



# **Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser**

Arnaud Jehl

## **► To cite this version:**

Arnaud Jehl. Modélisation du comportement mécanique des bois de structures par densitométrie X et imagerie laser. Matériaux. Paris, ENSAM, 2012. Français. <NNT : 2012ENAM0008>. <tel-01682225>

**HAL Id: tel-01682225**

**<https://pastel.hal.science/tel-01682225v1>**

Submitted on 12 Jan 2018

**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.



HAL Authorization

École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur

**Doctorat ParisTech**

**T H È S E**

pour obtenir le grade de docteur délivré par

**l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

**Spécialité "Mécanique et Matériaux"**

*présentée et soutenue publiquement par*

**Arnaud JEHL**

le 18 Juin 2012

**Modélisation du comportement mécanique des bois de structures  
par densitométrie X et imagerie laser**

**Confidentiel jusqu'au 18 juin 2017**

Directeur de thèse : **Laurent BLERON**

Co-encadrement de la thèse : **Rémy MARCHAL, Fabrice MERIAUDEAU et Raphaël VOGRIG**

**Jury**

**M. Joseph GRIL**, Directeur de recherche, MAB, CNRS  
**M. Philippe VIOT**, Professeur, I2M, Arts et Métiers ParisTech  
**M. Laurent BLERON**, Maître de conférences, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech  
**M. Robert COLLET**, Maître de conférences, LaBoMaP, Arts et Métiers ParisTech  
**M. Jean-Michel LEBAN**, Directeur de recherche, LERFoB, INRA  
**M. Fabrice MERIAUDEAU**, Professeur, Le2I, IUT Le Creusot  
**M. Guillaume ROBLOT**, Docteur, Luxscan Technologies, Luxembourg  
**M. Raphaël VOGRIG**, Docteur, Luxscan Technologies, Luxembourg

Rapporteur  
Rapporteur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Examineur  
Invité  
Invité

**T  
H  
È  
S  
E**







# Remerciements

---

Je souhaiterais en premier lieu remercier Luxscan Technologies, entreprise partenaire de cette étude, pour m'avoir offert la possibilité de prendre part à ce projet. Je tiens à souligner la confiance et le soutien apportés par Raphaël VOGRIG, ainsi que ses conseils ayant fortement contribué au bon déroulement de ce doctorat. Il est difficile, par ailleurs, d'exprimer la contribution de Guillaume ROBLOT dans ces travaux, tant celle-ci a pu être décisive dans pratiquement tous les domaines. Il est certain que sans son aide, l'issue de ce projet aurait été différente à bien des égards, et que ces quelques lignes ne sont qu'un aperçu de toute la reconnaissance qu'il mérite. Je souhaite également remercier Jean-Yves HERGOTT pour son soutien et ses conseils avisés, en particulier concernant les problématiques de vision. Enfin, d'une manière générale, je remercie chacun des collaborateurs de Luxscan Technologies car tous sans exception m'ont, à un moment ou un autre, aidé ou apporté leur soutien, voire les deux dans la plupart des cas. Je tiens à ce qu'ils sachent que leur sympathie a pour moi été essentielle au cours de ces trois dernières années.

Je ne peux évidemment pas oublier les enseignants-chercheurs du LaBoMaP, au premier rang desquels se trouve Laurent BLERON. Ses conseils ont évidemment été particulièrement décisifs tout au long de cette thèse, mais je tiens à souligner la qualité d'écoute dont il a fait preuve, ses encouragements et son soutien essentiels, et ce malgré la distance nous ayant séparé. Je me considère incroyablement chanceux d'avoir effectué cette thèse sous sa direction, et je profite de cette occasion pour lui souhaiter autant d'épanouissement dans les prochaines années que j'en ai ressenti en le côtoyant. Je remercie également tous ceux que j'ai eu la chance de rencontrer avant et pendant cette thèse : Rémy MARCHAL, Robert COLLET, Michaël KREBS et Louis DENAUD, par ordre d'apparition. J'ai eu énormément de plaisir à fréquenter des personnes toujours ouvertes et stimulantes, d'excellent conseil, et dont le soutien a également été essentiel.

Je tiens par ailleurs à remercier Fabrice MERIAUDEAU pour son aide au cours de ces travaux, et pas uniquement concernant la vision par ordinateur. Ses remarques et conseils toujours pertinents, ont grandement contribué aux résultats obtenus. Je profiterai également de cette occasion pour remercier Samuel CHEF, dont l'aide a été précieuse au cours des essais de spectroscopie IR et de fluorescence, qui n'ont malheureusement pas abouti à des résultats exploitables.

Je souhaiterais également remercier Frédéric MOTHE et Jean-Michel LEBAN, que j'ai eu la chance de rencontrer dans les locaux du LERFoB, et qui m'ont permis d'accéder à leurs ressources documentaires. Je les remercie également pour les échanges forts instructifs que nous avons eus au cours de cette journée. J'adresse une mention particulière à Jean-Michel qui a su débloquer la situation alors que je m'étais enfermé moi-même dehors sous la pluie.

Pour terminer, je tiens à m'excuser si j'oublie certaines personnes. J'ai eu l'occasion de rencontrer beaucoup de gens au cours des trois dernières années, chacune ayant contribué à sa manière, directe ou indirecte, à l'issue finale de cette thèse. Comme il serait vain de tenter d'établir une liste exhaustive, et que par ailleurs j'ai une mémoire des noms ridicule, je me contenterai d'exprimer ma gratitude à tous ceux qui se sentiront concernés.



# Table des matières

|  |           |
|--|-----------|
| <b>REMERCIEMENTS.....</b>  | <b>5</b>  |
| <b>TABLE DES MATIERES.....</b>                                     | <b>7</b>  |
| <b>INTRODUCTION .....</b>  | <b>13</b> |
| 1. CLASSEMENT MECANIQUE DES SCIAGES .....                          | 13        |
| 2. DE L'ANALYSE GLOBALE A L'ANALYSE LOCALE .....                   | 15        |
| 3. DEROULEMENT DE L'ETUDE.....                                     | 16        |
| <b>CHAPITRE I : BIBLIOGRAPHIE .....</b>                            | <b>17</b> |
| 1. DE LA STRUCTURE DE L'ARBRE A LA MICROSTRUCTURE CELLULAIRE ..... | 17        |
| 1.1 Anatomie et structure des arbres .....                         | 17        |
| 1.1.1 : Structure et métabolisme des arbres.....                   | 17        |
| 1.1.2 : Anatomie du tronc .....                                    | 18        |
| 1.2 Mécanismes de croissance .....                                 | 19        |
| 1.2.1 : L'origine des arbres .....                                 | 19        |
| 1.2.2 : Croissance primaire.....                                   | 19        |
| 1.2.3 : Croissance secondaire.....                                 | 20        |
| 1.2.4 : Du bois de printemps au bois d'été .....                   | 20        |
| 1.2.5 : Modèle de l'empilement de cônes .....                      | 21        |
| 1.3 Structure cellulaire des résineux .....                        | 21        |
| 1.3.1 : Organisation cellulaire .....                              | 22        |
| 1.3.2 : Orthotropie du bois.....                                   | 22        |
| 1.4 Anatomie des trachéides.....                                   | 22        |
| 1.4.1 : Géométrie générale .....                                   | 23        |
| 1.4.2 : Construction des parois .....                              | 23        |
| 1.4.3 : Microfibrilles de cellulose .....                          | 24        |
| 1.4.4 : Hémicelluloses .....                                       | 24        |
| 1.4.5 : Lignines .....   | 24        |
| 2. COMPLEXITE ET SINGULARITES DU MATERIAU BOIS .....               | 25        |
| 2.1 Relation densité – module élastique – résistance.....          | 25        |
| 2.2 Nature hygroscopique du bois .....                             | 25        |
| 2.2.1 : Variations dimensionnelles .....                           | 25        |
| 2.2.2 : Impact sur le comportement mécanique.....                  | 26        |
| 2.3 Différents modes de débit.....                                 | 26        |
| 2.4 Nœuds et déviation des fibres .....                            | 26        |
| 2.4.1 : Origine et géométrie des nœuds .....                       | 26        |
| 2.4.2 : Déviation des fibres autour des nœuds .....                | 27        |
| 2.4.3 : Déviation hélicoïdale des fibres .....                     | 28        |
| 2.5 Bois de compression des résineux.....                          | 28        |
| 2.5.1 : Origine du bois de compression.....                        | 28        |
| 2.5.2 : Structure et microstructure du bois de compression .....   | 29        |
| 2.5.3 : Impact sur le comportement du bois.....                    | 29        |
| 2.6 Du bois juvénile au bois adulte.....                           | 29        |
| 2.6.1 : Bois juvénile et maturation du cambium .....               | 29        |
| 2.6.2 : Microstructure du bois juvénile .....                      | 30        |
| 2.6.3 : Impact sur le comportement du bois.....                    | 30        |
| 2.7 Altérations fongiques et entomiques.....                       | 30        |
| 2.7.1 : Attaques fongiques .....                                   | 30        |
| 2.7.2 : Attaques par insectes.....                                 | 31        |



|  |    |
|--|----|
| 3. CLASSEMENT MECANIQUE DES BOIS DE STRUCTURES .....                 | 31 |
| 3.1 Cadre normatif .....   | 31 |
| 3.1.1 : Les Eurocodes : dimensionnement des structures .....         | 31 |
| 3.1.2 : L'EN 338 : les classes de résistance des sciages .....       | 32 |
| 3.1.3 : L'EN 14081 : homologation des machines .....                 | 32 |
| 3.2 Classement mécanique global des sciages .....                    | 34 |
| 3.2.1 : Classement mécanique visuel .....                            | 34 |
| 3.2.2 : Classement mécanique global par machine .....                | 35 |
| 3.3 Knot Area Ratio : prise en compte des nœuds .....                | 36 |
| 3.3.1 : Principe de calcul du KAR .....                              | 36 |
| 3.3.2 : Calcul automatique du KAR .....                              | 37 |
| 3.3.3 : Résultats obtenus .....                                      | 37 |
| 3.4 Area Reduction Factor : prise en compte de la pente de fil ..... | 37 |
| 3.4.1 : Principe du calcul de l'ARF .....                            | 37 |
| 3.4.2 : Résultats obtenus .....                                      | 38 |
| 3.5 Techniques de modélisation avancées .....                        | 39 |
| 3.5.1 : Homogénéisation micromécanique .....                         | 39 |
| 3.5.2 : Analyse par Eléments Finis .....                             | 40 |
| 3.5.3 : Limites actuelles .....                                      | 40 |
| 4. TECHNIQUES DE CARACTERISATION DU MATERIAU BOIS .....              | 41 |
| 4.1 Vision humaine et artificielle .....                             | 41 |
| 4.1.1 : Vision humaine .....   | 41 |
| 4.1.2 : Vision artificielle .....                                    | 41 |
| 4.2 Analyse acoustique .....   | 41 |
| 4.2.1 : Principe .....   | 41 |
| 4.2.2 : Applications et limites .....                                | 42 |
| 4.2.3 : Cas de la tomographie acoustique .....                       | 42 |
| 4.3 Diffusion des ondes électromagnétiques .....                     | 42 |
| 4.3.1 : Mécanismes de l'effet trachéides .....                       | 42 |
| 4.3.2 : Applications courantes .....                                 | 44 |
| 4.3.3 : Autres applications possibles .....                          | 44 |
| 4.4 Spectroscopie et fluorescence .....                              | 44 |
| 4.4.1 : Spectres d'absorption et d'émission .....                    | 44 |
| 4.4.2 : Spectroscopie du bois .....                                  | 45 |
| 4.4.3 : Cas de la fluorescence .....                                 | 45 |
| 4.5 Transmission des ondes électromagnétiques .....                  | 46 |
| 4.5.1 : Transmission des rayons X .....                              | 46 |
| 4.5.2 : Transmission des micro-ondes .....                           | 46 |
| 4.6 Tomographie .....  | 46 |
| 4.6.1 : Principe .....   | 46 |
| 4.6.2 : Applications et limites .....                                | 47 |
| 4.7 Diffraction des rayons x .....                                   | 47 |
| 4.7.1 : Principe .....   | 47 |
| 4.7.2 : Applications et limites .....                                | 48 |
| 4.8 Microscopie par éclairage polarisé .....                         | 48 |
| 4.8.1 : Principe .....   | 48 |
| 4.8.2 : Applications et limites .....                                | 48 |
| 5. TECHNOLOGIES DE VISION ARTIFICIELLE .....                         | 49 |
| 5.1 Acquisition des images .....                                     | 49 |
| 5.1.1 : Capture de l'image .....                                     | 49 |
| 5.1.2 : L'éclairage et la scène .....                                | 50 |
| 5.2 Prétraitement des images .....                                   | 51 |
| 5.2.1 : Objectif .....   | 51 |
| 5.2.2 : Réduction du bruit .....                                     | 51 |
| 5.2.3 : Détection des contours .....                                 | 52 |

|   |           |
|---|-----------|
| 5.2.4 : Opérations morphologiques .....                                   | 53        |
| 5.3 Segmentation de l'image.....  | 54        |
| 5.3.1 : Objectif.....   | 54        |
| 5.3.2 : Segmentation par seuillage.....                                   | 54        |
| 5.3.3 : Méthode de croissance par régions.....                            | 55        |
| 5.3.4 : Méthode split & merge .....                                       | 55        |
| 5.3.5 : Méthode des bâtonnets.....  | 55        |
| 5.4 Classification des segments.....                                      | 56        |
| 5.4.1 : Principe .....  | 56        |
| 5.4.2 : Réseaux de neurones formels.....                                  | 56        |
| 5.4.3 : Self-Organizing Maps .....  | 58        |
| 5.4.4 : K plus proches voisins .....                                      | 59        |
| 5.4.5 : Support Vector Machine .....                                      | 59        |
| 5.5 Analyse de texture.....   | 60        |
| 5.5.1 : Objectif.....   | 60        |
| 5.5.2 : Matrices de co-occurrences .....                                  | 61        |
| 5.5.3 : Local Binary Pattern .....  | 61        |
| 5.5.4 : Coordinated Clusters Representation .....                         | 62        |
| 5.5.5 : Décomposition en ondelettes .....                                 | 63        |
| 6. CONCLUSIONS .....  | 64        |
| <b>CHAPITRE II : MODELE DU PROFILE EQUIVALENT .....</b>                   | <b>67</b> |
| 1. DEFINITION DES PARAMETRES.....   | 67        |
| 1.1 Notations spécifiques .....   | 67        |
| 1.2 Définition du repère .....  | 67        |
| 1.3 Définition des paramètres.....  | 67        |
| 2. MESURE LOCALE DU KNOT DEPTH RATIO.....                                 | 68        |
| 2.1 Mesure de la densité par transmission des rayons X.....               | 69        |
| 2.1.1 : Application de la loi de Beer-Lambert.....                        | 69        |
| 2.1.2 : Identification des paramètres.....                                | 69        |
| 2.2 Mesure du KDR à partir de la densité locale .....                     | 70        |
| 2.2.1 : Principe général .....  | 70        |
| 2.2.2 : Méthode présentée par Oh [43] .....                               | 71        |
| 2.2.3 : Méthode utilisée dans cette étude .....                           | 71        |
| 3. DEFINITION DU PROFILE EQUIVALENT .....                                 | 72        |
| 3.1 D'un matériau hétérogène à un matériau homogène .....                 | 72        |
| 3.1.1 : Rappels sur les méthodes d'homogénéisation .....                  | 72        |
| 3.1.2 : Principe de la poutre équivalente .....                           | 73        |
| 3.2 Géométrie du Profilé Equivalent .....                                 | 73        |
| 3.2.1 : Principe général .....  | 73        |
| 3.2.2 : Prise en compte des nœuds à partir du Knot Depth Ratio .....      | 74        |
| 3.3 Propriétés mécaniques du Profilé Equivalent .....                     | 75        |
| 3.3.1 : Définition du module élastique $E_p(x)$ .....                     | 75        |
| 3.3.2 : Définition de la contrainte de rupture $\sigma_p$ .....           | 76        |
| 4. APPLICATION AU CALCUL DU MOE ET DU MOR .....                           | 76        |
| 4.1 Calculs préliminaires.....  | 76        |
| 4.1.1 : Flexion - position de la fibre neutre et moment quadratique ..... | 76        |
| 4.1.2 : Traction - Aire de la section droite.....                         | 77        |
| 4.2 Calcul du MOE .....   | 77        |
| 4.2.1 : Cas de la flexion .....   | 77        |
| 4.2.2 : Cas de la traction.....   | 78        |
| 4.3 Calcul du MOR .....   | 78        |
| 4.3.1 : Cas de la flexion .....   | 78        |
| 4.3.2 : Cas de la traction.....   | 78        |

|   |           |
|---|-----------|
| 5. RESULTATS .....  | 79        |
| 5.1 Méthodes .....  | 79        |
| 5.1.1 : Combinaisons de machines.....   | 79        |
| 5.1.2 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode X-0.....                          | 79        |
| 5.1.3 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode M-0.....                          | 79        |
| 5.1.4 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode XM-0.....                         | 80        |
| 5.1.5 : Optimisation des paramètres .....                                       | 80        |
| 5.2 Lots de sciages testés .....  | 81        |
| 5.3 Coefficients de détermination $R^2$ .....                                   | 81        |
| 5.3.1 : Modèle du Knot Area Ratio 1D .....                                      | 81        |
| 5.3.2 : Modèle du PE X-0.....   | 82        |
| 5.3.3 : Modèle du PE M-0.....   | 82        |
| 5.3.4 : Modèle du PE XM-0 .....   | 83        |
| 5.3.5 : Synthèse des résultats .....  | 83        |
| 5.4 Influence du champ de contraintes.....                                      | 84        |
| 5.4.1 : Méthode.....  | 84        |
| 5.4.2 : Résultats.....  | 84        |
| 5.5 Valeurs de $R^2$ après correction du champ de contraintes en traction ..... | 86        |
| 5.5.1 : Modèle du PE X-1.....   | 87        |
| 5.5.2 : Modèle du PE M-1.....   | 87        |
| 5.5.3 : Modèle du PE XM-1 .....   | 88        |
| 5.6 Tests de robustesse par validation croisée .....                            | 88        |
| 5.6.1 : Méthode.....  | 88        |
| 5.6.2 : Validation croisée appliquée au lot S6 .....                            | 89        |
| 5.6.3 : Validation croisée appliquées aux pièces d'épicéa .....                 | 90        |
| 6. DISCUSSION .....   | 91        |
| 6.1 Intérêt de l'utilisation des rayons X.....                                  | 91        |
| 6.1.1 : Mesure de densité .....   | 91        |
| 6.1.2 : Mesure du KDR .....   | 92        |
| 6.2 Intérêt du modèle du Profilé Equivalent .....                               | 92        |
| 6.2.1 : Performances .....  | 92        |
| 6.2.2 : Robustesse .....  | 93        |
| 7. CONCLUSION .....   | 93        |
| <b>CHAPITRE III : MODELISATION DE LA PENTE DE FIL .....</b>                     | <b>95</b> |
| 1. DEFINITION DES PARAMETRES.....   | 95        |
| 2. MESURE DE LA PENTE DE FIL .....  | 96        |
| 2.1 Effet trachéides .....  | 96        |
| 2.2 Mesure des caractéristiques des ellipses .....                              | 97        |
| 2.3 Estimation de l'angle de plongée des fibres.....                            | 97        |
| 2.3.1 : Hypothèse : diffusion isotrope transverse .....                         | 97        |
| 2.3.2 : Excentricité de l'ellipsoïde de révolution .....                        | 98        |
| 2.4 Estimation de la pente de fil en un point quelconque .....                  | 99        |
| 2.4.1 : Interpolation sur l'axe Y .....   | 99        |
| 2.4.2 : Interpolation sur l'axe Z .....   | 99        |
| 3. APPLICATION AU MODELE DU PROFILE EQUIVALENT .....                            | 100       |
| 3.1 Influence mécanique de la pente de fil .....                                | 100       |
| 3.2 Application au modèle du PE.....  | 101       |
| 4. RESULTATS .....  | 102       |
| 4.1 Matériel et méthodes.....   | 102       |
| 4.2 Coefficients de détermination $R^2$ .....                                   | 102       |
| 4.2.1 : Modèle du PE XD-1 .....   | 103       |
| 4.2.2 : Modèle du PE MD-1 .....   | 103       |
| 4.2.3 : Modèle du PE XMD-1 .....  | 103       |

|   |            |
|---|------------|
| 4.2.4 : Synthèse des résultats .....                                    | 104        |
| 4.3 Intérêt de l'estimation de l'angle de plongée .....                 | 105        |
| 4.4 Influence du champ de contraintes.....                              | 106        |
| 4.5 Tests de robustesse par validation croisée .....                    | 106        |
| 4.5.1 : Validation croisée appliquée au lot S6.....                     | 107        |
| 4.5.2 : Validation croisée appliquée aux pièces d'épicéa.....           | 108        |
| 4.6 Répartition de l'erreur en fonction des classes de résistance ..... | 108        |
| 4.6.1 : Méthode.....  | 109        |
| 4.6.2 : Résultats.....  | 110        |
| 4.7 Tests de répétabilité .....   | 111        |
| 4.7.1 : Sources d'erreurs aléatoires .....                              | 112        |
| 4.7.2 : Test de répétabilité normalisé .....                            | 113        |
| 4.8 Variation de pente de fil dans l'épaisseur des sciages .....        | 115        |
| 4.8.1 : Erreur d'estimation de la pente de fil .....                    | 115        |
| 4.8.2 : Impact sur l'estimation de propriétés mécaniques .....          | 117        |
| 4.9 Influence des paramètres de calcul.....                             | 118        |
| 5. DISCUSSION .....   | 120        |
| 5.1 Performances .....  | 120        |
| 5.2 Robustesse.....   | 121        |
| 5.3 Fidélité .....  | 121        |
| 6. CONCLUSION .....   | 121        |
| <b>CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....</b>                                | <b>123</b> |
| 1. ETAT DE L'ART INITIAL.....   | 123        |
| 2. MODELE DU PROFILE EQUIVALENT .....                                   | 124        |
| 3. INFLUENCE DE LA PENTE DE FIL .....                                   | 124        |
| 4. PERSPECTIVES .....   | 125        |
| 4.1 Problématiques soulevées.....                                       | 125        |
| 4.2 Modélisation du matériau bois .....                                 | 125        |
| 4.3 Prise en compte d'autres types de singularités .....                | 126        |
| 5. CONCLUSION GENERALE .....  | 126        |
| <b>REFERENCES .....</b>   | <b>129</b> |
| <b>ANNEXES .....</b>  | <b>137</b> |
| 1. ETUDE DETAILLEE DE LA DENSITOMETRIE X .....                          | 137        |
| 1.1 Application classique .....   | 137        |
| 1.1.1 : Rappels théoriques .....  | 137        |
| 1.1.2 : Mise en œuvre .....   | 137        |
| 1.1.3 : Non-linéarité .....   | 138        |
| 1.2 Vieillissement et durabilité.....                                   | 139        |
| 1.2.1 : Processus de vieillissement des éléments .....                  | 139        |
| 1.2.2 : Observations et mesures .....                                   | 140        |
| 1.2.3 : Moyens de contrôle et de correction .....                       | 141        |
| 1.3 Conclusions.....  | 141        |



# Introduction

## 1. Classement mécanique des sciages

L'utilisation technique du bois par l'Homme remonte à la préhistoire, ou plus précisément à la domestication du feu, environ 450 000 ans avant notre ère. Il servait alors au chauffage des habitations durant l'hiver, à l'éclairage durant la nuit, et également à la cuisson des aliments. Bien plus tard au cours de l'âge de pierre, le bois sera transformé, permettant la fabrication d'outils et d'éléments de structures pour des habitations. Les plus anciennes traces de construction en bois, découvertes sur le site du Monteverde au Chili, datent d'environ 15 000 ans, soit plus de 10 000 ans avant l'âge du bronze.

Jusqu'à aujourd'hui, la construction d'habitations et d'ouvrages d'art a considérablement évolué. Même s'il connaît un regain de popularité, notamment en France, le bois en tant que matière d'œuvre subit la concurrence de deux familles de matériaux : les aciers et les bétons. Il possède cependant de nombreux atouts. D'un point de vue écologique, la croissance d'un arbre permet d'absorber environ une tonne de CO<sub>2</sub> pour chaque mètre cube de bois produit. Sa transformation étant également peu énergivore, la structure d'une maison en bois possède un bilan carbone globalement négatif. Par ailleurs, cette activité ne menace pas l'intégrité des forêts et de leur écosystème si elles sont gérées convenablement. Dans ce cas, le bois représente donc une ressource inépuisable et facilement accessible.

D'un point de vue architectural, la facilité de mise en œuvre du bois et son bel aspect permet de libérer l'imagination des architectes. La technique du bois lamellé-collé, en particulier, permet d'atteindre des portées de plusieurs dizaines de mètres et d'offrir aux poutres des géométries complexes. Le récent centre Pompidou de Metz (Figure 1) illustre parfaitement l'étendue des possibilités actuelles des structures bois.



**Figure 1 : Structure complexe du centre Pompidou de Metz. La charpente est entièrement réalisée par assemblage de poutres en bois lamellé-collé.**

Enfin, d'un point de vue mécanique, le bois des résineux, le plus utilisé en construction, possède un rapport poids/résistance plus faible que le béton et que les aciers de construction standards. Pour un même ouvrage, une structure en bois est donc plus légère, et peut par ailleurs être préfabriquée. Ceci facilite à la fois le transport et la réduction du temps de montage, permettant d'alléger le coût global du bâtiment. Par ailleurs, cela permet de diminuer les contraintes exercées sur les sols et d'améliorer le comportement mécanique de l'ouvrage face aux séismes. En cas d'incendie, une structure bois est également préférable : la combustion du bois dégage peu de fumées toxiques, et la vitesse de combustion relativement faible réduit le risque de ruine du bâtiment avant la fin de son évacuation.

Intrinsèquement, le bois en tant que matériau d'œuvre présente cependant un inconvénient majeur. La variabilité qui existe au sein de chaque espèce, de chaque forêt et même de chaque arbre rend impossible, à ce jour, la prédiction du comportement mécanique à partir de données statistiques. Or, le calcul de la résistance d'une structure et de sa déformation repose sur le comportement de chacun de ses éléments. Les Eurocodes, normes de calcul des structures obligatoires depuis peu au sein de l'Union Européenne, ainsi que son corollaire l'EN 338, définissent des classes de résistance sur lesquelles les ingénieurs peuvent fonder leurs calculs. Lors de la mise en œuvre des structures, ceux-ci doivent alors utiliser des sciages appartenant à la classe choisie lors de la conception.

On peut remarquer que le problème de la détermination du comportement mécanique des sciages n'a pas disparu. En réalité il a été transféré en amont, chez les scieurs. D'après les nouvelles directives européennes, ceux-ci ont l'obligation depuis janvier 2012 d'indiquer la classe de résistance de chaque lot de bois produit. Le classement des sciages peut alors être réalisé de deux manières : soit visuellement par des opérateurs, soit à l'aide de machines spécialisées.

Pour appartenir à une classe de résistance donnée, un sciage doit satisfaire des conditions sur sa masse volumique, son module d'élasticité (MOE), et sur sa contrainte de rupture (MOR). D'une part, il est impossible de mesurer le MOR de manière non-destructive. D'autre part, la valeur de MOE faisant foi doit être obtenue par un essai de flexion ou de traction normalisé, incompatible avec les cadences de production des sciages, même les plus faibles. Ces deux paramètres doivent donc être estimés à partir d'autres essais ou propriétés mécaniques, ou grâce à des modèles plus avancés. L'établissement de tels modèles constitue le principal verrou technologique dans le domaine du classement mécanique.

Pour peu qu'un marché existe, il est évident que les sciages possédant les meilleures propriétés mécaniques seront également les mieux valorisés d'un point de vue économique. La norme EN14081 définit une limite sur la proportion de pièces surclassées, et par conséquent sur les profits pouvant être engendrés par un mauvais classement. En revanche, aucune limite n'est fixée concernant le sous-classement des sciages. Ceci nous amène à la conclusion que pour maximiser leurs profits, les scieurs ont intérêt à réduire le nombre de pièces sous-classées. Or, ce nombre dépend directement de la corrélation entre les propriétés mécaniques réelles des sciages et leurs estimations : une corrélation faible, traduisant une erreur d'estimation importante, impose de sous-estimer les performances des sciages afin de garantir la proportion maximale de pièces surclassées imposée par la norme. On comprend alors pourquoi la mise au point de machines de classement aussi efficaces que possible est devenu une problématique centrale de la filière bois en Europe.

## 2. De l'analyse globale à l'analyse locale

Il existe aujourd'hui de nombreux modèles de machines de classement mécanique du bois. Dans la plupart des cas, ces machines procèdent à une analyse globale des sciages en mesurant leur densité, leur module élastique par analyse vibratoire ou essai de flexion dynamique, et procèdent à une estimation de leur contrainte de rupture par régression linéaire. Ce type de machines offre de très bonnes performances dans la mesure du MOE, puisqu'elles atteignent un coefficient de détermination  $R^2$ , entre les valeurs de MOE estimées et les valeurs réelles, de l'ordre de 88%. En revanche, la marge de progression dans l'estimation du MOR reste importante, puisque les valeurs maximales de  $R^2$  que l'on peut obtenir sur de l'épicéa sont de l'ordre de 55% [1].

Une des pistes d'amélioration des machines de classement mécanique est de chercher à prendre en compte la présence et la géométrie des singularités dans les sciages. Les scanners optiques produits par la société Luxscan Technologies, partenaire de cette étude, constituent donc une excellente base de travail, puisqu'ils permettent de détecter la plupart des singularités du bois à des cadences industrielles. Les travaux réalisés par G. Roblot [1], également en partenariat avec Luxscan, ont permis d'avancer nettement sur ce point, en prenant en compte la position et l'agencement des nœuds à l'intérieur des sciages.

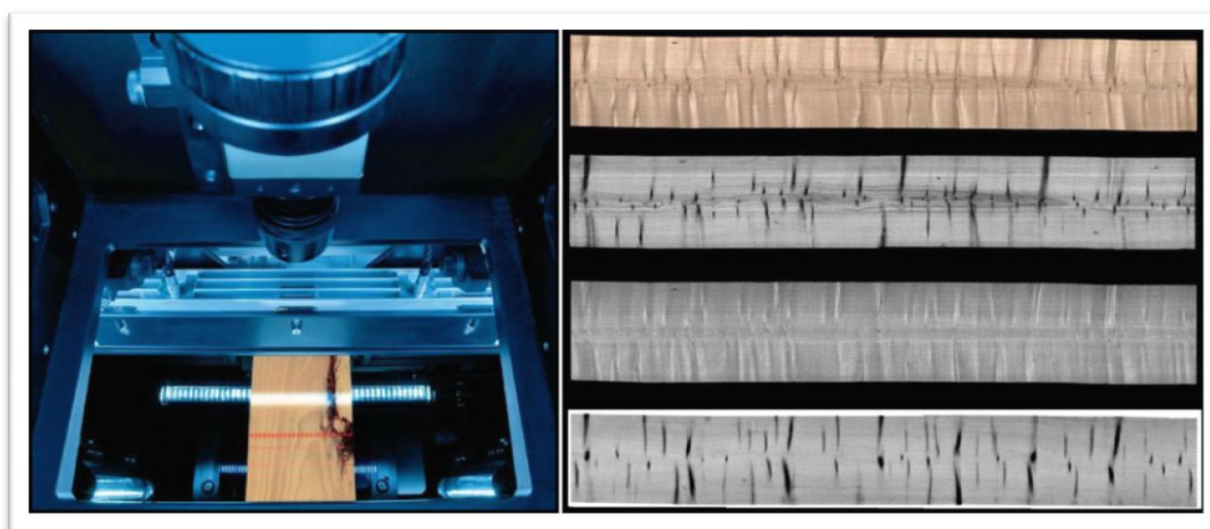


Figure 2 : Caméra et éclairage d'un scanner Luxscan et exemples d'images obtenues.

Si les nœuds peuvent actuellement être pris en compte lors du classement mécanique, ce n'est pas la seule singularité capable de diminuer les performances mécaniques des sciages. Le matériau bois étant de nature orthotropique, l'angle entre la direction des fibres et la direction de sollicitation, appelé également pente de fil, possède une influence considérable sur la rigidité et la résistance du bois sain. Cependant, aucune étude à ce jour ne permet d'évaluer l'impact qu'aurait la prise en compte de cette pente de fil sur la précision d'un classement mécanique.

Les équipements des scanners Luxscan permettent justement de mesurer localement et à grande vitesse la direction des fibres du bois. L'objectif de cette étude sera donc de mettre au point une méthode de classement mécanique capable de prendre en compte la pente de fil, d'évaluer ses performances, et le cas échéant d'assurer son industrialisation.



### **3. Déroulement de l'étude**

La première partie de cette étude se concentre sur les recherches bibliographiques. Dans un premier temps, nous étudierons l'anatomie du bois, de la structure de l'arbre à la microstructure cellulaire. Ceci nous permettra de mieux comprendre l'influence des différentes singularités sur le comportement mécanique des sciages. Dans un deuxième temps, nous nous concentrerons sur le classement mécanique en étudiant ses aspects normatifs, puis sur les différentes technologies actuelles d'estimation de la contrainte de rupture. Dans un troisième temps, nous verrons les différentes méthodes de caractérisation du matériau bois, qu'elles soient appliquées industriellement ou pour l'instant réservées aux laboratoires. Puisque les signaux que nous utiliserons sont des images numériques, une introduction aux technologies de vision artificielle sera présentée. Enfin, nous effectuerons un bilan des recherches bibliographiques afin de dégager le plan d'action pour la suite de l'étude.

# Chapitre I : Bibliographie

## 1. De la structure de l'arbre à la microstructure cellulaire

A l'inverse des matériaux synthétiques tels que les métaux ou les polymères, le bois est un matériau naturel formé par un organisme vivant : l'arbre. Tout comme les espèces animales, les végétaux et les arbres en particulier s'adaptent à chaque étape de leur croissance à leur milieu, qui lui-même varie au cours du temps. Cette adaptation conditionne la structure et le comportement du bois, ainsi que l'apparition de singularités.

Dans cette partie, nous nous intéresserons à l'anatomie des arbres, de l'échelle macroscopique à l'échelle microscopique, ainsi qu'à leurs mécanismes de croissance. Ces éléments permettront de mieux comprendre les problématiques liées à la complexité du matériau bois.

### 1.1 Anatomie et structure des arbres

#### 1.1.1 : Structure et métabolisme des arbres

La principale différence entre les espèces du règne animal et du règne végétal réside dans leur métabolisme. Les espèces végétales ont la capacité de produire du glucose à partir d'eau, de sels minéraux et de  $\text{CO}_2$  grâce à la photosynthèse. La structure des arbres est ainsi entièrement dédiée à cette fonction.

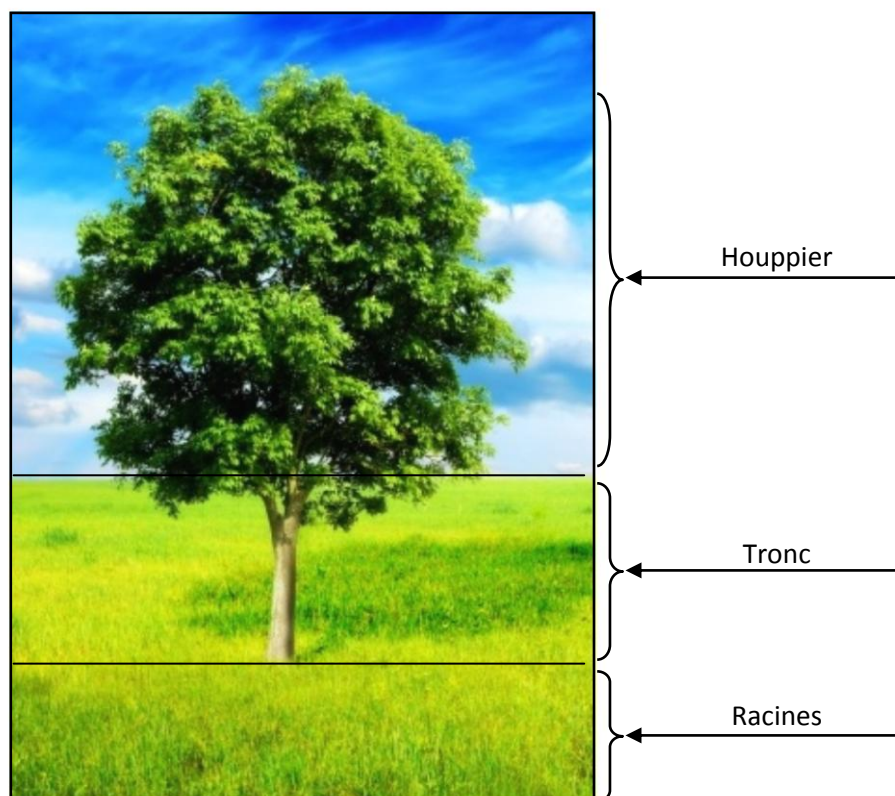


Figure 3 : Structure générale d'un arbre.

Un arbre possède une structure assez simple, qui peut être divisée en trois grandes parties (Figure 3) :

- Les racines sont une structure ramifiée enfouie dans le sol. Leur rôle principal est de puiser l'eau et les sels minéraux du sol pour former la sève brute. Elles assurent également l'ancrage de la plante dans le sol.
- Le tronc assure la conduction de la sève brute des racines au houppier et de la sève élaborée du houppier aux racines. Par ailleurs, il possède un rôle de soutien mécanique du houppier. C'est la partie de l'arbre qui sera par la suite la plus valorisée en tant que matière d'œuvre.
- Enfin, le houppier est la partie supérieure de l'arbre, comportant les branches et les feuilles. C'est le lieu où la sève brute est transformée en sève élaborée chargée en composés organiques, notamment en glucose.

### 1.1.2 : Anatomie du tronc

Nous avons vu que le tronc d'un arbre possède deux fonctions essentielles : conduction de la sève entre les racines et le houppier, et soutien mécanique du houppier. Cette dernière fonction est une des raisons pour lesquelles tous les produits en bois utilisés pour leurs performances mécaniques, qui font l'objet de cette étude, proviennent de cette partie.

La structure d'un tronc est organisée de manière concentrique (Figure 4). La partie vivante du tronc, c'est-à-dire composée du cambium et de l'assise subéro-phéllodermique situés sous l'écorce, possède un volume relativement faible. La majeure partie du tronc est donc constituée de cellules mortes. Néanmoins, ces cellules gardent un rôle actif dans le fonctionnement de l'arbre, et subissent des transformations au cours des années.

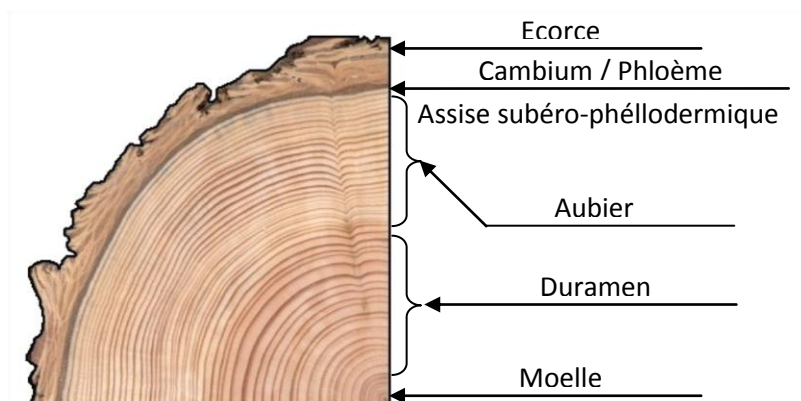


Figure 4 : Section d'un douglas (*Pseudotsuga menziesii*) et ses différentes parties.

Voici les différentes parties constituant un tronc (Figure 4). Chacune possède un rôle et des caractéristiques spécifiques [2] :

- L'écorce est la partie visible du tronc. Elle possède des propriétés mécaniques faibles, et son rôle consiste à protéger les assises vivantes des insectes, des champignons et des impacts mécaniques. L'écorce de certaines essences trouve cependant des applications intéressantes (industrie pharmaceutique, décoration, bouchons en liège, biomasse pour l'énergie, compostage, etc.). Elle est formée à partir de l'assise subéro-phéllodermique.

- Le cambium constitue l'une des parties vivante du tronc. Son épaisseur est de l'ordre du 1/10 de millimètre. Il est responsable de la croissance de l'arbre en diamètre (voir « Croissance secondaire », p. 20), en formant l'aubier à l'intérieur de l'arbre, et le phloème sous l'écorce. Ce dernier est un tissu dédié au transport de la sève élaborée du houppier vers les racines en vascularisant le cambium.
- L'aubier a pour rôle de transporter la sève brute des racines jusqu'au houppier. Parallèlement, il s'agit de la première partie du tronc assurant un soutien mécanique du houppier.
- Le bois parfait est obtenu à partir de l'aubier, au sein duquel la sève cesse de circuler après quelques années. Il a donc pour unique rôle le soutien mécanique du houppier. Chez la plupart des essences, la transition de l'aubier au bois parfait s'accompagne de transformations physiologiques et chimiques au niveau des cellules qu'on appelle duraminisation. Le bois obtenu, le duramen, se distingue généralement par une coloration plus prononcée, et par une meilleure résistance aux attaques biologiques.
- La moelle est le vestige de la croissance en hauteur de l'arbre (croissance primaire, voir p. 19). Il s'agit d'un cylindre présent sur toute la hauteur du tronc, beaucoup plus tendre que l'aubier et le duramen. Son faible diamètre (environ 5 à 10mm) limite son impact sur la résistance mécanique des sciages. Sa position reste toutefois intéressante dans le cadre de la localisation des singularités.

Avant le sciage, l'écorce et le cambium sont retirés. Seuls l'aubier, le duramen et la moelle constituent le matériau qui nous intéresse dans cette étude.

## **1.2 Mécanismes de croissance**

La croissance d'un arbre est un phénomène lié à la fois au patrimoine génétique de chaque individu et à l'environnement de l'arbre. Elle a un impact direct sur la structure du tronc, et donc sur la qualité du bois. C'est la raison pour laquelle il convient de l'étudier à travers cette partie.

### **1.2.1 : L'origine des arbres**

Un arbre peut être obtenu de deux façons différentes. En général, il est issu de la germination d'une graine, mais peut aussi être le résultat d'un clonage naturel (rejet) ou artificiel (bouturage).

La croissance d'un arbre démarre à partir d'une tige. Cette tige constituera par la suite le tronc de l'arbre, ou plus précisément sa moelle. Elle subit alors deux processus de croissance distincts et simultanés : la croissance primaire et la croissance secondaire.

### **1.2.2 : Croissance primaire**

La croissance primaire est celle qui permet à l'arbre de grandir en hauteur, et aux branches d'augmenter leurs ramifications. Concernant la croissance primaire du tronc, l'objectif est d'atteindre une hauteur suffisante pour s'affranchir de l'ombre des arbres voisins, et de bénéficier ainsi d'un maximum d'ensoleillement.

Au début de chaque saison de végétation, c'est-à-dire au début du printemps dans les zones tempérées, le bourgeon terminal à la cime de l'arbre se réactive, de même que ceux présents aux extrémités des branches. En général, ceux-ci donnent naissance à de

nouvelles branches (Figure 5). Par ailleurs, si l'arbre n'a pas atteint sa hauteur optimale, une tige verticale apparaîtra à la cime de l'arbre, lui permettant de gagner en hauteur.



Figure 5 : Croissance primaire d'une branche de sapin [1].

Il est nécessaire de noter ici que les branches d'un arbre ne s'élèvent pas au fur et à mesure de sa croissance, mais restent toujours à la même hauteur. En réalité, l'arbre crée des branches à partir de sa cime, qui viennent ombrager celles des années précédentes. Ces dernières, devenues inutiles à l'arbre après plusieurs années, finissent alors par mourir et dans certains cas par tomber [2].

### 1.2.3 : Croissance secondaire

La croissance secondaire est celle qui nous intéressera plus particulièrement, car elle permet au tronc et aux branches d'assurer leur rôle de soutien mécanique. C'est en effet elle qui est responsable de l'augmentation de leur diamètre. Tout comme la croissance primaire, elle a lieu en zone tempérée au cours de la saison de végétation. Cependant, les caractéristiques des cellules formées varient au cours de cette période, en formant le bois de printemps et le bois d'été (voir ci-dessous).

Ce mode de croissance est le seul fait du cambium. Le bois formé au cours des années précédentes n'intervient pas dans ce processus. La division cellulaire du cambium constitue, vers l'intérieur l'aubier, et vers l'extérieur le phloème. Elle permet également de recouvrir les dégradations qu'aurait pu subir l'arbre, ainsi que les branches mortes ou coupées.

### 1.2.4 : Du bois de printemps au bois d'été

En zones tempérées, une saison de végétation s'étale du début du printemps à la fin de l'été. Le bois formé au cours de cette période évolue progressivement entre le bois de printemps et le bois d'été, encore appelés respectivement bois initial et final.

La principale différence entre ces deux bois réside dans la géométrie de leurs fibres. Les fibres du bois de printemps sont plus courtes, possèdent des parois plus minces et un diamètre plus grand (Figure 6). Cela permet une meilleure conduction de la sève brute, mais



pénalise leurs propriétés mécaniques. Le bois d'été est donc plus dense, plus résistant, et très souvent possède une coloration plus soutenue que le bois de printemps (Figure 4).

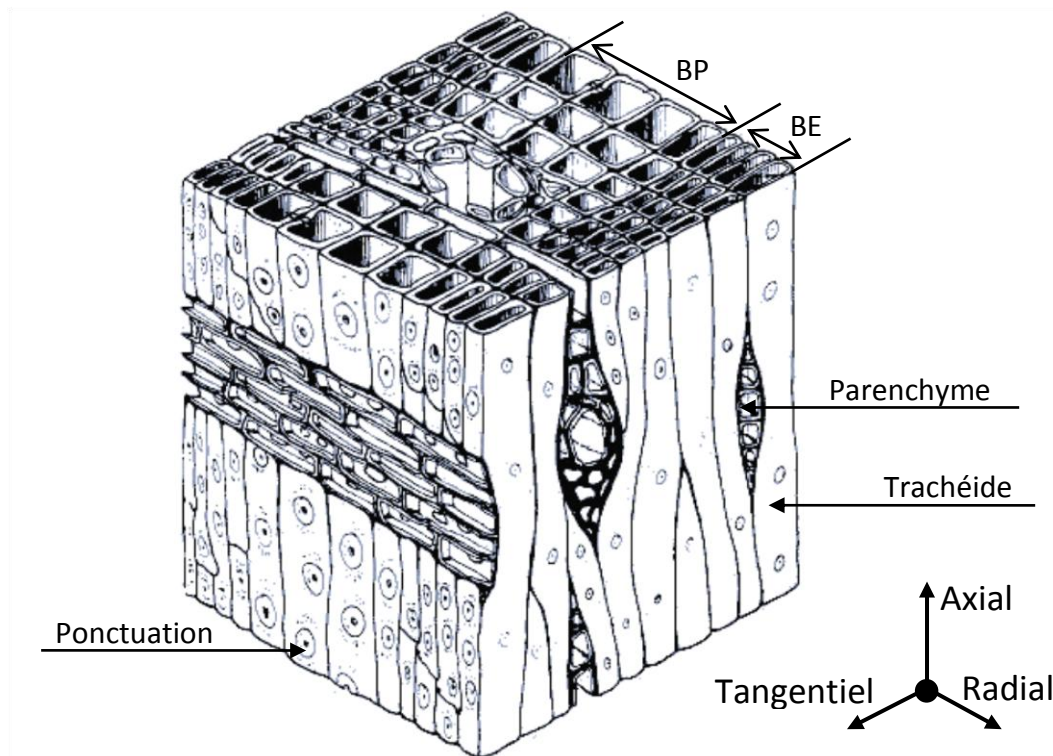


Figure 6 : Structure cellulaire des résineux. BP : bois de printemps, BE : bois d'été [3]

### 1.2.5 : Modèle de l'empilement de cônes

La croissance d'un arbre est donc la résultante des croissances primaires et secondaires. La manière la plus courante de modéliser cette croissance est celle de l'empilement de cônes. Avant tout, il convient de préciser que ce modèle est destiné à fournir une compréhension intuitive de la croissance des arbres, et non quantitative.

Ce modèle considère que le bois formé au cours d'une saison de végétation forme un cône venant s'ajouter au bois formé au cours des saisons de végétation précédentes. Toutes les cellules d'un même cône ont donc le même âge. L'arbre serait alors un empilement de ces cônes imbriqués les uns aux autres, à la manière de poupées russes.

Ce modèle est fondamental dans la compréhension du matériau bois, aussi bien d'un point de vue mécanique que visuel. La distribution de certaines singularités du bois ainsi que certains traitements d'images y font appel. Il sera donc implicitement utilisé tout au long de cette étude.

## 1.3 Structure cellulaire des résineux

La structure cellulaire fibreuse des résineux est relativement simple à décrire. Pourtant, elle induit un comportement mécanique anisotrope complexe qui est en partie responsable de la faible utilisation du bois en tant que matériau d'ingénierie. Nous allons ici décrire cette structure cellulaire afin de mieux comprendre son impact sur le comportement du bois.

### 1.3.1 : Organisation cellulaire

L'organisation cellulaire des arbres ressemble fortement à une structure en nids d'abeilles imparfaite (Figure 6). Celle des résineux est plus simple et régulière que celle des feuillus, car elle ne comporte que deux types de cellules : les trachéides et les parenchymes.

Les trachéides constituent la majeure partie de l'aubier et du duramen. Elles sont orientées selon l'axe du tronc ou des branches, sauf dans le cas de certaines singularités. Leur premier rôle est le soutien mécanique de la masse située au-dessus d'elles. Par ailleurs, les trachéides de l'aubier ont la capacité de conduire la sève brute à travers les ponctuations de leurs parois. Les parenchymes en revanche sont majoritairement orientés radialement, et concourent vers la moelle. Ils permettent la conduction de la sève brute dans l'épaisseur de l'aubier, et peuvent également servir de réserve de sève. Ils sont généralement regroupés en faisceaux que l'on appelle rayons ligneux (Figure 6).

Ces deux types de cellules peuvent parfois s'organiser autour de lacunes cylindriques que l'on appelle canaux résinifères, contenant des réserves supplémentaires de sève. Ces canaux se retrouvent essentiellement dans le bois de printemps (Figure 6).

Dans le cas des feuillus, les fonctions de soutien mécanique et de conduction de la sève brute sont dissociées. Elles sont respectivement assurées par deux types de cellules différentes appelées sclérenchymes et vaisseaux. Les sclérenchymes des feuillus sont plus courts et plus denses que les trachéides des résineux. Les vaisseaux des feuillus se distinguent notamment par une longueur beaucoup plus importante.

### 1.3.2 : Orthotropie du bois

Une conséquence directe de cette organisation cellulaire est le comportement anisotrope du bois. Le bois est en effet beaucoup plus résistant et rigide s'il est sollicité dans la direction de ses fibres.

On considère généralement que le bois possède un comportement orthotropique, c'est-à-dire symétrique par rapport à deux plans en chaque point. Ici, ces deux plans sont le plan normal à l'axe des fibres, et le plan contenant l'axe des fibres et passant par la moelle. Cela signifie que le comportement du bois est défini selon trois directions orthogonales (Figure 6):

- L'axe des fibres (direction axiale)
- L'axe des rayons ligneux (direction radiale)
- L'axe tangent aux cernes de croissance (direction tangentielle)

Ces trois directions sont données par ordre décroissant de rigidité et de résistance mécanique. Par souci de simplification à l'échelle macroscopique, on considère généralement que les directions radiales et tangentielles sont équivalentes et largement inférieures à la direction axiale du point de vue du comportement mécanique.

## 1.4 Anatomie des trachéides

Les trachéides sont les principales responsables du comportement et de la résistance du bois. Elles possèdent elles-mêmes une structure complexe nécessitant d'être caractérisée par de nombreuses techniques (voir chapitre « Techniques de caractérisation du matériau bois », p. 41).

### 1.4.1 : Géométrie générale

Les trachéides se présentent sous la forme de fuseaux élancés et creux. Leur longueur chez les résineux est de l'ordre de 1 à 5 mm, tandis que leur diamètre est de l'ordre de 20 à 50  $\mu\text{m}$ . Quant à l'épaisseur de leur paroi, elle varie entre 1 et 6  $\mu\text{m}$  [4,5,6]. Leur section est en général hexagonale ou rectangulaire. Elles comportent, essentiellement sur leurs faces tangentielles, des ponctuations leur permettant de transmettre la sève à d'autres cellules (Figure 6). Enfin, la partie creuse de ces cellules est appelée lumen.

### 1.4.2 : Construction des parois

Les trachéides sont essentiellement constituées de trois composés organiques : la cellulose, les hémicelluloses, et les lignines. A partir de ces composés, la cellule est formée de plusieurs couches d'épaisseurs et de compositions particulières (Figure 7), contribuant différemment au comportement physico-chimique du bois [7,8,9].

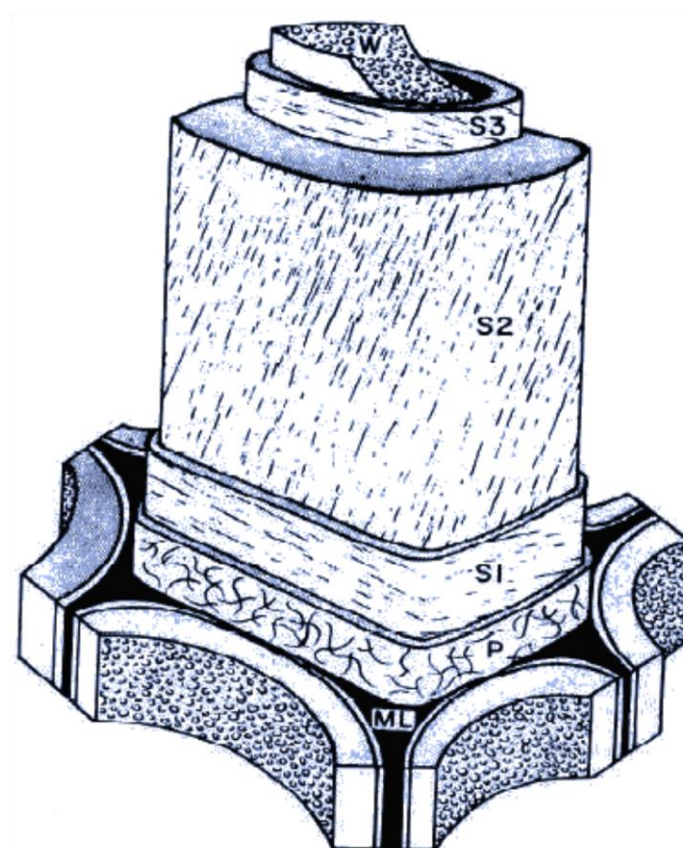


Figure 7 : Représentation de la paroi d'une trachéide. ML : matrice intercellulaire. P : paroi primaire. S1 à S3 : parois S1 à S3. W : eau libre. [10]

- La matrice intercellulaire assure la cohésion entre les trachéides. Elle est composée pour moitié de lignines, et pour moitié d'hémicelluloses. Son épaisseur est de l'ordre de 0.3  $\mu\text{m}$ .
- La paroi primaire est la première couche appartenant à la trachéide. Elle est composée pour moitié de lignine. Elle se distingue de la matrice intercellulaire par la présence à environ 15% de microfibrilles désordonnées de cellulose. Son épaisseur est de l'ordre de 0.1  $\mu\text{m}$ .



- La couche S1 est composée de microfibrilles ordonnées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignines à parts sensiblement égales. Ses microfibrilles forment un angle d'environ 70° avec l'axe de la cellule. Son épaisseur est de l'ordre de 0.15  $\mu\text{m}$ .
- La couche S2 est la plus importante pour le comportement des trachéides selon leur axe. Elle représente de 50 à 80% du volume des parois, avec une épaisseur allant de 1  $\mu\text{m}$  à 10  $\mu\text{m}$ . Elle est composée pour moitié de microfibrilles de cellulose formant un angle d'environ 10° avec l'axe de la cellule. Elle comporte également 30% d'hémicelluloses et 20% de lignines.
- Enfin, la couche S3 possède la même composition que la couche S2. Elle se distingue par son épaisseur très faible de l'ordre de 0.03  $\mu\text{m}$ , ainsi que par l'angle de ses microfibrilles d'environ 70°.

### **1.4.3 : Microfibrilles de cellulose**

La cellulose est le composé organique le plus abondant sur terre. Elle fait partie de la famille des polysaccharides, et est constituée d'une chaîne linéaire de plusieurs milliers de molécules de glucose. Sa longueur est d'environ 3.5 nm et sa résistance à la traction est de l'ordre de 800 MPa [11]. Son module élastique est d'environ 134 GPa [8].

Elle se présente dans le bois sous la forme de microfibrilles de 3 à 4 nm de diamètre [8], et de longueur pouvant aller jusqu'à 10  $\mu\text{m}$ . La résistance mécanique des cellules en traction axiale dépend principalement de ces microfibrilles, et plus particulièrement de l'angle qu'elles forment avec l'axe des fibres dans la paroi S2. Cet angle se situe en moyenne entre 10° et 20°, mais dans certains cas il peut être plus important, ce qui a pour conséquence une détérioration des propriétés physiques et mécaniques du bois [12].

### **1.4.4 : Hémicelluloses**

Les hémicelluloses sont le deuxième constituant des parois des trachéides. Elles diffèrent de la cellulose essentiellement par une plus faible longueur et la présence de ramifications à leurs chaînes principales [3]. Elles présentent également, en plus du glucose, des monomères tels que le xylose, et le galactose. Leur comportement mécanique varie fortement avec son taux d'humidité : à 12%, son module élastique est de 2 GPa. A 100%, il est réduit à 0.02 GPa [8].

