

---

## Quantification du flux de bois massif au sein des recyparcs de la province de Namur et classification sur base d'analyses spectrales

**Auteur :** Martin, Florence

**Promoteur(s) :** De Mil, Tom

**Faculté :** Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

**Diplôme :** Master en bioingénieur : gestion des forêts et des espaces naturels, à finalité spécialisée

**Année académique :** 2022-2023

**URI/URL :** <http://hdl.handle.net/2268.2/18150>

---

### *Avertissement à l'attention des usagers :*

*Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.*

*Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.*

---

**QUANTIFICATION DU FLUX DE BOIS MASSIF AU  
SEIN DES RECYPARCS DE LA PROVINCE DE  
NAMUR ET CLASSIFICATION SUR BASE  
D'ANALYSES SPECTRALES**

**FLORENCE MARTIN**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS, À FINALITÉ  
SPÉCIALISÉE**

**ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023**

**PROMOTEUR : TOM DE MIL**







© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique<sup>1</sup> de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

---

<sup>1</sup> Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**QUANTIFICATION DU FLUX DE BOIS MASSIF AU  
SEIN DES RECYPARCS DE LA PROVINCE DE  
NAMUR ET CLASSIFICATION SUR BASE  
D'ANALYSES SPECTRALES**

**FLORENCE MARTIN**

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE  
MASTER BIOINGÉNIEUR EN GESTION DES FORÊTS ET DES ESPACES NATURELS, À FINALITÉ  
SPÉCIALISÉE**

**ANNEE ACADEMIQUE 2022-2023**

**PROMOTEUR : TOM DE MIL**



## Remerciements

Ce travail de fin d'études a pu être mené à bien grâce à l'aide de plusieurs personnes à qui j'adresse ces remerciements.

Tout d'abord, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers mon promoteur, le professeur Tom DE MIL, sans qui ce travail n'aurait pas pu aboutir. Je vous suis reconnaissante pour votre accompagnement régulier et votre patience inébranlable. Votre éclaircissement sur l'objectif concret de ce travail ainsi que vos rappels quant à son importance ont été efficaces et d'une grande aide. Votre encadrement tout au long de ces six derniers mois a été de haute qualité.

Ensuite, je souhaite exprimer mes remerciements à Oriane BRACONNIER, qui m'a permis de visiter la Ressourcerie Namuroise et a facilité mon contact avec le BEP Environnement à Floreffe.

Un grand merci à Gaëtan DUFEY et Philippe VANLEEuw pour l'intérêt qu'ils ont porté à mon travail et pour m'avoir permis d'effectuer le tri manuel de cinq conteneurs sur leur site. J'adresse également ma reconnaissance aux différents employés sur place qui ont contribué de près ou de loin aux pesées des diverses catégories de bois.

Je n'oublie pas de remercier le professeur Benoît JOUREZ, qui nous a accompagnés lors de notre première visite au BEP Environnement. Vos idées, vos partages bibliographiques et votre assistance dans l'identification des différentes essences de bois ont été d'une grande utilité.

Un tout grand merci à toutes les personnes qui m'ont accompagné sur le terrain pour trier mes conteneurs : Louis, Pierre, Guillaume, Claire, Hugo, Clémence, Luna, Lara, Hélène, Nahama, Jean-Baptiste, Simon, Lise et Dounia. Sans vous, je n'aurais pu rassembler ces données.

Un grand merci au Centre wallon de Recherches agronomiques de m'avoir accueilli au sein de leur établissement, en particulier au Laboratoire de Technologie du Bois. Mes remerciements vont à Lahcen HADIY et Yannick DELZANT pour avoir poncé et découpé des échantillons de bois. Je tiens à exprimer ma gratitude envers Cécile LESIRE pour son aide et ses explications dans la réalisation de mes coupes microscopiques, ainsi qu'à Cécile VERHEYEN pour sa surveillance attentive de mes échantillons en étuve.

Je souhaite exprimer ma reconnaissance envers Cédric GEERTS pour le prêt d'un appareil photo de qualité, qui m'a permis d'illustrer au mieux les différentes étapes de ce travail.

Je tiens à remercier le professeur Godefroid DISLAIRE pour son intérêt manifeste et ses idées constructives tout au long de cette étude. Merci au laboratoire GeMMe à Liège de m'avoir permis de réaliser mes acquisitions. Mes remerciements vont également à Dominik ZIANS et Benjamin DELVOYE pour leur aide inestimable dans l'élaboration des codes destinés au traitement de mes données. Votre contribution m'a permis de mieux appréhender la matière nouvelle qu'est le machine learning.

Je remercie Aurore RICHEL, Arnaud MONTY, Benoit JOUREZ, Tom DE MIL, Philippe LEJEUNE et Jean-Marc HENIN qui ont accepté d'examiner ce travail.

Mon cheminement au sein des vieux murs de Gembloux aurait pu s'arrêter plus tôt que prévu. Heureusement, j'ai la chance inestimable d'avoir mes parents qui ont cru en moi pendant ces sept dernières années, parfois, plus que moi-même. Je ne serais pas assez de m'avoir accordé leur confiance et de toujours m'avoir soutenue, même dans mes échecs. Merci à mon Pap's de m'avoir conduite autant de fois à Gembloux, d'écouter mes péripéties de guindaille et surtout, d'avoir pris du temps à relire ce travail. Merci à ma Mamounette qui a toujours su être auprès de moi quand il le fallait et de toujours être aux petits soins.

Après sept ans passés à Gembloux, il est difficile de savoir par où commencer.

Merci au noyau des s16 (Calvi, Anto, Bosh, Kmy, Troll et Laura Dégât) qui sont là depuis le début et avec qui les souvenirs ne font que s'accumuler.

Merci aux Gonzesss (Tinmar, Rem's, Sky, Johnny, Gipsy, Germouille, Calvi, Anto, Bosh, Kmy, Troll et Laura Dégât) de me faire toujours passer des soirées aussi délirantes et alcoolisées.

Merci à ma deuxième maison, le kot Mijolles (Julie, Quentin, Pouchou, Momo, Natmaq, Jbou, Ping Pong, Twenty, Tinmar, Cailloux, Sprouty, Hibou, Kmy, Nènène, Dinus, Naxama), qui d'année en année n'a fait que me reconstruire de belles personnes.

Merci au comité AG 2022 (Rose, Mev, Cha, Spi, Tinmar, Verjus, Louito, Dinus) avec qui nous avons pu mettre notre touche à la vie gembloutoise pendant une année. Bises aux rageux.

Merci à l'Agro, grâce à qui j'ai pu écrire tout et n'importe quoi, sans jamais réellement savoir si quelqu'un allait un jour le lire.

Merci aux Epioux, un endroit si paisible qu'on en oublie tous ses tracas. Merci à Cha d'avoir repris cette commission ensemble pendant deux belles années.

Merci à Léya et Tinmar, sans qui l'open space n'aurait pas vu le jour. J'ai hâte de venir à votre mariage. Merci Léya pour les moments de rire et d'études passés ensemble, surtout quand je pouvais lancer Milou par la fenêtre. Merci Tinmar d'être toi et de me faire toujours aussi rire (par contre, toujours pas merci d'être parti du kot).

Merci à Clem de m'avoir fait découvrir des activités manuelles pour se divertir après une journée de TFE. Nos runnings et nos papotes étaient toujours une bonne idée.

Merci à Jbou d'être à l'écoute depuis tout ce temps et de toujours rigoler de mes récits d'histoire. Une fois ce travail terminé, j'arrive pour nos différents marathons films et séries. Merci aussi d'avoir relu avec patience, tu m'as bien aidée.

Merci Méla d'avoir relu également ce travail et aussi, pour ces moments passés ensemble.

Merci aussi à Kmy pour sa relecture et son amitié depuis tout ce temps.

Merci Mymystic d'avoir partagé ton stage avec moi dans le plus beau pays de la planète. Ce n'est que partie remise my pimento.

Merci Doudou pour tes cours de patinage artistique. La reprise a lieu en septembre apparemment.

Merci à Orion de m'avoir fait découvrir le folklore gembloutois. Merci aussi à mes lapines et toutes celles qui suivent, notre famille devient immense, je ne m'en sors plus. Vous êtes toutes des mijolles baveuses dans tous les cas.

Enfin, merci à tous les anciens que j'ai pu croisé sur la route comme on dit à Gembloux. De belles rencontres qui restent gravées.

Mon dernier merci va à Mr. Croutechou qui est arrivé par hasard sur ma route. Comme tu dis si bien, si je n'avais pas fait sept ans, ce hasard n'aurait pas eu lieu. J'ai hâte de continuer à créer des souvenirs avec toi.

Ces vieux murs m'ont vue grandir et m'épanouir. Les échecs forgent la détermination et je n'aurais jamais cru un jour rédiger ces remerciements. Il faut toujours y croire.

## Résumé

Au sein d'une société où la démographie est en expansion constante, la consommation des ressources naturelles augmente. Dans ce contexte, l'économie circulaire gagne en importance en tant que modèle à adopter pour une meilleure gestion du recyclage des matériaux. Parmi eux, le bois est une matière première sollicitée dont le recyclage est principalement axé sur la production d'énergie par crémation. Cependant, le tri manuel ayant ses limites, le domaine de l'imagerie tri-dimensionnelle (3D) et spectrale à ondes courtes (Short-Wave Infrared, SWIR) ouvre une perspective dans la classification automatique du bois. La spectroscopie dans le proche infrarouge (Near-Infrared, NIR) a déjà fait ses preuves pour la classification du bois massif. Cette réalité a inspiré ce travail en deux objectifs. D'une part, l'analyse d'une quantification des déchets de bois massif disponible en vue d'une potentielle production de panneaux en bois lamellé-croisé (CLT). Ce matériau est constitué de lamelles de bois massif disposées en plusieurs couches offrant une résistance exceptionnelle. Cette propriété est largement mise à profit dans le domaine de la construction. D'autre part, une classification à l'aide d'un algorithme de classification par vecteurs de support (Support Vector Classification, SVC) sur les données spectrales de sept essences de bois massif et trois types de panneaux de particules a été réalisée.

Afin de répondre au premier objectif, un tri manuel du bois massif a été mis en place au sein du BEP Environnement situé à Floreffe, dans la province de Namur. Cette quantification s'est basée sur deux critères : les dimensions et la présence de corps étrangers. Les proportions ressorties sont les suivantes : en moyenne, 41,51% de bois massif est retrouvé ce qui représente une partie non négligeable de bois valorisable. Toutefois, plusieurs adaptations devront être mis en place avant d'obtenir des lamelles correctes pour la fabrication de CLT. Ensuite, un algorithme SVC a été employé avec les données spectrales des différents échantillons de bois. Une matrice de confusion a permis d'analyser les performances de classification de l'algorithme. Une exactitude globale de 86,33% est constatée et est un début prometteur. La méthode de l'analyse en composantes principales (ACP) est employée afin d'étudier la totalité des valeurs de variance liées à chaque longueur d'onde. Ces résultats représentent donc une ouverture dans le domaine de la valorisation du bois et du tri automatisé.

Mots-clés : bois, recyparc, lamellé-croisé, classification, imagerie spectrale à ondes courtes, classification par vecteurs de support, analyse en composantes principales.

## Abstract

In a society where demographics are constantly expanding, the consumption of natural resources is increasing. Against this backdrop, the circular economy is gaining in importance as a model for better management of materials recycling. Among these, wood is a much sought-after raw material whose recycling is mainly focused on the production of energy through cremation. However, as manual sorting has its limits, the field of three-dimensional (3D) and short-wave spectral (SWIR) imaging is opening up new possibilities for the automatic classification of wood. Near-infrared (NIR) spectroscopy has already proved its worth for the classification of solid wood. This fact has inspired this work, which has two objectives. Firstly, to analyse the quantification of solid wood waste available for the potential production of cross-laminated timber (CLT) panels. This material is made up of strips of solid wood arranged in several layers, offering exceptional strength. This property is widely used in the construction industry. In addition, a support vector classification (SVC) was carried out on the spectral data of seven types of solid wood and three types of particleboard.

To reach the first objective, solid wood was sorted manually at the BEP Environnement in Floreffe, in the province of Namur. This quantification was based on two criteria : dimensions and the presence of foreign objects. The proportions found were as follows : on average, 41.51% of solid wood was found, which represents a significant proportion of recoverable wood. However, a number of adaptations will have to be made before the correct lamellae can be obtained for CLT manufacture. Next, a Support Vector Classification (SVC) algorithm was used with the spectral data from the various wood samples. A confusion matrix was used to analyse the classification performance of the algorithm. An overall accuracy of 86.33% was found, which is a promising start. The principal component analysis (PCA) method was used to study all the variance values associated with each wavelength. These results therefore represent an opening in the field of wood recovery and automated sorting.

Key words : wood, container park, cross laminated, classification, short-wave spectral imaging, support vector classification, principal component analysis.



## Table des matières

1.	Introduction .....	1
2.	Objectifs.....	11
3.	Matériel et méthode .....	12
3.1	Tri manuel des conteneurs et mise en évidence du bois massif.....	12
3.1.1	Matériel .....	12
3.1.2	Méthode.....	12
3.2	Mesures du taux d'humidité .....	16
3.2.1	Matériel .....	16
3.2.2	Méthode.....	16
3.3	Indentification des essences de bois .....	16
3.3.1	Matériel .....	16
3.3.2	Méthode.....	17
3.4	Analyses spectrales et tri-dimensionnelles d'échantillons de bois massif et transformé .17	
3.4.1	Matériel .....	17
3.4.2	Méthode.....	18
4.	Résultats et analyses des résultats.....	26
4.1	Tri des conteneurs.....	27
4.1.1	Quantification du bois massif.....	27
4.1.2	Humidité.....	29
4.1.3	Identification des essences.....	31
4.2	Spectrométrie du bois .....	34
4.2.1	Représentations de la réflectance des échantillons de bois .....	34
4.2.2	Analyses des graphiques SNV.....	38
4.2.3	Matrice de confusion de la classification du bois.....	40
4.2.4	Précision et Rappel.....	42
4.2.5	Analyse en composantes principales (ACP) selon trois dimensions.....	45
5.	Discussion .....	48
6.	Perspectives et améliorations .....	52
7.	Conclusion.....	53
8.	Bibliographie.....	54
9.	Annexes .....	58

## Liste des figures

Figure 1 : Finalité des déchets récoltés en 2022 par le BEP Environnement. Graphique disponible dans le Rapport d'activités annuel 2022 mis à disposition par le BEP.....	9
Figure 2 : Répartition par commune du poids net de bois en tonnes récoltés en 2022 (de janvier à décembre) par le BEP Environnement de Floreffe. Les communes sans couleur correspondent aux communes qui ne sont pas prises en charge par le BEP de Floreffe.....	10
Figure 3 : Répartition du nombre de conteneurs de bois récoltés en 2022 (de janvier à décembre) par le BEP Environnement de Floreffe. Les communes sans couleur correspondent aux communes qui ne sont pas prises en charge par le BEP de Floreffe. ....	10
Figure 4 : Répartition du nombre de conteneurs (en bleu) et du poids (en tonnes) de bois récolté (en orange) par mois sur l'année 2022 au BEP Environnement de Floreffe. ....	11
Figure 5 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie de bois non valorisable (catégorie 1). ....	13
Figure 6 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie du bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et possédant des corps étrangers (catégorie 2). ....	13
Figure 7 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et ne possédant pas de corps étrangers (catégorie 3). ....	14
Figure 8 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif respectant les dimensions requises et possédant des corps étrangers (catégorie 4)...	14
Figure 9 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif respectant les dimensions requises et ne possédant pas de corps étrangers (catégorie 5).....	15
Figure 10 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation du bois n'étant pas du bois massif (catégorie 6).....	15
Figure 11 : Disposition du premier groupe sur la bande transporteuse. Cinq échantillons sont disposés : (1) Douglas 1, (2) Hêtre 2, (3) Douglas 3, (4) Hêtre 3, (5) Chêne 1. Le laser rouge fait partie de la caméra tri-dimensionnelle (3D). ....	19
Figure 12 : Passage du cinquième groupe sur la bande transporteuse. Quatre échantillons sont disposés : (1) MDF 1, (2) Douglas 2, (3) Panneau particules 1 et (4) Chêne 2. La lumière halogène concentrée (faisceau blanc) qui forme la ligne de scan de la caméra SWIR. ....	19
Figure 13 : Prise de note de la disposition du deuxième groupe d'échantillons composés : (1) Hêtre 1, (2) Chêne 4, (3) Chêne 3, (4) Épicéa traité 3, (5) Épicéa traité 1, (6) Épicéa traité 2 et (7) OSB 3. ....	20
Figure 14 : Détermination d'une zone d'intérêt sur l'image .TIFF obtenue par la caméra 3D d'un échantillon de bois scanné (Chêne 1) à l'aide du logiciel Fiji ImageJ. ....	22
Figure 15 : Localisation des cinq zones sources ainsi que du BEP Environnement (point vert). ....	26
Figure 16 : Nombre d'habitants en 2022 de chaque commune et du quartier communal de la province de Namur d'où proviennent les cinq conteneurs triés. ....	26

