des nœuds suivant la connexion des fibres aux nœuds (Figure 65).

Tableau 14 : Calibration des valeurs A_{flow} et B_{flow} par Foley

	A_{flow}	B_{flow}
α / Above knot	1,33	0,045
α / Below knot	0,67	0,05
β / Above knot	1	0
β / Below knot	1	0,06

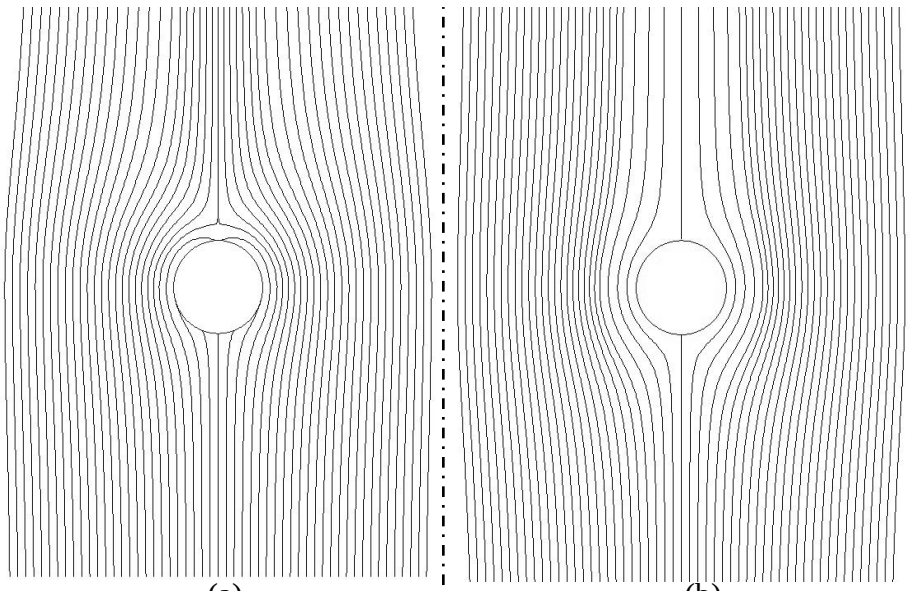


Figure 65 : (a) Motif de déviation des fibres de type α, (b) Motif de déviation des fibres de type β, calibré et calculé par Foley [82]

3.2 - Principe du scanner LOOBAR

Le LOOBAR (Local Online Orientation fiBer AnalyseR) est un scanner basé sur l'effet trachéide [84]–[93]. Cet effet apparait lorsqu'un laser éclaire de façon ponctuelle (disque) une surface de bois. La lumière se propage surtout dans la direction des fibres ainsi, le point laser initialement de forme circulaire, se déforme en une ellipse dont le grand axe est orienté dans le sens des fibres. Ce scanner est composé de cinquante pointeurs laser de 5-mW, répartis uniformément sur une ligne de 800 mm dans l'axe principal des fibres (perpendiculaire au sens de défilement du ruban sur la dérouleuse) (Figure 66 et Figure 67). Quatre caméras (Basler acA2440-75 µm), ayant une résolution de 2048 (sens principal des fibres) x 120 pixels (sens du défilement), permettent d'acquérir jusqu'à 1000 images par seconde. A cette fréquence, et avec une vitesse de déroulage de 1,5 $m.s^{-1}$, la résolution dans le sens perpendiculaire aux fibres est proche de 3 mm. La résolution dans la direction des fibres est égale à la distance entre le centre des ellipses et vaut environ 16 mm. Chaque pointeur laser est calibré individuellement afin de restituer un flux radiant de 1 mW (pour du douglas) étalonné par une photodiode laser (Thorlab PM16-151). Cette puissance est adaptée selon l'essence de bois considérée.

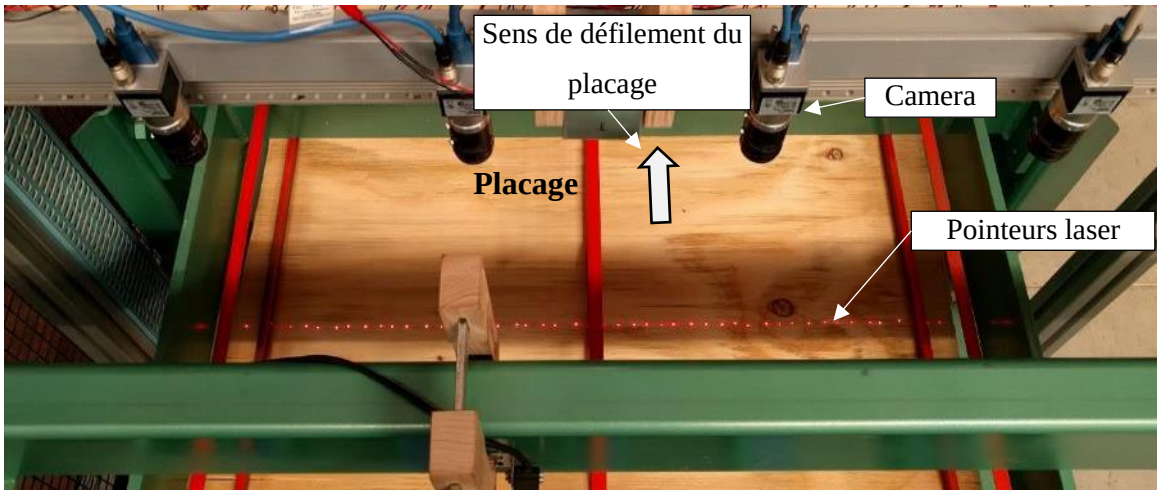


Figure 66 : Image du scanner laser LOOBAR

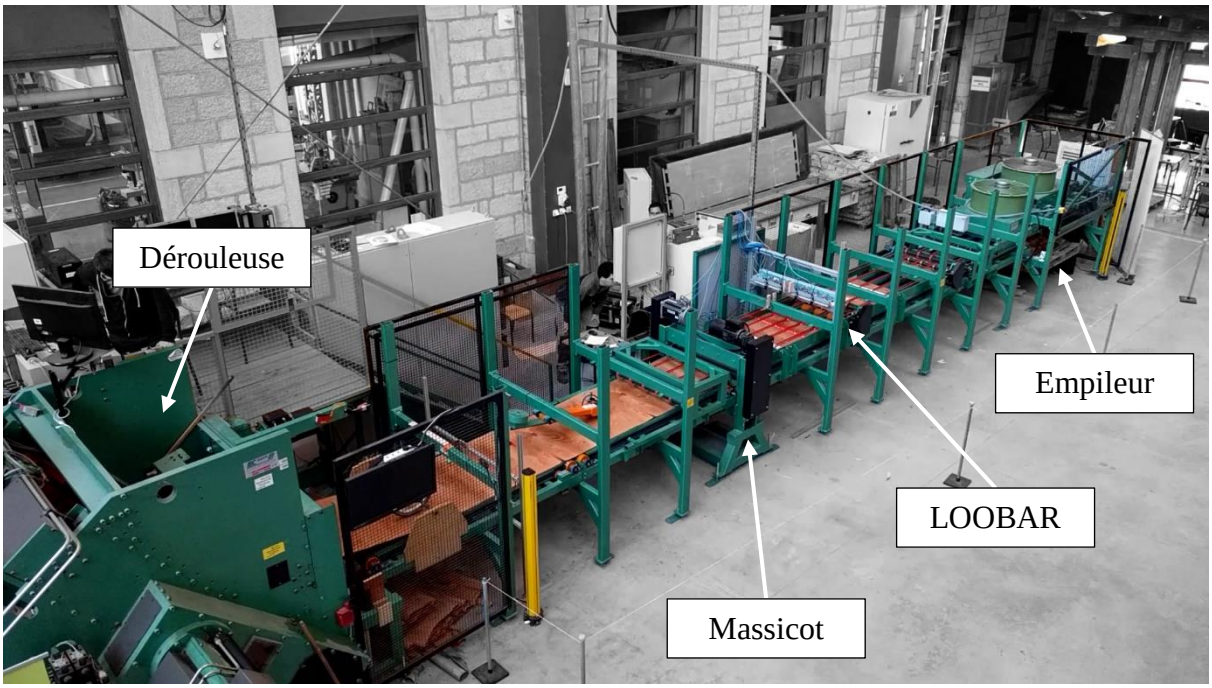


Figure 67 : Implantation du LOOBAR sur la ligne de déroulage Equipex du LaBoMaP

La Figure 68 présente les différentes étapes permettant de déterminer l'orientation des fibres grâce au LOOBAR. La capture d'image de chaque caméra est déclenchée de façon synchrone en fonction de la vitesse du tapis de convoyage du ruban ; ceci afin de pouvoir suivre les éventuelles variations de vitesse dues aux asservissements et, ainsi, garantir une résolution constante dans le sens perpendiculaire aux fibres (Figure 68-a). Ces images sont ensuite assemblées sur une seule image contenant les valeurs brutes de mesure (Figure 68-b) (en

prenant en compte les zones de superposition entre caméras). Cette image brute est ensuite binarisée afin d'isoler les ellipses (Figure 68-c).

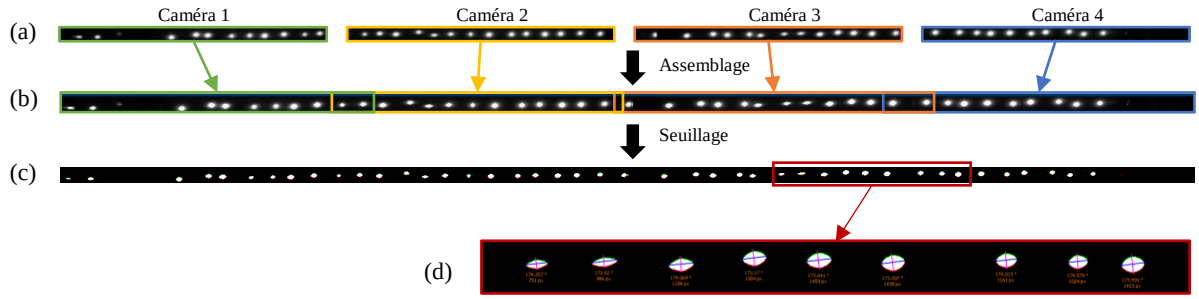


Figure 68 : Acquisition et traitement des images prises par les caméras du LOOBAR

Un traitement (Figure 68-d) réalisé en langage Python permet ensuite de détecter les ellipses grâce à la fonction « *FitEllipse* » de la librairie OpenCv [94]. Cette fonction calcule et fournit la position verticale et horizontale du centre de l'ellipse, la longueur du grand et du petit axe de l'ellipse, ainsi que son angle par rapport à la direction principale des fibres (voir Figure 69).

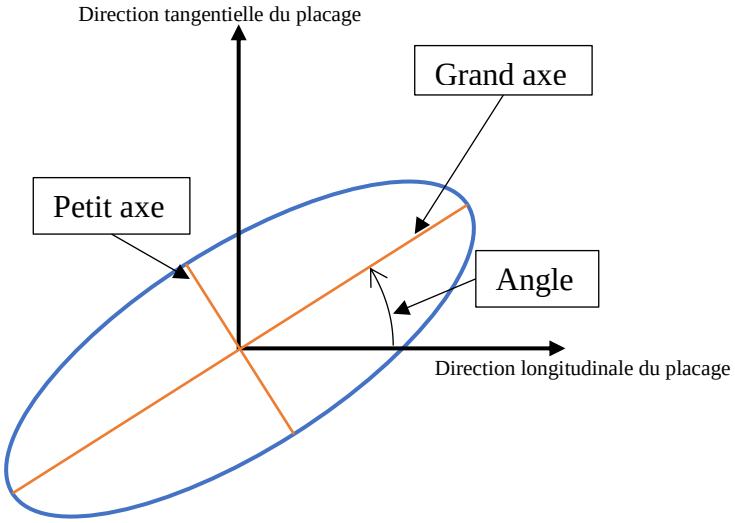


Figure 69 : Paramètres d'une ellipse

Il est ensuite possible d'extraire une cartographie d'orientation des fibres contenant toutes ces informations. En analysant le ratio « grand axe / petit axe », il est aussi possible de détecter les zones de bois de printemps et de bois d'été [95].

3.3 - Modèle de déviation basé sur la méthode de l'ovale de Rankine

Comme présenté précédemment, il est possible de prédire la déviation des fibres au voisinage des nœuds en se basant sur un modèle de mécanique des fluides. Pour ce faire, les nœuds sont considérés comme un obstacle à l'écoulement d'un fluide.

Nous avons choisi d'appliquer cette méthode pour chaque nœud (avec une section simplifiée à un cercle) détecté sur les placages, afin d'estimer l'orientation locale des fibres au voisinage des nœuds sur les deux billons décrits au chapitre 2.1. Cette approche pourrait nous permettre, à terme, de nous passer de la mesure sur les placages et de prédire la déviation de l'angle des fibres directement à partir d'une description basique de la nodosité du billon.

La Figure 70 présente une cartographie de l'orientation des fibres du bois, prédite par le modèle de déviation des fibres, basé sur la méthode de l'ovale de Rankine pour les six premiers placages du premier billon.

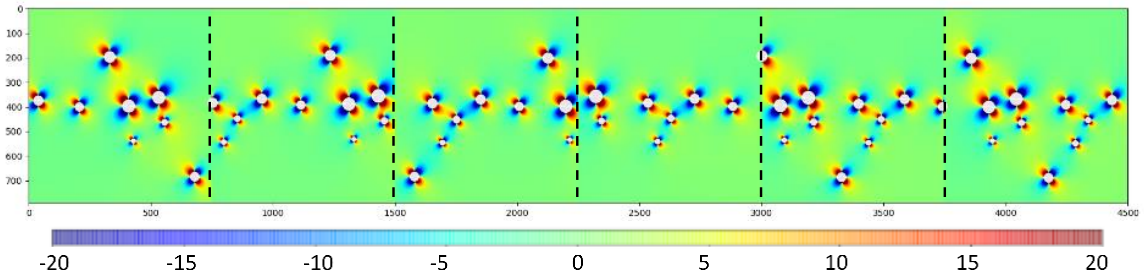


Figure 70 : Cartographie d'orientation des fibres pour les six premiers placages du premier billon (en degrés).

3.4 - Validation du modèle et ajustement des paramètres

Afin de valider et d'ajuster le modèle de déviation des fibres, nous l'avons comparé aux mesures réalisées avec le LOOBAR sur le ruban de deux billons aux voisinages de leurs nœuds. L'orientation des fibres est calculée avec le modèle à chaque point mesuré par le scanner. Seuls les points de mesures au voisinage des nœuds sont sélectionnés afin de tester la robustesse du modèle. Une validation qualitative du modèle a été réalisée afin de s'assurer que la région d'intérêt autour des nœuds corresponde avec les hypothèses décrites ci-après sur les angles et la limite de ratio. Les points de mesures retenus sont sélectionnés selon les critères suivants : ellipses ayant un ratio entre le petit axe sur le grand axe supérieur à 1,45 (déterminé pour éliminer les valeurs aberrantes), assurant ainsi que l'ellipse est bien formée et que le « fit » donne un résultat pertinent. Seules les ellipses avec un angle compris entre -45° et 45° ont été prises en compte afin d'éliminer les valeurs aberrantes. La Figure 71-a et b présentent les angles mesurés (flèche) et les nœuds détectés manuellement (cercle rouge) superposés sur l'image couleur des placages afin d'observer la pertinence de ces hypothèses.

La zone d'influence des nœuds est déterminée en calculant la distance maximale au centre du nœud (d_{max}) pour laquelle l'orientation des fibres est influencée. L'écart type de l'angle de toutes les ellipses contenues dans une zone annulaire ayant une taille de 0,1 rayon est calculé. Ce calcul d'écart type permet de détecter la distance où l'on sort de la zone d'influence. En effet, l'écart type dans la zone annulaire près du nœud est beaucoup plus élevé. Cette zone annulaire balaie le voisinage du nœud de 1 à 5 fois son rayon. La distance maximale (d_{max}) (Figure 71-b et c) est définie lorsque l'écart-type calculé ne varie plus. Cette distance depuis le centre des nœuds (d_{max}) est normalisée par le rayon des nœuds (c).

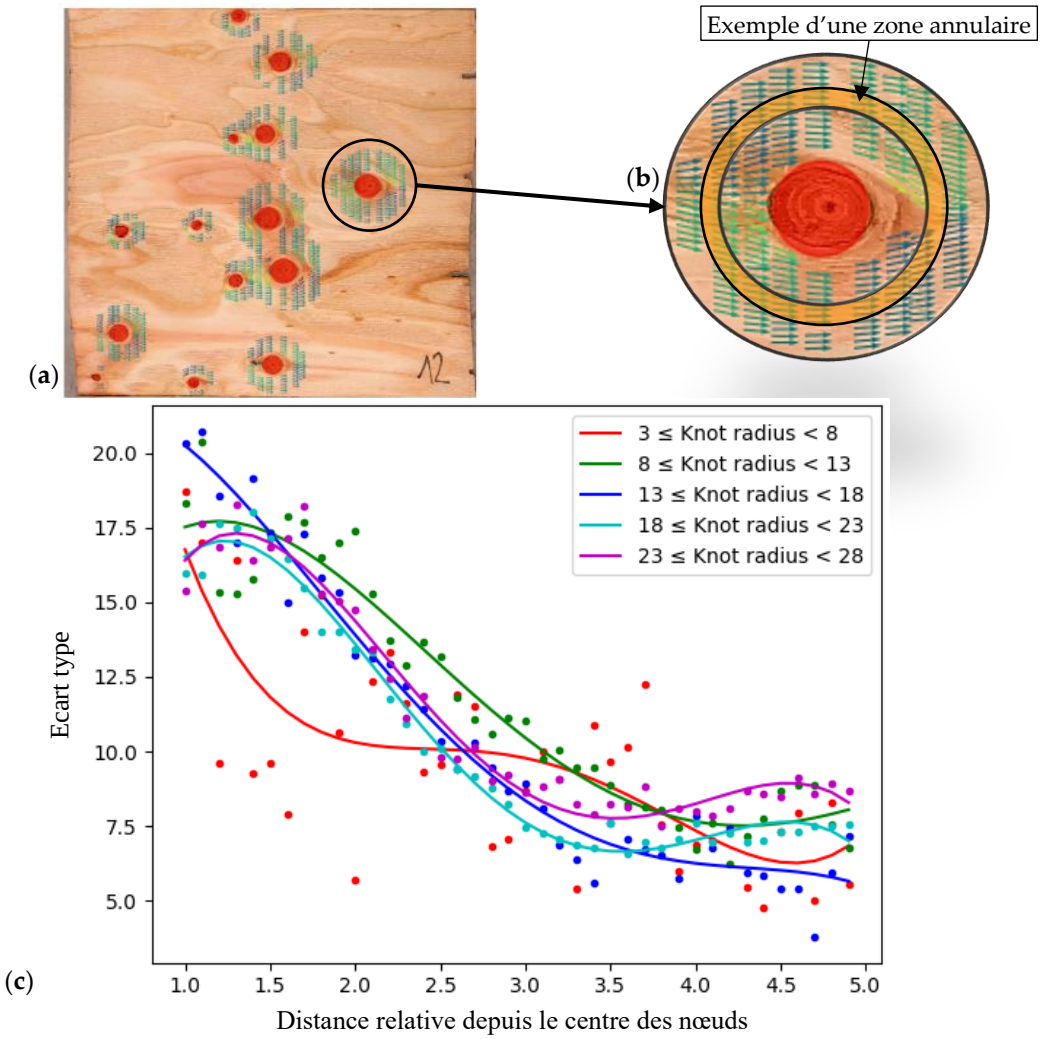


Figure 71 : (a) Orientation des fibres avec le seuillage autour des nœuds ; (b) Agrandissement d'un nœud avec un exemple d'une zone de mesure annulaire ; (c) Ecart type des angles sur les zones annulaires pour différentes tailles de nœuds (en mm)[80].

La taille de chaque classe de nœuds a été choisie de manière à avoir suffisamment de nœuds dans chaque classe (Tableau 15).

La précision de l'écart type pour la première classe (rayons entre 3 et 8 mm) est affectée par le faible nombre d'ellipses par rapport aux autres classes.