Les hémicelluloses assurent la cohésion entre les microfibrilles et les lignines, et également entre les microfibrilles [13]. Leurs propriétés hydrophiles associées à leur capacité de rétractation ont pour conséquence le caractère hygroscopique du bois [3]. Elles sont très souvent considérées comme isotropes, bien que certains de leurs composants possèdent une orientation préférentielle parallèle aux microfibrilles [13].

### **1.4.5 : Lignines**

Les lignines sont des composés amorphes et tridimensionnels de phénylpropanes [9,14]. Elles possèdent des propriétés mécaniques équivalentes aux hémicelluloses, mais leur caractère hydrophobe les rend insensibles aux variations d'humidité [3].

Les lignines constituent, avec les hémicelluloses, la matrice au sein des fibres et également entre les fibres. Tout comme les hémicelluloses, elles sont considérées comme isotropes en dépit de leur structure liée aux microfibrilles [8].

## 2. Complexité et singularités du matériau bois

La complexité du bois représente des problématiques différentes selon l'industrie du bois et l'échelle considérées : l'industrie papetière mène des recherches très actives dans la caractérisation de la composition et de la microstructure des fibres. Le contrôle de la matière première y est réalisé par prélèvement d'échantillons. En revanche, la filière liée à l'utilisation du bois en structure s'intéresse à la caractérisation des sciages dans leur ensemble, et à une échelle différente d'un point de vue anatomique.

Dans le reste de cette étude, nous considérerons donc le matériau bois comme mécaniquement homogène et isotrope transverse à l'échelle du millimètre. Cette partie présente les paramètres et les singularités mécaniquement prépondérantes qu'il est possible de rencontrer au-dessus de cette échelle.

### 2.1 Relation densité – module élastique – résistance

L'ensemble des caractéristiques mécaniques du bois pour un type de sollicitation donné peut être défini à partir de trois valeurs : la masse volumique, le module élastique et la contrainte de rupture. Pour des échantillons sains (exempts de défauts et hors des singularités) de faibles dimensions, ces trois valeurs sont assez bien corrélées. Par exemple, le coefficient de détermination  $R^2$  entre la densité et le module élastique des résineux est d'environ 77%. Il existe d'ailleurs des équations permettant de lier ces différents paramètres [15].

A l'échelle d'un sciage en revanche, les corrélations entre ces trois valeurs diminuent considérablement. Les coefficients de corrélations entre la densité et le module élastique que l'on peut espérer varient entre 16% et 40% [16]. Cette différence est due à la présence de singularités, réduisant les propriétés mécaniques des sciages. Ceci explique, par exemple, que leur contrainte de rupture diminue statistiquement avec leur longueur [17]. Il est donc nécessaire, pour aboutir à un classement mécanique optimal, de connaître ces singularités, de les détecter, et d'en tenir compte dans l'estimation de la contrainte de rupture du bois.

### 2.2 Nature hygroscopique du bois

A cause de son origine végétale, le bois possède un comportement très particulier vis-à-vis de l'eau présente dans son environnement. Il a la capacité de l'absorber ou de la rejeter afin de s'équilibrer avec le taux d'humidité de l'air ambiant. L'eau peut exister sous plusieurs formes dans le bois : elle peut être liée chimiquement aux composés de la paroi cellulaire, ou bien libre sous forme liquide ou gazeuse dans les lumens [2].

On définit le taux d'humidité du bois comme le rapport de la masse d'eau contenue dans le bois sur la masse du même bois anhydre. Jusqu'à un taux d'humidité d'environ 30%, l'eau est absorbée sous forme liée aux parois cellulaires. Au-delà de cette valeur, on considère que le point de saturation des fibres est atteint, et toute eau supplémentaire absorbée le sera sous forme libre, c'est-à-dire liquide au sein des lumens [2].

#### 2.2.1 : Variations dimensionnelles

Les variations dimensionnelles dues à l'humidité du bois ne se produisent donc qu'en-dessous du point de saturation des fibres. L'agencement des cellules et leurs microstructures provoquent l'orthotropie du matériau également face à des variations

d'humidité. Le retrait tel qu'il est donné dans la littérature s'entend dans le domaine allant du point de saturation des fibres au bois anhydre, exprimé par rapport aux dimensions du bois saturé. Le retrait ou gonflement correspondant à un taux d'humidité quelconque est calculé suivant une fonction affine de l'humidité.

Le retrait longitudinal est le plus faible, et peut atteindre 0.2% dans le bois sain normal. Le retrait radial est nettement plus important, de l'ordre de 5%. Enfin, le retrait tangentiel est le plus important, environ le double du retrait radial [2]. Ces retraits, et plus particulièrement leurs différences, peuvent provoquer des déformations importantes des sciages, et peuvent même causer l'apparition de fentes. C'est pourquoi les techniques de conduite de séchoirs sont très élaborées.

### **2.2.2 : Impact sur le comportement mécanique**

Le taux d'humidité influence également fortement les propriétés mécaniques du bois. Une fois encore, aucune variation n'est constatée au-delà du point de saturation des fibres. Par exemple, le module élastique longitudinal du bois vert diminue de 40% à 50% par rapport au bois sec [2]. Cette variation des propriétés mécaniques est prise en compte par les normes de calcul des bâtiments. On considère au niveau européen le bois comme sec et possédant sa capacité mécanique nominale à 12% d'humidité.

## **2.3 Différents modes de débit**

Le sciage consiste à extraire d'un tronc d'arbre conique des produits parallélépipédiques. En fonction de la position initiale du sciage dans le tronc, on parle de trois modes de débit différents :

- La dosse, dont la plus grande face est tangente aux cernes de croissance. Ce mode de débit est le plus utilisé pour l'obtention des pièces de grande section. La plupart des sciages utilisés en structure sont donc obtenus de cette manière.
- Le quartier, dont la plus grande face est normale aux cernes de croissance. Ce mode de débit est généralement plus pénalisant que la dosse en ce qui concerne le rendement matière. On le trouve donc beaucoup moins fréquemment.
- Le faux-quartier, dans tous les autres cas. Ce dernier est bien souvent réservé aux pièces de petites sections.

Mécaniquement, aucun auteur ne mentionne de différence notable entre ces trois modes de débit. Cependant, la position des défauts dans les sciages dépend de la position du sciage dans l'arbre. Par ailleurs, l'intersection des cônes issus de la croissance de l'arbre avec les plans de coupe donne des aspects différents aux pièces de dosse et de quartier : les pièces de dosse possèdent un motif caractéristique semblable à des flammes, alors que les pièces de quartier ont un motif rectiligne et régulier.

## **2.4 Nœuds et déviation des fibres**

### **2.4.1 : Origine et géométrie des nœuds**

Les nœuds sont des défauts du bois présents dans presque tous les sciages. Ils correspondent à la partie d'une branche enveloppée par le tronc au cours de sa croissance secondaire. Au niveau des sciages, on distingue les nœuds vivants, issus de la croissance d'une branche vivante, et les nœuds morts, issus de l'enveloppement d'une branche morte.

Mécaniquement, la principale différence réside dans le fait qu'un nœud mort est généralement entouré d'écorce, assimilable à une discontinuité du matériau.

La forme d'un nœud peut être assimilée à un cône de section elliptique, dont le sommet se situe sur la moelle du tronc. Des modèles plus complets existent, tenant compte de l'évolution de l'inclinaison et de la section du nœud [18].

Du point de vue anatomique, le bois d'un nœud n'est pas différent du bois situé autour de lui. Il possède cependant chez beaucoup d'essences une densité plus importante que le bois sain. La principale différence réside dans l'orientation des fibres du nœud, parallèles à l'axe de ce dernier, qui ont une influence très néfaste sur la résistance des sciages. [19,20].

### 2.4.2 : Déviation des fibres autour des nœuds

Nous avons vu que la croissance d'un arbre pouvait être assimilée à un empilement de cônes. Dans cette configuration, et sans nœud ni inclusion à proximité, les fibres du tronc sont parallèles à l'axe de ce dernier. L'apparition d'une branche à la cime d'un arbre représente une perturbation de ce mode de croissance : la croissance secondaire simultanée du tronc et de la branche à partir de leurs moelles respectives entraîne l'apparition d'une zone de transition entre les fibres verticales du tronc et celles du nœud.

La déviation des fibres autour des nœuds possède une influence directe sur le comportement mécanique du bois à l'échelle macroscopique. C'est pourquoi des recherches ont été menées afin de définir des modèles permettant de quantifier l'angle des fibres, par rapport à l'axe du tronc, à proximité des nœuds. Le modèle proposé par Mitsuhashi [21] utilise la formule empirique de Hatayama (Équation 1), qui a pour ambition de fournir une valeur d'angle  $\theta$  pour la prédiction de la contrainte de rupture des sciages. On se place dans ce cas en coordonnées polaires dont le centre est la moelle du tronc.  $D$  et  $l$  représentent respectivement la largeur angulaire du nœud  $i$  et la distance angulaire entre le point observé et ce nœud.  $N$  est une constante dépendant de l'espèce et du type de nœud ( $0.9 \leq N \leq 1.3$ ). Cet angle n'a cependant pas de signification concrète : il s'agit d'un intermédiaire de calcul destiné à être utilisé dans l'évaluation de l'Area Reduction Factor (voir p. 37).

$$\theta = \max_i \left[ \frac{15 \sqrt{N^{D_i} \cdot D_i}}{\sqrt{l_i}} - \frac{D_i}{2} - 5 \right], \quad 0 \leq \theta \leq 90$$

Équation 1 : Formule empirique de Hatayama

Un autre modèle a été développé par Foley [22]. Celui-ci a pour ambition de proposer une méthode de calcul des trois angles de rotation du repère définissant la structure cellulaire (axial, radial, tangentiel ; voir Figure 6 p. 21). Pour cela il émet l'hypothèse que la direction des fibres est en tout point tangente aux surfaces définies par les cernes de croissance, qu'il appelle couches de croissance. La direction radiale du repère lié à la structure cellulaire est quant à elle normale à ces surfaces. La trajectoire de ces couches de croissance est dans un premier temps modélisée empiriquement dans le plan défini par l'axe du nœud et la moelle du tronc. En s'appuyant sur la théorie de formation des nœuds énoncée par Wangaard [23] puis précisée par Shigo [24], Foley [22] modélise les parties supérieures et inférieures du nœud par deux fonctions différentes. La modélisation

volumique de ces couches de croissance est obtenue à partir des fonctions précédentes, et appliquées en coordonnées cylindriques.

L'orientation des fibres au sein de chaque couche est définie par Foley [22] à partir de l'analogie fibre-fluide mise en évidence par Phillips [25]. Celle-ci indique que l'angle des fibres à proximité d'un nœud, projeté sur un plan tangentiel au tronc, peut être approximé par l'écoulement laminaire et plan d'un fluide autour d'un obstacle elliptique. Shigo [24] indique que la croissance des branches s'effectue avant celle du tronc. Le profil d'angle des fibres est donc différent entre le bois d'été et le bois de printemps. Appliquée à l'analogie fibre-fluide, cette affirmation se traduit par deux types de conditions aux limites de l'obstacle elliptique.

Les résultats obtenus par Foley [22] correspondent assez bien aux mesures effectuées sur différents échantillons d'épicéa. En revanche, l'auteur note des résultats mitigés sur des échantillons de douglas, bien que les fonctions utilisées aient été optimisées pour cette essence. Il attribue cette observation à la plus grande variabilité dans les dimensions des nœuds chez le douglas que chez l'épicéa. Ceci illustre une des difficultés dans l'application de cette méthode : son efficacité est grandement liée à la qualité du paramétrage des fonctions. D'autre part, les essais n'ont été réalisés que sur des échantillons comportant un seul nœud, ce qui est extrêmement rare dans le cas des bois de structure où l'on retrouve bien souvent des groupes de nœuds rapprochés.

### **2.4.3 : Déviation hélicoïdale des fibres**

Indépendamment de la déviation des fibres autour des nœuds, l'orientation des fibres dans l'arbre n'est ni nécessairement parallèle à l'axe de l'arbre, ni constante sur toute l'épaisseur du tronc. En général, les fibres des résineux de l'hémisphère nord présentent un angle d'hélice de 3° à 5° à gauche à leur première année de croissance. Cet angle diminue et s'annule au bout d'environ 80 ans, puis augmente lentement vers la droite [26]. Certains arbres ne présentent pas cette inversion progressive de l'hélice, mais ont, au contraire, tendance à augmenter l'angle d'hélice initial. Dans l'hémisphère sud, l'hélice suit le profil inverse : elle est orientée à droite la première année de croissance, puis à gauche après plusieurs années.

Cette déviation globale des fibres est bien connue pour provoquer une déformation des sciages au cours du séchage. Elle entraîne également une diminution de leurs propriétés mécaniques [26]. Comme on ne connaît pas a priori la position initiale d'un sciage dans le tronc, il est alors nécessaire de mesurer l'angle global des fibres par rapport à l'axe des sciages.

## **2.5 Bois de compression des résineux**

### **2.5.1 : Origine du bois de compression**

La croissance des arbres est régie par deux objectifs complémentaires : le premier est d'atteindre un niveau d'ensoleillement suffisant le plus rapidement possible. Le second est d'assurer la stabilité mécanique de l'arbre. Dans des conditions idéales, les arbres poussent donc de manière verticale et rectiligne. Mais dans certaines conditions, comme un terrain en pente, des vents forts ou une ombre d'une origine quelconque, l'arbre peut être amené à pousser de façon non rectiligne.

Afin de provoquer une déformation permettant de redresser son tronc, l'arbre va alors produire une forme de bois précontraint, provoquant l'apparition de contraintes internes dans l'arbre. Dans le cas des feuillus, il s'agira de bois de tension sur la partie supérieure de l'élément à redresser. Les résineux adoptent la stratégie inverse en produisant du bois de compression sur la partie inférieure de cet élément. Les bois de tension ou de compression, appelés également bois de réaction, ne sont pas spécifiques au tronc, mais se retrouvent également au niveau des branches, leur permettant de maintenir leur orientation proche de l'horizontale.

### **2.5.2 : Structure et microstructure du bois de compression**

Le bois de compression se distingue du bois normal par quatre facteurs : sa densité, sa vitesse de croissance, sa structure et sa microstructure cellulaire. Sa densité et sa vitesse de croissance supérieures s'observent au niveau macroscopique, notamment sur une section horizontale de tronc. Le bois de compression possède ainsi une coloration plus intense, et des cernes de croissance plus larges qui provoquent une excentricité de la moelle.

Au niveau cellulaire, le bois de compression se caractérise par des fibres plus courtes, et de section quasi circulaires. On note également la réduction de la paroi S3, au profit d'une paroi S2 plus épaisse. A ceci s'ajoute la présence de sillons hélicoïdaux sur la paroi interne des cellules, ainsi qu'un espace intercellulaire plus large [3,12]. Au niveau de la microstructure des cellules, la principale différence réside dans l'augmentation de l'angle des microfibrilles de cellulose dans la paroi S2 à une valeur d'environ 45°. La paroi des cellules possède également une plus forte concentration en lignine [3,12].

### **2.5.3 : Impact sur le comportement du bois**

La plupart des applications ou des transformations du bois sont affectées par le bois de compression. Au moment de l'abattage d'un arbre ou du sciage, la libération de contraintes de croissance et la présence de bois de réaction provoquent une déformation du matériau, pouvant aller dans certains cas jusqu'à l'éclatement de celui-ci. Les produits comportant du bois de compression sont également plus sensibles dimensionnellement aux variations d'humidité [12], précisément à cause de l'angle des microfibrilles, avec un retrait longitudinal maximal pouvant aller jusqu'à 2% [2]. Mécaniquement, le bois de compression est moins résistant aux sollicitations en traction. Son module élastique est également plus faible dans l'axe des cellules que celui du bois normal.

## **2.6 Du bois juvénile au bois adulte**

### **2.6.1 : Bois juvénile et maturation du cambium**

Au cours des années suivant la formation du cambium, les cellules formées par ce dernier voient certaines de leurs propriétés géométriques et leur microstructure évoluer. Cette évolution est liée à la maturation du cambium, encore mal connue, mais qui semble dépendre de facteurs génétiques [27], de sa position relative au houppier, de sa hauteur [28], et bien sûr du temps.

On distingue alors généralement deux zones dans un tronc : celle proche de la moelle dite de bois juvénile, et celle dite de bois adulte, ou mature. Dû à la maturation progressive du cambium et à l'absence de caractéristiques visuelles, il n'existe pas de critère permettant

d'établir une frontière nette entre ces deux zones. On estime cependant qu'elle se situe généralement entre le 5<sup>e</sup> et le 20<sup>e</sup> cerne de croissance [28,29].

L'accroissement de la demande en bois pousse les sylviculteurs à sélectionner et exploiter de préférence les arbres et essences à forte vitesse de croissance. Cela permet de récolter les arbres plus jeunes et d'assurer un meilleur taux de rotation. En revanche, cela accroît la proportion de bois juvénile [30,31]. La caractérisation du bois juvénile est donc une question de plus en plus importante dans le cadre du classement mécanique.

### **2.6.2 : Microstructure du bois juvénile**

Macroscopiquement, le bois juvénile se distingue du bois mature par une plus faible densité et une proportion de bois d'été réduite. Malgré cela, il est presque impossible de détecter le bois juvénile à l'œil nu [28].

Au niveau de l'anatomie des cellules, la différence est notable : elles sont plus courtes, ont une dimension réduite dans la direction tangentielle, et des parois plus minces [28]. Leur microstructure est modifiée par un angle des microfibrilles plus important, de l'ordre de 40° [29,27]. Enfin, certains auteurs notent une diminution de la proportion de cellulose dans la paroi cellulaire [28], d'autres une réduction de la proportion de lignine [27]. On constate par ailleurs une diminution de certains composés extractibles du bois, notamment des composés phénoliques et flavonoïdes [32].

### **2.6.3 : Impact sur le comportement du bois**

La résistance en traction du bois juvénile et son module élastique sont inférieurs à ceux du bois mature [28]. Ceci s'explique en partie par des parois cellulaires plus minces, provoquant une plus faible densité, et également par un angle des microfibrilles plus important [33]. Il apparaît dans ce cas que le comportement mécanique du bois est principalement dicté par celui de la lignine [34].

Pour certaines essences, le bois juvénile se distingue également par une diminution de la durabilité du bois. Cela s'explique par la variation de sa composition chimique [32]. Enfin, son faible angle de microfibrilles le rend dimensionnellement plus sensible aux variations d'humidité : son retrait longitudinal peut ainsi atteindre 2% [2].

## **2.7 Altérations fongiques et entomiques**

### **2.7.1 : Attaques fongiques**

Les dégradations du bois occasionnées par le développement de champignons est une question majeure lors de l'étude d'un bâtiment. Certains champignons se nourrissent de la cellulose constituant la paroi des cellules, et d'autres de la lignine. Ils ont besoin pour se développer d'un taux d'humidité compris entre 20% et 35%. Les dégâts peuvent aller d'une simple coloration à une chute catastrophique des propriétés mécaniques.

Certaines essences sont plus résistantes que d'autres à la pourriture. Bien qu'il soit possible de traiter chimiquement le bois, un choix judicieux d'essence pour chaque application ou le maintien d'un taux d'humidité inférieur à 20% permet d'éviter la plupart des pathologies.

### **2.7.2 : Attaques par insectes**

Un certain nombre d'insectes représentent un danger majeur pour les structures en bois, dont le plus connu est probablement le termite. Bien que ce dernier se nourrisse de bois à l'état adulte, ce sont en général les larves d'insectes qui occasionnent les dégradations en creusant des galeries dans les éléments de structure. Si elles sont prolongées dans le temps, les attaques d'insectes peuvent provoquer jusqu'à l'effondrement des structures.

## **3. Classement mécanique des bois de structures**

L'amélioration des techniques de classement mécanique des bois de structures a été rendue nécessaire en Europe par l'adoption récente des Eurocodes, et surtout de l'EN 338 [35] qui définit les classes mécaniques des sciages au niveau européen.

Cette partie présente dans un premier temps le cadre normatif qui régit l'utilisation des bois de structure, leur classement, ainsi que l'homologation des machines destinées à cette application. Enfin, les différentes techniques de classement existantes seront décrites.

### **3.1 Cadre normatif**

#### **3.1.1 : Les Eurocodes : dimensionnement des structures**

Le dimensionnement d'une structure consiste à estimer les contraintes et les déformations subies par ses différents éléments. Ce calcul est réalisé en considérant diverses charges mécaniques appliquées au bâtiment final, telles que le poids propre de la structure, celui des personnes et du mobilier, de la neige, l'effort dû au vent, ou encore aux séismes. Il permet d'éviter la rupture d'un ou plusieurs éléments de la structure (Etats Limites Ultimes), mais également d'éviter une trop grande déformation pouvant nuire à l'utilisation du bâtiment (Etats Limites de Service).

On constate immédiatement que ce calcul pose un problème majeur. Les lois de la mécanique, qui permettent de calculer les efforts appliqués aux éléments de structure et d'en déduire les contraintes et déformations, sont admises par tous. En revanche, il reste trois inconnues qui restent à l'appréciation des ingénieurs :

- Quelles sont les charges appliquées au bâtiment ?
- Quel est le comportement mécanique du matériau ?
- Quelles sont les contraintes et déformations considérées comme admissibles ?

Auparavant, c'est-à-dire avant l'application des Eurocodes dans l'Union Européenne, chaque pays disposait d'une série de normes permettant d'apporter une réponse à ces trois questions. Cependant, les règles et les méthodes de calcul n'étaient pas nécessairement les mêmes pour tous les matériaux de construction, et cela rendait très difficile la concurrence à l'échelle internationale.

En 1990, la Commission Européenne a décidé de pallier ces problèmes et a mandaté le Comité Européen de Normalisation pour la rédaction d'une série de normes définissant les règles de calcul des structures applicables dans l'ensemble de l'UE. Ces règles sont consignées dans une série de normes appelées Eurocodes. Leur apport majeur réside dans le fait que les méthodes et formules sont semblables pour le calcul des structures en acier, en



béton et en bois, ce qui facilite le choix du matériau adapté aux besoins, et également le calcul des éléments composites (plancher bois-béton par exemple).

### 3.1.2 : L'EN 338 : les classes de résistance des sciages

Nous avons vu qu'une inconnue majeure lors du calcul d'une structure est le comportement mécanique du matériau pour chaque élément. Le comportement des aciers et des bétons est parfaitement connu et maîtrisé car il dépend uniquement de leurs compositions et de leurs procédés de fabrication. La notion de classe de résistance pour ces matériaux peut donc être facilement définie à partir de ces deux paramètres.

L'ambition des Eurocodes étant d'harmoniser les règles de calcul entre les différents matériaux de construction, il apparaît nécessaire de pouvoir connaître le comportement mécanique des sciages que l'on souhaite utiliser en structure. A cet effet, la norme EN 338 [35] définit une série de classes de résistance, comportant les valeurs limites de calcul utiles au dimensionnement des structures (Tableau 1).

| Résistance (en MPa)   | C18 | C24 | C30 |
|-----------------------|-----|-----|-----|
| Flexion               | 18  | 24  | 30  |
| Traction axiale       | 11  | 14  | 18  |
| Traction transversale | 0,5 | 0,5 | 0,6 |
| Compression axiale    | 18  | 21  | 23  |
| Compr. transversale   | 2,2 | 2,5 | 2,7 |
| Cisaillement          | 2,0 | 2,5 | 3,0 |

| Rigidité (en GPa)                  | C18  | C24  | C30  |
|------------------------------------|------|------|------|
| Module moy. d'élast. axiale        | 9    | 11   | 12   |
| Module moy. d'élast. trans.        | 0,30 | 0,37 | 0,40 |
| Mod. moy. de cisaillement          | 0,56 | 0,69 | 0,75 |
| Masse vol. (en kg/m <sup>3</sup> ) | C18  | C24  | C30  |
| Masse volumique                    | 320  | 350  | 380  |
| Masse vol. moyenne                 | 380  | 420  | 460  |

Tableau 1 : Extrait du tableau 1 de l'EN 338 [35]

Chaque classe est désignée par le type de bois concerné (C pour les résineux, D pour les feuillus, GL pour le bois lamellé-collé, GT pour le bois massif reconstitué) et sa contrainte caractéristique de rupture en flexion, exprimée en MPa. Une particularité de ce système de classement est qu'il ne s'applique pas à des sciages individuels, mais à un lot de pièces. La contrainte caractéristique est en effet définie comme le fractile à 5% de la contrainte de rupture, pour un taux d'humidité relative de l'air de 65% (correspondant à 12% pour les résineux) et une température de 20°C. Autrement dit, un lot de classe C30, par exemple, garantit par définition qu'au minimum 95% des pièces qui le constituent possèdent une contrainte de rupture en flexion supérieure ou égale à 30 MPa [36].

La norme EN 338 [35] indique également que pour appartenir à une classe donnée, le lot doit satisfaire trois critères : les valeurs caractéristiques de la résistance à la flexion et de la masse volumique, ainsi que le module d'élasticité moyen axial doivent être supérieurs aux valeurs de calcul. Or, la résistance à la flexion ne pouvant être mesurée que par un essai destructif, celle-ci doit être estimée à partir d'autres critères. C'est pourquoi il existe une norme régissant le classement mécanique à travers des critères visuels (NF B 52001), et une norme concernant l'homologation des machines de classement (EN 14081).

### 3.1.3 : L'EN 14081 : homologation des machines

Quelle que soit la technologie employée, l'objectif d'une machine de classement est de déterminer les trois paramètres permettant d'attribuer une classe de l'EN 338 à chaque sciage. Ce classement n'est jamais effectué en considérant toutes les classes disponibles dans la norme, mais se concentre en général sur une combinaison de 2 ou 3 classes. A l'heure actuelle, les combinaisons les plus fréquentes sont C18/C24 et C18/C24/C30.

Il est évident qu'une telle machine ne peut pas déterminer parfaitement et de façon non destructive la contrainte de rupture en flexion ou en traction. Par conséquent, certaines pièces se trouveront sous-classées, et d'autres sur-classées. Un trop grand nombre de pièces sur-classées pourrait mettre en danger l'intégrité des bâtiments dont elles composent la structure. L'homologation d'une machine de classement selon la norme EN 14081 [37] permet de s'assurer que le risque lié au sur-classement des sciages par cette machine est inférieur à une certaine limite. En revanche, cette norme n'impose aucune limite concernant le sous-classement, qui reste cependant important d'un point de vue économique.

Pour être réglée et homologuée, une machine doit procéder au classement d'au minimum 900 pièces représentatives de la production du pays concerné, pour l'essence, la combinaison de classes, et les dimensions souhaitées. Pour une machine disposant déjà d'une homologation, le nombre minimal de pièces permettant d'étendre l'homologation à une autre zone géographique, une autre essence, ou une autre combinaison de classes est de 450.

Chaque pièce de l'échantillon dispose donc d'une classe assignée par la machine et d'une classe optimale, obtenue après essai de flexion destructif. On représente le résultat de ces essais dans une matrice de contingence (Figure 8). Pour chaque combinaison classe assignée / classe optimale, la norme définit un coût élémentaire (Tableau 2). A partir des matrices de contingence et de coûts élémentaires, on calcule la matrice des coûts globaux en multipliant chaque case de la matrice de contingence par la case de la matrice des coûts élémentaires correspondante, et en divisant le résultat par le nombre de pièces assignées à la classe correspondante. Afin d'être homologuée pour une combinaison de classes donnée, une machine de classement doit fournir une matrice des coûts globaux dont chaque case située sous la diagonale doit être inférieure à 0,2. Un exemple d'utilisation de cette méthode est présenté par la Figure 8.

| CLASSE<br>OPTIMALE | CLASSE ASSIGNEE |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|--------------------|-----------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|                    | C50             | C45  | C40  | C35  | C30  | C27  | C24  | C22  | C20  | C18  | C16  | C14  |
| <b>C50</b>         | 0,00            | 0,22 | 0,45 | 0,72 | 1,01 | 1,16 | 1,33 | 1,69 | 1,90 | 2,11 | 2,60 | 3,17 |
| <b>C45</b>         | 0,37            | 0,00 | 0,23 | 0,49 | 0,77 | 0,92 | 1,09 | 1,45 | 1,64 | 1,85 | 2,33 | 2,89 |
| <b>C40</b>         | 0,83            | 0,42 | 0,00 | 0,25 | 0,53 | 0,68 | 0,84 | 1,19 | 1,38 | 1,59 | 2,05 | 2,60 |
| <b>C35</b>         | 1,43            | 0,95 | 0,48 | 0,00 | 0,27 | 0,42 | 0,57 | 0,91 | 1,10 | 1,30 | 1,76 | 2,29 |
| <b>C30</b>         | 2,22            | 1,67 | 1,11 | 0,56 | 0,00 | 0,14 | 0,29 | 0,63 | 0,81 | 1,01 | 1,45 | 1,97 |
| <b>C27</b>         | 2,84            | 2,22 | 1,60 | 0,99 | 0,37 | 0,00 | 0,15 | 0,48 | 0,66 | 0,85 | 1,29 | 1,80 |
| <b>C24</b>         | 3,61            | 2,92 | 2,22 | 1,53 | 0,83 | 0,42 | 0,00 | 0,32 | 0,50 | 0,69 | 1,12 | 1,63 |
| <b>C22</b>         | 4,24            | 3,48 | 2,73 | 1,97 | 1,21 | 0,76 | 0,30 | 0,00 | 0,17 | 0,36 | 0,77 | 1,26 |
| <b>C20</b>         | 5,00            | 4,17 | 3,33 | 2,50 | 1,67 | 1,11 | 0,74 | 0,37 | 0,00 | 0,18 | 0,59 | 1,07 |
| <b>C18</b>         | 5,93            | 5,00 | 4,07 | 3,15 | 2,22 | 1,67 | 1,11 | 0,74 | 0,37 | 0,00 | 0,40 | 0,87 |
| <b>C16</b>         | 7,08            | 6,04 | 5,00 | 3,96 | 2,92 | 2,29 | 1,67 | 1,25 | 0,83 | 0,42 | 0,00 | 0,46 |
| <b>C14</b>         | 8,57            | 7,38 | 6,19 | 5,00 | 3,81 | 3,10 | 2,38 | 1,90 | 1,43 | 0,95 | 0,48 | 0,00 |

Tableau 2 : Matrice des coûts élémentaires définis par l'EN14081.

La matrice des coûts est définie de la manière suivante : une pièce sous-classée utilisée en structure se trouve surdimensionnée. Par conséquent, le sous-classement se traduit par une perte de matière. L'EN 14081 [38] considère que la pièce est dimensionnée par l'Etat Limite de Service et définit le coût de sous-classement d'après l'Équation 2. Les valeurs de coût données dans cette norme sont alors obtenues en multipliant les valeurs obtenues par 10.

Dans le cas des pièces sur-classées, le coût est lié à l'augmentation du risque de rupture, ce qui se traduit concrètement par une diminution du coefficient de sécurité. On suppose que le coefficient de sécurité cible est de 3. Le calcul du coefficient de sécurité atteint est basé sur les valeurs caractéristiques de résistance en flexion des classes optimales et assignées, et sur l'hypothèse d'une répartition log-normale des contraintes de ruptures des sciages au sein d'une classe. Les détails de ce calculs sont fournis dans l'annexe A de l'EN 14081 [37]. La valeur de coût finale sera prise égale à la différence entre les coefficients de sécurité cible et atteint, multipliée par 10.

$$\text{Coût (sous – classement)} = \sqrt[3]{\frac{E_{\text{optimal}}}{E_{\text{assigné}}}} - 1$$

Équation 2 : Coût de sous-classement des sciages [38]

Enfin, on remarque que l'obtention des coûts de sous-classement et de sur-classement est impossible si la classe de rejet est concernée, car on ne connaît pas a priori les caractéristiques mécaniques de cette classe. L'EN 14081 impose de considérer que la classe de rejet possède 75% des caractéristiques de la classe immédiatement supérieure. Par exemple, si la combinaison de classes est C18 - C24 - C30, la contrainte de rupture caractéristique de la classe de rejet sera considérée à  $18 \times 0,75 = 13,5$  MPa.

Enfin, chaque machine de classement installée sur un site de production doit être soumise à un test de répétabilité. Celui-ci consiste à passer à 5 reprises un lot de 100 pièces, et à vérifier que les 5 résultats obtenus sont identiques pour chaque pièce. Nous reviendrons plus en détail sur ce test au cours du chapitre III.

| MATRICE DE CONTINGENCE |                 |     |     |       | MATRICE DES COÛTS GLOBAUX |                 |      |      |       |
|------------------------|-----------------|-----|-----|-------|---------------------------|-----------------|------|------|-------|
| CLASSE OPTIMALE        | CLASSE ASSIGNEE |     |     |       | CLASSE OPTIMALE           | CLASSE ASSIGNEE |      |      |       |
|                        | C35             | C27 | C22 | Rejet |                           | C35             | C27  | C22  | Rejet |
| C35                    | 207             | 32  | 16  | 2     | C35                       | 0,00            | 0,06 | 0,13 | 0,20  |
| C27                    | 10              | 168 | 12  | 1     | C27                       | 0,04            | 0,00 | 0,05 | 0,08  |
| C22                    | 4               | 13  | 84  | 2     | C22                       | 0,04            | 0,05 | 0,00 | 0,13  |
| Rejet                  | 0               | 2   | 2   | 24    | Rejet                     | 0,00            | 0,04 | 0,05 | 0,00  |

Figure 8 : Exemple d'utilisation de la méthode des coûts globaux. D'après l'EN 14081 [37].

## 3.2 Classement mécanique global des sciages

### 3.2.1 : Classement mécanique visuel

Le classement mécanique visuel consiste à classer les sciages non pas dans les classes de résistances mécaniques de l'EN 338, mais dans celles de la norme française NF B 52-001. Celle-ci comporte quatre classes appelées ST I, ST II, ST III et STIV, qui définissent des limites sur les dimensions et les positions de défauts qui dégradent les caractéristiques mécaniques des sciages (nœuds, fente, etc.), en fonction de leurs dimensions, de leurs essences et de leurs origines géographiques. La norme établit une correspondance respective entre les classes ci-dessus et certaines classes de l'EN 338 pour les essences courantes de résineux en France.

Du point de vue du classement mécanique, il a été démontré que cette méthode entraîne une forte sous-estimation des performances des sciages [39,40]. Ceci est dû à la faible corrélation entre les performances mécaniques des sciages et les critères d'aspect seuls. Afin de garantir l'intégrité des structures, il est donc nécessaire de sous-estimer les performances des sciages (Figure 9). Par ailleurs, cette méthode présente l'inconvénient d'être limitée en cadence et de présenter une faible répétabilité.

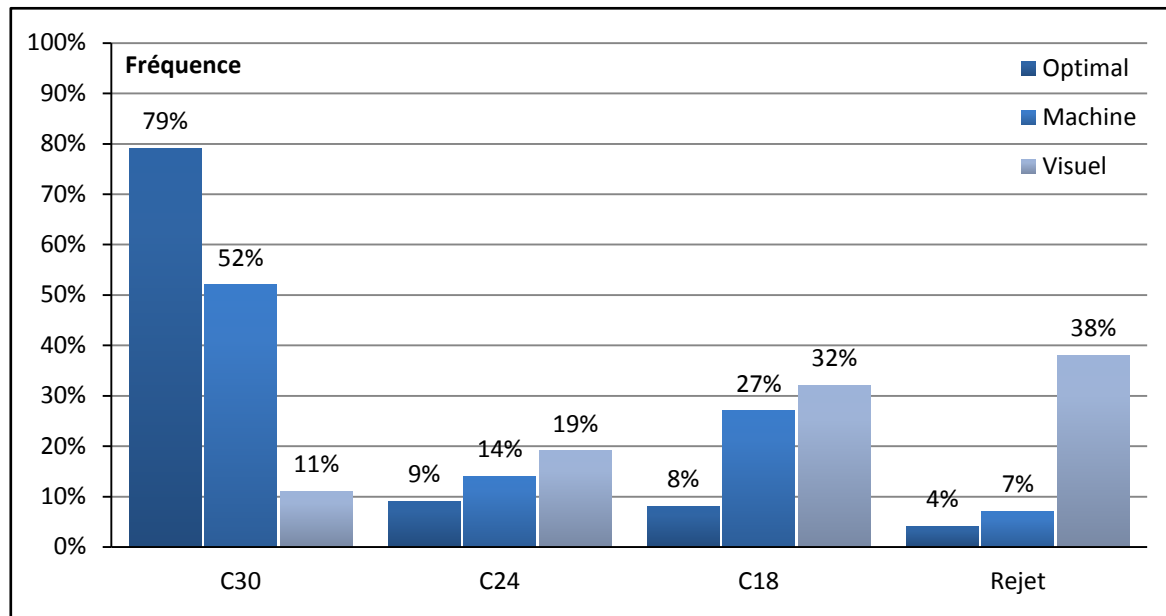


Figure 9 : Comparaison des classements de douglas obtenus visuellement et par machine, au regard du classement optimal obtenu par essai de flexion. [39].

### 3.2.2 : Classement mécanique global par machine

Le classement global par machine est destiné à pallier les insuffisances du classement mécanique visuel. L'automatisation permet en effet d'atteindre des cadences plus élevées, une meilleure répétabilité, mais surtout la prise en compte de modèles plus complexes de contrainte de rupture en fonction des paramètres globaux des sciages.

La plupart des machines de classement utilisent la relation entre la masse volumique, le module élastique et la contrainte de rupture du bois (voir p. 25). Par conséquent, leur mode de fonctionnement consiste à mesurer successivement la densité moyenne d'un sciage et son module élastique moyen, puis d'en estimer la contrainte de rupture.

On peut également distinguer deux types de machines : celles à convoyage longitudinal, et celles à convoyage transversal. La principale différence réside dans les technologies utilisables pour les mesures de densité et de module élastique. Les machines à convoyage longitudinal mesurent la densité grâce aux rayons X ou aux micro-ondes, et le module élastique est mesuré par essai de flexion dynamique. Les machines à convoyage transversal peuvent utiliser l'analyse des vibrations acoustiques pour mesurer le module élastique, et une simple pesée pour la mesure de densité. Il est également possible de combiner différentes technologies : par exemple, on peut envisager de mesurer le module élastique lors d'un convoyage transversal, puis la densité grâce aux rayons X en un autre point de la ligne de production. Notons qu'il existe également des cellules de mesures de densité par micro-ondes ou rayons X adaptables à un convoyage transversal.

### 3.3 Knot Area Ratio : prise en compte des nœuds

#### 3.3.1 : Principe de calcul du KAR

Les méthodes permettant de classer les sciages d'après leurs paramètres globaux donnent des résultats acceptables, mais, par définition, ne permettent pas de tenir compte des singularités du bois qui peuvent pourtant largement influencer la contrainte de rupture des sciages. Parmi les singularités les plus importantes se trouvent les nœuds, qui sont des zones de très faible résistance mécanique dans le cas d'une sollicitation en traction axiale ou en flexion des sciages.

Le KAR est un indicateur permettant d'obtenir une information concernant la nodosité des sciages. Il a été introduit pour la première fois par Tredwell [41], et consiste à projeter les nœuds, présents à l'intérieur d'une fenêtre d'observation, à l'extrémité de cette dernière. Le KAR représente alors le rapport entre l'aire totale de projection des nœuds et la section du sciage (Figure 10). La longueur de la fenêtre est généralement prise à 150mm, ce qui correspond à la zone autour d'un nœud dont la pente de fil est perturbée.

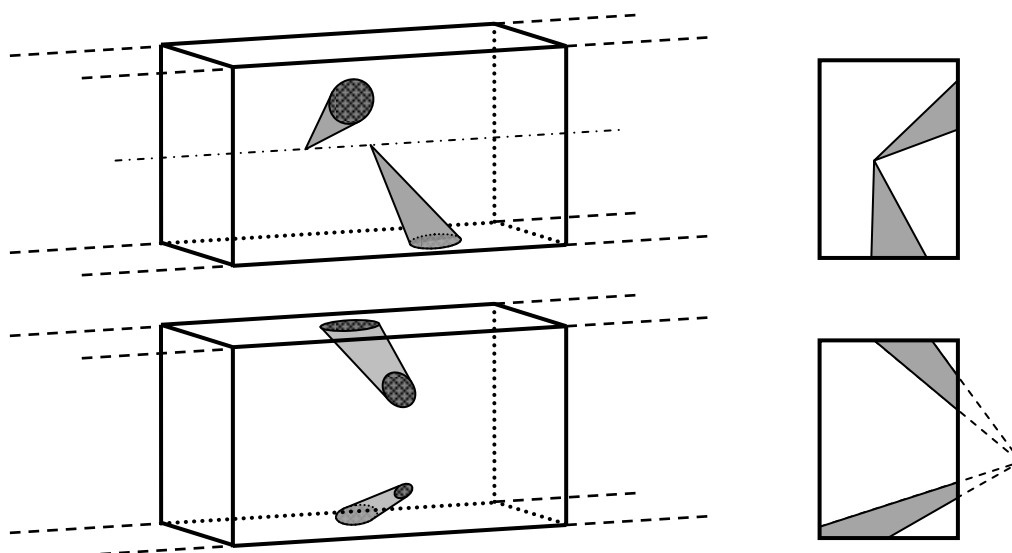


Figure 10 : Illustration du calcul du KAR : les volumes occupés par les nœuds sont projetés au bout de la fenêtre d'observation [41].

Pour estimer la contrainte de rupture d'un sciage, on fait glisser cette fenêtre sur toute la longueur du sciage, et on retient en général la valeur maximale de KAR obtenue, sa moyenne, ou encore son écart-type. Hanhijärvi [16] donne des valeurs de coefficient de détermination  $R^2$  entre le KAR maximal brut et la contrainte de rupture : 21% pour l'épicéa commun, et 54% pour le pin sylvestre. Les meilleurs résultats du pin sylvestre peuvent être expliqués par une plus grande hétérogénéité dans la géométrie des nœuds, qui ont alors une plus grande influence sur le comportement mécanique [1].

Il existe de nombreuses variantes au KAR standard défini par Tredwell [41], en particulier celle rapportée par Bailleres [42] et similaire à une autre méthode présentée par Roblot [1] : l'indice considéré n'est plus l'aire de la projection des nœuds, mais son moment quadratique, prenant ainsi en compte de la distribution hétérogène des contraintes lors d'un essai de flexion. Bien que l'idée soit cohérente, les résultats ne montrent d'amélioration dans aucun des deux cas. On retiendra néanmoins la démarche pour la suite de l'étude.

### 3.3.2 : Calcul automatique du KAR

Jusqu'à récemment, cette technique pouvait être uniquement appliquée manuellement. En effet, elle nécessite une connaissance de l'organisation des nœuds à l'intérieur des sciages pour déterminer leurs projections.

Roblot [1] introduit une méthode de calcul automatique du KAR basée sur la mise en correspondance des nœuds. Celle-ci est réalisée en trois temps. Premièrement, pour chaque fenêtre d'observation, on recherche les solutions possibles de mise en correspondance. Ces solutions correspondent à des nœuds qui ne se croisent pas à l'intérieur d'une section, et dont l'intersection se trouve idéalement en un point unique. Deuxièmement, on observe la position des points d'intersection définis précédemment sur l'ensemble du sciage. Cette étape permet de prendre une décision dans les cas où plusieurs solutions auraient été trouvées lors de la première étape. Enfin, la troisième phase consiste à vérifier la cohérence globale du résultat obtenu en projetant tous les nœuds du sciage sur une même section. Dans le cas où des nœuds se croiseraient, on revient aux étapes précédentes en cherchant de nouvelles solutions, ou en considérant certains nœuds comme non-débouchants.

Cette méthode est régie par une hypothèse de départ, qui consiste à considérer la moelle comme extérieure au sciage. En effet, dans le cas où la moelle serait située dans le sciage, la notion de mise en correspondance n'a aucun sens : tous les nœuds partant de la moelle, aucun ne serait traversant. Si cette hypothèse se trouve erronée, on constate soit qu'un grand nombre de nœuds se trouvent sans correspondant, soit que la moelle est éloignée de plusieurs mètres du sciage, ce qui n'est pas réaliste. Dans ce cas, la moelle est placée au centre du sciage, même si cette hypothèse reste très forte.

Une autre approche du calcul automatique du KAR a été présentée par Oh [43]. Celle-ci est basée sur l'information de densité locale extraite des images des sciages obtenues grâce aux rayons X. En supposant que la densité du bois sain et celle des nœuds sont constantes, il est possible de déterminer la profondeur locale des nœuds (Knot Depth Ratio). D'après l'auteur, la corrélation  $R^2$  entre le KAR mesuré manuellement et le KAR mesuré grâce aux rayons X se situe entre 89% et 93%.

### 3.3.3 : Résultats obtenus

La méthode introduite par Roblot [1] a été testée sur deux lots d'épicéa et deux lots de douglas. Différentes variantes du KAR ont été testées, pour différentes valeurs de taille de fenêtre. Les meilleurs résultats ont été obtenus en combinant les mesures du KAR et celles du module élastique et de la densité obtenues grâce au E-Scan, produit par la société Luxscan. L'auteur obtient des valeurs de  $R^2$  de 55% pour l'épicéa et de 72% pour le douglas, en utilisant une régression multilinéaire basée sur des valeurs de KAR calculées à l'aide de différents paramètres.

## 3.4 Area Reduction Factor : prise en compte de la pente de fil

### 3.4.1 : Principe du calcul de l'ARF

L'ARF a été introduit pour la première fois par Mitsuhashi [21], et se définit comme une amélioration du KAR décrit ci-dessus. La méthode utilisée est sensiblement la même : on observe la projection des nœuds sur la section d'une fenêtre glissante. Cependant, le KAR

considère que la résistance des nœuds en traction transversale est nulle, et celle du bois sain comme constante, quelle que soit la position du point observé par rapport au nœud.

L'ARF, tel qu'il est défini par Mitsuhashi [21], utilise la formule de Hatayama (Équation 1, p. 27) pour estimer une valeur d'angle des fibres autour du nœud sur la section de la fenêtre glissante. Cet angle permet de définir en chaque point de la section une valeur de résistance mécanique relative, d'après la formule de Hankinson (Équation 3). Le résultat est ensuite divisé par la valeur de résistance en traction axiale  $\sigma_{lim}(0)$ , supposée constante. La résistance mécanique des nœuds est ici considérée comme nulle.

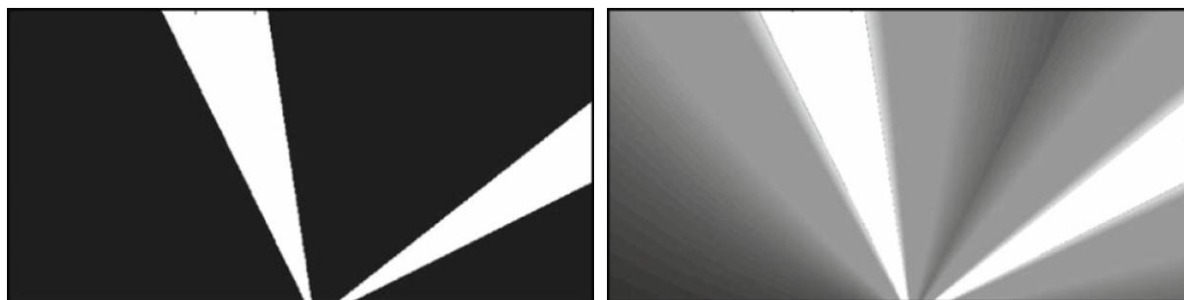
$$\sigma_{lim}(\theta) = \frac{\sigma_{lim}(0) \cdot \sigma_{lim}(90)}{\sigma_{lim}(0) \cdot \sin^n(\theta) + \sigma_{lim}(90) \cdot \cos^n(\theta)}$$

**Équation 3 : Formule de Hankinson, permettant de calculer la contrainte de rupture du bois en fonction de l'angle de sollicitation. Le paramètre n est compris entre 1,5 et 2 [21].**

Pour chaque fenêtre d'observation, on obtient un champ de valeurs de résistance mécanique relative. L'ARF local pour une fenêtre donnée est tout simplement la moyenne de ces valeurs sur la section de cette fenêtre. L'ARF global sera alors la valeur minimale des ARF locaux. La Figure 11 montre la différence entre le modèle de KAR et celui de l'ARF sur une fenêtre comportant deux nœuds projetés.

### 3.4.2 : Résultats obtenus

Cette méthode a été testée par Mitsuhashi [21] sur un échantillon de 79 sciages, dont 39 de dimensions 50x100x3600 mm et 40 de dimensions 50x150x3600 mm, avec une longueur de fenêtre d'observation de 100 mm. Les essais destructifs ont été réalisés sur un banc de traction. Par ailleurs, la valeur de résistance mécanique du bois en traction axiale a été mesurée sur de petites éprouvettes de bois sain.



**Figure 11 : Comparaison entre les modèles du KAR (à gauche) et de l'ARF (à droite) [21].**

D'après l'auteur, seuls 11 sciages ont été retenus pour la validation de la méthode. Les mesures indiquent que le coefficient de corrélation  $R^2$  entre les contraintes de rupture calculées et expérimentales est de 26% pour l'ARF et de 23% pour le KAR. L'amélioration de la prédiction indiquée par ces valeurs paraît très faible, et de toute manière peu fiable compte tenu du faible nombre de sciages testés. On peut également reprocher à ce modèle de ne pas être fondé sur une mesure de pente de fil, mais sur une estimation empirique.



### 3.5 Techniques de modélisation avancées

#### 3.5.1 : Homogénéisation micromécanique

Les méthodes d'homogénéisation, dans le cadre de l'étude d'un matériau quelconque, ont pour but d'établir le lien entre les propriétés mécaniques de ses constituants et celles d'un Volume Élémentaire Représentatif (VER) pouvant être considéré comme homogène à son échelle d'observation. Ceci permet de définir l'architecture d'un composite en fonction des propriétés désirées, ou à l'inverse de prédire son comportement connaissant sa composition. Les modèles simples de Voigt et de Reuss sont d'ailleurs des cas particuliers des théories d'homogénéisation plus générales, et bien plus complexes.

Les cas d'application de ces théories au bois sont encore rares. On peut néanmoins citer les travaux de Hofstetter [44], qui eux-mêmes s'inspirent des méthodes utilisées dans le domaine de la biomécanique, en particulier dans la caractérisation des structures osseuses. L'objectif ici est de décrire le comportement du bois à une échelle de quelques millimètres, ce qui correspond aux dimensions du bois d'été ou du bois de printemps au sein de chaque cerne. La méthode employée est celle de l'homogénéisation successive, à partir d'une échelle où les composants peuvent être considérés comme communs à tout échantillon de bois. A chaque étape, le VER sera donc un des constituants pris en compte à l'étape suivante (Figure 12). La première étape permet de décrire la matrice polymérique entourant les chaînes de cellulose, la seconde concerne la description des parois cellulaires. Enfin, la dernière étape permet d'obtenir une estimation du comportement du volume qui nous intéresse. Les distributions des composants à chaque étape sont idéalisées (cylindres infinis ou sphères), de manière à correspondre à des cas de calculs simplifiés dont on connaît les résultats. Les propriétés mécaniques des constituants élémentaires et leurs fractions volumiques doivent alors être mesurées ou estimées, selon les informations disponibles.

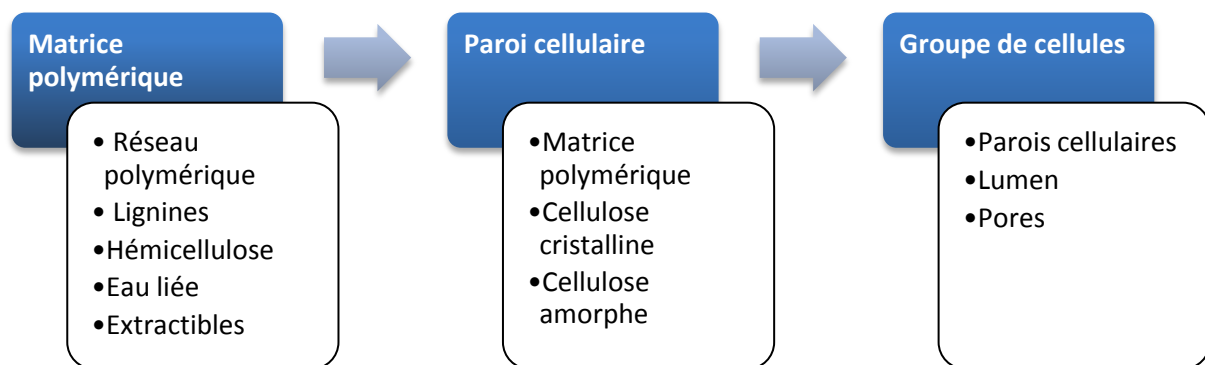


Figure 12 : Etapes d'homogénéisation successives.

Les résultats obtenus par Hofstetter [44] sont très prometteurs en ce qui concerne l'estimation des modules élastiques longitudinaux et transversaux, avec un coefficient de détermination  $R^2$  de l'ordre de 75% dans les deux cas. L'estimation des modules de cisaillement et de Poisson est en revanche beaucoup moins performante. Ces imperfections s'expliquent par les approximations géométriques qui peuvent être dans certains cas abusives, et par la difficulté que représente l'évaluation des fractions volumiques et des propriétés des constituants élémentaires. Néanmoins, la puissance de ce type de méthode a fait ses preuves pour d'autres types de matériaux, et confère à celle-ci une marge de progression importante.



### 3.5.2 : Analyse par Eléments Finis

Une autre méthode bien connue de modélisation mécanique avancée est celle des Eléments Finis. L'intérêt de cette méthode réside dans sa capacité à prendre en compte les singularités macroscopiques, ou plus précisément les singularités dont les dimensions sont proches de celles du sciage, empêchant ainsi la définition d'un VER. Ce type de simulation pose néanmoins un certain nombre de difficultés classiques, comme le choix d'un maillage adapté, le type d'éléments le mieux adapté, en particulier son type de comportement (élastique, élasto-plastique, etc.), ainsi que le critère de rupture.

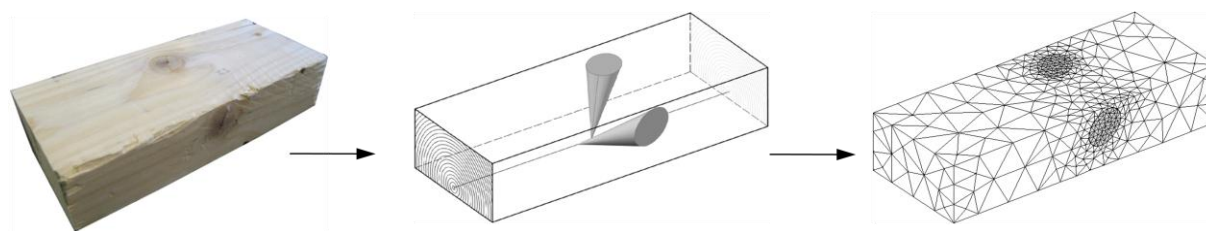


Figure 13 : Etapes de construction du modèle Eléments Finis [45]

Dans le cas du bois s'ajoutent deux problématiques supplémentaires. D'une part, les propriétés mécaniques correspondant à un élément du maillage dépendent à la fois du tenseur de rigidité du bois dans le repère local (axial, radial, tangentiel), mais également de l'orientation de ce repère par rapport au repère global. Il est donc nécessaire d'évaluer ces deux paramètres pour chaque élément. D'autre part, les résultats de ces évaluations sont des variables aléatoires, générant par conséquent un très grand nombre d'éléments différents, ce qui alourdit fortement les temps de calculs.

A l'occasion de seconds travaux, Hofstetter [45] utilise une méthode d'EF couplée à la modélisation micromécanique détaillée plus haut afin de simuler des essais mécaniques. Au cours de ces calculs, seuls les nœuds sont pris en compte, dans un modèle 3D (Figure 13). Les résultats, bien que fournis pour un faible nombre de pièces, semblent excellents : le coefficient de détermination  $R^2$  entre les contraintes de rupture estimées et mesurées sont de l'ordre de 95%, à la fois en traction et en flexion. On remarque immédiatement que l'imprécision toute relative du modèle micromécanique du même auteur ne pénalise que très peu les résultats finaux. Une interprétation possible de cette observation serait que le MOE et le MOR des sciages dépendent essentiellement des singularités macroscopiques, en l'occurrence des nœuds. Compte tenu de la faible quantité de détails donnés au cours de cette conférence, il est impossible de conclure de manière plus définitive.

### 3.5.3 : Limites actuelles

L'ensemble des méthodes développées par Hofstetter [44,45] offrent de très bons résultats finaux et peuvent être considérées comme très prometteuses. En l'état, Elles sont pourtant inapplicables à notre problématique, essentiellement pour une question de cadence. Il n'existe actuellement aucun dispositif permettant de relever dans un délai raisonnable l'ensemble des informations nécessaires à l'homogénéisation micromécanique. La modélisation par EF quand à elle, qui nécessite du temps et des ressources importants dans des cas de calculs simples, n'est à l'heure actuelle pas plus envisageable. Les conditions imposées dans notre cas nécessiteront donc la construction d'un modèle plus simple, capable de classer chaque planche en moins de 1 à 2 secondes.

## 4. Techniques de caractérisation du matériau bois

Comme nous avons pu le voir jusqu'à présent, la variabilité du bois rend impossible la caractérisation précise d'un sciage ou d'un échantillon à partir de données statistiques. Il est nécessaire, afin d'aboutir à un classement mécanique fiable, d'obtenir des informations sur les caractéristiques générales des sciages, ainsi que sur la présence de singularités locales.

L'objectif de cette partie est de présenter les différentes techniques existantes permettant de caractériser le matériau, de l'échelle macroscopique à microscopique. Ceci inclut la mesure de propriétés globales des sciages et la détection de singularités.