Figure 17 : Répartition des moyennes des proportions de chaque catégorie de bois trié sur les cinq conteneurs confondus.....	28
Figure 18 : Boxplots représentant pour chaque catégorie : la médiane (ligne noire épaisse), la dispersion des données (ligne verticale) et les valeurs extrêmes (point rouge). .....	29
Figure 19 : Boxplots du pourcentage d'humidité pour cinq échantillons pris par conteneur dans la catégorie 5 : la médiane (ligne noire épaisse), la dispersion des données (ligne verticale) et les valeurs extrêmes (point rouge). .....	31
Figure 20 : Répartition en pourcentage des types de bois massif (résineux, feuillu et tropical) retrouvés parmi les 25 échantillons prélevés dans les conteneurs.....	33
Figure 21 : Répartition en pourcentage des essence de bois massif identifiées parmi les 25 échantillons prélevés au sein de la catégorie 5 dans les conteneurs triés.....	34
Figure 22 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d' Afzélia. ....	35
Figure 23 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Azobé.....	35
Figure 24 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Wengé. ....	35
Figure 25 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Chêne.....	36
Figure 26 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Hêtre.....	36
Figure 27 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Douglas. ....	36
Figure 28 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Épicéa traité. ....	37
Figure 29 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de MDF. ....	37
Figure 30 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'OSB. ....	37
Figure 31 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons du panneau de particules. ....	38
Figure 32 : Graphique rassemblant une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par catégorie de bois massif.....	38
Figure 33 : Graphique rassemblant une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par catégorie de panneaux de bois. ....	38
Figure 34 : Graphique rassemble une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par classe de bois. Mise en évidence par un cadre noir d'une allure différente pour la catégorie Wengé comparée aux neuf autres catégories. ....	39
Figure 35 : Mise en évidence de cinq zones indicatrices de vibrations. ....	39
Figure 36 : Matrice de confusion avec les réelles étiquettes, « True labels », en ligne et les étiquettes prédites, « Predicted labels », en colonne par chaque classe de bois. La diagonale correspond aux tuiles correctement identifiées par le modèle.....	41

Figure 37 : Matrice de confusion avec une mise en évidence en rouge des trois classes ayant une précision de 1 (100%) : Afzélia, panneau de particules et Wengé.....	43
Figure 38 : Matrice de confusion avec une mise en évidence en rouge des trois classes ayant un rappel de 1 (100%) : chêne, MDF et Wengé.....	44
Figure 39 : Visualisation de l'ACP selon trois composantes principales (PC1, PC2 et PC3) permettant de distinguer les dix types de bois après le traitement de leurs données spectrales de réflectance. ....	45
Figure 40 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 1 (PC1). ....	46
Figure 41 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 2 (PC2). ....	46
Figure 42 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 3 (PC3). ....	47

## Liste des tableaux

Tableau 1 : Poids (kg) et proportions (%) par catégorie de triage du bois provenant des cinq conteneurs triés manuellement. ....	27
Tableau 2 : Analyses statistiques des proportions (%) de bois retrouvées dans chaque catégorie (1 à 6). .....	28
Tableau 3 : Pesées (g) avant et après le passage à l'étuve et taux d'humidité (%) des 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5. ....	30
Tableau 4 : Analyses statistiques du pourcentage d'humidité (%) par conteneur. ....	30
Tableau 5 : Type de bois et essences identifiés pour les 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5 parmi les cinq conteneurs. Le signe « ? » signifie que l'essence n'a pas pu être déterminée. .....	33
Tableau 6 : Nombre total d'échantillons, d'échantillons bien classés et mal classés pour chaque catégorie, le pourcentage (%) d'exactitude ainsi que le pourcentage (%) d'erreur calculés selon la matrice de confusion.....	42
Tableau 7 : Valeurs de précision et de rappel pour chaque classe de bois.....	43

## Liste des annexes

Annexe 1 : Photographies des différentes catégories de tri du bois par jour.....	58
Annexe 2 : Ensemble des échantillons scannés au laboratoire GeMMe à Liège par les caméras 3D et SWIR. ....	67
Annexe 3 : Code Python permettant d'obtenir les graphiques de l'intensité de réflectance, du pourcentage de réflectance et des courbes SNV en fonction des longueurs d'ondes. ....	69
Annexe 4 : Images .TIFF des cinq groupes d'échantillons scannés par la caméra 3D et images .TIFF modifiés à la dimension des fichiers RAW. ....	77
Annexe 5 : Code Python utilisé pour la classification SVC, l'optimisation des hyperparamètres, la matrice de confusion, les calculs de précisions et de rappel. ....	80
Annexe 6 : Scans des 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5 du tri manuel. ....	83
Annexe 7 : Coupes microscopiques transversales, radiales et tangentielles des échantillons non identifiables à l'oeil nu. ....	91
Annexe 8 : Graphiques des intensités et pourcentages (%) d'absorbance pour chaque classe de bois. ....	95
Annexe 9 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du MDF et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical). ....	97
Annexe 10 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du panneau de particules et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical). ....	97
Annexe 11 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance de l'OSB et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical). ....	97
Annexe 12 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du Douglas et de l'Épicéa traité.....	98

## Liste des abbréviations

CO<sub>2</sub> : Dioxide de carbone  
LCA : Life Cycle Assesment  
kg : kilogramme  
m<sup>3</sup> : mètre cube  
nm : nanomètre  
LC : lamellé-collé  
CLT : Cross-laminated timber  
OSB : Oriented Strand Board  
MDF : Medium Density Fiberboard  
XRF : X-Ray Fluorescence  
NIR : Near-Infrared  
SBSC : Sensor Based Sorting and Characterization  
GPU : Graphics Processing Unit  
3D : Tri-dimensionnel  
XRT : X-Ray Transmission  
LIBS : Laser-induced breakdown spectroscopy  
SWIR : Short-Wave Infrared  
VNIR : Visible and Near-Infrared  
SNV : Standard Normal Variate  
SVM : Support Vectore Machine  
SVC : Support Vector Classifcation  
RBF : Radial Basis Function  
VP : Vrai Positif  
VN : Vrai Négatif  
FP : Faux Positif  
FN : Faux Négatif  
ACP : Analyse en Composantes Principales  
CP : Composante Principale

# 1. Introduction

## *Situation climatique actuelle*

De nos jours, le changement climatique est un sujet central de préoccupation à l'échelle mondiale, notamment dû à l'augmentation continue des émissions de gaz à effet de serre (Grubb et al., 2022) parmi lesquels le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) joue un rôle prépondérant (Trouy & Triboulot, 2019). Il est donc primordial de réduire la détérioration de l'environnement liée à une population mondiale en expansion (Van Buren et al., 2016). En effet, cet accroissement de population augmente la pression sur l'environnement en sollicitant de plus en plus de ressources naturelles pouvant ainsi causer leur épuisement (Van Buren et al., 2016). Au cours du 20<sup>ème</sup> siècle, l'importance du bien-être chez les citoyens conduit à une augmentation de la consommation 34 fois plus importante pour les matériaux, 27 fois plus pour les minéraux, 12 fois plus pour les combustibles fossiles et 3,6 fois plus pour la biomasse (Van Buren et al., 2016).

Les conséquences de l'industrialisation mondiale et de la dépendance excessive envers les sources d'énergie non renouvelables ont conduit à une augmentation des déchets solides et du changement climatique. Une solution afin de contrer ces impacts est d'instaurer une économie circulaire dans les secteurs propices à son application. Cela dans le but de réduire les émissions de carbone de 45% d'ici 2030 et d'atteindre une neutralité en carbone d'ici 2050 (M. Yang et al., 2023). L'Union européenne fait partie des dix premiers émetteurs de gaz à effet de serre sur les années 2020 et 2021, ce qui engendre de nombreux objectifs à son échelle. Parmi ceux-ci figurent l'augmentation de la part de l'énergie renouvelable à 32% d'ici 2030, soit le double du pourcentage de 2017 ainsi que la réduction de gaz à effet de serre de 55% d'ici 2030, par rapport au taux de 1990 (M. Yang et al., 2023).

Le secteur de la construction est un contributeur majeur au changement climatique, représentant jusqu'à 36 % des émissions totales de CO<sub>2</sub> à l'échelle mondiale. De plus, ce secteur contribue à d'autres pressions environnementales telles que l'épuisement des ressources, la consommation d'énergie et la production de déchets. Avec les pratiques actuelles, une part significative des émissions de gaz à effet de serre au cours du cycle de vie d'un bâtiment provient de l'extraction des matières premières, de la fabrication des éléments de construction et des processus de construction. Améliorer la performance environnementale des bâtiments, notamment grâce à des pratiques telles que la réutilisation, peut contribuer à atténuer les impacts mondiaux de ce secteur sur le changement climatique (Bertin et al., 2022).

## *Économie circulaire et règle des 9R*

Afin d'améliorer la situation climatique actuelle, il est nécessaire d'évoluer et de changer l'économie linéaire appliquée dans la société (M. Yang et al., 2023). Il faut désormais se tourner vers une économie dite circulaire qui contribue à améliorer l'efficacité des ressources en réduisant les intrants et les émissions, ce qui en fait un outil potentiel pour combattre le changement climatique. Celle-ci va au-delà de la réduction des déchets par le recyclage (Van Buren et al., 2016). Elle est ponctuée par cinq pratiques qui visent à favoriser la préservation de l'environnement et la gestion durable des ressources : réduire la consommation de matières premières, mettre en œuvre l'éco-conception pour développer des produits afin de faciliter leur démontage et leur réutilisation après usage, prolonger la durée de vie des produits en encourageant leur entretien et leur réparation, utiliser des matériaux recyclables dans la fabrication des produits et récupérer des matières premières à partir des flux de déchets (Van Buren et al., 2016).

Bien que l'ère soit à l'économie de recyclage qui émet un besoin en matières premières et une production de déchets résiduels, l'économie circulaire apporte une nouvelle dimension. Elle permet de garder la boucle fermée et ne nécessite pas de nouveaux intrants (Van Buren et al., 2016) mais aussi



de réduire la dépendance au marché des ressources et de diminuer les coûts d'élimination (M. Yang et al., 2023).

Afin de minimiser les impacts environnementaux dus à la surconsommation, une règle visant à "réduire, réutiliser et recycler" a fait son apparition. Cette règle est communément appelée la règle des « 3R » (Irle, 2015). L'évolution vers une économie circulaire a également impacté cette règle, qui est désormais constituée de « 9R », à prioriser dans l'ordre suivant : Refuser (éviter le superflu), Repenser (rentabiliser l'utilisation du produit), Réduire (réduction des ressources naturelles et de matériaux pour la fabrication d'un produit), Réutiliser (réutilisation du produit en conservant la fonction d'origine), Réparer, Remettre à neuf, Remanufacturer (emploi des pièces d'un produit dans un nouveau produit ayant la même fonction), Réutiliser (réutilisation du produit ou des parties de ce produit pour une fonction différente), Recycler et enfin, Récupérer de l'énergie (Kirchherr et al., 2017). La dernière étape symbolise la dernière option de recyclage pour un produit où les dernières ressources exploitables sont extraites. Une fois l'énergie récupérée par la dégradation en chaleur, émissions et cendres, le cycle du produit est fini. Avec ce schéma en neuf étapes, l'économie circulaire s'oppose donc à la destruction inutile des ressources (Van Buren et al., 2016).

De ce fait, il est nécessaire de tendre vers une optimisation de la gestion des déchets (Dantas et al., 2021) surtout au vu de l'augmentation de la production de déchets solides, conséquence directe du comportement de surproduction et de surconsommation grandissant au sein de la population mondiale (Chioatto & Sospiro, 2023). Cette production de déchets implique une consommation non négligeable des ressources naturelles qui sont limitées (M. Yang et al., 2023). L'économie circulaire participe activement à augmenter la récupération et le recyclage des déchets afin de protéger au mieux l'environnement et d'utiliser de manière efficace les ressources (M. Yang et al., 2023). Cela permet également de réduire l'empreinte carbone en utilisant des méthodes de recyclage autres que la mise en décharge et l'incinération des déchets. Il est donc essentiel de poursuivre la recherche sur le recyclage à grande échelle et la technologie des déchets pour l'instaurer et lutter contre le changement climatique.

L'édification de constructions, particulièrement en milieux urbains, offre une opportunité de contrer le changement climatique en capturant du carbone. En recourant à des matériaux issus de sources biologiques tels que le bois d'ingénierie et le bambou, les édifices peuvent fonctionner comme des réservoirs de carbone. Ces matériaux affichent une forte capacité de stockage du carbone et des émissions de carbone incorporées limitées, les rendant efficaces pour réduire les rejets de CO<sub>2</sub> liés aux activités de construction (Churkina et al., 2020)

La séquestration de carbone dans les bâtiments peut contribuer à reconstituer les stocks de carbone terrestres et compenser les émissions à venir. Les constructions en bois, en particulier, présentent un potentiel substantiel de stockage du carbone. Selon les scénarios et la surface moyenne au sol par habitant, les édifices en bois pour les nouveaux citadins pourraient stocker de 0,01 à 0,68 GtC par an. Cela viendrait accroître le rôle de puits de carbone déjà joué par les produits du bois à longue durée de vie (Churkina et al., 2020).

En complément du bois, d'autres matériaux d'origine biologique comme le bambou, la paille, le chanvre et des matériaux novateurs à teneur élevée en carbone pourraient également être explorés. Les combinaisons optimales de ces matériaux dépendront des conditions climatiques locales et de la disponibilité des ressources naturelles. La transition vers des matériaux d'origine biologique exigera des ajustements dans les codes de construction, la reconversion de la main-d'œuvre du secteur de la construction et un renforcement des capacités de production de produits biosourcés. Cependant, les bénéfices potentiels de la captation de carbone dans les édifices font de cette transition une stratégie d'atténuation climatique prometteuse (Churkina et al., 2020).

## *Le bois*

Le bois, en tant que matériau largement produit et utilisé, joue un rôle important dans la gestion des déchets. Dans le contexte de la lutte contre la détérioration de l'environnement, il est essentiel de se concentrer sur les matériaux dont le cycle de vie n'est pas suffisamment optimisé, comme le bois, qui est à la fois une matière première robuste et une source importante de production énergétique (Ratajczak et al., 2015). Son utilisation permet également de minimiser la consommation d'énergie fossile (Trouy & Triboulot, 2019). Ainsi, il se présente comme un candidat idéal pour favoriser une économie circulaire, soutenue par une éco-industrie variée et étendue proposant des connaissances novatrices, des technologies avancées et des services qui contribuent à la protection et la restauration de l'environnement (Van Buren et al., 2016).

La transition vers une bioéconomie durable accentue la demande de ressources renouvelables telles que le bois (Risse et al., 2019). Pour maximiser son utilisation, il est essentiel de mettre en œuvre une approche en cascade qui consiste à conserver sa valeur ajoutée le plus longtemps possible, en passant par le recyclage et la réutilisation avant la valorisation énergétique finale (Risse et al., 2019). Cette approche peut être améliorée par de nouvelles technologies de recyclage, contribuant ainsi au développement d'une économie circulaire (Risse et al., 2019). L'effet cascade permet de prolonger le stockage de carbone dans le matériau, retardant ainsi la libération de CO<sub>2</sub> lors de sa valorisation énergétique en fin de vie (Besserer et al., 2021).

Le bois présente de nombreux avantages : il est d'origine naturelle, renouvelable, biodégradable, et dispose de caractéristiques mécaniques et thermiques remarquables. Sa production et sa fin de vie entraînent des impacts environnementaux moins importants que d'autres matériaux inorganiques ou fossiles (Besserer et al., 2021). Cependant, en raison de la demande croissante pour ce matériau, il existe un risque de dépasser les capacités de production d'ici 2030 en Europe (Besserer et al., 2021).

L'augmentation de la production et de la consommation entraîne une augmentation des déchets de bois, qui peuvent être recyclés en vue d'être transformés en nouvelles matières premières pour la production d'autres matériaux (Besserer et al., 2021).

L'aspect renouvelable (Risse et al., 2019) et 100 % naturel du bois permet des cycles de recyclage multiples ou une valorisation énergétique en fin de vie (Ratajczak et al., 2015). L'évaluation de la durabilité du cycle de vie (Life Cycle Assessment, LCA) est une méthodologie globale qui évalue l'impact environnemental et économique tout au long du cycle de vie d'un produit, de l'extraction à la fin de vie (Trouy & Triboulot, 2019). Elle prend en compte les dimensions environnementales, économiques et sociales (Risse et al., 2019). Concernant le bois, ses grandes dimensions offrent des possibilités de remodelage pour prolonger son cycle de vie. Il peut être utilisé dans la production de panneaux de construction, offrant ainsi un cycle supplémentaire avant que ses composants soient recyclés. Chaque cycle réduit cependant le pourcentage de bois recyclé, car les possibilités de valorisation se réduisent (Irle, 2015).

Contrairement à la production d'autres matériaux, qui émettent du dioxyde de carbone, le bois en consomme grâce à la photosynthèse, représentant jusqu'à 50 % de sa composition chimique (Trouy & Triboulot, 2019). Son utilisation permet donc de stocker du carbone (Nabuurs et al., 2022), avec une réduction d'environ 1200 kilogrammes (kg) de dioxyde de carbone par mètre cube (m<sup>3</sup>) utilisé (équivalent à 700 kg de matériau) (Trouy & Triboulot, 2019). Pour maximiser ce stockage, il est nécessaire de prolonger son cycle de vie grâce à une utilisation adéquate et à des produits durables (Nabuurs et al., 2022). Le carbone stocké est libéré dans l'atmosphère lorsque le bois est valorisé énergétiquement en fin de vie (Irle, 2015).

Par ses propriétés mécaniques, il participe à la substitution de matériaux tout en gardant les mêmes atouts (Nabuurs et al., 2022). Il a donc une place de plus en plus importante au sein du secteur

de la construction (Trouy & Triboulot, 2019). De plus, la qualité et la valeur économique du bois sont maintenues, ainsi que la durée du stockage de carbone qu'il représente lorsque le bois est utilisé dans la construction (Risse et al., 2019). Lors de l'utilisation de produits bois dans le secteur de la construction, cela engendre des déchets post-consommation qui représentent potentiellement le segment le plus important du marché du bois (Ratajczak et al., 2015).