Tableau 15 : Information sur la taille des nœuds du billon 1

Knot radius range (mm)	Number of knots (-)	Number of ellipses from 1 to 5 radius (-)
3 ≤ knots size < 8	37	1311
8 ≤ knots size < 13	96	17026
13 ≤ knots size < 18	33	11934
18 ≤ knots size < 23	84	47859
23 ≤ knots size < 28	37	37119

La distance maximale de la zone de perturbation des fibres (d_{max}) est observée à 3,4 rayons du centre du nœud. A cette distance, l'écart type semble atteindre une asymptote horizontale.
Une manière originale de présenter les résultats est de montrer l'orientation des fibres pour tous les nœuds dans un seul et même graphique (Figure 72). La Figure 72-a présente les angles mesurés (LOOBAR) pour tous les nœuds superposés, pour un total de 289 nœuds et 40 137 angles mesurés, pour tous les placages du billon 1. L'orientation des fibres autour des nœuds semble varier linéairement en fonction du rayon des nœuds. La zone de perturbation est proportionnelle à la taille des nœuds (cf. Figure 71-c). En effet, on peut observer que l'écart type en fonction de la distance relative varie peu suivant la taille du nœud. Par conséquent, les petits nœuds ont un impact mécanique, mais uniquement sur une zone relativement limitée.
Le modèle de Foley (2003) est utilisé pour prédire les angles selon l'approche détaillée dans le chapitre 3.1. La Figure 72-b présente les angles modélisés et normalisés suivant le rayon.
Pour améliorer l'efficacité du modèle, nous avons modifié les paramètres décrits au chapitre 3.1.

Nous avons donc ajusté les six facteurs décrits par Foley (2003), présentés dans le Tableau 16. Une optimisation de ces facteurs d'ajustement est calculée pour le billon 1 afin d'améliorer le modèle de l'orientation des fibres. Les RMSE sont calculés et minimisés pour trouver le meilleur ajustement en utilisant un algorithme évolutif [1](Bäck et al. 2018). Les résultats sont présentés dans le Tableau 16. La Figure 72-c présente les données du modèle amélioré.

Tableau 16 : Facteurs d'ajustement pour le modèle d'orientation des fibres pour du douglas

	Valeurs optimisées
$\boldsymbol{A_{flow,below}}$	0.528
$\boldsymbol{A_{flow,above}}$	0.572
$\boldsymbol{B_{flow,below}}$	0.099
$\boldsymbol{B_{flow,above}}$	0.099
$\boldsymbol{Yo_{rel}}$	$Yo_j \cdot \frac{l}{31.53}$
$\boldsymbol{Yo_{lim}}$	8.52

Les angles sont ensuite interpolés linéairement sur une grille régulière pour déterminer les angles en chaque point, et des lignes de flux (« Streamline ») sont tracées afin de comparer qualitativement les angles mesurés et modélisés (Figure 72-d-e-f).

[1] Taille de la population = 50, 10 générations avec résultats stable au bout de 5 génération. Algorithme *deap.eaSimple* réalisé en Python

La variation des angles, exprimée sur une l'échelle de couleurs, montre que la déviation des fibres modélisées est plus élevée que la déviation mesurée, l'ajustement du modèle permet de limiter cet effet de bord.

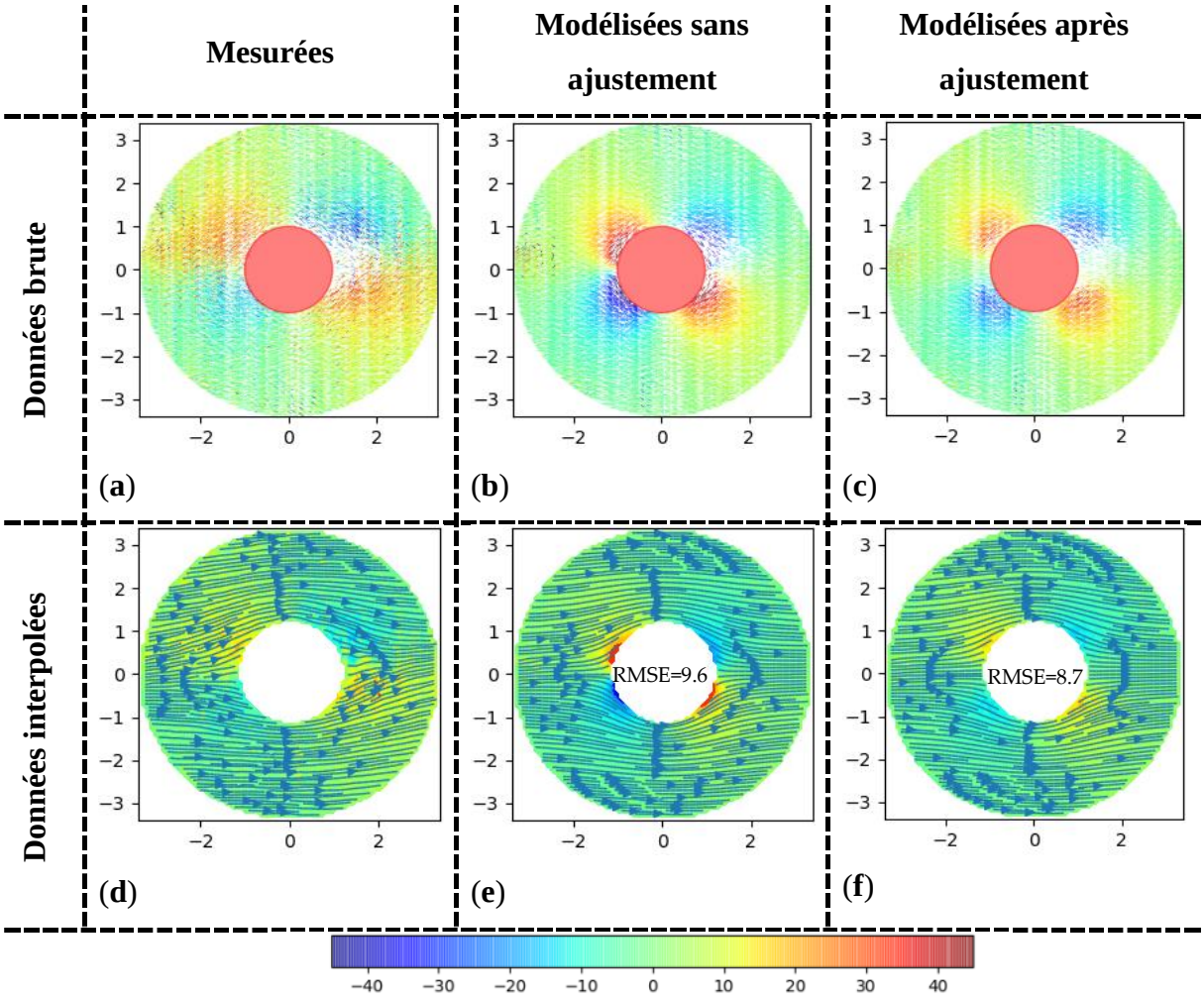


Figure 72 : Comparaison entre l'orientation des fibres mesurées, modélisées sans ajustement du modèle et modélisées avec un ajustement du modèle. Données : (a) mesurées, (b) modélisées sans ajustement, (c) modélisées après ajustement ; Données interpolées sur une grille régulière : (d) mesurées, (e) modélisées sans ajustement du modèle, (f) modélisées après ajustement du modèle [80]

La plus faible erreur quadratique moyenne (RMSE) calculée est de 8,70° sur tous les angles mesurés à une distance maximale de 3,4 rayons de nœuds. Ces facteurs optimisés sont utilisés pour modéliser la déviation locale de l'orientation des fibres du billon 2. Le RMSE, entre les données mesurées par le LOOBAR et les données modélisées, est de 9,57°, ce qui est proche du RMSE obtenu pour l'étape d'étalonnage sur le billon 1 et ce qui valide en première approche cette méthode.

Les fibres déviant autour des nœuds de manière proportionnelle à la taille du nœud, ces résultats montrent que seules les données relatives à la taille et à l'emplacement des nœuds pourraient être suffisantes pour établir une cartographie d'orientation des fibres au voisinage des nœuds.

3.5 - Synthèse

Il est possible de prédire l'orientation des fibres d'un placage en connaissant la position et le diamètre des nœuds. L'orientation des fibres mesurées sur deux billons (décrit au chapitre 2.1) grâce à un nouveau dispositif du LaBoMaP (le LOOBAR) a été comparée à un modèle basé sur la méthode de l'ovale de Rankine. Ce modèle a été ajusté afin d'améliorer la prédiction à la périphérie des nœuds. Finalement, la connaissance de la taille des nœuds pourrait être suffisante étant donné que la déviation des fibres est directement proportionnelle à la taille des nœuds pour cette essence et dans la configuration de coupe du déroulage. Cette observation est très intéressante, car une détection par caméra couleur pourrait suffire pour prédire l'orientation des fibres autour des nœuds. Cette technologie est facilement transférable sur des lignes de déroulage industrielles. En effet, des systèmes de prise d'image de produits déjà commercialisés pourraient être accessibles à faible coût pour classer un placage mécaniquement.

Cette nouvelle approche nécessite cependant d'être testée avec un nombre plus important de billons issus de plusieurs individus afin d'être définitivement validée.

La cartographie d'orientation des fibres déduites, il est maintenant possible de modéliser les propriétés mécaniques des placages et de les assembler afin de déterminer les propriétés mécaniques de poutres LVL.

4 - Modélisation des propriétés mécaniques d'un panneau multi-pli

La modélisation des propriétés mécaniques d'une poutre composite multi-pli est basée sur l'estimation des propriétés mécaniques locales des placages composant les différents plis et de leur assemblage. Les propriétés mécaniques du bois sont ajustées en fonction de sa densité et de l'orientation locale des fibres. Cette dernière est prise en compte via l'équation de Hankinson [96]. Dans notre cas, le matériau bois est considéré comme parfaitement orthotrope avec, comme axe principal, la direction des fibres du bois.

4.1 - Les facteurs influençant les caractéristiques mécaniques des placages

La résistance mécanique du bois est influencée par de multiples paramètres. La masse volumique fait partie d'un des paramètres fondamentaux, pour les bois résineux, permettant d'estimer les propriétés mécaniques. Grâce à la modélisation de la densité, il est possible de prédire la résistance mécanique du bois sain, sans défaut, dans ses directions principales.

Afin de déterminer la résistance mécanique d'un placage, il faut connaitre ses défauts internes. Ces singularités sont dues principalement à la présence de nœuds, créant une rupture de continuité de la matière, et générant aussi une déviation des fibres affaiblissant les propriétés mécaniques. Sachant que dans le cas d'un placage, une info surfacique peut être considérée comme interne, une estimation des propriétés mécaniques locales est don réalisable en connaissant uniquement les défauts présents en surface.

Une fois les placages modélisés mécaniquement à partir de leur densité locale et de l'orientation des fibres locales, un modèle analytique simplifié [92] permet de reconstruire une poutre équivalente et, ainsi, prédire les propriétés mécaniques globales de cette poutre.

4.1.1 - Impact de la masse volumique sur les propriétés mécaniques

La masse volumique est reconnue pour régir les propriétés mécaniques des placages, sa variation s'explique à différentes échelles :

- Au sein d'une même essence, la masse volumique varie suivant la génétique de l'arbre, la sylviculture, le climat, la nature du sol…
- Au sein même de l'arbre, la masse volumique évolue en fonction de la position verticale et horizontale. La masse volumique de la bille de pied est généralement plus importante que la masse volumique du houppier, et la masse volumique proche de l'écorce (constituée de bois mature) est généralement plus élevée que la masse volumique proche du cœur (constitué de bois juvénile).
- A l'échelle d'un cerne, la masse volumique du bois d'été est plus élevée que le celle du bois de printemps. Plusieurs auteurs [19], [97]–[99] présentent des modèles permettant de relier la masse volumique aux propriétés mécaniques du bois sain.

Les équations empiriques les plus utilisées dans la littérature sont présentées dans le Tableau 17 pour la prédiction du module d'élasticité (MOE) et du module de rupture (MOR). Les modèles de Guitard et du Wood Handbook sont établis pour un panel des bois résineux, en revanche, l'équation de Pollet est basée uniquement sur du douglas mature avec des essais mécaniques réalisés sur 884 éprouvettes.

Tableau 17 : Prédiction des propriétés mécaniques du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12%

	Auteur	Equation
MOE longitudinal	*Guitard*	$13100 + 41700(\rho_{12} - 0.45)$
	Wood handbook	$20500\rho_{12}^{0.84}$
	Pollet	$36.605\rho_{12} - 4242.4$
MOR longitudinal	*Wood hanbook*	$170.700\rho_{12}^{1.01}$
	Pollet	$0.2751\rho_{12} - 41.164$

Le MOE varie fortement pour l'équation de Guitard $\left(\frac{MOE_{650}}{MOE_{400}} = 1.96\right)$ et de Pollet $\left(\frac{MOE_{650}}{MOE_{400}} = 1.87\right)$, en passant de 400 kg/m^3 et 650 kg/m^3(Figure 73). Concernant le MOR un écart de 25% à 650 kg/m^3 est observable en comparant le modèle du Wood Handbook et le modèle de Pollet, ce qui n'est pas négligeable.

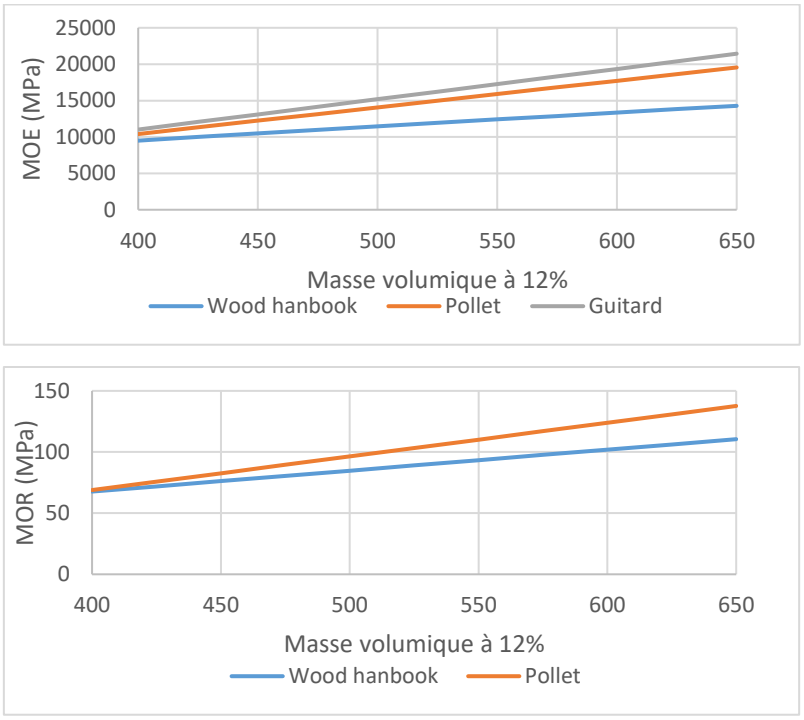


Figure 73 : Modèle de prédiction du MOE et du MOR en fonction de la masse volumique à 12% d'humidité

4.1.2 - Modélisation de la masse volumique au sein de l'arbre

Afin de déterminer les propriétés mécaniques des placages et des poutres reconstituées, il est nécessaire de connaitre la masse volumique interne de l'arbre sur pied. Kimberley [100] définit un modèle empirique (Equation (12)) permettant d'estimer la masse volumique du douglas en fonction de sa position radiale (numéro de cerne notée (R)).

$$masse\ volumique\ basale = a + \frac{b - R}{c + d \cdot e^{f \cdot R}} + (1 - g \cdot e^{-h \cdot R}) \times L_i \qquad (12)$$

Le paramètre L_i est un facteur d'ajustement pour la parcelle. Il est fixé à 0 pour une parcelle de densité moyenne. Les différents paramètres de l'équation déterminés empiriquement, pour du douglas néozélandais, sont listés ci-dessous :

Tableau 18 : Paramètres de la modélisation de la densité selon Kimberley [100]

Paramètre	Valeur
a	432,6
b	1,22
c	0,0235
d	0,0125
f	0,221
g	0,814
h	0,258

Suivant la modélisation de Kimberley [100], la masse volumique, à cause de la juvénilité du bois, décroit sur les premiers cernes jusqu'au vingtième, puis augmente jusqu'à une asymptote au cerne 35 (Figure 74).

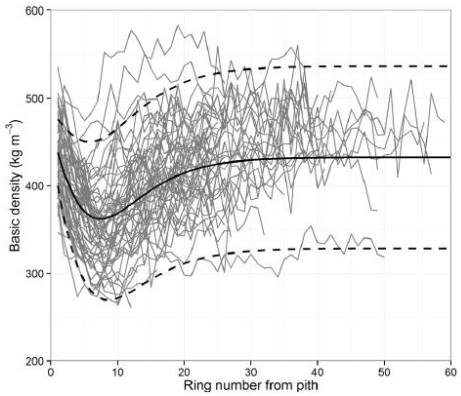


Figure 74 : Modélisation de la masse volumique en fonction du numéro de cerne selon Kimberley [100]

4.2 - Détermination des propriétés mécaniques des placages en prenant en compte la masse volumique et l'orientation des fibres

Les propriétés mécaniques des placages sont déterminées sur la base de celles du bois sain, qui dépend fortement de la masse volumique du matériau. Les propriétés du bois dans la direction longitudinale sont ainsi calculées en se basant sur la modélisation de Pollet [98] pour le MOE et le MOR. En effet, le modèle de Pollet a été ajusté avec des éprouvette de douglas provenant de Wallonie, ce modèle semble donc le plus adapté à la ressource de douglas française. De ces valeurs, les caractéristiques transverses du matériau sont déduites via les données issues du Wood Hanbook [99]. Le ratio entre le module longitudinal et transverse est donné à 0,05. Le ratio pour le MOR est choisi également à 0,05, ce qui est dans la plage de validité d'écrit dans le Wood Handbook [99]. La formule de Hankinson [96] (Equation (13)) permet de déterminer les propriétés locales équivalentes du matériau dans sa direction principale. Le MOR est déterminé de manière similaire.

$$MOE = \frac{E_0 \cdot E_{90}}{E_0 \sin(\theta)^n + E_{90} \cos(\theta)^n} \qquad (13)$$

Avec E_0 le module d'élasticité longitudinal du bois, E_{90} le module d'élasticité transverse, θ l'orientation des fibres et n une constante (entre 1,5 et 2 selon l'essence [99], il est fixé à deux dans notre cas).

4.3 - Assemblage des placages pour calcul des propriétés mécaniques de poutres LVL

Une fois les propriétés mécaniques locales des placages déterminés, il est possible de déterminer les propriétés globales des poutres composées de ces placages. Viguier [92] a développé une méthode basée sur le théorème de Huygens, permettant de déterminer le module global d'une poutre constituée de placages, en prenant en compte la masse volumique et l'orientation des fibres à partir des cartographies des différents placages (voir Annexe C).

Pour déterminer ce module d'élasticité global, nous avons besoin d'effectuer plusieurs étapes :

- Moyenner les modules d'élasticité (à deux dimension) suivant la largeur de la poutre pour obtenir un module variant suivant la longueur de la poutre (à une dimension).
- Calculer la position de la fibre neutre.
- Calculer la rigidité efficace locale.
- Simuler un essai de flexion suivant la norme NF EN 408 [101].
- Calculer le module global.

Pour déterminer le module de rupture (MOR), une approche similaire est réalisée (voir Annexe C). Les étapes nécessaires pour déterminer le module de rupture sont listées ci-dessous :

- Une moyenne des modules de rupture suivant la largeur de la poutre pondérée par les modules d'élasticité. En effet, la zone la plus rigide sera la plus sollicitée mécaniquement.
- Un calcul des contraintes sur le panneau pour une force unitaire.
- En considérant que le comportement est linéaire fragile, on calcule ensuite l'effort nécessaire pour arriver à la rupture du premier élément.

4.4 - Validation du calcul analytique

La validation du modèle mécanique pour les poutres LVL de douglas s'appuie sur une étude réalisée avec des placages de douglas déroulés et assemblés au LaBoMaP.