### 4.1 Vision humaine et artificielle

La caractérisation visuelle des sciages, par opérateurs ou par ordinateur, est la méthode la plus répandue actuellement dans le classement des sciages. Elle se base sur l'observation des faces des produits, afin d'identifier certaines singularités. La vision par machines est celle qui nous intéresse plus particulièrement, et consiste en l'automatisation de la vision humaine.

#### 4.1.1 : Vision humaine

Le classement des sciages par vision humaine est encore largement utilisé, en particulier en France. Cette technique a l'avantage de pouvoir être facilement adaptée à différentes applications, et ne nécessite pas d'investissement matériel particulier.

Les faces d'un sciage sont observées par un ou plusieurs opérateurs spécialement formés. Ils peuvent identifier toutes sortes de défauts visibles, éventuellement estimer la distribution de ces défauts dans le volume des pièces. Leur travail consiste ensuite soit à trier les pièces en fonction de critères prédéfinis, soit à positionner les zones de découpe pour purger les défauts et/ou optimiser la matière.

#### 4.1.2 : Vision artificielle

La vision artificielle est une discipline qui s'est fortement développée à partir des années 1980, mais ses origines remontent aux années 1950 [46]. Dans l'industrie du bois, elle a pour objectif de localiser certaines singularités à partir des techniques de vision classiques, et très souvent en utilisant l'effet trachéides (voir p. 42). Des informations plus complètes sur les technologies de vision artificielle seront présentées au paragraphe 5, p. 49.

### 4.2 Analyse acoustique

#### 4.2.1 : Principe

L'analyse acoustique des sciages est actuellement la méthode la plus utilisée industriellement pour le classement mécanique automatisé. Elle repose sur la corrélation entre la densité, le module élastique et la résistance du bois. L'objectif de cette méthode est donc d'estimer le module élastique du bois connaissant sa densité, et d'en déduire sa contrainte de rupture [47].

Les techniques d'analyse acoustique peuvent se diviser en deux catégories. La première consiste à mesurer la vitesse de propagation d'une onde, en général des ultrasons, le long du sciage. Un bout d'une planche est ainsi soumis à une vibration de fréquence

donnée, et la mesure est effectuée à l'autre bout. Le temps de propagation est calculé à partir du décalage de phase entre les signaux émis et reçus.

La seconde consiste à percuter la planche afin de la faire entrer en vibration. La grandeur mesurée dans ce cas est la fréquence propre du sciage, qui est d'ailleurs liée à la vitesse de propagation de l'onde [47]. Cette technique est plus favorable à des applications industrielles, puisqu'elle permet d'effectuer une mesure à la volée (pièces en mouvement). Parmi les systèmes de mesure utilisant cette technique, on peut citer le Viscan produit par Microtec, et le E-Scan produit par Luxscan.

#### **4.2.2 : Applications et limites**

Des systèmes utilisant cette technique ont déjà été mis en place dans plusieurs scieries. Ils permettent d'atteindre un coefficient de corrélation  $R^2$  entre la contrainte de rupture calculée et mesurée de 64% [47], bien que ces résultats varient fortement en fonction de l'essence étudiée. Leurs faibles coûts et leur facilité de mise en œuvre contribuent à faciliter leur implantation.

Ils présentent cependant l'inconvénient de ne considérer les poutres que dans leur ensemble, sans tenir compte des singularités locales, notamment de leurs positions et de leurs caractéristiques mécaniques. Toutefois, la présence de singularités peut modifier la fréquence propre de la poutre dans le cas d'un impact latéral, mais l'application de ce phénomène se heurte à la précision de la lecture automatique du spectre fréquentiel [47].

#### **4.2.3 : Cas de la tomographie acoustique**

L'objectif de la tomographie acoustique est de mesurer la vitesse de transmission des ondes mécaniques en plusieurs points. Cette technique est très répandue dans l'exploration des sols, et a été appliquée à la localisation de la moelle dans les sciages [48], mais également au diagnostic sanitaire d'arbres sur pieds ou de poteaux.

### **4.3 Diffusion des ondes électromagnétiques**

#### **4.3.1 : Mécanismes de l'effet trachéides**

Nous avons vu que la structure et l'anatomie des trachéides rendent le bois mécaniquement anisotrope. Cette anisotropie se retrouve également dans les mécanismes de diffusion de la lumière au cœur du bois. En effet, si un laser est projeté perpendiculairement à la surface d'une pièce de bois, une partie de la lumière diffusée dans le bois remonte à la surface de la pièce, et on observe alors une tache plus grande que le laser incident. La particularité de cette tache est qu'elle n'est pas circulaire, mais elliptique (Figure 14). Il se trouve que son grand axe est orienté parallèlement à l'axe des fibres, ou plus précisément parallèlement à la projection de l'axe des fibres sur la surface observée [49]. Naturellement, si les fibres sont orientées perpendiculairement à la surface observée, la tache est circulaire. Ce phénomène est couramment appelé effet trachéides.

L'origine de ce phénomène est encore mal connue et discutée. Pour certains auteurs, les parois cellulaires agissent comme un guide d'ondes, permettant de propager plus facilement la lumière dans l'axe des trachéides [50]. Cette hypothèse est formulée sans plus de précisions, mais est compatible avec l'idée selon laquelle la lumière serait réfléchiée par la matrice intercellulaire, plus riche en lignine [51].

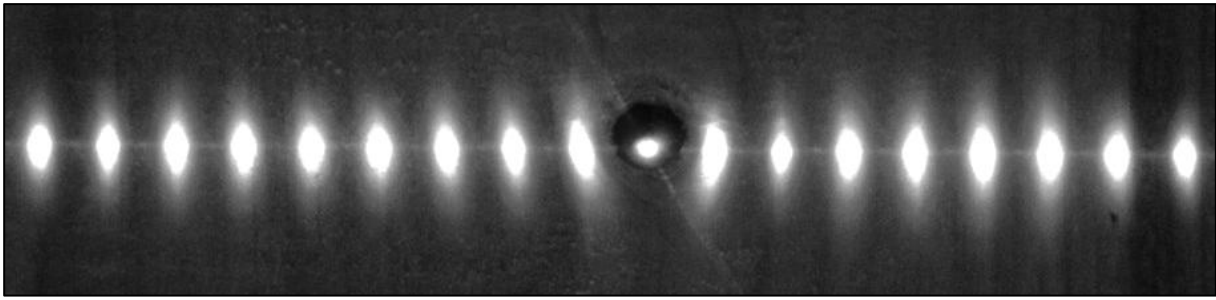


Figure 14 : Observation de l'effet trachéides obtenu par lasers points.

Un premier modèle a été établi par Simonaho [52]. Celui-ci considère des fibres infinies de sections carrées, avec des parois d'épaisseurs constantes, ainsi que les ponctuations présentes dans ces parois (voir Figure 6 p.21). Les résultats fournis par la méthode modale de Fourier indiquent que le phénomène de diffraction joue un rôle important dans l'effet trachéides. En particulier, l'influence des ponctuations des parois cellulaires semble prépondérante, et permet de propager la lumière selon l'axe des trachéides. La paroi des cellules semble ne pas affecter la propagation de la lumière perpendiculairement aux fibres.

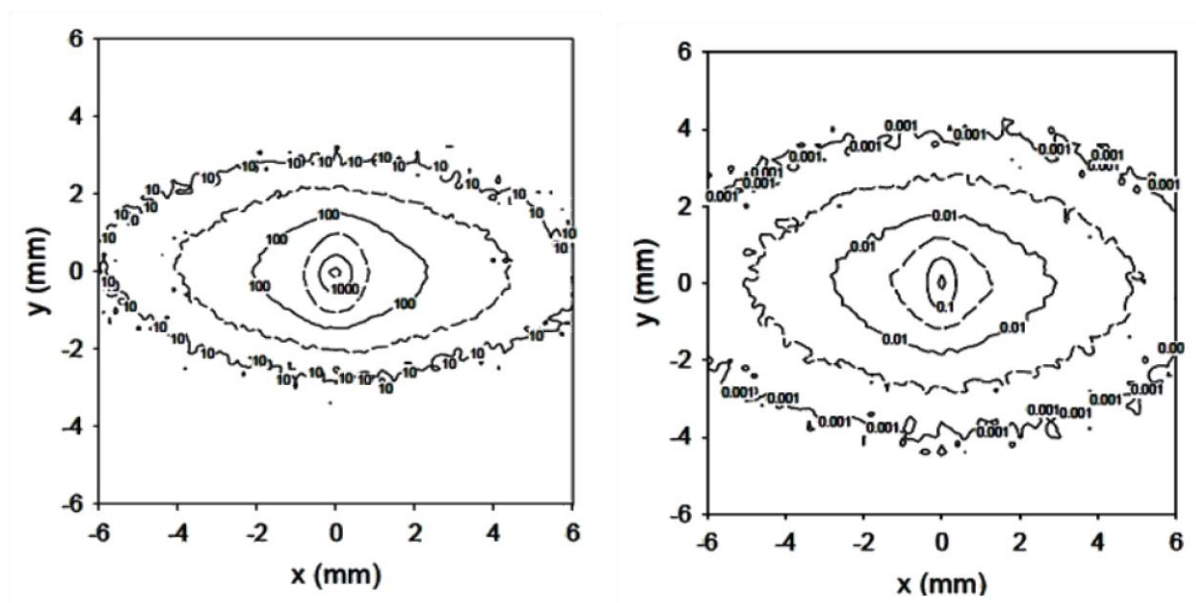


Figure 15 : Comparaison entre les courbes d'iso-intensités lumineuses observées (à gauche) et prévues par le modèle de Kienle (à droite) [53].

Un second modèle a été développé par Kienle [53], considérant les trachéides comme des cylindres infinis possédant des propriétés de diffusion anisotropiques. Entre les différents cylindres sont disposées des sphères isotropiques de faibles diamètres. Deux modèles de propagation de la lumière ont été utilisés : d'une part l'équation de transport des ondes électromagnétiques résolues par un algorithme de Monte-Carlo, et d'autre part la théorie de la diffusion, qui est une approximation de la précédente [53]. Les résultats obtenus par l'algorithme de Monte-Carlo prévoient deux étapes dans l'effet trachéides : la première est la diffusion de l'onde lumineuse dans le plan normal aux cellules, due à l'interaction entre un cylindre et une onde plane. Par la suite, les photons prennent des directions aléatoires grâce aux éléments de diffusion isotropiques. L'anisotropie des

trachéides favorise ensuite la diffusion selon leur axe. Par ailleurs, ce modèle prévoit une tache de diffusion plus large dans le cas du bois humide. Tous ces résultats se retrouvent dans les observations de Kienle (Figure 15).

#### **4.3.2 : Applications courantes**

L'effet trachéides est en général utilisé implicitement dans la détection de nœuds, en projetant sur la face d'un sciage une ligne laser perpendiculaire à celle-ci. Les nœuds possédant une orientation de leurs fibres différente, la lumière sera peu diffusée dans l'axe de la planche, et la ligne laser observée sera donc plus fine. En focalisant une caméra linéaire à quelques millimètres de cette ligne laser, on obtient donc une image de la planche avec un fort contraste entre les nœuds et les zones de bois sain.

La deuxième application la plus courante de ce phénomène est la mesure de l'orientation des fibres, ou plutôt de la projection de l'angle des fibres sur la face du sciage observée, ou à la surface d'un tronc écorcé (Figure 14). Les corrélations entre les valeurs mesurées et réelles sont excellentes [51,54,49].

#### **4.3.3 : Autres applications possibles**

L'orientation de l'ellipse ne permet que d'obtenir la moitié de l'information concernant l'angle des fibres par rapport à la direction de sollicitation. En effet, l'angle de plongée des fibres par rapport à la face observée n'est pas directement observable à partir de la tache de diffusion. Toutefois, il existe un lien entre le facteur de forme de l'ellipse et cet angle de plongée [49].

D'après Seltman [55], cette technique peut également être utilisée pour la détection de singularités de structure cellulaire différente de celle du bois normal. En raison de l'influence de la géométrie des cellules et de leur composition, il serait possible de l'appliquer à la détection du bois de compression, du bois juvénile, à la caractérisation d'attaques fongiques, ou encore à la mesure de densité.

### **4.4 Spectroscopie et fluorescence**

#### **4.4.1 : Spectres d'absorption et d'émission**

La lumière est une onde électromagnétique, au même titre que les ondes radios ou les rayons X, et dont la partie visible correspond à des longueurs d'ondes comprises entre 380 nm (violet) et 780 nm (rouge). La couleur est l'interprétation par l'œil humain du spectre lumineux, c'est-à-dire de la distribution des intensités des radiations en fonction de leurs longueurs d'ondes. Une onde de spectre uniforme sur l'intervalle des longueurs d'ondes visibles est appelée lumière blanche.

Une propriété intéressante de la lumière est sa capacité à échanger de l'énergie avec la matière, sous forme d'émission ou d'absorption. Chaque matériau possède un ensemble spécifique de fréquences qu'il est capable d'émettre ou d'absorber, ainsi que des intensités relatives associées. Celui-ci constitue les spectres d'émission et d'absorption d'un matériau [46]. La couleur d'un objet qui ne produit pas spontanément de la lumière est définie par son spectre de diffusion, qui est lui-même constitué du spectre de la lumière incidente auquel on retire le spectre d'absorption de l'objet.

#### 4.4.2 : Spectroscopie du bois

La différence entre l'acquisition classique d'une image par caméra numérique et la spectroscopie réside dans le nombre de signaux utilisés pour décrire les différents intervalles de longueurs d'ondes. Dans le cas d'une acquisition couleur classique, le nombre de signaux est de 3, de même que pour l'œil humain. Dans le cas d'une acquisition par ultraspectroscopie, ce nombre peut atteindre plusieurs centaines [56].

Cette technique est largement utilisée dans l'industrie pharmaceutique et l'industrie chimique par exemple, grâce à la possibilité d'identification de composés chimiques particuliers. Son utilisation dans la caractérisation du bois suit le même principe et a été appliquée dans de nombreux domaines. On peut citer notamment la caractérisation du bois de compression [57], ou encore l'étude de la composition du bois [58].

Les travaux de Nyström [59] sont ici particulièrement intéressants, car ils permettent une détection en haute résolution et en temps réel du bois de compression. D'autres auteurs parviennent à établir un lien entre le spectre de diffusion et certaines caractéristiques des cellules à l'aide de régressions multilinéaires. On peut ainsi estimer l'angle des microfibrilles [60,61], la longueur des fibres [62], et même les propriétés mécaniques macroscopiques [60,63] avec une précision très intéressante. Cette méthode semble plus prometteuse car elle permet d'estimer de propriétés ayant un impact direct sur les propriétés mécaniques des sciages.

#### 4.4.3 : Cas de la fluorescence

La fluorescence est un cas particulier d'absorption et d'émission lumineuse d'un matériau. Certaines substances sont en effet capables d'absorber des ondes lumineuses de certaines longueurs, et de restituer l'énergie correspondante à des longueurs d'ondes différentes. Si les longueurs d'ondes absorbées et émises se situent respectivement hors du spectre de la lumière visible et à l'intérieur de celui-ci, la fluorescence a pour effet de rendre l'objet plus lumineux. Ce phénomène peut être observé avec de simples surligneurs du commerce.

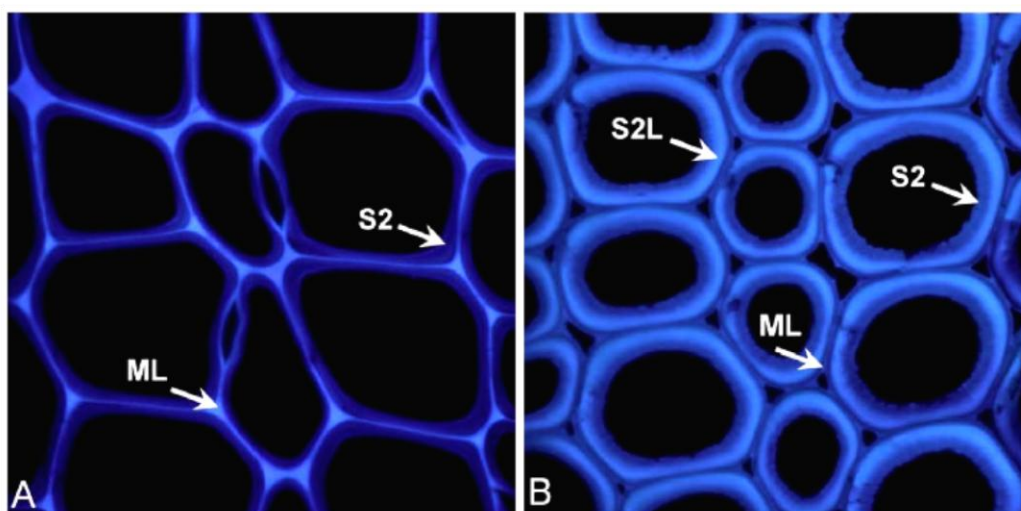


Figure 16 : fluorescence du bois normal (à gauche) et du bois de compression (à droite). On observe une plus forte émission de la paroi S2 du bois de compression, due à une forte concentration en lignine [64]



Un certain nombre de composants du bois possèdent cette propriété, et notamment la lignine [14]. Les couples de longueurs d'ondes absorbées/émises données dans les différentes études varient, car ils varient également selon les essences observées et leurs compositions chimiques [14,65,66]. Néanmoins, certains auteurs utilisent avec succès cette propriété pour détecter le bois juvénile [66] ou encore le bois de compression [64] grâce à leurs concentrations en lignine (Figure 16).

Une autre manière d'exploiter ce phénomène est de mettre en évidence certaines protéines par fixation d'anticorps portant un marqueur fluorescent. Cette procédure appelée immunofluorescence, généralement utilisée dans le domaine médical, a été exploitée par [67] dans la détection du bois de compression. Selon l'auteur, cette technique présente l'avantage d'une grande sensibilité associée à une échelle de résolution allant du nanomètre à plusieurs centimètres.

## **4.5 Transmission des ondes électromagnétiques**

### **4.5.1 : Transmission des rayons X**

La plupart des scanners industriels dédiés au bois disposent d'un émetteur et d'une caméra à rayons X. Ceux-ci permettent de visualiser la projection des variations de densité au sein des sciages, exactement comme lors d'une radiographie médicale : d'après la loi de Beer-Lambert, l'intensité du champ électrique transmis à travers le bois diminue avec l'épaisseur de la pièce et la densité moyenne sur l'épaisseur. Cela permet de mesurer la densité moyenne ou locale des sciages, de détecter les nœuds, les poches de résine ou encore les fentes. Nous reviendrons plus en détails sur ce point dans le chapitre II.

### **4.5.2 : Transmission des micro-ondes**

La première application de la transmission des micro-ondes est semblable à celle des rayons X. Cette technique est courante dans la mesure de la densité d'un sciage, et permet également la détection des nœuds [68]. Cependant, l'utilisation d'un faisceau de micro-ondes polarisé permet d'extraire des informations supplémentaires : il se trouve que la densité, le taux d'humidité et l'angle des fibres peuvent être simultanément mesurés à partir de l'intensité transmise, du décalage de phase, ainsi que de l'angle de dépolarisation [69,70].

## **4.6 Tomographie**

### **4.6.1 : Principe**

La tomographie est un domaine de l'imagerie dédié à l'observation des objets dans leur volume, faisant intervenir la transmission d'ondes électromagnétiques. Quelle que soit la méthode utilisée (rayons X, résonance magnétique nucléaire, etc.), le principe consiste à extraire une série d'images en deux dimensions pour différentes sections de l'objet observé. Chaque image 3D est obtenue par reconstruction à partir de ses projections [71].

Cette technologie est largement répandue dans le domaine médical (scanners et Imagerie à Résonance Magnétique), et est parfois utilisée pour caractériser les grumes avant sciage. Elle est par ailleurs de plus en plus utilisée dans le domaine de la science des matériaux. Dans ce cas, la tomographie s'applique à l'observation de structures microscopiques. On parle alors de microtomographie

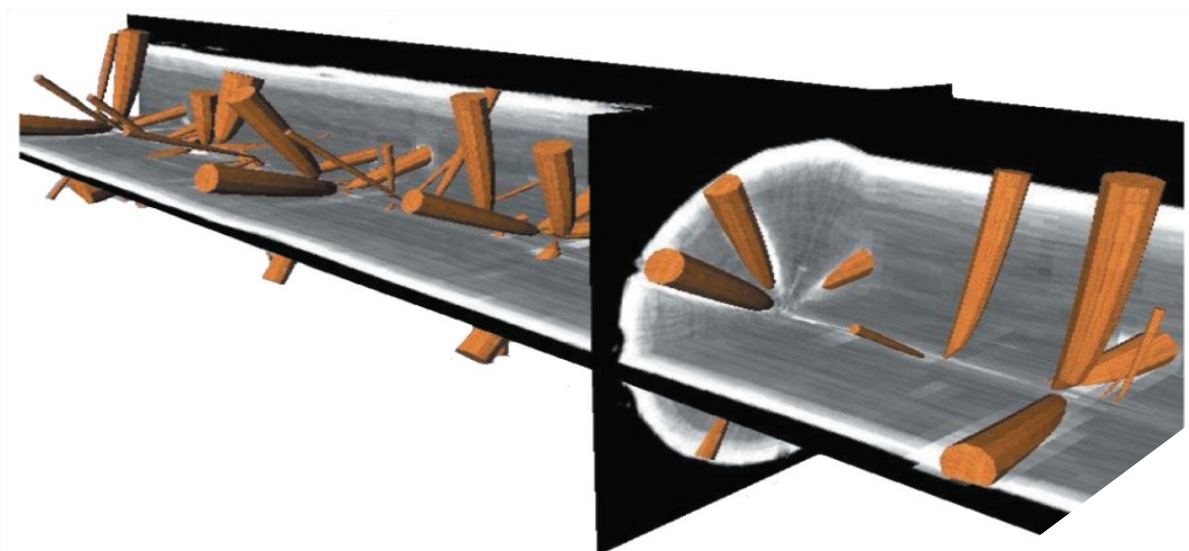


Figure 17 : Modélisation de la distribution des nœuds au sein d'un tronc par analyse tomographique [72]

#### 4.6.2 : Applications et limites

Dans le domaine du bois, la tomographie est principalement utilisée pour l'étude des défauts internes au tronc. Elle a permis d'élaborer des modèles de géométrie des nœuds [18], et permet également une détection automatique volumique des nœuds, fentes et de la moelle [71,18,73]. Il est également possible d'obtenir des informations à plus petite échelle, telle que la déviation hélicoïdale des fibres [74]. Enfin, l'application de la microtomographie permet la mesure volumique des caractéristiques géométriques des fibres et de la structure cellulaire [75,76].

### 4.7 Diffraction des rayons x

#### 4.7.1 : Principe

La technique de diffraction des rayons X est très largement utilisée dans le domaine de la cristallographie des métaux, des céramiques, des polymères, et dans le cas qui nous intéresse, du bois. L'objectif est d'utiliser le phénomène de diffraction du rayon incident pour caractériser la nature et l'orientation de la structure cristalline de l'échantillon.

On distingue deux méthodes d'analyse utilisant la diffraction des rayons X. La première consiste à observer, sur un écran révélateur, le profil de diffraction du rayon incident à travers l'échantillon [77,78]. Dans ce cas, les microfibrilles se comportent comme un réseau de diffraction symétrique par rapport à l'axe des trachéides. Le profil observé se trouve donc lui-même symétrique par rapport à l'axe des fibres, et la forme du profil est définie par l'angle des microfibrilles.

La seconde méthode consiste à mesurer l'intensité du rayon réfléchi par l'échantillon. Lors de l'essai, on fait varier l'angle d'incidence afin de parcourir le demi-espace du côté observé de l'échantillon. Si la différence de chemin optique entre deux rayons réfléchis par deux plans cristallins parallèles et successifs est égale à la longueur d'onde, on observe un pic d'intensité. L'ensemble des pics d'intensité forme le profil de diffraction, et dépend uniquement de la structure cristalline des microfibrilles.



#### **4.7.2 : Applications et limites**

Dans le cas du bois, la diffraction des rayons X permet de mesurer l'orientation des microfibrilles de cellulose [79,80,81,78], ainsi que celle des trachéides [82,77]. Elle permettrait donc de détecter de façon fiable le bois juvénile, le bois de compression ainsi que la pente de fil. Cependant, certains auteurs notent une faible corrélation entre les valeurs moyennes locales obtenues par cette méthode et l'angle des microfibrilles obtenu en microscopie par éclairage polarisé [83,84]. Selon [83], cette différence pourrait s'expliquer par la forte variabilité dans l'angle des microfibrilles présente dans le bois de printemps.

En revanche, son application est pour l'instant limitée à une utilisation en laboratoire. L'analyse de la diffraction par réflexion est réalisée en un point, et prend malgré cela beaucoup de temps. De plus, l'interprétation des données est relativement complexe. Quant à l'analyse de la diffraction en transmission, elle présente l'avantage d'être instantanée et plus facile à interpréter, mais doit être réalisée sur des échantillons de faible épaisseur, de l'ordre de 1 mm. On peut néanmoins citer le système industriel SylviScan produit par le laboratoire australien CSIRO, qui utilise la technique de diffraction des rayons X par transmission afin d'évaluer la qualité de petits échantillons de bois.

### **4.8 Microscopie par éclairage polarisé**

#### **4.8.1 : Principe**

D'après les équations de Maxwell, la direction de propagation d'une onde lumineuse et les directions respectives de son champ électrique et magnétique forment un trièdre direct. La polarisation de la lumière se définit comme la projection, sur un plan normal à la direction de propagation, du vecteur représentant son champ électrique (ou magnétique). Celle-ci peut être rectiligne, circulaire, elliptique ou aléatoire.

Certains matériaux possèdent des propriétés de biréfringence, c'est-à-dire que leur indice de réfraction dépend à la fois de la longueur d'onde de la lumière incidente, mais également de sa polarisation. C'est le cas de cristaux liquides des écrans LCD, et également des parois des trachéides [85].

#### **4.8.2 : Applications et limites**

L'observation de fibres en microscopie par éclairage polarisé a été utilisée afin de mesurer l'angle des microfibrilles. Elle consiste à mesurer l'intensité lumineuse transmise en fonction de l'angle de polarisation de la lumière incidente [83]. Cette technique a cependant été utilisée uniquement dans l'observation de fibres isolées, et non sur des échantillons de bois de taille macroscopique.

Cave [85] utilise la polarisation de manière différente, appelée ellipsométrie. Celle-ci consiste à mesurer la variation de polarisation de la lumière après réflexion ou transmission par l'échantillon. D'après cet auteur, elle permet d'effectuer une mesure en temps réel de l'angle des microfibrilles, sans préparation particulière des fibres.

## 5. Technologies de vision artificielle

Les technologies de vision artificielle sont généralement utilisées dans le but d'automatiser les étapes de contrôle visuel d'ordinaire effectuées par des êtres humains. Elles sont de plus en plus populaires au sein de l'industrie, et notamment celle du bois pour la caractérisation des défauts des sciages.

L'objectif de cette partie est de présenter une introduction au domaine de la vision artificielle, permettant d'appréhender la suite de cette étude. Ce domaine est bien trop vaste pour être exploré ici de façon exhaustive. C'est pourquoi seront présentées ci-dessous les principales problématiques rencontrées au cours de l'acquisition et de l'analyse des images, ainsi que certaines des solutions techniques les plus courantes.

### 5.1 Acquisition des images

#### 5.1.1 : Capture de l'image

Une image peut être définie comme une représentation d'un ou plusieurs objets, obtenue par le biais d'un système optique. Dans le cas qui nous intéresse, ce système optique est constitué d'une caméra numérique, qui effectue une transformation du signal électromagnétique reçu en un signal électrique codé sous forme numérique.

Le cœur d'une caméra numérique est constitué de son capteur. Il en existe plusieurs technologies, dont les plus connues sont le Charge-Coupled Device (CCD) et le Complementary Metal-Oxyde Semiconductor (CMOS). Tous fonctionnent selon le même principe : ils sont constitués d'un ensemble de photodiodes organisées soit en rectangle dans le cas des caméras matricielles, soit sous forme d'une unique ligne dans le cas des caméras linéaires. Au cours de l'acquisition, chacune de ces cellules reçoit des photons en provenance d'une région de l'espace bien définie. Par effet photoélectrique, ces photons créent une tension électrique aux bornes des différentes photodiodes. La tension électrique accumulée au cours du temps d'acquisition est donc fonction du nombre de photons reçus par la diode sur cette même période. Une fois le temps d'acquisition écoulé, on mesure simultanément la tension électrique aux bornes de chaque diode. Une image numérique résulte donc d'une première discrétisation spatiale du signal en éléments appelés pixels. Le nombre de pixels par image définit ce qu'on appelle couramment sa résolution.

La seconde étape de l'acquisition consiste à coder le signal électrique analogique émis par chaque photodiode en un nombre entier compris entre 0 et  $2^n-1$ . Il y a donc ici un second échantillonnage en intensité. La valeur de  $n$  définit la profondeur de l'image. Pour  $n=1$ , l'image est dite binaire, uniquement composée de noir et de blanc. En général, chaque pixel est défini sur 1 octet ( $n=8$ ), ce qui donne 256 niveaux de gris. Il est cependant possible de prendre une valeur de  $n$  encore supérieure.

Jusqu'à présent, nous avons considéré que les pixels ne contenaient qu'une information de niveau de gris. La plupart des caméras grand-public et certaines caméras industrielles sont cependant capables de fournir des images couleur. Dans le cas des matrices de Bayer, par exemple, chaque pixel ne contient pas l'information d'une seule photodiode, mais de quatre : une photodiode est ainsi dédiée au rouge, une autre au bleu, et enfin les deux dernières captent l'intensité de vert. Le fait d'avoir deux photodiodes dédiées au vert est destiné à se imiter la sensibilité de l'œil humain.

D'un point de vue technologique, les caméras matricielles sont utilisées de préférence pour photographier des objets statiques. Toutes les applications destinées au grand-public utilisent cette technologie (appareils photos, webcams, caméscopes). Les caméras linéaires en revanche sont très utilisées dans l'industrie, car elles sont adaptées pour photographier des objets en translation rectiligne et uniforme, comme sur un convoyeur. On peut également les utiliser dans les cas où l'acquisition d'une seule ligne est nécessaire. C'est typiquement le cas pour la lecture de codes barre.

### 5.1.2 : L'éclairage et la scène

La mise au point de l'éclairage et de la scène est une étape critique lors de la conception d'un système de vision artificielle. L'ensemble des algorithmes de prétraitement et d'analyse des images ne peuvent être efficaces que si l'information que l'on cherche à obtenir est contenue dans l'image, et de préférence de manière la plus contrastée possible. La solution technique la plus adaptée dépendra de la nature de l'objet à observer, ainsi que du ou des paramètres de l'objet que l'on souhaite mesurer.

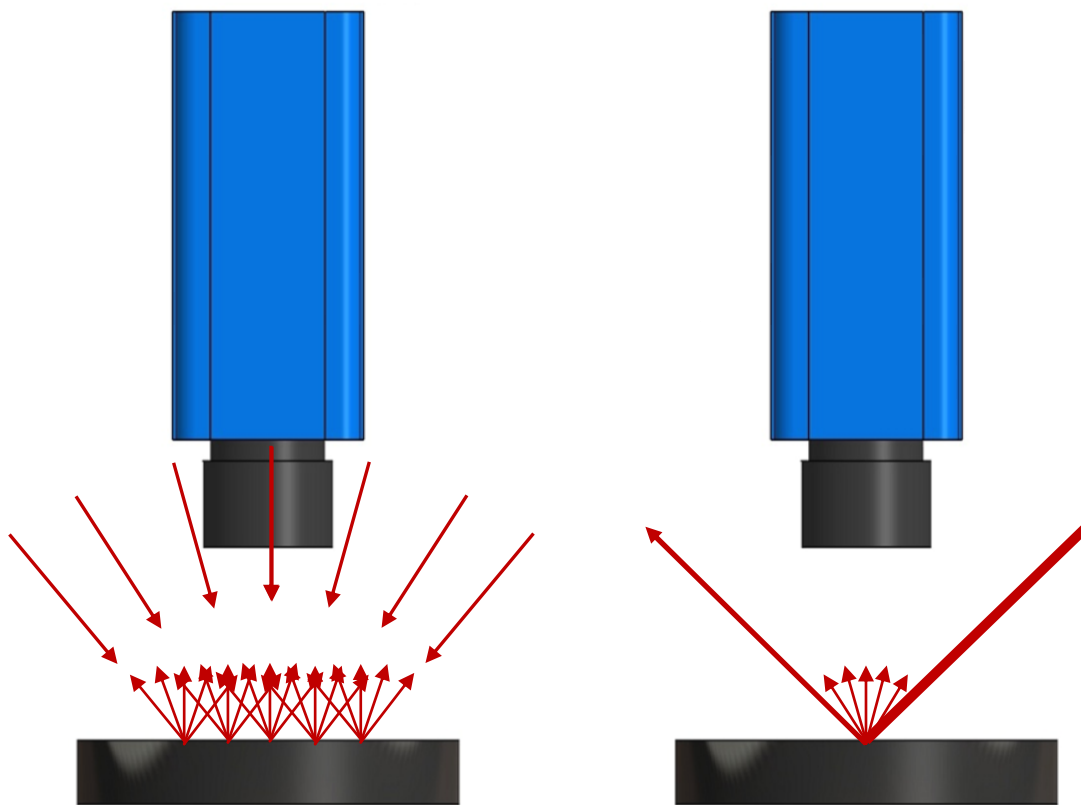


Figure 18 : Influence de l'éclairage sur la caractérisation de l'état de surface. Gauche : éclairage isotrope. Droite : éclairage unidirectionnel.

Considérons l'exemple simple suivant (Figure 18) : on cherche à mesurer qualitativement l'état de surface d'une pièce mécanique en acier, et dont la surface est polie. Le matériau de l'objet étant métallique, l'intensité de la lumière diffusée croît avec la rugosité de sa surface. Dans le cas d'un éclairage isotrope, les variations de rugosité ne seraient pas perceptibles : la lumière diffusée et réfléchiée par l'objet serait également isotrope. Une des nombreuses solutions consisterait à éclairer l'objet selon une direction

préférentielle, puis à mesurer l'intensité de la lumière diffusée selon une direction différente de celle du rayon réfléchi.

Il est également possible, en fonction des applications, d'utiliser un éclairage d'une couleur particulière, de mesurer l'ombre projetée d'un objet, ou même d'utiliser un éclairage polarisé. La détection des nœuds des sciages par effet trachéides est une autre illustration d'un choix judicieux d'éclairage, utilisant les propriétés du matériau bois.

La recherche d'un système éclairage/capteur optimal est donc une problématique récurrente lors de la conception d'un système de vision artificielle. Une autre problématique est de rendre constante l'intensité et la distribution spatiale de cet éclairage, afin de ne pas fausser les mesures. C'est pourquoi l'acquisition des images est généralement réalisée dans une chambre fermée. C'est également la raison pour laquelle l'éclairage naturel est très rarement utilisé.

## **5.2 Prétraitement des images**

### **5.2.1 : Objectif**

Le prétraitement des images peut être utilisé pour satisfaire deux objectifs. Dans le premier cas, il permet d'améliorer leurs qualités visuelles, notamment en réduisant le bruit issu de l'acquisition. Dans le cas de la vision artificielle qui nous intéresse, cette étape permet de mettre en valeur les parties des images que l'on souhaite analyser. Elle se distingue des étapes ultérieures d'analyse par une modification des valeurs des pixels de l'image.

### **5.2.2 : Réduction du bruit**

En traitement du signal unidimensionnel ou bidimensionnel, on appelle bruit un signal parasite venant se superposer au signal utile que l'on souhaite mesurer. Ce bruit peut être d'origine externe ou interne au système générant le signal. Dans le cas de l'acquisition d'images, il se traduit généralement par l'apparition de valeurs aberrantes sur des pixels aléatoires.

Le bruit étant a priori inconnu, il est impossible de le soustraire directement au signal résultant. Dans certains cas, en particulier s'il est gaussien, il peut dans certains cas être caractérisé par une ou plusieurs fréquences particulières. Une solution consiste alors à annuler ces fréquences dans la transformée de Fourier du signal initial, puis à reconstruire l'image par transformée inverse [86]. Cette technique, dite linéaire, est très utilisée dans le cas des signaux unidimensionnels, mais présente des inconvénients dans le cas des images : elle nécessite un temps de calcul important, et n'est pas adaptée au filtrage des bruits impulsifs, c'est-à-dire qui ne dépendent pas des valeurs initiales des pixels, ni des bruits blancs non constitués d'une ou plusieurs fréquences particulières.

La technique de filtrage la plus utilisée consiste à modifier la valeur de chaque pixel en fonction de ses pixels adjacents. Elle présente l'avantage d'être facilement automatisable, et il existe plusieurs méthodes permettant de réaliser ce type de filtrage. Une des plus simples et des plus couramment utilisées est le filtre médian (Figure 19). Elle consiste à remplacer la valeur d'un pixel par la valeur médiane des pixels de son voisinage, défini par un carré centré autour du pixel que l'on cherche à modifier. La dimension du carré est généralement prise à 3 ou 5 pixels.



**Figure 19 : Filtres de réduction du bruit. Gauche : image d'origine, 15% de bruit impulsionnel. Centre : image avec filtre médian 3x3. Droite : image avec filtre de Nagao.**

Une autre technique de filtrage non-linéaire est le filtre de Nagao (Figure 19). Il définit 9 sous-ensembles différents du voisinage 5x5 autour du pixel observé. Pour chaque sous-ensemble, on calcule la valeur moyenne et la variance des pixels. La valeur du pixel observé sera remplacée par la valeur moyenne du sous-ensemble présentant la plus faible variance. Ce filtre présente l'avantage, grâce à la définition des sous-ensembles, de respecter l'anisotropie locale de l'image. En contrepartie, elle nécessite un temps de calcul bien plus grand que le filtre médian.

### 5.2.3 : Détection des contours

Les contours des objets contenus dans une image sont généralement définis à partir d'une variation brusque des valeurs des pixels. Par conséquent, il est possible de localiser les contours aux points où le gradient est localement maximal, ou bien aux points où le laplacien s'annule.



**Figure 20 : Filtres de détection des contours. Gauche : image d'origine. Centre : Détection des contours avec filtre de Sobel. Droite : Détection des contours avec filtre de Canny.**

Une des méthodes de détection des contours les plus courantes fait intervenir le filtre de Sobel pour le calcul du gradient en chaque point de l'image [86]. Celui-ci possède un fonctionnement semblable aux filtres non linéaires de réduction du bruit : la valeur de chaque pixel observé est remplacée par une combinaison linéaire des valeurs des pixels du voisinage. Les coefficients du filtre de Sobel sont définis à partir des masques de la Figure 21. Le premier détermine le gradient horizontal, qui permet de détecter les contours verticaux.

Le second, à l'inverse, permet de détecter les contours horizontaux. Ces deux masques définissent les coordonnées du vecteur gradient en chaque pixel de l'image, et permettent de calculer sa norme ainsi que son orientation. Les contours ainsi obtenus sont en général seuillés à une valeur appropriée afin d'obtenir une image binaire.

Un autre filtre de détection des contours très utilisé est le filtre de Canny [87]. Celui-ci, dans sa forme originale, fonctionne de la manière suivante : On applique à l'image un filtrage gaussien destiné à réduire le bruit, qui pourrait faire apparaître des contours fictifs. Pour chaque pixel de l'image obtenue, on calcule les gradients horizontaux et verticaux de manière similaire au filtre de Sobel, mais en considérant les masques  $[-1][0][1]$  et  $^T[1][0][-1]$ . On obtient alors un champ de valeurs de gradients et de direction des contours que l'on arrondit à  $45^\circ$  près ( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  ou  $135^\circ$ ). L'étape finale consiste à éliminer les points qui ne sont pas des extremums locaux. Par exemple, si la direction du contour en un point est horizontale, le point n'est défini comme appartenant à un contour que si sa valeur est supérieure aux pixels voisins situés au-dessus et en-dessous. L'image obtenue est une image binaire présentant des contours d'une épaisseur de 1 pixel.

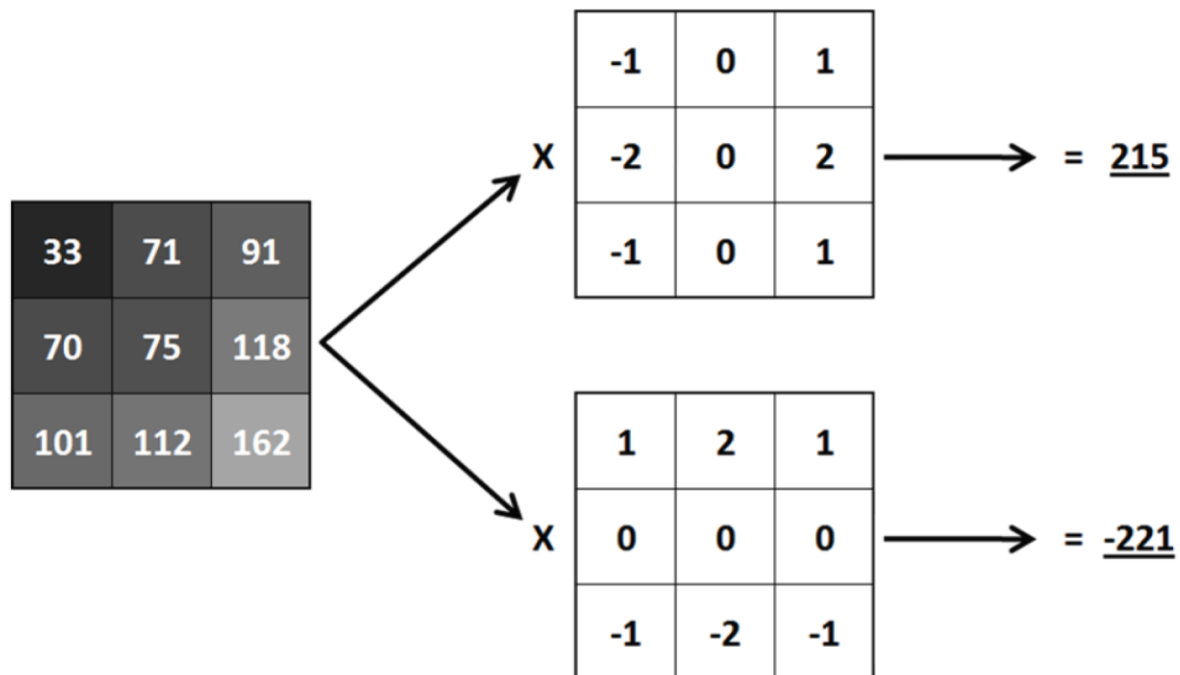


Figure 21 : Calcul du gradient horizontal et vertical à l'aide du filtre de Sobel.

### 5.2.4 : Opérations morphologiques

Les opérations morphologiques s'appliquent le plus souvent à des images binaires, afin par exemple de fermer les contours obtenus précédemment. On distingue deux opérations élémentaires que sont la dilatation et l'érosion [86]. Le principe est relativement simple : on définit un masque binaire arbitraire dont on définit également le centre. La dilatation de l'image consiste à centrer le masque sur chaque pixel de l'image. S'il existe au moins un pixel de valeur 1 recouvert par le masque, le pixel au centre du masque est mis égal à 1. L'érosion est l'inverse de la dilatation : s'il existe au moins un pixel de valeur 0 recouvert par le masque, le pixel au centre du masque est mis égal à 0.

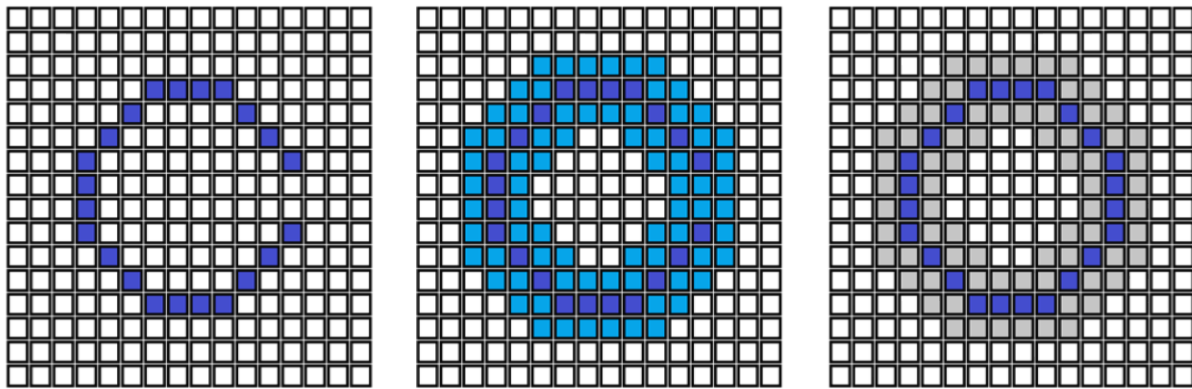


Figure 22 : Opération de fermeture à l'aide d'un masque de 3x3 pixels. Gauche : contour avant fermeture. Centre : contour après dilatation. Droite : contour après érosion.

Les opérations de dilatation et d'érosion sont généralement combinées. Une dilatation suivie d'une érosion est appelée une fermeture, car elle permet, entre autres, de refermer les contours. A l'inverse, une érosion suivie d'une dilatation est appelée une ouverture [86].

## 5.3 Segmentation de l'image

### 5.3.1 : Objectif

Nous avons vu dans le paragraphe précédent (p. 52) des méthodes permettant de détecter les contours des objets à partir d'une variation de luminance, que l'on peut qualifier de segmentation par contours [87]. La segmentation d'une image par régions est destinée à localiser l'ensemble des pixels occupés par les objets contenus dans l'image. Pour ce faire, l'image de départ est divisée en plusieurs sous-images, de manière à satisfaire les conditions suivantes [87] :

- La réunion de l'ensemble des régions est l'image d'origine
- L'intersection de deux régions distinctes est vide.
- Chaque région respecte un ou plusieurs critères d'homogénéité

La principale difficulté réside dans le choix des critères d'homogénéité, sensés caractériser les différents objets de manière univoque. Ces critères peuvent être liés à la luminance des pixels ou à leurs couleurs, à la texture d'un ensemble de pixels (voir paragraphe « Analyse de texture », p. 59), ou bien à une combinaison des deux. Une fois le ou les critères définis, la segmentation peut être réalisée par les méthodes présentées ci-dessous.

### 5.3.2 : Segmentation par seuillage

La méthode de segmentation par seuillage est à la fois la plus intuitive et la plus simple à mettre en œuvre. Elle consiste à définir les limites de luminance ou de couleur pour les différents objets observés [87]. Chaque pixel de l'image peut donc être classé dans un de ces intervalles et identifié comme appartenant à un objet particulier. On note alors que les étapes de segmentation et de classification (voir paragraphe « Classification des segments », p. 56) sont ici simultanées.

Cependant, cette méthode ne peut s'appliquer que dans un nombre limité de cas : soit on a une connaissance a priori des objets observés, soit le critère de luminance ou de couleur est suffisamment performant pour que les frontières entre les intervalles puissent être établies à partir de l'histogramme de l'image.

### **5.3.3 : Méthode de croissance par régions**

Le principe de fonctionnement de cette méthode est le suivant : au cours de la phase d'initialisation, on choisit un certain nombre de pixels, les seeds, comme origine des futures régions. Le choix de ces seeds peut être aléatoire, défini à partir d'une connaissance a priori des positions des objets, ou encore à partir des pics de l'histogramme de l'image.

Durant la phase séquentielle, chaque pixel voisin d'une région déjà définie est soumis à un test d'homogénéité. Si l'ajout de ce pixel à la région n'invalide pas son critère d'homogénéité, il est considéré comme appartenant à cette région. Sinon, il est considéré comme origine d'une nouvelle région. Cette opération est répétée jusqu'à ce que tous les pixels appartiennent à un segment [87].

La phase finale consiste à comparer chaque région avec ses voisines. Si l'union de deux régions respecte toujours le critère d'homogénéité, elles sont fusionnées. Cette opération est répétée jusqu'à ce qu'aucune fusion ne soit plus possible.

Cette méthode présente l'avantage d'être simple dans son fonctionnement et facile à implémenter. Cependant, elle requiert un temps de calcul et une quantité de mémoire importants et dépendant du choix des seeds. C'est pourquoi elle est généralement utilisée comme composante de la méthode split and merge (voir ci-dessous).

### **5.3.4 : Méthode split & merge**

La méthode de segmentation par split and merge permet d'apporter une solution au problème posé par l'initialisation de la méthode de croissance par régions. La première phase de cet algorithme consiste à tester le critère d'homogénéité sur l'image complète. Normalement, il ne devrait pas être respecté, c'est pourquoi on divise l'image de départ en quatre quadrants (split). Puis on teste à nouveau ce critère sur chacun des quadrants séparément : si le critère est respecté, il s'agit d'une région. Sinon, on divise ce quadrant en quatre sous-quadrants, et ainsi de suite. Cette opération est répétée tant qu'il existe des divisions de l'image qui ne satisfont pas le critère d'homogénéité [87].

Une fois la phase de split terminée, on peut regrouper les différentes régions obtenues grâce à la méthode de croissance par régions (merge). Une fois encore, le temps de calcul nécessaire à cette opération est important. Par ailleurs, le temps de calcul lors de la phase de split dépend fortement de l'image elle-même.

### **5.3.5 : Méthode des bâtonnets**

Cette méthode est semblable à celle de la croissance par régions, mais permet essentiellement d'économiser du temps de calcul en séparant les phases de segmentation sur les deux axes de l'image. Lors de la première phase de cet algorithme, on parcourt successivement les colonnes de l'image de façon à les segmenter indépendamment les unes des autres. On obtient donc des régions de 1 pixel de largeur que l'on appelle bâtonnets (Figure 23).



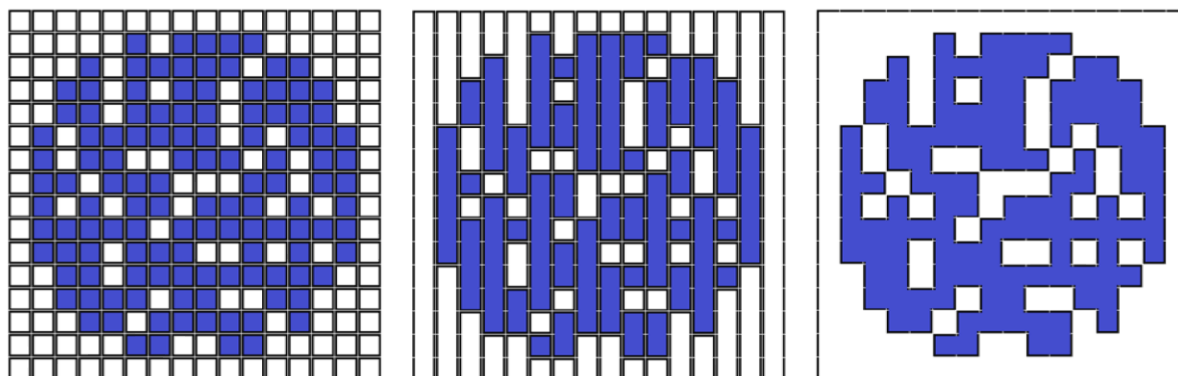


Figure 23 : Méthode de segmentation par bâtonnets. Gauche : image originale. Centre : construction des bâtonnets. Droite : regroupement des bâtonnets adjacents.

La seconde phase s'apparente à nouveau à une croissance par régions : on effectue un test d'homogénéité sur tous les bâtonnets adjacents afin de les regrouper pour créer les segments.

## 5.4 Classification des segments

### 5.4.1 : Principe

L'objectif de la classification des segments est d'identifier les objets matériels dont ils sont l'image, permettant par exemple de prendre une décision concernant ces objets, ou d'alimenter une base de données. Pour ce faire, il est nécessaire d'extraire du segment des informations quantitatives et pertinentes. En fonction des applications, on peut relever les dimensions de la région, sa position, sa couleur, sa texture, etc. Ces informations éventuellement hétérogènes sont alors combinées de façon à être représentées par un vecteur caractéristique du segment. Notons ici qu'un segment peut être constitué d'un seul pixel, ce qui rend l'étape de segmentation facultative bien qu'indispensable dans la plupart des cas.

Le problème de classification d'un segment se ramène donc à la classification d'un vecteur. Il est nécessaire pour cela de fournir au système de vision des vecteurs de référence : c'est l'étape d'apprentissage. On distingue ici les méthodes d'apprentissage supervisé des méthodes d'apprentissage non-supervisé. Pour les premières, l'utilisateur doit disposer d'une collection d'échantillons dont la classe est connue. Pour les secondes, l'utilisateur peut ne pas connaître a priori les classes des échantillons. L'algorithme d'apprentissage permet en effet de regrouper les vecteurs similaires dans des classes définies au préalable, lesquelles seront identifiées par la suite.

### 5.4.2 : Réseaux de neurones formels

Le principe des réseaux de neurones au sens large s'inspire d'observations concernant l'anatomie du cerveau et de son mode de fonctionnement. En particulier, celui-ci diffère des ordinateurs par sa capacité à traiter une grande quantité d'informations en parallèle grâce au réseau complexe de cellules qui le composent, appelées neurones. Il existe une centaine de milliards de neurones dans un cerveau humain, et chacun d'entre eux serait en moyenne connecté à dix mille autres. De manière simplifiée, un neurone est composé de trois parties :

- Les dendrites forment un système de ramifications autour du corps cellulaire. Elles constituent les canaux d'entrée des informations en provenance d'autres neurones.
- Le corps cellulaire contient le noyau de la cellule. Il génère l'influx nerveux de sortie en fonction de l'information transmise par les dendrites.
- L'axone est une longue fibre nerveuse en provenance du noyau et qui transmet le signal en provenance du corps cellulaire à d'autres neurones à travers ses terminaisons synaptiques, chacune d'entre elles le pondérant par un poids synaptique.

Un grand nombre d'expériences tendent à montrer que le cerveau est de nature plastique : il évolue tout au long de la vie d'un individu, forme des zones spécialisées dans certaines activités, ou en d'autres termes s'adapte en fonction des sollicitations. Le processus d'apprentissage sous-jacent est expliqué par Hebb en 1949. Celui-ci est fondé sur l'hypothèse d'un mécanisme de couplage synaptique. La pondération synaptique entre l'axone d'un neurone A et les dendrites d'un autre neurone B est fonction de la fréquence d'activation de A provoquant une activation de B [88].

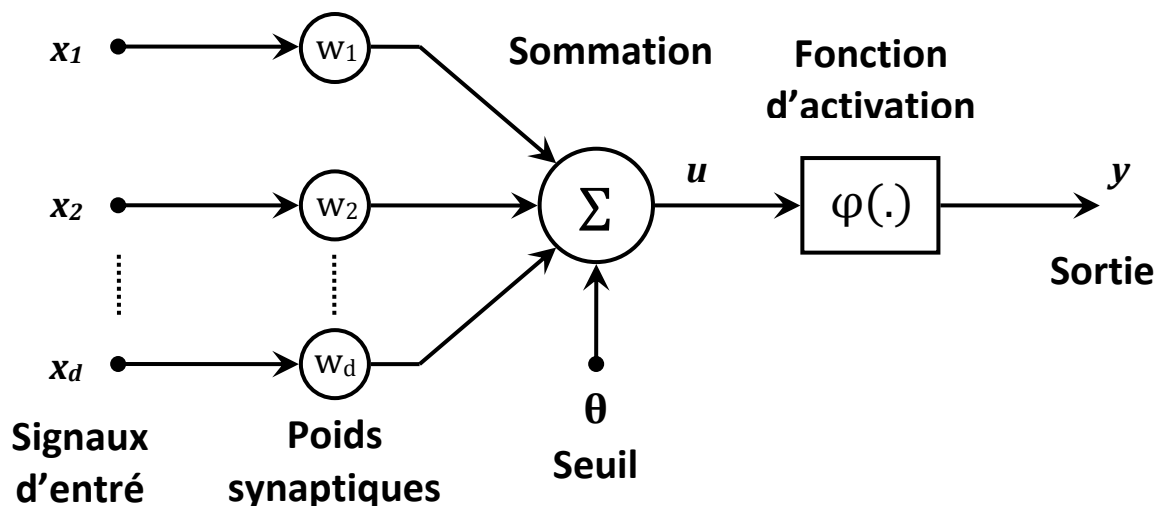


Figure 24 : Schématisation du neurone formel [89].

La première modélisation mathématique d'un neurone organique a été réalisée en 1943 par McCulloch et Pitts, définissant ce que l'on appelle un neurone formel [88]. Celui-ci est décrit comme un automate booléen dont l'état de sortie résulte d'une combinaison linéaire des valeurs pondérées des entrées (Figure 24). Rosenblatt propose à son tour le modèle du perceptron, basé sur un réseau composé de perceptrons.

Nous n'entrerons pas plus en détail sur la description du modèle du perceptron. Des informations plus complètes sur cette technologie pourront être trouvées dans l'ouvrage de Davalo [88]. Dans le cas de la classification de segments qui nous intéresse ici, les modèles de réseaux de neurones formels ont fait l'objet de nombreuses investigations. On peut citer les travaux de Gosselin [89] portant sur la reconnaissance de caractères manuscrits, ou encore de Schmoldt [90].

Lors de la classification, les composantes du vecteur caractéristique d'un segment constituent les signaux d'entrée du réseau. La classe du segment est alors donnée par la valeur de la sortie en fonction des seuils d'activation et des poids synaptiques. La phase

d'apprentissage supervisé du réseau consiste donc à déterminer la valeur appropriée des poids synaptiques en utilisant l'algorithme de rétropropagation du gradient. Ces valeurs sont d'abord initialisées de manière aléatoire, et la fonction d'activation de chaque neurone est remplacée par une fonction sigmoïde dérivable. Puis on classe une série d'échantillons dont les classes réelles sont connues. Pour chaque échantillon, on quantifie l'erreur résultant d'un mauvais classement, et on corrige les poids synaptiques en fonction de leur contribution à cette erreur grâce à des fonctions connues [88].