### *Valorisation du bois*

Le bois peut servir autrement que pour la production d'énergie. En effet, il occupe une place importante dans le secteur de la construction par ses différents produits.

Parmi ceux-ci, les copeaux de bois peuvent servir à produire du béton. Cette matière première a un impact positif sur la lutte contre le changement climatique, surtout en prenant en compte le carbone biogénique (Caldas et al., 2021). Malgré le transport sur des longues distances qui est impliqué dans le cycle de vie du béton-bois et qui affecte donc son empreinte carbone, les émissions de carbone de ce produit peuvent valoir 15 kg de dioxyde de carbone par mètre cube. Cette valeur est obtenue en prenant en compte le dioxyde de carbone capturé lors de la croissance de l'eucalyptus (M. Yang et al., 2023).

Le bois en construction se retrouve également au sein d'une diversité de panneaux remarquables. Les plus communs sont les suivants :

#### Bois lamellé collé (Glulam, LC) :

Le bois lamellé-collé est un matériau de construction constitué d'au moins deux couches parallèles de lamelles, qui peuvent être formées à partir d'une ou deux planches juxtaposées, avec une épaisseur finale comprise entre 6 et 45 mm (Niemz et al., 2023). Ces couches sont assemblées en panneaux comprenant au moins deux strates parallèles, fixées ensemble par collage. Chaque lamelle est composée de plusieurs planches placées côte à côte. Elles sont jointes à l'aide de colle ayant des propriétés mécaniques comparables à celles du bois. L'épaisseur de chaque couche peut varier de 6 à 45 mm (Ramage et al., 2017).

#### Bois lamellé-croisé (Cross-Laminated Timber, CLT) :

Le bois lamellé-croisé (CLT) se présente sous la forme d'une plaque et présente des caractéristiques qui pourraient le faire entrer avec succès dans l'industrie de la construction en raison de sa configuration, de ses dimensions et de ses propriétés particulières (Niemz et al., 2023). Ce sont des panneaux composés de trois, cinq ou sept couches. L'orientation est perpendiculaire entre chaque couche. L'assemblage des couches se fait par l'utilisation de colle conférant une très bonne résistance, stabilité et rigidité au produit (Muthu, 2016). Il est constitué de bois massif et est utilisé dans les applications de toiture, de plancher ou de mur (Arbelaez, 2019). Les multiples atouts du CLT en font un compétiteur performant sur le marché de la construction, facilitant un montage rapide sur chantier (Niemz et al., 2023).

#### OSB (Oriented Strand Board) :

Panneaux composés de trois couches ou plus composés de brins au sein de chaque couche, orientés de manière alterne (Muthu, 2016).

#### Panneaux contreplaqué (Plywood) :

Un panneau multicouche élaboré à partir de brins de bois ayant des caractéristiques prédéfinies en termes de forme et d'épaisseur, reliés par un agent de liaison grâce à l'application de chaleur et de

pression. Les brins des couches extérieures sont disposés de manière alignée et parallèle à la longueur ou à la largeur du panneau (Niemz et al., 2023).

Panneaux de particules :

Panneaux composés de résidus de fabrication de produits en bois comme des copeaux et de la sciure. Ils peuvent également être fabriqués à partir de petites particules de bois recyclé. Concernant la taille des particules, elles sont plus grandes dans les couches centrales et plus fines pour les couches externes. La fabrication se fait sous pression et à chaud en ajoutant un adhésif polymère (Niemz et al., 2023).

MDF (Medium Density Fiberboard) :

Panneau de fibres obtenu par un procédé à sec, offrant des avantages distincts par rapport au bois massif et aux panneaux de particules grâce à sa structure uniforme et compacte. Ils sont utilisés dans la construction, l'ameublement et l'emballage. Les fibres proviennent de bois résiduel brisé. Elles sont mélangées avec un agent de liaison synthétique sous pression et à chaud ce qui forme des panneaux denses (Muthu, 2016; Niemz et al., 2023).

Les types de panneaux conservant au mieux l'intégrité des pièces de bois parmi ceux présentés ci-dessus sont le lamellé-collé (LC) ainsi que le bois en lamellé-croisé (CLT). Ils s'inscrivent de manière optimale dans l'économie circulaire visant à réutiliser, en minimisant les transformations, les produits disponibles. En effet, les matériaux à base de bois de masse dont le LC et le CLT font partie constituent une ouverture de marché participant à la valorisation du bois de récupération (Arbelaez, 2019). De plus, le flux de déchets bois peut être utilisé comme première ressource pour les fabriquer (Ross et al., 2010).

Le CLT est le candidat idéal en vue de l'utilisation de bois massif de récupération. En effet, il utilise une quantité importante de matière première, ce qui laisse la possibilité d'incorporer un volume variable de bois de récupération. Ce dernier peut prendre place dans la couche intérieure du panneau ou dans les couches extérieures. Cela laisse la possibilité à la fabrication des panneaux entièrement composés de bois recyclés. Ses qualités pouvant varier, les différents plis composant un panneau de CLT représentent l'option idéale pour utiliser à la fois des bois de qualité inférieure et des bois de qualité supérieure (Arbelaez, 2019).

### *Sources de bois de récupération*

Deux possibilités existent lors de la recherche de bois de récupération potentiellement valorisable en panneaux CLT : le secteur de la déconstruction et de la démolition ainsi que le secteur des parcs à conteneurs.

La déconstruction se définit comme le processus de démontage d'une structure physique en ses composants en suivant l'ordre inverse de sa construction, tout en préservant ses propriétés physiques et son intégrité structurelle d'origine, avec un minimum de dommages (Diyamandoglu & Fortuna, 2015). Quant à la démolition, elle s'apparente à la destruction, la décomposition ou le retrait d'une structure qui est arrivée en fin de vie (Arbelaez, 2019). La démolition implique généralement une élimination totale de toutes les parties du bâtiment dans l'objectif d'y placer, sur le même lieu, une nouvelle construction (Thomsen et al., 2011).

Les déchets de construction et de démolition représentent l'un des principaux types de déchets dans la société actuelle (Ramos Huarachi et al., 2020). En Belgique, le recyclage des déchets de construction et de démolition est largement répandu, avec un taux compris entre 60 et 70% (Villoria Saez, 2011). Ce secteur s'inscrit dans le mouvement d'une économie circulaire, en voulant prolonger

le cycle de vie des matériaux en provenant (M. Yang et al., 2023). Cependant, il serait plus rentable encore en évaluant les déchets retrouvés sur place. Deux outils sont proposés pour améliorer ce secteur (L. Akanbi et al., 2019). Le premier est un outil mathématique qui consiste à évaluer la valeur résiduelle d'un bâtiment ou d'un matériau de construction. Celui-ci est complété par un deuxième outil d'analyse, qui apporte une simulation de la quantité et qualité des matériaux qui peuvent être soutirés d'un bâtiment devant être déconstruit (L. Akanbi et al., 2019). Un tri parmi les déchets de construction pourrait donc être fait afin de maximiser leur réutilisation et de participer au mieux aux différents objectifs de l'économie circulaire. Une méthode d'estimation de la performance de récupération des bâtiments reposant sur la modélisation des informations de ceux-ci est également proposée par le même auteur (L. A. Akanbi et al., 2018).

Il est important d'étendre les données sur la composition en termes de matériau des bâtiments. En effet, un historique de chaque bâtiment permettrait d'optimiser la valorisation de ses composantes une fois que ce bâtiment rentre en phase de déconstruction. Cependant, l'économie circulaire débute dès la conception d'un bâtiment. Il faut s'attarder sur le début de la construction afin d'optimiser le choix des matériaux et de les référencer. Le passeport matériaux est une innovation fournissant des informations détaillées sur la composition et la quantité de matériaux utilisées pour un bâtiment. Il constitue également un inventaire matériel. Cet outil est nécessaire pour améliorer l'économie circulaire dans l'industrie du bâtiment et en réduire l'empreinte carbone (Honic et al., 2019).

Plusieurs entreprises belges offrent leurs services dans le secteur de la destruction et la démolition afin de récupérer les matériaux et de leur donner une seconde vie. Par exemple, Rotor DC<sup>2</sup> est une coopérative, basée à Bruxelles, qui organise le réemploi des matériaux récupérés après la déconstruction. Renewi<sup>3</sup> est un autre exemple d'entreprise se spécialisant dans la relève des déchets de déconstruction. Le bois récolté par celle-ci est transformé en biomasse afin de produire de l'énergie.

Toutefois, le problème du secteur de la déconstruction et de la démolition réside par la manière dont les bâtiments sont démis. Bien souvent, l'utilisation de machines lourdes détruisent les matériaux pouvant être réutilisés par après, ce qui nuit au cycle de valorisation (Nunes et al., 2019).

En parallèle, une seconde source de bois de récupération à haut potentiel de valorisation est collectée à partir des parcs à conteneurs, impliquant les citoyens dans le cadre d'une économie circulaire. Actuellement, sa valorisation est de nature énergétique. Le matériau est soumis à un processus de broyage comme sur le site du Bureau Économique de la Province de Namur (BEP) Environnement à Floreffe. Ce co-produit est une source énergétique pour les entreprises.

La Ressourcerie namuroise joue déjà un rôle dans la valorisation du bois de récupération en fabriquant ses propres panneaux de CLT à partir des encombrants récupérés auprès des résidents locaux. Cependant, cette initiative ne s'étend pas aux divers parcs à conteneurs présents dans la région namuroise, lesquels ont rassemblé près de 22 000 tonnes de bois au cours de l'année 2022<sup>4</sup>

Ces informations démontrent l'importance accordée à la valorisation du bois de récupération au sein de la province de Namur. Toutefois, il reste des opportunités d'étendre ces initiatives afin de tirer pleinement parti du potentiel de valorisation du bois de récupération collecté à partir des parcs à conteneurs. En encourageant une collaboration accrue entre les citoyens, les entreprises et les entités de valorisation, il est envisageable de renforcer l'économie circulaire et de promouvoir une utilisation durable des produits ligneux.

Pour l'instant, l'unique manière de trier le bois est manuelle. Elle se limite au dépôt des différents types de bois confondus dans un seul et unique conteneur. Automatiser ce tri est une ouverture

---

<sup>2</sup> <https://rotordc.com/>

<sup>3</sup> <https://www.renewi.com/fr-be/>

<sup>4</sup> Rapport d'activités annuel 2022 du BEP, disponible sur : <https://www.bep.be>

d'optimisation de la valorisation du bois. Différentes catégories pourraient ainsi être mises en place en vue de valorisation spécifiquement les profils de bois retrouvés au sein des conteneurs.

### *Classification du bois et automatisation du tri*

Un système de tri automatisé en quatre parties existe déjà. Il permet de séparer les copeaux de bois en deux catégories : la catégorie A, qui comprend le bois brut, et la catégorie B, qui rassemble le bois transformé en panneaux de différents types. Ce tri est essentiel pour distinguer les copeaux de catégorie A, qui peuvent être vendus à des industries de copeaux à un prix plus avantageux. Le système de tri se base sur trois aspects du bois : sa couleur, sa forme et sa texture. Un système de vision industrielle est utilisé pour effectuer cette classification, tandis qu'un mécanisme d'éjection sépare les copeaux de catégorie B, permettant ainsi de ne conserver que ceux de la catégorie A (Verheyen et al., 2016).

Par ailleurs, une autre approche de tri a été mise en œuvre en utilisant l'évaluation d'un système de fluorescence X (X-Ray Fluorescence, XRF), spécifique pour détecter les métaux présents dans le bois. Cette méthode permet de trier les bois en fonction de leur teneur en composants chimiques tels que l'arsenic et le cuivre, qui sont utilisés pour la conservation (Hasan et al., 2011; Rasem Hasan et al., 2011).

En somme, grâce aux technologies avancées de vision industrielle et de détection chimique, le tri automatisé du bois est devenu possible, ce qui permet d'améliorer l'efficacité et la rentabilité de ce processus. Néanmoins, le tri automatique ne vise pas le bois de plus grandes dimensions qui ne subit pas de broyage au préalable.

En vue de la production de panneaux CLT entièrement élaborés avec du bois de récupération, il faudrait la mise en place d'un système de tri automatique pouvant reconnaître chaque essence de bois massif, mais aussi les différents panneaux de bois transformés.

Cette reconnaissance est possible grâce à l'utilisation de la spectroscopie proche infrarouge (Near Infrared, NIR). En vue de trier automatiquement le bois, il faut d'abord élaborer une classification afin de séparer les différents types de bois. Des études ont été menées pour séparer plusieurs essences de bois massif grâce à un balayage NIR (Braga et al., 2011) mais aussi, la classification d'essences résineuses (Cooper et al., 2011). Une autre étude a permis de distinguer dix essences de feuillus différentes par la spectroscopie NIR. Cela a été démontré par une analyse en composante principale (Russ & Fiserova, 2011). Il est également possible de différencier le bois dur (feuillus) du bois tendre (résineux) (Z. Yang et al., 2012). D'autres facteurs peuvent être déterminés par l'application de l'imagerie hyperspectrale, comme la densité de base et la teneur en humidité (Mora et al., 2011), ou encore la teneur en humidité superficielle (Kobori et al., 2013).

GeMMe, un groupe de recherche situé à Liège, met en place des méthodes novatrices visant à optimiser la gestion des ressources minérales et métalliques<sup>5</sup>. Trois secteurs de recherches sont visés : les géoressources et la géoimagerie, le traitement des minéraux et leur recyclage et enfin, les matériaux de construction.

Au sein de ce groupe, l'axe Sensor Based Sorting and Characterization<sup>6</sup> (SBSC, signifiant "Tri et caractérisation par capteurs") englobe plusieurs activités, passant de la caractérisation à des systèmes de tri avancés. Le développement des instruments de vision industrielle, des systèmes de tri robotisés, et des systèmes d'éjection pneumatique pour des chaînes industrielles complètes, ont été développés par le laboratoire GeMMe SBSC. Leur expertise centrale reste la caractérisation, utilisant les outils de

---

<sup>5</sup> <http://www.gemme.ulg.ac.be/>

<sup>6</sup> <http://www.gemme.ulg.ac.be/index.php/accueil/labs/sbcs/>

pointe de l'apprentissage automatique, notamment les techniques de machine à vecteur de support et d'apprentissage profond sur l'unité de traitement graphique (Graphics Processing Unit, GPU).

Le laboratoire étudie une variété de matériaux, allant des minéraux traditionnels aux matériaux recyclables. Leurs études récentes incluent le tri de batteries par 3D (tridimensionnel) et transmission des rayons X (X-ray Transmission, XRT), le tri d'alliages métalliques par spectroscopie d'émission atomique induit par laser (Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, LIBS), le tri de plastiques par l'utilisation d'une caméra infrarouge à onde courte (Short-Wave Infrared, SWIR). Ils ont mis en place un banc de tri industriel multi-capteurs comprenant un convoyeur à bande, un scanner 3D, des caméras hyperspectrales visible et proche-infrarouge (Visible and Near-Infrared, VNIR) et SWIR, un capteur linéaire de rayons X multi-énergie et un scanner analytique LIBS. Ce banc est complété par cinq robots delta et des éjecteurs pneumatiques pour permettre le tri rapide et efficace des matériaux.

Le bois est un matériau qui n'a pas encore été exploité au sein de ce laboratoire. Cela représente une opportunité de tri spécifique en vue d'une amélioration de la valorisation de ce matériau pour s'inscrire dans le mouvement de l'économie circulaire et de la règle des 9R.

### *La gestion des déchets à Namur*

La gestion des déchets étant une partie prenante à l'application de la règle des "9R", il est intéressant d'observer son fonctionnement au sein même d'une province comme celle de Namur. Les informations suivantes sont tirées du Rapport annuel<sup>7</sup> 2022 du BEP.

Le BEP est divisé en quatre axes : BEP Environnement, BEP Crématorium, BEP Expansion économique et IDEFIN gestion déléguée, une intercommunale de financement. La gestion des déchets est l'une des tâches du BEP Environnement. Il collecte et s'occupe du traitement des déchets et a ses propres sites d'équipement.

Concernant les déchets ménagers, ils représentent 491kg par habitant. Sachant que cela englobe 38 communes namuroises et Héron en province de Liège, pour un total de 505 014 habitants, une diminution de 10,33% de la quantité totale de déchets est observée par rapport à l'année précédente. Cependant, les années 2020 et 2021 ne peuvent pas réellement être considérées comme années de références, étant donné les conséquences du Covid-19 en 2020 (augmentation de la quantité de déchets due à la présence permanente des habitants à leur domicile) ainsi que les nombreuses inondations touchant la Région Wallonne en 2021 (augmentation de la quantité de déchets due aux dégradations). Cela donne une baisse de 6,33% de déchets, ce qui correspond à 39kg par habitant par an en moins.

Au niveau du traitement de ces déchets, 60% correspond au taux minimum de recyclage et 23,2% au taux de valorisation énergétique. La Ressourcerie Namuroise, qui travaille en collaboration avec le BEP Environnement depuis 2009, est un système d'encombrants. Ce service permet aux citoyens d'évacuer leurs déchets de grand volume directement à domicile. Il propose d'aller chercher directement les encombrants et, ensuite, de les valoriser au maximum en les remettant à neuf si cela est possible. Les objets récoltés et remis à neuf en 2022 représentent 4769 tonnes minimum d'encombrants avec 16,7% minimum de réemploi (Figure 1). Ils ont également leur propre production de lamellé-collé réalisée en totalité grâce aux différents bois retrouvés parmi ces encombrants.