Cette étude a été réalisée en plusieurs étapes. En premier lieu, une mesure de la masse volumique et de l'orientation des fibres a permis de classer les placages. Ils ont ensuite été collés, puis les poutres obtenues ont subi un essai de flexion quatre points afin de comparer la prédiction du modèle avec les valeurs expérimentales de déformation et de rupture. Cette méthode utilisée dans [92] a pour objectif de montrer qu'en triant les placages, il est possible d'obtenir des poutres aux propriétés bien différenciées en partant d'une ressource donnée.

4.4.1 - Échantillonnage et tri

Après massicotage de placages d'épaisseur 3 mm, issus des billons utilisés dans l'étude des paramètres de déroulage (Première partie, chapitre 2), à un format de $150 \times 740\ mm^2$, 175 placages d'aubier et 162 placages de duramen ont été sélectionnés. Ces placages ont été pesés et scannés à l'aide du BobiScan [86], [102], un scanner offline développé au LaBoMaP, afin de mesurer respectivement leur masse volumique et l'orientation locale des fibres.
Les propriétés mécaniques du bois sain ont été déduites de la masse volumique, les propriétés mécaniques locales l'ont été en utilisant l'équation de Hankinson (13). La moyenne du MOE sur tout le placage permet de donner un indicateur pour leur tri. Les placages sont, ainsi, numérotés selon leur performance mécanique théorique de 1 (la plus faible) à 175 (la plus élevée) pour le duramen, et jusqu'à 162 pour l'aubier.

4.4.2 - Assemblage

Afin d'évaluer le modèle de prédiction des propriétés mécaniques, 10 poutres constituées de placages d'aubier et 11 de duramen, ont été fabriquées à partir de placages orientés dans le même sens. L'empilement a été réalisé en ordonnant les placages par leurs propriétés mécaniques de la plus faible jusqu'à la plus élevée. La répartition des placages dans les 10 poutres d'aubier est schématisée sur la Figure 75. Le placage 1 ayant les propriétés mécaniques les plus faibles et le placage 130 ayant les propriétés mécaniques les plus importantes.

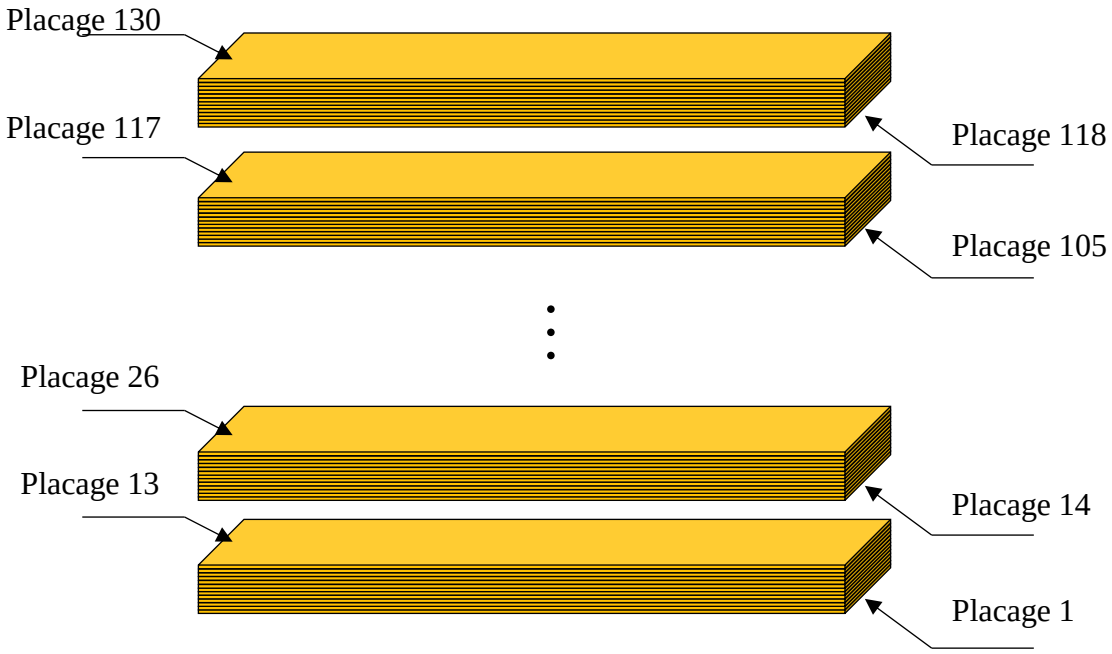


Figure 75 : Assemblage des placages d'aubier

Les placages ont été collés avec de la colle vinylique (PVA-c Rakoll GLX4) à la pression de 8 bar, préconisée par le fabricant.

4.4.3 - Essais mécaniques

Les poutres ont été sollicitées en flexion 4 points suivant la norme NF EN 408 [101] sur une machine d'essais universelle Zwick (Type BT1-FR250SR.A4K). La configuration des essais est présentée sur la Figure 76.

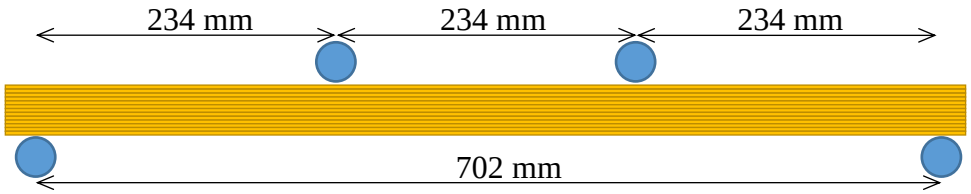




Figure 76 : Montage d'essais de flexion 4 points selon la norme NF EN 408

4.4.4 - Résultats

La prédiction des propriétés mécaniques du modèle est comparée avec les essais. La comparaison porte, plus particulièrement, sur le MOE et le MOR pour les 10 poutres d'aubier et pour les 11 poutres de duramen.

MOE

Les propriétés mécaniques des poutres modélisées sont comparées à celles des essais mécaniques (Figure 77). La prédiction du module d'élasticité pour l'aubier est fortement corrélée avec les valeurs d'essais avec un coefficient de détermination de 0,85. Il existe un léger biais sur ce coefficient de détermination, car une des poutres à un MOE anormalement très faible par rapport aux autres, engendrant un effet levier. En retirant cette poutre, le coefficient de détermination est de 0,65. La zone colorée représente la zone de fiabilité à 95%.

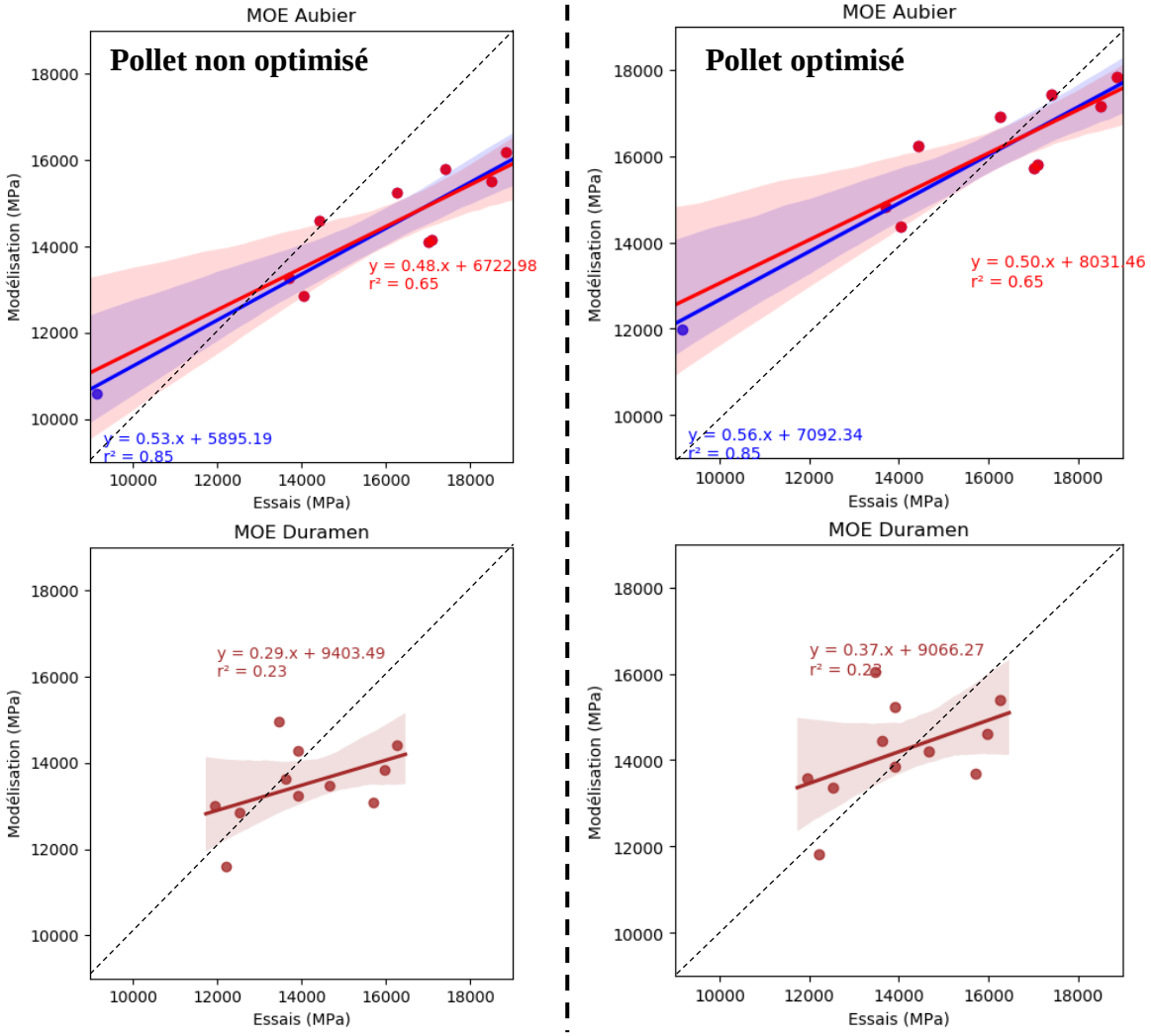


Figure 77 : Comparaison du module d'élasticité du modèle et des essais pour les poutres d'aubier et de duramen (à gauche non optimisé et à droite optimisé)

La prédiction du module d'élasticité des poutres issues de duramen est beaucoup plus délicate, du fait que le coefficient de détermination est faible (0,23). Ce manque de précision peut s'expliquer par le taux de placages fissurés plus élevé dans le duramen, à cause de la sécheresse à cœur du douglas [101], mais aussi à cause de la juvénilité du bois, que la modélisation ne prend pas en considération.

Une optimisation, en suivant un algorithme évolutionnaire [103], a permis d'ajuster le modèle de Pollet pour ces poutres. On retrouve les équations optimisées au Tableau 19 :

Tableau 19 : Prédiction des du module d'élasticité du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12% suivant Pollet optimisé

	MOE Pollet avant optimisation	**MOE Pollet optimisé**
Aubier	$36.605\rho_{12} - 4242.4$	$44.443\rho_{12} - 6545.5$
Duramen	$36.605\rho_{12} - 4242.4$	$42.461\rho_{12} - 6632.2$

Le Tableau 20 présente l'erreur relative entre la modélisation et les essais. Cette optimisation améliore particulièrement la prédiction du modèle sur les poutres d'aubier. En revanche, sa validation sur un panel d'essais plus large n'a pas pu être réalisée dans le cadre de la thèse. Nous reviendrons sur ce point dans la synthèse.

Tableau 20 : Erreur relative sur les modules d'élasticité avant et après optimisation

MOE	**Non optimisé**	**Optimisé**
Aubier complet	10.8%	8.4%
Aubier sans le point aberrant	10.3%	6.2%
Duramen	7.7%	7.7%

Si l'on prend uniquement en compte la densité des placages (sans l'orientation des fibres), le coefficient de détermination de l'aubier se réduit à 0,78 (0,56 sans prendre en compte le point aberrant).

MOR

La prédiction du module de rupture (Figure 78) pour l'aubier est plutôt bonne avec un coefficient de détermination de 0,99. La pente de la régression linéaire est supérieure à 1 ce qui veut dire que l'on surestime le module modélisé par rapport à la réalité. Comme pour le module d'élasticité, la prédiction du module de rupture des poutres de duramen, avec un r^2=0,30, est plus complexe. Les causes sont surement similaires à celles précédemment citées (non prise en compte de la fissuration, juvénilité…).

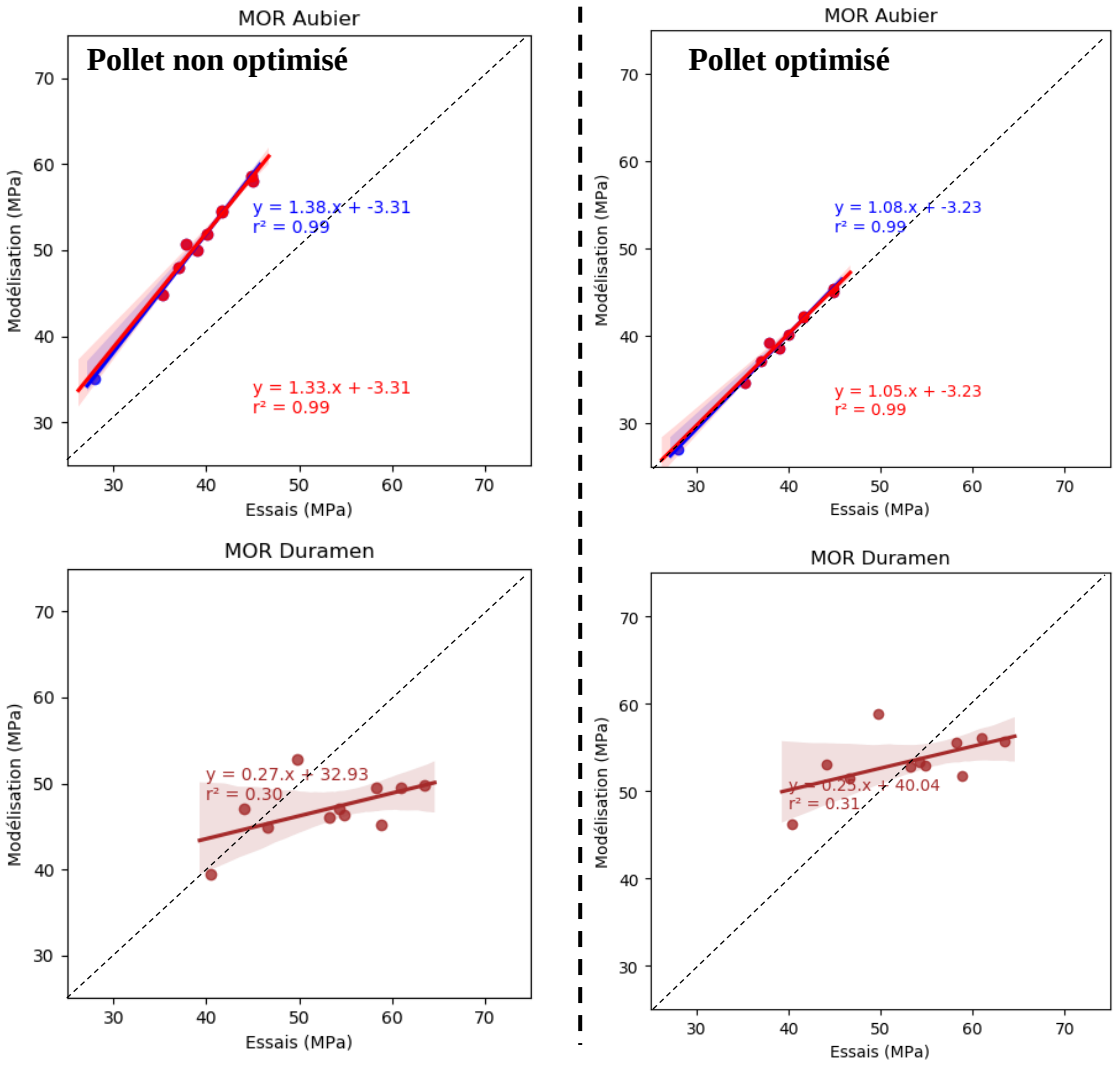


Figure 78 : Comparaison du module de rupture entre la modélisation et les essais pour les poutres d'aubier et de duramen (à gauche non optimisé et à droite optimisé)

Une optimisation du modèle de Pollet a également été effectué pour ajuster le module de rupture (Tableau 21). Une variation assez faible sur le coefficient directeur de la fonction affine impacte fortement les résultats.

Tableau 21 : Prédiction des du module de rupture du bois sain en fonction de sa masse volumique à 12% suivant Pollet optimisé

	MOR Pollet avant optimisation	**MOR Pollet optimisé**
Aubier	$0.2751\rho_{12} - 41.164$	$0.2182\rho_{12} - 34.929$
Duramen	$0.2751\rho_{12} - 41.164$	$0.2442\rho_{12} - 11.213$

Le Tableau 22 présentant l'erreur relative entre la modélisation et les essais montre une amélioration importante de la prédiction.

Tableau 22 : Erreur relative sur les modules de rupture avant et après optimisation

MOR	**Non optimisé**	**Optimisé**
Aubier complet	29.5%	1.4%
Aubier sans le point aberrant	30.0%	1.1%
Duramen	12.8%	9.7%

Pour le module de résistance, si on ne prend pas en compte l'impact des nœuds et de l'orientation des fibres, le coefficient de détermination pour l'aubier est un peu plus faible, r^2=0,95 et pour le duramen r^2=0,24. La prise en compte de l'orientation des fibres améliore bien la prédiction des propriétés mécaniques des poutres.

4.5 - Synthèse

Il est possible de déterminer les propriétés mécaniques de poutres LVL uniquement en connaissant la masse volumique globale des placages et l'orientation des fibres.

Bien que la masse volumique soit un facteur d'explication important des propriétés mécaniques des poutres LVL, la prise en compte de la position des nœuds permet d'affiner la prédiction.

La comparaison avec les essais réalisés montre que la prédiction du module d'élasticité des poutres constituées de placage d'aubier est meilleure que pour celle constituées de duramen. Cela est probablement dû à des taux de fissuration des placages plus élevés et une juvénilité présente dans le duramen dégradant les propriétés mécaniques des poutres mais non pris en compte dans la modélisation.

Une optimisation a permis d'affiner les prédictions. Cependant, le nombre de poutre étant faible (10 d'aubier et 11 de duramen) cette optimisation n'est pas pertinente, il est donc préférable pour la suite de ce mémoire de conserver les équations issues de la bibliographie. Une étude sur un nombre plus important de poutres issus de plusieurs arbres serait un travail complémentaire intéressante et nécessaire afin d'affiner la prédiction.

5 - Propriétés mécaniques de panneaux de LVL issus de la forêt domaniale du Grison

Les trois chapitres précédents montrent qu'il est possible de modéliser la position des nœuds sur les placages en fonction de la répartition des branches dans l'arbre ainsi que de l'orientation des fibres autour de ces nœuds, pour, finalement, déterminer les propriétés mécaniques des placages, puis des poutres LVL. Ce chapitre nous permet d'étudier une application concrète du modèle global en utilisant la base de données contenant les informations « forêt » du site du Grison (71). Pour ajuster les propriétés mécaniques, il est nécessaire, dans un premier temps, de déterminer la masse volumique des placages en fonction de l'âge et de la position radiale des placages déroulés (voir chapitre suivant 5.1). Les propriétés mécaniques moyennes des placages peuvent être estimées pour chaque placette à partir des données sylvicoles. Ensuite, plusieurs stratégies d'assemblage sont étudiées afin de déterminer les propriétés mécaniques des poutres LVL constituées de ces placages. Les résultats de cette approche sont ensuite comparés à une étude de grande ampleur réalisée en partenariat avec France Douglas, publiée dans Forêt Entreprise [58], caractérisant les propriétés mécaniques de poutres LVL de douglas issues d'arbres provenant de 3 parcelles différentes.

5.1 - Modélisation de la masse volumique des arbres

Afin de caractériser la masse volumique des placages déroulés, le modèle de Kimberley [100], défini dans le chapitre précédent (voir 4.1.2), est utilisé. Des mesures de masse volumique ont été effectuées par l'INRAE sur les premières rondelles de chaque arbre. Les 15 arbres issus de la forêt domaniale du Grison sont tous âgés de 43 ans. En considérant la largeur des cernes constante, il est possible de comparer le modèle de Kimberley et les mesures de masse volumique (Figure 79).