### 5.4.3 : Self-Organizing Maps

Les Self-Organized Maps (ou SOMs) sont une forme de réseaux de neurones inventée par Kohonen en 1990, et font partie des méthodes d'apprentissage non-supervisées. Il est utile de préciser ici qu'elles n'utilisent pas le modèle du neurone formel décrit précédemment. Leur principal intérêt réside dans l'organisation automatique des vecteurs de référence en fonction de leurs distances les uns par rapport aux autres, permettant de leur attribuer une classe plus facilement. En revanche, il ne s'agit pas d'un outil de classification, bien qu'une partie de l'algorithme d'apprentissage corresponde à une classification par méthode des K plus proches voisins. Notons également que cette méthode n'a d'intérêt que si les classes des vecteurs de référence sont a priori inconnues.

Une SOM, est composée de plusieurs cellules, dont le nombre est défini par l'utilisateur. Chaque cellule possède donc une position définitive sur la carte, et contient un vecteur de dimension appropriée. La première étape est l'initialisation de chacun de ces vecteurs. Celle-ci peut être optimisée en fonction de la collection d'apprentissage (gradient des composantes principales), mais peut parfaitement être aléatoire. La principale différence réside dans le nombre d'itérations nécessaires à l'apprentissage.

Une fois les cellules initialisées commence la phase d'apprentissage. Chaque vecteur de référence est alors comparé aux vecteurs contenus dans chaque cellule. La cellule possédant le vecteur le plus proche de l'échantillon est désignée comme la gagnante. A ce titre, cette cellule ainsi que les cellules géographiquement voisines sont récompensées de la manière suivante : leurs vecteurs caractéristiques sont modifiés de manière à se rapprocher de l'échantillon. L'amplitude de cette modification décroît avec la distance entre la cellule considérée et la cellule gagnante, ainsi qu'avec le nombre d'itérations déjà effectuées [91].



Figure 25 : Utilisation d'une SOM pour classer des imagerie prises au hasard sur des images de pin scandinave (*pinus silverstris*). Le vecteur contenu dans chaque cellule est le vecteur couleur de l'imagerie correspondante. Gauche : carte après initialisation. Droite : carte après apprentissage.

La phase finale de l'apprentissage consiste à définir sur la carte les limites géographiques des différentes classes. On obtient donc en sortie une collection de vecteurs de référence (les vecteurs contenus dans les cellules) qui peuvent alors être utilisés lors de la classification de segments. Silvén, et Kaupinnen [92,93] proposent une méthode de contrôle d'aspect automatique du bois faisant intervenir les SOMs à deux niveaux : détection des défauts à partir du vecteur couleur des imagerie (idem Figure 25), puis classification des segments issus des imagerie de défauts adjacentes.

#### **5.4.4 : K plus proches voisins**

La méthode des K plus proches voisins (ou K Nearest Neighbours) est une technique de classification à la fois simple dans son fonctionnement et très facile à implémenter. Elle est d'ailleurs implicitement utilisée lors de l'apprentissage des SOMs.

On suppose que l'on dispose d'une collection de N vecteurs de référence dont la classe est connue, et on cherche à définir la classe d'un nouveau vecteur. L'algorithme fonctionne de la manière suivante : on calcule successivement la distance entre le nouveau vecteur et chacun des vecteurs de référence. De cette manière, on détermine les classes respectives des K vecteurs de référence les plus proches du nouveau vecteur. La classe affectée au nouveau vecteur sera alors la classe la plus représentée parmi les K plus proches voisins [94].

#### **5.4.5 : Support Vector Machine**

Les SVMs sont une méthode de classification récente, introduite par Vapnik en 1995. Elles fonctionnent de manière binaire, mais leur fonctionnement peut être étendu à un plus grand nombre de classes. L'apprentissage est réalisé de manière supervisée, et permet de définir les frontières entre les domaines des différentes classes considérées.

Leur fonctionnement repose sur la transformation d'un problème de discrimination potentiellement non-linéaire de vecteurs de dimension N en un problème linéaire de dimension supérieure, éventuellement infinie. Cette transformation est réalisée à partir d'une fonction non-linéaire appliquée aux vecteurs d'entrée vers l'espace dit de redescription, qui doit être de type Hilbertien (muni d'un produit scalaire). En réalité, la solution du problème ne dépend que du produit scalaire dans l'espace de redescription. C'est pourquoi on préfère utiliser directement la fonction qui, à deux vecteurs de l'espace initial, associe leur produit scalaire dans l'espace de redescription. Cette fonction est appelée la fonction noyau [95]. Il existe plusieurs fonctions noyaux connues et couramment utilisées.

Une fois que l'on aboutit à un problème linéaire dans l'espace de redescription, il existe une famille d'hyperplans permettant la séparation entre les différentes classes. Parmi cette famille, la méthode SVM permet de choisir celui qui maximise la marge entre les deux domaines, c'est-à-dire la distance minimale entre l'hyperplan et les vecteurs de référence de part et d'autre. Ces vecteurs sont appelés vecteurs de support.

Cette méthode a montré de bonnes performances dans le domaine du traitement d'images [95]. La mise en place d'un tel algorithme ne pose pas de difficultés particulières, et il existe des bibliothèques permettant l'implémentation de cette méthode dans différents langages de programmation. En revanche, le choix optimal de la fonction noyau et de ses

paramètres est une étape coûteuse en temps et en ressources, car il n'existe aucune méthode à ce jour permettant de les définir sûrement et de manière déterministe.

## 5.5 Analyse de texture

### 5.5.1 : Objectif

Les méthodes de segmentation et de classification que nous avons vu dans les paragraphes précédents utilisent des vecteurs issus de l'image et permettant de distinguer les objets que l'on souhaite détecter. Dans la plupart des cas, l'étape de segmentation se réfère à la couleur des pixels ou à l'histogramme d'une imagerie. De même, la classification des segments s'opère généralement à partir de leur histogramme ou de certaines caractéristiques géométriques.

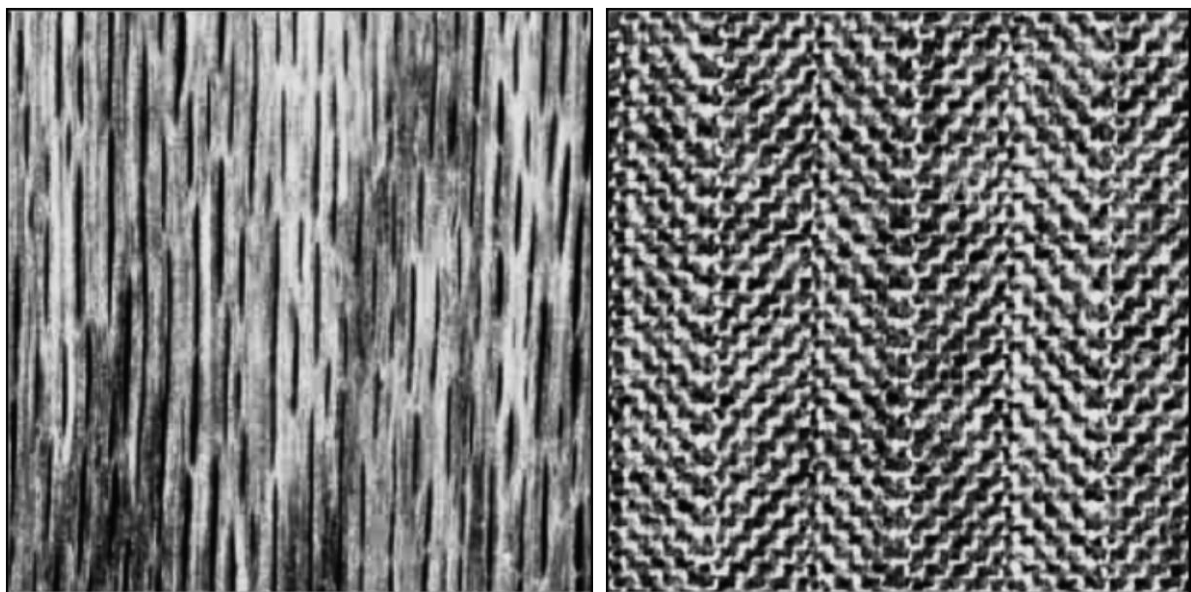


Figure 26 : Illustration de la notion de texture. Les deux images possèdent des histogrammes très proches. Seules leurs textures permettent de les distinguer. D'après Sanchez-Yañez [96].

L'exemple ci-dessus montre qu'il existe des cas pour lesquels la segmentation ou la classification à partir des seuls histogrammes est impossible. L'utilisation d'un descripteur de texture peut alors permettre de décrire l'image de manière plus appropriée. La notion de texture, si elle est relativement intuitive, est difficile à définir précisément. D'une manière générale, elle permet de décrire l'arrangement des pixels les uns par rapport aux autres. Poudiougou [97] propose la définition suivante : « [...] une disposition aléatoire que l'on pourrait considérer (avec une certaine approximation) comme visuellement homogène ».

Une particularité de l'analyse de texture est qu'elle ne permet pas de caractériser un pixel isolé, mais un ensemble de pixels formant une imagerie. On constate qu'il y a ici un compromis à réaliser : une imagerie de grande dimension augmente la probabilité que le vecteur de texture mesuré soit représentatif, mais diminue la résolution spatiale lors de la segmentation et de la classification. De même, si la texture est utilisée dans la classification de segments, il est nécessaire de normaliser le vecteur afin de le rendre indépendant des dimensions du segment.

### 5.5.2 : Matrices de co-occurrences

Les matrices de co-occurrences ont été introduites par Haralick [98]. Leur ancienneté a permis de prouver leur efficacité dans de nombreux domaines, ce qui les a rendues très populaires.

Elles sont constituées d'une matrice de dimension  $N^2$ ,  $N$  étant le nombre de niveaux de gris de l'image à traiter. Généralement, les images sont réduites afin d'obtenir une valeur de  $N$  comprise entre  $2^2$  et  $2^5$ . Elles sont également définies à partir d'un vecteur de déplacement  $\underline{V}$ . La construction d'une matrice  $M$  revient à mesurer le nombre d'occurrences, ou éventuellement la probabilité qu'un pixel de niveau  $i$  corresponde à un pixel de niveau  $j$  par une translation de  $V$  (voir exemple de la Figure 27).

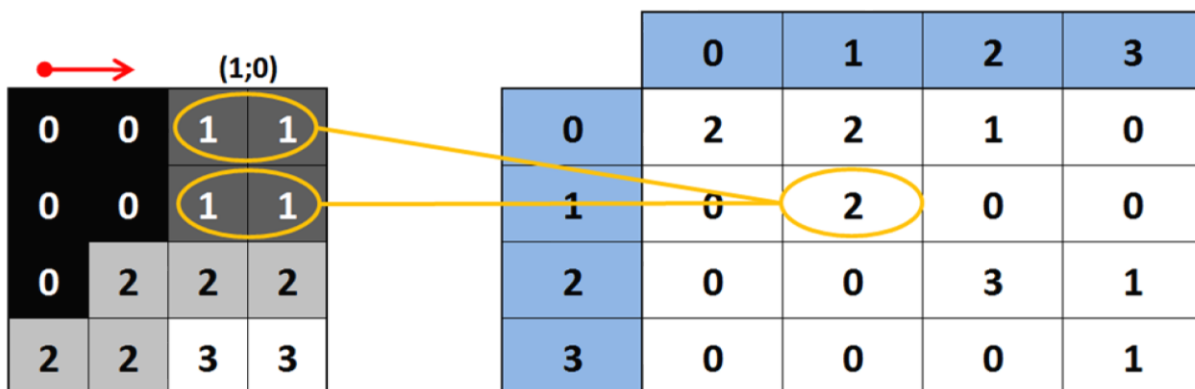


Figure 27 : Exemple d'une matrice de co-occurrence (à droite) obtenue à partir d'une image à quatre niveaux de gris (à gauche) selon le vecteur  $(1,0)$ . D'après [98].

On peut remarquer que les matrices de co-occurrences correspondant aux vecteurs  $\underline{V}$  et  $-\underline{V}$  sont les transposées l'une de l'autre. Afin d'éviter une redondance des informations, on utilise parfois une matrice symétrique, correspondant à la somme des deux matrices précédentes. Par ailleurs, le choix du vecteur de déplacement ayant une influence évidente sur la matrice obtenue, la description de la texture à différentes échelles et selon différentes directions requiert un grand nombre de matrices de co-occurrences.

Afin de réduire le grand nombre d'informations à traiter, Haralick [98] préconise de ne pas chercher à classer les images d'après leurs matrices de co-occurrences brutes, mais d'après 14 paramètres statistiques extraits de ces matrices : l'énergie, le contraste, la corrélation, la variance, la dis-similarité, la somme des moyennes, la somme des variances, la somme d'entropie, l'entropie, la différence de variance, la différence d'entropie, deux paramètres de mesure d'information de la corrélation, et le coefficient de corrélation maximum.

### 5.5.3 : Local Binary Pattern

Les matrices de co-occurrence permettent d'obtenir une information de texture complète, mais induisent en contrepartie une grande quantité d'informations à traiter. Cet inconvénient majeur a motivé des recherches plus récentes visant à définir des paramètres de texture plus simples et néanmoins efficaces. C'est le cas du LBP, introduit par Ojala [99].

Le LBP dans sa forme originale se présente sous la forme d'un histogramme dont les valeurs d'entrée sont comprises entre 0 et 255. Il mesure, pour l'ensemble des pixels de l'image, le nombre d'occurrence de ces valeurs calculées de la manière suivante : on observe



les 8 pixels au voisinage d'un pixel central. La première étape consiste à attribuer la valeur 0 à tous les pixels d'intensité inférieure au pixel central, ou 1 dans le cas inverse. On multiplie ensuite ces valeurs par des puissances de 2 organisées de manière croissante autour du pixel central, puis on calcule la somme de ces valeurs. La colonne de l'histogramme correspondant au résultat final est alors incrémentée, et l'opération est répétée au pixel suivant [99]. Un exemple est donné par la Figure 28.

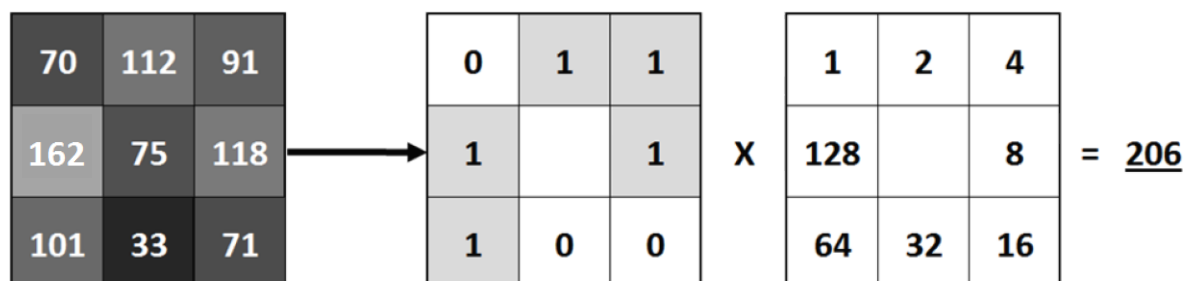


Figure 28 : Exemple de calcul du LBP.

On peut remarquer que cette technique possède trois propriétés particulières : premièrement, elle est invariante par rapport à une variation moyenne des niveaux de gris, ce qui implique qu'elle est insensible aux variations d'intensité lumineuse lors de l'acquisition de l'image d'entrée. Deuxièmement, elle n'est pas invariante en rotation, ce qui dans certains cas peut poser problème. Notons ici qu'il existe des variantes du LBP permettant de corriger cela [100]. Enfin, son champ d'observation est limité au voisinage direct du pixel central. Il existe cependant des variantes du LBP permettant une observation en multirésolution et d'autres possédant la propriété d'invariance en rotation.

#### 5.5.4 : Coordinated Clusters Representation

Les CCRs développés par Kurmychev [101] possèdent un principe de fonctionnement très proche de celui des LBP. Il existe cependant des différences notables. Premièrement, le seuillage des pixels n'est pas fonction de la valeur du pixel central : les CCRs utilisent des images binaires en entrée. Deuxièmement, le voisinage du pixel central observé n'est pas limité aux 8 pixels voisins, mais s'étend à un carré de dimension  $N \times N$ . Enfin, l'organisation des facteurs  $2^n$  multiplicateurs est cette fois-ci défini croissant de gauche à droite puis de haut en bas [101]. Un exemple de calcul des CCRs pour un voisinage  $5 \times 5$  est donné dans la Figure 29.

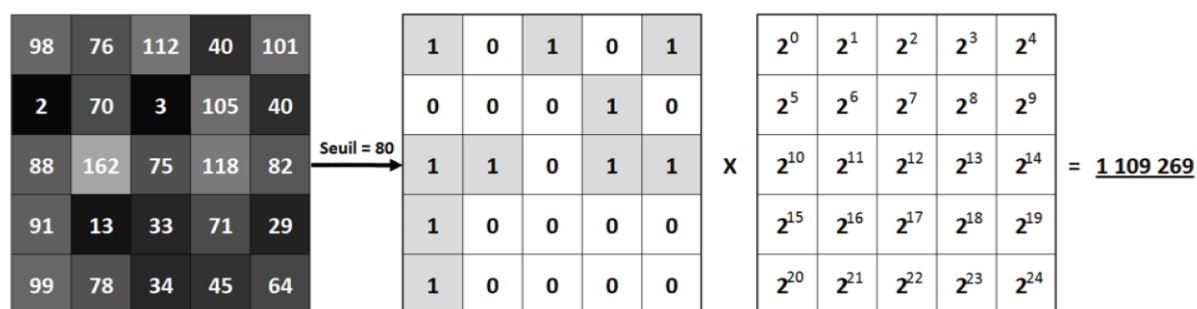


Figure 29 : Exemple d'utilisation d'une CCR.

Si les CCRs présentent l'avantage d'être facilement adaptables à des voisinages plus importants, il en résulte également une quantité d'information et un temps de calcul

exponentiels. Pour un voisinage de type 5x5, la taille de l'histogramme est de  $2^{25}$ , soit plus de 16 millions d'entiers. Il existe également des variantes à cette méthode permettant d'obtenir une invariance en rotation.

### 5.5.5 : Décomposition en ondelettes

Le principe de la transformation en ondelettes a été introduit par Grossmann [102], et peut être abordé comme une évolution des célèbres transformées de Fourier et Laplace. Ces deux méthodes permettent en effet d'interpréter un signal temporel dans un domaine fréquentiel. La particularité des ondelettes est qu'elles permettent de préserver l'information temporelle après transformation de la fonction initiale d'un domaine temporel vers un domaine temps/fréquence.

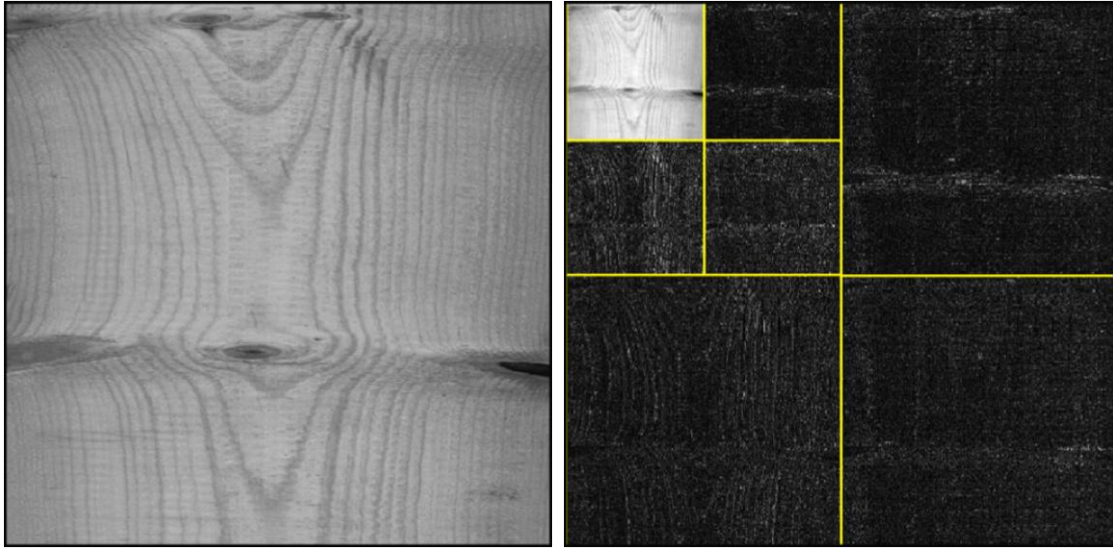


Figure 30 : Transformation en ondelettes à deux niveaux d'une image de pin.

Cette méthode repose sur des fonctions appelées ondelettes mères  $\Psi_{[1;0]}$ , qui sont des fonctions temporelles oscillantes de moyenne nulle, et qui tendent vers zéro à l'infini. A partir de ces ondelettes mères, on peut définir des ondelettes filles dilatées et translatées selon l'axe des abscisses en fonction de deux paramètres  $a$  et  $b$  (Équation 4).

$$\Psi_{[a;b]}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi_{[1;0]} \left( \frac{t-b}{a} \right)$$

Équation 4 : Passage d'une ondelette mère  $\Psi_{[1;0]}$  à une ondelette fille  $\Psi_{[a;b]}$  avec  $a$  facteur de dilatation et  $b$  paramètre de translation.

La transformation d'une fonction en ondelettes revient à effectuer le produit scalaire entre cette fonction initiale et une ondelette  $\Psi_{[a;b]}$  (Équation 5). Cette opération est effectuée pour différentes valeurs de  $a$  et  $b$ , ce qui permet d'obtenir la fonction transformée, qui à un couple de valeur  $(a;b)$  associe  $\langle f | \Psi_{[a;b]} \rangle$ .

$$\mathbf{T}_f^{\text{ond}}(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \langle \mathbf{f} | \Psi_{[\mathbf{a};\mathbf{b}]} \rangle = \int_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{f}(\mathbf{t}) \cdot \Psi_{[\mathbf{a};\mathbf{b}]}(\mathbf{t}) \cdot d\mathbf{t}$$

Équation 5 : Transformation en ondelettes d'une fonction  $f$  selon les paramètres  $a$  et  $b$ .



Jusqu'à présent, seul le cas d'une transformation en ondelettes d'un signal unidimensionnel a été évoqué. Dans le cas des images, le principe reste le même : on effectue dans un premier temps la transformation en ondelettes de l'image sans dilatation de l'ondelette mère, et séparément pour l'ensemble des lignes et l'ensemble des colonnes. On obtient donc une transformée pour les détails verticaux, et une autre pour les détails horizontaux. A partir de ces deux fonctions, on peut en obtenir une supplémentaire décrivant les motifs diagonaux. Ce processus est ensuite répété sur l'image initiale dont la résolution a été divisée par 2 (ce qui équivaut à dilater l'ondelette mère d'un facteur  $a=2$ ), et ainsi de suite.

Cette méthode est aujourd'hui massivement utilisée dans le domaine de la compression de données : c'est elle qui constitue la base de la compression des images en format JPEG [103]. Dans notre cas, elle permet de mettre en évidence, en un temps relativement court, les détails de texture séparément selon différentes directions et différentes échelles.

## 6. Conclusions

Nous avons pu constater, au cours de ce chapitre, que le bois est un matériau d'une importante complexité. D'une part, sa structure le rend hétérogène et anisotrope pour des échelles d'observation allant de l'arbre à la microstructure cellulaire. D'autre part, il présente des singularités, liées à sa croissance et à son environnement, qui affectent sa structure et par conséquent son comportement mécanique. Enfin, la géométrie, la position et l'agencement des singularités, ainsi que les caractéristiques mécaniques locales varient fortement d'un sciage à l'autre.

Compte tenu de tous ces éléments, on comprend qu'il est extrêmement délicat de prétendre fournir une description complète du comportement mécanique des sciages à des cadences industrielles, et ce pour trois raisons précises : aucune méthode à ce jour ne permet de connaître l'ensemble des paramètres physico-chimiques et géométriques du matériau à toutes les échelles d'observation et dans un délai raisonnable. Même si c'était le cas, les théories d'homogénéisation actuelles ne permettent pas de traiter un matériau ne possédant pas de Volume Élémentaire Représentatif à une échelle macroscopique, rendant impossible la caractérisation des sciages entiers par cette méthode. On peut enfin envisager une homogénéisation à une échelle plus réduite, par exemple millimétrique. Dans ce cas, l'étude du comportement des sciages devrait faire appel à des calculs par Éléments Finis, dont les capacités et temps de calculs sont encore limités. Ces deux dernières options ont néanmoins fait l'objet d'études et offrent de très bons résultats, mais sont à l'heure actuelle inapplicables dans notre contexte.

Cette incapacité actuelle à estimer précisément les propriétés mécaniques des sciages, et en particulier leur contrainte de rupture, est à l'origine du système de classement par lot en vigueur au sein de l'UE. Nous avons en effet vu que les seuils définis par l'EN 338 s'appliquent sur les fractiles à 5% (densité et MOR) ou les valeurs moyennes (MOE) des propriétés mécaniques de l'ensemble des planches d'un même lot. Une conséquence de ce système est que le classement d'une planche donnée est en réalité conditionné par les seuils appliqués sur les IPs, eux-mêmes variables en fonction de la combinaison de classes disponibles. Autrement dit, une planche classée C24 pour une combinaison C18/C24 peut

être classée C18 pour une combinaison C18/C24/C30. Cet aspect peu intuitif est source d'une grande confusion parmi les acteurs de la transformation du bois, et dans une certaine mesure, constitue pour eux un frein à l'adoption du classement mécanique par machine. Outre l'optimisation de la matière première, qui reste une problématique importante, on voit que la mise au point de modèles performants dans l'estimation des propriétés mécaniques des sciages permettrait de s'affranchir du classement par lot et de ses inconvénients.

Si l'on s'en tient à l'état de l'Art, seules deux singularités du bois peuvent être caractérisées de manière fiable et à grande vitesse : les nœuds et la pente de fil. Les nœuds sont considérés comme ayant une influence majeure sur les propriétés des sciages. La pente de fil quand à elle possède une influence critique sur le bois sain, mais aucune étude n'établit son intérêt dans le domaine du classement mécanique. Ces deux singularités permettent de calculer le Knot Area Ratio et l'Area Reduction Factor, considérés comme références à l'heure actuelle. Bien qu'il existe des variantes du KAR et de l'ARF ainsi que plusieurs manières de les lier aux propriétés mécaniques qui nous intéressent, ceux-ci restent des indices assez peu adaptables à l'introduction de nouveaux paramètres, ou encore à un champ de contraintes particulier. La mise au point d'un modèle apportant une solution simple à ces lacunes, et suffisamment rapide pour être appliqué industriellement permettrait d'améliorer les performances des scanners optiques en tant que machines de classement mécanique.

La suite de cette étude sera donc consacrée à la mise au point d'un tel modèle, applicable aux cas de sollicitations en traction et en flexion, et capable de prendre en compte tous types de singularités du bois. Dans le chapitre suivant, les principes de construction de ce modèle que nous avons appelé « Profilé Equivalent » seront présentés, de même que les méthodes de mise en œuvre à partir des images obtenues grâce au scanner CombiScan+. Les résultats présentés au cours de cette partie ne prennent en compte que les nœuds, détectés de trois manières différentes, et rendent compte à la fois des performances en termes de  $R^2$  atteints, et de la robustesse face à une variation des paramètres de calcul. Ces résultats nous permettront de vérifier la pertinence de notre modèle face aux résultats obtenus par le KAR.

Le troisième et dernier chapitre de cette étude nous permettra, quant à lui, d'introduire dans notre modèle les informations de pente de fil locale, et de vérifier ainsi dans quelle mesure ces données influencent les résultats obtenus. Outre une analyse des performances et de la robustesse, nous nous attarderons également sur la répétabilité de ce modèle, sur notre hypothèse de variation de la pente de fil dans l'épaisseur des sciages, ainsi qu'à la répartition des erreurs d'estimation en fonction des classes de résistance. L'ensemble de ces éléments nous permettra de juger de l'intérêt éventuel d'une implémentation de ce modèle au sein des scanners, en vue d'une homologation en tant que machine de classement mécanique.



# Chapitre II : Modèle du Profilé Equivalent

Nous avons vu dans le chapitre précédent que les méthodes d'estimation du MOR appliquées au classement mécanique les plus performantes actuellement sont basées sur le principe suivant : définir une section équivalente pour chaque sciage, en prenant en compte la disposition des nœuds (KAR), associée ou non à la pente de fil locale (ARF). Malgré les performances de ces méthodes, on peut leur reprocher de ne pas tenir compte de la distribution des contraintes, et de ne pouvoir traiter qu'un nombre restreint de singularités. En effet, si lors d'un essai de traction les contraintes peuvent être considérées comme homogènes dans tout le volume de l'éprouvette, ce n'est absolument pas le cas lors d'un essai de flexion.

Dans ce chapitre, nous présenterons un nouveau modèle que nous appelons Profilé Equivalent (PE), adaptable à tout type de sollicitation à condition qu'elle soit plane. Ce modèle est également capable de tenir compte des différentes singularités du bois, bien que ce chapitre concerne uniquement la mesure et la prise en compte des nœuds. Dans un premier temps, les méthodes permettant d'obtenir ce PE seront définies, suivies de l'application de ce modèle au calcul du MOE et du MOR. Enfin, les résultats obtenus par comparaison avec des essais destructifs seront présentés.

## 1. Définition des paramètres

Afin de clarifier les développements mathématiques qui font l'objet de la suite de ce chapitre, il est nécessaire de définir les paramètres et notations qui seront utilisés. Ces notations seront par la suite conservées dans le reste de cette étude.

### 1.1 Notations spécifiques

- Les tenseurs sont soulignés en fonction de leur ordre. Par exemple  $S$  désigne un scalaire,  $\underline{V}$  désigne un vecteur, et  $\underline{M}$  une matrice.
- La valeur moyenne d'un paramètre sur l'épaisseur du sciage est encadrée par les symboles  $\langle$  puis  $\rangle$ .
- La valeur moyenne d'un paramètre sur le volume du sciage est encadrée par les symboles  $\ll$  et  $\gg$ .

### 1.2 Définition du repère

- Soit  $\underline{X}$  le vecteur parallèle à la longueur du sciage
- Soit  $\underline{Y}$  le vecteur parallèle à la largeur du sciage
- Soit  $\underline{Z}$  le vecteur parallèle à l'épaisseur du sciage

La base  $(\underline{X}, \underline{Y}, \underline{Z})$  est défini de manière à former un trièdre direct.

### 1.3 Définition des paramètres

- Soient  $L_1$ ,  $L_2$  et  $L_3$  la longueur, la largeur et l'épaisseur du sciage
- Soit  $\rho(x,y,z)$  la masse volumique locale d'un sciage
- Soient  $\rho_{CW}$  et  $\rho_K$  les masses volumiques respectives du bois sain et des nœuds
- Soit  $KDR(x,y)$  la fraction de l'épaisseur occupée par un nœud (Knots Depth Ratio)

- Soit  $T_{PE}(x, y)$  l'épaisseur locale du profilé équivalent
- Soit  $Y_{FN}(x)$  la position de la fibre neutre du PE
- Soit  $I_{B,P}(x)$  le moment quadratique de la planche (B) ou du profilé (P)
- Soit  $A_{B,P}(x)$  l'aire de la section de la planche (B) ou du profilé (P)
- Soit  $E_{B,P}(x)$  le module élastique local de la planche (B) ou du profilé (P)
- Soit  $\sigma_{B,P}(x)$  la contrainte de rupture locale de la planche (B) ou du profilé (P)

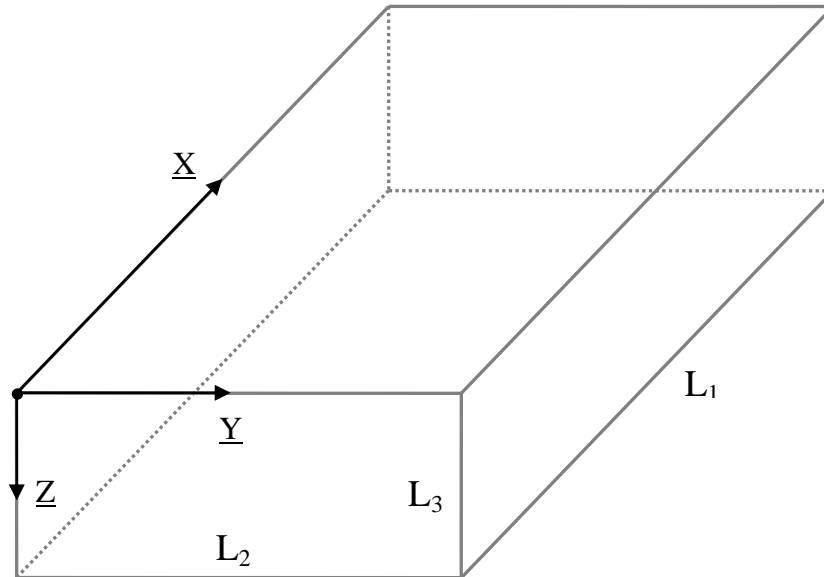


Figure 31 : Représentation de la base ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ,  $\underline{Z}$ ) ainsi que des dimensions des sciages

## 2. Mesure locale du Knot Depth Ratio

La première étape de la définition du PE est commune à tous les modèles capables de tenir compte des singularités du bois. Elle consiste à localiser ces singularités, qui sont ici limitées aux nœuds, et en particulier dans le volume du sciage. Comme nous allons le voir dans la partie 3, le PE est symétrique par rapport au plan défini par les efforts de sollicitation. Par conséquent, seule la fraction de l'épaisseur du sciage occupée par un nœud nous intéresse. Cette valeur, définie pour chaque point du plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ) est appelée Knot Depth Ratio (KDR).

Il existe actuellement deux méthodes permettant de réaliser la mesure locale du KDR, chacune présentant ses avantages et inconvénients. La première a été établie par Roblot [1] et consiste à détecter les nœuds apparents sur les faces des sciages, puis à les mettre en correspondance par un algorithme dédié. Or, l'étape de détection des nœuds est parfois délicate, et dépend de l'état de surface du bois. L'autre méthode, introduite par Oh [43] utilise l'information de densité locale obtenue par transmission des rayons X. Si elle a l'avantage de fournir une information potentiellement pixel par pixel, elle est fondée sur des hypothèses fortes sur la densité des nœuds. Cette partie présente une variante de la seconde méthode qui a été utilisée au cours de cette étude. Les résultats issus des deux méthodes de quantification du KDR seront par la suite comparés.

## 2.1 Mesure de la densité par transmission des rayons X

### 2.1.1 : Application de la loi de Beer-Lambert

La loi de Beer-Lambert permet de quantifier l'intensité d'une onde électromagnétique transmise à travers un matériau quelconque. Les composantes du champ électrique et du champ magnétique étant liées par les équations de Maxwell, Il est possible de se ramener uniquement à la composante électrique  $E_x$ . A partir de sa forme différentielle, cette loi peut s'exprimer de la manière suivante :

$$E_x(x, y, z + dz) = E_x(x, y, z) \cdot e^{-\mu \cdot \rho(x, y, z) \cdot dz}$$

Équation 6 : Equation de Beer-Lambert

Le paramètre  $\mu$  représente l'absorbance du matériau en question pour la longueur d'onde du rayonnement électromagnétique. Nous considérons, par souci de simplification, ce paramètre comme constant pour un lot de sciages donné, et pour un réglage défini de l'alimentation de l'émetteur de rayons X. De la même manière, le taux d'humidité au sein d'un lot et l'épaisseur des sciages sont également supposés constants. L'astuce de calcul consiste ici à établir le logarithme des deux membres de cette équation, ce qui permet d'exprimer  $\langle \rho \rangle$  comme fonction affine du logarithme de l'intensité de l'onde transmise.

$$\langle \rho \rangle (x, y) = \frac{1}{L_3} [a \cdot \ln(G)(x, y, z = L_3) + b]$$

Équation 7 : Expression de  $\langle \rho \rangle$  en fonction de l'intensité transmise

Ce résultat correspond à celui énoncé par Oh [43]. La mesure de l'intensité lumineuse étant réalisée par une caméra numérique, on peut raisonnablement considérer le niveau de gris de l'image comme proportionnel à l'intensité de l'onde transmise. Cette hypothèse n'est cependant valable qu'à condition que l'image ne présente de saturation ni dans le noir, ni dans le blanc : un réglage approprié de la puissance de la source des rayons X doit donc être effectuée au préalable. Des analyses plus avancées des non-linéarités observées lors de la densitométrie par rayons X ainsi que de la signification des paramètres  $a$  et  $b$  sont présentées en Annexe I, p.133.

### 2.1.2 : Identification des paramètres

Comme nous venons de le voir, la justesse de la mesure de densité par transmission des rayons X est définie par deux paramètres, notés  $a$  et  $b$ . La méthode d'identification de ces paramètres, que nous avons choisie, exploite le fait que l'Équation 7 définisse une relation affine : les coefficients  $a$  et  $b$  se conservent par sommation.

L'identification se déroule donc de manière très simple. Une mesure de densité par pesée nous permet d'avoir, pour chaque pièce, un couple de valeurs : densité réelle multipliée par l'épaisseur de la pièce, et moyenne des logarithmes des niveaux de gris de l'image de la planche par rayons X. Les coefficients  $a$  et  $b$  sont pris égaux aux coefficients de la droite de régression entre ces deux valeurs, au sens des moindres carrés. La Figure 32 nous montre que la mesure de densité globale des sciages par transmission des rayons X est très précise si elle est réalisée dans de bonnes conditions : taux d'humidité homogène sur l'ensemble du lot, et épaisseur constante sur chaque planche.

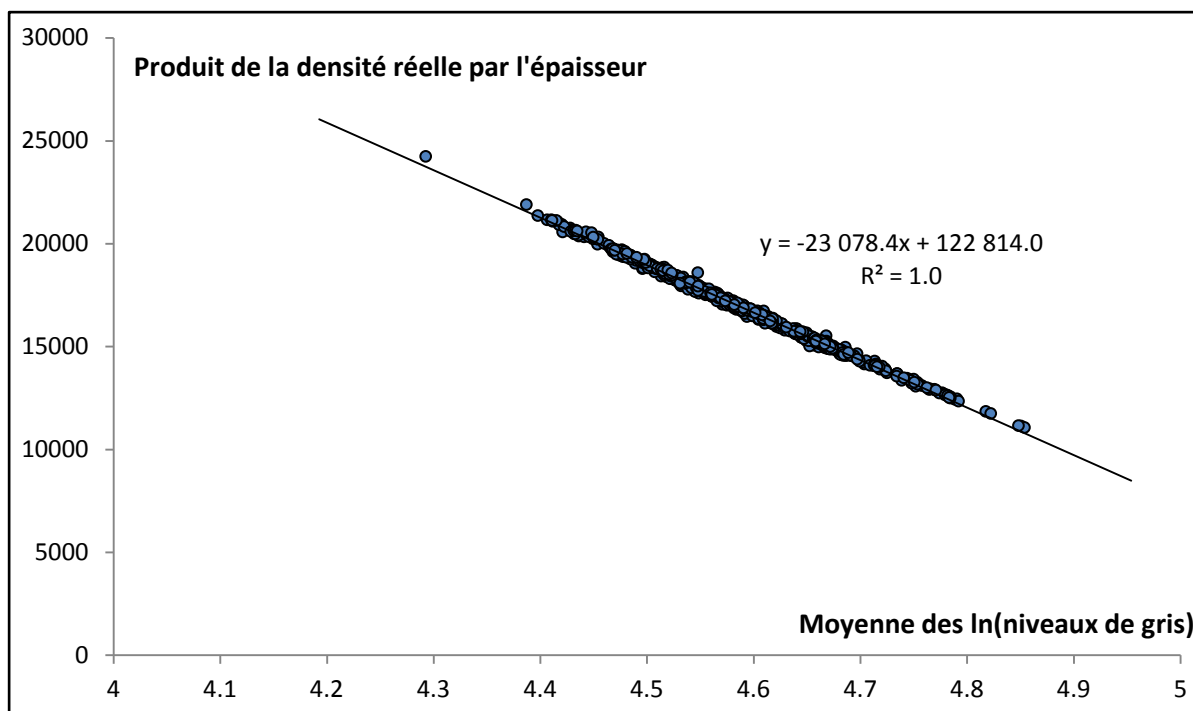


Figure 32 : Identification des paramètres de mesure de densité par rayons X. Mesures réalisées sur un lot de 697 pièces d'écipéa.

## 2.2 Mesure du KDR à partir de la densité locale

### 2.2.1 : Principe général

Lors de l'étape précédente, nous avons déterminé, pour chaque point du plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ), une valeur  $\langle \rho \rangle$  de densité moyenne du sciage à travers son épaisseur. L'objectif ici est de déterminer à partir de cette valeur le KDR du point correspondant.

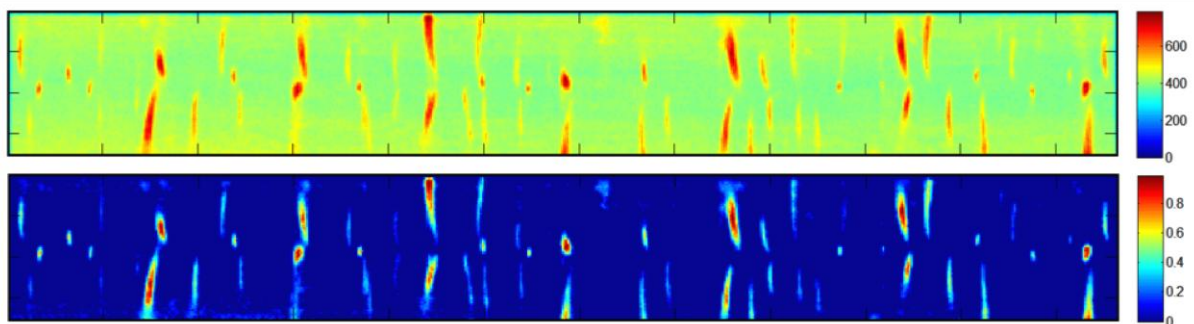


Figure 33 : Champs de densité  $\langle \rho \rangle$  (haut) et de KDR (bas) mesurés sur une planche d'écipéa.

Les deux méthodes présentées sont basées sur la même hypothèse. Celle-ci consiste à considérer le bois comme un matériau biphasé : les nœuds représentent une phase, et sont noyés dans une matrice de bois sain. Les densités de chacune des phases sont supposées constantes, ce qui nous permet d'établir la relation suivante :

$$KDR(x, y) = \frac{\langle \rho \rangle (x, y) - \rho_{CW}}{\rho_K - \rho_{CW}}$$

Équation 8 : Expression du KDR en fonction de la densité mesurée  $\langle \rho \rangle$

On constate qu'il est nécessaire de connaître deux paramètres supplémentaires afin de déterminer la valeur du KDR : la densité du bois sain  $\rho_{CW}$  ainsi que la densité des nœuds  $\rho_K$ . Le choix de ces deux paramètres constitue la principale différence entre les deux méthodes ci-dessous.

### 2.2.2 : Méthode présentée par Oh [43]

Cette méthode définit  $\rho_K$  comme la valeur moyenne des densités des nœuds pour le lot de sciages considéré. Afin d'estimer cette valeur, plusieurs spécimens comportant des nœuds d'axe normal au plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ) sont sélectionnés : une mesure de densité par rayons X sur ce type de nœud n'est pas perturbée par la présence de bois sain. La valeur de  $\rho_{CW}$  est en revanche mesurée pour chaque pièce. Un traitement d'image permet de distinguer les zones comportant des nœuds des zones uniquement composées de bois sain. La densité du bois sain est donc mesurée sur ces dernières.

Les valeurs de KDR mesurées à l'aide de cette méthode ont été comparées par l'auteur à des mesures manuelles, effectuées sur des sections comportant des nœuds. La corrélation  $R^2$  entre les KDRs mesurés manuellement et ceux mesurés par rayons X est comprise entre 89% et 93%.

### 2.2.3 : Méthode utilisée dans cette étude

La différence avec la méthode ci-dessus se situe essentiellement dans le calcul de  $\rho_K$ . Ici,  $\rho_{CW}$  est mesurée dans un premier temps pour chaque planche, après détection des zones comportant des nœuds. Cette opération est réalisée par un seuil adaptatif, proportionnel à la densité moyenne du sciage  $\langle \rho \rangle$  selon un facteur  $f_1$ , puis  $\rho_K$  est défini comme proportionnel à  $\rho_{CW}$ , selon un second facteur de proportionnalité  $f_2$ .

Enfin, le calcul du KDR en chaque point du plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ) n'est réalisé que si la densité locale  $\langle \rho \rangle$  est supérieure à  $f_1 \times \rho_{CW}$ . Cette condition est destinée à filtrer les variations anormales de densité, qui peuvent être dues, par exemple, à la présence de bois de compression. Les facteurs  $f_1$  et  $f_2$  sont choisis empiriquement de manière à optimiser l'estimation du MOE ou du MOR, selon le cas.

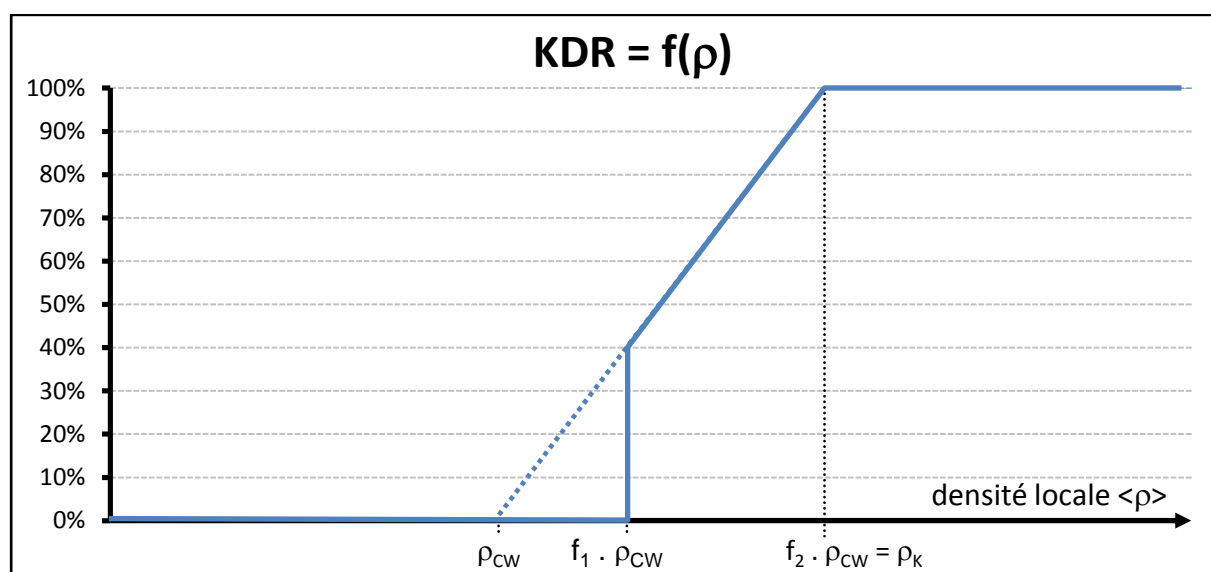


Figure 34 : Représentation graphique de la méthode de calcul du KDR



### 3. Définition du Profilé Equivalent

Nous disposons maintenant d'une information locale concernant la position des nœuds dans chaque sciage, en particulier le KDR. Celle-ci a pu être obtenue grâce à l'algorithme de mise en correspondance des nœuds présentée par Roblot [1], ou bien par la méthode présentée dans la partie précédente. L'étape suivante consiste à prendre en compte ces informations dans un modèle de prédiction du MOE ou du MOR. Le KAR en est un exemple bien connu et largement éprouvé, mais qui n'est pas cohérent avec la théorie de la résistance des matériaux dans le cas d'une distribution hétérogène des contraintes.

Dans ce chapitre, nous proposons un nouveau modèle de prédiction du MOE et du MOR à partir du KDR, basé sur la recherche d'une poutre fictive, possédant les mêmes propriétés mécaniques globales que le sciage, mais composée d'un matériau homogène, et que l'on saurait facilement traiter analytiquement. La définition de cette poutre fictive, que nous avons appelé Profilé Equivalent, est l'objet de cette partie.

#### 3.1 D'un matériau hétérogène à un matériau homogène

##### 3.1.1 : Rappels sur les méthodes d'homogénéisation

Nous savons que la difficulté rencontrée lors de la modélisation du comportement mécanique du bois n'est pas tant due à son anisotropie qu'à son hétérogénéité. Ce n'est cependant pas le seul matériau présentant cette difficulté : les bétons armés, les aciers, ainsi que la plupart des matériaux d'origine biologique par exemple, possèdent ces propriétés s'ils sont observés à une échelle adaptée. On parle généralement de matériaux composites, qu'ils soient manufacturés ou non.

Nous avons vu que les méthodes dites d'homogénéisation permettent de passer du comportement mécaniques des différentes phases d'un composite à son comportement mécanique global, et inversement. Le passage de l'un à l'autre s'effectue à l'aide de tenseurs de localisation d'ordre 4, définis à partir de la structure du matériau. L'intérêt de ces théories est double : comprendre le comportement d'une structure connaissant sa composition, et réciproquement, définir l'architecture d'un nouveau matériau en fonction des besoins. Ces théories sont d'une très grande complexité, et font appel à des notions avancées de calcul tensoriel. Néanmoins, elles sont devenues d'un usage fréquent et peuvent être approchées par les modèles simplifiés de Voigt et de Reuss.

Nous avons également vu que l'application de ces méthodes au bois représente des difficultés que l'on peut résumer en deux points. Premièrement, on ne sait actuellement pas obtenir d'informations, sur la géométrie et la composition des fibres, à des vitesses suffisamment élevées pour présenter un intérêt dans notre contexte. Deuxièmement, les nœuds, qui sont des inclusions macroscopiques dont les positions et les géométries sont aléatoires, et dont les dimensions sont sensiblement du même ordre de grandeur que celle des sciages, rendent impossible la définition d'un VER à cette échelle. L'application d'une méthode d'homogénéisation à la caractérisation des sciages passe donc nécessairement par un modèle macroscopique de type Eléments Finis, ou par celui du Profilé Equivalent que nous allons proposer.

### 3.1.2 : Principe de la poutre équivalente

Nous venons de voir qu'il est impossible de définir un matériau homogène possédant les mêmes propriétés macroscopiques que le bois. Cependant, l'intérêt de ce type de démarche demeure dans notre cas. En effet, plutôt que de rechercher un matériau équivalent, il est plus pertinent de rechercher pour chaque sciage une poutre équivalente, de matériau homogène, et possédant le même comportement mécanique.

Cela signifie que l'expérimentateur ne pourrait pas, à partir des mesures effectuées lors d'un essai destructif, distinguer le sciage réel de la poutre équivalente : la rupture doit avoir lieu pour le même effort dans le cas de la traction, ou pour le même moment dans le cas de la flexion, et au même endroit. Par ailleurs, la relation entre l'effort appliqué et le déplacement mesuré doit être identique dans les deux cas.

Globalement, le processus de prédiction du MOE et du MOR se déroule donc de la manière suivante : à partir des informations mesurées sur la planche réelle, on définit une poutre équivalente, c'est-à-dire à la fois sa géométrie et son matériau. On est alors capable de déterminer le comportement mécanique de cette poutre en fonction des efforts qui lui sont appliqués. Ce comportement étant sensé être identique à celui de la planche réelle, il est possible d'en déduire les propriétés mécaniques (MOE et MOR) de cette dernière. Notons que ce processus n'oblige pas nécessairement à déterminer le comportement mécanique de la planche en termes de déplacement et d'effort maximal avant rupture. Il est mathématiquement possible de calculer directement ses propriétés mécaniques à partir de la définition de la poutre équivalente.

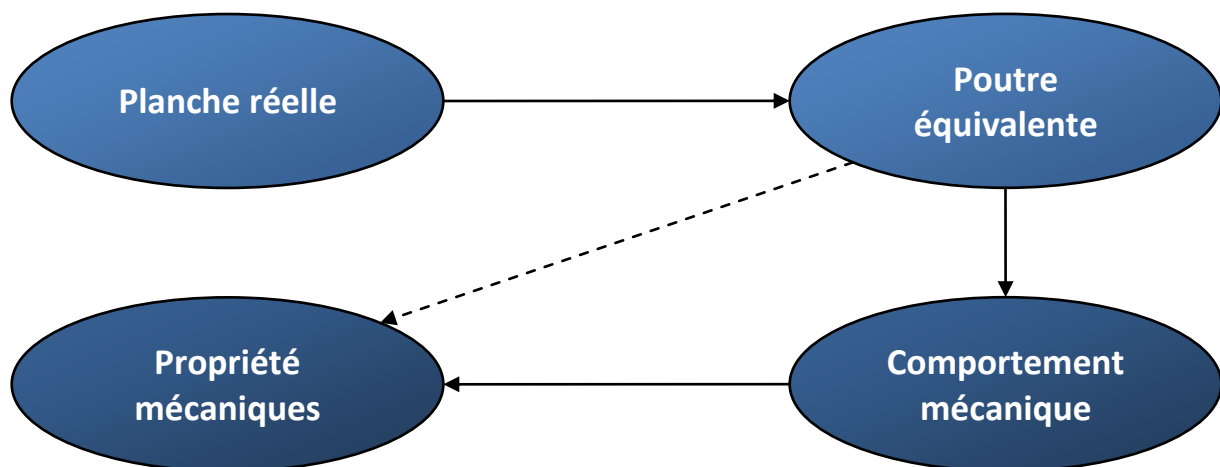


Figure 35 : Principe d'utilisation de la poutre équivalente

## 3.2 Géométrie du Profilé Equivalent

### 3.2.1 : Principe général

La définition de la géométrie du PE est une des étapes les plus importantes de l'application de ce modèle, car elle seule permet de prendre en compte la position des singularités du bois. Celle-ci est basée sur le principe suivant : l'épaisseur locale  $T_{PE}(x, y)$  de la poutre équivalente est proportionnelle à la rigidité ou la résistance, selon le cas, de la planche réelle en ce point. Cette variation d'épaisseur en fonction de la position  $(x, y)$  est la raison pour laquelle nous ne parlerons plus de poutre équivalente, mais de Profilé Equivalent.

Le principe de construction qui consiste à faire varier l'épaisseur du PE dans le plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ) s'explique par la distribution des contraintes. En effet, les éléments d'une structure bois ne sont généralement soumis qu'à deux types de sollicitations principales : la traction/compression (lamelles du bois lamellé-collé, par exemple) et la flexion. Dans la plupart des cas, le plan de flexion correspond au plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Y}$ ), ce qui fait que les contraintes sont homogènes dans la direction  $\underline{Z}$ , c'est-à-dire dans l'épaisseur du sciage. Dans le cas où le plan de flexion serait le plan ( $\underline{X}$ ,  $\underline{Z}$ ), le modèle du PE doit être adapté en faisant varier non pas l'épaisseur, mais la largeur locale du profilé.

On peut remarquer ici que ce modèle est capable de tenir compte de toutes les singularités présentes dans le bois, à condition que l'on sache identifier leur influence sur les propriétés mécaniques. Cependant, dans ce chapitre, nous nous limiterons à la prise en compte des nœuds afin de vérifier l'intérêt de ce modèle par rapport au KAR.

### 3.2.2 : Prise en compte des nœuds à partir du Knot Depth Ratio

Le modèle du KAR considère de manière implicite que la rigidité et la résistance mécanique des nœuds est nulle. C'est cette même hypothèse, légèrement modifiée, qui sera appliquée dans la définition de l'épaisseur locale du PE. En d'autres termes, l'épaisseur locale du PE correspond en tout point à la quantité de bois sain à un facteur multiplicatif près. Ceci peut être schématisé par la figure ci-dessous :

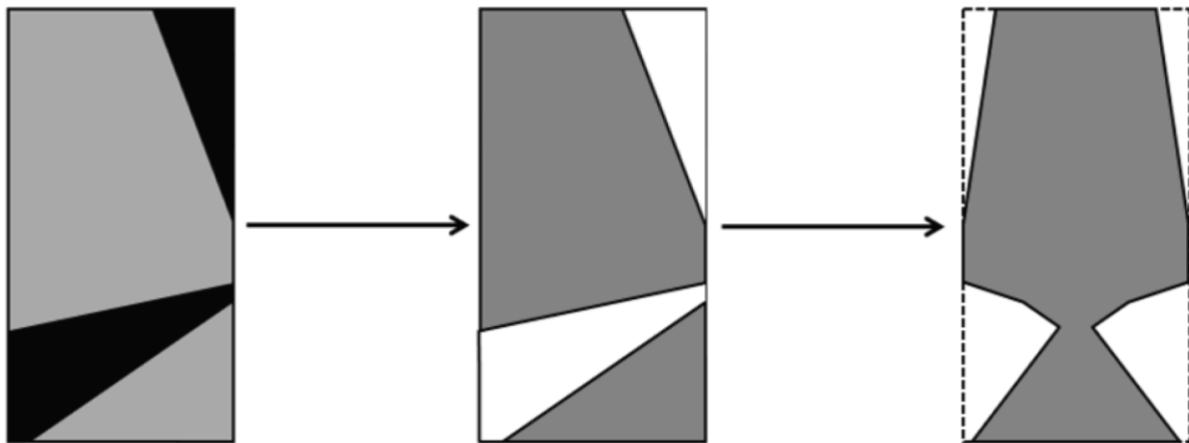


Figure 36 : Prise en compte des nœuds dans le modèle du PE. Gauche : section du sciage comportant deux nœuds. Droite : PE correspondant.