---

<sup>7</sup> Rapport d'activités annuel 2022 du BEP, disponible sur : <https://www.bep.be>

#### FINALITÉ DES DÉCHETS RÉCOLTÉS EN 2022



Figure 1 : Finalité des déchets récoltés en 2022 par le BEP Environnement. Graphique disponible dans le Rapport d'activités annuel 2022 mis à disposition par le BEP.

Afin de limiter les coûts de transports entre les recyparcs et le site de dépôt, un compactage va être mis en place. Cela touche plusieurs flux sur un même site : le bois, les déchets verts, les encombrants, les papiers/cartons et les métaux.

#### Traitement des déchets au BEP Environnement : le bois

Le bois a fait son apparition dans les recyparcs en 1999. Cette année, une diminution de 9% des déchets bois est observée. Un partenariat est né entre le BEP Environnement et Tibi, une entreprise publique qui s'occupe de la gestion intégrée des déchets dans la région de Charleroi<sup>8</sup>. Ce partenariat se nomme Bivalor, une société interne dont l'activité principale est de valoriser les déchets de bois provenant des deux intercommunales au sein même du site de Floreffe.

En 2022, les deux intercommunales ont apporté un total de 38 925 tonnes de bois, dont 25 156 tonnes provenant de BEP Environnement et 13 769 tonnes provenant de Tibi. L'intercommunale InBW, un partenaire économique et environnemental de la Province du Brabant wallon<sup>9</sup>, a contribué avec 644 tonnes de bois, tandis qu'Intradel, une association intercommunale de la Province de Liège<sup>10</sup> a fourni 113 tonnes.

La majeure partie du bois collecté a été traitée dans la chaîne de traitement du bois à Floreffe. En 2022, le personnel de cette chaîne a transformé 37 866 tonnes de bois en combustibles alternatifs, principalement 31 980 tonnes de plaquettes de bois et 4 964 tonnes de fines de bois. Ces combustibles très demandés suite à l'augmentation des coûts de l'énergie (gaz, mazout et électricité) sont utilisés par des clients industriels pour leurs processus de fabrication, tels que la production de chaux et la cogénération. Le partenariat principal est celui avec Carmeuse qui se renforce au fil des années.

Par ce processus de transformation du bois, des déchets sont générés en quantités nettement moins importantes, notamment des poussières de bois, des métaux et des matériaux indésirables tels que les textiles, les mousses et les plastiques.

Le BEP Environnement a fourni ses chiffres concernant les flux de bois net récoltés au sein des différents recyparcs durant l'année 2022 (Figure 2). En moyenne, cela représente 667,93 tonnes de bois récoltées par commune. Les communes ayant un poids net, en tonnes, de bois les plus élevés sont

<sup>8</sup> <https://www.tibi.be/>

<sup>9</sup> <https://www.inbw.be/>

<sup>10</sup> <https://www.intradel.be/>



Jemeppe-sur-Sambre, Fosses-la-Ville ainsi que les trois quartiers communaux rassemblant les recyparcs disponibles pour la commune de Namur, c'est-à-dire, Naninne, Malonne et Champion.

Répartition par commune du poids net de bois (t) récoltés en 2022 par le BEP Environnement de Floreffe

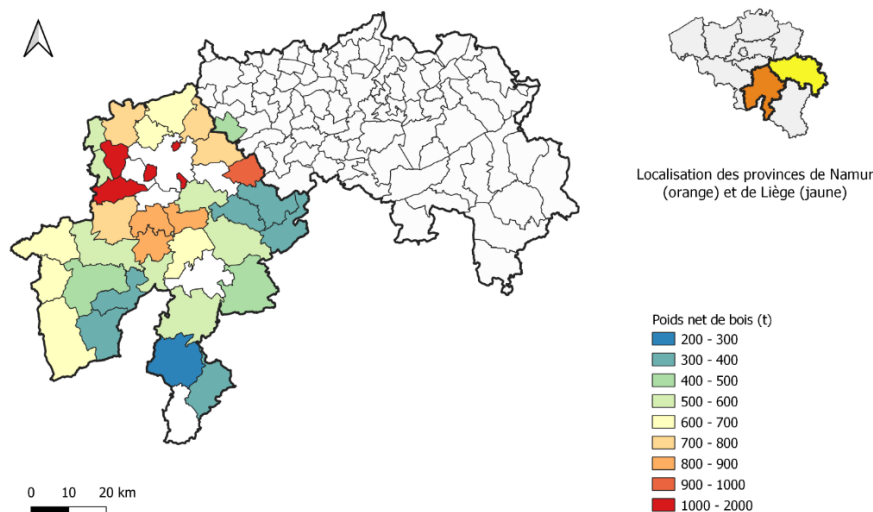


Figure 2 : Répartition par commune du poids net de bois en tonnes récoltés en 2022 (de janvier à décembre) par le BEP Environnement de Floreffe. Les communes sans couleur correspondent aux communes qui ne sont pas prises en charge par le BEP de Floreffe.

Le nombre de conteneurs varie également d'une commune à l'autre (Figure 3). En moyenne, 204 conteneurs sont remplis par commune. Le nombre de conteneurs est lié au poids net de bois récolté, ce qui laisse donc la commune de Namur en première position avec 1167 conteneurs récoltés sur l'année 2022.

Répartition par commune du nombre de conteneurs de bois récoltés en 2022 par le BEP Environnement de Floreffe

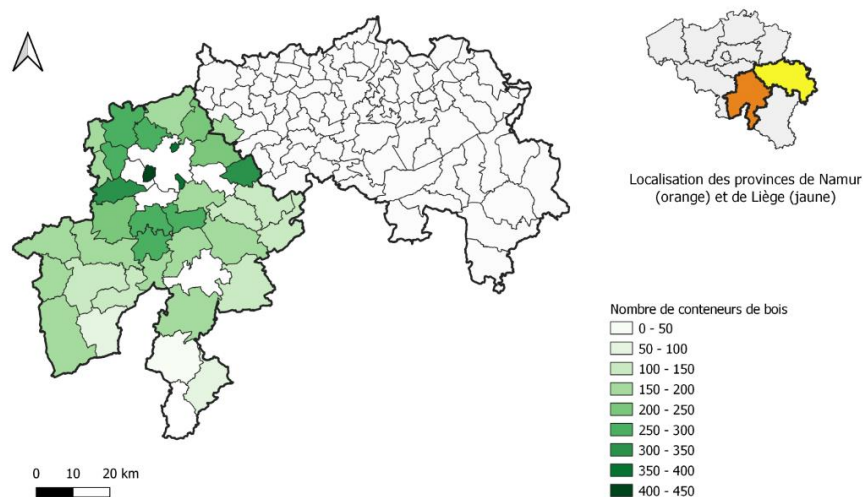


Figure 3 : Répartition du nombre de conteneurs de bois récoltés en 2022 (de janvier à décembre) par le BEP Environnement de Floreffe. Les communes sans couleur correspondent aux communes qui ne sont pas prises en charge par le BEP de Floreffe.

Le nombre de conteneurs varie légèrement selon les saisons. Une baisse s’observe en janvier, février ainsi que de septembre à décembre (Figure 4). Le poids récolté par mois varie en fonction du nombre de conteneurs. La courbe du poids suit l’évolution du nombre de conteneurs.

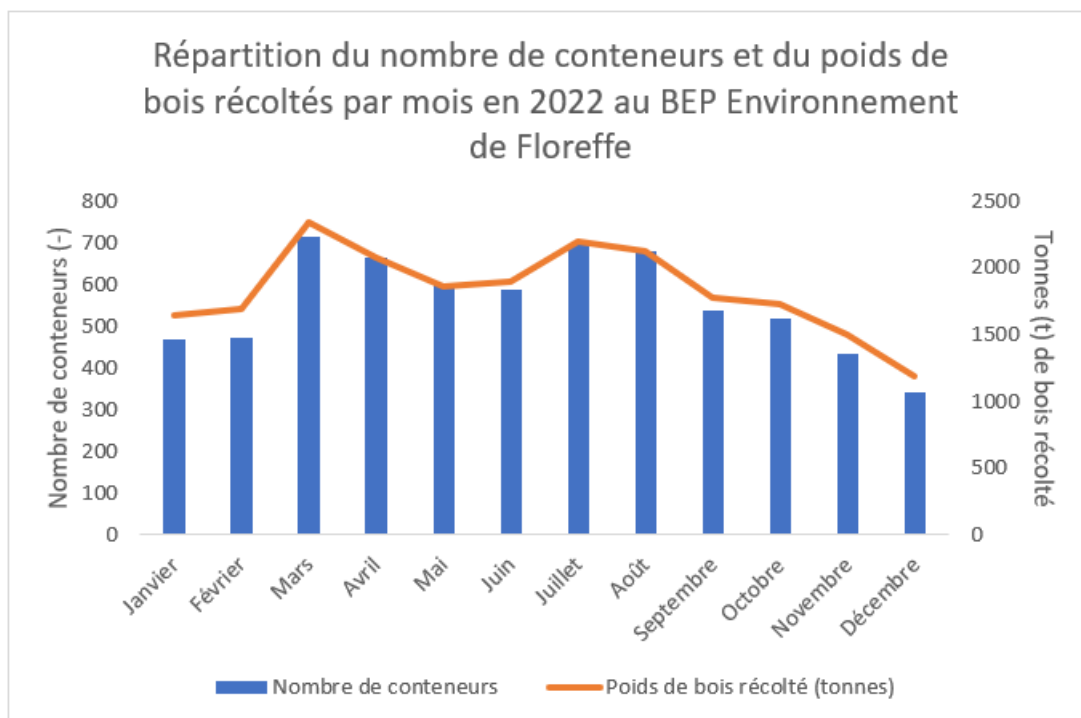


Figure 4 : Répartition du nombre de conteneurs (en bleu) et du poids (en tonnes) de bois récolté (en orange) par mois sur l’année 2022 au BEP Environnement de Floreffe.

Une nécessité de valorisation du bois en vue d’une économie circulaire. Deux objectifs distincts ont émergé de ce projet : quantifier les flux de bois au sein des recyparcs et utiliser les technologies actuelles pour trier le bois en fonction de ses caractéristiques.

## 2. Objectifs

Le premier objectif de cette étude est de réaliser une analyse de divers conteneurs au sein du BEP Environnement situé à Floreffe, afin de quantifier le bois massif qu'ils contiennent selon différents critères. En effet, le marché du bois de récupération peut également s’ouvrir dans le domaine des recyparcs en plus du secteur de déconstruction et démolition. La quantification du flux de bois récolté permettra de déterminer s'il est pertinent ou non d'améliorer la chaîne de tri et de recyclage des déchets de bois provenant des particuliers en séparant le bois massif des autres types de bois en vue de la production de panneaux CLT.

Le deuxième objectif est une étude sur la possibilité du tri automatique du bois non broyé en se basant sur sa nature et ses dimensions. Afin d’optimiser au mieux la valorisation du bois, automatiser le tri permettrait de détecter de manière plus efficace les pièces avec un haut potentiel de valorisation. Ce tri automatique existe déjà pour des batteries, du métal ainsi que du plastique au laboratoire GeMMe SBSC à Liège. Il est possible de réaliser des tests sur le bois pour déterminer s'il peut également être trié automatiquement, de la même manière que d'autres matériaux sont actuellement triés.

### 3. Matériel et méthode

#### 3.1 Tri manuel des conteneurs et mise en évidence du bois massif

Le tri des conteneurs a été réalisé au BEP Environnement situé à Floreffe. Ce centre gère non seulement les déchets courants tels que les PMC, les cartons, les déchets ménagers, les déchets organiques mais aussi le bois collecté dans l'entièreté des recyparcs de la province de Namur.

Actuellement, tous les types de bois reçus sont broyés pour produire des copeaux qui sont ensuite vendus à diverses entreprises pour être utilisés comme source d'énergie dans le processus de cogénération. Le recyclage comporte plusieurs étapes, y compris un premier tri pour éliminer les éléments étrangers tels que les métaux, le plastique, et autres, suivi de plusieurs étapes de broyage pour obtenir des copeaux de deux tailles différentes.

Cinq conteneurs de communes différentes : Fernelmont, Hastière, Namur (Naninne), Ohey et La Bruyère ont été analysés pendant cinq jours consécutifs avec l'aide de plusieurs personnes.

##### 3.1.1 Matériel

Afin de réaliser le tri de chaque conteneur, il y avait à disposition sur le site de Floreffe, un camion porte conteneur, une bascule (Modèle D410, fabricant BILANCAI), une grue mobile, des équipements de protection et un contre-maître. Du matériel supplémentaire comme une scie manuelle et des sachets hermétiques ont été apportés afin de réaliser la prise d'échantillons. Un mètre ruban a également été utilisé dans le but de vérifier les dimensions des morceaux de bois triés pour les classer correctement.

##### 3.1.2 Méthode

La méthode décrite ci-dessous a été appliquée cinq jours de suite sur cinq conteneurs de provenance et de contenu différents.

Avant de commencer le tri du bois, différentes catégories ont été déterminées afin d'optimiser le triage. Elles sont mises en place en vue de quantifier le flux de bois massif retrouvé dans les conteneurs. Une catégorie rassemblant le reste des bois non massif représente la majorité.

Le premier critère de tri consiste à détecter la présence de corps étrangers tels que les clous, les vis ou tout autre matériau qui n'est pas du bois. Puisque cela constitue une hétérogénéité qui complique le processus de valorisation (Besserer et al., 2021), il est important de séparer en fonction de la présence ou non de ces éléments.

Ensuite, une dimension minimale a été choisie afin d'assurer, par la suite, une production de CLT, un matériau de construction en bois constitué de plusieurs couches de planches de bois massif collées entre elles dans une configuration croisée (Niemz et al., 2023). Ces dimensions minimales sont de 50 x 8 x 2 centimètres (cm) et ont été combinées aux catégories avec ou sans corps étrangers. Généralement, l'épaisseur retrouvée pour les lamelles de CLT est de 1,3 à 4 cm<sup>11</sup>. Concernant la longueur et la largeur des lamelles, les dimensions de 50 et 8 cm ont été arbitrairement choisies. Ces dimensions sont standards pour la fabrication de panneaux CLT.

---

<sup>11</sup> <https://www.eurabo.be/fr/lexique/CLT> et <https://arcwood.ee/fr/produit/bois-lamelle-croise-clt/>

La dernière catégorie mise en place n'est autre que celle du bois non valorisable à cause de sa détérioration flagrante. Il correspond au bois mort et pourri, distingué en fonction de certains aspects physiques tels que sa désintégration facile lors de sa manipulation, son poids relativement léger et la présence de signes extérieurs de pourriture.

Cela a permis de distinguer six catégories afin de trier au mieux le bois massif retrouvé dans les différents conteneurs (Annexe 1) :

Catégorie 1 : Bois non valorisable (Figure 5).



Figure 5 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie de bois non valorisable (catégorie 1).

Catégorie 2 : Bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et possédant des corps étrangers (Figure 6).



Figure 6 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie du bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et possédant des corps étrangers (catégorie 2).



Catégorie 3 : Bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et ne possédant pas de corps étrangers (Figure 7).



Figure 7 : Photographie du bois trié venant du conteneur d'Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif ayant des dimensions inférieures à 50 x 8 x 2 cm et ne possédant pas de corps étrangers (catégorie 3).

Catégorie 4 : Bois massif respectant les dimensions requises et possédant des corps étrangers (Figure 8).



Figure 8 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif respectant les dimensions requises et possédant des corps étrangers (catégorie 4).

Catégorie 5 : Bois massif respectant les dimensions requises et ne possédant pas de corps étrangers (Figure 9).



Figure 9 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation de la catégorie de bois massif respectant les dimensions requises et ne possédant pas de corps étrangers (catégorie 5).

Catégorie 6 : Tout bois excepté le bois massif (Figure 10).



Figure 10 : Photographie du bois trié venant du conteneur de Hastière. Représentation du bois n'étant pas du bois massif (catégorie 6).

#### 1. Arrivée du conteneur

Le camion transportant le conteneur est pesé à l'entrée du site ce qui permet de connaître le poids net du bois apporté. Une fois la pesée effectuée, le conteneur était déversé à un endroit prévu pour effectuer le tri manuel.

#### 2. Tri manuel

Dans un premier temps, une sélection manuelle est réalisée afin de différencier le bois massif des autres types de bois (OSB, MDF, CLT, etc). Ensuite, une étape de tri plus minutieuse est effectuée en respectant les cinq catégories mentionnées précédemment.

### 3. Pesées

Pour mesurer le poids de chaque catégorie, un plan dessiné à la main a été utilisé pour permettre au contre-maître d'identifier chaque tas représentant une catégorie. Ensuite, le contre-maître a utilisé un camion taré et a ajouté progressivement chaque catégorie, l'une après l'autre. En calculant les différences de poids entre chaque pesée du camion, le poids de chaque catégorie a été déterminé. Ces pesées permettent ainsi de connaître les proportions de bois massif retrouvé au sein d'un conteneur.

### 4. Prises d'échantillons

Afin de mesurer le taux d'humidité et d'identifier les essences de bois retrouvées, cinq échantillons de la catégorie 5 étaient prélevés quotidiennement à l'aide d'une scie et placés dans des sacs hermétiques différents. La taille des échantillons était variable, elle dépendait de la taille globale de l'objet et de la facilité d'extraction d'un morceau correct pour être placé à l'étuve. Le choix des cinq échantillons était aléatoire, tout en veillant à ne pas choisir deux fois la même source de bois.

## 3.2 Mesures du taux d'humidité

### 3.2.1 Matériel

Concernant l'évaluation du pourcentage d'humidité pour chaque échantillon, une étuve (SNOL 220/300) ainsi qu'une balance précise au millième près ont été utilisées afin de prendre les mesures.