Le coefficient de détermination (r^2=0.4) montre une corrélation significative malgré le fait que le modèle ait été calibré avec des données de douglas néozélandais. De plus, la largeur des cernes est considérée constante alors que, suivant la sylviculture, la largeur de l'accroissement annuel aura une largeur variable suivant l'âge cambial.

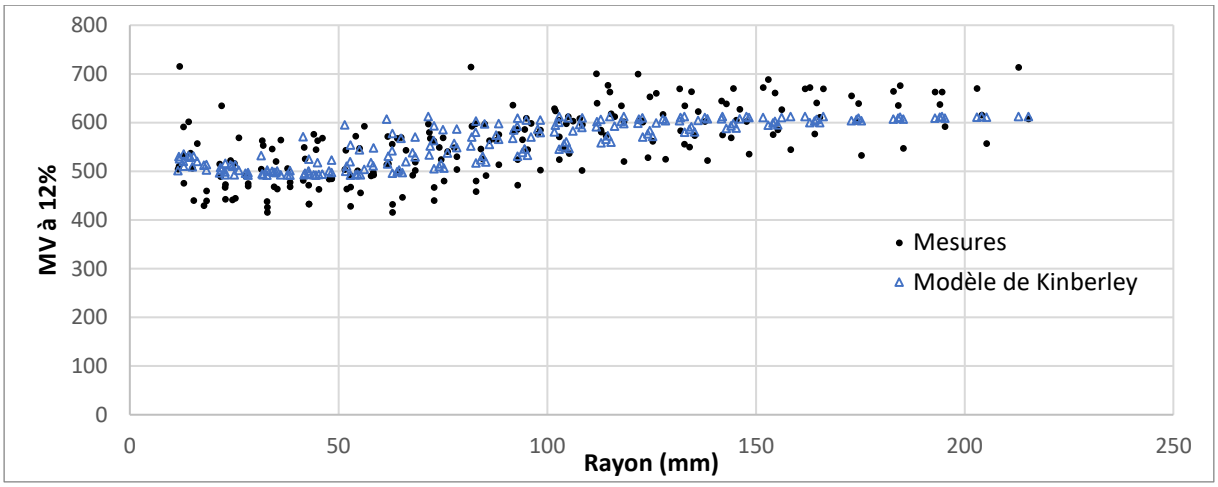


Figure 79 : Masse volumique des arbres de la forêt du Grison mesurée sur les premières rondelles et modélisée.

La masse volumique étant déterminée pour un rayon, il est possible de la déterminer pour tous les placages de caractériser la masse volumique (Figure 80).

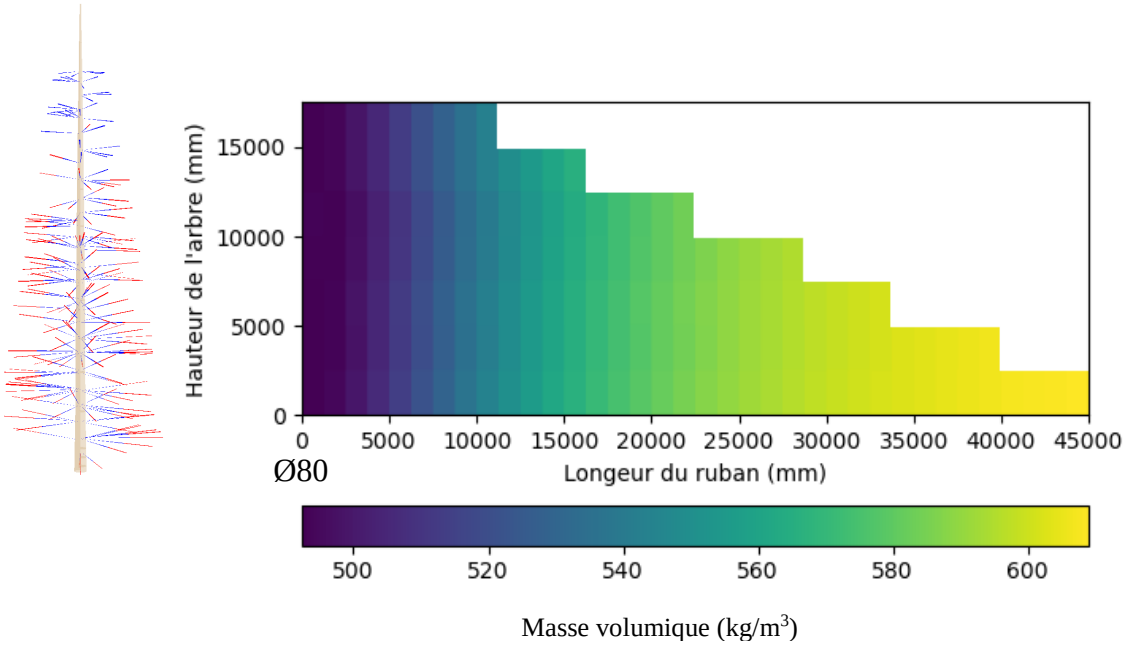


Figure 80 : Exemple d'une cartographie de la masse volumique modélisée de placages issus d'un arbre de la forêt du Grison

5.2 - Modélisation des propriétés mécaniques des placages

Les propriétés mécaniques locales de chaque placage 2500 x 250 mm sont estimées grâce au modèles mécaniques (chapitre 4), en connaissant la cartographie d'orientation des fibres (chapitre 2 et 3) et la densité de chaque placage. La Figure 81 présente les modules d'élasticité locaux et moyens modélisés pour un arbre de la forêt du Grison. Les placages proches de la moelle ont globalement une rigidité inférieure aux placages proches de l'écorce, principalement à cause de leurs masses volumiques inférieures. Les placages issus de la bille de pied ont un module d'élasticité supérieur aux placages proches du houppier.

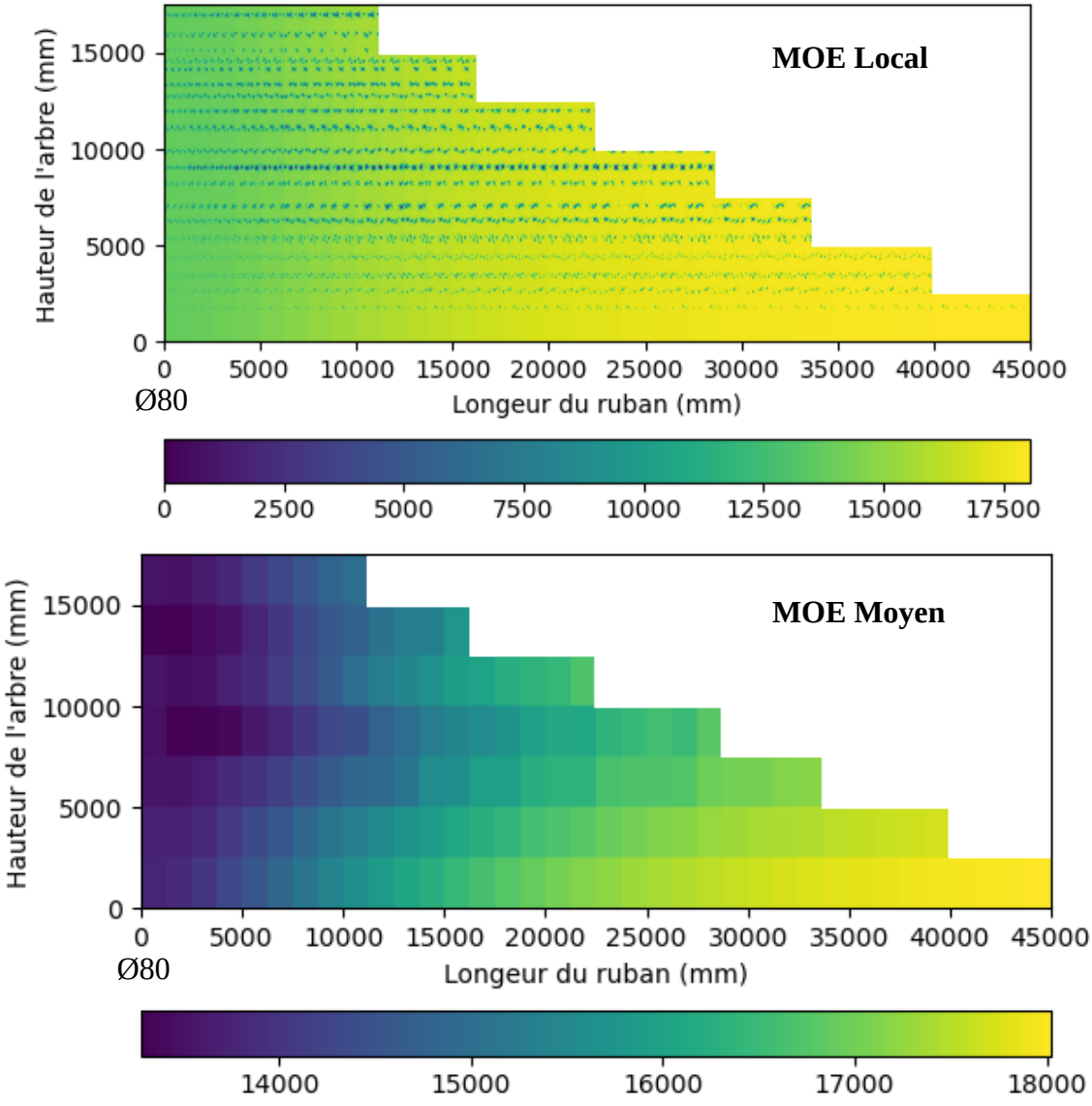


Figure 81 : Modules d'élasticité local et moyen modélisés pour les placages issus d'un arbre de la forêt du Grison (MPa)

L’impact des nœuds n’est cependant pas négligeable (Figure 82), certains placages peuvent perdre presque 8% de leurs rigidités moyennes uniquement à cause de la présence des nœuds. Nous avons remarqué que les placages les plus impactés par les nœuds se situent globalement à mi-longueur du ruban déroulé. En effet, au début du ruban de déroulage, les nœuds ont une taille importante, mais sont éloignés les uns des autres. Le long du ruban de déroulage, les nœuds se rapprochent, mais se réduisent en diamètres. La partie la plus critique, impactant le plus fortement les propriétés mécaniques, se situe, donc, à mi-longueur du ruban déroulé.

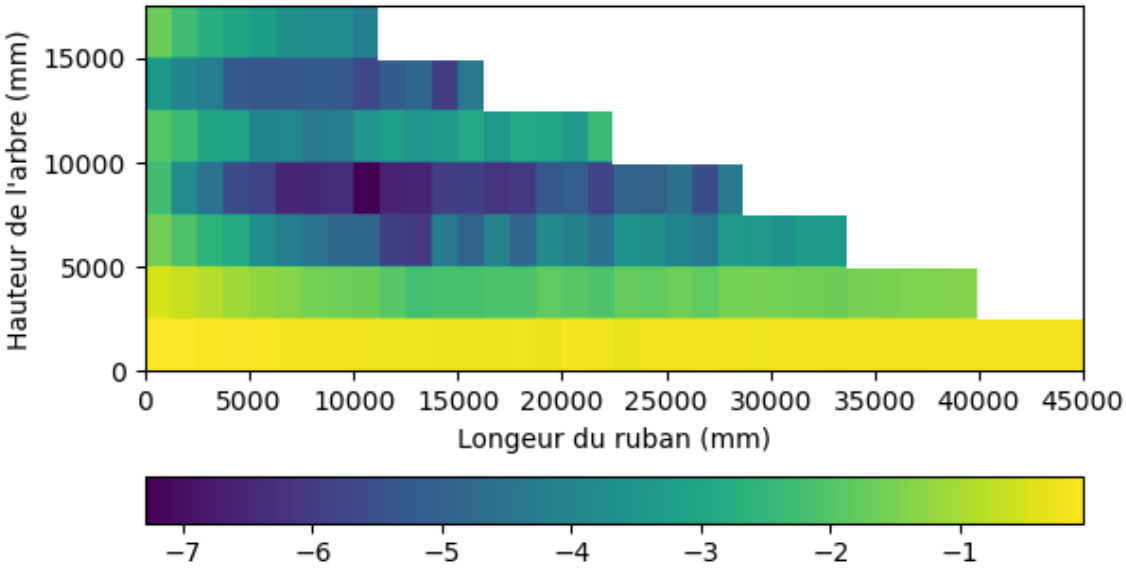


Figure 82 : Impact des nœuds sur les propriétés mécaniques moyennes des placages (en %)

5.3 - Modélisation des propriétés mécaniques des poutres LVL

La modélisation des propriétés mécaniques des poutres LVL est faite similairement au chapitre 4.4.2. Deux stratégies d'assemblage de poutres différentes ont été mises en place. Pour ces deux stratégies, le choix a été fait de séparer les trois sylvicultures (voir chapitre 1.3) et de séparer les placages d'aubier et de duramen. On a donc six modalités différentes présentées dans la Figure 83 :

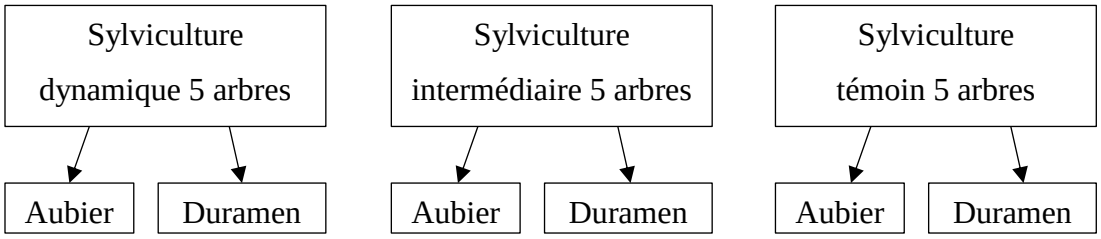


Figure 83 : Modalités de déroulage des billons

Le déroulage virtuel permet de produire des placages virtuels d'une dimension de 3x1250x2500 mm^3, des panneaux virtuels sont réalisés par le collage de 15 placages pour obtenir un panneau de 45x1250x2500 mm^3. Ces panneaux sont ensuite délignés en 10 poutres de 45x125x2500 mm^3.

5.3.1 - Stratégie d'assemblage des placages

Deux scénarios d'assemblages des placages ont été réalisés :

- Le premier scénario (Sc1) consiste à empiler tous les placages issus du même billon les uns sur les autres, et, ceci, billon par billon, pour réaliser un panneau. Ce type d'assemblage risque d'affaiblir les propriétés mécaniques des panneaux en ne dispersant pas efficacement les défauts des nœuds verticillaires.
- Le deuxième scénario (Sc2) consiste à mélanger aléatoirement les placages issus de la même modalité. Ce scénario est plus représentatif d'un panneau LVL fabriqué sur une ligne industrielle. En effet, sur ce type de ligne, les placages sont mélangés pendant les différents tris et manipulations et sont décalés lors de la composition du panneau, pour permettre un pressage en continu comme illustré sur la Figure 11.

5.3.2 - Modélisation des poutres

On va chercher ici à modéliser les propriétés mécaniques des poutres de LVL en flexion sur chant, représentatif d'un usage en structure. Pour ceci, les modules d'élasticité locaux sont moyennés dans la largeur de la poutre afin d'avoir une cartographie 2D des modules de la poutre entière (Figure 84).

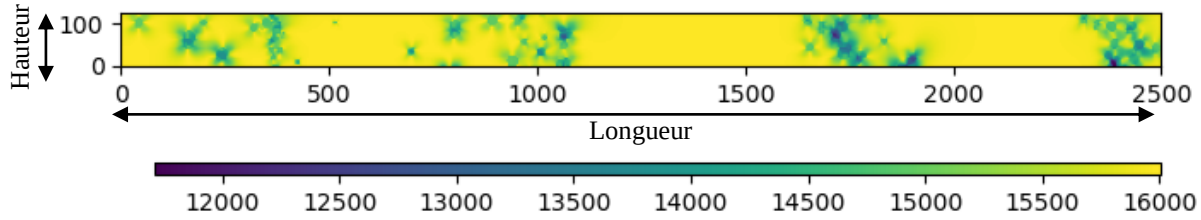


Figure 84 : Cartographie du module d'élasticité modélisé d'une poutre en flexion sur chant (MPa)

On détermine ensuite la position de la fibre neutre suivant le théorème de Huygens (Figure 85), puis on réalise un essai de flexion 4 points virtuel suivant la norme NF EN 408 [101] (Figure 86).

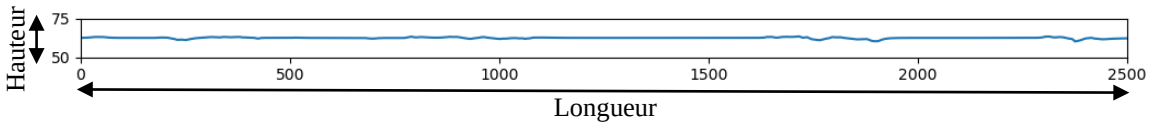


Figure 85 : Variation de la fibre neutre en fonction de la cartographie du module d'élasticité local.

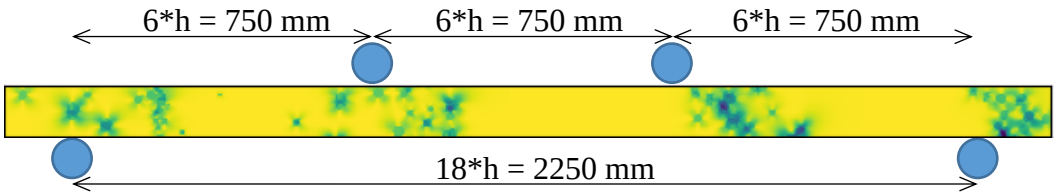


Figure 86 : Spécification de l'essai de flexion virtuel suivant la norme EN 408

Il est ainsi possible de déterminer le module d'élasticité et le module de rupture comme précisé au chapitre 4.3.

5.4 - Résultats de la modélisation

La Figure 87 présente la prédiction des propriétés mécaniques des poutres issues de la forêt du Grison suivant les différentes modalités et les stratégies d'assemblage. Les poutres constituées de placages d'aubier ont, en moyenne, des propriétés mécaniques supérieures (+8% en MOE) à celles constituées de placages de duramen ce qui est cohérent avec les résultats de la littérature.