Il est alors très facile de définir l'épaisseur locale du PE à partir de la valeur du KDR calculé précédemment (voir Équation 9). Cette équation n'est cependant valable que dans le cas où seuls les nœuds doivent être pris en compte.

$$T_{PE}(x, y) = L_3 \cdot [1 - \alpha \cdot KDR(x, y)]$$

Équation 9 : Epaisseur locale du PE en fonction du KDR

La présence du facteur  $\alpha \in [0, 1]$  permet de tenir compte du fait que les nœuds ne possèdent ni une rigidité ni une résistance nulle. Dans le cas du calcul du MOE, ceci sera néanmoins pris en compte d'une autre manière, et on peut dans ce cas définir le paramètre  $\alpha$  égal à 1. Dans le cas du calcul du MOR, sa valeur sera choisie de manière à maximiser la corrélation entre les MORs estimés et mesurés.

La géométrie du PE est à présent définie. Sa longueur et sa largeur sont prises égales à celles de la planche réelle, et son épaisseur locale est définie à partir du KDR. Afin de pouvoir déterminer le comportement mécanique de ce PE, il reste nécessaire de définir les propriétés du matériau qui le constitue.

### 3.3 Propriétés mécaniques du Profilé Equivalent

L'étape finale de la construction du PE consiste donc à lui attribuer un matériau. Plus précisément, il s'agit ici de définir le module élastique et la contrainte de rupture du matériau qui le constitue. La difficulté ici est que nous ne disposons pas d'informations permettant d'évaluer directement ces valeurs. Il est donc nécessaire d'estimer ces propriétés à partir d'autres grandeurs mesurées précédemment.

Nous avons vu qu'il existe une corrélation entre les trois propriétés que l'on cherche à mesurer dans le cadre du classement mécanique, à savoir la densité, le MOE et le MOR. La Figure 37 nous montre que la méthode la plus pertinente consiste à estimer dans un premier temps le MOE à partir de la densité, le MOR étant à ce stade inconnu. Dans un second temps, le MOR peut alors être estimé grâce au MOE.

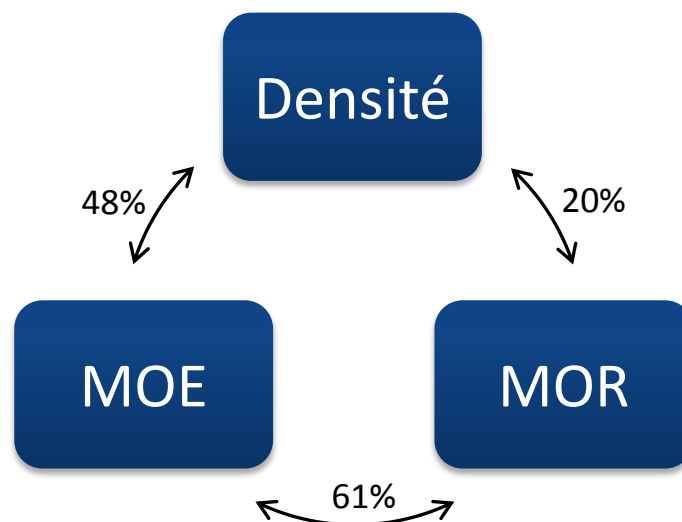


Figure 37 : Corrélations  $R^2$  entre densité, MOE et MOR, mesurées sur un lot de 422 pièces d'épicéa.

Notons ici que le matériau constituant le PE ne doit pas nécessairement être homogène au sens strict pour permettre le calcul analytique de son comportement mécanique. En réalité, une homogénéité par sections de ce matériau, c'est-à-dire pour chaque position sur l'axe  $\underline{x}$ , est suffisante et permet d'obtenir de meilleurs résultats.

#### 3.3.1 : Définition du module élastique $E_P(x)$

Comme nous l'avons vu, le module élastique du PE peut être défini à partir de la densité de la planche réelle. Plus précisément, c'est la densité moyenne par section transversale  $\rho(x)$ , calculée lors des étapes précédentes, qui sera utilisée ici. Une correction affine de cette densité est appliquée afin d'obtenir une valeur de module élastique. Les coefficients utilisés sont ceux fournis par Guitard [104], valables dans le cas des résineux.

Par ailleurs, un facteur correctif lié au KAR local est appliqué. Celui-ci est destiné à prendre en compte des phénomènes engendrés par la présence des nœuds, mais dont on ne sait pas actuellement quantifier l'influence sur le comportement mécanique du sciage, rendant impossible leur prise en compte dans la géométrie du PE : perturbation de l'angle des fibres, concentration de contraintes, etc. Finalement, l'expression du module élastique du PE retenue pour la suite de l'étude est la suivante :

$$E_p(x) = (1 - KAR(x))^p \cdot [13.1 + 41.7 * (\rho(x) - 0.45)]$$

**Équation 10 : Expression en [GPa] du module élastique du PE.**

Enfin, un seuil  $s_E$  est appliqué à la valeur obtenue précédemment : si la valeur de  $E_p$  est inférieure à ce seuil, alors elle est définie comme égale à  $s_E$ . Ceci permet de tenir compte du fait que les nœuds ne possèdent pas une rigidité nulle. La valeur de ce seuil ainsi que celle du paramètre  $p$  sont définies de manière à optimiser l'estimation du MOE de la planche.

### 3.3.2 : Définition de la contrainte de rupture $\sigma_p$

Contrairement à la valeur de  $E_p$ , qui est définie pour chaque position selon  $\underline{x}$ , la contrainte de rupture du PE  $\sigma_p$  est définie comme constante. Comme on l'a vu, le MOR est assez bien corrélé au MOE, c'est pourquoi nous définissons  $\sigma_p$  comme fonction linéaire du MOE de la planche, mesuré ou estimé. Notons que le coefficient de cette fonction linéaire n'a pas besoin d'être précisé : Il sera toujours possible, si nécessaire, de corriger les valeurs de MOR obtenues afin de correspondre à celles mesurées par essais destructifs.

## 4. Application au calcul du MOE et du MOR

L'objectif de cette partie est de montrer comment les valeurs du MOE et du MOR peuvent être déterminées à partir du PE qui a été défini au cours de l'étape précédente. Rappelons que le principe utilisé ici est l'équivalence entre la planche réelle et le PE du point de vue de l'expérimentateur : la rupture doit avoir lieu pour les mêmes efforts, et les déplacements correspondants doivent être égaux.

### 4.1 Calculs préliminaires

#### 4.1.1 : Flexion - position de la fibre neutre et moment quadratique

La première étape du calcul, que ce soit pour l'estimation du MOE ou du MOR, consiste à déterminer pour chaque section transversale la position de la fibre neutre. Pour rappel, dans le cas d'un essai de flexion, la fibre neutre est constituée de l'ensemble des points qui ne subissent aucune contrainte de traction/compression. La position de cette fibre, pour une section donnée, est définie de manière à ce que la moyenne des efforts normaux à la section soit nulle. Les contraintes de traction/compression étant réparties linéairement autour de la fibre neutre, la position de cette dernière est définie par son barycentre, suivant l'équation suivante :

$$Y_{FN}(x) = \frac{1}{L_2} \int y \cdot T_{PE}(x, y) dy$$

**Équation 11 : Position de la fibre neutre du PE en une position  $x$  donnée.**

Nous sommes maintenant en mesure d'exprimer le moment quadratique du PE en chaque position  $x$ , autour de la fibre neutre (Équation 12). Cette valeur est un intermédiaire de calcul qui se révèlera important par la suite.

$$I_P(x) = \int T_{PE}(x, y)(y - Y_{FN}(x))^2 dy$$

**Équation 12 : Moment quadratique du PE en une position  $x$  donnée**

#### 4.1.2 : Traction - Aire de la section droite

Le cas de la traction longitudinale est évidemment plus simple à traiter, puisqu'il n'y a qu'un seul ensemble de valeur à déterminer. Le calcul des aires des sections droites du PE est relativement trivial :

$$A_P(x) = \int T_{PE}(x, y) dy$$

**Équation 13 : Aire de la section droite du PE en une position donnée  $x$**

## 4.2 Calcul du MOE

### 4.2.1 : Cas de la flexion

Le principe de calcul du MOE dans le cas de la flexion est le suivant : compte tenu du PE qui a été défini précédemment, ainsi que de la géométrie de la machine d'essais, il est possible de déterminer la valeur de la flèche en chaque point de la poutre pour un effort de flexion arbitraire. Dans le cas d'une poutre élancée, dans son domaine élastique, sa déformation est calculée à partir de l'équation suivante :

$$\frac{d^2 f}{dx^2}(x) = \frac{M(x)}{E_P(x) \cdot I_P(x)}$$

**Équation 14 : Déformation d'une poutre en flexion.  $f$  représente la flèche locale, et le moment de flexion est noté  $M$ .**

La valeur de  $f(x)$  est alors obtenue simplement à l'aide de deux intégrations numériques successives (méthode de Simpson). Parfois, lors d'un essai de flexion, la valeur du module élastique de la poutre testée est calculée à partir du rayon de courbure de la poutre, afin de s'affranchir du tassement au niveau des appuis. Or, le modèle du PE ne tient pas compte de ce phénomène, ce qui nous permet de déterminer le MOE de la planche réelle en supposant que, pour le même effort de flexion, la flèche à mi-longueur de la planche réelle est égale à celle du PE.

Une solution simple permettant de calculer le MOE à partir de la flèche à mi-longueur est de comparer cette valeur avec celle obtenue si la planche avait un module élastique quelconque  $MOE_0$ , notée  $f_0$ . L'Équation 14 ayant pour conséquence que la flèche est inversement proportionnelle au module élastique, l'expression du MOE devient :

$$MOE = \frac{f_0}{f(L_1/2)} \cdot MOE_0$$

**Équation 15 : Calcul du MOE en flexion à partir de la flèche à mi-longueur.**

### 4.2.2 : Cas de la traction

Dans le cas de la traction, le calcul se trouve énormément simplifié. Il est évidemment possible de suivre exactement la même logique que pour le calcul du MOE en flexion. Cependant, un certain nombre d'étapes se simplifient et aboutissent à l'équation suivante, où  $x_1$  et  $x_2$  représentent les positions des deux mors, et  $A_B$  et  $A_P$  désignent respectivement les sections de la planche réelle et du profilé :

$$MOE = \frac{1}{A_B \cdot (x_2 - x_1)} \int_{x_1}^{x_2} E_P(x) \cdot A_P(x) dx$$

Équation 16 : Calcul du MOE en traction.

## 4.3 Calcul du MOR

### 4.3.1 : Cas de la flexion

D'après les modèles simples de résistance des matériaux, la rupture d'une structure est atteinte quand la contrainte appliquée au matériau est, en au moins un point, égale à la contrainte de rupture de ce matériau. Dans le cas qui nous intéresse, la rupture doit avoir lieu au même point et pour le même effort de flexion, pour la planche réelle et pour le PE. La première étape est d'estimer, pour chaque section droite de la planche, sa contrainte de rupture  $\sigma_B(x)$  à partir du moment de flexion maximal, lui-même calculé à partir du PE :

$$\frac{\sigma_P \cdot I_P(x)}{\max(y - y_{FN}(x))} = M_{max}(x) = \frac{\sigma_B(x) \cdot I_B}{L_2/2}$$

Équation 17 : Calcul de la contrainte de rupture de la planche en une position donnée  $x$ .

On est alors en mesure, pour chaque section droite, d'estimer l'effort de flexion nécessaire pour provoquer la rupture de celle-ci, noté  $F_{max}(x)$ . Ce calcul doit bien-sûr tenir compte de la distribution des moments de flexion, qui dépend de la géométrie de la machine d'essais. Afin d'éviter de perturber ce résultat par les bruits de mesure, l'effort maximal de flexion de la planche sera défini comme la moyenne des  $N$  plus faibles valeurs de  $F_{max}$ .  $N$  sera choisi de manière à optimiser les résultats.

Connaissant l'effort maximal de flexion de la planche, on peut calculer le moment de flexion correspondant entre les deux appuis centraux, et également la contrainte maximale correspondante, toujours entre les deux appuis (voir Équation 17). C'est cette valeur de contrainte qui sera alors considérée comme le MOR de la planche.

### 4.3.2 : Cas de la traction

Il est possible d'appliquer une méthode équivalente à celle décrite précédemment. Mais encore une fois, l'effort de traction étant constant entre les mors, et les contraintes appliquées homogènes, le calcul s'en trouve fortement simplifié. Le MOR s'exprime dans ce cas de la manière suivante :

$$MOR = \frac{1}{A_B} \min_N [\Sigma_P(x) \cdot A_P(x)]$$

Équation 18 : Calcul de la contrainte de rupture de la planche en une position donnée  $x$ .



## 5. Résultats

Le modèle du PE a été testé sur un ensemble de plus de 3000 planches de différentes essences européennes, sollicitées en flexion 4 points ou en traction axiale. La géométrie des machines d'essais destructifs correspond au mode opératoire défini par la norme EN 408 [105]. Nous avons identifié trois méthodes de mise en œuvre possible du PE, essentiellement définies par la méthode de calcul du KDR : à partir de la densité locale, à partir d'une mise en correspondance des nœuds, ou mixte. Ces trois méthodes correspondraient chacune à une utilisation possible des scanners optiques comme machines de classement mécanique.

Cette partie présente une description des lots de sciages utilisés, ainsi que des précisions concernant les méthodes de mise en œuvre de ce modèle. Enfin, les résultats obtenus par le modèle du Profilé Equivalent seront exprimés en terme de coefficients de détermination  $R^2$  entre les valeurs estimées par le modèle et mesurées par essais destructifs, puis comparées aux résultats obtenus par la méthode du KAR.

### 5.1 Méthodes

#### 5.1.1 : Combinaisons de machines

Les résultats fournis dans la suite de cette partie correspondent à deux combinaisons de machines permettant de mesurer ou d'estimer les propriétés mécaniques des sciages. La première, appelée « E » est uniquement constituée du E-Scan. Celui-ci mesure le MOE des sciages par analyse vibratoire, et l'estimation du MOR est réalisée par simple correction affine du MOE. La seconde, que l'on notera par la suite « C », correspond au scanner optique CombiScan+, utilisé seul dans l'estimation du MOE et du MOR. Ce scanner est équipé des éléments standards proposés par Luxscan Technologies, à savoir quatre caméras IVP, quatre caméras couleur, et une caméra X. La dernière combinaison de machines, appelée « C+E » est constituée du CombiScan+ associé au E-Scan. Dans ce cas, le calcul du MOR des sciages prend en compte la nodosité mesurée à l'aide du scanner optique, ainsi que le MOE qui est quant à lui mesuré par le E-Scan.

#### 5.1.2 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode X-0

Parmi les trois méthodes de calcul du KDR, celle-ci est la plus simple et rapide à mettre en œuvre. En effet, la mesure du KDR est effectuée à partir de l'information locale de densité obtenue par rayons X (voir partie 2, p. 68), ce qui ne nécessite pas d'étape de détection des nœuds, et ne dépend pas de l'état de surface des sciages. La résolution spatiale choisie, de même que pour les méthodes M-0 et XM-0, est de 5mm selon  $\underline{X}$  et de 2mm selon  $\underline{Y}$ .

Le couple de paramètres  $f_1$  et  $f_2$ , permettant de définir les densités du bois sain et des nœuds, est ici optimisé indépendamment pour chaque combinaison de machine, chaque lot de sciages, et chaque propriété mécanique estimée.

#### 5.1.3 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode M-0

Cette méthode consiste à utiliser l'algorithme de mise en correspondance des nœuds (knots Matching) établi par Roblot [1]. Celui-ci fournit, pour chaque nœud, le ou les rectangles encadrant le défaut sur chaque face et issus de l'étape de détection antérieure. Il

est alors possible de définir deux polygones plans, qui correspondent respectivement aux projections du nœud dans les plans ( $Y, Z$ ) et ( $X, Z$ ). Les sommets de chaque polygone sont alors ordonnés dans le sens trigonométrique. Le calcul du KDR revient donc à tester l'inclusion de chaque point du sciage dans le nœud, c'est-à-dire l'orientation du point par rapport à chaque vecteur défini par deux sommets successifs de chaque polygone (Figure 38). Cette opération est alors répétée pour chaque nœud.

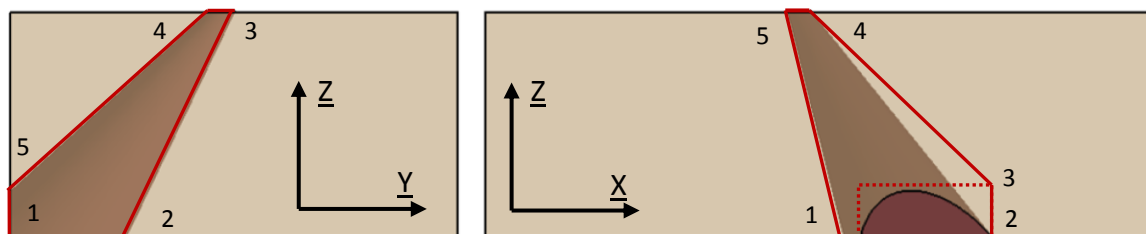


Figure 38 : Polygones correspondant à la projection d'un nœud sur les plans ( $Y, Z$ ) et ( $X, Z$ ).

Cette méthode présente l'avantage évident de ne pas être soumise à des hypothèses aussi fortes que la précédente. On peut ainsi en attendre une plus grande précision dans la mesure du KDR. Cependant, l'étape de détection des nœuds peut être rapidement mise en défaut dans les cas où l'aspect des faces des sciages serait dégradé. De plus, la Figure 38 montre que le fait d'utiliser des rectangles, afin d'encadrer les défauts, peut entraîner une surestimation de la taille de ces derniers selon l'axe  $X$ .

#### 5.1.4 : Calcul du Knots Depth Ratio : méthode XM-0

Cette dernière méthode de calcul résulte simplement de l'association des méthodes X-0 et M-0, tout en utilisant une analyse de texture LBP afin de pré-localiser les nœuds sur les images X. Pour chaque propriété mécanique, la méthode offrant les meilleures performances a été retenue. Ainsi, le MOE de chaque sciage est défini d'après la mise en correspondance des nœuds. Cependant, dans les zones identifiées par leur texture comme appartenant à un nœud, mais où la mise en correspondance n'en a trouvé aucun, alors c'est la méthode X-0 qui est appliquée.

A l'inverse, pour l'estimation du MOR, c'est la méthode X-0 qui est appliquée. Dans ce cas, il se trouve qu'il est préférable de ne pas filtrer les valeurs de KDR en fonction des positions des nœuds identifiées par leur texture. Ceci a tendance à légèrement dégrader les résultats. Notons également que, dans l'estimation des deux propriétés mécaniques, l'information de texture dans le calcul de la densité du bois sain n'a quasiment pas d'influence sur le résultat final.

#### 5.1.5 : Optimisation des paramètres

Nous avons vu que le calcul du KDR à partir de l'information de densité locale était défini par deux paramètres, que nous avons appelés  $f_1$  et  $f_2$  (voir Figure 34, p. 71). Par ailleurs, une fois cette étape achevée, l'estimation du MOE puis du MOR fait elle aussi appel à deux couples de paramètres que nous avons appelés respectivement  $(s_E, p)$  et  $(\alpha, N)$ . Les détails des rôles de chacun des paramètres peuvent être trouvés pp. 74, 76 et 78.

Nous avons donc au plus quatre paramètres à définir pour chaque lot de sciages, chaque combinaison de machines, chaque mode de sollicitation et chaque propriété mécanique. La méthode d'optimisation retenue s'apparente à une automatisation d'un processus de remontée du gradient. On fait d'abord varier le premier paramètre d'un pas constant afin de maximiser le coefficient de détermination entre les valeurs prédites et les valeurs mesurées. La même opération est répétée pour les trois autres paramètres, puis le pas de variation est réduit, et l'opération est réitérée. Le processus est arrêté après un certain nombre de boucles, ou bien si un extremum local a été atteint. Il est évident qu'il ne s'agit pas là d'un algorithme optimisé en termes de vitesse de convergence. Cependant, celui-ci nous a semblé fournir de bons résultats en termes de  $R^2$  atteints et en temps de calcul.

## 5.2 Lots de sciages testés

Ce modèle a pu être testé sur sept lots de sciages de différentes sections et longueurs, eux-mêmes constitués de trois essences différentes. Sur la totalité des pièces, environ les trois quarts ont par la suite été sollicités en flexion, et un quart en traction. Malheureusement, tous ces lots ont été testés à des dates différentes et sur des scanners différents. Il en résulte que les méthodes M-0 et XM-0 n'ont pas pu être appliquées dans certains cas. Le Tableau 3 résume les caractéristiques de chacun de ces lots :

| LOT   | ESSENCE | N Total | N Flexion | N Traction | X-0  | M-0  | XM-0 |
|-------|---------|---------|-----------|------------|------|------|------|
| S1    | Epicéa  | 199     | 199       | -          | Oui  | Oui  | Oui  |
| D2    | Douglas | 191     | 191       | -          | Oui  | Oui  | Oui  |
| P3    | Pin     | 423     | 423       | -          | Oui  | Non  | Non  |
| P4    | Pin     | 412     | 206       | 206        | Oui  | Non  | Non  |
| S5    | Epicéa  | 422     | 210       | 212        | Oui  | Oui  | Non  |
| S6    | Epicéa  | 697     | 341       | 356        | Oui  | Oui  | Oui  |
| S7    | Epicéa  | 680     | 680       | -          | Oui  | Oui  | Oui  |
| TOTAL |         | 3024    | 2250      | 774        | 3024 | 2189 | 1767 |

Tableau 3 : Description des différents lots de sciages testés

## 5.3 Coefficients de détermination $R^2$

Les coefficients de détermination  $R^2$  présentés ci-dessous ont été établis pour chaque combinaison de machines, chaque méthode d'estimation, chaque lot de sciages et chaque propriété mécanique. Cependant, les valeurs moyennes et extrêmes des  $R^2$  ne sont pas calculées sur l'ensemble des lots, mais uniquement sur S1, D2, S6 et S7. Cela nous permettra de ne pas introduire de biais dans la comparaison entre les différentes méthodes. Une synthèse nous permettra ensuite de dégager des tendances de ces résultats.

### 5.3.1 : Modèle du Knot Area Ratio 1D

Cette méthode est directement issue des travaux de Roblot [1], et constitue pour nous la méthode de référence en termes de performances. Le modèle retenu correspond au KAR 1D associé à la valeur de densité, identifié par l'auteur comme offrant les valeurs de  $R^2$  les plus élevées.

| KAR 1D   |          | MOE |     |     | MOR |     |     |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |          | E   | C   | C+E | E   | C   | C+E |
| S1       | Flexion  | 85% | 41% | 85% | 42% | 36% | 52% |
| D2       | Flexion  | 84% | 64% | 84% | 58% | 62% | 71% |
| P3       | Flexion  | 88% | 72% | 88% | 74% | 70% | 77% |
| P4       | Flexion  | 84% | 67% | 84% | 58% | 59% | 69% |
|          | Traction | 82% | 68% | 82% | 64% | 59% | 71% |
| S5       | Flexion  | 88% | 70% | 88% | 54% | 48% | 61% |
|          | Traction | 70% | 60% | 70% | 51% | 54% | 61% |
| S6       | Flexion  | 88% | 67% | 88% | 53% | 56% | 65% |
|          | Traction | 91% | 77% | 91% | 58% | 63% | 69% |
| S7       | Flexion  | 85% | 63% | 85% | 53% | 50% | 62% |
| VAL. MIN |          | 84% | 41% | 84% | 42% | 36% | 52% |
| MOYENNE  |          | 87% | 62% | 87% | 53% | 53% | 64% |
| VAL. MAX |          | 91% | 77% | 91% | 58% | 63% | 71% |

Tableau 4 : Résultats expérimentaux du modèle KAR 1D (R<sup>2</sup>)

### 5.3.2 : Modèle du PE X-0

Le Tableau 5 nous montre que le modèle du PE associé à une mesure du KDR par densité locale (rayons X) fournit en moyenne de meilleurs résultats que le modèle du KAR 1D. De même, l'écart entre les valeurs de R<sup>2</sup> minimales et maximales se trouve réduit.

| PE X-0   |          | MOE |     |     | MOR |     |     |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |          | E   | C   | C+E | E   | C   | C+E |
| S1       | Flexion  | 85% | 61% | 85% | 42% | 48% | 56% |
| D2       | Flexion  | 84% | 72% | 84% | 58% | 73% | 74% |
| P3       | Flexion  | 88% | 71% | 88% | 74% | 77% | 80% |
| P4       | Flexion  | 84% | 75% | 84% | 58% | 70% | 74% |
|          | Traction | 82% | 63% | 82% | 64% | 64% | 73% |
| S5       | Flexion  | 88% | 66% | 88% | 54% | 52% | 67% |
|          | Traction | 70% | 57% | 70% | 51% | 52% | 61% |
| S6       | Flexion  | 88% | 61% | 88% | 53% | 47% | 60% |
|          | Traction | 91% | 68% | 91% | 58% | 61% | 69% |
| S7       | Flexion  | 85% | 63% | 85% | 53% | 48% | 60% |
| VAL. MIN |          | 84% | 61% | 84% | 42% | 47% | 56% |
| MOYENNE  |          | 87% | 65% | 87% | 53% | 55% | 64% |
| VAL. MAX |          | 91% | 72% | 91% | 58% | 73% | 74% |

Tableau 5 : Résultats Expérimentaux du modèle PE X-0 (R<sup>2</sup>)

### 5.3.3 : Modèle du PE M-0

Les résultats de ce modèle nous permettent de constater que la mise en correspondance des nœuds semble être une méthode plus adaptée au calcul du MOE que l'analyse de densité locale. L'observation inverse peut être faite concernant l'estimation du MOR. Dans le cas du MOR également, le KAR 1D semble conserver l'avantage.

| PE M-0   |          | MOE |     |     | MOR |     |     |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |          | E   | C   | C+E | E   | C   | C+E |
| S1       | Flexion  | 85% | 55% | 85% | 42% | 43% | 54% |
| D2       | Flexion  | 84% | 68% | 84% | 58% | 63% | 69% |
| P3       | Flexion  | 88% | -   | 88% | 74% | -   | -   |
| P4       | Flexion  | 84% | -   | 84% | 58% | -   | -   |
|          | Traction | 82% | -   | 82% | 64% | -   | -   |
| S5       | Flexion  | 88% | 71% | 88% | 54% | 50% | 62% |
|          | Traction | 70% | 60% | 70% | 51% | 53% | 59% |
| S6       | Flexion  | 88% | 68% | 88% | 53% | 55% | 63% |
|          | Traction | 91% | 76% | 91% | 58% | 59% | 65% |
| S7       | Flexion  | 85% | 60% | 85% | 53% | 49% | 60% |
| VAL. MIN |          | 84% | 55% | 84% | 42% | 43% | 54% |
| MOYENNE  |          | 87% | 66% | 87% | 53% | 54% | 62% |
| VAL. MAX |          | 91% | 76% | 91% | 58% | 63% | 69% |

Tableau 6 : Résultats Expérimentaux du modèle PE M-0 ( $R^2$ )

### 5.3.4 : Modèle du PE XM-0

Le Tableau 7 présente les résultats obtenus par le modèle XM-0, combinant les avantages des modèles X-0 et M-0. On constate que les valeurs moyennes de  $R^2$  obtenues sont, dans tous les cas, au moins égales aux plus fortes valeurs rencontrées précédemment. Ce modèle peut donc être considéré comme le meilleur des trois.

| PE XM-0  |          | MOE |     |     | MOR |     |     |
|----------|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|          |          | E   | C   | C+E | E   | C   | C+E |
| S1       | Flexion  | 85% | 57% | 85% | 42% | 51% | 56% |
| D2       | Flexion  | 84% | 71% | 84% | 58% | 74% | 74% |
| P3       | Flexion  | 88% | -   | 88% | 74% | -   | -   |
| P4       | Flexion  | 84% | -   | 84% | 58% | -   | -   |
|          | Traction | 82% | -   | 82% | 64% | -   | -   |
| S5       | Flexion  | 88% | -   | 88% | 54% | -   | -   |
|          | Traction | 70% | -   | 70% | 51% | -   | -   |
| S6       | Flexion  | 88% | 69% | 88% | 53% | 57% | 61% |
|          | Traction | 91% | 75% | 91% | 58% | 63% | 69% |
| S7       | Flexion  | 85% | 61% | 85% | 53% | 52% | 60% |
| VAL. MIN |          | 84% | 57% | 84% | 42% | 51% | 56% |
| MOYENNE  |          | 87% | 67% | 87% | 53% | 59% | 64% |
| VAL. MAX |          | 91% | 75% | 91% | 58% | 74% | 74% |

Tableau 7 : Résultats Expérimentaux du modèle PE XM-0 ( $R^2$ )

### 5.3.5 : Synthèse des résultats

Il est assez difficile de mesurer l'apport des modèles de PE X-0, M-0 et XM-0 par rapport au KAR 1D à partir des tableaux précédents. Ceci est d'autant plus vrai que la moyenne des  $R^2$  seule n'est pas un indicateur suffisant pour évaluer les performances de ces méthodes appliquées à des lots d'essences et d'origines variées. L'observation des valeurs minimales et maximales des  $R^2$  obtenus permet ainsi d'évaluer leur stabilité.

La Figure 39 représente les valeurs moyennes et extrêmes observées dans les tableaux précédents. D'une manière générale, on constate que les méthodes X-0 et surtout XM-0 sont mieux adaptés à l'estimation du MOR que ceux utilisant une mise en correspondance des nœuds. Ces deux modèles étant quasiment identiques, il est normal qu'ils fournissent des résultats très proches dans le cas de la combinaison de machines C+E. En revanche, leur différence est nettement plus marquée pour le CombiScan+ utilisé seul : les résultats de l'estimation du MOE ont en effet un impact direct sur l'estimation du MOR. Il est donc assez évident dans ce cas que le calcul du KDR à partir de la densité locale est la solution technologique la plus pertinente.

Il est plus difficile, en revanche, d'établir un choix concernant la méthode d'estimation du MOE dans le cas du CombiScan+ seul. On remarque que la mise en correspondance des nœuds donne de meilleurs résultats en moyenne que les rayons X. Elle permet également d'améliorer de façon significative l'estimation du MOR par la suite, dans le cas de la méthode XM-0. En revanche, la méthode X-0 se montre bien plus stable : l'étendue des valeurs de  $R^2$  observées est plus réduite, ce qui pourrait s'expliquer par une qualité des faces des sciages assez variables d'un lot à l'autre, ce qui influe sur la détection des nœuds.

En définitive, le choix de la méthode de calcul du PE devra s'effectuer entre la X-0 et la XM-0. Les résultats seuls ne permettant pas de les distinguer, ce choix pourra être effectué à partir d'autres critères, tels que l'utilisation finale du scanner optique (exclusivement classement mécanique, ou associé à un classement d'aspect), la fiabilité d'une éventuelle détection de nœuds sur des pièces dont les faces peuvent être sales et/ou mal rabotées, la simplicité de mise au point de la machine, etc.

## **5.4 Influence du champ de contraintes**

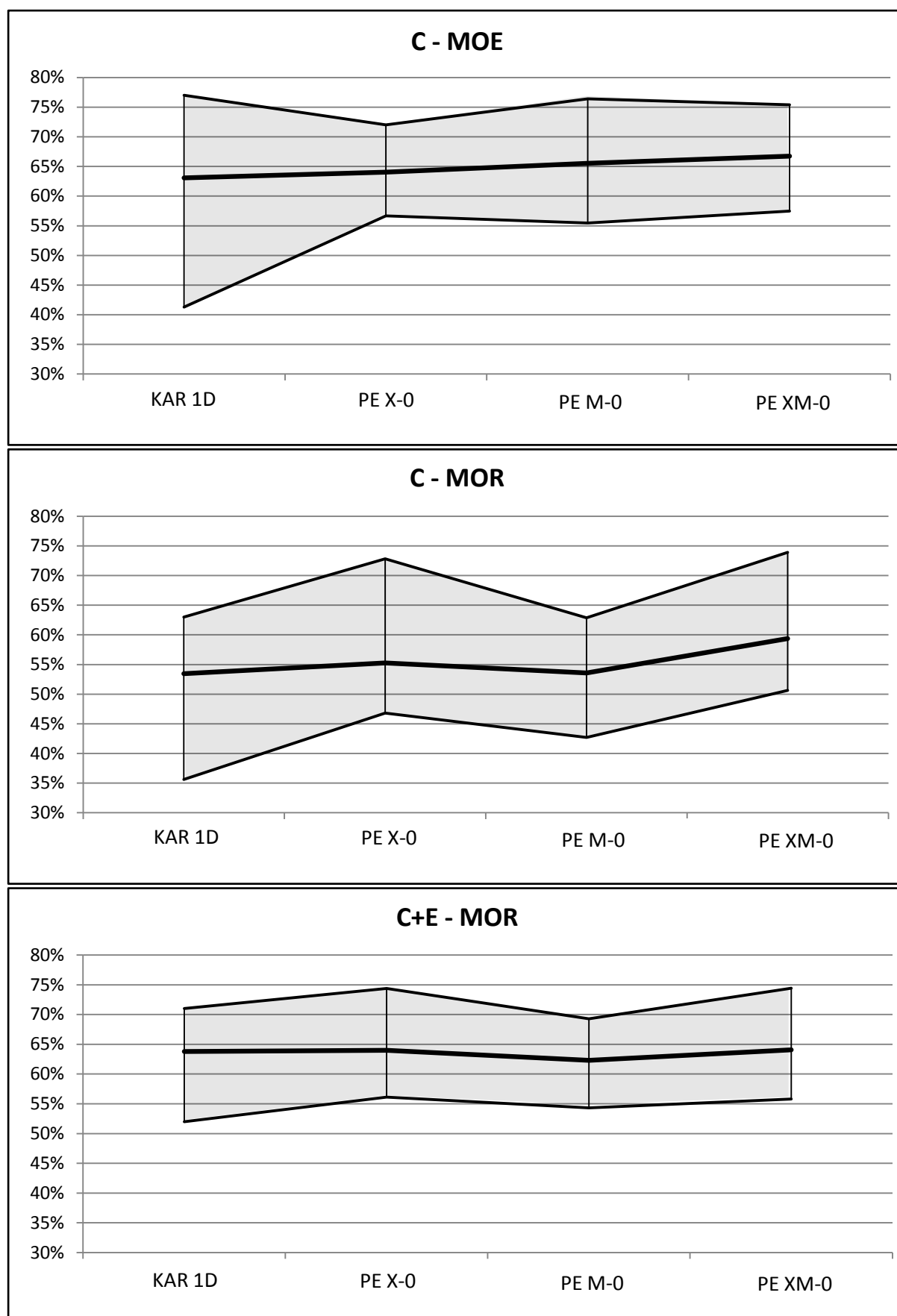
Les résultats présentés dans le paragraphe précédent montrent que les modèles mis au point au cours de cette étude ont permis d'améliorer les résultats d'estimation des propriétés mécaniques des sciages. En revanche, ils ne permettent pas de conclure sur l'intérêt intrinsèque du modèle du PE. C'est ce que nous allons étudier au cours de cette partie.

### **5.4.1 : Méthode**

L'intérêt du modèle du PE réside dans sa capacité à tenir compte de la distribution des contraintes de flexion ou de traction, selon le cas, dans l'estimation du MOE et du MOR. Mais aucun résultat ne permet, jusqu'à présent, de vérifier l'influence de ce champ de contraintes sur les résultats finaux. Une manière de tester l'intérêt de ce modèle consiste donc à estimer les propriétés mécaniques des sciages à partir d'un champ de contraintes volontairement erroné.

### **5.4.2 : Résultats**

Le Tableau 8 permet de dresser deux observations importantes. La première est que les valeurs de  $R^2$  obtenues varient de manière significative en fonction du mode de sollicitation utilisé dans les calculs. La prise en compte d'un champ de contraintes approprié dans l'estimation du MOE et du MOR permet donc d'améliorer les résultats correspondants dans le cas de la flexion. Ceci tend à confirmer l'intérêt du modèle du PE par rapport au KAR, en particulier dans les cas des pièces sollicitées en flexion.



**Figure 39 : Comparaison des  $R^2$  des modèles de KAR 1D et de PE. Courbe du haut : valeur max. Courbe du milieu : valeur moyenne. Courbe du bas : valeur min.**



Nous avons donc effectué ce test à partir du modèle du PE X-0. Nous connaissons déjà les résultats obtenus à partir du champ de contraintes approprié. Nous avons donc recalculé l'ensemble des valeurs en inversant les modes de sollicitation : les pièces testées en flexion ont été calculées à partir du modèle du PE appliqué à la traction, et inversement. Notons que lors de ce test, les valeurs extrêmes et moyennes des  $R^2$  ont été calculées sur l'ensemble des lots.

La seconde observation est plus surprenante : l'estimation des propriétés mécaniques des pièces sollicitées en traction donne de meilleurs résultats si le calcul est effectué à partir d'un champ de contraintes correspondant à de la flexion.

| PE X-0   |          | C – MOE |     | C – MOR |     | C+E – MOR |     |
|----------|----------|---------|-----|---------|-----|-----------|-----|
|          |          | =       | X   | =       | X   | =         | X   |
| S1       | Flexion  | 61%     | 47% | 48%     | 41% | 56%       | 50% |
| D2       | Flexion  | 72%     | 65% | 73%     | 66% | 74%       | 68% |
| P3       | Flexion  | 71%     | 69% | 77%     | 73% | 80%       | 79% |
| P4       | Flexion  | 75%     | 73% | 70%     | 69% | 74%       | 71% |
|          | Traction | 63%     | 63% | 64%     | 69% | 73%       | 78% |
| S5       | Flexion  | 66%     | 61% | 52%     | 50% | 67%       | 68% |
|          | Traction | 57%     | 58% | 52%     | 52% | 61%       | 59% |
| S6       | Flexion  | 61%     | 46% | 47%     | 45% | 60%       | 58% |
|          | Traction | 68%     | 73% | 61%     | 65% | 69%       | 73% |
| S7       | Flexion  | 63%     | 56% | 48%     | 45% | 60%       | 58% |
| VAL. MIN |          | 57%     | 46% | 47%     | 41% | 56%       | 50% |
| MOYENNE  |          | 66%     | 61% | 59%     | 57% | 67%       | 66% |
| VAL. MAX |          | 75%     | 73% | 77%     | 73% | 80%       | 79% |

Tableau 8 : Résultats du test de l'intérêt du modèle du PE. Colonnes « = » : modes de sollicitation réels. Colonnes « x » : modes de sollicitation volontairement erronés.

Nous ne sommes pas en mesure, à l'heure actuelle, de fournir une interprétation de ce phénomène. Des tests similaires après prise en compte de la pente de fil (voir p. 106) nous permettent simplement d'affirmer que la direction des fibres, qui suit pourtant un schéma particulier autour des nœuds situés à proximité des rives, n'en est pas responsable. On constate également, après optimisation, que la modification du champ de contraintes s'accompagne d'une forte variation des paramètres  $f_1$  et  $f_2$ , modifiant ainsi les valeurs de KDR. Nous pensons que ce phénomène peut être dû à un comportement non-linéaire du bois à la rupture, qui ne peut pas être pris en compte par ce modèle.

## 5.5 Valeurs de $R^2$ après correction du champ de contraintes en traction

Les résultats du paragraphe précédent ont montré que l'estimation du MOE et du MOR des pièces sollicitées en traction s'avère plus précise dans le cas où le calcul est effectué à partir d'un champ de contraintes correspondant à de la flexion, du moins dans le cas du modèle du PE X-0. Il nous reste donc à vérifier les performances de cette nouvelle méthode sur les modèles PE M-0 et PE XM-0.

Pour plus de clarté, ces nouvelles méthodes seront appelées X-1, M-1 et XM-1. Bien évidemment, celles-ci correspondent respectivement aux méthodes X-0, M-0 et XM-0 (voir définitions pp. 79 à 80). Précisons ici que seule la méthode de calcul des pièces en traction a

été modifiée. L'objectif étant de comparer ces méthodes deux à deux, les valeurs moyennes et extrêmes des  $R^2$  sont calculées sur l'ensemble des lots disponibles dans chaque cas.

### 5.5.1 : Modèle du PE X-1

Le Tableau 9 montre les résultats obtenus par les modèles de PE X-0 et X-1. Les valeurs de  $R^2$  qu'il contient sont celles du Tableau 8, et n'apportent donc pas d'information particulière. On constate simplement une amélioration pour des pièces de traction.

| PE X-0 vs PE X-1 |          | PE X-0  |         |           | PE X-1  |         |           |
|------------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|                  |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR |
| S1               | Flexion  | 61%     | 48%     | 56%       | 61%     | 48%     | 56%       |
| D2               | Flexion  | 72%     | 73%     | 74%       | 72%     | 73%     | 74%       |
| P3               | Flexion  | 71%     | 77%     | 80%       | 71%     | 77%     | 80%       |
| P4               | Flexion  | 75%     | 70%     | 74%       | 75%     | 70%     | 74%       |
|                  | Traction | 63%     | 64%     | 73%       | 63%     | 69%     | 78%       |
| S5               | Flexion  | 66%     | 52%     | 67%       | 66%     | 52%     | 67%       |
|                  | Traction | 57%     | 52%     | 61%       | 58%     | 52%     | 59%       |
| S6               | Flexion  | 61%     | 47%     | 60%       | 61%     | 47%     | 60%       |
|                  | Traction | 68%     | 61%     | 69%       | 73%     | 65%     | 73%       |
| S7               | Flexion  | 63%     | 48%     | 60%       | 63%     | 48%     | 60%       |
| VAL. MIN         |          | 57%     | 47%     | 56%       | 58%     | 47%     | 56%       |
| MOYENNE          |          | 66%     | 59%     | 67%       | 66%     | 60%     | 68%       |
| VAL. MAX         |          | 75%     | 77%     | 80%       | 75%     | 77%     | 80%       |

Tableau 9 : Résultats Expérimentaux du modèle PE X-1 comparés au modèle PE X-0

### 5.5.2 : Modèle du PE M-1

Dans le cas du modèle PE M-1, les résultats sont pratiquement équivalents à ceux du modèle M-0, et sont même légèrement moins bons. Ceci est probablement dû au fait que pour ce modèle, les valeurs de KDR sont fixées par la mise en correspondance des nœuds. Dans ce cas, il est donc inutile de calculer les pièces de traction comme des pièces de flexion.

| PE M-0 vs PE M-1 |          | PE M-0  |         |           | PE M-1  |         |           |
|------------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|                  |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR |
| S1               | Flexion  | 55%     | 43%     | 54%       | 55%     | 43%     | 54%       |
| D2               | Flexion  | 68%     | 63%     | 69%       | 68%     | 63%     | 69%       |
| P3               | Flexion  | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
| P4               | Flexion  | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
|                  | Traction | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
| S5               | Flexion  | 71%     | 50%     | 62%       | 71%     | 50%     | 62%       |
|                  | Traction | 60%     | 53%     | 59%       | 57%     | 50%     | 57%       |
| S6               | Flexion  | 68%     | 55%     | 63%       | 68%     | 55%     | 63%       |
|                  | Traction | 76%     | 59%     | 65%       | 75%     | 60%     | 67%       |
| S7               | Flexion  | 60%     | 49%     | 60%       | 60%     | 49%     | 60%       |
| VAL. MIN         |          | 55%     | 43%     | 54%       | 55%     | 43%     | 54%       |
| MOYENNE          |          | 66%     | 53%     | 62%       | 65%     | 53%     | 62%       |
| VAL. MAX         |          | 76%     | 63%     | 69%       | 75%     | 63%     | 69%       |

Tableau 10 : Résultats Expérimentaux du modèle PE M-1 comparés au modèle PE M-0

### 5.5.3 : Modèle du PE XM-1

Dans le cas du modèle PE XM-1, les valeurs de KDR sont à nouveau en partie obtenues par l'information de densité locale. Le tableau ci-dessous nous montre que ce modèle donne de meilleurs résultats que le PE XM-0 pour les pièces de traction.

| PE XM-0 vs PE XM-1 |          | PE XM-0 |         |           | PE XM-1 |         |           |
|--------------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|                    |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR |
| S1                 | Flexion  | 57%     | 51%     | 56%       | 57%     | 51%     | 56%       |
| D2                 | Flexion  | 71%     | 74%     | 74%       | 71%     | 74%     | 74%       |
| P3                 | Flexion  | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
| P4                 | Flexion  | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
|                    | Traction | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
| S5                 | Flexion  | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
|                    | Traction | -       | -       | -         | -       | -       | -         |
| S6                 | Flexion  | 69%     | 57%     | 61%       | 69%     | 57%     | 61%       |
|                    | Traction | 75%     | 63%     | 69%       | 77%     | 67%     | 73%       |
| S7                 | Flexion  | 61%     | 52%     | 60%       | 61%     | 52%     | 60%       |
| VAL. MIN           |          | 57%     | 51%     | 56%       | 57%     | 51%     | 56%       |
| MOYENNE            |          | 67%     | 59%     | 64%       | 67%     | 60%     | 65%       |
| VAL. MAX           |          | 75%     | 74%     | 74%       | 77%     | 74%     | 74%       |

Tableau 11 : Résultats Expérimentaux du modèle PE XM-1 comparés au modèle PE XM-0

## 5.6 Tests de robustesse par validation croisée

La certification d'une machine de classement mécanique doit être réalisée séparément pour différentes essences et différentes régions de croissance des arbres. Compte tenu de l'investissement que représente l'accès à une telle certification, il serait intéressant de pouvoir transposer les réglages réalisés pour une essence et une origine données à une production d'une même essence mais d'une origine différente. Dans ce cas, le processus d'homologation s'en trouve fortement simplifié.

Dans notre cas, cela impliquerait d'utiliser le même jeu de paramètres ( $f_1$ ,  $f_2$ ,  $s_E$ ,  $p$ ,  $\alpha$  et  $N$ ) pour tous les lots d'une même essence. Or, les résultats donnés précédemment ont fait l'objet d'une optimisation séparée pour les différents lots. Rien ne permet donc d'affirmer que ces résultats seraient conservés avec des jeux de paramètres non optimaux. Bien qu'il soit évident que les valeurs de  $R^2$  seraient réduites, l'objectif de ces tests de robustesse est de nous assurer que les performances du modèle ne soient pas trop dégradées.

### 5.6.1 : Méthode

Afin de vérifier la robustesse du modèle du PE, deux tests de validation croisée ont été effectués à partir de la méthode X-1 et sur les lots d'épicéa. Un premier test a été effectué uniquement sur le lot S6 et séparément pour les deux modes de sollicitation. Cinq groupes de sciages ont été définis à partir de celui-ci : le premier est constitué de l'ensemble du lot, puis l'ensemble des sciages a été réparti aléatoirement sur les quatre autres. Pour chacun de ces cinq groupes, une optimisation des paramètres a été réalisée, puis le jeu de paramètres correspondant a été testé sur les quatre autres groupes.

Un second test de validation croisée a été réalisé, cette fois-ci entre les différents lots d'épicéa, plus un lot regroupant l'ensemble des pièces d'épicéa de cette étude. La même

méthode que précédemment a été appliquée : optimisation des paramètres sur un lot, puis évaluation des  $R^2$  obtenus par ces paramètres sur les autres lots. Nous serons alors en mesure de vérifier la robustesse du modèle au sein d'une même essence et pour différentes origines géographiques des bois.

### 5.6.2 : Validation croisée appliquée au lot S6

Les résultats du Tableau 12 doivent être lus par colonnes, c'est-à-dire que l'on observe pour chaque sous-lot de sciages les  $R^2$  obtenus à l'aide des paramètres optimisés pour un autre sous-lot. Notons ici que ce test est volontairement assez sévère : chaque sous-lot A, B, C ou D est constitué de 85 à 89 pièces, ce qui est en principe bien trop faible pour établir un réglage (la norme EN 14081 exige 900 pièces pour une première homologation).

| C – MOE FLEXION |                     |      |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR      | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                 | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6              | 61%                 | 59%  | 61%  | 64%  | 61%  |
| S6 A            | 61%                 | 61%  | 63%  | 64%  | 60%  |
| S6 B            | 60%                 | 60%  | 64%  | 62%  | 56%  |
| S6 C            | 60%                 | 57%  | 59%  | 64%  | 59%  |
| S6 D            | 61%                 | 60%  | 61%  | 63%  | 63%  |
| Ampl.           | 1 pt                | 4 pt | 5 pt | 2 pt | 7 pt |

| C – MOE TRACTION |                     |      |      |      |      |
|------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR       | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                  | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6               | 73%                 | 79%  | 64%  | 69%  | 83%  |
| S6 A             | 73%                 | 80%  | 62%  | 70%  | 83%  |
| S6 B             | 73%                 | 77%  | 66%  | 67%  | 83%  |
| S6 C             | 70%                 | 77%  | 57%  | 72%  | 78%  |
| S6 D             | 74%                 | 78%  | 65%  | 69%  | 84%  |
| Ampl.            | 4 pt                | 3 pt | 9 pt | 5 pt | 6 pt |

| C – MOR FLEXION |                     |      |       |       |       |
|-----------------|---------------------|------|-------|-------|-------|
| OPTIM POUR      | Résultats ( $R^2$ ) |      |       |       |       |
|                 | S6                  | S6 A | S6 B  | S6 C  | S6 D  |
| S6              | 47%                 | 44%  | 39%   | 45%   | 61%   |
| S6 A            | 47%                 | 46%  | 44%   | 41%   | 58%   |
| S6 B            | 43%                 | 44%  | 49%   | 33%   | 47%   |
| S6 C            | 47%                 | 44%  | 38%   | 47%   | 61%   |
| S6 D            | 46%                 | 42%  | 39%   | 45%   | 63%   |
| Ampl.           | 4 pt                | 4 pt | 11 pt | 14 pt | 16 pt |

| C – MOR TRACTION |                     |      |      |      |      |
|------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR       | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                  | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6               | 65%                 | 69%  | 63%  | 68%  | 65%  |
| S6 A             | 65%                 | 70%  | 63%  | 68%  | 63%  |
| S6 B             | 64%                 | 66%  | 65%  | 66%  | 62%  |
| S6 C             | 65%                 | 69%  | 63%  | 70%  | 62%  |
| S6 D             | 63%                 | 63%  | 61%  | 65%  | 68%  |
| Ampl.            | 2 pt                | 7 pt | 4 pt | 5 pt | 6 pt |

| C+E – MOR FLEXION |                     |      |      |      |      |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR        | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                   | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6                | 60%                 | 58%  | 58%  | 59%  | 68%  |
| S6 A              | 60%                 | 60%  | 58%  | 57%  | 68%  |
| S6 B              | 60%                 | 57%  | 62%  | 55%  | 68%  |
| S6 C              | 60%                 | 58%  | 58%  | 59%  | 66%  |
| S6 D              | 60%                 | 57%  | 57%  | 58%  | 69%  |
| Ampl.             | 0 pt                | 3 pt | 5 pt | 4 pt | 3 pt |

| C+E – MOR TRACTION |                     |       |      |      |       |
|--------------------|---------------------|-------|------|------|-------|
| OPTIM POUR         | Résultats ( $R^2$ ) |       |      |      |       |
|                    | S6                  | S6 A  | S6 B | S6 C | S6 D  |
| S6                 | 73%                 | 71%   | 74%  | 72%  | 75%   |
| S6 A               | 72%                 | 74%   | 75%  | 71%  | 70%   |
| S6 B               | 66%                 | 63%   | 78%  | 68%  | 59%   |
| S6 C               | 72%                 | 72%   | 73%  | 72%  | 73%   |
| S6 D               | 73%                 | 70%   | 73%  | 72%  | 76%   |
| Ampl.              | 7 pt                | 11 pt | 5 pt | 4 pt | 17 pt |

Tableau 12 : Résultats des tests de validation croisée appliquée au lot S6 (modèle PE X-1)

Si l'on observe uniquement les résultats du lot S6 complet, on constate que les valeurs varient finalement assez peu d'un jeu de paramètres à l'autre. L'écart entre les valeurs extrêmes ne dépasse en effet qu'une seule fois les 5 points. En revanche, l'amplitude des  $R^2$  augmente de manière catastrophique pour les différents sous-lots, dépassant les 10 points à 5 reprises et atteint même 17 points. Ce résultat est de nature à mettre en cause la

robustesse du modèle du PE. Cependant, une observation détaillée des résultats montre qu'une optimisation effectuée sur le lot complet S donne toujours des résultats très proches de l'optimum sur les différents sous-lots. Par ailleurs, on constate que les écarts importants impliquent systématiquement le sous-lot S6 B.

Bien entendu, plus le lot utilisé pour l'optimisation est large et représentatif, meilleurs seront les résultats du modèle sur une production complète. Les résultats précédents nous permettent de considérer que le modèle du PE possède une robustesse satisfaisante à condition d'effectuer l'optimisation dans des conditions appropriées.

### 5.6.3 : Validation croisée appliquées aux pièces d'épicéa

Le Tableau 13 est construit de la même manière que celui du paragraphe précédent. Notons ici que le lot S correspond à l'ensemble des pièces d'épicéa disponibles. Certains de ces lots ne comprenant pas de pièces sollicitées en traction, certaines cases des tableaux correspondants doivent être laissées vides.

| C – MOE FLEXION |                             |       |       |       |      |
|-----------------|-----------------------------|-------|-------|-------|------|
| OPTIM POUR      | Résultats (R <sup>2</sup> ) |       |       |       |      |
|                 | S                           | S1    | S5    | S6    | S7   |
| S               | 65%                         | 58%   | 60%   | 60%   | 63%  |
| S1              | 61%                         | 61%   | 41%   | 59%   | 62%  |
| S5              | 60%                         | 49%   | 66%   | 49%   | 58%  |
| S6              | 63%                         | 59%   | 52%   | 61%   | 63%  |
| S7              | 64%                         | 59%   | 55%   | 60%   | 63%  |
| Ampl.           | 5 pt                        | 11 pt | 25 pt | 12 pt | 5 pt |

| C – MOE TRACTION |                             |    |      |       |    |
|------------------|-----------------------------|----|------|-------|----|
| OPTIM POUR       | Résultats (R <sup>2</sup> ) |    |      |       |    |
|                  | S                           | S1 | S5   | S6    | S7 |
| S                | 52%                         | -  | 51%  | 71%   | -  |
| S1               | -                           | -  | -    | -     | -  |
| S5               | 42%                         | -  | 58%  | 63%   | -  |
| S6               | 49%                         | -  | 54%  | 73%   | -  |
| S7               | -                           | -  | -    | -     | -  |
| Ampl.            | 3 pt                        | -  | 7 pt | 10 pt | -  |

| C – MOR FLEXION |                             |      |      |      |      |
|-----------------|-----------------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR      | Résultats (R <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |
|                 | S                           | S1   | S5   | S6   | S7   |
| S               | 52%                         | 47%  | 52%  | 47%  | 47%  |
| S1              | 51%                         | 48%  | 47%  | 47%  | 47%  |
| S5              | 49%                         | 41%  | 52%  | 44%  | 43%  |
| S6              | 50%                         | 45%  | 48%  | 47%  | 45%  |
| S7              | 51%                         | 47%  | 49%  | 47%  | 48%  |
| Ampl.           | 3 pt                        | 7 pt | 5 pt | 3 pt | 5 pt |

| C – MOR TRACTION |                             |    |      |      |    |
|------------------|-----------------------------|----|------|------|----|
| OPTIM POUR       | Résultats (R <sup>2</sup> ) |    |      |      |    |
|                  | S                           | S1 | S5   | S6   | S7 |
| S                | 54%                         | -  | 48%  | 65%  | -  |
| S1               | -                           | -  | -    | -    | -  |
| S5               | 47%                         | -  | 52%  | 58%  | -  |
| S6               | 53%                         | -  | 44%  | 65%  | -  |
| S7               | -                           | -  | -    | -    | -  |
| Ampl.            | 7 pt                        | -  | 8 pt | 7 pt | -  |

| C+E – MOR FLEXION |                             |      |      |      |      |
|-------------------|-----------------------------|------|------|------|------|
| OPTIM POUR        | Résultats (R <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |
|                   | S                           | S1   | S5   | S6   | S7   |
| S                 | 62%                         | 55%  | 67%  | 59%  | 59%  |
| S1                | 61%                         | 56%  | 65%  | 57%  | 58%  |
| S5                | 61%                         | 53%  | 67%  | 60%  | 59%  |
| S6                | 61%                         | 53%  | 67%  | 60%  | 59%  |
| S7                | 61%                         | 54%  | 67%  | 59%  | 60%  |
| Ampl.             | 1 pt                        | 3 pt | 2 pt | 3 pt | 2 pt |

| C+E – MOR TRACTION |                             |    |      |      |    |
|--------------------|-----------------------------|----|------|------|----|
| OPTIM POUR         | Résultats (R <sup>2</sup> ) |    |      |      |    |
|                    | S                           | S1 | S5   | S6   | S7 |
| S                  | 68%                         | -  | 59%  | 73%  | -  |
| S1                 | -                           | -  | -    | -    | -  |
| S5                 | 67%                         | -  | 59%  | 71%  | -  |
| S6                 | 68%                         | -  | 58%  | 73%  | -  |
| S7                 | -                           | -  | -    | -    | -  |
| Ampl.              | 1 pt                        | -  | 1 pt | 2 pt | -  |

Tableau 13 : Résultats des tests de validation croisée appliquée aux différents lots d'épicéa (PE X-1)

On remarque immédiatement que l'amplitude des  $R^2$  relevés est très importante dans le cas de l'estimation du MOE, bien que l'estimation du MOR reste relativement stable. De même que dans le Tableau 12, le jeu de paramètres correspondant au lot S convient assez bien à tous les autres. Ce constat est particulièrement intéressant puisqu'il permet d'envisager, si besoin, une optimisation globale, au mieux par essence, à condition d'utiliser à cet effet des bois d'origines différentes. On remarque cependant, que le lot S5 semble particulièrement incompatible avec les autres. Il est intéressant ici de noter que les bois de celui-ci sont d'origine suédoise, alors que les autres ont été prélevés à des latitudes bien différentes : France, Slovaquie, Ukraine et Roumanie. Ceci pourrait peut-être expliquer l'incompatibilité de ce lot avec les paramètres issus de tous les autres.