### 3.2.2 Méthode

Les échantillons relevés sur le site du BEP Environnement, de tailles variables, sont pesés avant d'être placés à l'étuve à 100°C.

Afin de déterminer le temps adéquat pour que la masse sèche soit stable, l'échantillon le plus massif parmi les cinq premiers a été pesé après 24 heures, 48 heures et 72 heures. Aucune différence significative (<1%) a été observée entre 48 et 72 heures. Les échantillons ont donc été placés pendant 48 heures dans l'étuve. Après être restés 48 heures à 100°C dans l'étuve, les échantillons sont pesés.

Une fois les échantillons séchés, le taux d'humidité a été calculé selon la formule suivante (Niemz et al., 2023) :

$$\% \text{ humidité} = 100 * (m_h - m_0) / m_0$$

Où :

- $M_h$  : masse humide
- $M_0$  : masse anhydre

## 3.3 Indentification des essences de bois

### 3.3.1 Matériel

Tout d'abord, un ponçage a été réalisé à l'aide d'une ponceuse orbitale excentrique (marque Festool) avec différents grains de papier abrasifs (120, 180, 240, 320 et 400). Ensuite, les échantillons ont été scannés pour observer au mieux les différentes caractéristiques.



Certaines essences ne pouvant pas être identifiées simplement à l'aide de scans, des coupes microscopiques ont été réalisées. Pour se faire, un cube de 2 cm de côté a été prélevé sur chaque échantillon à l'aide d'une scie circulaire. Ensuite, une plaque chauffante (Schott - CERAN 30x30) et des berlins remplis d'eau distillée ont été employés. Un microtome (MICROM HM440E) a été utilisé afin de réaliser les coupes sur les échantillons de bois. Des photographies de ces coupes ont été faites à l'aide d'un microscope (Zeiss Axiolab A) muni d'un appareil photo (Nikon D300S). Le traitement de ces photos a été fait par les logiciels Nikon Capture NX2 et Nikon Camera Control Pro 2 sur un ordinateur portable.

### 3.3.2 Méthode

Pour permettre l'identification des échantillons, la surface transversale a été poncée à plusieurs reprises en veillant à changer les grains progressivement pour avoir un résultat net. Le ponçage a commencé avec l'utilisation d'un grain de 120 et a progressivement augmenté en passant par 180, 240, 320 et finissant avec un grain de 400.

Un scan de chaque face transversale des 25 échantillons a été réalisé pour pouvoir les observer de plus près sur un ordinateur. Cela a permis d'identifier aisément les essences feuillues présentes parmi les échantillons. Une loupe a également été utilisée afin d'observer les différentes caractéristiques (De Mil, 2022).

Concernant les essences tropicales et résineuses, une observation microscopique a été nécessaire afin d'assurer la bonne identification. Plusieurs étapes ont été réalisées afin d'obtenir les coupes microscopiques. La première étape consiste à immerger chaque cube dans de l'eau distillée. Les berlins ont été chauffés jusqu'au moment où l'échantillon touchait le fond. Cette étape permet une coupe du bois plus aisée. Les coupes ont été réalisées selon les trois axes du bois : transversal, radial et tangentiel. L'épaisseur d'une coupe varie entre 18 et 22 micromètres ( $\mu\text{m}$ ) en fonction de l'aisance de la coupe.

Les coupes sont placées sur des lames en verre qui permettent une observation sur le microscope. Des photos sont prises afin de pouvoir observer sur un ordinateur les différentes caractéristiques microscopiques permettant de distinguer les essences (Jourez, 2022).

## 3.4 Analyses spectrales et tri-dimensionnelles d'échantillons de bois massif et transformé

En vue d'automatiser le tri du bois afin d'orienter au mieux sa valorisation, des essais ont été réalisés dans le laboratoire GeMME à l'Université de Liège.

### 3.4.1 Matériel

Un panel d'échantillons a été choisi au vu de représenter au mieux les différents types de bois retrouvés au sein des conteneurs provenant de centres de tri. Ces échantillons ont été sélectionnés parmi ceux disponibles au sein de la faculté de Gembloux Agro-Bio Tech. Différentes essences ont été sélectionnées en vue de la production de panneaux CLT. Trois échantillons ont été sélectionnés pour représenter chacune des dix catégories suivantes :

- Chêne (*Quercus robur*)
- Hêtre (*Fagus sylvatica*)
- Douglas (*Pseudotsuga menziesii*)
- Épicéa traité (*Picea abies*)
- Afzélia (*Afzelia pachyloba*)
- Azobé (*Lophira alata*)



- Wengé (*Millettia laurentii*)
- OSB
- MDF
- Panneaux de particules

Une bande transporteuse surplombée d'une caméra 3D (SICK ranger3) avec une résolution de 2208 pixels et d'une caméra SWIR (Neo Hyspex swir 384) avec une résolution de 384 pixels ont permis de passer en revue les échantillons. La caméra SWIR possède 288 canaux permettant de capturer des images dans 288 longueurs d'ondes différentes qui se situent dans une gamme spectrale de 930 à 2500 nanomètres (nm). Sa résolution spectrale est de 5,45 nm qui correspond à l'intervalle entre les longueurs d'ondes mesurées par cet outil. Des miroirs elliptiques sont disposés afin de focaliser la lumière émise par les lampes halogènes en une seule ligne sur la bande transporteuse. Cette ligne correspond à la « line scan », autrement dit, la ligne de scan afin de construire une image de l'échantillon ligne après ligne.

Le logiciel Python (version 3.11) a été employé via l'interface Sypder (version 5.4.3) disponible sur Anaconda Navigator (version 2.4.2). Le logiciel Fiji ImageJ (version 1.54f) est également utilisé (Schneider et al., 2012).

Un environnement de travail a été créé pour répondre aux besoins spécifiques du traitement des fichiers via Python. Différents packages ont dû être installés : Spectral, Os, XML Element Tree, Matplotlib, Numpy, Pillow, Plotly, Scikit-learn, Seaborn et Collections. Cela permet de traiter les données rassemblées dans des fichiers dans le format « Tagged Image File Format » (tiff), produits par la caméra 3D quant à la caméra SWIR, qui elle fournit des fichiers RAW et « High Dynamic Range » (hdr). Ces trois types de fichiers sont produits pour chaque groupe.

### 3.4.2 Méthode

#### *Passage des échantillons sous les deux caméras*

Chaque échantillon a reçu une abréviation spécifique à sa catégorie afin d'être tracé : "CH 1-2-3" pour les échantillons de Chêne, "D 1-2-3" pour les échantillons de Douglas, etc. (

Annexe 2).

Cinq groupes ont été constitués avec différents échantillons afin d'être soumis à l'acquisition par les deux caméras. Les échantillons ont été placés sur la bande transporteuse tout en respectant les dimensions du laser de la caméra 3D (Figure 11) et du faisceau de la caméra SWIR (Figure 12).

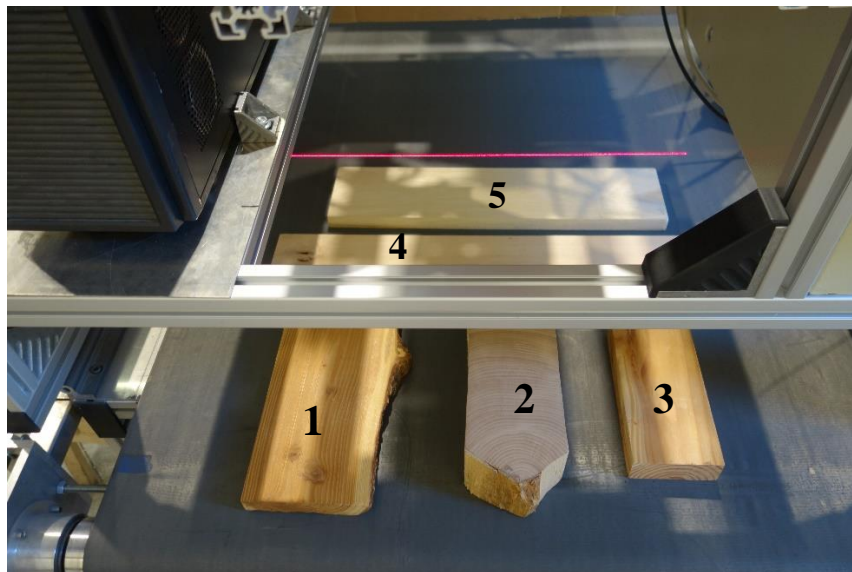


Figure 11 : Disposition du premier groupe sur la bande transporteuse. Cinq échantillons sont disposés : (1) Douglas 1, (2) Hêtre 2, (3) Douglas 3, (4) Hêtre 3, (5) Chêne 1. Le laser rouge fait partie de la caméra tri-dimensionnelle (3D).

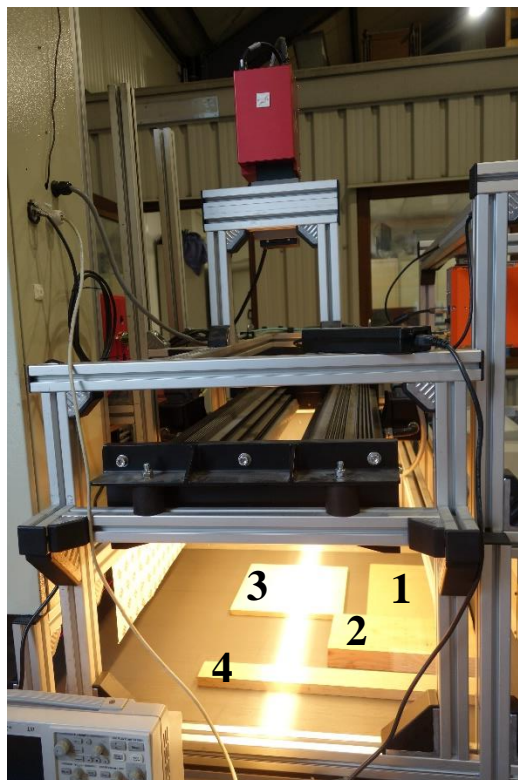


Figure 12 : Passage du cinquième groupe sur la bande transporteuse. Quatre échantillons sont disposés : (1) MDF 1, (2) Douglas 2, (3) Panneau particules 1 et (4) Chêne 2. La lumière halogène concentrée (faisceau blanc) qui forme la ligne de scan de la caméra SWIR.

Après avoir été soumis à la numérisation par les deux caméras, un schéma détaillé de la disposition est élaboré manuellement, tandis qu'une photographie est prise pour préserver la position

de chaque échantillon sur la bande transporteuse (Figure 13). Ceci garantit une traçabilité optimale avec les données informatiques.



Figure 13 : Prise de note de la disposition du deuxième groupe d'échantillons composés : (1) Hêtre 1, (2) Chêne 4, (3) Chêne 3, (4) Épicéa traité 3, (5) Épicéa traité 1, (6) Épicéa traité 2 et (7) OSB 3.

#### *Graphiques spectraux pour chaque catégorie d'échantillons*

La caméra SWIR a permis de collecter les données spectrales de chaque échantillon scanné par celle-ci. Elle permet de mesurer la réflectance des échantillons d'une intensité de 0 à 65 535. Lorsque l'intensité est nulle, cela signifie que l'objet ne reflète aucune lumière à la longueur d'onde émise tandis qu'une intensité maximale signifie que l'objet reflète l'entièreté de la lumière à la longueur d'onde émise. Pour se faire, une calibration avec un blanc de référence, reflétant 100% des rayons lumineux a été faite au préalable. En divisant l'intensité par 655,35, le pourcentage de réflectance est obtenu.

L'échantillon est éclairé, ligne par ligne, par la lumière. Chaque pixel de cet échantillon va la refléter à une certaine intensité. La caméra, par ses 288 canaux de longueurs d'ondes différentes, permet d'enregistrer pour chaque pixel, l'intensité de réflectance à chaque longueur d'onde qu'elle peut mesurer. Cela permet par la suite d'obtenir un spectre par pixel de l'intensité de réflectance en fonction de la gamme spectrale.

Pour se faire, il faut traiter toutes ces données enregistrées dans des fichiers raw et hdr qui comportent les informations pour chaque pixel.

Un premier code a permis de mettre en place des graphiques de réflexion concernant chaque échantillon scanné (

Annexe 3).

La première étape est de changer la taille de l'image .TIFF donnée par la caméra 3D pour qu'elle corresponde avec les données obtenues par la caméra SWIR étant donné leur résolution différente (

Annexe 4). Grâce à cette nouvelle image .TIFF, les zones d'intérêts peuvent être déterminées en utilisant le logiciel Fiji ImageJ.

Pour se faire, il faut localiser un coin supérieur gauche sur l'échantillon et un coin inférieur droit. Sachant que les pixels se lisent de haut en bas et de gauche à droite, cela permet de balayer la surface délimitée par ces deux coins. Il faut prêter attention à bien positionner ces deux repères afin que le rectangle qui sera ainsi tracé respecte les limites de l'échantillon (Figure 14). En positionnant le curseur de l'ordinateur sur le coin supérieur gauche et ensuite, sur le coin inférieur droit, les valeurs de x et de y sont données.

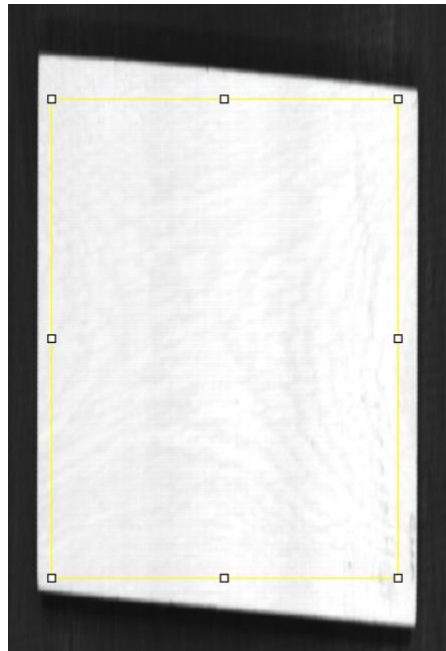


Figure 14 : Détermination d'une zone d'intérêt sur l'image .TIFF obtenue par la caméra 3D d'un échantillon de bois scanné (Chêne 1) à l'aide du logiciel Fiji ImageJ.

Une fois la zone d'intérêt sélectionnée, le code permettra de tracer une courbe sur un graphique montrant l'intensité d'absorbance en fonction des longueurs d'ondes. Les longueurs d'ondes se situent dans la plage de 930 à 2500 nm, tandis que l'intensité de réflectance varie de 0 à 65 535.

Pour calculer cette courbe, le code est composé de plusieurs parties. Une fonction « wavelengths » (longueurs d'ondes) va permettre de récupérer les valeurs de longueurs d'onde centrales associées à chaque bande spectrale dans le fichier hdr correspondant, qui contient une image hyperspectrale. Au sein de cette image, chaque pixel est associé à un spectre qui représente l'intensité de la lumière pour différentes longueurs d'ondes. Ces spectres peuvent être divisés en bandes spectrales, où une plage de longueurs d'ondes est rassemblée.

Ces valeurs de longueurs d'ondes centrales vont être utilisées via le package Matplotlib afin d'afficher un spectre moyen de chaque zone d'intérêt déterminée à l'aide de Fiji ImageJ. Cette région d'intérêt est spécifiée par la fonction « `img_swir1[y1:y2, x1:x2, :].mean(axis=(0, 1))` » où  $(y_1, x_1)$  correspondent au couple de pixels du coin supérieur gauche et  $(y_2, x_2)$ , au coin inférieur droit.

La sous-région sélectionnée par les coordonnées x et y en pixels des deux repères placés sur l'échantillon donnent une matrice résultante bidimensionnelle qui contient les valeurs de pixels de différentes longueurs d'ondes appartenant à la région spatiale mentionnée plus haut. Cette matrice est composée des trois axes. Les deux premiers correspondent aux lignes qui représentent une position spatiale et aux colonnes qui représentent des longueurs d'ondes. Le troisième axe caractérisé par « : » reprend toutes les valeurs de chaque spectre pour chaque position et longueur d'onde.

Une moyenne est calculée sur les deux premiers axes ce qui revient à établir la moyenne le long des positions spatiales et le long des longueurs d'ondes. Au final, un seul vecteur de valeurs moyennes de spectre spécifique à cette région spatiale est obtenu ce qui est représenté sous forme d'une courbe dans un graphique d'intensité d'absorbance en fonction des longueurs d'onde en nm.

Le premier graphique produit concerne l'intensité de réflectance en fonction des longueurs d'ondes. Afin d'avoir un pourcentage de réflectance, il a fallu diviser l'intensité par 655,35. Cela permet de mieux se représenter la réflectance de chaque échantillon.

#### *Correction : Standard Normal Variate (SNV)*

Étant donné la présence de décalages sur l'axe horizontal des graphiques, une correction est appliquée et de nouveaux graphiques sont produits. Cette correction est réalisée par la technique de prétraitement nommée Standard Normal Variate (SNV) qui consiste à corriger les effets additifs et multiplicatifs des spectres (Bi et al., 2016). Cela permet de contrer l'influence de facteurs externes comme les propriétés physiques ou l'épaisseur des échantillons (Bi et al., 2016). Les effets additifs concernant les variations présentent sur l'axe vertical (Dhanoa et al., 1994). Ces variations peuvent influencer les données spectrales et impacter la comparaison correcte entre les échantillons. Cette normalisation a pour effet de centrer la moyenne de chaque spectre autour de zéro, en la soustrayant de la valeur originale et ensuite, le diviser par l'écart-type en vue de mettre à l'échelle les valeurs. ((Dhanoa et al., 1994).