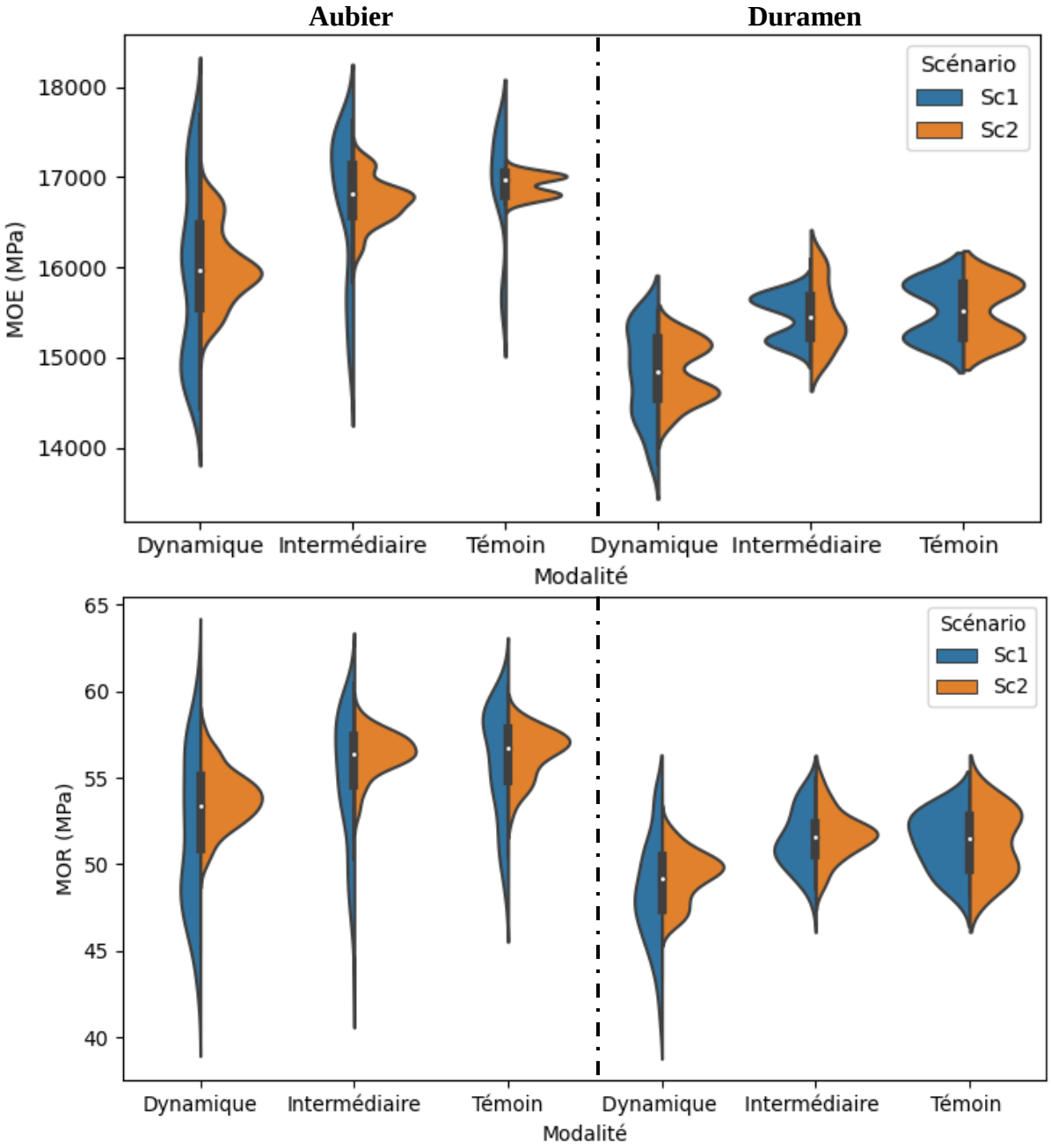


Figure 87 : Prédiction des propriétés mécaniques des poutres issues de la forêt domaniale du Grison suivant les différentes modalités et stratégies d'assemblages

Le Tableau 23 présente les populations de chaque modalité. Tous les placages virtuels disponibles ont été utilisés pour fabriquer les panneaux, les arbres de petit diamètre (sylviculture témoin) ont un faible nombre de placages (35), ce qui a permis de produire uniquement 2 panneaux de 15 placages de duramen. On peut d'ailleurs voir deux populations dans la distribution des modules d'élasticité pour cette modalité. La sylviculture dynamique présente une dispersion beaucoup plus importante du fait de sa plus grande population mais aussi car les placages présentent plus de défauts (nœuds plus gros) et une plus grande proportion de bois moins dense.

Le scénario 2 (LVL avec placages mélangés) présente une dispersion plus faible que le scénario 1 (placages non mélangés). Ceci s'explique ainsi : si un arbre présente de gros défauts, la poutre générée va avoir des propriétés mécaniques inférieures et inversement. En mélangeant aléatoirement les placages, le matériau est homogénéisé.

Tableau 23 : Population de chaque modalité

	Modalité	**Nombre de panneaux**	**Nombre de poutres**
Aubier	**Dynamique**	27	270
	Intermédiaire	12	120
	Témoin	6	60
Duramen	**Dynamique**	11	110
	Intermédiaire	5	50
	Témoin	2	20

5.5- Application du modèle global à des arbres élagués virtuellement

5.5.1 - Simulation

Dans ce scénario, nous allons simuler un élagage virtuel des arbres de la forêt du Grison quand leur diamètre a dépassé 20 cm. Pour cela, nous supprimons les nœuds de tous les cernes concernés par l'élagage.

5.5.2 - Comparaison

La Figure 88 présente la comparaison entre les propriétés mécaniques des poutres réalisées (suivant le scénario 2) avec les arbres non élagués et avec les arbres élagués virtuellement. Les poutres composées de placages d'aubier ne comportent presque pas de nœuds, ce qui améliore les propriétés mécaniques de ces poutres (4% pour le MOE, 7% pour le MOR). Pour les poutres constituées de placages de duramen, cette amélioration est beaucoup moins marquée (1,7% pour le MOE, 4,8% pour le MOR) ce qui est normal car il reste encore beaucoup de nœuds dans les placages de duramen. On remarque la grande efficacité de la dispersion des nœuds dans le LVL qui ont, finalement, des impacts limités.

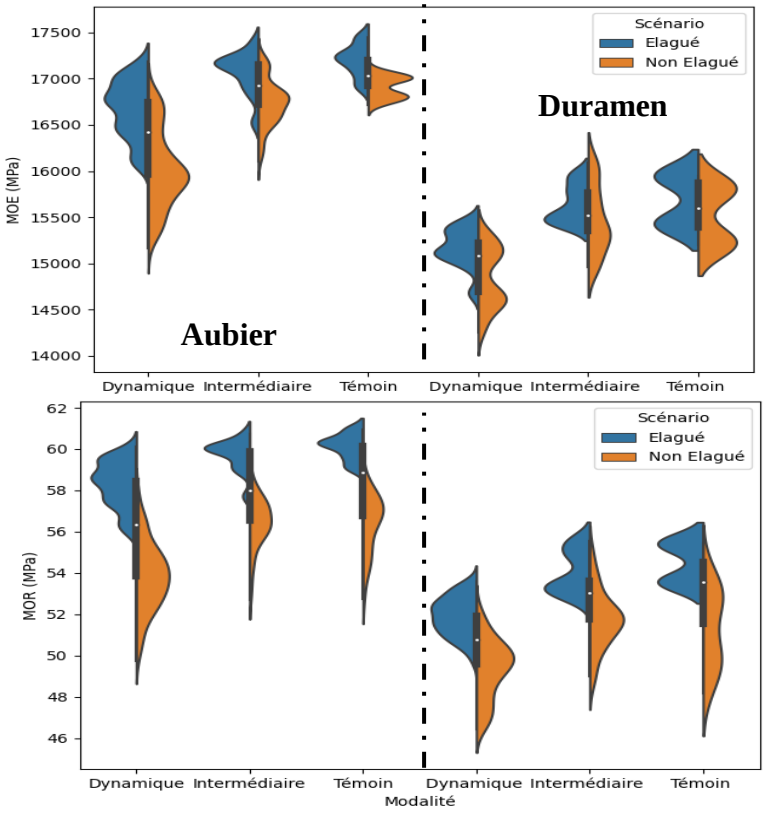


Figure 88 : Comparaison des propriétés mécaniques modélisées entre les poutres LVL constituées d'arbres élagués et les poutres LVL constituées d'arbres non élagués

5.6 - Comparaison avec les résultats d'une étude de grande ampleur

En première année de thèse, une étude a été réalisée avec l'association France Douglas. Elle avait pour objectifs de :

- Déterminer les paramètres de déroulage optimum pour le douglas,
- Réaliser des panneaux de type LVL issus de gros douglas,
- Tester mécaniquement leurs performances,
- Comparer les résultats avec des produits en épicéa commercialisés par les pays d'Europe du Nord, et ce, sur un volume représentatif de bois.

5.6.1 - Campagne d'essais

5.6.1.1 - Approvisionnement

Un lot de douglas représentatif de la ressource forestière française, d'après les coopératives partenaires, a été approvisionné sur le site de production de la société Thébault à Solférino. 186 billons provenant de 3 stations différentes ont été déroulés soit près de 100m^3. La nomenclature utilisée est la suivante :

P1. 66 billons (33 m^3) livrés par la coopérative forestière Alliance Forêt Bois (AFB) proviennent de Larfeuil (19). Ces arbres plantés à 1600 tiges/ha à une altitude moyenne de 700 m ont été abattus à 65 ans, ils ont eu avec 2 éclaircies. Le diamètre minimal des arbres de cette provenance est de 42 cm et le diamètre maximal est de 68 cm pour un diamètre moyen de 52,1 cm. La largeur de cerne moyenne est estimée à 4,00 cm.

P2. 110 billons (56 m^3) venant d'Ambrugeat (19) ont été fournis par la Coopérative Forestière Bourgogne Limousin (CFBL). Ces billons sont issus d'un peuplement d'environ 60 ans situé sur le plateau de Millevaches entre 700 et 800 m d'altitude. Une éclaircie a été effectuée en 1999 suite à la tempête, suivie de 2 autres jusqu'à la coupe de régénération actuelle. Le diamètre minimal des arbres de cette provenance est de 39 cm et le diamètre maximal est de 62 cm pour un diamètre moyen de 49,1 cm. La largeur de cerne moyenne est estimée à 4,09 mm.

P3. 10 autres billons (6 m^3) ont été fournis par la Coopérative Forestière Bourgogne Limousin (CFBL), provenant de la commune de Neuvic d'Ussel (19). Ces billons, âgés de 44 ans, ont la particularité d'avoir été élagués jusqu'à 6 m en 1993. Leur sylviculture a été très dynamique, plantés à 1100 tiges/ha, dépressés à 13 ans en 1983. Ils ont bénéficié de deux éclaircies en 2000 et en 2007. Le diamètre minimal des arbres de cette provenance est de 45 cm et le diamètre maximal est de 64 cm pour un diamètre moyen de 53,6 cm. La largeur de cerne moyenne est estimée à 6,09 mm, ce qui est beaucoup plus important que pour les deux autres provenances.

La répartition des qualités de billons est représentée dans le graphique de la Figure 89.

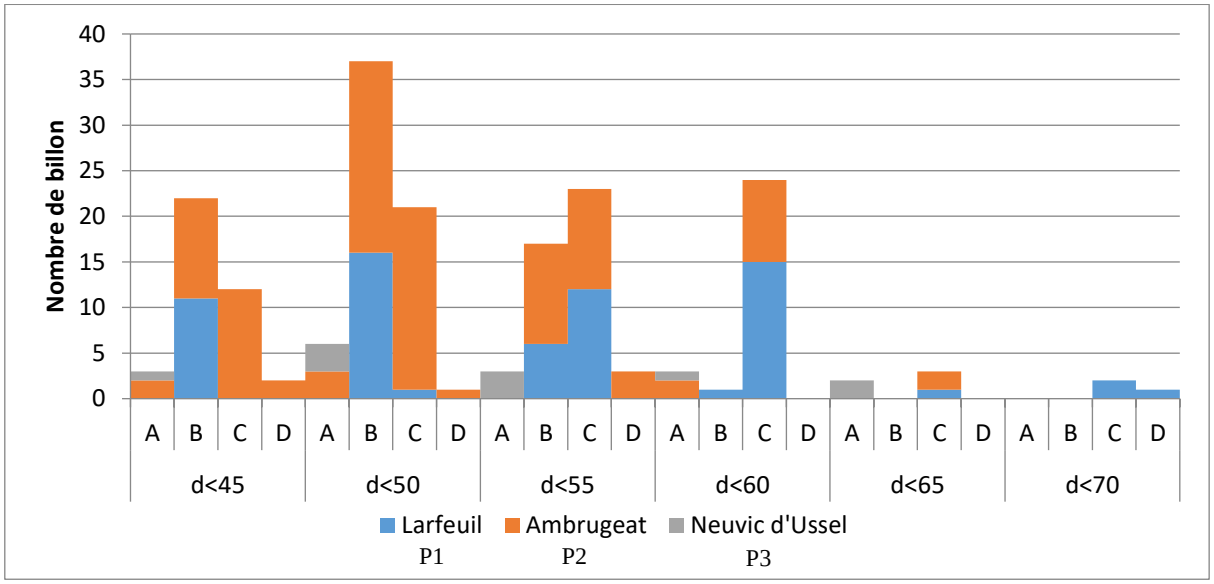


Figure 89 : Répartition des qualités des billons suivant leur diamètre et leur provenance

5.6.1.2 - Tri des placages en fonction de leur humidité, leur provenance, leur position dans l'arbre

Lors de cette campagne, 5 930 placages de 2600 x 1300 mm ont été déroulés et 2 311 placages (1 003 d'aubier et 1 308 de duramen) ont été triés soit près de 39% du lot initial. La quantité de placages devant être triée a été déterminée en fonction des panneaux à fabriquer pour les étapes suivantes. 824 placages ont été triés dans les placages issus de la provenance P1 et 1 166 dans ceux issus de la provenance P2. Tous les placages de la provenance 3 (321 placages) ont été triés, mais cela n'a pas été suffisant pour générer toutes les combinaisons des panneaux désirées.

Chaque lot de placages a été séparé par des étiquettes afin de conserver les données de la provenance, la position du billon dans l'arbre, la qualité bois rond et le diamètre de déroulage jusqu'à la composition des panneaux. La Figure 90, montre un exemple de pile de placages provenant de plusieurs billons.



Figure 90 : Pile de placages triés

Cela a permis, pour la réalisation des panneaux, de ne sélectionner que des placages issus d'arbres d'un diamètre supérieur à 50 cm, de provenance et de position connues. Le nombre de placages de chaque pile doit être identique afin de permettre le chargement d'une ligne entière dans le séchoir (cf. Figure 91).

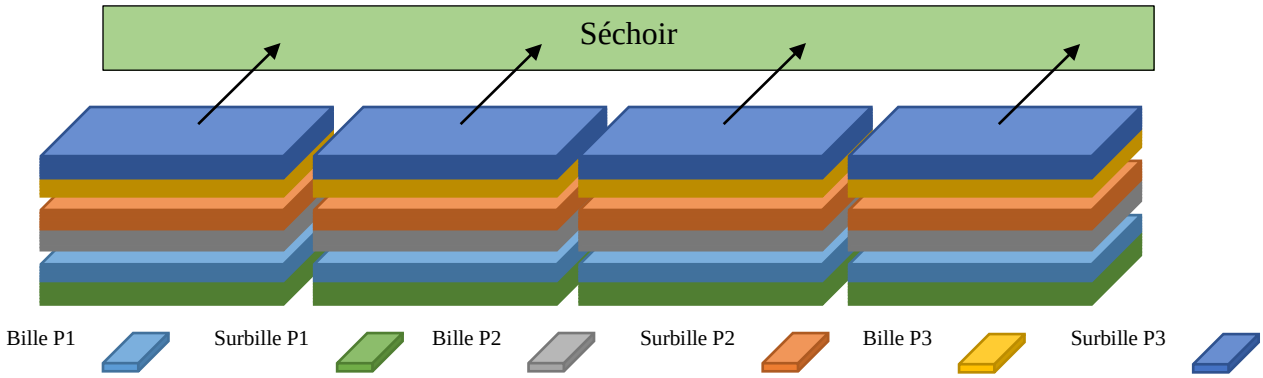


Figure 91 : Mise en place des piles de placages pour le processus de séchage des plis

Cette opération nécessite une séparation des placages d'aubier et de duramen dont les paramètres de séchage doivent être ajustées (l'humidité variant du simple au triple entre le duramen et l'aubier).

Les 2 311 placages ont été triés manuellement afin de composer les piles suivantes (voir Figure 92).



Figure 92 : Piles de placages triées selon leur position dans la bille et leur provenance

Un contrôle de la qualité des placages suivant la norme EN NF 635-3 a été réalisé sur l'ensemble de ces placages.

Les placages ont été triés suivant deux qualités :

- Q1 dite « qualité supérieure » (Classe I, II et III) et
- Q2 dite « qualité inférieure » (Classe IV).

La classe IV de la norme EN NF 635-3 correspond à des placages qui peuvent comporter des nœuds sains et adhérents supérieurs à 60 mm ou des nœuds sautés supérieurs à 40 mm, des fentes d'une longueur supérieure à la moitié du placage ou d'une largeur supérieure à 15 mm ou plus de 3 fentes par mètre.

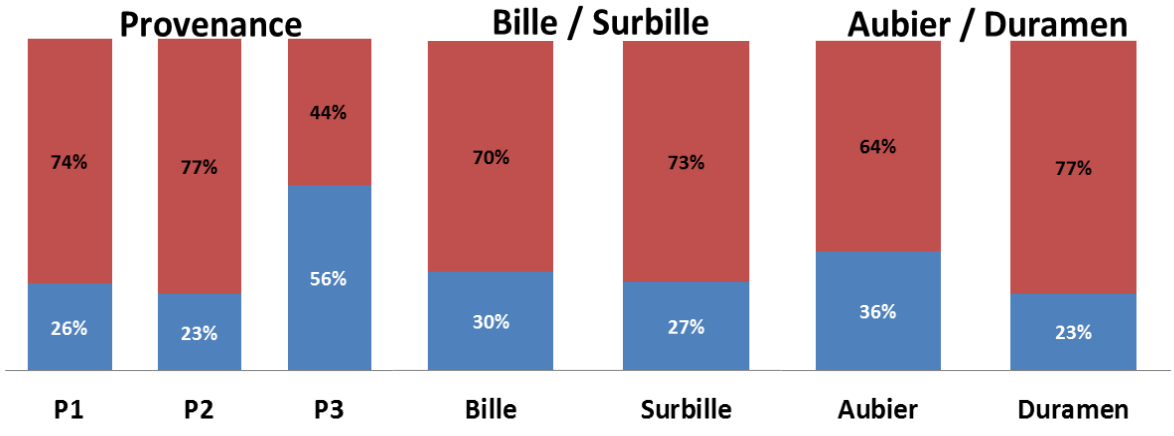


Figure 93 : Répartition des qualités suivant les modalités [49]

La Figure 93 révèle un nombre plus élevé de placages de bonne qualité (Q1) dans la provenance 3 par rapport aux deux autres provenances. Ceci s'explique par le fait que les arbres de la provenance 3 ont été élagués à 6 m 23 ans avant leur récolte : il y a donc très peu de nœuds dans l'aubier. La qualité des placages est globalement meilleure pour cette provenance.
En revanche, il n'y a pas ou peu d'impact de la position de la bille dans l'arbre sur la qualité des placages. Nous constatons que l'aubier donne des placages de meilleure qualité que le duramen. Cela peut s'expliquer par plusieurs raisons :

- Le duramen plus sec que l'aubier, aggrave la fissuration lors du déroulage ;
- La quantité de nœuds sera d'autant plus grande que la coupe se rapproche du centre ;
- La manipulation des placages à la main avant l'opération de séchage a probablement plus pénalisé les placages secs du duramen que ceux de l'aubier.

5.6.1.3 - Fabrication de panneaux LVL

Des panneaux de 2 500 x 1 250 x 45 mm^3 ont ainsi été constitués (soit 15 plis de 3 mm). Comme le montre la Figure 94, 24 panneaux étaient prévus dans le plan d'expérience afin de tester toutes les configurations. Pour un panneau, on associe une provenance, une position dans l'arbre (bille/surbille), une position radiale (aubier/duramen) et un critère de qualité de placage (Q1/Q2). Pour les panneaux de la provenance 3, la différenciation entre bille et surbille n'a pas été effectuée compte tenu du nombre insuffisant de billons, ce qui a empêché la fabrication des 4 derniers panneaux (croix rouge). Le panneau P2-SB-D-Q1 n'a pas pu être fabriqué à la suite d'un problème technique lors de sa composition (croix rouge sur la Figure 94).

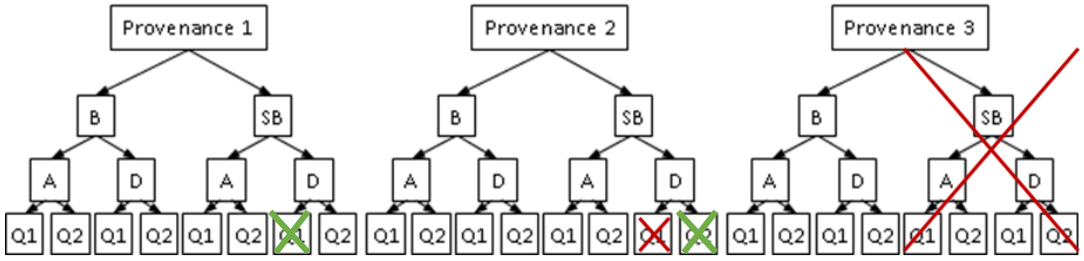


Figure 94 : Modalités retenues pour la composition des panneaux LVL de l'étude

Les 19 panneaux ont été collés par le partenaire en utilisant une colle phénolique utilisée usuellement pour la fabrication de ses contreplaqués.