Ces résultats indiquent une fois de plus que le modèle du Profilé Equivalent est suffisamment robuste malgré l'étape d'optimisation des paramètres. Bien que l'idéal soit d'effectuer une optimisation pour chaque origine géographique de bois, nous avons vu qu'il est possible de trouver un réglage convenant plutôt bien à la plupart des individus d'une même essence. Encore une fois, le choix du lot utilisé pour l'optimisation sera déterminant pour les résultats globaux de la machine de classement.

## 6. Discussion

### 6.1 Intérêt de l'utilisation des rayons X

#### 6.1.1 : Mesure de densité

Le premier avantage que l'on peut tirer de l'utilisation des rayons X, dans le classement mécanique des sciages, réside dans sa capacité à effectuer une mesure de densité avec une précision tout à fait honorable. Cette méthode permet donc de se dispenser d'un système de pesée, statique ou dynamique, dans les cas où un scanner optique est utilisé comme machine de classement mécanique, et pour des performances équivalentes. Par ailleurs, une mesure de densité, et plus généralement des propriétés locales des sciages, permettra le cas échéant une optimisation de ces derniers par tronçonnage et/ou délignage. Cependant, la mesure de densité par rayons X n'est pas exempte de sources d'erreur. En effet, l'épaisseur de chaque sciage doit être constant, ou à défaut mesurée en chaque point, car nous avons vu que la valeur de densité locale dépend directement de ce paramètre. De faibles variations sont toutefois acceptables, et définissent en partie la précision du système. De même, le taux d'humidité doit être à peu près constant d'une pièce à l'autre. Il peut arriver que cette condition soit difficile à réaliser pour des raisons logistiques. Dans ce cas, la mesure de densité peut être corrigée par une mesure d'humidité préalable. Globalement, on peut donc dire que les principales sources de dispersion des mesures peuvent être corrigées assez facilement par des moyens relativement simples. Une étude détaillée de la mesure de densité par rayons X et de l'impact du vieillissement combiné de la source et du capteur est présentée en annexe.

Si l'on souhaite implémenter cette technologie dans une machine de classement mécanique, il reste deux inconnues de taille qu'il conviendrait, en toute rigueur, de déterminer. Premièrement, on ne sait pas à l'heure actuelle définir un réglage de puissance (tension et intensité) de la source X autrement que par tâtonnement. Nous avons vu que le seul critère concernant la mesure de densité est que l'image obtenue ne doit saturer ni dans

le blanc, ni dans le noir. Si la production de sciage comprend de fortes variations d'épaisseur et de densité, ceci peut s'avérer problématique, bien que le problème ne se soit jamais posé au cours de cette étude. De même, rien ne permet d'affirmer que la même calibration puisse être transposable d'une essence à l'autre.

### **6.1.2 : Mesure du KDR**

Le second intérêt de cette méthode est qu'elle autorise une mesure locale de la densité des sciages, et permet donc d'estimer la valeur de KDR en chaque point. Comme nous l'avons vu, cette estimation ne peut être réalisée que sous certaines hypothèses : densités du bois sain et des nœuds constantes sur chaque pièce et proportionnelles entre elles. Il est clair que ces hypothèses sont fortes et entraînent sans aucun doute des erreurs de mesure. Ces erreurs peuvent néanmoins être réduites en identifiant par traitement d'images les zones des sciages pouvant potentiellement contenir des nœuds, ce qui permet d'éviter une surestimation du KDR dans les zones de bois clair. En revanche, aucune méthode, permettant de réduire l'erreur de mesure dans les zones contenant effectivement des nœuds, n'a actuellement été définie. L'autre méthode d'estimation du KDR actuellement connue est la mise en correspondance des nœuds. Celle-ci présente l'avantage d'être fondée sur des hypothèses bien moins fortes et plus réalistes, mais est soumise à une détection des nœuds qui peut dans certains cas s'avérer plus complexe qu'il n'y paraît. D'une manière générale, et puisque les résultats offerts par ces deux méthodes restent proches, le choix d'une technologie permettant l'estimation du KDR dépendra essentiellement du budget, de l'utilisation finale du scanner optique (classement mécanique seul, ou combiné à un classement d'aspect), et de la souplesse d'utilisation souhaitée.

## **6.2 Intérêt du modèle du Profilé Equivalent**

### **6.2.1 : Performances**

Le modèle du PE a été construit de manière à pouvoir s'adapter à deux points qui étaient ignorés par le modèle du KAR. Le premier est la possibilité de prendre en compte d'autres singularités que les nœuds seuls, par exemple la pente de fil. Le second est la répartition des contraintes au sein de la pièce. Le chapitre suivant, consacré à la modélisation de l'influence mécanique de la pente de fil, confirmera à posteriori l'importance du premier point.

Concernant le second point, nous avons vu que la prise en compte d'un champ de contraintes adapté permet d'améliorer sensiblement la qualité de l'estimation du MOE et du MOR en flexion. Le calcul de ces valeurs dans le cas de la traction s'avère plus précis si le champ de contraintes appliqué correspond également à celui de la flexion. Ceci semble traduire le fait que le modèle du PE est incomplet. Ceci n'est pas surprenant, puisque la théorie utilisée, qui correspond à un cas simple et linéaire de résistance des matériaux, est elle-même connue pour être incomplète. Dans un cas de rupture fragile, comme c'est le cas pour le matériau bois sollicité en traction axiale, l'application de la mécanique de la rupture pourrait constituer une piste d'évolution dans le futur. Une autre piste potentiellement intéressante serait une modélisation plus fine des concentrations de contraintes et effets de bord à proximité des nœuds.

Au final, le modèle du PE tel qu'il est décrit dans ce chapitre nous a permis de légèrement dépasser les performances offertes par le KAR. Ce modèle, en l'état, présente



donc un intérêt certain pour le classement mécanique des sciages. Nous pensons par ailleurs que l'approche mécanistique qui a conduit à sa construction favorisera par la suite son amélioration, ou le cas échéant la construction de modèles plus aboutis prenant en compte des phénomènes non-linéaires : plasticité du bois en compression, mécanique de la rupture, ou concentration des contraintes par exemple.

### **6.2.2 : Robustesse**

Il est parfaitement clair que le point faible de ce modèle réside dans la nécessité de définir en tout huit paramètres pour caractériser les sciages. Le principal risque dans ce cas réside dans la robustesse du modèle à un changement d'origine géographique de ceux-ci. Les différents tests de validation croisée réalisés précédemment nous ont permis de vérifier que le modèle possède effectivement une robustesse satisfaisante au sein d'une même production, ainsi que d'une production à l'autre. Cependant, il est nécessaire de conserver une certaine prudence, car ces résultats ont aussi montré qu'il peut exister une incompatibilité entre certaines zones géographiques. La norme EN 14081 considère que les bois issus de deux pays voisins possèdent des caractéristiques semblables, et autorise donc une extension de l'homologation sous certaines conditions. Dans le cas contraire, la définition d'un nouveau réglage machine est de toutes façons nécessaire. Dans tous les cas, nous avons pu trouver un réglage des paramètres offrant de bons résultats sur l'ensemble des lots d'épicéa, en dépit du fait que leurs origines géographiques soient très éloignées. Des essais similaires seront néanmoins nécessaires pour confirmer cette tendance sur d'autres essences.

## **7. Conclusion**

A travers ce chapitre, nous avons présenté un nouveau modèle de prédiction des propriétés mécaniques des sciages, appelé Profilé Equivalent. Si il est largement inspiré du modèle du KAR dans le traitement de l'information des nœuds, l'approche ayant permis de le construire est bien plus analytique, et en accord avec les lois simples de la mécanique. Ce modèle tire son avantage dans sa capacité à tenir compte de la répartition du champ de contraintes appliquées aux sciages, ce qui lui permet d'atteindre des valeurs de  $R^2$  supérieures à celles observées pour le modèle du KAR. Malgré l'étape indispensable d'optimisation des paramètres de calcul, ce modèle a fait preuve d'une robustesse pouvant être mise en défaut, mais suffisante pour pouvoir être introduit au sein d'une machine de classement. Par ailleurs, l'introduction d'une méthode de calcul de densité et de caractérisation des nœuds par rayons X permet d'étendre le champ des solutions technologiques actuellement disponibles pour ce type de machines à sept combinaisons d'équipements :

- E-Scan seul
- CombiScan+ uniquement équipé des rayons X (modèle PE X-1)
- CombiScan+ uniquement équipé des caméras IVP et couleur (modèle PE M-1)
- Combiscan+ avec équipement complet X + IVP + couleur (modèle PE XM-1)
- Les trois dernières combinaisons + le E-Scan

Malgré ces bonnes performances de ces modèles, on peut constater que les valeurs de  $R^2$  atteintes plafonnent généralement à environ 70%, ce qui laisse 30% de la variabilité du matériau encore inexpliquée. Nous avons identifié la déviation des fibres comme singularité

pouvant avoir une forte influence sur le comportement mécanique des sciages. Le chapitre suivant sera donc consacré à l'étude de la pente de fil, et nous verrons que le modèle du PE s'avèrera être un choix judicieux puisqu'il permet d'intégrer cette nouvelle information de manière très simple.

# Chapitre III : Modélisation de la Pente de Fil

Les résultats présentés dans le chapitre précédent montrent l'intérêt du modèle du Profilé Equivalent dans l'estimation du MOE et du MOR des sciages à partir des positions et géométries de leurs nœuds. Cependant, les travaux ayant débouché sur ce modèle n'étaient pas directement destinés à remplacer le Knot Area Ratio. Ce dernier, en effet, est un indicateur de la nodosité des sciages qui se trouve être assez bien corrélé à leurs propriétés mécaniques. On comprend alors que le problème posé par cet indice est qu'il ne permet de prendre en compte ni d'autres types de singularités, ni le mode de sollicitations. Dans ce sens, la solution de l'ARF proposée par Mitsuhashi [21], qui par ailleurs n'est pas basée sur une mesure directe de la pente de fil, n'est pas plus satisfaisante.

Comme nous le verrons dans ce chapitre, le modèle du PE permet de prendre en compte l'information de pente de fil de manière très simple et cohérente. La principale difficulté réside alors dans la mesure de la direction des fibres. Nous verrons tout d'abord comment cette mesure est effectuée, puis de quelle manière cette information est introduite dans le modèle du PE. Enfin, les résultats obtenus sur deux lots d'épicéa seront présentés avec et sans prise en compte de l'angle de plongée des fibres, et comparés avec les résultats obtenus dans le chapitre précédent.

## 1. Définition des paramètres

L'ensemble des notations définies dans le chapitre précédent sont conservées. A celles-ci s'ajoutent désormais les trois angles suivants :

- Soit  $\theta(x,y,z)$  l'angle entre la direction des fibres et l'axe  $\underline{X}$  : pente de fil
- Soit  $\phi(x,y,z)$  l'angle entre l'axe  $\underline{X}$  et la projection des fibres sur le plan  $(\underline{X}, \underline{Y})$
- Soit  $\psi(x,y,z)$  l'angle entre la direction des fibres et le plan  $(\underline{X}, \underline{Y})$  : angle de plongée

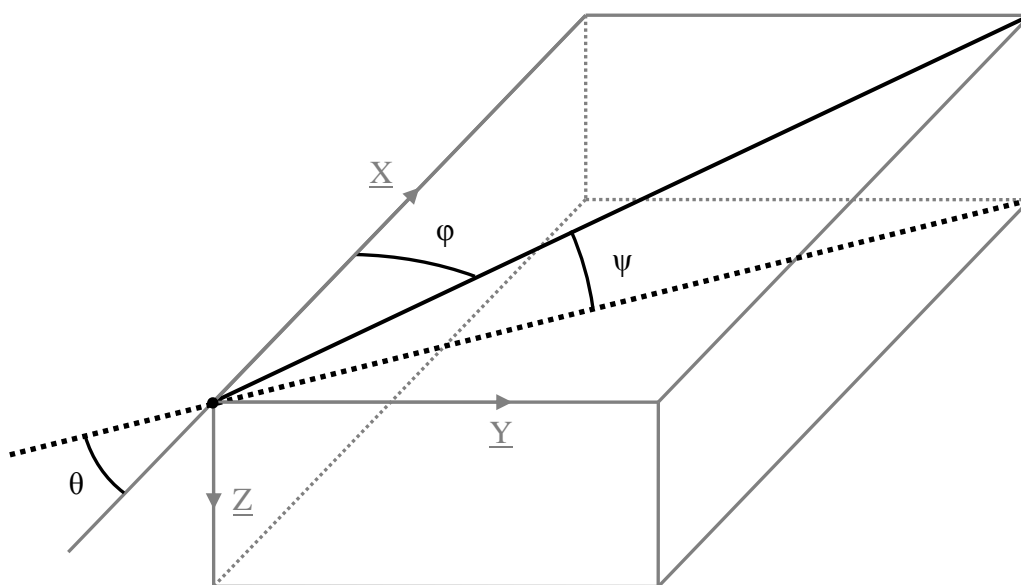


Figure 40 : Représentation de la pente de fil  $\theta$ , de l'angle de projection  $\phi$  et de l'angle de plongée  $\psi$

La relation entre ces trois angles peut se démontrer assez facilement à partir de la Figure 40, et s'écrit de la manière suivante :

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi) \cdot \cos(\psi)$$

Équation 19 : Relation entre la pente de fil  $\theta$ , l'angle de projection  $\phi$  et l'angle de plongée  $\psi$

## 2. Mesure de la Pente de Fil

La première étape dans la prise en compte de la pente de fil dans un modèle de prédiction du MOE et du MOR est évidemment la mesure de cet angle. Celle-ci, comme nous allons le voir, fait appel à des méthodes non conventionnelles de vision artificielle, et s'avère relativement complexe. De plus, certaines informations ne peuvent être obtenues de manière directe, et leur mesure doit alors être fondée sur une série d'hypothèses fortes. Nous verrons dans cette partie sur quels principes repose la mesure de la pente de fil, et de quelle manière elle a été implémentée au cours de notre étude.

### 2.1 Effet trachéides

Il est préférable ici de rappeler de quelle manière la pente de fil est mesurée au sein des scanners optiques. Le principe utilisé est celui de l'effet trachéides, parfois également appelé effet scatter. Celui-ci traduit une anisotropie de la diffusion de la lumière au sein du bois, et dont les mécanismes ne sont pas à ce jour parfaitement identifiés.

Si une lumière de forte intensité est projetée en un point sur une surface de bois, le plus fréquemment à l'aide d'un laser, une partie de celle-ci sera diffusée au sein du matériau. Par une suite de diffusions successives, une partie de la lumière diffusée sera ramenée à la surface du bois, la rendant visible pour un observateur ou une caméra. Il en résulte donc une tache lumineuse elliptique autour du point d'impact du laser, et orientée parallèlement à l'angle de projection des fibres (Figure 41).

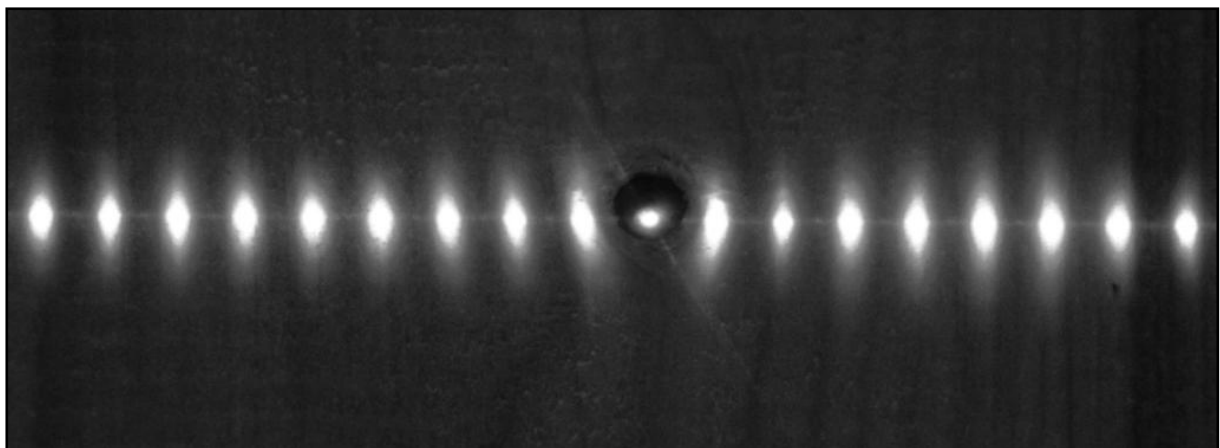


Figure 41 : Effet trachéides obtenu à l'aide d'une ligne de lasers points.

Afin de mesurer la pente de fil à grande vitesse sur des pièces en translation rectiligne, on utilise généralement une ligne de lasers points. Cette ligne est obtenue à partir d'un unique laser, devant lequel ont été placés un prisme et un réseau de diffraction. Ce système de mesure de la pente de fil est aujourd'hui un équipement optionnel mais courant

des scanners CombiScan+. Au cours de cette étude, nous n'utiliserons que l'information de pente de fil mesurée sur les faces supérieures et inférieures des sciages, bien qu'il soit également possible de mesurer la pente de fil sur leurs rives.

Une conséquence importante de ce dispositif optique est que les points projetés à la surface des sciages ne sont pas homogènes, ni en puissance, ni en géométrie, ce dont il nous faudra tenir compte par la suite. Enfin, les images des ellipses, obtenues grâce à des caméras industrielles, sont seuillées de manière à obtenir une image binaire correspondant à chaque point du laser sur l'axe  $Y$  et pour chaque position sur l'axe  $X$ .

## 2.2 Mesure des caractéristiques des ellipses

L'extraction des paramètres des ellipses, à partir d'images seuillées, est réalisée par une Analyse en Composantes Principales (ACP). Cette méthode est principalement utilisée en statistiques dans l'analyse des nuages de points. Traduite de manière facilement compréhensible par un mécanicien, cette méthode consiste à extraire dans un premier temps la matrice  $2 \times 2$  d'inertie de l'ellipse dans le repère global. Cette étape est très simple puisqu'elle s'appuie sur la définition même des moments et produits d'inertie. Dans un second temps, cette matrice, par définition symétrique, est diagonalisée, ce qui permet de connaître l'orientation des axes de l'ellipse ainsi que leurs dimensions.

Cette méthode est intéressante d'un point de vue algorithmique, car elle fait appel à très peu de conditions et de boucles, ce qui la rend très rapide. Cette propriété est importante pour notre application compte tenu de la vitesse de défilement des planches dans les scanners. Par ailleurs, le fait de tenir compte de l'ensemble des points de l'ellipse la rend beaucoup plus robuste que celles basées uniquement sur ses contours. De cette manière, la mesure de l'angle de projection des fibres est considérée comme relativement peu sensible à l'état de surface des sciages.

L'ensemble de ces opérations permet donc de mesurer de manière fiable l'ensemble des paramètres de chaque ellipse : son angle par rapport à  $X$ , c'est-à-dire l'angle  $\phi$ , ses axes, son aire, son excentricité et son facteur de forme. En revanche, la mesure de l'angle de plongée  $\psi$  n'est pas directe et fait l'objet d'une étape de calcul supplémentaire.

## 2.3 Estimation de l'angle de plongée des fibres

Nous avons vu que l'étude des paramètres géométriques d'une ellipse ne permet pas de mesurer directement l'angle de plongée  $\psi$  des fibres (voir Figure 40) par rapport à la face du sciage observée. Cependant, nous savons également que le facteur de forme de l'ellipse est lié à cet angle : la tache de diffusion apparaît circulaire au niveau des nœuds pour lesquels l'angle de plongée des fibres est proche de  $90^\circ$ . Nous verrons dans ce paragraphe de quelle manière les valeurs de  $\psi$  sont estimées à partir du grand axe de l'ellipse.

### 2.3.1 : Hypothèse : diffusion isotrope transverse

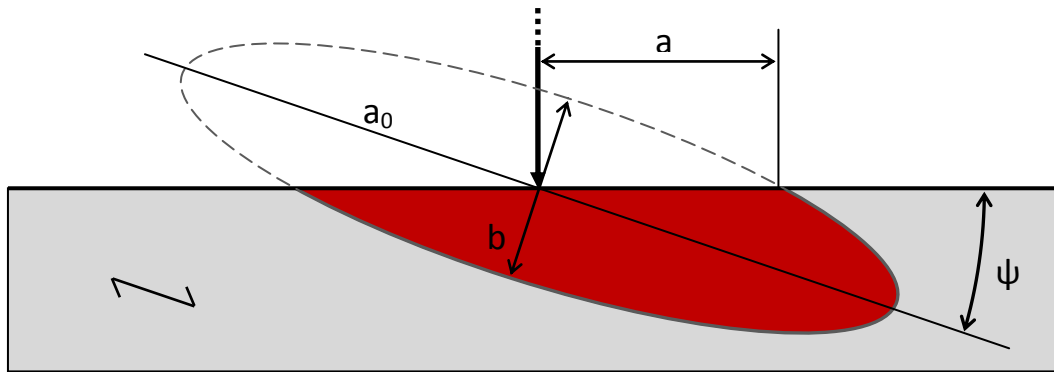
Pour pouvoir estimer les valeurs de  $\psi$ , nous devons émettre quelques hypothèses. La première est qu'au sein du bois, les surfaces sur lesquelles l'intensité lumineuse est homogène sont des ellipsoïdes de révolution, et dont le centre commun est situé au point d'impact du laser. Le fait que ces surfaces soient des ellipsoïdes est parfaitement cohérent avec l'observation de l'effet trachéides, puisque nous savons que leurs intersections avec le plan formant la face du sciage observé sont des ellipses. Par ailleurs, le fait que ces

ellipsoïdes soient de révolution traduirait le fait que, du point de vue de la diffusion de la lumière, les directions radiale et tangentielle du bois soient équivalentes. Notons ici que cette hypothèse d'isotropie transverse a été présentée comme valide dans les travaux de Seltman [55], et utilisée au cours des travaux de Simonaho [52] et de Kienle [53].

$$a^2 = \frac{b^2}{1 - e_0^2 \cdot \cos^2(\psi)}$$

**Équation 20 : Calcul de  $\psi$  à partir de l'équation polaire d'une ellipse.**

On suppose que l'on connaît le grand axe  $a_0$  de l'ellipsoïde. Nous verrons par la suite de quelle manière ce paramètre est calculé. Nous connaissons également les grand et petit axes de l'ellipse détectée par le scanner optique, notés respectivement  $a$  et  $b$ . L'hypothèse de diffusion isotrope transverse de la lumière nous permet de supposer que le petit axe de l'ellipsoïde de révolution a également pour valeur  $b$ , et nous sommes donc en mesure de calculer son excentricité  $e_0$ . La Figure 42 représente le modèle géométrique qui nous permettra, grâce à l'équation polaire d'une ellipse (Équation 20), de calculer la valeur de  $\psi$ .



**Figure 42 : Calcul de l'angle de plongée  $\psi$  à partir du grand axe de l'ellipsoïde  $a_0$ .**

On peut remarquer que cette méthode se montrera plus précise pour de faibles valeurs de  $\psi$ . En effet, une faible variation de  $\psi$  autour de  $0^\circ$  provoquera une forte variation de  $a$ , alors qu'à l'inverse, une forte variation de  $\psi$  autour de  $90^\circ$  provoquera une faible variation de ce paramètre. On pourrait penser que ceci ne pose pas de problème particulier : d'après la formule de Hankinson, l'influence de la pente de fil sur le comportement mécanique n'est sensible qu'entre  $0^\circ$  et  $25^\circ$  environ, et reste sensiblement constante au-delà de cette valeur. Mais ce constat est en réalité beaucoup plus préjudiciable qu'il n'y paraît, car l'estimation de la valeur de  $a_0$  est fondée sur des hypothèses très fortes, entraînant une erreur importante sur cet intervalle. Ceci constitue donc la principale limitation de cette méthode, et il conviendra par la suite d'évaluer les résultats de prédiction du MOE et du MOR avec et sans prise en compte de l'angle de plongée. Ceci est nécessaire pour conclure sur l'intérêt de l'estimation de  $\psi$  dans ces conditions.

### 2.3.2 : Excentricité de l'ellipsoïde de révolution

Afin de pouvoir calculer la valeur de  $\psi$  grâce à l'Équation 20, il nous reste donc à déterminer la valeur de l'excentricité de l'ellipsoïde  $e_0$ . Autrement dit, nous devons estimer la valeur de  $e$  pour un angle  $\psi = 0^\circ$ . Nous avons vu qu'en raison du système laser utilisé,

l'ensemble des points n'est pas homogène, ce qui nous oblige à déterminer une valeur de  $e_0$  pour chacun de ces points, ainsi que pour chaque sciage.

Pour une planche donnée et une position donnée sur l'axe  $\underline{Y}$  correspondant à un point du laser, la valeur de  $e_0$  est définie comme le fractile à 20% des valeurs de  $e$  mesurées en cette position sur toute la longueur de la planche. Le seuil de ce fractile est ici le résultat d'un compromis : plus cette valeur est grande, plus l'angle de plongée estimé sera important, et inversement. La valeur de 20% a été choisie parce qu'elle offre de bons résultats dans l'estimation des propriétés mécaniques des deux lots de sciages testés et pour les deux propriétés mécaniques estimées. Nous avons par ailleurs constaté que les valeurs de  $R^2$ , sur l'estimation finale des propriétés mécaniques, varient de moins de 1 point pour des seuils de fractile compris entre 15% et 25%.

## 2.4 Estimation de la pente de fil en un point quelconque

Jusqu'à présent, nous avons pu estimer les angles de projection et de plongée des fibres aux points correspondant à une mesure directe par effet trachéides. On comprend bien que pour être appliquée au modèle du PE, la pente de fil doit pouvoir, en théorie, être évaluée en chaque point du sciage. Nous allons voir de quelle manière cette évaluation est faite, d'abord sur les faces des sciages, puis dans leur volume. Cette dernière estimation impose par ailleurs ce qui peut être considéré comme la plus forte hypothèse de cette étude, et sera testée et discutée par la suite.

### 2.4.1 : Interpolation sur l'axe $\underline{Y}$

L'interpolation des valeurs de pente de fil sur les faces des sciages ne pose pas de problème particulier, étant donné que les points du laser sont en pratique très proches les uns des autres : la distance entre deux points est en général de l'ordre de 5mm. Pour des raisons liées à la croissance secondaire des arbres (voir p. 20), mais également géométriques, la pente de fil ne peut pas comporter de variations brutales sur d'aussi courtes distances. Pour cette raison, nous estimons qu'une interpolation linéaire entre deux points permet d'obtenir une précision satisfaisante.

Dans notre implémentation de cette méthode, à but uniquement expérimental, l'interpolation sur l'axe  $\underline{Y}$  est réalisée très tôt, et indépendamment du calcul du PE. L'interpolation linéaire est donc faite sur les directions des ellipses, ainsi que sur les carrés de leurs facteurs de forme. La raison pour laquelle ces deux valeurs ont été choisies est que ce sont des informations de bas niveau obtenues très facilement et rapidement par l'algorithme de détection des ellipses. En toute rigueur, il aurait peut-être été préférable d'opérer l'interpolation linéaire sur l'excentricité des ellipses, mais les caractéristiques de deux ellipses consécutives sont généralement très proches. Les erreurs commises par ailleurs (calcul de l'angle de plongée, interpolation sur l'axe  $\underline{Z}$ ) ont donc une influence beaucoup plus importantes sur le résultat final.

### 2.4.2 : Interpolation sur l'axe $\underline{Z}$

L'interpolation de l'angle selon  $\underline{Z}$  est encore plus simple dans son implémentation, mais constitue sans aucun doute la seconde limitation de cette méthode. Elle consiste simplement à effectuer une interpolation linéaire entre les angles  $\theta$  mesurés sur les deux faces et pour les positions  $(x,y)$  correspondantes.

Cette méthode est critiquable sur plusieurs points, à commencer par l'utilisation d'une interpolation linéaire entre deux points de la planche très éloignés. Le fait est que nous ne disposons pas à l'heure actuelle de modèle théorique décrivant l'orientation des fibres au sein du bois. Les études menées par Foley [22] ne concernent en effet que des zones comportant un seul nœud alors que les sciages en contiennent nécessairement plusieurs, et imposent de connaître précisément la position de la moelle. Etant donné que nous ne disposons, que d'une mesure en surface, soit deux mesures par position (x,y), une interpolation numérique linéaire est pour l'instant la seule possibilité. Par ailleurs, on peut penser qu'il aurait été préférable d'effectuer cette interpolation séparément pour les angles  $\phi$  et  $\psi$ . Le problème dans ce cas est le temps de traitement qui devient extrêmement long, puisque l'utilisation d'une table de correspondance (voir paragraphe 3.3.2, ci-dessous) devient alors délicate en raison de sa taille.

Nous avons testé un autre modèle qui consiste à tenir compte de la présence éventuelle de nœuds n'émergeant, pour certaines positions, sur aucune des faces. Dans ce cas, nous connaissons la pente de fil aux points occupés par les nœuds, soit environ 90°. Nous avons alors pu réaliser deux régressions linéaires (face/nœud, puis nœud/face). Cette légère modification n'a malheureusement pas permis d'augmenter les  $R^2$  obtenus. La raison supposée est que d'une part cette configuration se retrouve finalement assez rarement, et d'autre part que l'on doit dans ce cas utiliser la mise en correspondance des nœuds, qui elle-même, comporte une incertitude.

### 3. Application au modèle du Profilé Equivalent

Nous avons identifié une méthode permettant d'estimer la valeur de la pente de fil en chaque point des sciages. Nous sommes maintenant en mesure de prendre en compte cette information dans la prédiction du MOE et du MOR. Comme nous allons le voir, le modèle du Profilé Equivalent s'avère ici particulièrement adapté, et ne nécessite que de légères adaptations.

#### 3.1 Influence mécanique de la pente de fil

Nous avons vu que la formule de Hankinson (ci-dessous) est très bien adaptée pour décrire la réduction des propriétés mécaniques du bois sain, aussi bien en termes de contrainte de rupture qu'en module élastique, en fonction de la pente de fil.

$$h(\theta) = \frac{Q}{\sin^n \theta + Q \cdot \cos^n \theta}$$

**Équation 21 : Formule générale de Hankinson [2].  $h$  définit le facteur multiplicatif à appliquer à la propriété mécanique souhaitée.**

Néanmoins, cette formule étant paramétrique, il est nécessaire de fixer ces paramètres au préalable. Pour cela, nous nous sommes basés sur les intervalles usuels [2], et avons identifié des valeurs de  $n$  et  $Q$  offrant de bons résultats dans tous les cas. Nous avons donc défini les valeurs de  $n = 1,5$  et  $Q = 0,05$ . La Figure 43 représente les valeurs de  $h$  obtenues en fonction de la pente de fil  $\theta$ .



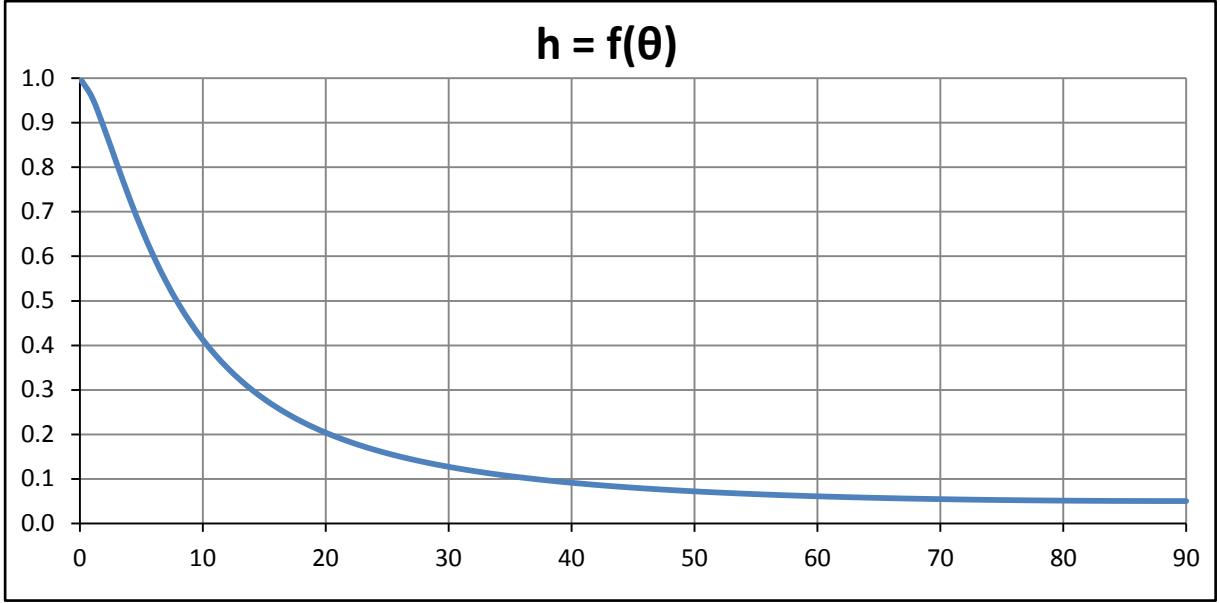


Figure 43 : Application de la formule de Hankinson au calcul du module élastique et de la contrainte de rupture

### 3.2 Application au modèle du PE

Nous disposons à présent de l'ensemble des informations nécessaires à l'intégration de la pente de fil dans le modèle du PE. Ceci est réalisé de manière très simple en réduisant l'épaisseur locale  $T_{PE}(x,y)$  du profilé en fonction des angles  $\theta(x,y,z)$  mesurés au point correspondant. Pour ce faire, l'Équation 9 a été modifiée de manière à intégrer une fonction notée  $H(x,y)$ , et dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1 :

$$T_{PE}(x,y) = L_3 \cdot [1 - \alpha \cdot KDR(x,y)] \cdot H(x,y)$$

Équation 22 : Epaisseur locale du PE en fonction du KDR et de la pente de fil locale

Les valeurs de cette fonction  $H$  sont calculées de la manière suivante : la formule de Hankinson est appliquée en tout point du sciage. Pour chaque position  $(x,y)$ , la valeur de  $H$  est prise égale à la moyenne des résultats obtenus au point correspondant. Ceci peut être exprimé à l'aide de l'équation suivante :

$$H(x,y) = \frac{1}{L_3} \cdot \int h(\theta(x,y,z)) dz$$

Équation 23 : Expression de la fonction  $H$  en fonction de la pente de fil locale

Or, nous avons vu que les valeurs de  $\theta$  n'ont pu être mesurées que sur les faces. Les valeurs dans le volume n'ont pu qu'être estimées par interpolation linéaire à partir de ces mesures. En conclusion, les valeurs de  $H$  ne dépendent que des angles mesurés sur les faces, que l'on notera  $\theta_1$  et  $\theta_2$ . La forme complète de l'expression de  $H$  peut donc s'écrire de la manière suivante :

$$H(x,y) = \frac{1}{L_3} \cdot \int h\left(\frac{z \cdot \theta_1(x,y) + (L_3 - z) \cdot \theta_2(x,y)}{L_3}\right) dz$$

Équation 24 : Expression complète de la fonction  $H$

Il s'avère que le temps de calcul de cette fonction est très grand, en raison du fait qu'elle doit être répétée un grand nombre de fois pour chaque pièce. Nous avons donc choisi d'utiliser une table de correspondance : les valeurs de  $H$  pour toutes les combinaisons de  $\theta_1$  et  $\theta_2$  peuvent être calculées à l'avance et stockées sous forme d'un tableau de taille raisonnable. Dans ce cas, le calcul de  $H$  revient à accéder à un élément d'un tableau, ce qui se fait de manière très rapide. Si l'on souhaitait effectuer séparément les interpolations linéaires des angles  $\phi$  et  $\psi$ , la taille de ce tableau serait de l'ordre de 1Go pour une résolution de  $1^\circ$  et une précision en virgule flottante (32 bits).

## 4. Résultats

Les essais réalisés sur ce nouveau modèle prenant en compte la pente de fil vont nous permettre de vérifier plusieurs points. Premièrement, nous confirmerons l'intérêt de cette information, ainsi que de l'angle de plongée  $\psi$ . Puis nous étudierons l'influence du champ de contraintes dans le calcul du MOE et du MOR, la robustesse du nouveau modèle, et enfin la répartition des erreurs d'estimation en fonction des classes de résistance.

### 4.1 Matériel et méthodes

Les combinaisons de machines utilisées ainsi que les méthodes de calcul correspondent exactement à la description du chapitre précédent (voir pp. 79 à 81). La seule différence réside dans la configuration du scanner optique CombiScan+ utilisé, puisque, bien entendu, ce dernier dispose dans notre cas de lasers points sur les deux faces afin de mesurer la pente de fil. Afin d'éviter toute ambiguïté, les différents modèles du PE prenant en compte la pente de fil seront annotés de la lettre « D » (pour Dot lasers). Par exemple, le modèle PE X-1 avec pente de fil sera noté PE XD-1

Tous les lots utilisés au chapitre précédent n'ont pas pu être repris ici. La raison est que les scanners utilisés pour la mesure de certains d'entre eux ne disposaient pas de laser points au moment de l'acquisition des images. Le Tableau 14 donne une description des lots qui serviront à cette partie de notre étude :

| LOT   | ESSENCE | N Total | N Flexion | N Traction |
|-------|---------|---------|-----------|------------|
| S6    | Epicéa  | 697     | 341       | 356        |
| S7    | Epicéa  | 680     | 680       | -          |
| TOTAL |         | 1377    | 1021      | 356        |

Tableau 14 : Description des différents lots de sciages testés

### 4.2 Coefficients de détermination $R^2$

Les coefficients de détermination  $R^2$  obtenus par les modèles XD-1, MD-1 et XMD-1 ont été comparés à ceux obtenus dans le chapitre précédent. Seules les combinaisons de machines C et C+E nous intéressent ici. Les résultats ont ensuite été synthétisés afin de mieux visualiser les progrès obtenus grâce à la pente de fil.

#### 4.2.1 : Modèle du PE XD-1

Les résultats du tableau suivant montrent une forte augmentation des valeurs de  $R^2$  grâce à la prise en compte de la pente de fil, et ce dans tous les cas observés au cours de cette étude. Le gain est de manière générale plus important dans le cas du CombiScan+ utilisés seul.

| PE XD-1 vs X-1 |          | PE X-1  |         |           | PE XD-1 |         |           |
|----------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|                |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR |
| S6             | Flexion  | 61%     | 47%     | 60%       | 72%     | 58%     | 61%       |
|                | Traction | 73%     | 65%     | 73%       | 80%     | 74%     | 78%       |
| S7             | Flexion  | 63%     | 48%     | 60%       | 69%     | 57%     | 63%       |
| VAL. MIN       |          | 61%     | 47%     | 60%       | 69%     | 57%     | 61%       |
| MOYENNE        |          | 66%     | 53%     | 64%       | 74%     | 63%     | 67%       |
| VAL. MAX       |          | 73%     | 65%     | 73%       | 80%     | 74%     | 78%       |

Tableau 15 : Comparaison des modèles PE X-1 et PE XD-1

#### 4.2.2 : Modèle du PE MD-1

Les observations du paragraphe précédent s'appliquent également au Tableau 16 : la prise en compte de la pente de fil permet d'améliorer fortement les résultats des deux combinaisons de machines, et pour les deux propriétés mécaniques étudiées.

| PE MD-1 vs PE M-1 |          | PE M-1  |         |           | PE MD-1 |         |           |
|-------------------|----------|---------|---------|-----------|---------|---------|-----------|
|                   |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR |
| S6                | Flexion  | 68%     | 55%     | 63%       | 77%     | 60%     | 60%       |
|                   | Traction | 75%     | 60%     | 67%       | 80%     | 73%     | 76%       |
| S7                | Flexion  | 60%     | 49%     | 60%       | 67%     | 59%     | 63%       |
| VAL. MIN          |          | 60%     | 49%     | 60%       | 67%     | 59%     | 60%       |
| MOYENNE           |          | 68%     | 55%     | 64%       | 75%     | 64%     | 66%       |
| VAL. MAX          |          | 75%     | 60%     | 67%       | 80%     | 73%     | 76%       |

Tableau 16 : Comparaison des modèles PE M-1 et PE MD-1

#### 4.2.3 : Modèle du PE XMD-1

Une fois encore, les tendances observées sur les modèles PE XD-1 et MD-1 se retrouvent dans le cas du modèle PE XMD-1. Ce dernier offre ainsi des valeurs de  $R^2$  supérieures, dans tous les cas, à celles du modèle PE XM-1.

| PE XMD-1 vs PE MD-1 |          | PE XM-1 |         |           | PE XMD-1 |         |           |
|---------------------|----------|---------|---------|-----------|----------|---------|-----------|
|                     |          | C - MOE | C - MOR | C+E - MOR | C - MOE  | C - MOR | C+E - MOR |
| S6                  | Flexion  | 69%     | 57%     | 61%       | 77%      | 62%     | 61%       |
|                     | Traction | 77%     | 67%     | 73%       | 82%      | 75%     | 79%       |
| S7                  | Flexion  | 61%     | 52%     | 60%       | 67%      | 60%     | 63%       |
| VAL. MIN            |          | 61%     | 52%     | 60%       | 67%      | 60%     | 61%       |
| MOYENNE             |          | 69%     | 58%     | 64%       | 76%      | 66%     | 67%       |
| VAL. MAX            |          | 77%     | 67%     | 73%       | 82%      | 75%     | 79%       |

Tableau 17 : Comparaison des modèles PE XM-1 et PE XMD-1

## 4.2.4 : Synthèse des résultats

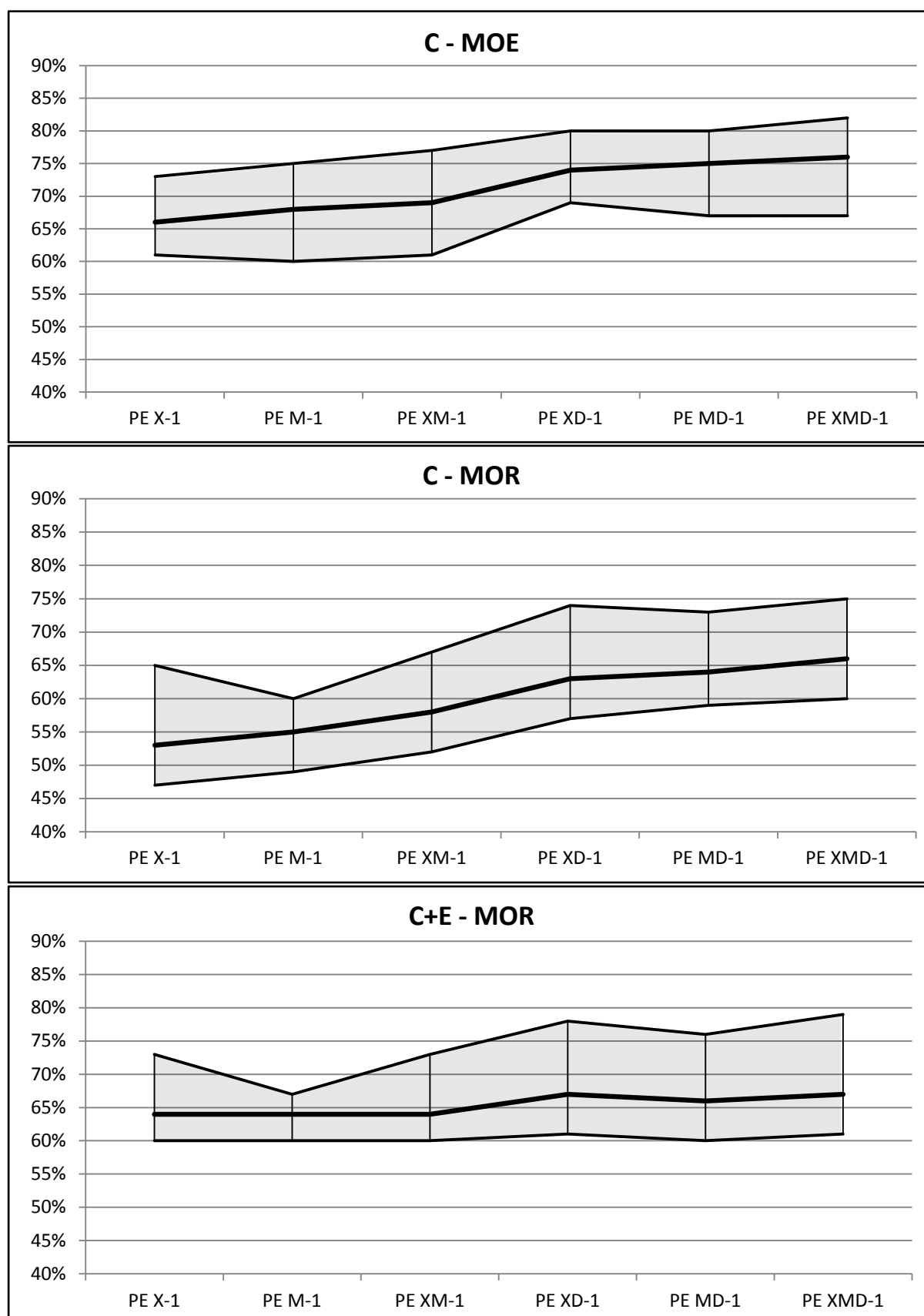


Figure 44 : Comparaison des  $R^2$  des modèles de PE avec et sans prise en compte de la pente de fil.  
 Courbe du haut : valeur max. Courbe du milieu : valeur moyenne. Courbe du bas : valeur min.

Les résultats des tableaux précédents ont été synthétisés dans la Figure 44. Le premier constat est que, en accord avec les observations précédentes, les modèles prenant en compte la pente de fil présentent des valeurs de  $R^2$  supérieures dans tous les cas à celles observées dans le chapitre précédent. En particulier, on note une nette progression dans l'estimation du MOE sans utilisation du E-Scan. On peut donc en conclure que, du point de vue des performances atteintes, la pente de fil est une information importante.

Par ailleurs, on peut remarquer que l'introduction de ce paramètre a peu d'influence sur les efficacités relatives des modèles. Le PE XD-1 semble être le moins performant comparé au PE XMD-1. Le PE MD-1 semble, quant à lui se situer entre les deux autres. Notons ici que nous avons observé, dans le chapitre précédent, que le PE X-1 offrait de meilleurs résultats que le PE M-1, ce qui contraste avec les résultats présentés ici. La raison est que ces derniers ne tiennent compte que de deux lots au lieu de 4 précédemment. On peut globalement considérer que ces deux modèles restent proches en termes de performances.

Du point de vue du matériel, la mesure de la pente de fil nécessite la présence de caméras IVP, utilisées également lors de la détection des nœuds. Or, il se trouve que le modèle PE XMD-1 est dans tous les cas plus performant que le PE XD-1. Par conséquent, ce dernier ne présente un intérêt que dans un cas : si l'on souhaite s'affranchir d'une détection des nœuds. Si au contraire on estime qu'une telle détection est aisée, ou bien si le classement mécanique est couplé à un classement d'aspect, alors le choix du modèle PE XD-1 ne permettra pas de réduire le coût de la machine.

### 4.3 Intérêt de l'estimation de l'angle de plongée

Nous avons déjà évoqué le fait que l'estimation de l'angle de plongée repose sur des hypothèses très fortes, qui entraînent inévitablement une erreur importante. Il est alors légitime de se demander si la prise en compte de cet angle dans l'estimation du MOE et du MOR des sciages n'est pas finalement préjudiciable.

Afin de répondre à cette question, nous avons comparé les résultats obtenus par le modèle du PE XD-1 tel qu'il a été énoncé dans ce chapitre à ceux obtenus par ce même modèle, en posant  $\psi = 0^\circ$ . Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 18.

| PE XD-1  |          | C – MOE |               | C – MOR |               | C+E – MOR |               |
|----------|----------|---------|---------------|---------|---------------|-----------|---------------|
|          |          | $\phi$  | $\phi + \psi$ | $\phi$  | $\phi + \psi$ | $\phi$    | $\phi + \psi$ |
| S6       | Flexion  | 68%     | 72%           | 55%     | 58%           | 62%       | 61%           |
|          | Traction | 78%     | 80%           | 71%     | 74%           | 77%       | 78%           |
| S7       | Flexion  | 69%     | 69%           | 59%     | 57%           | 64%       | 63%           |
| VAL. MIN |          | 68%     | 69%           | 55%     | 57%           | 62%       | 61%           |
| MOYENNE  |          | 72%     | 74%           | 62%     | 63%           | 68%       | 67%           |
| VAL. MAX |          | 78%     | 80%           | 71%     | 74%           | 77%       | 78%           |

Tableau 18 : Influence de l'estimation de l'angle de plongée sur l'estimation du MOE et du MOR.  
Colonne «  $\phi$  » : sans angle de plongée. Colonne «  $\phi + \psi$  » : avec angle de plongée

L'observation des valeurs moyennes et extrêmes de ce tableau montre que l'estimation de l'angle de plongée permet effectivement d'améliorer légèrement les résultats du modèle. Ceci confirme que la méthode de calcul de cet angle, présentée précédemment (p. 97), présente un intérêt malgré une série d'hypothèses fortes.

Cependant, si l'on observe en détail les résultats obtenus pour les deux lots, on constate que la prise en compte de  $\psi$  a tendance à augmenter l'erreur d'estimation des propriétés mécaniques du lot S7. Cette différence peut s'expliquer par l'état général des pièces de ce dernier : celles-ci n'étaient en effet pas rabotées, et présentaient par ailleurs d'importantes traces de terre et de poussière. On peut donc en conclure que la mesure de la pente de fil, et en particulier de l'angle de plongée, impose tout de même une attention particulière à l'état de surface des sciages.

#### 4.4 Influence du champ de contraintes

Au cours du chapitre précédent, nous avons mis en évidence le fait que l'estimation des propriétés mécaniques des pièces sollicitées en traction s'avère plus précise si ces mêmes pièces sont calculées en flexion. Ceci traduit le fait que l'influence mécanique des singularités est d'autant plus grande que ces dernières sont situées à proximité des rives.

Les précédents tests n'ont été réalisés qu'en tenant compte des nœuds. Or, les sciages ayant été utilisés au cours de cette étude sont des pièces de dosse, pour la plupart proches de la moelle. Dans ce cas, les axes des nœuds situés près des rives sont presque tangents à une des faces, et l'orientation des fibres se trouve différente de celle observée autour d'un nœud normal aux faces. On pourrait donc penser que l'observation qui a été faite aurait pour cause, unique ou partielle, la pente de fil autour des nœuds.

Nous avons donc reproduit le test du chapitre précédent (voir p. 84), à savoir une comparaison entre les résultats obtenus en calculant les pièces à partir d'un champ de contraintes de flexion puis de traction. Le Tableau 19 synthétise les résultats obtenus :

| PE XD-1 |          | C – MOE |     | C – MOR |     | C+E – MOR |     |
|---------|----------|---------|-----|---------|-----|-----------|-----|
|         |          | =       | x   | =       | x   | =         | x   |
| S6      | Flexion  | 72%     | 51% | 58%     | 51% | 61%       | 60% |
|         | Traction | 72%     | 80% | 69%     | 74% | 73%       | 78% |
| S7      | Flexion  | 69%     | 62% | 57%     | 54% | 63%       | 62% |

Tableau 19 : Influence du champ de contraintes. Colonnes « = » : résultats obtenus avec les modes de sollicitation réels. Colonnes « x » : résultats obtenus en inversant les sollicitations.

Les résultats de ce tableau montrent que, contrairement à l'hypothèse de départ, la déviation des fibres autour des nœuds ne permet pas à elle seule d'expliquer pourquoi les nœuds situés à proximité des rives ont une influence prépondérante sur le comportement des sciages en traction axiale. L'ajout de ce paramètre dans le modèle a simplement permis d'augmenter les valeurs de  $R^2$  de manière quasiment homogène. On peut également en conclure que le calcul des pièces de traction, à partir de contraintes correspondant à de la flexion, reste bien adapté malgré l'introduction d'un nouveau paramètre.

#### 4.5 Tests de robustesse par validation croisée

Nous avons montré que le modèle du PE X-1 offrait une robustesse satisfaisante, aussi bien au sein d'un même lot qu'entre des lots de même essence mais d'origines géographiques différentes. Après avoir introduit la pente de fil dans le modèle, il convient de vérifier que ce paramètre ne rend pas l'estimation des propriétés mécaniques trop sensible au jeu de paramètres issu de l'optimisation.

Cette vérification sera conduite à travers deux tests de validation croisée. Le premier sera effectué au sein du lot S6, et le second entre les lots S6 et S7. Mis à part le nombre de lots testés dans le second cas, la méthode utilisée ici est en tout point identique à celle du chapitre précédent (voir Chapitre II : 5.6, p. 88).

#### 4.5.1 : Validation croisée appliquée au lot S6

Le constat que l'on peut tirer des résultats du tableau suivant est que le modèle du PE XD-1 présente une grande robustesse au sein d'un même lot. D'une part, l'optimisation des paramètres sur un sous-lot ne modifie que de façon marginale les résultats obtenus sur le lot complet. D'autre part, on observe que les valeurs des  $R^2$  restent très proches quel que soit le sous-lot utilisé dans la phase d'optimisation, et bien que la taille de ces derniers soit très faible. Ce dernier point contraste avec l'observation faite après les tests de validation croisée effectuées à partir du PE X-1 (voir p. 89), et pour lesquels certains sous-lots semblaient incompatibles entre eux.

| C – MOE FLEXION |                     |      |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR   | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                 | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6              | 72%                 | 68%  | 72%  | 77%  | 74%  |
| S6 A            | 72%                 | 68%  | 72%  | 77%  | 73%  |
| S6 B            | 70%                 | 62%  | 75%  | 73%  | 71%  |
| S6 C            | 72%                 | 67%  | 71%  | 77%  | 74%  |
| S6 D            | 71%                 | 67%  | 70%  | 76%  | 75%  |
| Ampl.           | 2 pt                | 6 pt | 5 pt | 4 pt | 4 pt |

| C – MOE TRACTION |                     |      |      |      |      |
|------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR    | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                  | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6               | 80%                 | 84%  | 71%  | 78%  | 88%  |
| S6 A             | 80%                 | 84%  | 71%  | 78%  | 88%  |
| S6 B             | 79%                 | 82%  | 72%  | 76%  | 88%  |
| S6 C             | 79%                 | 83%  | 68%  | 79%  | 87%  |
| S6 D             | 80%                 | 83%  | 72%  | 78%  | 89%  |
| Ampl.            | 1 pt                | 2 pt | 4 pt | 3 pt | 2 pt |

| C – MOR FLEXION |                     |      |      |      |      |
|-----------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR   | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                 | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6              | 58%                 | 47%  | 55%  | 63%  | 68%  |
| S6 A            | 58%                 | 48%  | 55%  | 63%  | 67%  |
| S6 B            | 57%                 | 44%  | 57%  | 62%  | 65%  |
| S6 C            | 58%                 | 47%  | 55%  | 63%  | 67%  |
| S6 D            | 57%                 | 45%  | 53%  | 61%  | 70%  |
| Ampl.           | 1 pt                | 4 pt | 4 pt | 2 pt | 5 pt |

| C – MOR TRACTION |                     |      |      |      |      |
|------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR    | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                  | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6               | 74%                 | 74%  | 71%  | 79%  | 75%  |
| S6 A             | 74%                 | 75%  | 71%  | 79%  | 74%  |
| S6 B             | 73%                 | 74%  | 72%  | 79%  | 71%  |
| S6 C             | 74%                 | 75%  | 71%  | 80%  | 74%  |
| S6 D             | 74%                 | 72%  | 72%  | 76%  | 77%  |
| Ampl.            | 1 pt                | 3 pt | 1 pt | 4 pt | 6 pt |

| C+E – MOR FLEXION |                     |      |      |      |      |
|-------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR     | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                   | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6                | 61%                 | 54%  | 60%  | 64%  | 65%  |
| S6 A              | 60%                 | 55%  | 59%  | 64%  | 64%  |
| S6 B              | 61%                 | 54%  | 60%  | 64%  | 65%  |
| S6 C              | 61%                 | 55%  | 60%  | 64%  | 65%  |
| S6 D              | 57%                 | 49%  | 58%  | 58%  | 67%  |
| Ampl.             | 4 pt                | 6 pt | 2 pt | 6 pt | 3 pt |

| C+E – MOR TRACTION |                     |      |      |      |      |
|--------------------|---------------------|------|------|------|------|
| OPTIM<br>POUR      | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |      |      |
|                    | S6                  | S6 A | S6 B | S6 C | S6 D |
| S6                 | 78%                 | 77%  | 81%  | 79%  | 78%  |
| S6 A               | 78%                 | 78%  | 80%  | 79%  | 76%  |
| S6 B               | 77%                 | 73%  | 83%  | 75%  | 78%  |
| S6 C               | 78%                 | 76%  | 78%  | 80%  | 78%  |
| S6 D               | 78%                 | 75%  | 80%  | 77%  | 80%  |
| Ampl.              | 1 pt                | 5 pt | 5 pt | 5 pt | 4 pt |

Tableau 20 : Résultats des tests de validation croisée appliquée au lot S6 (modèle PE X-1)

Outre la validation du modèle du point de vue de sa robustesse, ces résultats montrent que la prise en compte de la pente de fil présente un double intérêt : une

meilleure estimation des propriétés mécaniques, ainsi qu'une réduction de la sensibilité aux paramètres de calcul. Ceci peut s'expliquer par le fait que, dans le cas présent, les nœuds ne sont plus les seules singularités prises en compte, ce qui diminue ainsi l'influence d'une incertitude sur leur mesure.

#### 4.5.2 : Validation croisée appliquée aux pièces d'épicéa

Les essais de validation croisée se limitent ici aux lots S6, S7, et à l'union de ces deux lots. Puisque seul le lot S6 comporte des pièces testées en traction, nous n'avons été en mesure de traiter ici que les pièces de flexion. Le Tableau 21 montre les résultats obtenus.