Une moyenne des trois courbes par catégorie est réalisée en vue d'obtenir un graphique rassemblant les dix catégories pour émettre une comparaison.

#### *Création de tuiles*

Puisqu'il n'y a que trois échantillons par catégorie de bois, il a fallu augmenter les données. Pour se faire, des tuiles de 10 x 10 pixels ont été créées. Sur base d'un deuxième code (Annexe 5), la fonction « snv\_mean\_tiles (image) » a permis cela. Elle consiste à séparer l'image en tuiles de 10x10 pixels avec un pas de 10x10 pixels entre les tuiles voisines pour éviter un possible chevauchement. Ensuite, la méthode SNV a été appliquée afin de normaliser le spectre de chaque tuile produite.

#### *Ensemble d'entraînement et de test*

Un ensemble de formation et un de test ont été formés en vue de l'apprentissage automatique. Sur base des tuiles produites, la moyenne spectrale normalisée est calculée pour chacune. Celui dit d'entraînement a pour but d'entraîner le modèle prédictif. Il contient un ensemble de données sur lesquelles le modèle peut s'entraîner pour apprendre les relations entre les variables. Il va également pouvoir minimiser ses erreurs en s'entraînant.

L'ensemble de test permet au modèle d'évaluer ses performances sur des données jamais vues auparavant.

Les échantillons 1 et 2 de chaque catégorie sont ainsi utilisés pour former les tuiles de l'ensemble de formation tandis que les tuiles des échantillons 3 de chaque catégorie ont constitué les données pour l'ensemble de test.

#### *Classification Support Vector Machine (SVM) : Algorithme d'apprentissage SVC (Support Vector Classification)*

SVM est un algorithme d'apprentissage supervisé qui cherche à trouver un hyperplan optimal pour séparer les exemples de différentes classes dans un espace multidimensionnel. SVC est une

implémentation spécifique de l'algorithme SVM qui convient à la tâche de classification, où les étiquettes de classe sont présentes et l'objectif est de trouver un hyperplan qui sépare les exemples de différentes classes tout en maximisant la marge (la distance entre l'hyperplan de séparation et les exemples les plus proches de chaque classe, appelés vecteurs de support). Plus la marge est grande, plus le modèle est robuste.

Cet algorithme a été utilisé avec un noyau à fonction de base radiale (Radial Basis Function, RBF) ce qui permet d'effectuer une transformation non linéaire des données dans un espace de dimension supérieure. Ce type de noyau est choisi car il existe plusieurs classes dans le modèle. L'objectif est d'entraîner un modèle SVC en utilisant les données d'entraînement pour prédire les probabilités des classes sur l'ensemble de test, et ensuite évaluer les performances du modèle en comparant les probabilités prédites avec les étiquettes réelles de l'ensemble de test.

#### *Optimisation des hyperparamètres à l'aide de Grid Search*

Grid search est une technique d'optimisation hyperparamétrique utilisée en apprentissage automatique pour déterminer les meilleures combinaisons d'hyperparamètres pour un modèle. Deux hyperparamètres sont testés avec des valeurs différentes : C et gamma.

« C » est un hyperparamètre de régularisation qui contrôle la précision du modèle SVM. Une valeur élevée de C favorise une classification plus précise sur les données d'entraînement et aide à éviter le sur-apprentissage. Les valeurs testées sont : 100, 10, 1, 0,1.

Gamma contrôle l'influence des exemples d'entraînement : une valeur élevée signifie que seuls les exemples proches de l'hyperplan sont pris en compte, tandis qu'une valeur faible signifie que des exemples plus éloignés sont également considérés. Les valeurs testées sont 1, 0,1, 0,01, 0,001.

Ces valeurs vont être testées plusieurs fois afin de connaître les hyperparamètres optimaux à appliquer au SVC de classification. Le meilleur estimateur est lorsque C vaut 100 et gamma vaut 0,001.

#### *Évaluation de la performance du modèle : matrice de confusion, précision, rappel, exactitude et erreur*

Dans le but d'analyser l'efficacité du modèle de classification, un calcul d'une matrice de confusion et des mesures de précision et de rappel est réalisé. La fonction « plotconfmat(cm) » est utilisée pour générer la matrice de confusion, tandis que la fonction « perform » est employée pour déterminer les performances du modèle à travers les valeurs de précision et de rappel.

L'ensemble de formation correspondent à la base de données d'entrée du modèle SVC. Une fois entraîné, le modèle va utiliser l'ensemble test pour évaluer sa classification. La matrice de confusion reflète ainsi le comportement du modèle face au jeu de données test. Elle permet de montrer le nombre d'échantillons (ici, les tuiles) qui ont été correctement attribués à leur classe de bois mais aussi, les erreurs produites.

La matrice de confusion donne quatre types de résultats :

- **Vrai Positif (VP)** : Résultat lorsque le modèle prédit correctement qu'un exemple appartient à une classe donnée et que cette prédiction est en accord avec l'étiquette de la classe associée à l'exemple.  
Exemple : Le modèle prédit que la tuile appartient à la classe OSB et que c'est bien de l'OSB.
- **Faux Positif (FP)** : Résultat lorsque le modèle prédit à tort qu'un exemple appartient à une classe donnée et que cette prédiction ne correspond pas à l'étiquette de la classe associée à l'exemple.

Exemple : Le modèle prédit que la tuile appartient à la classe OSB alors que c'est du Chêne.

- **Vrai Négatif (VN)** : Résultat lorsque le modèle prédit correctement qu'un exemple n'appartient pas à une classe donnée et que cette prédiction est en accord avec l'étiquette de la classe associée à l'exemple.

Exemple : Le modèle prédit que la tuile n'appartient pas à la classe OSB et que c'est bien du chêne (une autre classe que l'OSB).

- **Faux Négatif (FN)** : Résultat lorsque le modèle prédit à tort qu'un exemple n'appartient pas à une classe donnée et que cette prédiction ne correspond pas à l'étiquette de la classe associée à l'exemple. En d'autres mots, que l'exemple appartient bien à la classe rejetée par le modèle.

Exemple : Le modèle prédit que la tuile n'appartient pas à la classe OSB alors que c'est un échantillon d'OSB.

La précision est le rapport entre les VP et la somme des VP et FP. Elle permet d'obtenir la proportion d'exemples positifs prédits correctement parmi tous les exemples prédits comme positif.

Tandis que le rappel est le rapport entre les VP et la somme des VP et FN. Il permet d'avoir la proportion des exemples réellement positifs (VP) que le modèle a identifiés correctement parmi tous les exemples réellement positifs présents.

L'exactitude globale est le rapport entre la somme des VP et VN sur le nombre total d'exemples. Tandis que l'exactitude par classe correspond au rapport des VP sur le nombre total d'exemples de cette classe.



#### 4. Résultats et analyses des résultats

Les conteneurs ont été sélectionnés afin d'avoir cinq communes sources différentes. Les différentes provenances sont représentées sur la carte suivante (Figure 15). La provenance d'un conteneur n'est pas une commune mais un quartier communal, Naninne se situant dans la commune de Namur.

##### Communes sources des conteneurs triés

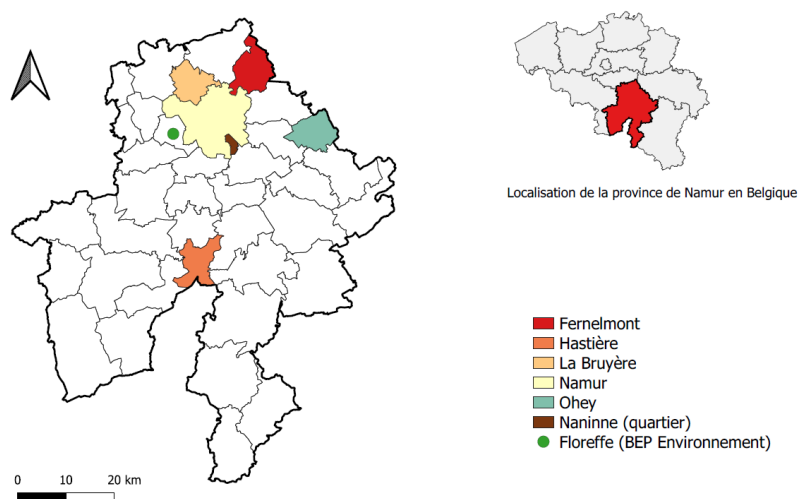


Figure 15 : Localisation des cinq zones sources ainsi que du BEP Environnement (point vert).

Il faut savoir que chaque commune possède un seul et unique recyparc mis à disposition des habitants. À l'exception de la commune de Namur qui rassemble trois parcs à conteneurs répartis dans trois quartiers communaux différents : Champion, Naninne et Malonne. Par la suite, il sera intéressant d'observer le nombre d'habitants par commune afin de voir s'il y a un lien entre le nombre d'habitants et le poids net de bois récolté et trié (Figure 16). Le quartier communal de Nannine, où réside 1582 habitants, est également visité par les habitants de la commune de Namur, qui elle représente 113 187 habitants<sup>12</sup>.

Répartition démographique 2022 des quatre communes et du quartier communal de la province de Namur

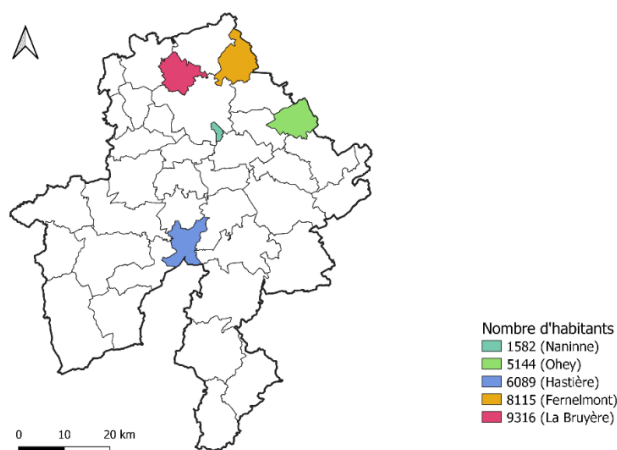


Figure 16 : Nombre d'habitants en 2022 de chaque commune et du quartier communal de la province de Namur d'où proviennent les cinq conteneurs triés.

<sup>12</sup> Nombre d'habitants de la commune de Namur disponible sur : <https://data.namur.be/pages/statistiques-communedenamur-leschiffres/>

## 4.1 Tri des conteneurs

### 4.1.1 Quantification du bois massif

Il y a une grande variation dans les types de bois massif retrouvés dans les conteneurs. Voici une liste non exhaustive des différents types retrouvés pendant le triage :

- Meubles démantelés
- Déchets de découpe
- Charpente
- Lambris
- Planches diverses
- Piquets de clôture
- Plinthes
- Manches
- Palettes

Au total, ce sont 15 910 kg de bois qui ont été triés en cinq jours. Le tableau suivant (Tableau 1) rassemble les différentes quantités (kg) retrouvées dans chaque catégorie ainsi que leurs proportions (%).

Tableau 1 : Poids (kg) et proportions (%) par catégorie de triage du bois provenant des cinq conteneurs triés manuellement.

Provenance	Fernelmont		Hastière		Naninne		Ohey		La Bruyère	
	Poids (kg)	Proportion (%)	Poids (kg)	Proportion (%)	Poids (kg)	Proportion	Poids (kg)	Proportion	Poids (kg)	Proportion
Total du conteneur	3740	100	2950	100	3640	100	3560	100	2020	100
Catégorie 1	780	20,86	80	2,71	100	2,75	120	3,37	80	3,96
Catégorie 2	140	3,74	180	6,10	320	8,79	260	7,30	560	27,72
Catégorie 3	80	2,14	140	4,75	120	3,30	160	4,49	140	6,93
Catégorie 4	580	15,51	460	15,59	500	13,74	540	15,17	400	19,80
Catégorie 5	140	3,74	120	4,07	100	2,75	260	7,30	20	0,99
Catégorie 6	2020	54,01	1970	66,78	2500	68,68	2220	62,36	820	40,59
Total bois massif	1720	45,99	980	33,22	1140	31,32	1340	37,64	1200	59,41

Au sein de la catégorie 6, rassemblant tous les éléments en bois transformés, différents types s'y retrouvent :

- Panneaux d'OSB
- Panneaux de MDF
- Panneaux de particules
- Panneaux ou objets composés de contreplaqué
- Objets en osier
- Objets composés de lamellés-collés

Les analyses suivantes ont été réalisées avec le logiciel R Studio (version 2021.09.0, RStudio Team). Avant de traiter les données, les proportions en pourcentage (%) ont été calculées afin de comparer les différentes catégories entre elles. Ce calcul permet donc d'établir des comparaisons pertinentes entre les cinq conteneurs qui n'avaient pas le même poids de bois total au départ (Tableau 2).

Les analyses statistiques des proportions (%) ont été réalisées (Tableau 2) et une représentation de la moyenne de chaque catégorie ont été représentées (Figure 17).

Tableau 2 : Analyses statistiques des proportions (%) de bois retrouvées dans chaque catégorie (1 à 6).

Catégorie	Moyenne	Écart-type	Médiane
1	6,73	7,92	3,37
2	10,73	9,68	7,30
3	4,32	1,79	4,49
4	15,96	2,27	15,51
5	3,77	2,31	3,74
6	58,48	11,49	62,36

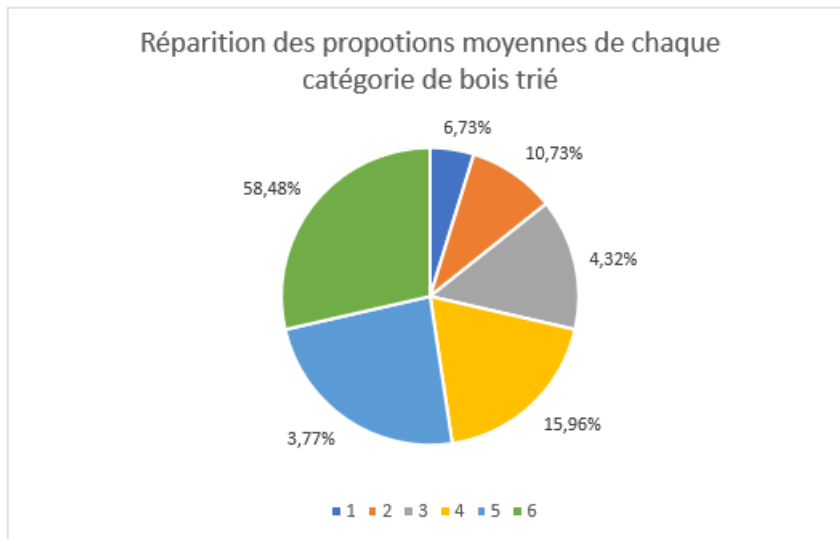


Figure 17 : Répartition des moyennes des proportions de chaque catégorie de bois trié sur les cinq conteneurs confondus.

Il ressort de ces résultats que la catégorie 6 présente les plus hautes valeurs pour chaque analyse. Au sein du bois massif, la catégorie 4 présente la moyenne la plus élevée. Celle-ci rassemble les bois mesurant plus de 50 x 8 x 2 cm et possédant des corps étrangers. La moyenne la plus basse est représentée par la catégorie 5 qui est la plus intéressante pour un usage direct du bois étant donné ses bonnes dimensions et son absence de corps étrangers.

Les écarts-types permettent de mettre en évidence la dispersion autour de la moyenne. Cependant, les valeurs extrêmes influencent fortement cette valeur tandis que dans le calcul de la médiane définit la valeur qui se trouve au milieu de l'ensemble des données.

Concernant les catégories 1 et 2, la médiane se situe en-dessous de la moyenne ce qui signifie que la moitié des pesées de ces deux catégories sont nettement plus basses que la moyenne calculée. Cela est dû aux pesées « extrêmes » présentes pour certains conteneurs. En effet, la catégorie 1 du conteneur 1 représente 20,86% de la masse totale du bois tandis que pour les quatre autres conteneurs, cela oscille entre 2,71% et 3,96%. Il y a cette même situation concernant la catégorie 2 où la valeur extrême correspond à 27,72% pour la commune de La Bruyère tandis que les quatre autres conteneurs, cela varie entre 3,74% et 8,79%.

Ces différences soulignent la variabilité retrouvée au sein des conteneurs de bois. Les proportions au sein d'un conteneur peuvent être influencées par la provenance de celui-ci, le nombre d'habitants de la région source, la consommation en bois des habitants, etc.

La catégorie 6 possède également une médiane légèrement différente de la moyenne mais a contrario de la situation précédente, la médiane est supérieure. Les trois dernières catégories (3, 4 et

5) quant à elles présentent des médianes similaires aux moyennes ce qui relève une constante dans les pesées entre les cinq conteneurs.

Afin de mieux visualiser les données de pesées pour chaque catégorie, les boxplots ont été réalisés (Figure 18).