Ceux-ci ont ensuite été expédiés au campus Arts et Métiers de Cluny où ils ont tous été délignés en 10 poutres de 2500 x 120 x 45 mm^3 (cf. Figure 95). Toutes les poutres ont été repérées suivant le tri fait sur le site du partenaire.



Figure 95 : Scie à panneau (à gauche) et poutres délignées (à droite)

Deux panneaux ont dû être écartés des résultats (croix verte sur la Figure 94), le panneau P1-SB-D-Q1 était en trop mauvais état suite à sa manutention et le panneau P2-SB-D-Q2 présentait une épaisseur insuffisante du fait d'un problème lors de sa composition (non détecté en usine). Lors du délignage, deux poutres n'avaient pas la bonne dimension. Finalement, 168 poutres ont pu être exploitées

5.6.1.4 - Essais mécaniques

Afin de caractériser les performances mécaniques des poutres LVL de Douglas, des essais destructifs de flexion 4 points sur chant ont été réalisés. Un banc de flexion a été utilisé, il est équipé d'un vérin électrique d'une capacité de 10 tonnes, d'un capteur de flèche locale (type LVDT) et d'un capteur de flèche globale (type potentiomètre rotatif).

Les essais ont été réalisés en suivant la norme NF EN 408 (cf. Figure 96). La raideur et la résistance à la rupture de chaque poutre ont été mesurées.

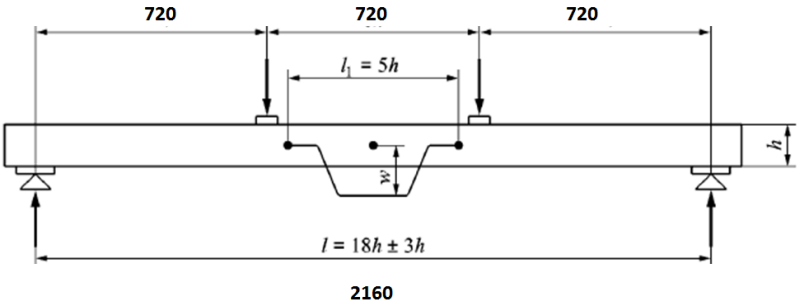


Figure 96 : Schéma de positionnement de l'éprouvette d'essai en flexion 4 (norme NF EN 408)

La masse volumique, l'humidité et la position de la rupture ont été relevées pour chaque poutre. Une photo a été prise après rupture dans le but d'observer les différents faciès de rupture (voir Figure 97).



Figure 97 : Poutre de LVL sur banc de flexion 4 points du LaBoMaP

5.6.2 - Résultats des essais

Le module d'élasticité et le module de résistance à la rupture ont été traités et séparés suivant la provenance et le critère aubier/duramen (Figure 98), le reste étant moyenné. Les poutres constituées exclusivement de duramen présentent des modules d'élasticité et de résistance inférieurs à ceux des poutres constituées exclusivement d'aubier.

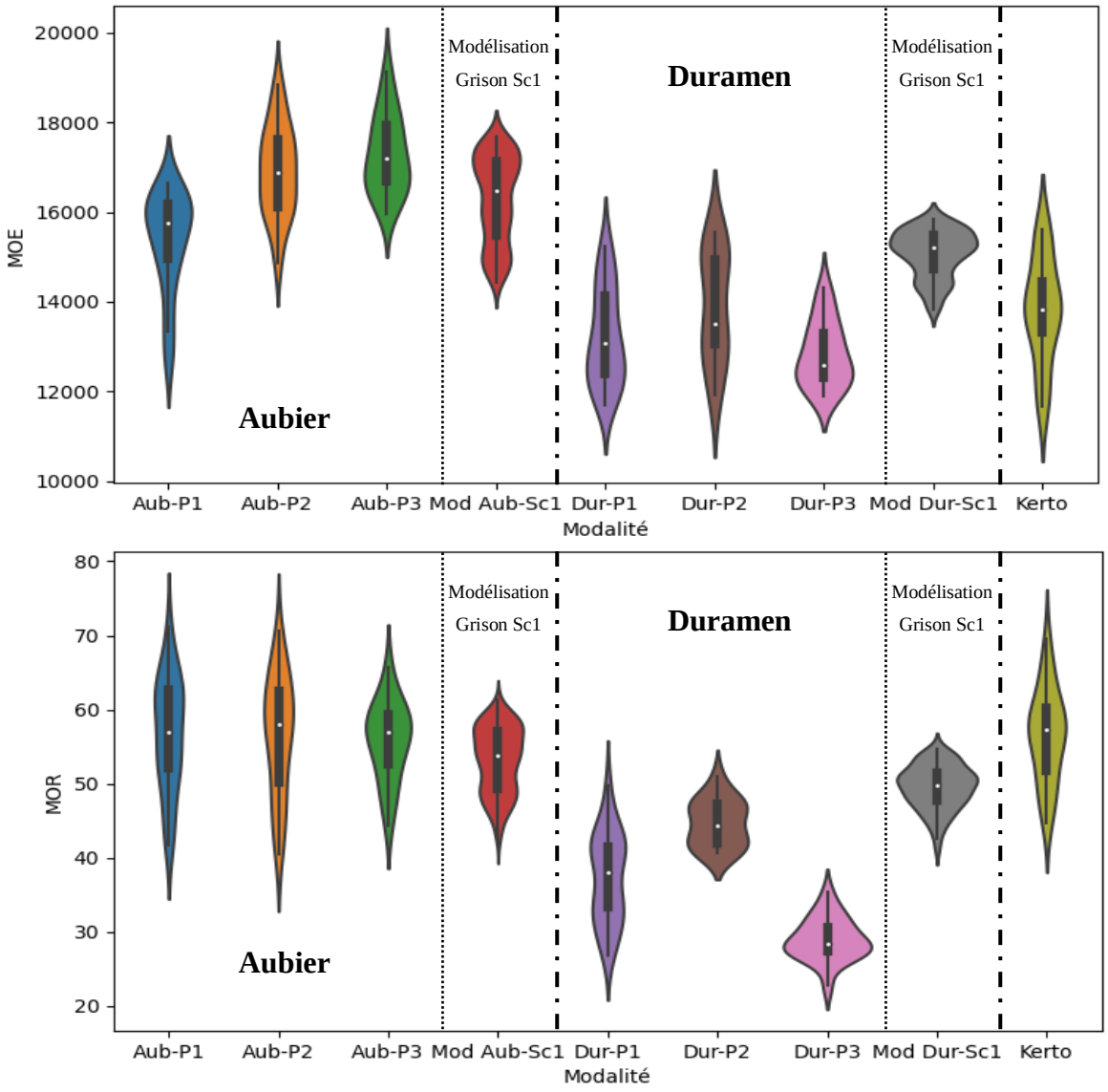


Figure 98 : Propriétés mécaniques des poutres issues du lot de France Douglas

La provenance influe peu sur les propriétés mécaniques des placages sauf pour la provenance 3 qui comporte des arbres élagués. C'est assez logique car P1 et P2 se ressemble beaucoup du point de vue itinéraire sylvicole. On observe qu'avant l'élagage, soit une partie de bois duraminisé, la forte nodosité liée à la branchaison et la plus faible masse volumique a abaissé

la rigidité du bois de ces arbres. Il faut aussi relever que cette provenance présente à la fois les meilleures propriétés dans l'aubier et les plus faibles dans le duramen de l'ensemble de l'échantillonnage. L'effet de cet itinéraire sylvicole est donc très net sur les propriétés du bois. En effet, la croissance rapide de ces arbres dans leur jeunesse a accentué la forte proportion de bois juvénile dans les poutres de duramen, affaiblissant ainsi leurs propriétés mécaniques, au contraire l'aubier de cette provenance (sans défauts) a un module d'élasticité plus élevé.

Plus généralement, les poutres composées d'aubier de douglas présentent un module d'élasticité supérieur à celui du Kerto et les poutres composées de duramen présente un module d'élasticité similaire au Kerto. La résistance est comparable pour les poutres issues de panneaux constitués d'aubier et celles en Kerto. En revanche, les poutres de duramen présentent une résistance à la rupture plutôt basse avec une moyenne à 37 MPa contre 56,5 MPa pour celles en aubier de douglas et celles en Kerto.

Plusieurs hypothèses peuvent expliquer cette valeur anormalement faible. Lors de cette étude, afin de suivre les placages dans le flux de production de l'entreprise, il a été nécessaire de manipuler plusieurs fois chaque placage. Cette opération sans impact pour les placages d'aubier a inévitablement amplifié la fissuration (déjà importante) dans le duramen. En effet, qu'elles soient dues au mécanisme de fissuration pendant la coupe par déroulage ou à un stress hydrique lors de la croissance des arbres, ces fissures traversant souvent l'épaisseur des placages, constituent des amorces de ruptures très pénalisantes, étant donné la sollicitation exercée sur le chant des poutres lors des essais sur le banc de flexion.

D'autres raisons plus systémiques permettent aussi d'expliquer que les mesures de résistance soient plus faibles avec des poutres de duramen qu'avec des poutres d'aubier. Ces dernières comportent en effet moins de nœuds, plus de bois mature (plus résistant) et un bois globalement plus dense. L'état de surface est aussi meilleur, ce qui est de nature à favoriser l'adhésion des plis aubieux lors du collage. Ceci ne peut qu'améliorer les propriétés mécaniques des produits reconstitués.

La simulation des arbres provenant de la forêt du Grison a été effectué suivant le scénario 1 similairement à la composition des panneaux. Dans la Figure 98, les trois sylvicultures ont été ajoutées. La modélisation montre des propriétés mécaniques dans le même ordre de grandeur que l'étude (Aubier/Duramen). Cependant, pour les poutres constituées de duramen, le module d'élasticité et de résistance sont légèrement supérieur avec modélisation. Ceci s'explique probablement par les différentes manipulations comme expliquées précédemment.

5.7- Synthèse

En assemblant les différents modèles (modélisation de l'arbre, des placages, de l'orientation des fibres dans les placages, de la densité, puis, des propriétés mécaniques), il est possible de prédire la distribution des propriétés mécaniques de poutres LVL issues d'une parcelle cartographiée (âge et diamètre des arbres, diamètre, hauteur, inclinaison, azimut et statut des branches).

Le modèle a été testé sur les arbres de parcelles expérimentales de la forêt domaniale du Grison avec un élagage virtuel. Il permet de prédire l'amélioration des propriétés mécaniques des poutres issues des arbres élagués. On constate bien une amélioration des propriétés mécaniques aussi bien d'un point de numérique qu'expérimental.

Les résultats du modèle sont cohérents en ordre de grandeur avec une étude de grande ampleur (100 m^3) portant sur la caractérisation des propriétés mécaniques de panneaux de douglas représentatif de la ressource française.

Conclusion et perspectives

Le procédé de déroulage c'est révélé bien adapté pour répondre à un des enjeux essentiels de cette thèse, à savoir, valoriser les gros douglas noueux non adaptés au ligne de sciage industrielle. Grâce à celui-ci, il est possible de réaliser des poutres en LVL pour obtenir des produits de construction avec des propriétés mécaniques comparables à ceux produits en épicéa. Plusieurs étapes ont été nécessaire afin d'estimer quantitativement et qualitativement le potentiel d'une parcelle de douglas, à produire des poutres LVL, dont on connait certaines données sylvicoles. Il a fallu :

- Dans un premier temps, identifier les paramètres à ajuster du processus de déroulage du douglas français et déterminer les plus favorables pour produire une qualité de placage bien adaptés à la fabrication de panneaux structurels.

- Dans un second temps, un modèle a été développé afin de prédire les propriétés mécaniques des placages prenant en compte la branchaison et la masse volumique des arbres. Ces placages virtuels ont ensuite été construits à partir des modèles d'arbres et assemblés afin de prédire les propriétés mécaniques des poutres LVL.

1 - Étude des paramètres du procédé de déroulage

Le douglas n'est pas une essence traditionnellement déroulée en France. En effet, cette essence est plutôt récente sur le sol français, et elle arrive seulement à maturité. Le déroulage de cette essence nécessite de prendre certaines précautions afin de garantir une qualité de placage optimale. La première partie de ce mémoire a permis de définir les paramètres ajustables industriellement. La qualité des placages a pu être quantifiée grâce aux critères de rugosité car une coupe de « bonne » qualité génère moins de fissuration et d'arrachement de fibres.

Le douglas étant un bois hétérogène avec une densité du bois très différente entre bois de printemps et bois d'été, il est important de garantir une vitesse de déroulage relativement rapide ($\gtrsim$2m/s) afin de limiter les arrachements de fibres et d'améliorer la qualité des placages. Le centrage du billon sur la moelle permet aussi de limiter la rugosité en évitant de franchir plusieurs fois les limites de cernes. Un angle d'affutage du couteau de 20° et un angle de dépouille proche de 0° assure un déroulage de qualité pour un placage déroulé de 3 mm d'épaisseur. De plus, une barre de pression rotative est nécessaire afin d'évacuer et prévenir tout risque de coincement des fibres dégradant fortement la qualité du placage. La température d'étuvage des billons a aussi un impact important sur la qualité des placages. En effet, une température minimale et nécessaire afin de rendre les nœuds plus malléable et ainsi garantir la durée de service du couteau tout en limitant le phénomène de fissuration cyclique dans le bois final. Cependant une température trop élevée dégrade les conditions de coupe et crée des arrachements de fibre. Une température de 50°C$\pm$10 permet d'obtenir un placage de bonne qualité pour des applications en contreplaqué ou LVL. Afin de s'assurer que cette température est atteinte au cœur du billon, un modèle de prédiction de la montée et de la descente en température au cœur des billons a été développé. La diffusivité thermique du douglas vert a été déterminée (entre 0,171 et 0,175 $mm^2.s^{-1}$). Ce modèle permet aux industriels d'estimer le temps nécessaire pour atteindre la température cible au cœur du billon. Des essais sur un site de production du groupe Thébault ont été réalisés et ont confirmé la fiabilité du modèle. Il va aussi être exploité dans le cas du déroulage du hêtre par la société Brugère. Les paramètres optimisés, dans cette étude, sont cohérents avec ceux pratiqués par de les dérouleurs en Amérique du Nord. Au final, même si le douglas est une essence hétérogène difficile à dérouler, elle ne l'est pas plus qu'en Amérique du Nord, où, elle constitue l'essence phare de l'industrie du déroulage.

2 - Modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles.

Une fois les paramètres de déroulage optimaux déterminés, nous nous sommes intéressés à la prédiction des propriétés mécaniques de poutres LVL en connaissant les caractéristiques des arbres.

Il a été nécessaire de reconstruire l'arbre et de le dérouler virtuellement afin de définir une cartographie de la position et de la taille des nœuds sur les placages déroulés. Deux billons déroulés au laboratoire nous ont permis de valider un modèle simplifié de nœuds (cône/cylindre) correspondant au déroulage réel. De plus, les perturbations de l'orientation des fibres créées par les nœuds ont été prises en compte dans un modèle ajusté au douglas. Cette étape a nécessité la mise au point d'un système très original de mesure de l'orientation locale des fibres sur la ligne de déroulage du LaBoMaP : le LOOBAR. Bien que le nombre de billon utilisés pour cette étude soit faible, la démonstration de la faisabilité de produire des placages virtuels à partir d'une modélisation de l'arbre et de sa branchaison a été faite. La spécificité de la coupe (déroulage) permet aussi de retrouver une typologie de nœud très particulière et proche d'un cercle, la plupart du temps, ce qui facilite grandement sa modélisation ainsi que son effet sur la variation locale de l'angle des fibres.

Un modèle analytique a été produit. Il repose sur la connaissance de l'orientation locale des fibres et de la densité moyenne des placages. Il a permis de prédire les propriétés mécaniques de placage et de poutres LVL. Ce modèle a été validé pour 10 poutres constituées de placages d'aubier et 11 poutres constituées de placages de duramen. Les poutres constituées de placages d'aubier présentent des corrélations particulièrement de bonnes. Pour les poutres constituées de placages de duramen, le taux de fissuration des placages et la proportion de bois juvénile n'étant pas pris en compte par le modèle, la prédiction des propriétés mécanique est plus délicate.

Enfin, ces différents modèles ont été appliqués à 15 arbres issus de la base de données « *ModelFor* ». Ces arbres, provenant de parcelles expérimentales de la forêt domaniale du Grison, ont reçu trois traitements sylvicoles différents (dynamique, intermédiaire et témoin). La différence des propriétés mécaniques entre les poutres issues de placage d'aubier et de

duramen est assez marquée. Il est aussi possible de distinguer un écart entre les propriétés mécaniques des placages provenant de la sylviculture dynamique et les deux autres.

Une simulation d'élagage des 15 arbres de la base de données de la forêt du Grison a été effectuée grâce au modèle. Les poutres issue d'arbres élaguées présentent un gain de propriétés mécaniques non négligeable (entre 1,7 et 4% pour le MOE et entre 4,8 et 7% pour le MOR).

L'ordre de grandeur des propriétés mécaniques est en accord avec les résultats d'une étude réalisée pour « France Douglas » estimant le potentiel de valorisation par déroulage du douglas issu de la ressource française. Ces produits (type LVL) possèdent des propriétés mécaniques qui peuvent rivaliser avec des produits déjà commercialisés et fabriqués principalement à partir d'épicéa sous condition de tri des placages (aubier, duramen, association optimisée entre eux)

3 - Perspectives

Avec une base de données plus importantes, modélisée suivant une sylviculture particulaire ou enregistrée grâce à des données LIDARS, le modèle global peut permettre d'estimer la quantité et la qualité de placages et de poutres LVL. Les sylviculteurs seront donc plus à même d'orienter leurs peuplements et de définir un prix sur une ressource forestière avec un fort potentiel de récolte dans les années à venir.

Il sera vraiment intéressant de développer des modèles forestiers prédisant la branchaison et la forme de chaque arbre d'une parcelle pour affiner la modélisation des arbres et, par la suite, des propriétés mécaniques.

La prise en compte, par le modèle, du taux plus élevé de fissuration et de la juvénilité des placages de duramen permettrait d'améliorer la prédiction des propriétés mécaniques. Une campagne d'expérimentale sur un nombre de billons plus important devra être réalisée pour valider la robustesse du modèle complet. Cette campagne permettra d'ajuster les équations faisant varier le module d'élasticité et de résistance en fonction de la masse volumique.

Une thèse actuellement en cours au LaBoMaP, menée par Robin Duriot, permettra de poursuivre le développement de la modélisation des propriétés mécaniques de poutres LVL et optimiser le LVL en termes de composition, de lamellation et de forme, compte tenu des contraintes mécaniques et des déformations hygroscopiques pour une application de nervure de tabliers dans le cadre de ponts mixte bois béton.

Références bibliographiques

[1] ONU, « Climat : la planète a connu une décennie de chaleur exceptionnelle », *ONU Info*, déc. 03, 2019. https://news.un.org/fr/story/2019/12/1057361.

[2] N. Höhne *et al.*, « Emissions: world has four times the work or one-third of the time », *Nature*, vol. 579, n° 7797, p. 25-28, mars 2020, doi: 10.1038/d41586-020-00571-x.

[3] R. Claire, *Le douglas un arbre exceptionnel*. Drulingen: Imprimerie Scheuer, 2010.

[4] C. Dodane, « Les nouvelles forêts du Massif Central: enjeux sociétaux et territoriaux. Ces hommes qui plantaient des résineux pour éviter la friche. », Thèse, 2010.

[5] FCBA, « Mémento ». 2018.

[6] FCBA, « Mémento ». 2019.

[7] A. Thivolle-Cazat, G. Weiller, et A. Bailly, « Ressource et disponibilité en douglas en France », présenté à Assises nationales du douglas, Bordeaux, France, 2018.

[8] ProSilva, « Importance et rôle des gros bois et très Gros Bois en France », Rapport d'étude, 2012.

[9] IFN, « Dimension des bois », 2020. https://inventaire-forestier.ign.fr/spip.php?article594 (consulté le sept. 09, 2020).

[10] R. Collet, « Quels nouveaux débouchés pour les gros bois résineux ? », *Forêt-entreprise*, n° 224, 2015.