Les valeurs relevées restent relativement faibles, ce qui tend à confirmer la robustesse du modèle PE XD-1 entre plusieurs lots d'une même essence. En toute rigueur, pour pouvoir être en mesure de fournir des conclusions plus définitives, il aurait fallu disposer de plus de lots différents. On remarque également que dans leur ensemble, si l'on se limite à l'observation de ces deux lots, les amplitudes des  $R^2$  sont du même ordre de grandeur que celles du PE X-1. Aucune amélioration de la robustesse n'est donc à noter, et on peut même en remarquer une légère diminution. Ceci n'est pas préjudiciable dans la mesure où les amplitudes relevées étaient déjà relativement faibles.

Néanmoins, le point encourageant de ce test est la confirmation du fait qu'il est possible de trouver un réglage fournissant des résultats quasi-optimaux pour un large éventail d'origines géographiques des bois (ici Europe Centrale / Est pour le lot S6, France pour le lot S7).

| C – MOE FLEXION |                     |      |      | C – MOR FLEXION |                     |      |      | C+E – MOR FLEXION |                     |      |      |
|-----------------|---------------------|------|------|-----------------|---------------------|------|------|-------------------|---------------------|------|------|
| OPTIM<br>POUR   | Résultats ( $R^2$ ) |      |      | OPTIM<br>POUR   | Résultats ( $R^2$ ) |      |      | OPTIM<br>POUR     | Résultats ( $R^2$ ) |      |      |
|                 | S                   | S6   | S7   |                 | S                   | S6   | S7   |                   | S                   | S6   | S7   |
| S               | 74%                 | 72%  | 68%  | S               | 61%                 | 57%  | 57%  | S                 | 65%                 | 60%  | 62%  |
| S6              | 74%                 | 72%  | 68%  | S6              | 61%                 | 58%  | 56%  | S6                | 64%                 | 61%  | 61%  |
| S7              | 74%                 | 72%  | 68%  | S7              | 61%                 | 54%  | 57%  | S7                | 64%                 | 55%  | 63%  |
| Ampl.           | 0 pt                | 0 pt | 0 pt | Ampl.           | 0 pt                | 4 pt | 1 pt | Ampl.             | 1 pt                | 6 pt | 2 pt |

Tableau 21 : Résultats des tests de validation croisée appliquée aux lots S6 et S7 (modèle PE X-1)

#### 4.6 Répartition de l'erreur en fonction des classes de résistance

Nous avons vu que la prise en compte de la pente de fil permet d'améliorer sensiblement la qualité de la prédiction des propriétés mécaniques des sciages, en termes de coefficients de détermination  $R^2$ . Pour aller plus loin, nous avons voulu savoir quel type de sciages (très hautes, hautes, moyennes, ou basses propriétés mécaniques) bénéficiait le plus de cette amélioration. Ceci pourrait avoir une influence sur le choix d'une machine de classement comprenant un scanner optique : l'investissement dans un équipement de mesure de la pente de fil est-il rentable si, par exemple, seules les basses classes mécaniques nous intéressent ?



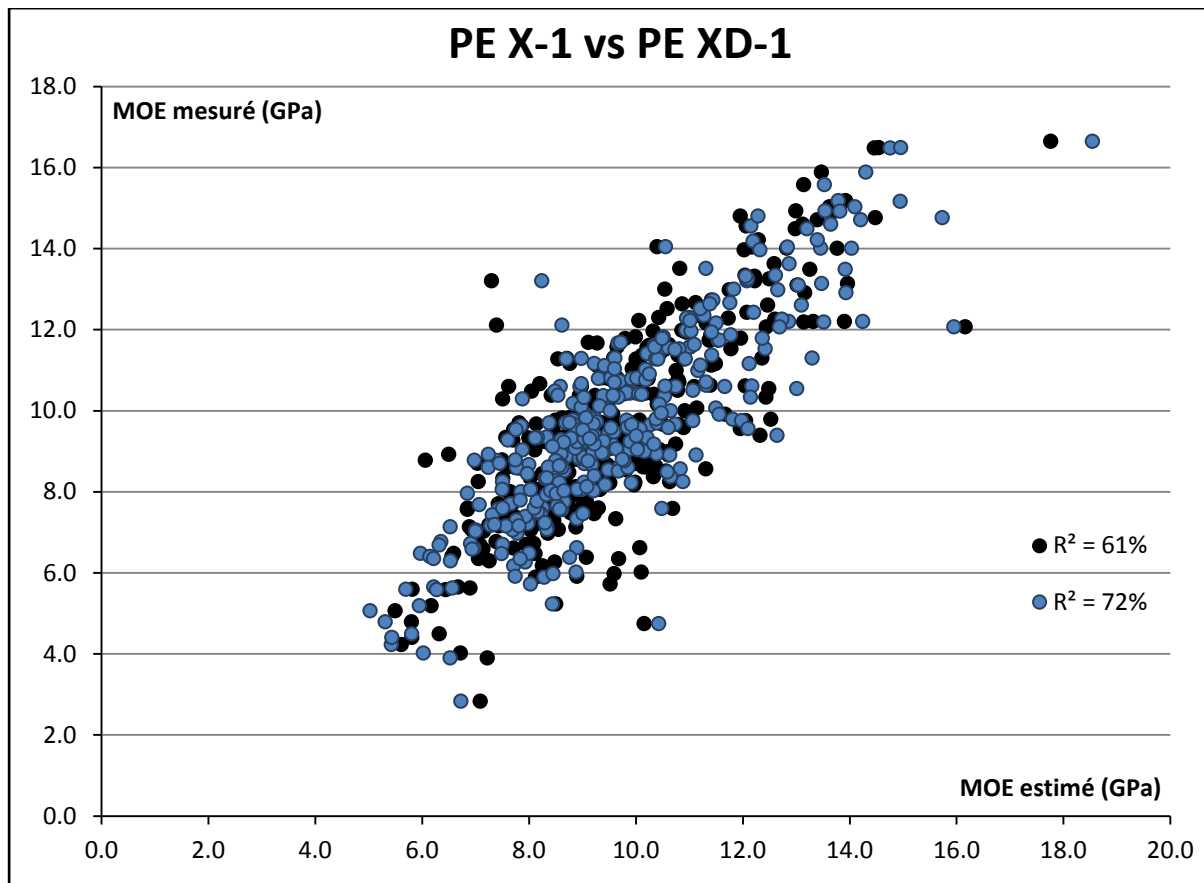


Figure 45 : Comparaison des modèles PE X-1 (points noirs) et PE XD-1 (points bleus) en flexion.

#### 4.6.1 : Méthode

Jusqu'à présent, afin de comparer les résultats des différents modèles étudiés (KAR et PE), nous nous sommes contentés de mesurer les coefficients de détermination  $R^2$  entre les valeurs prédites par calcul et les valeurs mesurées par essais destructifs. Dans notre cas, cet indice n'est plus suffisant car il ne permet pas de distinguer les sciages en fonction de leurs propriétés mécaniques, et selon des intervalles définis au préalable.

Nous avons donc été contraints de développer un indice approprié, permettant de caractériser localement la forme des nuages de points. Celui-ci a pour objectif, en quelque sorte, de mesurer la largeur de ce dernier pour une position donnée sur l'axe vertical, ainsi que son écart par rapport à la droite de régression. Le calcul de cet indice, que nous appellerons  $S$ , est similaire à un intervalle de confiance de l'erreur d'estimation selon une simplification de la loi de Student, comme le montre l'équation suivante :

$$S_{y1,y2} = \sqrt{\frac{1}{Nb_{y \in [y1,y2]}} \sum_{y=y1}^{y2} (x - y)^2}$$

Équation 25 : Expression de  $S$  pour un nuage de points  $(x,y)$  quelconque, sur l'intervalle  $[y_1, y_2]$ .

$Nb_{y \in [y1,y2]}$  désigne le nombre de points  $(x,y)$  tels que  $y$  appartient à cet intervalle.

Bien entendu, l'expression de cet indice n'a de sens que si une correction affine des valeurs estimées a été réalisée au préalable. L'ensemble des indices obtenus pour un nuage donné, c'est-à-dire pour un ensemble d'intervalles contigus couvrant la totalité de ses points, constitue ce que nous appellerons sa signature. Les signatures ainsi obtenues par plusieurs nuages de points peuvent alors être comparées, et caractérisent ainsi les performances relatives de deux modèles : plus la valeur de la signature est importante sur un intervalle donné, plus l'erreur d'estimation commise sera grande sur ce même intervalle. La figure ci-dessous permet ainsi, par exemple, de comparer les signatures des deux nuages de la Figure 45 :

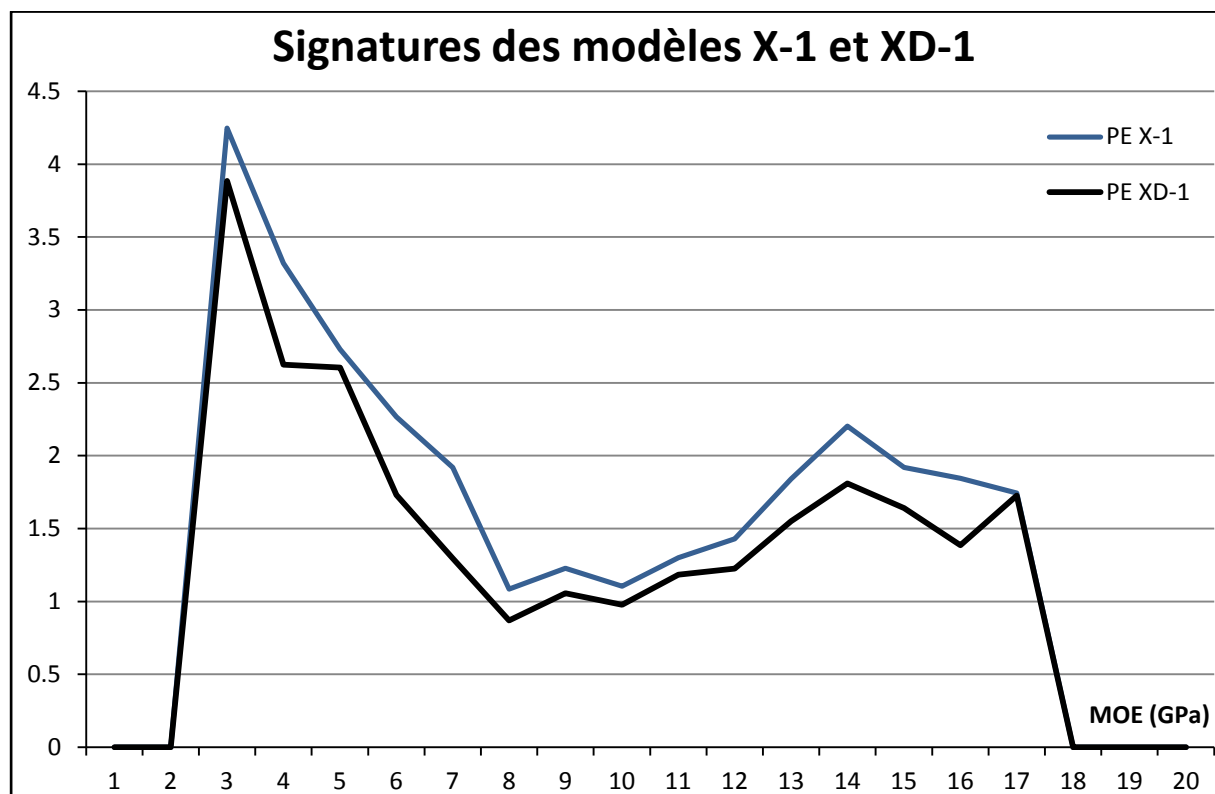


Figure 46 : Signatures des modèles PE X-1 et PE XD-1 (MOE en flexion).

Ce test a été effectué sur le lot S6, afin de disposer de données à la fois en flexion (FL) et en traction (TR). Les signatures des modèles PE XD-1 PE MD-1 et PE XMD-1 ont été comparées à celles de leurs équivalents ne prenant pas en compte la pente de fil, et ce pour les combinaisons de machines « C » (CombiScan+ seul) et « C+E » (combiné au E-Scan).

Enfin, nous avons distingué quatre groupes de classes mécaniques :

- Basses classes (B) : jusqu'à C18 incluse
- Moyennes classes (M) : de C20 à C27
- Hautes classes (H) : de C30 à C40
- Très hautes classes (TH) : à partir de C45

#### 4.6.2 : Résultats

Les résultats de toutes ces comparaisons ont été retranscrits dans le Tableau 22. Les symboles « - », « = » et « + » signifient que l'erreur d'estimation des propriétés mécaniques avec pente de fil est respectivement moins, équivalente, ou plus importante que sans.

| MOE         |          | B  | M  | H  | TH |
|-------------|----------|----|----|----|----|
| XD-1        | C - FL   | -  | -  | -  | -  |
|             | C - TR   | -  | -  | -  | -  |
|             | C+E - FL | NA | NA | NA | NA |
|             | C+E - TR | NA | NA | NA | NA |
| MD-1        | C - FL   | =  | -  | -  | -  |
|             | C - TR   | -  | =  | -  | -  |
|             | C+E - FL | NA | NA | NA | NA |
|             | C+E - TR | NA | NA | NA | NA |
| XMD-1       | C - FL   | =  | -  | -  | -  |
|             | C - TR   | -  | =  | -  | -  |
|             | C+E - FL | NA | NA | NA | NA |
|             | C+E - TR | NA | NA | NA | NA |
| TOTAL « - » |          | 4  | 4  | 6  | 6  |
| TOTAL « = » |          | 2  | 2  | 0  | 0  |
| TOTAL « + » |          | 0  | 0  | 0  | 0  |

| MOR         |          | B | M | H | TH |
|-------------|----------|---|---|---|----|
| XD-1        | C - FL   | - | - | = | -  |
|             | C - TR   | - | = | - | -  |
|             | C+E - FL | + | = | = | -  |
|             | C+E - TR | - | + | - | -  |
| MD-1        | C - FL   | + | - | - | -  |
|             | C - TR   | - | - | - | -  |
|             | C+E - FL | + | = | = | =  |
|             | C+E - TR | + | - | - | -  |
| XMD-1       | C - FL   | = | - | = | -  |
|             | C - TR   | - | = | - | -  |
|             | C+E - FL | + | = | = | -  |
|             | C+E - TR | - | + | - | -  |
| TOTAL « - » |          | 6 | 5 | 7 | 11 |
| TOTAL « = » |          | 1 | 5 | 5 | 1  |
| TOTAL « + » |          | 5 | 2 | 0 | 0  |

Tableau 22 : Comparaison entre les signatures des modèle de PE avec et sans pente de fil, en fonction des groupes de classes mécaniques.

Dans le cas du MOE, la signature du PE avec pente de fil est toujours au plus équivalente à celle du PE sans pente de fil, ce qui signifie que l'erreur d'estimation diminue quel que soit le groupe de classes observé. Ceci est cohérent avec les observations précédentes, qui montraient que la prise en compte de la pente de fil permet d'améliorer de manière plus importante l'estimation du MOE que du MOR.

Dans les deux cas, l'observation des totaux montre de manière flagrante une transition des pièces de basses aux très hautes caractéristiques mécaniques : le nombre de « - » a tendance à augmenter, et les « + » ont tendance à nettement diminuer. Par ailleurs, dans tous les cas, le nombre de « - » est toujours supérieur au nombre de « + ».

On peut donc en conclure que, quelle que soit la combinaison de classes choisie, la prise en compte de la pente de fil est toujours bénéfique. Cependant, la différence est d'autant plus forte que les classes choisies sont hautes. Ceci peut s'expliquer par le fait que les sciages de hautes propriétés mécaniques comportent peu de nœuds. L'influence globale des nœuds diminue donc, dans ces cas, au profit d'autres singularités, dont la pente de fil.

#### 4.7 Tests de répétabilité

Au cours de son processus d'homologation, une machine de classement mécanique est soumise à trois tests. Les deux premiers, que nous avons évoqués au cours du premier chapitre (voir p. 32), permettent de définir les seuils appliqués sur les IPs définissant les frontières entre les différentes classes. Ce sont en fait aux résultats de ces tests que bénéficient les progrès réalisés dans l'estimation des propriétés mécaniques. Le dernier test est en revanche le seul capable de priver une machine de certification, puisqu'il définit le degré de fidélité minimal de cette machine en tant qu'appareil de mesure. En d'autres termes, il impose une limite sur l'erreur aléatoire de quantification des IPs, sans tenir compte du lien entre ces IPs et les propriétés mécaniques réelles.

#### 4.7.1 : Sources d'erreurs aléatoires

La première partie des essais relatifs à la répétabilité du scanner consiste à quantifier la fidélité de l'ensemble scanner + modèle. Plus précisément, il s'agit d'isoler les différentes sources potentielles d'erreurs, de manière à évaluer la prédominance des unes par rapport aux autres. Compte-tenu de la nature du modèle utilisé, toute erreur aléatoire commise sur le calcul des IPs trouve son origine dans l'acquisition des données. Nous avons donc identifié quatre facteurs indépendants susceptibles d'induire une telle erreur : l'incertitude intrinsèque à l'acquisition des images, le sens de passage des planches dans le scanner, le réglage de puissance du tube à rayons X, et le seuil de détection des ellipses du laser point. Le plan d'expérience correspondant, appliqué à deux lots d'épicéa et de douglas d'origine Française, est détaillé dans le Tableau 23 :

| Description        | Sens de passage  | Puissance X (U,I) | Seuil laser | Nb de planches |
|--------------------|------------------|-------------------|-------------|----------------|
| Acquisition 1 (A1) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Acquisition 2 (A2) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Acquisition 3 (A3) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Acquisition 4 (A4) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Acquisition 5 (A5) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Sens 1 (S1)        | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 20             |
| Sens 2 (S2)        | Arrière          | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 20             |
| Sens 3 (S3)        | A l'envers       | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 20             |
| Sens 4 (S4)        | Arrière + envers | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 20             |
| Puissance X 1 (X1) | -                | 25, 30 / 30, 30   | 35          | 63 / 54        |
| Puissance X 2 (X2) | -                | 30, 35 / 35, 35   | 35          | 63 / 54        |
| Puissance X 3 (X3) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 63 / 54        |
| Puissance X 4 (X4) | -                | 40, 45 / 40, 45   | 35          | 63 / 54        |
| Seuil laser 1 (L1) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 30          | 20             |
| Seuil laser 2 (L2) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 33          | 20             |
| Seuil laser 3 (L3) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 35          | 20             |
| Seuil laser 4 (L4) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 37          | 20             |
| Seuil laser 5 (L5) | -                | 35, 40 / 40, 40   | 40          | 20             |

Tableau 23 : Plan d'évaluation de la fidélité du scanner. Bleu = épicéa, rouge = douglas.

Pour chacun des 18 essais présentés dans le tableau ci-dessus, l'IP correspondant au MOR de chaque planche a été extrait à partir des images acquises et traitées par le modèle PE XD-1, puis corrigé de manière à correspondre aux valeurs destructives. La raison pour laquelle nous avons choisi de nous concentrer sur cet IP est qu'étant en bout de la chaîne de traitement, celui-ci accumule les incertitudes liées au calcul de deux autres, et est donc plus susceptible de présenter une erreur de répétabilité importante. Nous considérons comme valeurs d'IP de référence, pour chaque planche, la moyenne des valeurs obtenues au cours de ces différents essais. L'erreur d'estimation statique des IPs, pour chaque essai, est alors définie comme la moyenne des écarts entre les valeurs obtenues pour chaque planche et les valeurs de référence correspondantes. L'erreur aléatoire est défini comme l'intervalle de confiance à 99%, au sens de la loi de Student, de ces écarts autour de l'erreur statique. Notons que dans les cas des essais X1 à X4, une calibration de la densitométrie a été systématiquement effectuée.

Nous obtenons donc, pour chacun de ces essais, une valeur d'erreur statique correspondant au biais du calcul de l'IP de MOR, et une valeur d'erreur aléatoire représentant la fidélité de l'ensemble scanner + modèle, toujours concernant l'IP de MOR.

Les résultats de ces essais sur le lot d'épicéa, présentés dans la Figure 47, montrent que les valeurs d'erreurs statiques et aléatoires restent relativement stables autour de leurs moyennes respectives. Notons ici que les valeurs d'erreurs, apparemment plus importantes, des essais S2 à X1 correspondent très probablement à l'apparition d'une panne du compresseur, provoquant une chute d'approvisionnement en air comprimé du scanner pouvant fortement perturber l'acquisition des images. Nous avons ensuite pu compenser en partie ce problème pour les essais suivants, ce qui expliquerait que les valeurs d'erreur baissent pour les essais suivants.

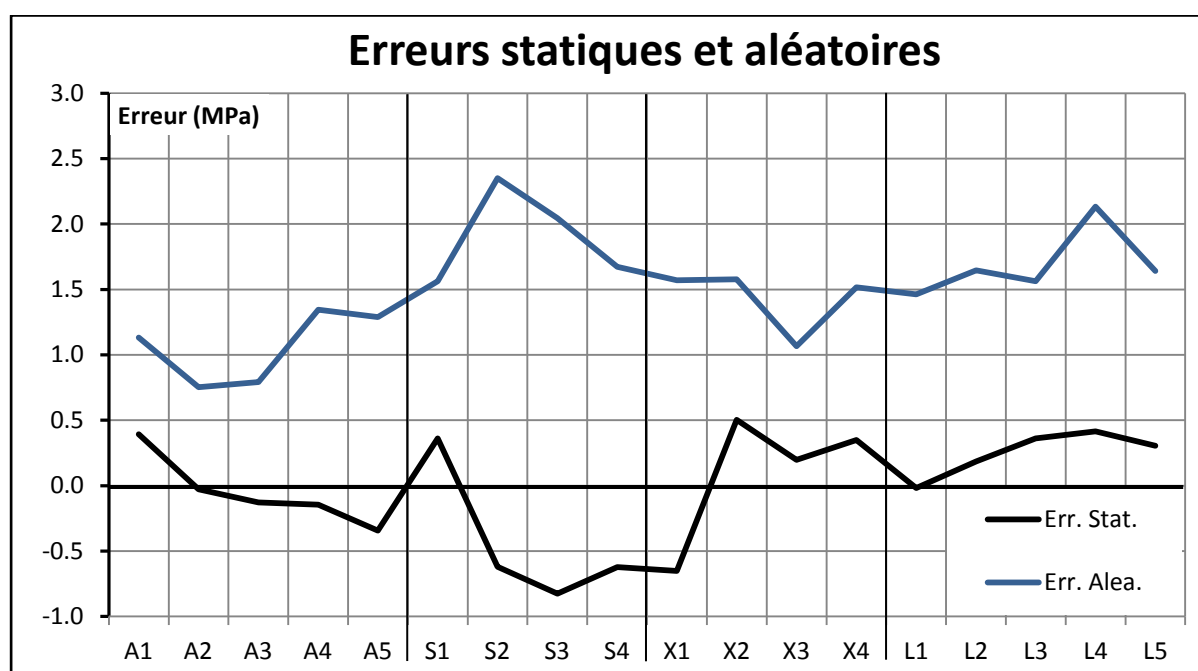


Figure 47 : Erreurs statiques et aléatoires relevées pour chaque essai sur le lot d'épicéa.

Nous retiendrons donc de ces résultats que l'intervalle de confiance relatif à aux valeurs des IPs de MOR est de l'ordre de 1,5 MPa, ce qui dans notre cas correspond à environ 6% de leur moyenne. Ce résultat peut être considéré comme acceptable puisque, à titre de comparaison, l'erreur de répétabilité du E-Scan a été évaluée à environ 5%.

#### 4.7.2 : Test de répétabilité normalisé

La seconde partie des essais de répétabilité consiste à vérifier la capacité du scanner à valider une éventuelle homologation. Celui-ci consiste à scanner 5 fois de suite un ensemble de 100 planches. Trois seuils sont alors définis sur les IPs de MOR de manière à séparer les planches en 4 classes fictives. Pour chacun des 5 passages, chaque planche se voit donc attribuer une classe, et sa classe de référence est alors définie comme la plus fréquente. On peut donc établir une matrice de contingence recensant le nombre total de planches pour chaque combinaison classe assignée / classe de référence. Cette matrice de contingence est alors multipliée par une matrice de coûts élémentaires, puis les résultats sont divisés par le nombre de planches assignées à chaque classe. Cette méthode est fortement semblable à la méthode des coûts globaux (voir p. 32), la principale différence résidant dans les valeurs de coûts élémentaires. Dans notre cas, aucune valeur de la matrice de coûts globaux ne doit dépasser 0,1. Le Tableau 24 présente le calcul des coûts globaux dans un cas fictif d'erreur de répétabilité excessif du point de vue de la norme.

| MAT. DE CONTINGENCE |                 |     |     |     | MAT. DE COUTS ELEM. |                 |   |   |   | MAT. DE COUTS GLOBAUX |                 |      |      |      |
|---------------------|-----------------|-----|-----|-----|---------------------|-----------------|---|---|---|-----------------------|-----------------|------|------|------|
| REF                 | CLASSE ASSIGNEE |     |     |     | REF                 | CLASSE ASSIGNEE |   |   |   | REF                   | CLASSE ASSIGNEE |      |      |      |
|                     | A               | B   | C   | D   |                     | A               | B | C | D |                       | A               | B    | C    | D    |
| A                   | 118             | 5   | 0   | 0   | A                   | 0               | 1 | 2 | 3 | A                     | 0,00            | 0,04 | 0,00 | 0,00 |
| B                   | 8               | 102 | 9   | 2   | B                   | 1               | 0 | 1 | 2 | B                     | 0,06            | 0,00 | 0,07 | 0,03 |
| C                   | 1               | 13  | 111 | 10  | C                   | 2               | 1 | 0 | 1 | C                     | 0,02            | 0,11 | 0,00 | 0,08 |
| D                   | 0               | 0   | 7   | 114 | D                   | 3               | 2 | 1 | 0 | D                     | 0,00            | 0,00 | 0,06 | 0,00 |

Tableau 24 : Exemple fictif de calcul de coûts globaux correspondant à un test de répétabilité

Plusieurs tests de répétabilité ont donc été effectués à partir des images obtenues lors des essais A1 à A5, et pour les lots d'épicéa et de douglas. Ces essais ont été réalisés à partir du nombre de pièces disponibles, soit 63 planches pour l'épicéa et 54 pour le douglas, et dans différentes configurations précisées dans le Tableau 25. Concernant la combinaison scanner + E-Scan, les données utilisées proviennent de la certification de ce dernier sur d'autres lots de planches, après avoir rapproché les valeurs similaires de module d'élasticité dynamique d'une part, et d'IP de MOE corrigé d'autre part. Enfin, la colonne « Correct. Dens. » indique si un étalonnage spécifique de densitométrie a été réalisé pour chaque passage, ou si un réglage général a été appliqué.

| Essence | E-Scan | Mode     | Correct. Dens. | Résultat | Coût max. |
|---------|--------|----------|----------------|----------|-----------|
| Spruce  | Non    | flexion  | Oui            | OK       | 0.038     |
| Spruce  | Non    | flexion  | Non            | OK       | 0.075     |
| Spruce  | Non    | traction | Non            | OK       | 0.077     |
| Spruce  | Oui    | flexion  | Non            | OK       | 0.063     |
| Douglas | Non    | flexion  | Oui            | OK       | 0.060     |
| Douglas | Non    | flexion  | Non            | OK       | 0.074     |
| Douglas | Non    | traction | Non            | OK       | 0.091     |

Tableau 25 : Liste des combinaisons testées et les résultats correspondants.

La principale information que l'on peut tirer de ce tableau est que toutes les combinaisons testées semblent passer le test de répétabilité. On doit toutefois émettre ici quelques réserves. D'une part, le nombre de pièces dans chaque lot est inférieur au nombre requis par la norme. D'autre part, la répartition des pièces, et en particulier la concentration des valeurs d'IPs au voisinage des seuils des 4 classes fictives, revêt une importance capitale pour un test tel que celui-ci. Il est donc impossible d'affirmer avec certitude que le Combiscan+ passerait, le cas échéant, un véritable test d'homologation. Néanmoins, ces résultats s'avèrent fort encourageants.

La deuxième information intéressante est qu'il ne sera à priori pas nécessaire de procéder à un étalonnage de la densitométrie X à chaque allumage du tube. On constate que dans ce cas, le scanner présente une moindre répétabilité, probablement due à l'incertitude du générateur à haute tension sur les valeurs de tension et d'intensité électrique fournies. Cette incertitude est très faible, et difficilement détectable sur une simple mesure de densité, mais on constate qu'elle a tout de même un impact, certes réduit, sur la valeur maximale des coûts globaux.

## 4.8 Variation de pente de fil dans l'épaisseur des sciages

Nous avons déjà évoqué le fait que l'hypothèse de variation linéaire de la pente de fil dans l'épaisseur des sciages constitue une des plus fortes limitations de cette étude. L'objectif de cette partie est d'étudier l'impact de cette hypothèse sur les valeurs des IPs de MOE et de MOR. Dans un premier temps, nous allons quantifier l'erreur commise sur les valeurs de pente de fil dans les zones de bois sain, et les comparer à la fidélité de la mesure de cet angle par effet trachéides. Nous étudierons ensuite les erreurs commises sur les IPs, en prenant cette fois en compte les zones de nœuds.

### 4.8.1 : Erreur d'estimation de la pente de fil

Nous allons, au cours de ce paragraphe, évaluer l'erreur d'estimation de la pente de fil due à l'hypothèse de variation linéaire utilisée au cours de cette étude. 11 planches d'épicéa de dimensions 44x150x2000 (mm), et dont les faces ont été rabotées, ont été scannées une première fois, et les valeurs de pente de fil relevées sur les faces. Elles ont ensuite été successivement rabotées de 2mm sur chaque face, puis scannées à nouveau jusqu'à une épaisseur de 12mm.

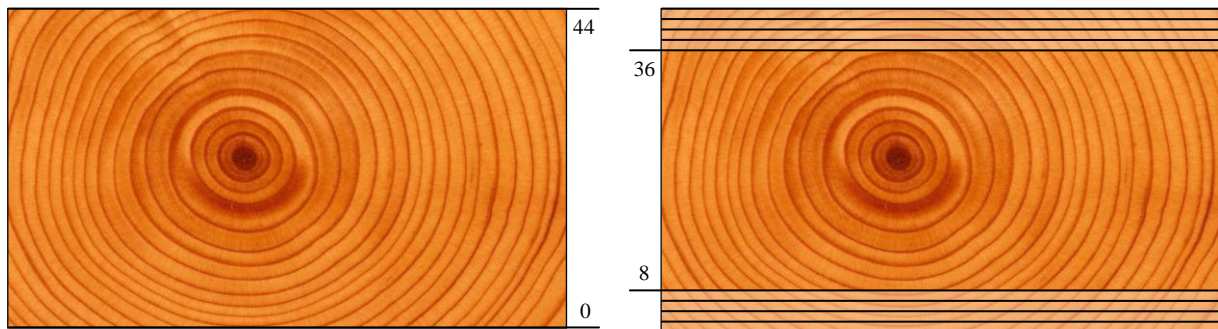


Figure 48 : Coupe d'une planche à l'état initial (gauche) et après 4 passes de rabotage (droite). Les positions de référence correspondantes sont également indiquées.

Nous avons donc pu comparer sur cet intervalle l'écart entre les valeurs estimées par notre hypothèse et les valeurs effectivement mesurées, en sélectionnant plus de 7000 points de mesure dans les zones de bois sain, c'est-à-dire ne présentant pas de pente de fil supérieure à 25°. Cette valeur de 25° a été choisie car d'une part la mesure par effet trachéides devient instable pour de grandes valeurs d'angle, et d'autre part, d'après la formule de Hankinson, une variation d'angle au-delà de cette valeur n'a mécaniquement plus une grande influence. Enfin, grâce aux essais de répétabilité effectués précédemment, nous avons pu évaluer la justesse de la mesure de pente de fil à 9,6°.

L'ensemble des résultats obtenus est contenu dans le Tableau 26. Toutes les valeurs d'erreur présentées s'entendent comme l'intervalle de confiance à 99% de l'erreur d'estimation. A chaque ligne correspond une position sur l'axe  $Z$  pour laquelle la pente de fil a pu être mesurée et estimée, ces positions étant définies par rapport aux planches avant rabotage. Les positions de référence correspondent quant à elles aux positions ayant servi de base à l'estimation de ces angles. Ce changement de position de référence permet ainsi de simuler une campagne d'essais similaire réalisée à partir de planches d'épaisseurs différentes.



| POSITION<br>(mm) | POSITIONS DE REFERENCE (mm) |         |         |         |         |         |         |         |
|------------------|-----------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                  | 00 - 44                     | 02 - 42 | 04 - 42 | 06 - 38 | 08 - 36 | 10 - 34 | 12 - 32 | 14 - 30 |
| 2                | 12,56                       |         |         |         |         |         |         |         |
| 4                | 11,88                       | 11,96   |         |         |         |         |         |         |
| 6                | 12,33                       | 12,35   | 11,82   |         |         |         |         |         |
| 8                | 12,14                       | 12,28   | 11,90   | 12,56   |         |         |         |         |
| 10               | 12,00                       | 12,04   | 11,69   | 12,16   | 12,18   |         |         |         |
| 12               | 12,37                       | 12,34   | 12,02   | 12,38   | 12,38   | 12,14   |         |         |
| 14               | 12,06                       | 12,03   | 11,88   | 12,16   | 12,06   | 12,09   | 12,21   |         |
| 16               | 12,70                       | 12,61   | 12,48   | 12,74   | 12,61   | 12,49   | 12,70   | 12,60   |
| 28               | 12,23                       | 12,20   | 12,39   | 12,33   | 12,34   | 12,10   | 12,05   | 11,92   |
| 30               | 11,92                       | 11,87   | 11,87   | 11,86   | 11,75   | 11,82   | 11,96   |         |
| 32               | 11,88                       | 12,05   | 11,85   | 12,07   | 11,86   | 11,81   |         |         |
| 34               | 11,91                       | 11,75   | 11,96   | 11,80   | 11,49   |         |         |         |
| 36               | 11,62                       | 11,75   | 11,72   | 11,79   |         |         |         |         |
| 38               | 12,07                       | 11,76   | 12,04   |         |         |         |         |         |
| 40               | 11,90                       | 11,31   |         |         |         |         |         |         |
| 42               | 11,39                       |         |         |         |         |         |         |         |
| MOYENNE          | 12,06                       | 12,02   | 11,97   | 12,18   | 12,08   | 12,08   | 12,23   | 12,26   |

Tableau 26 : Erreurs d'estimation (°) de pente de fil en fonction de l'épaisseur de départ

On constate immédiatement que les valeurs d'erreur ne dépendent ni de la distance entre les positions de référence et la position de mesure, ni de l'épaisseur de départ des sciages. Les valeurs d'erreur restent en effet concentrées autour de 12°, ce qui est légèrement supérieur à l'erreur de répétabilité de 9,6° évaluée précédemment sur un autre lot de planches. Par ailleurs, nous avons pu observer que les valeurs d'erreur relevées pour chaque planche individuellement se situent entre 10° et 14°, soit assez proches de la valeur moyenne pour le lot complet. Bien que ces résultats ne constituent pas une preuve formelle, il est fort probable que ces valeurs d'erreur de 12° correspondent en fait à l'erreur de répétabilité de la mesure de pente de fil pour ce lot de planches particulier. Dans tous les cas, on peut raisonnablement considérer que l'hypothèse de variation linéaire de pente de fil induit une erreur d'estimation relativement faible dans les zones de bois sain.

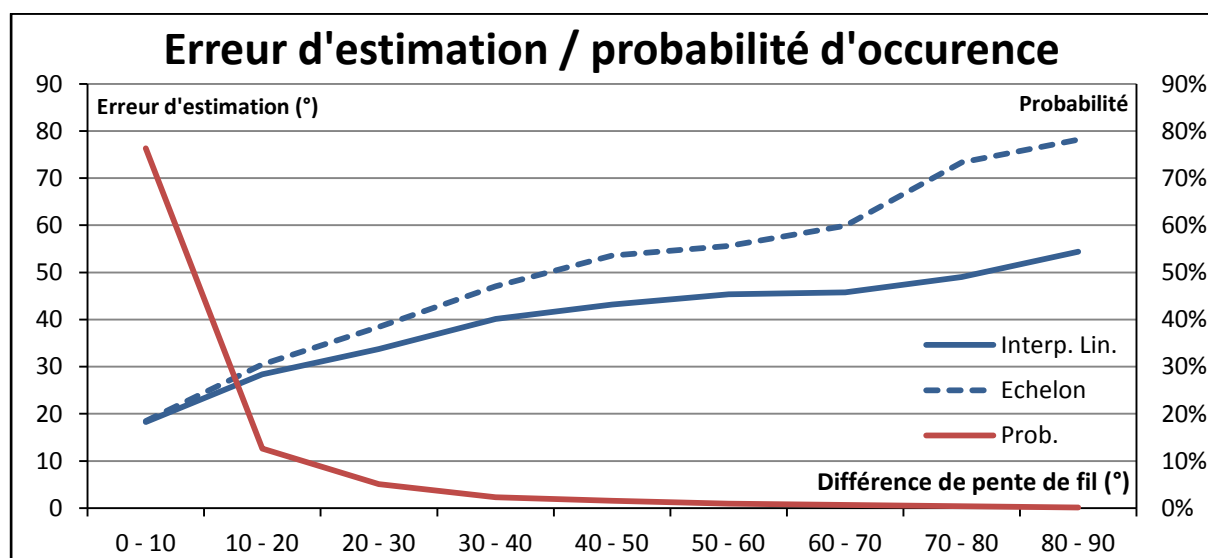


Figure 49 : Erreur d'estimation et probabilité d'occurrence en fonction de la différence de pente de fil entre les faces supérieures et inférieures de sciages



Les essais précédents ne concernant que les zones où les valeurs de pente de fil n'excèdent pas 25°, la différence de pente de fil entre les faces supérieures et inférieures des sciages est donc limitée. Dans ce cas, les valeurs estimées dans l'épaisseur des sciages dépendent peu de la méthode d'interpolation utilisée. L'objectif de la Figure 49 est de comparer les erreurs d'estimation obtenues par deux méthodes d'interpolation : linéaire, telle que nous l'avons utilisée jusqu'à présent, et au point le plus proche (échelon). Les résultats sont donnés en fonction de la différence de pente de fil entre les faces supérieures et inférieures des sciages, dont la probabilité d'occurrence est donnée pour information. Pour ces essais, aucune restriction n'est appliquée aux valeurs mesurées de pente de fil, ce qui permet cette fois-ci de prendre en compte les zones de nœuds.

On constate immédiatement que la méthode d'interpolation linéaire entraîne une erreur d'estimation moins importante que la méthode d'interpolation au point le plus proche, et que l'écart entre ces méthodes augmente avec la différence de pente de fil entre les faces supérieures et inférieures. L'observation des probabilités d'occurrence montre toutefois que l'apport de l'interpolation linéaire est faible sur les intervalles les plus déterminants, soit jusqu'à 30° de différence. L'estimation des propriétés mécaniques devrait donc finalement être peu affectée par le choix d'une des deux méthodes. L'interpolation linéaire gardant l'avantage, nous continuerons à utiliser celle-ci dans la suite de cette étude.

#### 4.8.2 : Impact sur l'estimation de propriétés mécaniques

Nous avons vu que notre hypothèse de départ est dans une certaine mesure valable dans les zones de bois sain. Nous allons à présent quantifier l'erreur qu'elle provoque sur le calcul des IPs corrigées de MOE et de MOR, en tenant compte cette fois des zones de nœuds. Pour cela nous avons repris l'échantillon de planche utilisées précédemment. Nous avons dans un premier temps calculé les IPs de ces planches à partir du modèle du PE XD-1 tel que nous l'avons défini. Dans un second temps, nous avons recalculé ces IPs, en remplaçant les valeurs estimées de pente de fil par les valeurs mesurées correspondantes quand elles étaient disponibles. Comme nous ne disposons pas de valeurs mesurées entre les positions 16mm et 28mm, les valeurs de pente de fil dans cet intervalle ont été estimées par interpolation linéaire entre ces mêmes positions. Les intervalles de confiance à 99% des écarts entre les IPs calculés de ces deux manières sont consignés dans le Tableau 27. A titre de comparaison, L'erreur de répétabilité du scanner sur le calcul des IPs, ainsi que l'erreur d'estimation globale des propriétés mécaniques sont indiquées.

| POSITIONS DE REF<br>(mm) | ERREUR SUR IP MOE<br>(GPa) | ERREUR SUR IP MOR<br>(MPa) |
|--------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 00 - 44                  | 1,75                       | 5,96                       |
| 02 - 42                  | 1,74                       | 6,22                       |
| 04 - 42                  | 1,76                       | 4,87                       |
| 06 - 38                  | 1,96                       | 3,98                       |
| 08 - 36                  | 2,10                       | 4,79                       |
| 10 - 34                  | 2,25                       | 4,03                       |
| 12 - 32                  | 1,99                       | 3,89                       |
| 14 - 30                  | 1,65                       | 3,18                       |
| REPETABILITE             | 0,30                       | 1,50                       |
| GLOBALE                  | 3,68                       | 20,8                       |

Tableau 27 : Erreurs sur les IPs dues à l'hypothèse de variation linéaire.

Concernant uniquement les valeurs d'erreur relevées, on constate immédiatement un fait intéressant : si les erreurs commises sur le MOE semblent relativement stables sur les intervalles considérés, celles commises sur le MOR augmentent avec l'épaisseur du sciage. Ceci peut s'expliquer par le fait que, contrairement au module élastique d'une poutre, sa contrainte de rupture dépend des propriétés mécaniques locales au point de rupture initial. Autrement dit, une erreur individuelle sur l'estimation de pente de fil peut fortement modifier l'IP de MOR, mais aura peu d'influence sur le MOE. Le deuxième constat est que, compte tenu des valeurs des erreurs de répétabilité intrinsèques au scanner, les erreurs sur les IPs dues à l'estimation de pente de fil ne peuvent être imputées à un défaut de justesse du système. Enfin, on remarque que dans le cas du MOE, l'erreur due à l'estimation de pente de fil est à peine inférieure à l'erreur globale commise par l'ensemble scanner + modèle, sachant que celle-ci est déjà relativement faible. En revanche l'erreur commise sur l'IP de MOR semble avoir une influence relativement faible sur l'erreur globale du système pour des épaisseurs de sciages allant de faibles à moyennes. On peut donc conclure de tout cela que notre hypothèse de variation linéaire est loin d'être idéale, sans pour autant être catastrophique. Dans ce domaine, le développement d'un modèle précis, complet et de mise en œuvre simple serait donc grandement bienvenu.

#### 4.9 Influence des paramètres de calcul

Au cours de la présentation du modèle du Profilé Equivalent, nous avons introduit en tout 8 paramètres :  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $p$  et  $S_E$  qui interviennent lors du calcul du MOE, et  $f_1$ ,  $f_2$ ,  $\alpha$  et  $N$ , permettant de déterminer le MOR. L'optimisation de ces paramètres, actuellement réalisée empiriquement, permet ainsi de maximiser les corrélations entre les IPs et les propriétés mécaniques correspondantes. Les tests de validation croisée réalisés précédemment nous ont permis de quantifier la robustesse globale du modèle, et de vérifier la pertinence d'une optimisation large couvrant plusieurs lots à la fois. L'objectif de cette partie sera d'évaluer la sensibilité du modèle à une variation des paramètres d'entrée, et de pouvoir classer ces derniers en fonction de leur influence.

Notre hypothèse de travail principale est que les interactions entre les différents paramètres sont négligeables au regard de l'influence des paramètres eux-mêmes. Le plan d'expériences que nous avons adopté consiste donc en une variation successive des différents paramètres un à un, jusqu'à  $\pm 10\%$  de leurs valeurs nominales respectives. Le modèle du Profilé Equivalent PE XD-1 a alors été appliqué au lot S7, comportant uniquement des pièces de flexion, et les coefficients de détermination  $R^2$  entre les IPs et les valeurs destructives ont été relevés. Enfin, les valeurs nominales des différents paramètres résultent de l'optimisation de ces derniers pour le lot S complet, regroupant les pièces des lots S6 et S7. L'ensemble des valeurs de chaque paramètre pour chaque essai est défini dans le Tableau 28.

Les résultats de ces différents essais sont représentés sur la Figure 50. On constate immédiatement que les valeurs des  $R^2$  obtenues ne varient que très peu en fonction des paramètres de calcul, sauf dans le cas du paramètre  $f_1$  appliqué à l'estimation du MOE. On relève en effet, pour ce dernier, une amplitude des  $R^2$  de l'ordre de 3 points, alors qu'elle est limitée à environ 1 point pour tous les autres, à la fois concernant l'estimation du MOE et celle du MOR. Cette observation pourra s'avérer utile lors d'une optimisation, car elle montre qu'une attention particulière devra être apportée à ce paramètre.

| PLAN D'EXPERIENCES - MOE |             |             |             |             |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| N°                       | $f_1$       | $f_2$       | p           | $S_E$       |
| 1                        | <b>1.08</b> | 2.95        | 7.00        | 3.70        |
| 2                        | <b>1.14</b> | 2.95        | 7.00        | 3.70        |
| 3                        | <b>1.20</b> | 2.95        | 7.00        | 3.70        |
| 4                        | <b>1.26</b> | 2.95        | 7.00        | 3.70        |
| 5                        | <b>1.32</b> | 2.95        | 7.00        | 3.70        |
| 6                        | 1.20        | <b>2.66</b> | 7.00        | 3.70        |
| 7                        | 1.20        | <b>2.80</b> | 7.00        | 3.70        |
| 8                        | 1.20        | <b>2.95</b> | 7.00        | 3.70        |
| 9                        | 1.20        | <b>3.10</b> | 7.00        | 3.70        |
| 10                       | 1.20        | <b>3.25</b> | 7.00        | 3.70        |
| 11                       | 1.20        | 2.95        | <b>6.30</b> | 3.70        |
| 12                       | 1.20        | 2.95        | <b>6.65</b> | 3.70        |
| 13                       | 1.20        | 2.95        | <b>7.00</b> | 3.70        |
| 14                       | 1.20        | 2.95        | <b>7.35</b> | 3.70        |
| 15                       | 1.20        | 2.95        | <b>7.70</b> | 3.70        |
| 16                       | 1.20        | 2.95        | 7.00        | <b>3.33</b> |
| 17                       | 1.20        | 2.95        | 7.00        | <b>3.52</b> |
| 18                       | 1.20        | 2.95        | 7.00        | <b>3.70</b> |
| 19                       | 1.20        | 2.95        | 7.00        | <b>3.89</b> |
| 20                       | 1.20        | 2.95        | 7.00        | <b>4.07</b> |

| PLAN D'EXPERIENCES - MOR |             |             |             |              |
|--------------------------|-------------|-------------|-------------|--------------|
| N°                       | $f_1$       | $f_2$       | p           | $S_E$        |
| 21                       | <b>1.31</b> | 2.20        | 1.00        | 12.10        |
| 22                       | <b>1.38</b> | 2.20        | 1.00        | 12.10        |
| 23                       | <b>1.45</b> | 2.20        | 1.00        | 12.10        |
| 24                       | <b>1.52</b> | 2.20        | 1.00        | 12.10        |
| 25                       | <b>1.60</b> | 2.20        | 1.00        | 12.10        |
| 26                       | 1.45        | <b>1.98</b> | 1.00        | 12.10        |
| 27                       | 1.45        | <b>2.09</b> | 1.00        | 12.10        |
| 28                       | 1.45        | <b>2.20</b> | 1.00        | 12.10        |
| 29                       | 1.45        | <b>2.31</b> | 1.00        | 12.10        |
| 30                       | 1.45        | <b>2.42</b> | 1.00        | 12.10        |
| 31                       | 1.45        | 2.20        | <b>0.90</b> | 12.10        |
| 32                       | 1.45        | 2.20        | <b>0.95</b> | 12.10        |
| 33                       | 1.45        | 2.20        | <b>1.00</b> | 12.10        |
| -                        | -           | -           | -           | -            |
| -                        | -           | -           | -           | -            |
| 34                       | 1.45        | 2.20        | 1.00        | <b>10.89</b> |
| 35                       | 1.45        | 2.20        | 1.00        | <b>11.50</b> |
| 36                       | 1.45        | 2.20        | 1.00        | <b>12.10</b> |
| 37                       | 1.45        | 2.20        | 1.00        | <b>12.71</b> |
| 38                       | 1.45        | 2.20        | 1.00        | <b>13.31</b> |

Tableau 28 : Valeurs des paramètres adoptées pour chaque essai

Par ailleurs, les faibles amplitudes des  $R^2$  observées constituent également une appréciation complémentaire de la robustesse du modèle. Il est cependant important de rappeler ici que cette étude ne tient pas compte des interactions entre les différents paramètres, et en particulier concernant les paramètres  $f_1$  et  $f_2$  qui interviennent tous deux au cours du calcul du Knots Depth Ratio. Des essais complémentaires ont montré que la sensibilité du modèle aux variations de  $f_2$  a tendance à augmenter pour de faibles valeurs de  $f_1$ , ce dernier restant toutefois prédominant. Ces résultats confirment donc l'importance du choix de la valeur de  $f_1$  au cours de l'optimisation.

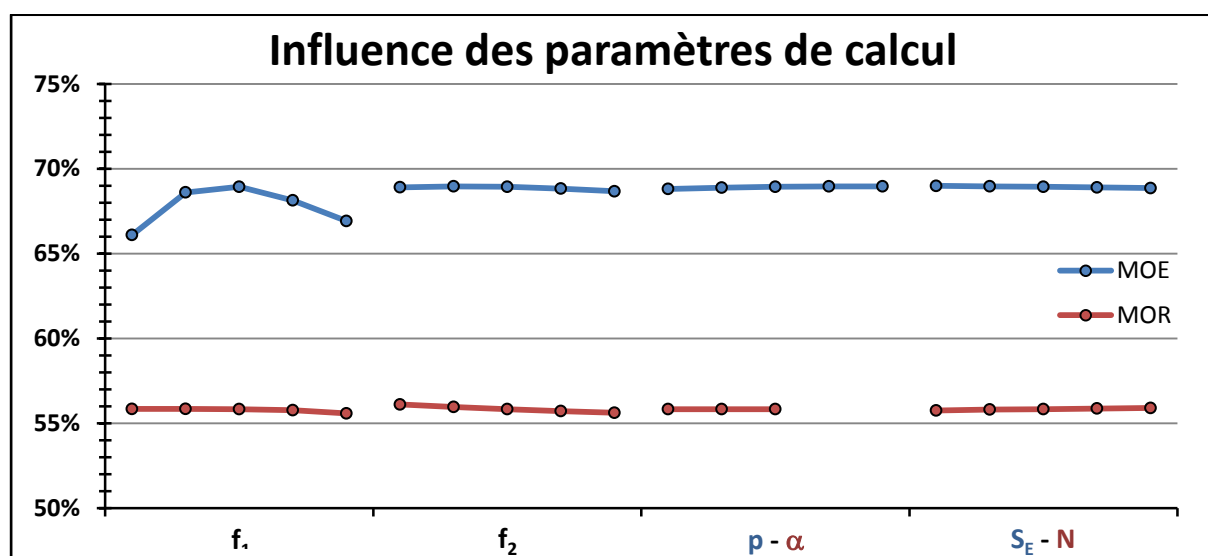


Figure 50 : Influence des paramètres de calcul pour le lot S7

## 5. Discussion

### 5.1 Performances

Tous les essais comparatifs entre les modèles de PE montrent clairement que la prise en compte de la pente de fil permet d'améliorer fortement l'estimation des propriétés mécaniques des sciages. Les résultats obtenus peuvent donc être considérés comme satisfaisants, malgré deux hypothèses fortes qui constituent, selon nous, les principales limitations du modèle.

Premièrement, la méthode de mesure de l'angle de plongée est fondée sur des considérations statistiques très limitatives, bien que nous ayons montré que la prise en compte de cet angle est tout de même bénéfique. Deuxièmement, l'interpolation linéaire de la pente de fil entre les faces supérieures et inférieures constitue une solution par défaut, et qui n'est pas fondé sur un quelconque modèle établi. L'absence de modèle théorique, ainsi que la contrainte imposée par le temps de calcul limitent actuellement le nombre des possibilités à deux : interpolation linéaire, ou interpolation au point le plus proche. Or, une série d'essais que nous n'avons pas publiée dans cette étude montre que les résultats obtenus par cette dernière méthode ne sont pas aussi bons qu'avec la première, bien que relativement proches. Nous avons également montré que notre méthode donne des résultats satisfaisants dans les zones de bois sain, et que l'erreur qu'elle engendre sur les IPs est acceptable, mais a tendance, dans le cas du MOR, à augmenter avec l'épaisseur des sciages. Etant donné que la précision des mesures de pente de fil par effet trachéides semble varier d'un lot de sciages à un autre, il serait utile de confirmer les résultats obtenus, éventuellement sur d'autres essences, et également pour des épaisseurs plus importantes.

Nous avons également pu constater que, de même que dans le chapitre précédent, les meilleurs résultats d'estimation sont obtenus en calculant tous les sciages comme des poutres en flexion, y compris les sciages testés en traction. Ceci, d'une part, confirme une fois de plus l'intérêt du Profilé Equivalent en tant que modèle prédictif. D'autre part, cela permet d'affirmer que le profil de direction des fibres, pourtant différent entre les nœuds situés à proximité des rives et les autres, n'est pas responsable de ce phénomène. Ni les essais réalisés, ni le modèle du PE ne nous permettent d'en désigner la cause. A ce stade, nous ne pouvons que suggérer différentes pistes de recherches, essentiellement basées sur des approches de mécanique non-linéaire : mécanique de la rupture, comportement élasto-plastique, concentrations de contraintes et effets de bord.

Enfin, nous avons proposé une méthode permettant d'exprimer les performances des modèles selon différents groupes de classes mécaniques. Une comparaison a donc été menée entre les modèles de PE basés uniquement sur les nœuds, et ceux prenant en compte la pente de fil. Les résultats montrent que d'une manière générale, les hautes, moyennes et basses classes mécaniques bénéficient toutes de la prise en compte de la pente de fil. Cependant, on note que ce bénéfice s'avère plus important vers les hautes classes. Nous avons alors tenté d'expliquer cette observation : dans ce cas, en effet, le nombre et la taille des nœuds diminuent leur influence sur le comportement mécanique des sciages, et l'influence de la pente de fil augmente donc en proportion. Cependant, il faut garder à l'esprit que cet essai n'a été réalisé que sur un seul lot et sur une seule essence, bien que ce lot soit de taille importante.

## 5.2 Robustesse

De même qu’au cours du chapitre précédent, une évaluation de la robustesse du modèle a été réalisée par validation croisée : d’abord au sein d’un même lot, puis entre les deux lots S6 et S7, pour lesquels nous disposons de lasers points.

Les résultats se sont montrés très encourageants. D’une part, nous avons observé une très bonne stabilité des résultats au sein du lot S6, pourtant composé de bois de différentes origines. Ceci est probablement dû au fait que les nœuds ne sont plus les seules singularités prises en compte, ce qui diminue l’influence des paramètres d’optimisation sur le résultat final.

D’autre part, il semble que la robustesse du modèle entre les deux lots s’est montrée légèrement réduite après la prise en compte de la pente de fil. Néanmoins, les amplitudes des  $R^2$  relevées restent relativement basses, et une optimisation effectuée sur l’ensemble des lots disponibles fournit des résultats quasi-optimaux pour chaque lot. Notons ici qu’il serait intéressant d’étendre ce test à un nombre plus important de lots et d’essences différents, de manière à confirmer que les résultats de cette étude soient bien représentatifs.

## 5.3 Fidélité

Deux tests visant à estimer la fidélité du scanner en tant qu’appareil de mesure ont été réalisés. Le premier nous a permis d’évaluer l’influence du sens de passage des planches, du réglage de puissance des rayons X, et du seuil de détection des ellipses sur les valeurs des IPs de MOR. Nous avons pu constater une légère augmentation de l’erreur de calcul de ces IPs en comparaison du degré de répétabilité intrinsèque au scanner. Il est probable que cette augmentation soit cependant due à des problèmes techniques rencontrés lors de la campagne d’essais, ce qui nous empêche de conclure définitivement sur ce point. En supposant que ce soit le cas, nous obtiendrions une incertitude globale de l’ordre de 6% sur les valeurs des IPs, ce qui reste raisonnable au regard d’autres machines.

Le second test est une simulation du test de répétabilité normalisé effectué lors de l’homologation des machines de classement mécanique. Il est parfaitement admis que les résultats obtenus ne constituent pas une garantie sur les résultats obtenus lors d’une homologation éventuelle, et ce pour deux raisons : le protocole expérimental que nous avons appliqué ne correspond pas exactement à celui prescrit par la norme, et même si c’était le cas, les résultats dépendent fortement du lot de bois testé. Cela étant dit, les résultats obtenus lors de nos tests se sont montrés très encourageants, puisque toutes les combinaisons testées présentent un degré de répétabilité satisfaisant.

## 6. Conclusion

Au cours de nos recherches bibliographiques, nous avons identifié la pente de fil comme une singularité pouvant fortement affecter le comportement mécanique des bois de structures, étant donnée son influence bien connue sur de petits échantillons de bois sain. Cependant, aucun modèle permettant de la prendre en compte sur des pièces de grandes dimensions n’avait encore été publié. A travers ce chapitre, nous avons introduit une méthode permettant de tenir compte de la déviation de fibres dans l’estimation des

propriétés mécaniques des sciages, ce qui constitue donc un progrès évident dans le domaine du classement mécanique. Cette méthode, comme nous l'avons vu, s'appuie fortement sur le modèle du Profilé Equivalent qui, rappelons-le, a précisément été mis au point selon cet objectif.