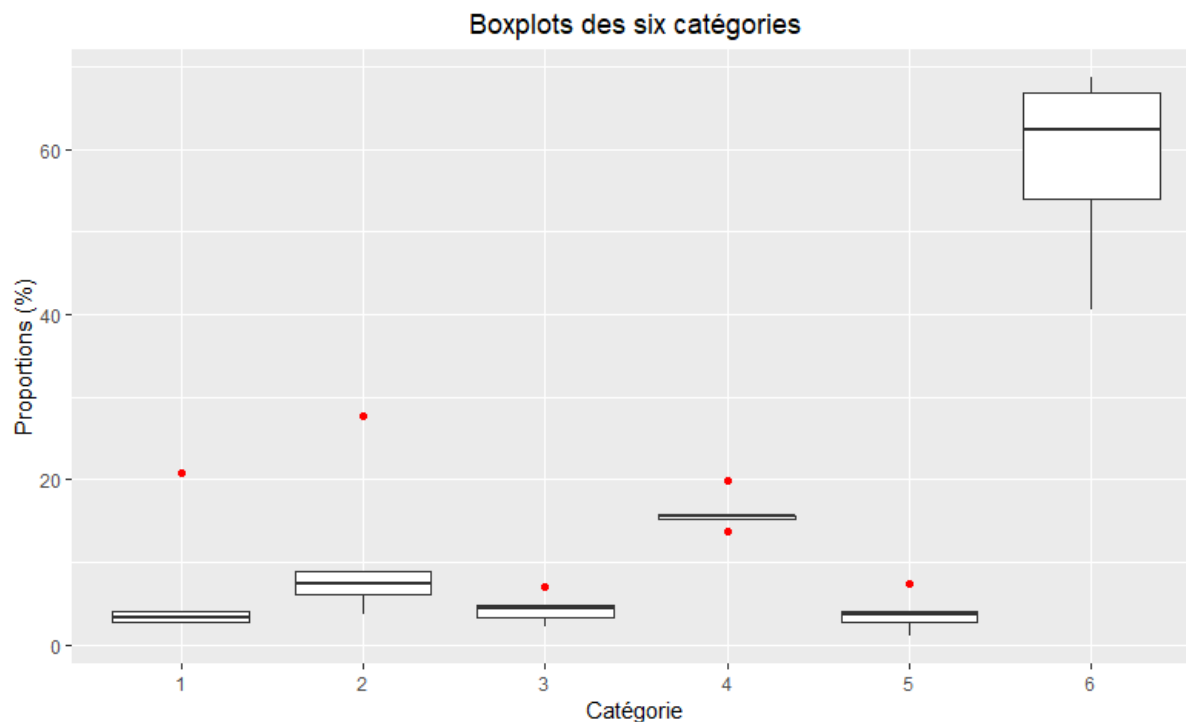


Figure 18 : Boxplots représentant pour chaque catégorie : la médiane (ligne noire épaisse), la dispersion des données (ligne verticale) et les valeurs extrêmes (point rouge).

Par ces boxplots, la catégorie 6 présente une dispersion élevée des données ce qui insinue une difficulté de prédire le poids retrouvé dans cette catégorie sur le long terme. Globalement, les dispersions restent minimales dans les cinq autres catégories, avec les catégories 1 et 4 présentant une dispersion très réduite. Cela montre une certaine homogénéité entre les conteneurs, malgré une provenance différente.

Les points rouges symbolisent les valeurs extrêmes qui, dans ce cas-ci, correspondent à une pesée s'éloignant fortement de la tendance observée entre les conteneurs. Cela souligne une instabilité potentielle dans le contenu en bois qui peut se retrouver d'un conteneur à l'autre.

Étant donné qu'il n'y a que cinq pesées par catégorie, lorsqu'une ou plusieurs pesées est identifiées comme extrêmes, cela réduit considérablement les données prises en compte pour calculer les boxplots.

#### 4.1.2 Humidité

Les taux d'humidité (%) ont été calculés sur 25 échantillons de bois massif faisant partis de la catégorie 5 (Tableau 3). Cinq échantillons ont été pris par conteneur en veillant à choisir des morceaux de bois différents pour chaque échantillon.

- Conteneur 1 : Échantillons 1 à 5.
- Conteneur 2 : Échantillons 6 à 10.
- Conteneur 3 : Échantillons 11 à 15.
- Conteneur 4 : Échantillons 16 à 20.
- Conteneur 5 : Échantillons 21 à 25.

Les conditions météorologiques lors du tri des conteneurs étaient sèches exceptés le quatrième jour où il y a eu des averses entre 8h et 10h. Cependant, il est difficile de savoir quelles étaient les conditions météorologiques de stockage du bois au sein du parc à conteneurs ou même chez l'habitant.

Ces échantillons ont eu des usages différents comme des plinthes d'intérieur, des objets d'extérieurs, des meubles ou autres. L'humidité est déjà influencée par l'usage précédent le dépôt de l'objet dans le conteneur. La position de l'objet dans le conteneur influence également ce taux d'humidité, à savoir, s'il est exposé ou non à l'air libre. Une humidité initiale plus élevée sera remarquée pour les bois ayant eu une utilisation à l'extérieur.

Tableau 3 : Pesées (g) avant et après le passage à l'étuve et taux d'humidité (%) des 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5.

Numéro de l'échantillon	Masse (g) avant étuve	Masse (g) après étuve	Taux d'humidité (%)
1	72,03	61,58	16,97
2	41,62	35,04	18,80
3	96,42	82,82	16,43
4	37,64	25,35	48,45
5	20,89	18,33	13,93
6	69,42	58,29	19,09
7	15,25	13,26	15,01
8	66,97	58,08	15,31
9	61,20	44,87	36,39
10	44,62	29,30	52,29
11	41,15	35,03	17,49
12	21,08	18,39	14,59
13	33,58	29,99	<b>11,96</b>
14	105,39	96,12	<b>9,65</b>
15	36,24	30,74	17,87
16	168,58	144,46	16,70
17	24,41	20,60	18,50
18	91,05	67,79	34,31
19	62,85	51,59	21,84
20	35,20	30,13	16,81
21	29,10	24,23	20,11
22	43,89	37,18	18,06
23	58,64	49,52	18,43
24	75,32	37,86	98,98
25	44,42	38,13	16,47

Les analyses statistiques concernant les pourcentages d'humidité par conteneur ont été réalisées (Tableau 4).

Tableau 4 : Analyses statistiques du pourcentage d'humidité (%) par conteneur.

Conteneur	Moyenne	Écart-type	Médiane
1	22,92	14,38	16,97
2	27,62	16,35	19,09
3	14,31	3,54	14,59
4	21,63	7,39	18,50
5	34,41	36,12	18,43

Le test statistique Kruskal-Wallis a été réalisé en vue d'analyser si une différence significative est observée entre les médianes de pourcentages humidité de chaque conteneur. Une p-valeur de 0,2113 est obtenue. Elle est supérieure à 0,05 donc l'hypothèse nulle de l'égalité des médianes entre chaque conteneur n'est pas vérifiée. Il n'est pas possible de conclure de manière significative qu'il y a des différences significatives entre les conteneurs basées sur les pourcentages d'humidité.

Globalement, les moyennes entre chaque conteneur sont réunies autour du même intervalle de valeurs. Cependant, le conteneur 3 relève une moyenne inférieure tandis que le conteneur 5 a une moyenne supérieure.

Les médianes montrent bien que les différents taux d'humidité se rassemblent autour des mêmes données. Tandis que pour les écarts-types, les cinq valeurs sont toutes assez différentes exceptés pour les conteneurs 1 et 2.

Afin de mieux visualiser les pourcentages d'humidité pour chaque conteneur, les boxplots ont été réalisés (Figure 19).

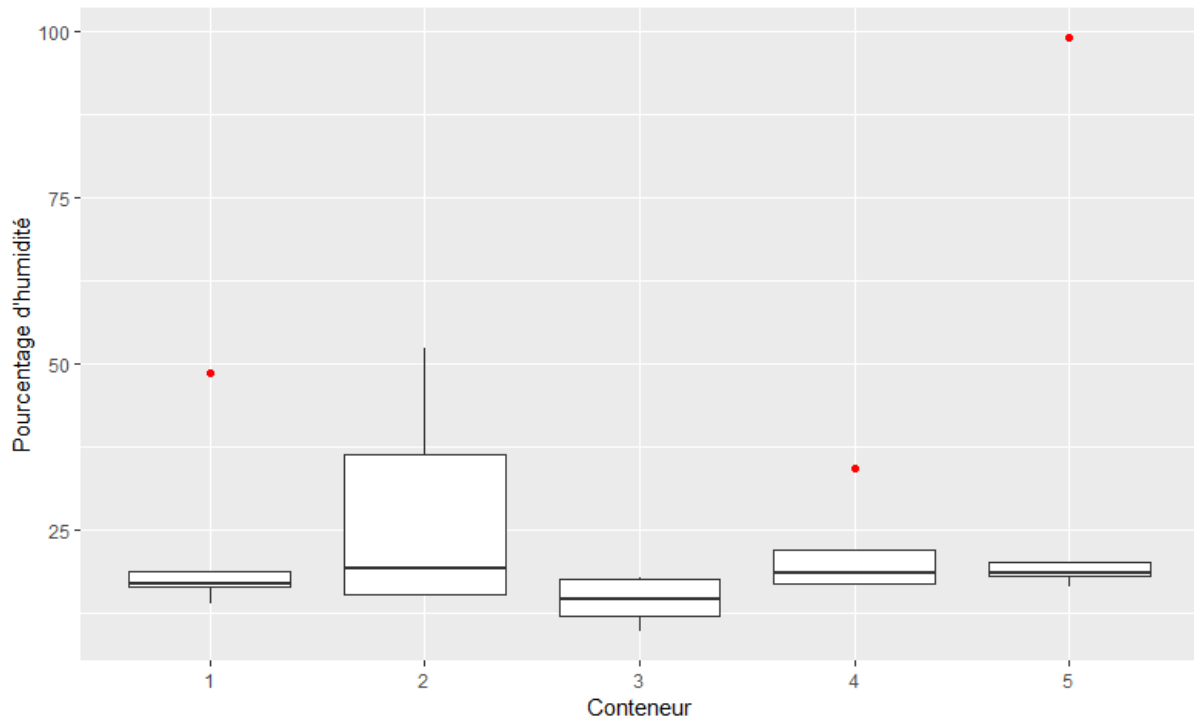


Figure 19 : Boxplots du pourcentage d'humidité pour cinq échantillons pris par conteneur dans la catégorie 5 : la médiane (ligne noire épaisse), la dispersion des données (ligne verticale) et les valeurs extrêmes (point rouge).

Trois données extrêmes ressortent parmi les cinq conteneurs. Le conteneur 2 présente une dispersion des données plus importante que les quatre autres. Cela montre donc une certaine constance et robustesse dans les pourcentages d'humidité retrouvés parmi les 25 échantillons prélevés.

#### 4.1.3 Identification des essences

Les différentes essences (Tableau 5) des échantillons ont été identifiées après avoir procédé à un ponçage des surfaces des 25 échantillons de bois ainsi que des observations sur scans (

Annexe 6) et coupes microscopiques (

Annexe 7).

Tableau 5 : Type de bois et essences identifiés pour les 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5 parmi les cinq conteneurs. Le signe « ? » signifie que l'essence n'a pas pu être déterminée.

Numéro de l'échantillon	Types de bois	Essence
1	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )
2	Tropical	Merbau ( <i>Intsia bijuga</i> )
3	Feuille	Chêne ( <i>Quercus sp.</i> )
4	Feuille	Peuplier ( <i>Populus sp.</i> )
5	Feuille	Chêne ( <i>Quercus sp.</i> )
6	Feuille	Chêne ( <i>Quercus sp.</i> )
7	Feuille	Hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> )
8	Résineux	Thuja géant ( <i>Thuja plicata</i> )
9	Résineux	Pin sylvestre ( <i>Pinus sylvestris</i> )
10	Résineux	Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )
11	Résineux	?
12	Résineux	?
13	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )
14	Feuille	Orme ( <i>Ulmus campestris</i> )
15	Résineux	Sapin blanc ( <i>Abies alba</i> )
16	Tropical	?
17	Résineux	Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )
18	Résineux	Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )
19	Résineux	Douglas ( <i>Pseudotsuga menziesii</i> )
20	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )
21	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )
22	Feuille	Hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> )
23	Feuille	Hêtre ( <i>Fagus sylvatica</i> )
24	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )
25	Résineux	Épicéa ( <i>Picea abies</i> )

La majorité des bois retrouvés au sein des 25 échantillons est du résineux (Figure 20). Le Douglas (*Pseudotsuga menziesii*) représente 16% de la totalité des échantillons (Figure 21).

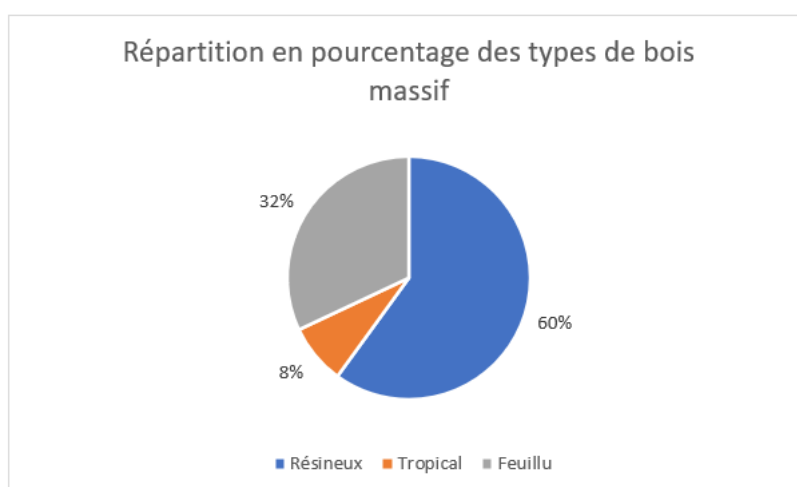


Figure 20 : Répartition en pourcentage des types de bois massif (résineux, feuillu et tropical) retrouvés parmi les 25 échantillons prélevés dans les conteneurs.



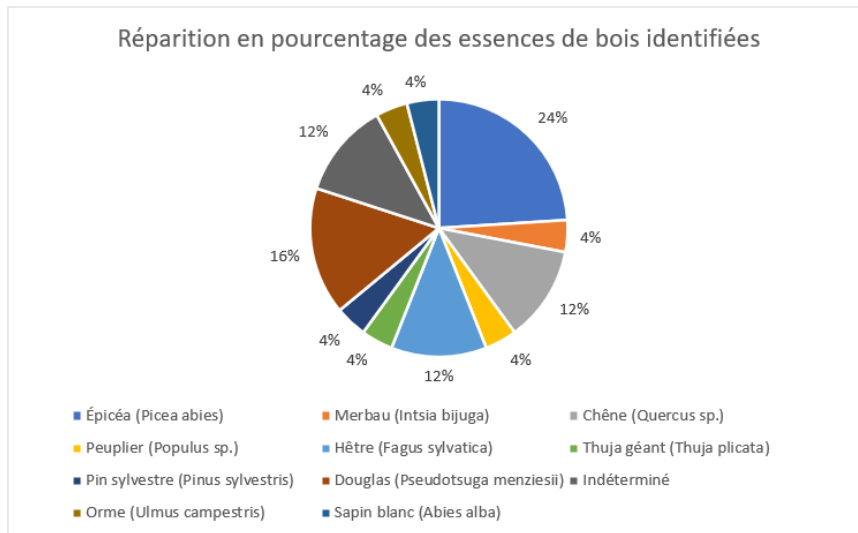


Figure 21 : Répartition en pourcentage des essence de bois massif identifiées parmi les 25 échantillons prélevés au sein de la catégorie 5 dans les conteneurs triés.

## 4.2 Spectrométrie du bois

### 4.2.1 Représentations de la réflectance des échantillons de bois

Les courbes de réflectance en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500nm) sont représentées dans deux graphiques pour chaque classe de bois. Un graphique met en relation l'intensité de réflectance avec les longueurs d'ondes tandis que le seconde concerne le pourcentage de réflectance (

Annexe 8).

Une normalisation SNV a été appliquée afin de mieux visualiser les ressemblances entre les courbes d'une même classe (Figure 22 à Figure 31).

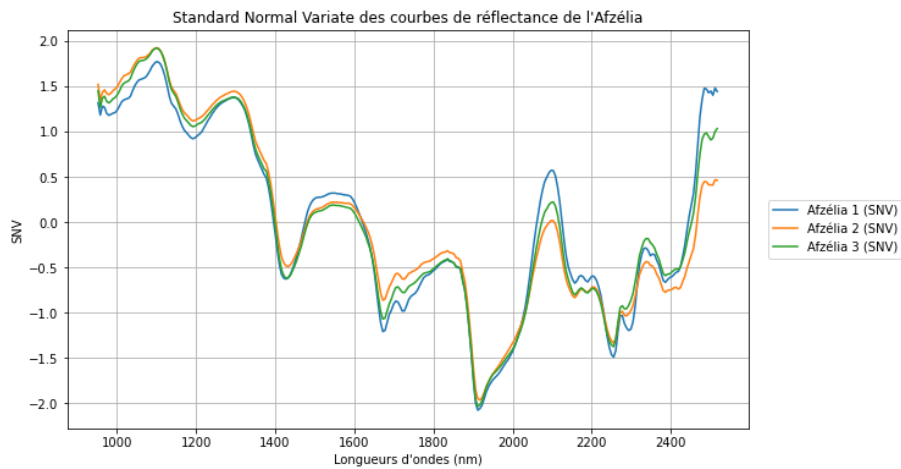


Figure 22 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Azélia.