[11] *LVL Handbook Europe*. Federation of the Finnish Woodworking Industries, 2019.

[12] A. Daoui, C. Descamps, R. Marchal, et A. Zerizer, « Influence of veneer quality on beech LVL mechanical properties », *Maderas. Ciencia y tecnología*, vol. 13, n° 1, p. 69–83, 2011.

[13] J. L. Le Calonnec, « Impacts du Douglas (Pseudotsuga menziesii) sur la biodiversite forestiere en Europe », p. 21, 2016.

[14] L. Augusto, J.-L. Dupouey, et J. Ranger, « Effects of tree species on understory vegetation and environmental conditions in temperate forests », *Annals of Forest Science*, vol. 60, n° 8, p. 823-831, déc. 2003, doi: 10.1051/forest:2003077.

[15] F. Mothe, « Aptitude au déroulage du bois de Douglas : conséquences de l'hétérogénéité du bois sur la qualité des placages », Thèse, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 1988.

[16] V. D. Thi, « Modélisation du comportement au feu des structures en bois », 2017, doi: 10.13140/RG.2.2.22917.86245.

[17] E. Wheeler, « Softwood Anatomy...longitudinal Tracheids », sept. 03, 2017. http://www4.ncsu.edu/~xylem/WPS202/softwood/lt.htm (consulté le oct. 25, 2018).

[18] M.-C. Trouy, « MOOC Anatomie du bois ». 2018.

[19] J. Bodig et B. A. Jayne, *Mechanics of wood and wood composites*, vol. 712. Van Nostrand Reinhold New York, 1982.

[20] W. M. McKenzie, « Fundamental analysis of the wood-cutting process », 1961.

[21] C. Decès-Petit, « Etude des phases transitoires au cours du déroulage de bois », Thèse, ENSAM, 1996.

[22] J. F. Lutz, « Techniques for peeling, slicing, and drying veneer », p. 68, 1974.

[23] E. Movassaghi, « Influence des paramètres microdensitométriques du bois sur les efforts de coupe et la qualité des placages de Douglas et de Châtaignier obtenus par déroulage », Thèse, Institut National Polytechnique de Lorraine, 1985.

[24] B. Thibaut, « Le processus de coupe du bois par déroulage », Thèse, Universite des sciences et techniques du Languedoc, Montpellier, France, 1988.

[25] H. Bailleres, L. Denaud, J.-C. Butaud, et R. L. McGavin, « Experimental Investigation on Rotary Peeling Parameters of High Density Coconut Wood », *BioResources*, vol. 10, nº 3, p. 4978–4996, juin 2015, doi: 10.15376/biores.10.3.4978-4996.
[26] F. Z. Bouarab, A. H. Aknouche, et A. Hamrani, « A Predictive Model of the Optimal Tool Edge Geometry for Veneer Cutting Processes », *Machining Science and Technology*, vol. 23, nº 5, p. 758-778, sept. 2019, doi: 10.1080/10910344.2019.1584820.
[27] C. Labidi, R. Collet, C. Nouveau, P. Beer, S. Nicosia, et M.-A. Djouadi, « Surface treatments of tools used in industrial wood machining », *Surf. Coat. Technol.*, vol. 200, nº 1-4, p. 118-122, printemps 2005.
[28] C. Peters et J. D. Cumming, « Measuring wood surface smoothness », *Forest Products Journal*, vol. 20, nº 12, p. 40–3, 1970.
[29] Salmén, « Temperature and water induced softening behaviour of wood fiberbased materials. », Thèse, The Royal Institute of Technology, 1986.
[30] J. Beauchêne, « Évolution du comportement mécanique du bois vert avec la température– application à l'étude du déroulage et du tranchage de quelques bois Guyanais », Thèse, ENGREF, Kourou, 1996.
[31] I. Aydin, G. Colakoglu, et S. Hiziroglu, « Surface characteristics of spruce veneers and shear strength of plywood as a function of log temperature in peeling process », *Int. J. Solids Struct.*, vol. 43, nº 20, p. 6140–6147, 2006, doi: 10.1016/j.ijsolstr.2005.05.034.
[32] A. Dupleix, « Feasibility of wood peeling assisted by infrared heating », Thèse, ENSAM, Cluny, France, 2013.
[33] M. Hecker, « Peeled Veneer from Douglas-Fir - Influence of Round Wood Storage, Cooking, and Peeling Temperature on Surface Roughness », présenté à IWMS, Kyoto, 1995.
[34] A. Rohumaa, T. Antikainen, C. G. Hunt, C. R. Frihart, et M. Hughes, « The influence of log soaking temperature on surface quality and integrity performance of birch veneer », *Wood Sci Technol*, vol. 50, nº 3, p. 463-474, mai 2016, doi: 10.1007/s00226-016-0805-5.
[35] S. E. Corder et G. H. Atherton, « Effect of peeling temperatures on Douglas fir veneer », Corvallis, Or.: Forest Research Laboratory, Oregon State University, 1963.
[36] A. Rohumaa, J. Viguier, S. Girardon, M. Krebs, et L. Denaud, « Lathe check development and properties: effect of log soaking temperature, compression rate, cutting radius and cutting speed during peeling process of European beech (Fagus sylvatica L.) veneer », *European Journal of Wood and Wood Products*, vol. 76, nº 6, p. 1653-1661, nov. 2018, doi: 10.1007/s00107-018-1341-9.
[37] G. Pot, L. E. Denaud, et R. Collet, « Numerical study of the influence of veneer lathe checks on the elastic mechanical properties of laminated veneer lumber (LVL) made of beech », *Holzforschung*, vol. 69, nº 3, p. 247-316, 2015, doi: 10.1515/hf-2014-0011.
[38] B. Pałubicki *et al.*, « A Method of Lathe Checks Measurement; SMOF device and its software », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 68, nº 2, p. 151-159, mai 2010, doi: 10.1007/s00107-009-0360-y.
[39] L. Denaud, « Analyses vibratoires et acoustiques du déroulage », Thèse, ENSAM, 2006.
[40] F. Mothe, G. Duchanois, B. Zannier, et J.-M. Leban, « Analyse microdensitométrique appliquée au bois: méthode de traitement des données utilisée à l'Inra-ERQB (programme Cerd) », in *Annales des sciences forestières*, 1998, vol. 55, p. 301–313.
[41] P. C. Botosso, « Une methode de mesure du retrait microscopique du bois : Application à la prédiction du retrait tangentiel d'éprouvette de bois massif de Sapin pectiné », 1997.
[42] B. Collet, A. Brackley, et J. Cumming, « Simplified, highly accurate method of producting high-quality veneer », 1971.

[43] H. Polge, « Quelques observations sur des fissures radiales dans le bois de douglas », *Annales des sciences forestières*, vol. 39, n° 4, p. 399-406, 1982.
[44] W. R. Day, « Drought Crack of Conifers », *Forestry Commision*, n° 26, p. 40, 1954.
[45] N. Melin, « Influence de la vitesse de croissance sur la qualité du bois de douglas », Mémoire de 3ème année, 1984.
[46] H. Polge, « Nouvelles observations sur les fissures radiales du douglas », *Biologie et forêt*, 1984.
[47] N. Melin et P. Riou-Nivert, « La microfissuration du bois de douglas : un défaut peu connu », *Forêt Entreprise*, n° 32, p. 26-29, déc. 1985.
[48] A. Carvalho, « Occurrence of uniannular clefts in the living wood of Pseudotsuga in Portugal. », *Forêt Méditérranéenne*, 1995.
[49] AMVALOR, « Optimisation du procédé de déroulage de douglas de gros diamètres et évaluation de la qualité des placages et caractérisation mécanique de panneaux CP et LVL », Rapport d'étude, déc. 2018.
[50] J. F. Lutz, « Heating veneer bolts to improve quality of Douglas-fir plywood », Rapport d'étude, 1960.
[51] J.-C. Butaud, C. Decès-Petit, et R. Marchal, « An Experimental Device for the Study of Wood Cutting Mechanisms : the Microlathe », in *12th International Wood Machining Seminar*, Kyoto, oct. 1995, p. 479–485.
[52] S. Stefanowski, R. Frayssinhes, G. Pinkowski, et L. Denaud, « Study on the in-process measurements of the surface roughness of Douglas fir green veneers with the use of laser profilometer », *Eur. J. Wood Prod.*, vol. 78, n° 3, p. 555-564, mai 2020, doi: 10.1007/s00107-020-01529-6.
[53] J.-C. Butaud, C. Decès-Petit, et R. Marchal, « An Experimental Device for the Study of Wood Cutting Mechanisms : the Microlathe », Kyoto, oct. 1995, p. 479-485.
[54] R. Frayssinhes, S. Stefanowski, L. Denaud, S. Girardon, B. Marcon, et R. Collet, « Peeled Veneer from Douglas-Fir: Soaking Temperature Influence on the Surface Roughness », in *Proceedings of the 24th International Wood Machining Seminar*, Corvallis, OR, USA, 2019, p. 237-245.
[55] F. W. Calonego, E. T. D. Severo, A. R. Cunha, et D. C. Gaia, « Use of glass transition temperature for stabilization of board's cracks of Eucalyptus grandis », *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 82, n° 3, p. 791-797, sept. 2010, doi: 10.1590/S0001-37652010000300025.
[56] R. Marchal, F. Mothe, L. E. Denaud, B. Thibaut, et L. Bleron, « Cutting forces in wood machining - Basics and applications in industrial processes. A review. COST Action E35 2004-2008: Wood machining - Micromechanics and fracture », *Holzforschung*, vol. 63, n° 2, p. 157-167, 2009.
[57] B. Thibaut *et al.*, « Wood machining with a focus on French research in the last 50 years », *Annals of Forest Science*, vol. 73, n° 1, p. 163-184, mars 2016, doi: 10.1007/s13595-015-0460-2.
[58] L. Denaud, R. Collet, et R. Frayssinhes, « La fabrication de LAMIBOIS (LVL) en Douglas, une opportunité française », *Forêt Entreprise*, n° 253, p. 45-50, août 2020.
[59] T. Maku, « Studies on the Heat Conductin in Wood: The present study is a discussion on the results of investigations made hitherto by author on heat conduction in wood. », 1954.
[60] R. Frayssinhes, S. Girardon, B. Marcon, L. Denaud, et R. Collet, « A Simple Method to Determine the Diffusivity of Green Wood », *BioResources*, p. 11, 2020.
[61] P. D. Miles et W. B. Smith, « Specific gravity and other properties of wood and bark for 156 tree species found in North America », U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA, USA, NRS-RN-38, 2009. doi: 10.2737/NRS-RN-38.

[62] CEA, *Cast3m*. French atomic energy commission, 2018.
[63] F. Kollmann, *Technologic des Holzes und der Holzwerkstoffe Bd. 1 [Technologie of Wood and Woodworking Material]*, Springer. Berlin, Germany, 1951.
[64] J. D. MacLean, « Relation Of Wood Density to Rate of Temperature Change in wood in Different Heat Medium », in *Proceedings of the 36th Annual Meeting of the American Wood Preserver Association*, St Louis, Missouri, USA, 1940, vol. 36, p. 220-248.
[65] P. Perré et I. Turner, « Determination of the Material Property Variations Across the Growth Ring of Softwood for Use in a Heterogeneous Drying Model. Part 2. Use of Homogenisation to Predict Bound Liquid Diffusivity and Thermal Conductivity », *Holzforschung*, vol. 55, nº 4, p. 417-425, janv. 2001, doi: 10.1515/HF.2001.069.
[66] Y. Jannot et C. Moyne, *Transferts thermiques: cours et 55 exercices corrigés*, Edilivre. Paris, France, 2016.
[67] J. D. Arney, « Computer simulation of Douglas-fir tree and stand growth », Thèse, 1972.
[68] M. W. Ritchie et D. W. Hann, « Development of a tree height growth model for Douglas-fir », *Forest Ecology and Management*, vol. 15, nº 2, p. 135–145, 1986.
[69] S. Dufour-Kowalski, B. Courbaud, P. Dreyfus, C. Meredieu, et F. de Coligny, « Capsis: an open software framework and community for forest growth modelling », *Annals of Forest Science*, vol. 69, nº 2, p. 221-233, mars 2012, doi: 10.1007/s13595-011-0140-9.
[70] N. L. Osborne et D. A. Maguire, « Modeling knot geometry from branch angles in Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 46, nº 2, p. 215-224, févr. 2016, doi: 10.1139/cjfr-2015-0145.
[71] F. Mothe, B. Thibaut, R. Marchal, et M. Negri, « Rotary cutting simulation of heterogeneous wood : application to douglas for peeling », *Proceedings of the 13th international wood machining seminar. Volumme II*, 1997. http://agritrop.cirad.fr/391663/ (consulté le nov. 27, 2017).
[72] T. A. Drewett, « The growth and quality of UK-grown Douglas-fir », Thèse, Edinburgh Napier University, 2015.
[73] A. Achim, B. Gardiner, J.-M. Leban, et R. Daquitaine, « Predicting the branching properties of Sitka spruce grown in Great Britain », *New Zealand Journal of Forestry Science*, p. 20, 2006.
[74] S. Hein, A. R. Weiskittel, et U. Kohnle, « Models on Branch Characteristics of Wide-Spaced Douglas-fir », p. 12, 2009.
[75] D. A. Maguire, J. A. Kershaw Jr, et D. W. Hann, « Predicting the effects of silvicultural regime on branch size and crown wood core in Douglas-fir », *Forest Science*, vol. 37, nº 5, p. 1409–1428, 1991.
[76] D. A. Maguire, S. R. Johnston, et J. Cahill, « Predicting branch diameters on second-growth Douglas-fir from tree-level descriptors », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 29, nº 12, p. 1829–1840, 1999.
[77] J. Weber, « Méta-analyse de la structure du houppier du sapin de Douglas », INRAE, UMR 1434 SILVA, Centre Grand Est, Nancy, Rapport de stage M1, 2020.
[78] *OpenGL*. 2019.
[79] *QT*. 2019.
[80] R. Frayssinhes, S. Girardon, L. Denaud, et R. Collet, « Modeling the Influence of Knots on Douglas-Fir Veneer Fiber Orientation », *Fibers*, vol. 8, nº 9, p. 54, août 2020, doi: 10.3390/fib8090054.
[81] J. R. Goodman et J. Bodig, « Mathematical model of the tension behavior of wood with knots and cross grain », Banff, Alberta, 1978.
[82] C. Foley, « Modeling the effects of knots in structural timber », Thèse, División of the Structural Engineering, Lund University, 2003.

[83] A. Shigo, *A New Tree Biology Facts Photos, and Philosophies on Trees and Their Problems and Proper Care*. 1997.
[84] M. Belkacemi *et al.*, « Wood fiber orientation assessment based on punctual laser beam excitation: A preliminary study », Gdansk, Poland, juill. 2016.
[85] A. Briggert, M. Hu, A. Olsson, et J. Oscarsson, « Tracheid effect scanning and evaluation of in-plane and out-of-plane fiber direction in norway spruce timber », *Wood and Fiber Science*, vol. 50, nº 4, p. 411-429, oct. 2018.
[86] V. Daval, G. Pot, M. Belkacemi, F. Meriaudeau, et R. Collet, « Automatic measurement of wood fiber orientation and knot detection using an optical system based on heating conduction », *Optics express*, vol. 23, nº 26, p. 33529–33539, 2015, doi: 10.1364/OE.23.033529.
[87] Y. Faydi *et al.*, « Modélisation des propriétés mécaniques du bois à partir de la mesure de la pente de fil », Lyon, août 2015.
[88] C. Hu, C. Tanaka, et T. Ohtani, « On-line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser light scattering pattern image », *J Wood Sci*, vol. 50, nº 4, p. 321-326, août 2004, doi: 10.1007/s10086-003-0569-z.
[89] J. Nyström, « Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect », *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 41, nº 1-3, p. 91-99, déc. 2003, doi: 10.1016/S0168-1699(03)00045-0.
[90] C. Y. C. Purba, J. Viguier, L. Denaud, et B. Marcon, « Contactless moisture content measurement on green veneer based on laser light scattering patterns », *Wood Sci Technol*, mai 2020, doi: 10.1007/s00226-020-01187-0.
[91] S.-P. Simonaho, J. Palviainen, Y. Tolonen, et R. Silvennoinen, « Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern », *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 41, nº 1, p. 95–103, 2004, doi: 10.1016/S0143-8166(02)00144-6.
[92] J. Viguier, C. Bourgeay, A. Rohumaa, G. Pot, et L. Denaud, « An innovative method based on grain angle measurement to sort veneer and predict mechanical properties of beech laminated veneer lumber », *Construction and Building Materials*, vol. 181, p. 146-155, août 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.050.
[93] J. Zhou et J. Shen, « Ellipse detection and phase demodulation for wood grain orientation measurement based on the tracheid effect », *Optics and lasers in engineering*, vol. 39, nº 1, p. 73–89, 2003, doi: 10.1016/S0143-8166(02)00041-6.
[94] *Opencv*. 2019.
[95] S.-P. Simonaho et R. Silvennoinen, « Sensing of wood density by laser light scattering pattern and diffractive optical element based sensor », *Journal of Optical Technology*, vol. 73, nº 3, p. 170-174, 2006.
[96] Hankinson, « Investigation of crushing strength of spruce at varying angles of grain », *Air service information circular*, vol. 3, nº 259, p. 16, 1921.
[97] D. Guitard, *Mécanique du matériau bois et composites*. Cépaduès, 1987.
[98] C. Pollet, J.-M. Henin, J. Hébert, et B. Jourez, « Effect of growth rate on the physical and mechanical properties of Douglas-fir in western Europe », *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 47, nº 8, p. 1056-1065, août 2017, doi: 10.1139/cjfr-2016-0290.
[99] R. J. Ross, « Wood handbook: wood as an engineering material », *USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, General Technical Report FPL-GTR-190, 2010: 509 p. 1 v.*, vol. 190, 2010.
[100] M. O. Kimberley, R. B. McKinley, D. J. Cown, et J. R. Moore, « Modelling the variation in wood density of New Zealand-grown Douglas-fir », *New Zealand Journal of Forestry Science*, vol. 47, nº 1, déc. 2017, doi: 10.1186/s40490-017-0096-0.
[101] AFNOR, « NF EN 408 ». 2012.

[102] B. Besseau, G. Pot, R. Collet, et J. Viguier, « Influence of wood anatomy on fiber orientation measurements obtained by laser scanning on five European species », *Journal of Wood Science*, En cours de soumission.
[103] T. Bäck, D. B. Fogel, et Z. Michalewicz, *Evolutionary computation 1: Basic algorithms and operators*. CRC press, 2018.

Annexes

Annexe A : Paramètres de rugosité

La rugosité est un critère essentiel dans les processus d'usinage des matériaux. Elle est un indicateur de la création d'une nouvelle surface. On peut la comparer à la mémoire de l'usinage. Une rugosité bien maitrisée est essentielle dans certains domaines, par exemple, la surface d'un cylindre d'un moteur à explosion doit présenter des rainures croisées afin de permettre une lubrification suffisante au passage du piston.

Les paramètres d'état de surface utilisés en profilométrie sont séparés en trois groupes selon le type de profil : les paramètres (de préfixe) P qui sont calculés sur le profil primaire ; les paramètres R ou S qui sont calculés sur le profil de rugosité linéaire ou surfacique ; et les paramètres W qui sont calculés sur le profil d'ondulation. La séparation entre le profil d'ondulation et le profil de rugosité est effectuée à l'aide d'un filtre fréquentiel. Les fréquences élevées sont représentatives du profil de rugosité et les fréquences faibles sont représentatives du profil d'ondulation (Figure 99).