Les résultats offerts par ce modèle sont relativement satisfaisants, puisqu'il permet une augmentation des valeurs de  $R^2$  de l'ordre de 5 à 10 points pour les deux propriétés mécaniques étudiées, à savoir les MOE et MOR. Les progrès les plus significatifs sont observés dans l'estimation du MOE, ce qui permet d'améliorer fortement les performances du scanner optique CombiScan+ utilisé seul. De même, nous avons pu observer que l'apport de l'information de pente de fil profite particulièrement, mais pas exclusivement, aux pièces de hautes caractéristiques. Enfin, puisque les nœuds ne sont plus les seules singularités prises en compte, la robustesse du modèle se trouve fortement augmentée, et nous avons montré que la répétabilité du système permet d'envisager sereinement une homologation. Les différentes solutions technologiques de classement mécaniques, qui nous paraissent cohérentes d'un point de vue résultats/coût, sont donc à présent les suivantes :

- E-Scan seul
- CombiScan+ uniquement équipé des rayons X (modèle PE X-1)
- CombiScan+ uniquement équipé des caméras IVP et couleur (modèle PE MD-1)
- Combiscan+ avec équipement complet X + IVP + couleur (modèle PE XD-1 / XMD-1)
- Les trois dernières combinaisons + le E-Scan

Nous devons malgré tout noter que la méthode présentée dans ce chapitre reste critiquable en raison de certaines approximations. Il nous semble que celles-ci sont techniquement difficilement contournables à l'heure actuelle, et permettent malgré tout des résultats honorables. Mais il est certain que ce modèle est perfectible, et pourrait constituer une base intéressante pour d'autres travaux.

# Conclusions et perspectives

---

Nous avons évoqué au début de cette étude l'importance que revêt la problématique du classement mécanique au sein de l'industrie européenne du bois, et en particulier concernant les sciages destinés à une utilisation en structures. La demande en machines de classement mécanique connaît aujourd'hui une croissance forte, motivant ainsi les recherches visant à améliorer leurs performances. Considérant le potentiel des scanners optique CombiScan+ produits par Luxscan Technologies dans ce domaine, cette entreprise, partenaire essentiel de ce projet, nous a confié pour objectif la mise au point d'un modèle ou d'une méthode offrant la meilleure précision possible dans le calcul des propriétés mécaniques des sciages. Nos travaux ont donc consisté d'une part à identifier, à partir de la littérature, les pistes prometteuses l'amélioration, et d'autre part leur mise en œuvre.

## 1. Etat de l'Art initial

La première partie de nos travaux consistait en une analyse bibliographique, dont l'objectif principal était de collecter des informations concernant l'anatomie du matériau bois ainsi que les méthodes actuellement existantes permettant de caractériser ce dernier. Nous avons ainsi pu constater que la principale difficulté posée par ce matériau réside dans sa variabilité et son hétérogénéité à de multiples échelles. Le comportement d'un élément de structure bois est en effet déterminé par la présence de singularités macroscopique, comme par les caractéristiques de sa structure cellulaire, et même par sa microstructure.

Nous avons également vu que les méthodes de caractérisation physico-chimique du bois ne manquent pas. Celles permettant une observation du matériau à l'échelle macroscopique, comme la vision artificielle, la densitométrie, la tomographie, ou encore l'analyse vibratoire, peuvent aujourd'hui être considérées comme bien établies, et sont d'ailleurs appliquées dans l'industrie. En revanche, les méthodes d'observation de la structure ou de la microstructure du bois, si elles ont prouvé leur efficacité, restent cantonnées à une utilisation en laboratoire. A ce titre, la méthode que l'on peut considérer aujourd'hui comme la plus prometteuse est l'analyse multispectrale. Celle-ci présente à la fois l'avantage de rendre compte de certaines caractéristiques des cellules, et sa faible résolution spatiale permettant d'envisager une acquisition et un traitement des informations dans un délai raisonnable. Cette méthode fait d'ailleurs l'objet de nombreux travaux de recherche.

Enfin, nous avons enfin étudié les différentes méthodes existantes permettant d'évaluer de manière non-destructive les propriétés mécaniques des sciages. Nous avons pu constater qu'il en existe en réalité très peu, principalement dérivées du Knots Area Ratio. Ces méthodes sont capables de prendre en compte les positions et géométries de nœuds, éventuellement des valeurs de pente de fil estimées à partir d'un modèle de variation autour des nœuds, et leurs résultats sont actuellement considérés comme références. On peut cependant reprocher à ces méthodes leur incapacité à prendre en compte d'autres types de singularités, ainsi qu'à tenir compte de la distribution des contraintes. Ce sont donc sur ces aspects que se sont donc dirigées nos recherches, aboutissant à la mise au point du modèle que nous avons appelé « Profilé Equivalent ».

## 2. Modèle du Profilé Equivalent

Le premier objectif de cette étude a donc été la mise au point d'un modèle de comportement mécanique des poutres en bois, à la fois simple, rapide d'utilisation et suffisamment souple pour pouvoir prendre en compte divers types de singularités et de sollicitations. La solution que nous avons proposée consiste à définir une poutre de longueur et largeur égales à celles de la poutre réelle de départ, et possédant les mêmes valeurs (à une correction affine près) que celle de la poutre réelle. Pour cela, nous faisons varier les propriétés et la largeur locale de notre poutre équivalente et fonction des informations globales et locales dont nous disposons.

Après avoir comparé les valeurs estimées de MOE et de MOR obtenues par notre modèle aux valeurs réelles obtenues par essais destructifs, puis rapproché ces résultats à ceux obtenus par le modèle du KAR 1D, il est apparu que le Profilé Equivalent offre une meilleure précision d'estimation, bien que l'écart soit relativement faible. Plusieurs solutions s'offrent à nous concernant la méthode d'estimation de la profondeur relative des nœuds, basée soit uniquement sur la densitométrie, soit en y ajoutant les informations de détection. Cette dernière solution s'avère être la meilleure du point de vue des performances, mais nécessite un paramétrage de la détection des nœuds, pouvant s'avérer problématique selon la qualité des bois.

Il a donc été décidé que le modèle servant de référence, qui sera selon toute probabilité soumis à une homologation sera celui prenant uniquement en compte la densité locale. Les tests de robustesse aux variations des paramètres de calcul montrent qu'il est possible de limiter la chute des performances générales par une optimisation de ces paramètres sur un lot suffisamment représentatif. On peut donc considérer que le modèle du Profilé Equivalent rapporte une réponse aux problématiques relevées au cours de l'étude de la littérature ayant motivé nos travaux. En particulier, celui-ci a pu être aisément amélioré grâce à la prise en compte des informations de pente de fil.

## 3. Influence de la Pente de Fil

Le second objectif de cette étude était d'évaluer l'apport de l'information de pente de fil dans le domaine du classement mécanique des sciages, et le cas échéant, de l'appliquer de manière à améliorer les performances des scanners optiques CombiScan+ dans cette optique. Nos travaux sur le modèle du Profilé Equivalent ont ainsi permis, comme nous l'avons vu, d'y intégrer très facilement ces données.

Nous avons confirmé l'idée selon laquelle la prise en compte de la pente de fil permet d'améliorer sensiblement la précision du scanner, aussi bien dans l'estimation du MOE que du MOR. Nous avons également pu vérifier la capacité de cette nouvelle machine de classement mécanique à s'accorder avec les normes européennes en vigueur, en termes de robustesse, et surtout de répétabilité. Bien que s'appuyant, comme nous l'avons vu, sur des hypothèses fortes dont nous avons quantifié l'impact, la précision et la simplicité de mise en œuvre du modèle PE XD-1 ont été retenues pour une implémentation au sein des scanners CombiScan+ ainsi que pour le concours à un processus d'homologation.



## 4. Perspectives

### 4.1 Problématiques soulevées

De manière évidente, les premières questions soulevées par nos travaux portent sur les hypothèses utilisées lors des calculs. Certaines sont directement liées à la mise en œuvre du modèle, et relèvent d'essais comparatifs et de décisions justifiées mais arbitraires. D'autres en revanche permettent d'établir les données d'entrée du modèle, et portent donc sur la nature même du matériau. Deux hypothèses en particulier sont de ce type : l'une permet une estimation de l'angle de plongée des fibres par une analyse statistique des facteurs de forme des ellipses issues de l'effet trachéide, et l'autre porte sur la variation de pente de fil dans l'épaisseur des sciages. Il est évident que ce sont là des solutions par défaut, faute de modèle existant. L'établissement de modèles adaptés pourrait ainsi permettre une amélioration des performances du scanner.

Nous avons également constaté, à notre grande surprise, que l'estimation du MOE et du MOR des pièces testées en traction s'avère plus précise si ces mêmes pièces sont traitées comme des pièces de flexion. Cela correspond en fait à accorder une plus grande influence mécanique aux singularités situées à proximité des rives. Nous n'avons pas à l'heure actuelle identifié l'origine de ce phénomène. L'hypothèse qui est selon nous la plus probable serait que ces observations traduisent l'influence de mécanismes de rupture non-linéaires, peut-être favorisée par l'orientation particulière des fibres à proximité des nœuds rasants, ou encore qu'elles soient une conséquence des concentrations de contraintes et effets de bord.

L'autre constat qui peut être fait est que, à l'instar d'autres modèles et d'autres machines de classement, les performances obtenues concernant les pièces testées en flexion sont bien moins grandes que dans le cas de la traction. Là encore, aucune étude n'a été publiée sur ce sujet, et nous n'avons aucune certitude sur l'explication de cette observation. Notre hypothèse est que notre modèle, ni aucun autre basé sur des lois de comportement linéaires, ne permet de prendre en compte la nature élasto-plastique du bois en compression. Si tel est le cas, il sera certainement difficile d'y remédier, non pas parce que notre modèle ne le permet pas (un calcul itératif serait cependant nécessaire), mais parce qu'il est impossible, et proscrit lors d'une homologation, de connaître à l'avance la rive sollicitée en compression et celle sollicitée en traction. Une étude plus approfondie pourrait permettre de dégager une solution, et ainsi d'améliorer sensiblement la précision de scanner dans le cas de la flexion.

### 4.2 Modélisation du matériau bois

Le modèle du Profilé Equivalent constitue en quelque sorte une solution intermédiaire entre les méthodes essentiellement statistiques telles que le KAR, et les modèles purement mécaniques visant à expliquer le comportement du bois par des théories déductives éprouvées. Nous avons vu dans la littérature que des tentatives de modélisation micromécaniques et Eléments Finis successives font l'objet de recherches actives, et commencent même à fournir des résultats intéressants. Bien qu'actuellement inapplicables dans notre cas, ce type de méthode est largement appliqué dans le cadre de l'étude des matériaux composites, cristallins et des biomatériaux. Il reste évidemment de nombreux obstacles à surmonter et de progrès à réaliser, mais elle constitue à notre sens la piste d'amélioration à long terme la plus crédible et la plus prometteuse.

### 4.3 Prise en compte d'autres types de singularités

Jusqu'à présent, les seules données prises en compte lors du classement mécanique des sciages sont le module d'élasticité dynamique, les nœuds, et à présent la pente de fil. Il existe pourtant, comme nous l'avons vu, d'autres types de singularités susceptibles d'influencer le comportement mécanique des planches, parmi lesquelles on trouve en premier lieu le bois de compression et le bois juvénile. La principale difficulté posée par celles-ci est leur détection, puisque leurs spécificités par rapport au bois sain se trouvent dans leur structure et microstructures cellulaires, et sont très difficilement observables à l'œil nu. On compte à présent plusieurs études visant à détecter ce type de singularité par analyse spectrale dans le proche infrarouge. Pour le moment, cette technique requiert un temps d'acquisition et de traitement inadapté aux cadences qui nous intéressent. Elle constitue cependant une autre piste très intéressante et prometteuse dans le perfectionnement des machines de classement mécanique.

A ce titre, une série d'essais visant à étudier la faisabilité d'une détection du bois de compression et du bois juvénile, à l'aide de caméras spectrales et par fluorescence UV, a été conduite au sein du laboratoire LE2I de Dijon et avec l'aide de la société finlandaise SpecIm. Les résultats de ces essais ont été peu concluants, et n'ont pas démontré un apport majeur par comparaison avec une analyse colorimétrique classique. Il semble, d'après la littérature, que la solution la plus pertinente serait de lier certaines propriétés des cellules, telles que leur longueur ou l'angle de leurs microfibrilles, au spectre de diffusion du bois dans le proche infrarouge par régression multilinéaire. Une étude plus poussée sur cette technique aurait nécessité de pouvoir mesurer ces propriétés cellulaires à une cadence importante, ce qui requiert un équipement que nous n'avons pas à notre disposition.

## 5. Conclusion générale

A travers cette étude nous avons présenté un modèle original de comportement des sciages capable de prendre en compte tous types de singularités du bois. Nous avons démontré les performances de ce modèle couplé à la densitométrie X et à l'imagerie laser, permettant respectivement l'acquisition de données concernant la nodosité et la pente de fil locale. Ces dernières ont par ailleurs prouvé l'intérêt significatif qu'elles représentent dans l'estimation du MOE et du MOR des sciages. Enfin, les essais de robustesse et de répétabilité effectués indiquent que les scanners optiques CombiScan+ conçus par Luxscan Technologies, équipés de notre modèle, sont de bons candidats à l'homologation en tant que machine de classement selon la norme Européenne EN 14081. On peut donc raisonnablement considérer que les objectifs principaux de ce projet sont remplis.

Cependant, il ne fait aucun doute que notre solution reste perfectible. D'une part, nous ne savons pas encore prendre en compte la totalité des singularités du bois pouvant influencer ses performances mécaniques. D'autre part, notre modèle uniquement basé sur des lois de comportement linéaires ne correspond pas nécessairement à la réalité, notamment en flexion et face à la rupture. Il existe donc encore de nombreuses pistes d'amélioration, pour lesquelles, nous l'espérons, notre modèle du Profilé Equivalent pourra servir de point de départ. Dans l'hypothèse où le développement des modèles de classement mécanique connaîtrait des progrès importants, un classement par pièce pourrait être envisagé, et permettrait de s'affranchir des difficultés posées par le classement par lot.

En dépit du fait que le bois soit utilisé en structures depuis des millénaires, nous n'en sommes probablement qu'au début des progrès permettant d'évaluer de manière non-destructive ses propriétés mécaniques. Les progrès continus réalisés dans les domaines informatiques et d'imagerie numérique permettront sans doute dans le futur des progrès spectaculaires, favorisant ainsi l'usage plus large de ce matériau parfaitement adapté aux défis des prochaines décennies.



# Références

- 1 Roblot, G. *Calcul automatique du Knot Area Ratio appliqué au classement par machine des bois de structure*. Thèse de Doctorat, Arts & Métiers ParisTech. 178 p., 2010.
- 2 US DEPT. OF AGRICULTURE. *Wood HandBook : Wood as an Engineering Material*. Madison, WI. 486 p., 1999.
- 3 Gachet, Christophe. *Inventaire et hiérarchisation de paramètres structuraux et ultrastructuraux facteurs de variabilité intra spécifique de certaines propriétés mécano physiques des tissus ligneux*. Thèse de Doctorat, Université Bordeaux I. 146 p., 2003.
- 4 Mäkinen, Harri, Jaakkola, Tuula, Piispanen, Riikka, and Saranpää, Pekka. Predicting wood and tracheid properties of Norway spruce. *Forest Ecology and Management* 241 (2007), 175-188.
- 5 Reme, P.A. and Helle, T. Assessment of transverse dimensions of wood tracheids using SEM. *Holz als Roh- und Werkstoff* 60 (2002), 277–282.
- 6 Sarén, Matti-P., Serimaa, Ritva, Andersson, Seppo, Paakkari, Timo, Saranpää, Pekka, and Pesonen, Erkki. Structural Variation of Tracheids in Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Journal of Structural Biology* 136 (2001), 101-109.
- 7 Bergander, A. and Salmén, L. Cell wall properties and their effects. *Journal of Materials Science* 37 (2002), 151-156.
- 8 Salmén, Lennart. Micromechanical understanding of the cell-wall structure. *C. R. Biologies* 327 (2004), 873-880.
- 9 Fromm, Jörg, Rockel, Beate, Lautner, Silke, Windeisen, Elisabeth, and Wannerc, Gerhard. Lignin distribution in wood cell walls determined by TEM and backscattered SEM techniques. *Journal of Structural Biology* 143 (2003), 77-84.
- 10 Passass, R. The measurement of single fibers properties : capabilities today and possibilities for tomorrow. In *Cost E54* (Riga 2007).
- 11 Mark, James E. *Polymer Data Handbook*. Oxford University Press. 1102 p., 1999.
- 12 Sedighi-Gilani, Marjan, Sunderland, Homeira, and Navi, Parviz. Microfibril angle non-uniformities within normal and compression wood tracheids. *Wood Science and Technology* 39 (2005), 419-430.
- 13 Akerholm, M. and Salmén, L. Interactions between wood polymers studied by dynamic FT-IR spectroscopy. *Polymer* 42 (2001), 963-969.
- 14 Albinsson, Bo, Li, Shiming, Lundquist, Knut, and Stombergc, Rolf. The origin of lignin fluorescence. *Journal of Molecular Structure* 508 (1999), 19-27.
- 15 Jodin, P. *Le bois matériau d'ingénierie*. ARBOLOR. 433 p., Nancy, 1994.
- 16 Hanhijärvi, A., RantaMaunus, A., and Turk, G. Potential of strength grading of timber with combined measurement techniques. *Espoo : VTT Publications* 568 (2005).

- 17 Takeda, T. and Hashizume, T. Differences of tensile strength distribution between mechanically high-grade and low-grade Japanese larch lumber II: Effect of knots on tensile strength distribution. *J Wood Sci* 45 (1999), 207-212.
- 18 Andreu, Jean-Philippe and Rinnhofer, Alfred. Modeling knot geometry in Norway spruce from industrial CT images. *Lecture Notes in Computer Science*, 2749 (2003), 287-296.
- 19 Lam, F, Barrett, J.D., and Nakajima, S. Influence of Knot Area Ratio based grading rules on the engineering properties of Hem-fir used in Japanese post and beam housing. *Wood Science and Technology* 38 (2004), 83-92.
- 20 Lam, F., Barrett, J.D., and Nakajima, S. Influence of Knot Area Ratio on the bending strength of Canadian Douglas fir timber used in Japanese post and beam housing. *J Wood Sci* 51 (2005), 18-25.
- 21 Mitsunashi, Kohsaku, Poussa, Matti, and Puttonen, Jari. Method for predicting tension capacity of sawn timber considering slope of grain around knots. *J Wood Sci* 54 (2008), 189-195.
- 22 Foley, C. A tree-dimensional paradigm of fiber orientation in timber. *Wood Science and Technology* 35 (2001), 453-465.
- 23 Wangaard, F.F. *The mechanical properties of wood*. John Wiley & Sons. 377 p., 1950.
- 24 Shigo, A.L. *A New Tree Biology : Facts Photos, and Philosophies on Trees and Their Problems and Proper Care*. 1997.
- 25 Phillips, G.E., J., Bodig, and Goodman, J.R. Flow-grain Analogy. *Wood Science* 14 (1981), 55-65.
- 26 Brännström, Mattias, Manninen, Jeanne, and Oja, Johan. Predicting the strength of sawn wood by tracheid laser scattering. *BioResources* 3 (2008), 437-451.
- 27 Kumar, Manoj, Saranpää, Pekka, Barnett, John R., and Wilkinson, Michael J. Juvenile-mature wood transition in pine: correlation between wood properties and candidate gene expression profiles. *Euphytica* 166 (2009), 341-355.
- 28 Alteyrac, Jérôme, Cloutier, Alain, and Zhang, S. Y. Characterization of juvenile wood to mature wood transition age in black spruce (*Picea mariana* (Mill.) B.S.P.) at different stand densities and sampling heights. *Wood Science and Technology* 40 (2006), 124-138.
- 29 Lindström, Håkan, Evans, James W., and Verrill, Steve P. Influence of Cambial Age and Growth Conditions on Microfibril Angle in Young Norway Spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Holzforschung* 52 (1998), 573-581.
- 30 Bouffier, Laurent, Raffin, Annie, Rozenberg, Philippe, Meredieu, Céline, and Kremer, Antoine. What are the consequences of growth selection on wood density in the French maritime pine breeding programme? *Tree Genetics & Genomes* 5 (2009), 11-25.
- 31 Roth, Brian E., Li, Xiaobo, Huber, Dudley A., and Peter, Gary F. Effects of management intensity, genetics and planting density on wood stiffness in a plantation of juvenile loblolly pine in the southeastern USA. *Forest Ecology and Management* 246 (2007), 155-162.

- 32 Dünisch, Oliver, Richter, Hans-Georg, and Koch, Gerald. Wood properties of juvenile and mature heartwood in *Robinia pseudoacacia* L. *Wood Science and Technology*. 13 p. (2009).
- 33 Ivkovic, Milos, Gapare, Washington J., Abarquez, Aljoy, Ilic, Jugo, Powell, Michael B., and Wu, Harry X. Prediction of wood stiffness, strength, and shrinkage in juvenile wood of radiata pine. *Wood Science and Technology* 43 (2009), 237-257.
- 34 Via, B.K., So, C.L., Shupe, T.F., Groom, L.H., and Wikaira, J. Mechanical response of longleaf pine to variation in microfibril angle, chemistry associated wavelengths, density, and radial position. *Composites, Part A*, 40 (2009), 60-66.
- 35 AFNOR. *NF EN 338, Bois de structure - Classes de résistance*. 5 p., 1995.
- 36 AFNOR. *NF EN 384, Bois de structure - Détermination des valeurs caractéristiques des propriétés mécaniques et de la masse volumique*. 11 p., 1995.
- 37 AFNOR. *NF EN 14081-2 - Timber structures - Strength graded structural timber with rectangular cross section*. 15 p., 2003.
- 38 Rouger, F. A new statistical method for the establishment of machine settings. In *Proceedings of the 30th Meeting, International Council for Research and Innovation in Building and Construction, Working Commission W18 – Timber Structures* (Vancouver, Canada : Paper No. 30-17-1 1997), 14.
- 39 Reuling, D., Lanvin, J. D., and Rouger, F. Homologation des machines de classement des bois pour la résistance. In *Colloque sur le classement structure des sciages par machine* (Dompierre Les Ormes, France 2008).
- 40 Roblot, G., Coudegnat, D., Bleron, L., and Collet, R. Evaluation of the visual stress grading standard on French Spruce (*Picea excelsa*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) sawn timber. *Ann. For. Sci.* 65 (812). 4 p. (2008).
- 41 Tredwell, T. Visual Stress Grading of Timber, Explanation and practical interpretation of the visual grading elements of BS 4978:1973. *Timber grades for structural uses*. Timber Research and Development Association (1973), 31.
- 42 Bailleres, H., Hopewell, G., and Boughton, G. *MOE and MOR assessment technologies for improving graded recovery of exotic pines in Australia*. Forest & Wood Products Australia : Products & Processing, 2009.
- 43 Oh, Jung-Kwon, Shim, Kugbo, Kim, Kwang-Mo, and Lee, Jun-Jae. Quantification of knots in dimension lumber using a single-pass X-ray radiation. *Journal of Wood Science* 55 (2009), 264-272.
- 44 Hofstetter, Karin, Hellmich, Christian, and Eberhardsteiner, Josef. Development and experimental validation of a continuum micromechanics model for the elasticity of wood. *European Journal of Mechanics - A/Solids* 24 (2005), 1030-1053.
- 45 Hofstetter, Karin. Physical Modeling of the Effects of Defects. In *WWN Gradewood* (Munich 2010).
- 46 Fernandez-Maloigne, Christine. *Introduction aux techniques de traitement et d'analyse d'images*. 90p.

- 47 Brancheriau, Loïc. *Expertise mécanique des sciages par analyse des vibrations dans le domaine acoustique*. Thèse de Doctorat, Univ. Aix Marseille II. 278 p., 2002.
- 48 Mariño, R. A., Fernández, M. E., Fernández-Rodríguez, C., and Méndez, M. Detection of pith location in chestnut lumber (*Castanea sativa* Mill.) by means of acoustic tomography and longitudinal stress-wave velocity. *Eur. J. Wood Prod.* 68 (2010), 197-206.
- 49 Simonaho, Simo-Pekka, Palviainen, Jari, Tolonen, Yrjö, and Silvennoinen, Raimo. Determination of wood grain direction from laser light scattering pattern. *Optics and Lasers in Engineering* 41 (2004), 95-103.
- 50 Palviainen, Jari and Silvennoinen, Raimo. Inspection of wood density by spectrophotometry and a diffractive optical element based sensor. *Measuring Science and Technology* (2001), 345-352.
- 51 Nyström, Jan. Automatic measurement of fiber orientation in softwoods by using the tracheid effect. *Computers and Electronics in Agriculture* 41 (2003), 91-99.
- 52 Simonaho, Simo-Pekka and Silvennoinen, Raimo. Light Diffraction from Wood Tissue. *Optical Review* 11 (2004), 308-311.
- 53 Kienle, Alwin, D'Andrea, Cosimo, Foschum, Florian, Taroni, Paola, and Pifferi, Antonio. Light propagation in dry and wet softwood (2008), 9895-9906.
- 54 Hu, Chuanshuang, Tanaka, Chiaki, and Ohtani, Tadashi. On-line determination of the grain angle using ellipse analysis of the laser light scattering pattern image. *J Wood Sci* 50 (2004), 321-326.
- 55 Seltman, Joachim. Indication of slope of grain and biodegradation in wood with electromagnetic waves. In *Paper for presentation at the seminar/workshop on scanning technology and image processing on wood, 1 september 1992, Skelleftea, Sweden*. 1992.
- 56 Aikio, Mairi. *Hyperspectral prism-grating-prism imaging spectrograph*. Thèse de Doctorat, Université d'Oulu, Finlande. 125 p., 2001.
- 57 Altaner, Clemens M., Tokareva, Elena N., Wong, Janet C. T., Hapca, Adrian I., McLean, J. Paul, and Jarvis, Michael C. Measuring compression wood severity in spruce. *Wood Science and Technology* 43 (2009), 279-290.
- 58 Kelley, Stephen S., Rials, Timothy G., Snell, Rebecca, Groom, Leslie H., and Sluiter, Amie. Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology* 38 (2004), 257-276.
- 59 Nyström, Jan and Hagman, Olle. Real-time spectral classification of compression wood in *Picea abies*. *J Wood Sci* 45 (1999), 30-37.
- 60 Schimleck, Laurence R., Evans, Robert, Jones, P. David, Daniels, Richard F., Peter, Gary F., and Clark, Alexander. Estimation of microfibril angle and stiffness by near infrared spectroscopy using sample sets having limited wood density variation. *IAWA Journal* 26, 175-187 (2005).
- 61 Zboňák, Anton and Bush, Tamara. Application of near-infrared spectroscopy to predict microfibril angle of 14-year-old *Pinus patula*. In *IUFRO symposium on Wood structure and Properties 06* (Silenica, Slovaquie 2006).



- 62 Inagaki, T., Schwanninger, M., Kato, R., Kurata, Y., Thanapase, W., Puthson, P., and Tsuchikawa, S. Eucalyptus camaldulensis density and fiber length estimated by near-infrared spectroscopy. *Wood Sci. Technol.* 46 (2010), 143-155.
- 63 Fujimoto, Takaaki, Kurata, Yohei, Matsumoto, Kazushige, and Tsuchikawa, Satoru. Feasibility of near-infrared spectroscopy for online multiple trait assessment of sawn lumber. *Journal of Wood Science* 56 (2010), 452-459.
- 64 Donaldson, Lloyd, Radotic, Ksenija, Kalauzi, Aleksandar, Djikanovic, Daniela, and Jeremic, Milorad. Quantification of compression wood severity in tracheids of Pinus radiata D. Don using confocal fluorescence imaging and spectral deconvolution. *Journal of Structural Biology* 169 (2010), 106-115.
- 65 Pandey, K. K., Upreti, N. K., and Srinivasan, V. V. A fluorescence spectroscopic study on wood. *Wood Science and Technology* 32 (1998), 309-315.
- 66 Billa, Evaggeli, Pastou, Adamantia, Monties, Bernard, Romero, Javier, and Koukios, Emmanuel G. Multivariate chemometric analysis of the fluorescence spectra of eucalyptus wood. *Industrial Crops and Products* 11 (2000), 187-196.
- 67 Altaner, Clemens and Jarvis, Mike. Galactan in compression wood : detection by immuno-fluorescence and thought about its role. In *Cost E50* (Varsovie, Pologne 2006).
- 68 Baradit, E., Aedo, R., and Correa, J. Knots detection in wood using microwaves. *Wood Science and Technology* 40 (2006), 118-123.
- 69 Schajer, Gary S. and Bahar Orhan, F. Measurement of wood grain angle, moisture content and density using microwaves. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (2006), 483–490.
- 70 Schajer, Gary S. and Bahar Orhan, F. Microwave Non-Destructive Testing of Wood and Similar Orthotropic Materials. *Subsurface Sensing Technologies and Applications* 6 (2005), 293-313.
- 71 Longuetaud, Fleur. *Détection et analyse non destructive de caractéristiques internes de billons d'épicéa commun (Picea Abies (L.) Karst.) par tomographie à rayons X*. Thèse de Doctorat, ENGREF. 124 p., 2005.
- 72 Andreu, Jean-Philippe and Rinnhofer, Alfred. Modeling of internal defects in logs for value optimization based on Industrial CT scanning. In *5th International Conf. on Image Processing and Scanning of Wood* (Bad Waltersdorf, Austria 2003), Institute for Digital Image Processing, 141-150.
- 73 Longuetaud, Fleur, Leban, Jean-Michel, Mothe, Frédéric, Kerrien, Erwan, and Berger, Marie-Odile. Automatic detection of pith on CT images of spruce logs. *Computers and Electronics in Agriculture* 44 (2004), 107-119.
- 74 Sepúlveda, Paul. Measurement of spiral grain with computed tomography. *J Wood Sci* 47 (2001), 289-293.
- 75 Mayo, S.C., Chen, F., and Evans, R. Micron-scale 3D imaging of wood and plant microstructure using high-resolution X-ray phase-contrast microtomography. *Journal of Structural Biology*. 7 p. (2010).

- 76 Steppe, Kathy, Cnudde, Veerle, Girar, Catherine, Lemeur, Raoul, Cnudde, Jean-Pierre, and Jacobs, Patric. Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *Journal of Structural Biology* 148 (2004), 11-21.
- 77 Buksnowitz, Christoph, Müller, Ulrich, Evans, Robert, Teischinger, Alfred, and Grabner, Michael. The potential of SilviScan's X-ray diffractometry method for the rapid assessment of spiral grain in softwood, evaluated by goniometric measurements. *Wood Science and Technology* 42 (2008), 95-102.
- 78 Sarén, Matti-P. and Serimaa, Ritva. Determination of microfibril angle distribution by X-ray diffraction. *Wood Science and Technology* 40 (2006), 445-460.
- 79 Cave, I. D. Theory of X-ray measurement of microfibril angle in wood. *Wood Science and Technology* 31 (1997), 143-152.
- 80 Reiterer, A., Jakob, H. F., Stanzl-Tschegg, S. E., and Fratzl, P. Spiral angle of elementary cellulose walls of *Picea abies* determined by X-ray scattering. *Wood Science and Technology* 32 (1998), 335-345.
- 81 Sahlberg, Ulla, Salmén, Lennart, and Oscarsson, Anders. The fibrillar orientation in the S2-layer of wood fibres as determined by X-ray diffraction analysis. *Wood Science and Technology* 31 (1997), 77-86.
- 82 Sarén, Matti-P., Serimaa, Ritva, and Tolonen, Yrjö. Determination of fiber orientation in Norway spruce using X-ray diffraction and laser scattering. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (2006), 183-188.
- 83 Bergander, Anna, Briindström, Jonas, Daniel, Geoffrey, and Salmén, Lennart. Fibril angle variability in earlywood of Norway spruce using soft rot cavities and polarization confocal microscopy. *J Wood Sci* 48 (2002), 255-263.
- 84 Peura, Marko, Müller, Martin, Serimaa, Ritva, Vainio, Ulla, Sarén, Matti-Paavo, Saranpää, Pekka, and Burghammer, Manfred. Structural studies of single wood cell walls by synchrotron X-ray microdiffraction and polarised light microscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research* 238 (2005), 16-20.
- 85 Ye, Chun and Vilenius, Ari. Measurement of the microfibril angle and cell wall thickness. In *Cost E54* (Riga 2007).
- 86 Jähne, Bernd, Haußecker, Horst, and Geißler, Peter. *Handbook of Computer Vision and Applications, Vol. 2 : Signal Processing and Pattern Recognition*. Academic Press. 967 p., 1999.
- 87 Muburak, Shah. *Fundamentals of computer vision*. 133 p., 1997.
- 88 Davalo, Eric and Naïm, Patrick. *Des Réseaux de Neurones*. Ed. Eyrolles. 232 p., 1991.
- 89 Gosselin, Bernard. *Application de réseaux de neurones artificiels à la reconnaissance automatique de caractères manuscrits*. Thèse de doctorat, Fac. Polytech. de Mons. 231 p., 1996.
- 90 Schmoldt, Daniel L., Li, Pei, and Abbott, A. Lynn. Machine vision unsing artificial neural networks with local 3D neighborhoods. *Comp. and Electr. in Agriculture* 16 (1997), 255-271.

- 91 Kohonen, Teuvo, Kangas, Jari, and Laaksonen, Jorma. *SOM\_PAK : the Self-Organizing Map program package, V1.2*. 21 p., 1992.
- 92 Silvén, Olli, Niskanen, Matti, and Kauppinen, Hannu. Wood inspection with non-supervised clustering. *Machine Vision and Applications* 13 (2003), 275-285.
- 93 Kaupinen, Hannu. *Development of a color machine vision method for wood surface inspection*. Department of Electrical Engineering and Infotech, Univ. of Oulu. 147 p., 1999.
- 94 Azé, Jérôme. K-plus proches voisins. In *Cours DataMining, Univ. Paris XI* ( 2007).
- 95 Hasan, Mohamadally and Boris, Fomani. *SVM : Machines à Vecteurs de Support ou Séparateurs à Vastes Marges*. 20 p., Versailles St Quentin, 2006.
- 96 Sanchez-Yañez, Raül E., Kurmyshev, Evgenii V., and Cuevas, Francisco J. A framework for texture classification using the coordinated clusters representation. *Pattern Recogn. Letters* 24 (2003), 21-31.
- 97 Poudiougou, Paul. Texture : un état de l'art. *ORSTOM* (1990), 167-177.
- 98 Haralick, Robert M., ShanMugam, K., and Dinstein, Its'Hak. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics* 3 (1973), 610-621.
- 99 Ojala, T., Pietikäinen, M., and D., Harwood. A comparative study of texture measures with classification based on feature distributions. *Pattern Recognition* 29 (1996), 51-59.
- 100 Ojala, Timo, Pietikäinen, Matti, and Mäenpää, Topi. Gray Scale and Rotation Invariant Texture Classification with Local Binary Patterns. In *Lecture Notes in Computer Science, Computer Vision - ECCV 2000*. 2000.
- 101 Kurmyshev, E.V. and Cervantes, M. A quasi-statistical approach to digital binary image representation. *Revista Mexicana de Fisica* 42 (1996), 104-116.
- 102 Grossmann, A. and Morlet, J. Decomposition of hardy functions into square integrable wavelets of constant shapes. *SIAM Journal of Mathematical Analysis* (1984), 723-736.
- 103 Oyvind, Ryan. *Applications of the wavelet transform in image processing*. Department of informatics, Univ. of Oslo. 16 p., 2004.
- 104 Guitard, Daniel. *Mécanique du Matériau Bois et Composites*. Cepadues. 238 p., 1987.
- 105 AFNOR. *NF EN 408, Bois de structure et bois lamellé-collé - Détermination de certaines propriétés physiques et mécaniques*. 35 p., 2010.



# Annexes

## 1. Etude détaillée de la densitométrie X

Il apparaît de manière évidente que la mesure de densité locale représente, pour la méthode de classement mécanique présentée dans cette étude, une des données les plus critiques. Nous avons montré que la densitométrie par rayons X permet une précision satisfaisante dans la mesure des densités moyennes de planches. On peut donc supposer que l'erreur de mesure restera relativement faible dans le cas des mesures locales, tout en sachant qu'il existe un bruit présent lors de l'acquisition des images.

Nous allons voir ici que la réponse du capteur n'est en réalité pas linéaire. Cela ne pose, nous l'avons vu, pas de problèmes particulier lors d'une calibration du système de densitométrie. En revanche lors du vieillissement de l'ensemble source + capteur, on souhaiterait pouvoir disposer d'une méthode de correction aussi peu contraignante que possible, ainsi que de signaux pouvant déclencher une alerte dans le cas d'un vieillissement trop important. Cette partie nous permettra de répondre en partie à ces problématiques.

### 1.1 Application classique

#### 1.1.1 : Rappels théoriques

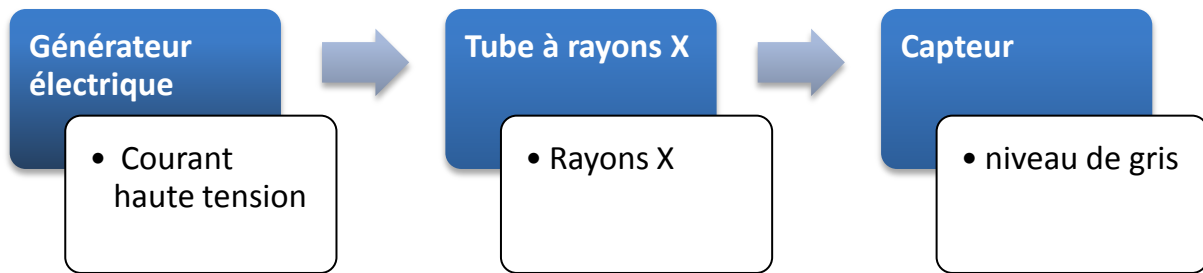
Comme nous l'avons évoqué au chapitre II, la densitométrie par transmission d'une onde électromagnétique fait intervenir la loi de Beer-Lambert. L'expression de cette loi qui nous intéressera par la suite est présentée par l'équation suivante, où  $\rho$  représente la densité locale,  $e$  définit l'épaisseur locale du matériau,  $I$  et  $G$  sont respectivement l'intensité de l'onde électro-magnétique et le niveau de gris de sortie de la caméra, et  $A_\lambda$  représente l'absorbance du matériau pour la longueur d'onde correspondante.

$$\rho \cdot e = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{A_\lambda} = \frac{\ln(G_0) - \ln(G)}{A_\lambda} = a \cdot \ln(G) + b$$

Nous avons vu que la mise en œuvre de cette équation dans notre cas offre de bons résultats. Il faut cependant souligner que la relation affine entre la densité locale et le logarithme des niveaux de gris qui en découle n'est assurée que sous deux conditions. Premièrement, l'onde électromagnétique émise par la source doit être idéalement monochromatique. Dans tous les cas, la largeur de sa bande spectrale doit être beaucoup plus faible que la zone de transition de l'absorbance du matériau. Deuxièmement, la réponse du capteur doit être proportionnelle à l'intensité de l'onde reçue. Sans pouvoir déterminer dans quelles proportions ces conditions influent sur les résultats finaux, nous allons voir que le système de densitométrie X utilisé présente une légère non-linéarité.

#### 1.1.2 : Mise en œuvre

Notre système de densitométrie X fait principalement intervenir 3 éléments, schématisés sur la figure suivante. L'élément qui nous intéressera plus particulièrement ici est le capteur, dont le rôle est de convertir l'intensité de l'onde électromagnétique en une valeur numérique, idéalement proportionnelle, codée sur  $N$  bits.



Le lien entre l'intensité de l'onde et les niveaux de gris de sortie est établi schématiquement en deux temps. Un premier tir à blanc (sans émission de rayons X) permet d'évaluer le bruit de fond dans l'environnement du capteur, qui sera par la suite soustrait à toutes les valeurs mesurées. Dans un second temps, le tube est alimenté en courant, générant des rayons X qui percutent donc le capteur sans traverser d'obstacle. On applique alors un coefficient de correction à chaque pixel de manière à ce que sa valeur atteigne 255. Autrement dit, si l'on effectue une acquisition sans introduire de planche dans le scanner, on obtient une image parfaitement blanche, à la limite de la saturation.

Trois remarques peuvent être faites, qui auront une importance capitale pour la suite. Premièrement, une variation d'intensité de l'alimentation électrique ne modifie pas les valeurs de niveaux de gris moyens des images, ni leur dynamique. La tension d'alimentation, en revanche, garde une influence directe puisqu'elle détermine la ou les longueurs d'ondes émises, et donc l'absorbance du matériau. La seconde est que plus le coefficient de correction précédemment évoqué est élevé, plus l'image finale sera bruitée, puisque ce coefficient s'applique également au bruit de fond aléatoire. Enfin, l'équation issue de la loi de Beer-Lambert présentée précédemment peut être simplifiée, et s'exprime donc de la manière suivante :

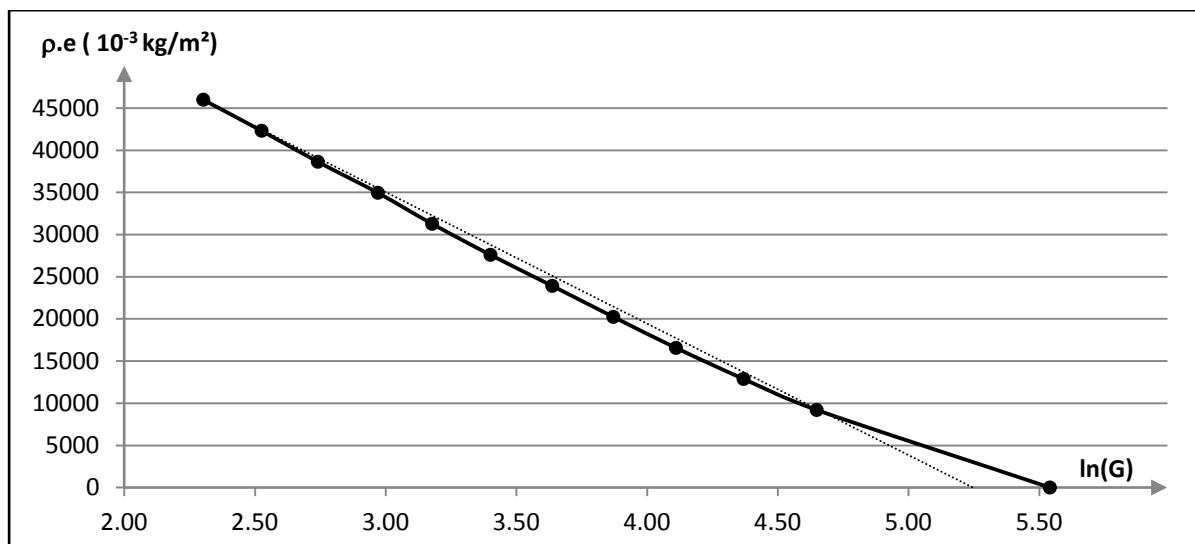
$$\rho \cdot e = \frac{\ln(I_0) - \ln(I)}{A_\lambda} = \frac{\ln(255) - \ln(G)}{A_\lambda} = a \cdot \ln(G) + b$$

Dans ce cas, on peut alors conclure que  $a = 1/A_\lambda$  et que  $b = -a \ln(255)$ . Si tel est le cas, la calibration de la densitométrie reviendrait à déterminer la valeur de l'absorbance pour une tension d'alimentation donnée. Nous verrons dans le paragraphe suivant que cette propriété n'est pas vérifiée, précisément à cause de la non-linéarité du système.

### 1.1.3 : Non-linéarité

Afin de vérifier la linéarité du système, nous avons scanné une cale constituée d'un matériau homogène (Polyéthylène), dont le profil présente des marches de hauteurs constantes. Cette variation d'épaisseur permet de simuler une variation de densité, puisque d'après les équations précédentes, ces deux paramètres ont la même influence sur les niveaux de gris des images. On peut également ajouter à ces données un point de mesure pour une épaisseur nulle, dont le niveau de gris correspondant sera de 255, conformément à la calibration du capteur.

La figure suivante présente les différentes valeurs des produits de densité par l'épaisseur locale, en fonction des logarithmes des niveaux de gris correspondants. On constate de manière évidente une concavité de la courbe résultante, prouvant ainsi la non-linéarité du capteur. On constate également que cette non-linéarité a pour conséquence la rupture du lien entre  $a$  et  $b$  tel que nous l'avons présenté précédemment.



Un ensemble de mesures ultérieures nous a permis de constater que cette non-linéarité possède un caractère répétitif, qui semble indépendant de l'absorbance du matériau comme du vieillissement du système. Le lien entre  $a$  et  $b$  s'en trouve conservé sous forme d'une fonction affine légèrement différente de celle prévue par la théorie.

## 1.2 Vieillissement et durabilité

### 1.2.1 : Processus de vieillissement des éléments

Le vieillissement source + capteur de rayons X tel qu'il apparaît au sein des scanners CombiScan+ fait potentiellement intervenir ces deux éléments. Le vieillissement du tube à rayons X est dû d'une part à la perméabilité de l'enveloppe en verre, causant une diminution du vide à l'intérieur du tube, et d'autre par à la sublimation du filament provoquant un dépôt de tungstène sur la cible ainsi que sur la fenêtre d'émission des rayons X. La conséquence de ces deux phénomènes conjugués est une diminution générale de l'intensité des ondes émises, accompagnée d'un décalage du spectre d'émission vers les grandes longueurs d'ondes.

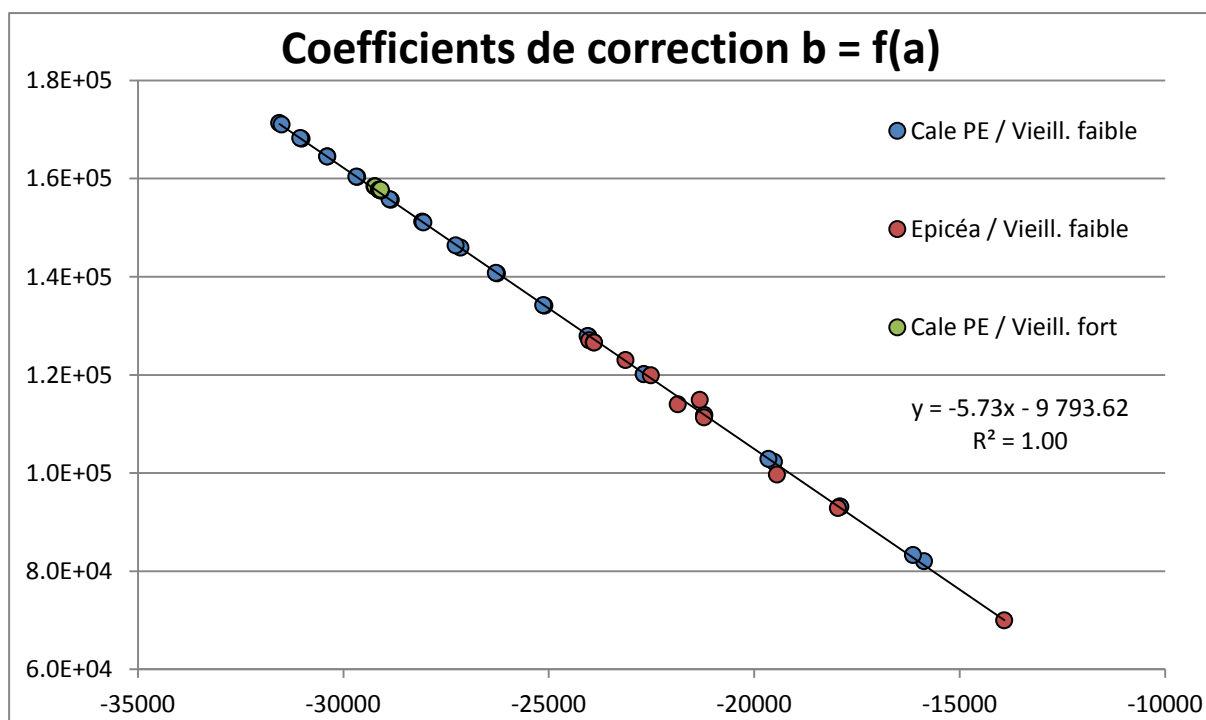
Le vieillissement du capteur, quand-à lui, a pour conséquence une diminution de la sensibilité du capteur, qui peut être variable selon la longueur d'onde considérée. Une série de mesures effectuées sur une période de 21 mois, au cours de laquelle nous avons relevé les valeurs d'intensité émises avant correction de la caméra et pour différentes réglages d'alimentation électrique, nous a permis de quantifier que la perte de sensibilité du système est de l'ordre de 0,07% par jour d'utilisation, à environ 16h de fonctionnement par jour. A l'heure actuelle, nous ne pouvons cependant pas distinguer les effets du vieillissement du tube du vieillissement de la caméra, ce qui pose un problème évident lorsque la perte de sensibilité indique qu'au moins un des éléments doit être remplacé.

Compte-tenu des toutes les informations évoquées précédemment, deux tests nous permettraient de vérifier qu'il est possible d'effectuer de manière simple une correction de la densitométrie X après vieillissement du tube et/ou du capteur. Le premier de ces tests consiste à établir le lien entre les coefficients de correction  $a$  et  $b$ , ainsi qu'à vérifier l'évolution de ce lien au cours du temps. Si la fonction  $f: a \rightarrow b$  est altérée par le vieillissement du système, cela signifie que la non-linéarité de ce dernier évolue au cours du temps, rendant impossible une re-calibration sans un lot complet de planches.

Dans le cas où cette fonction  $f$  semblerait constante au cours du temps, nous devrions vérifier que le vieillissement du système a le même impact sur la dynamique des images qu'une modification de la tension électrique. Ce test peut être réalisé de la manière suivante : un lot de planches, ainsi que la cale en polyéthylène évoquée précédemment sont scannées pour différentes valeurs de tension électrique. On peut donc connaître les absorbances ( $A_\lambda = 1/a$ ) des deux matériaux en fonction de cette même tension, et même l'absorbance du bois en fonction de l'absorbance du PE (à tension d'alimentation fixe). Cette même opération est alors répétée sur un scanner équipé d'une caméra et d'un tube ayant plusieurs milliers d'heures de fonctionnement. Si la fonction liant les absorbances des deux matériaux est préservée, on est alors assuré que le fait de scanner la cale en PE permettra de re-calibrer entièrement la densitométrie.

### 1.2.2 : Observations et mesures

Nos premiers essais, conformément aux idées présentées au paragraphe précédent, ont porté sur l'étude du lien entre les coefficients de correction  $a$  et  $b$ , et surtout sur l'évolution de ce lien dans le temps et pour différents matériaux. Nous avons donc relevé plusieurs couples de valeurs ( $a, b$ ) correspondant à différentes tensions d'alimentation, à deux matériaux (épicéa et PE), et à deux états de vieillissement du système. Les résultats sont consignés dans la figure suivante :



On constate que dans tous les cas, les points de mesure se trouvent plutôt bien alignés, y compris après vieillissement du système. Notons que pour pouvoir conclure de manière plus certaine, il nous aurait fallu disposer de points plus éloignés concernant la série « Cale PE / Vieillissement fort ». On peut néanmoins raisonnablement considérer que la non-linéarité du système n'est pas affectée par son vieillissement, ce qui nous permettra de déterminer la valeur du coefficient de correction  $b$  à partir de la valeur de l'absorbance de l'épicéa. Il nous reste donc à déterminer si cette même valeur d'absorbance peut être déduite à partir de celle de la cale en PE, pour une tension d'alimentation donnée.



Malheureusement, nous n'avons pas pu réaliser les essais correspondants, car nous ne disposons pas en interne de caméras et de tubes suffisamment vieillis. La question du lien entre les absorbances des deux matériaux après vieillissement reste donc en suspens. Aucun des résultats déjà obtenus ne permet de dégager au mois un indice sur ce point, qui doit par conséquent être traité rapidement.

### 1.2.3 : Moyens de contrôle et de correction

L'autre objectif de cette partie est de pouvoir dégager un ensemble d'indicateurs et de méthodes permettant de vérifier que la mesure de densité est effectuée dans des conditions optimales garantissant des résultats fiables, et le cas échéant d'alerter l'utilisateur sur la nécessité d'effectuer une correction de la calibration ou de remplacer un ou plusieurs éléments.

Afin de pouvoir distinguer l'usure du tube de celle du capteur, il serait utile de masquer une partie de la caméra située hors du champ de vision à l'aide d'une plaque épaisse d'acier ou de plomb. De manière régulière, cette plaque devra être retirée, permettant ainsi de connaître l'usure globale du système, l'usure du tube, et d'en déduire l'usure de la caméra. Le fait de scanner régulièrement la cale en PE, ce qui est d'ailleurs imposé par la norme, ainsi que l'observation des profils d'acquisition avant correction de la caméra permettront d'obtenir plusieurs informations utiles. Le tableau suivant résume l'ensemble des observations susceptibles de déclencher une alerte, leurs causes probables, ainsi que les moyens éventuels permettant d'y remédier.

|     | Alerte   | Causes   | Solutions   |
|-----|--|--|---|
| (1) | Diminution de l'intensité de l'onde émise        | Vieillissement du tube                               | Remplacement du tube, augmentation de l'intensité électrique, augmentation du temps d'exposition      |
| (2) | Faible sensibilité du capteur                    | Vieillissement du capteur                            | Remplacement de la caméra, augmentation de l'intensité électrique, augmentation du temps d'exposition |
| (3) | Modification de a et b sans rupture de leur lien | Modification de la longueur d'onde émise par le tube | Correction de la calibration (si possible), re-calibration complète, remplacement du tube             |
| (4) | Rupture du lien entre a et b                     | Modification de la dynamique du capteur              | Re-calibration complète, remplacement de la caméra  |
| (5) | Faible ratio signal / bruit                      | (1) et/ou (2)  | (1) et/ou (2)   |
| (6) | Forte non-linéarité                              | Modification de la dynamique du capteur              | Remplacement de la caméra   |
| (7) | Faible précision                                 | (1), (2), (3), (4), (5) et/ou (6)                    | (1), (2), (3), (4), (5) et/ou (6)   |

## 1.3 Conclusions

Cette partie nous a permis de mieux comprendre les mécanismes en jeu lors d'une mesure de densité par transmission des rayons X, ainsi que les limites de nos hypothèses de travail. Concernant le vieillissement de ce système de mesure, nous avons pu valider une partie des conditions nécessaires à une re-calibration à partir d'une cale homogène d'épaisseur variable, mais un des tests permettant de valider définitivement le principe n'a pas pu être effectué. Nous avons également pu définir de moyens d'alerte du mauvais fonctionnement du système ainsi que les actions à effectuer permettant d'y remédier, et garantissant en partie un classement mécanique fiable.





## MODELISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DES BOIS DE STRUCTURES PAR DENSITOMETRIE X ET IMAGERIE LASER

**RESUME :** Le classement mécanique des bois de structures est devenu, depuis l'introduction des Eurocodes 5 et de l'ensemble des normes associées, une problématique centrale de la filière bois dans l'Union Européenne. L'objectif général, ainsi que le principal verrou technologique lié à ce type de classement, réside dans l'estimation des propriétés mécaniques des planches, en particulier leur module élastique (MOE) et leur contrainte de rupture (MOR). Les machines actuellement considérées comme les plus performantes sont capables de détecter les positions et géométries des nœuds des sciages, et d'interpréter ces informations au travers de modèles adaptés. En revanche, ces modèles s'adaptent très mal à des répartitions de contraintes variées, et ne permettent pas de prendre en compte d'autres types de singularités. La déviation des fibres autour des nœuds, en particulier, réduit considérablement les propriétés mécaniques du bois sain, mais son influence sur des pièces de bois de grande taille n'avait jamais été quantifiée. Au cours de cette étude, nous avons développé un modèle de comportement original, appelé « Profilé Equivalent », qui permet à la fois de prendre en compte la répartition des contraintes et tous types de singularités. Nous avons donc pu évaluer les performances de ce modèle, en considérant les informations de nodosité obtenues par densitométrie X et celles de pente de fil obtenues par imagerie laser, par comparaison entre les valeurs de propriétés mécaniques estimées et les valeurs correspondantes mesurées par essais destructifs. Nous avons montré d'une part que notre modèle offre de bonnes performances, sans tenir compte de la pente de fil, au regard de celles obtenues par des méthodes établies. D'autre part, l'information de pente de fil permet bien d'améliorer de manière significative la précision de l'estimation des propriétés mécaniques.

**Mots clés :** bois, classement mécanique, rayons x, densitométrie, effet trachéides, eurocodes

## MODELING OF LUMBER'S MECHANICAL BEHAVIOR USING X-RAYS DENSITOMETRY AND LASER IMAGING

**ABSTRACT :** Since the introduction of the Eurocode 5 and its related standards, lumber strength grading has become a major issue for the European wood industry. The main objective and technological limitation of this grading type stands in the estimation of the boards' mechanical properties, especially their elasticity modulus (MOE) and strength (MOR). The machines currently considered as the most effective are able to locally detect the boards' knots positions and geometries, and to interpret this data through adapted models. However, these models barely adapt to various stresses distributions, and are not able to take in account other kinds of singularities. Slope of grain around knots, especially, considerably decrease sound wood's mechanical properties, but its influence on full-size boards had never been quantified. Through this study, we developed an original behavior model, called "Equivalent Profile", allowing taking in account both stresses distribution and any kind of singularity. We have thus evaluated this model's performances, considering knottiness data obtained by X-Rays densitometry and slope of grain's acquired by laser imaging, by comparison between estimated and destructively measured mechanical properties values. We showed, on one hand, that our model provides high performances, without taking in account slope of grain, compared to established methods' ones. On the other hand, slope of grain data actually allows a substantial improvement of mechanical properties' estimation accuracy.

**Keywords :** lumber, strength grading, x-rays, densitometry, tracheid effect, eurocodes