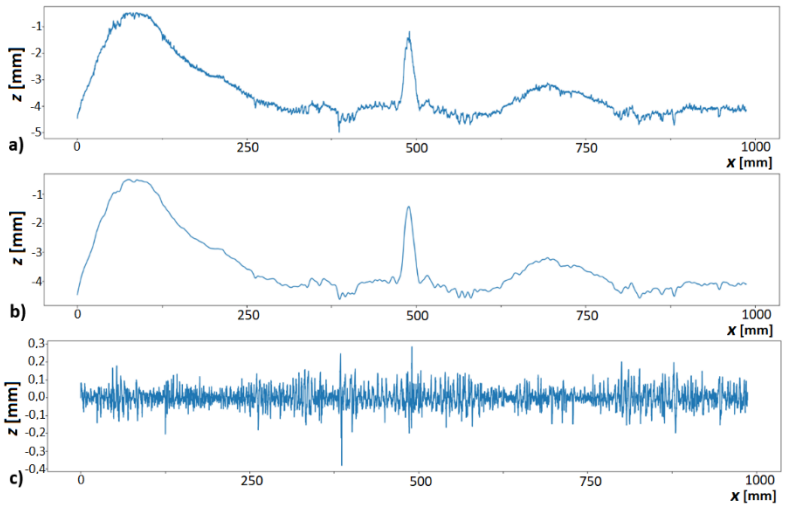


Figure 99 : Exemple du profil de hauteur pour a) le profil primaire non filtré ; b) le profil d'ondulation ; c) le profil de rugosité [52]

Il est possible de distinguer plusieurs paramètres permettant de caractériser la rugosité d'une surface. Certains paramètres sont calculés sur un profil linéaire, noté par la lettre « R », d'autres directement sur une surface, notés par la lettre « S ». La norme NF EN ISO 4287 : 1998 décrit ces différents paramètres.

Dans le cas de la rugosité linéaire, une longueur de base et une longueur d'évaluation sont définies dans la norme NF EN 4288 en fonction de la rugosité (Tableau 24). Dans le cas de la rugosité surfacique, aucune longueur de base et de référence ne sont définies dans les normes, mais il semble acceptable d'utiliser un carré ayant les côtés correspondants à la longueur d'évaluation (Ln).

Tableau 24 : Longueurs de base de rugosité pour le mesurage de Ra, Rq, Rsk, Rku, RDq et pour les courbes et paramètres associés de profils non périodiques (Extrait de la norme NF EN 4288)

Ra µm	**Longueur de base de rugosité** Lr mm	**Longueur d'évaluation de rugosité** Ln mm
(0.006)<Ra⩽0.02	0.08	0.4
0.02<Ra⩽0.1	0.25	1.25
0.1<Ra⩽2	0.8	4
2<Ra⩽10	2.5	12.5
10<Ra⩽80	8	40

Les paramètres les plus communément employés sont :

- La moyenne arithmétique des hauteurs absolues (Ra ou Sa) :

$$R_a = \frac{1}{l}\int_0^l \left|\tilde{Z}(x)\right| dx \qquad S_a = \frac{1}{A}\iint_A \left|\tilde{Z}(x,y)\right| dx\, dy \qquad (14)$$

- La moyenne quadratique des hauteurs (Rq ou Sq) :

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l}\int_0^l \tilde{Z}(x)^2\, dx} \qquad S_q = \sqrt{\frac{1}{A}\iint_A \tilde{Z}(x,y)^2\, dx\, dy} \qquad (15)$$

- La hauteur maximale (Rz ou Sz) :

$$R_z = \frac{1}{5}\sum_{i=1}^{5} R_{p_i} - R_{v_i} \qquad S_z = \frac{1}{25}\sum_{i=1}^{25} S_{p_i} - S_{v_i} \qquad (16)$$

- Le facteur d'asymétrie de la distribution des hauteurs (Rsk ou Ssk) :

$$R_{sk} = \frac{1}{l.R_q^3}\int_0^l \tilde{Z}(x)^3\,dx \qquad S_{sk} = \frac{1}{A.S_q^3}\iint_A \tilde{Z}(x,y)^3\,dx\,dy \qquad (17)$$

- Le facteur d'aplatissement de la distribution des hauteurs (Rku ou Sku) :

$$R_{ku} = \frac{1}{l.R_q^4}\int_0^l \tilde{Z}(x)^4\,dx \qquad S_{ku} = \frac{1}{A.S_q^4}\iint_A \tilde{Z}(x,y)^4\,dx\,dy \qquad (18)$$

Grâce à ces différents paramètres, il est possible de décrire la texture d'un profil ou d'une surface. Les paramètres les plus couramment employés sont généralement la moyenne arithmétique (Ra) et la hauteur maximale (Rz). Dans certains cas, ils sont cependant insuffisants pour décrire certaines altérations de surface.

Par exemple, la Figure 100 permet de voir que deux profils avec un Ra et un Rz similaires peuvent, en réalité, être très différents. Dans ce cas, le Rsk du profil 1 sera significativement négatif, c'est-à-dire que le pic de la distribution des hauteurs sera excentré vers les altitudes élevées. On peut considérer ce profil comme un plateau avec d'étroites et profondes vallées. C'est intéressant dans le cas des placages, car un profil présentant un Rsk significativement négatif pourra être assimilé à un placage ayant subi des arrachements de fibres. Dans le cas du profil 2, le Rsk sera significativement positif, avec le pic de la distribution des hauteurs excentré vers les altitudes basses. Pour des placages, cela signifiera que certaines fibres n'ont pas été bien coupées par l'outil, la surface sera pelucheuse.

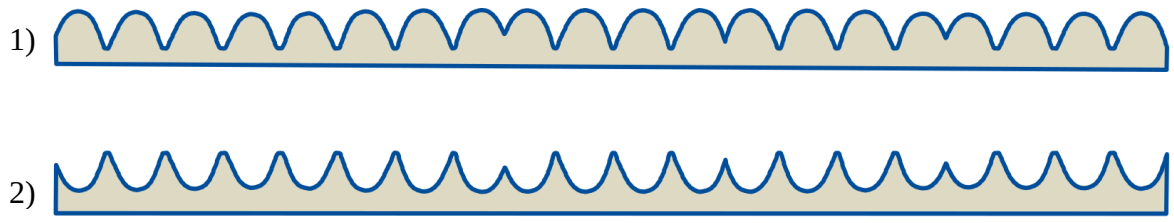


Figure 100 : Comparaison de deux profils (Extrait de « Digital Surf, Analyse des états de surface selon ISO 25178 »)

Annexe B : Ovale de Rankine

L'ovale de Rankine peut être décrit mathématiquement comme une superposition d'une source et d'un puit de même débit dans un flux unidirectionnel et uniforme.

L'exemple le plus simple de flux correspond à un flux unidirectionnel et uniforme le long d'un des axes de coordonnées, par exemple la direction x, déterminé par l'équation (19) :

$$\psi = Uy \tag{19}$$

Le flux généré par une source à une distance (a) peut être exprimé en coordonnées cartésiennes par l'équation (20) :

$$\psi = \frac{q}{2\pi}\arctan\left(\frac{y}{x+a}\right) \tag{20}$$

Et réciproquement, le flux absorbé par le puit à une distance $(-a)$ peut être exprimé en coordonnées cartésiennes par l'équation (21) :

$$\psi = \frac{-q}{2\pi}\arctan\left(\frac{y}{x-a}\right) \tag{21}$$

En superposant les équations (19), (20) et (21), il est possible de déterminer le flux global par l'équation (22) :

$$\psi = Uy + \frac{q}{2\pi}\left(\arctan\left(\frac{y}{x+a}\right) - \arctan\left(\frac{y}{x-a}\right)\right) \tag{22}$$

La vitesse du flux peut être déterminée par les équations (23) :

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial\psi}{\partial y} = U + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{x+a}{(x+a)^2+y^2} - \frac{x-a}{(x-a)^2+y^2}\right) \\ v &= -\frac{\partial\psi}{\partial x} = -\frac{q}{2\pi}\left(\frac{y}{(x-a)^2+y^2} - \frac{y}{(x+a)^2+y^2}\right) \end{aligned} \tag{23}$$

Pour réaliser des ovales, on doit déterminer le couple (q, a) position et débit des sources et puits. Le système (équation (24)) peut être déterminé pour que la vitesse du flux (u) soit nulle aux points de stagnation notés (S) et que (v) soit nulle au point (P) sur la Figure 101.

$$\begin{cases} u_S = 0 = U + \frac{q}{2\pi}\left(\frac{1}{x_S+a} - \frac{1}{x_S-a}\right) \\ v_P = 0 = -\frac{q}{2\pi}\left(\frac{y_P}{(-a)^2+y_P^2} - \frac{y_P}{a^2+y_P^2}\right) \end{cases} \tag{24}$$

Dans notre cas, nous souhaitons simplement faire un cercle. On peut donc fixer le paramètre (a) à une valeur. Par exemple, dans le code Python, le paramètre (a) est fixé à $a = l/100$ avec l étant le rayon du nœud. Le paramètre (q) peut donc être déterminé par l'équation (25):

$$q = -\frac{(2a + l) \times (2a - l) \times \pi}{4a} \qquad (25)$$

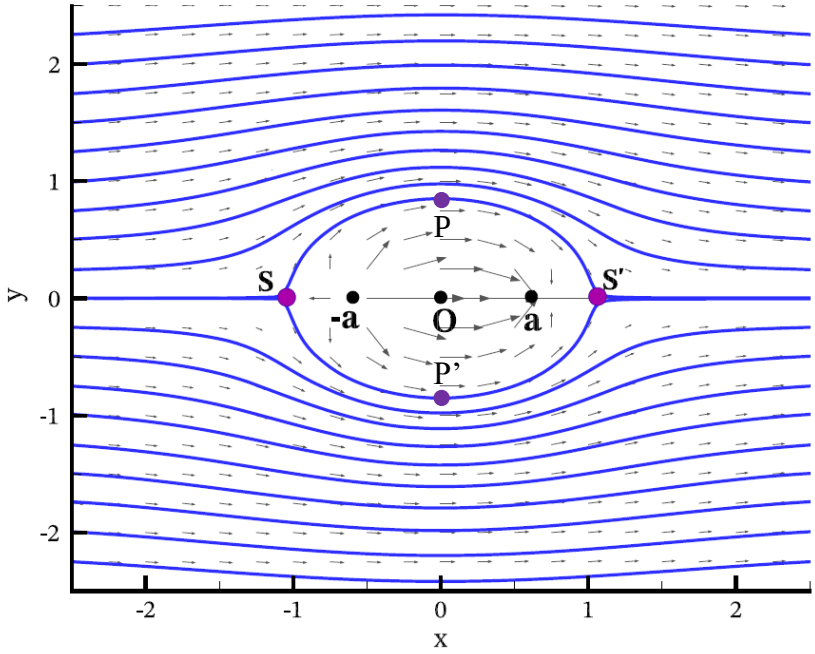


Figure 101 : Ovale de Rankine

Annexe C : Modélisation des propriétés mécaniques

C.1 - Procédure analytique pour la prédiction du module d'élasticité

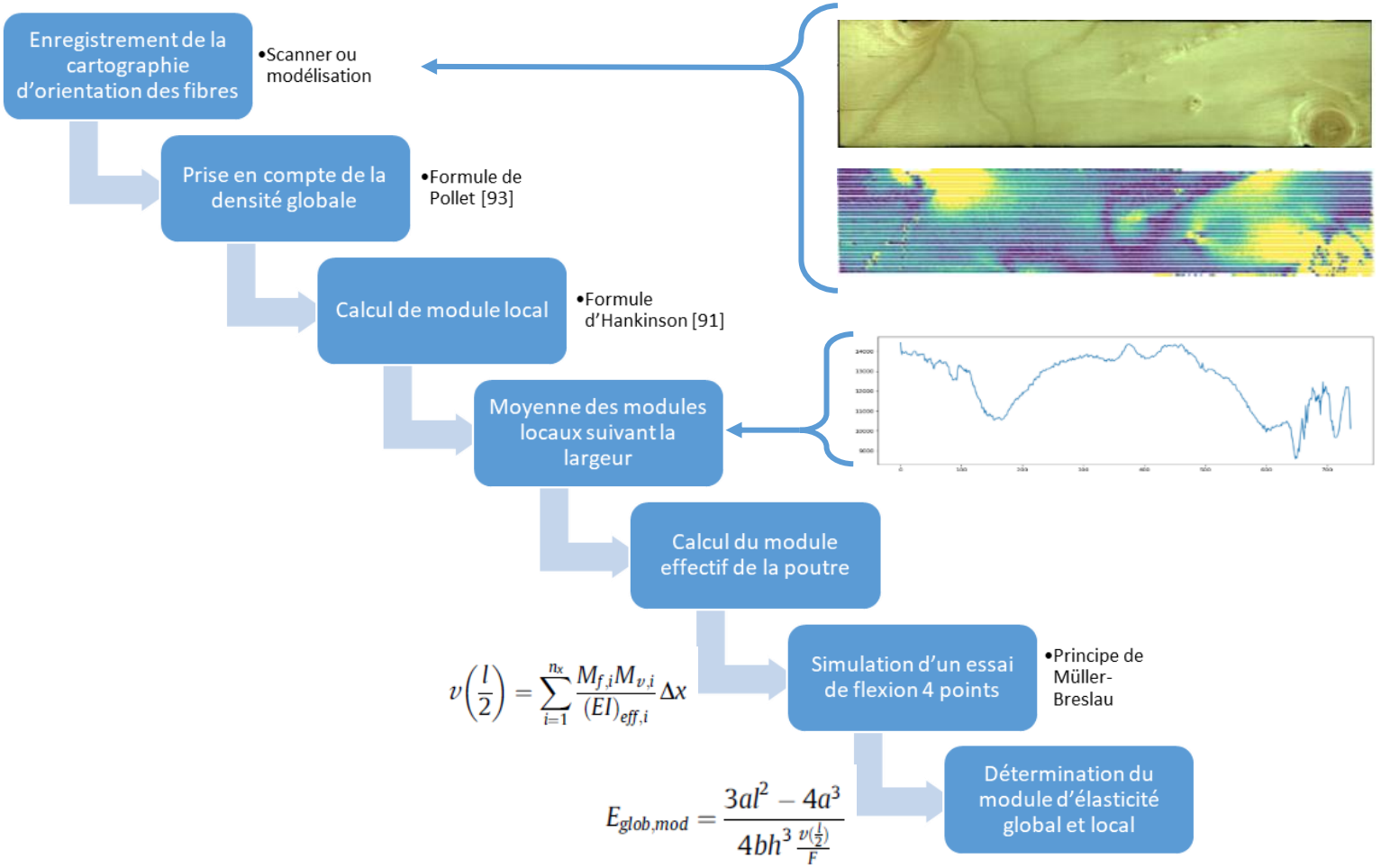


Figure 102 : Procédure analytique pour la modélisation du module d'élasticité

C.2 - Procédure analytique pour la prédiction du module de rupture

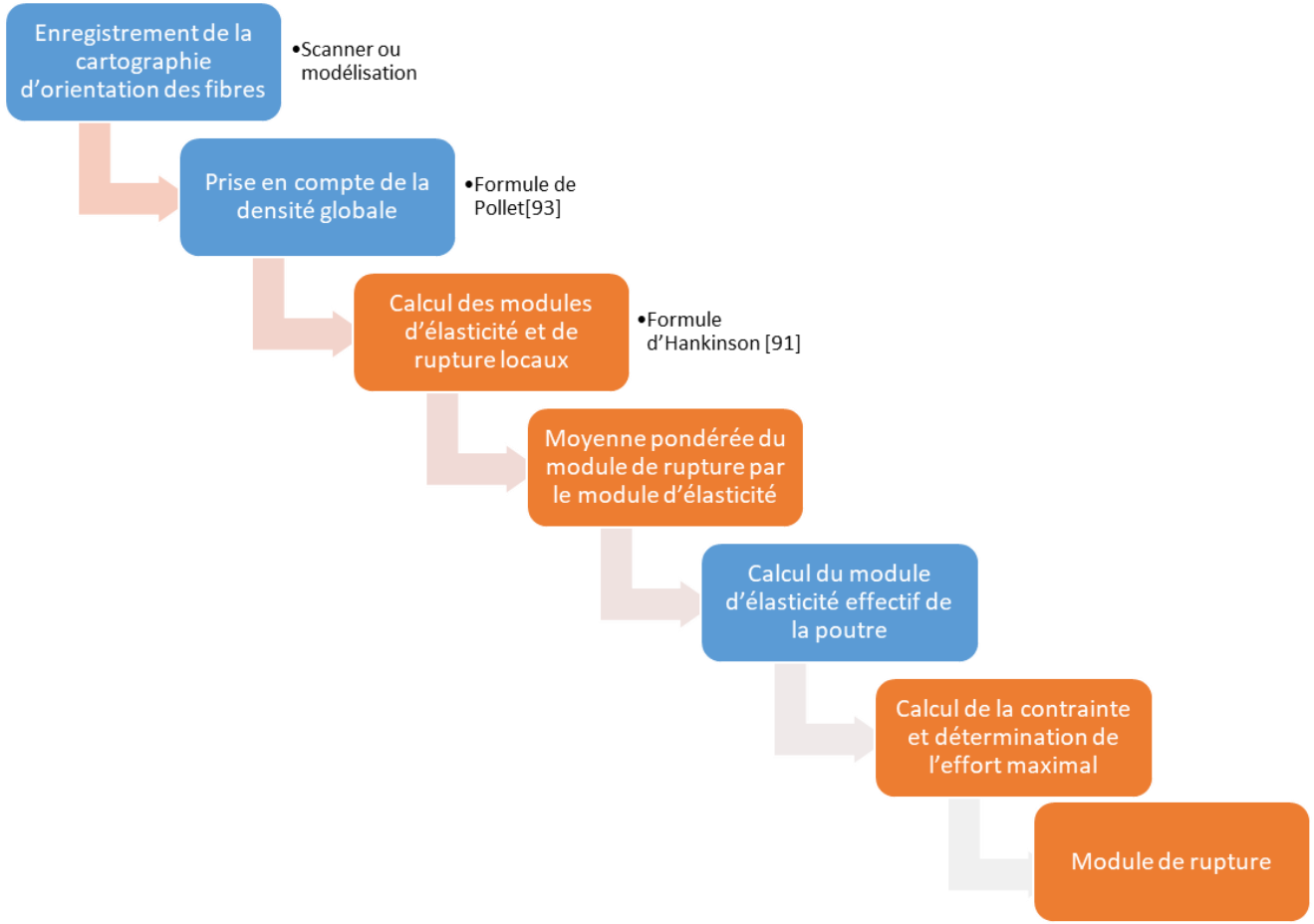


Figure 103 : Procédure analytique pour la modélisation du module de rupture

Rémy FRAYSSINHES

Optimisation des paramètres de déroulage du douglas et modélisation des propriétés mécaniques de panneaux de LVL intégrant les données sylvicoles

Résumé

Le douglas a été implanté massivement en France métropolitaine il y a une 50^{aine} d'années. La part de gros bois, en raison du vieillissement des peuplements, va s'accroître dans les années à venir. Une part de cette ressource ne correspondra pas aux approvisionnements recherchés par les plus grosses scieries et va se déprécier. Un procédé de transformation du bois bien adapté pour la valorisation de cette ressource est le déroulage. En France, le douglas n'est pas une essence déroulée dû à sa récente maturité. Les placages peuvent servir à réaliser des panneaux de contreplaqué, mais aussi de LVL. Une étude des paramètres optimaux de déroulage a été nécessaire afin d'obtenir des placages de qualité. Ensuite, un modèle prenant en compte les données sylvicoles d'un peuplement a été développé afin d'estimer les propriétés mécaniques de poutres LVL. Il a permis de prédire les propriétés mécaniques de poutres fabriquées avec des arbres issus de trois placettes avec des itinéraires sylvicoles « contrastés ». Une simulation d'un élagage à 20 ans sur ces arbres montre l'intérêt d'utiliser cet outil d'aide à la décision pour la conduite des peuplements forestiers.

Résumé en anglais

Douglas fir was established massively in France around 50 years ago. The proportion of large tree, due to aging of the stands, will increase in the years to come. Part of this resource will not correspond to the supplies sought by the largest sawmills and will depreciate. Peeling process is well suited for the enhancement of this resource. In France, Douglas fir is not a peeled species due to its recent maturity. Veneers can be used to make plywood panels, but also LVL. A study of the optimal peeling parameters was necessary in order to obtain quality veneers. Then, a model taking into account the silvicultural data of a stand was developed in order to estimate the mechanical properties of LVL beams. It was used to predict the mechanical properties of beams made with trees from three plots of "contrasting" silvicultural routes. A simulation of a 20-year pruning on these trees shows the value of using this decision-support tool for managing forest stands.