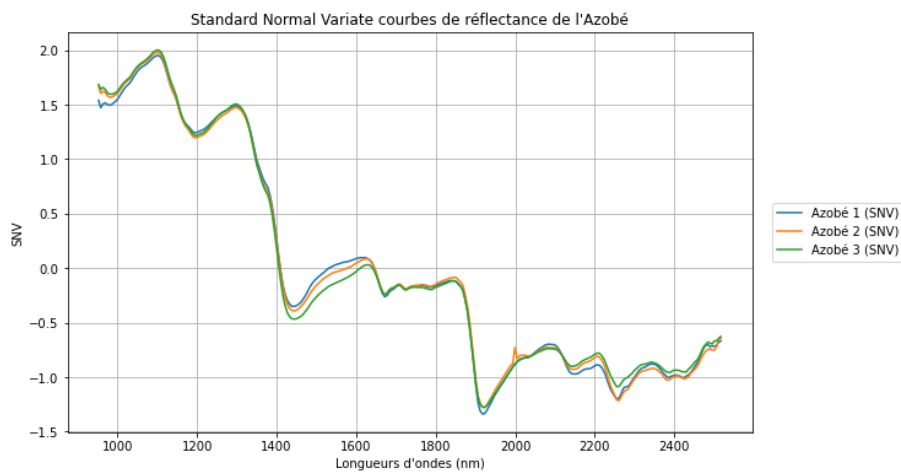


Figure 23 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Azobé.

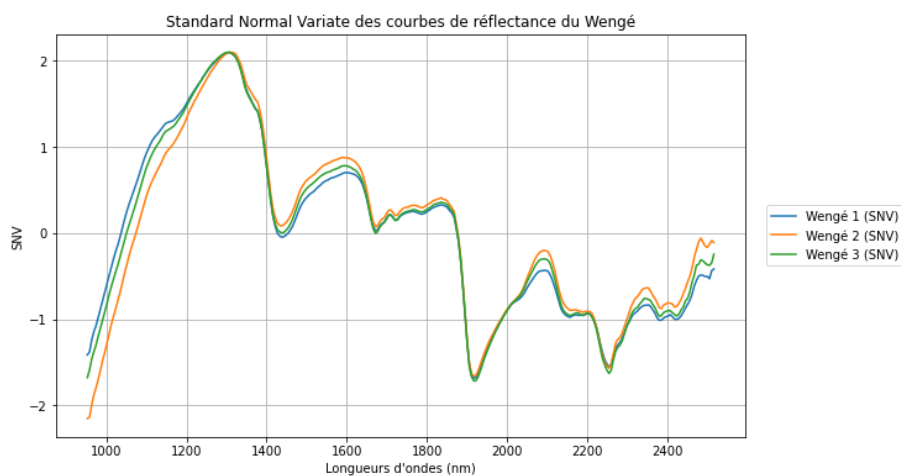


Figure 24 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Wengé.

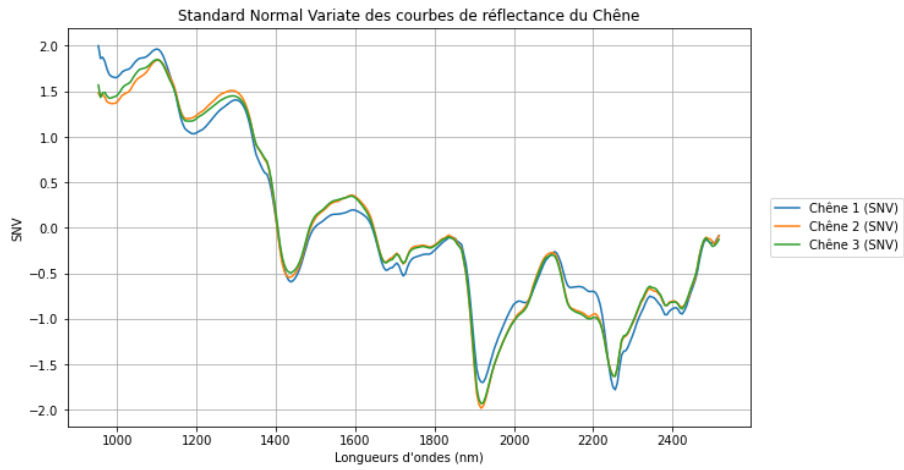


Figure 25 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Chêne.

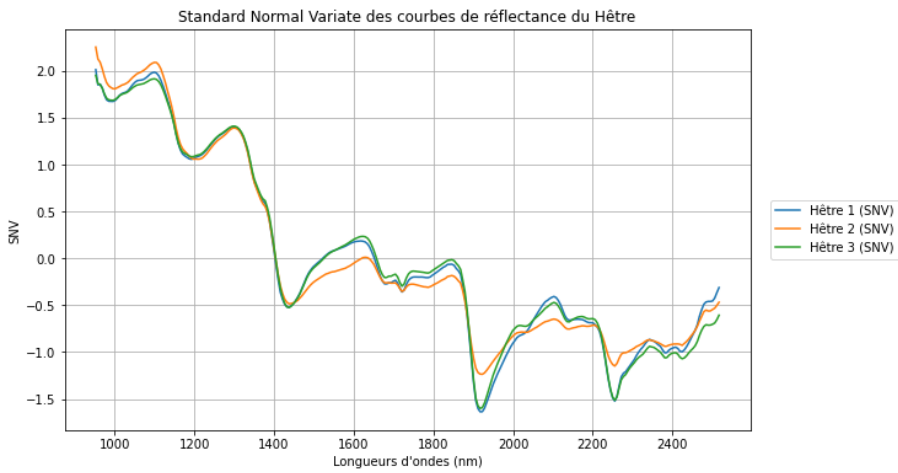


Figure 26 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Hêtre.

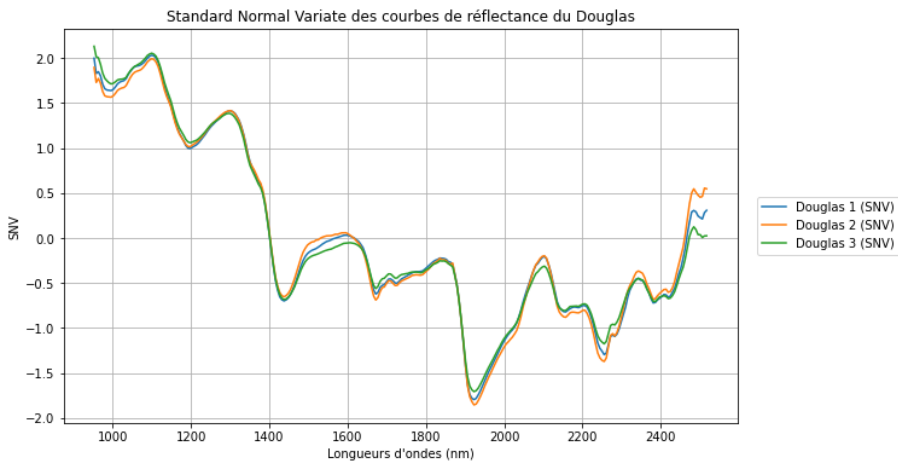


Figure 27 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de Douglas.

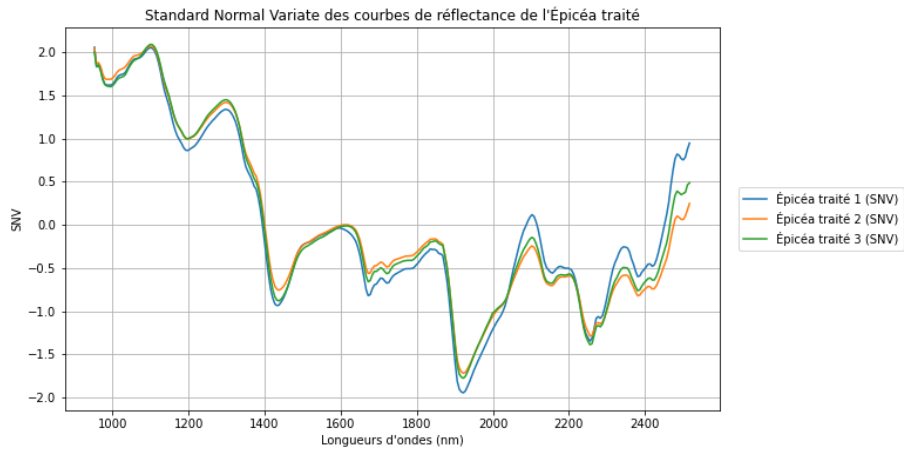


Figure 28 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Épicéa traité.

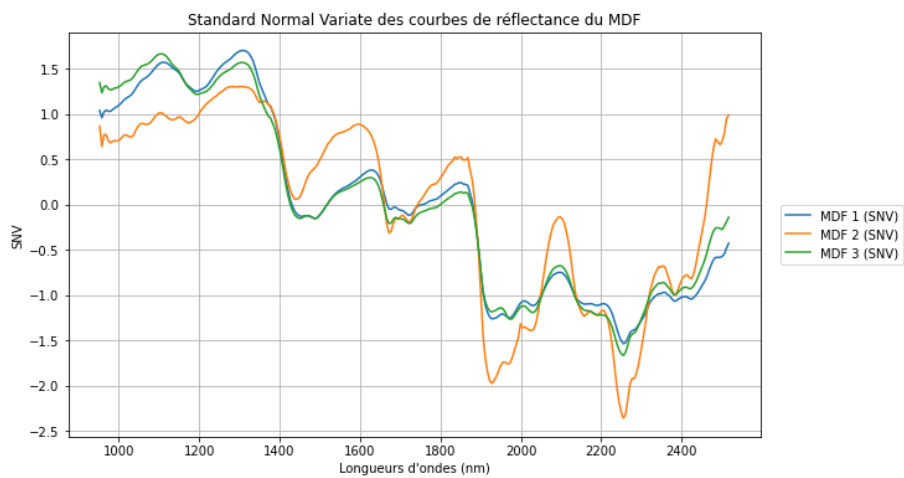


Figure 29 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons de MDF.

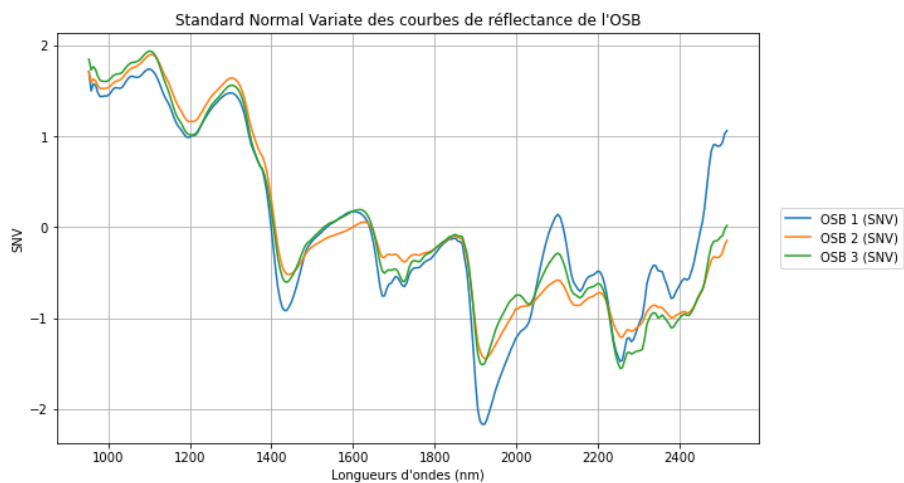


Figure 30 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'OSB.

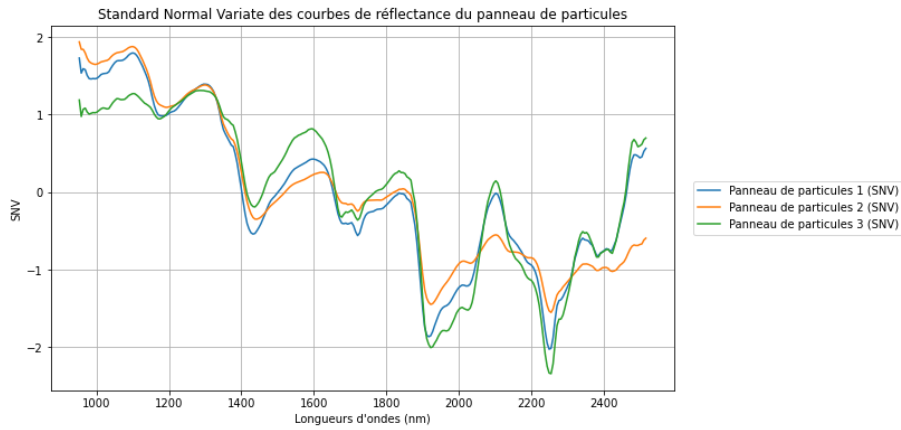


Figure 31 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons du panneau de particules.

Un graphique général représentant une courbe moyenne SNV par catégorie de bois massif est généré et le même graphique est également réalisé pour les différents panneaux (Figure 32 et Figure 33).

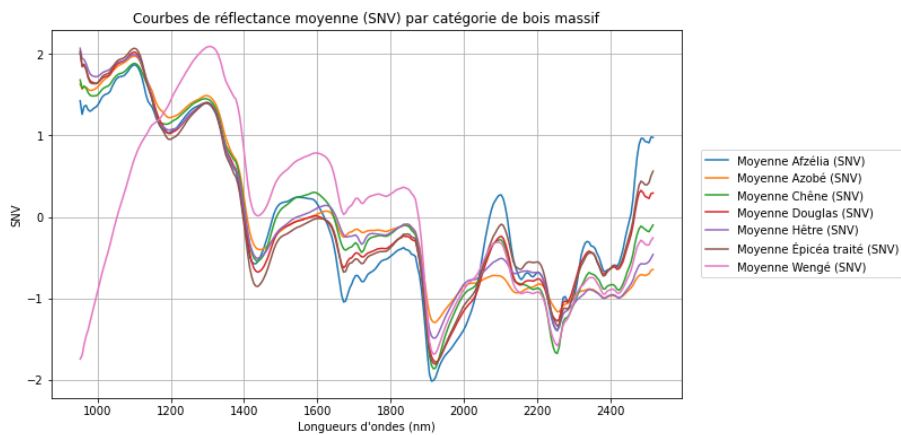


Figure 32 : Graphique rassemblant une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par catégorie de bois massif.

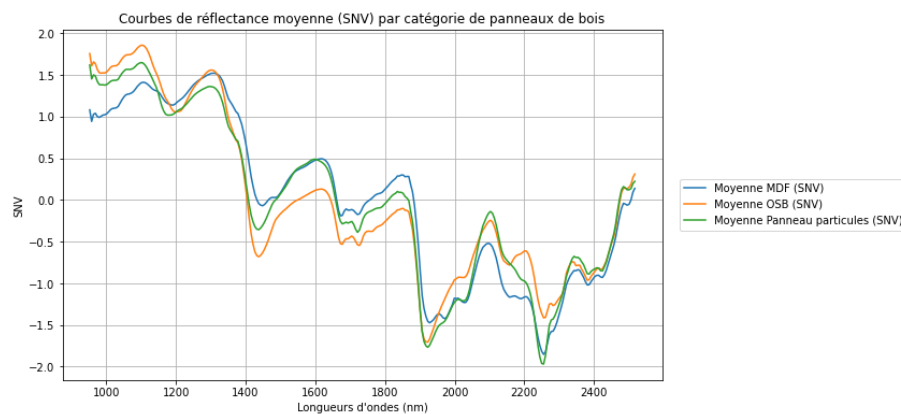


Figure 33 : Graphique rassemblant une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par catégorie de panneaux de bois.

#### 4.2.2 Analyses des graphiques SNV

L'analyse des résultats de spectrométrie se fait en observant les graphiques normalisés, permettant une meilleure mise en évidence des disparités présentes entre les trois échantillons par catégorie.

Le graphique qui représente toutes les classes ensemble (Figure 34) met en évidence une tendance cohérente entre 930 et 1300 nm pour chaque catégorie, à l'exception du Wengé.

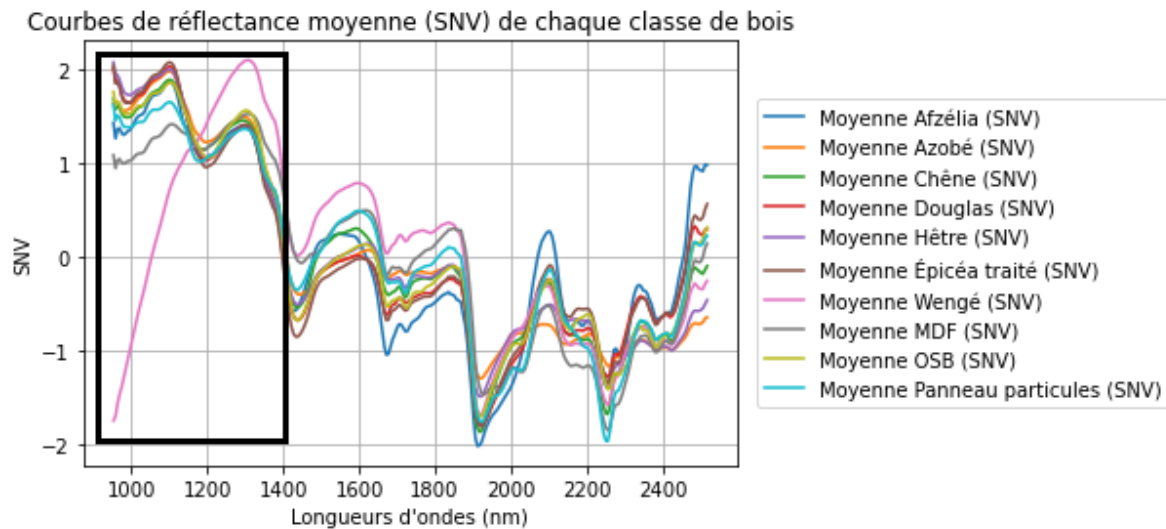


Figure 34 : Graphique rassemble une courbe normalisée (SNV) moyenne de réflectance par classe de bois. Mise en évidence par un cadre noir d'une allure différente pour la catégorie Wengé comparée aux neuf autres catégories.

Les analyses spectrales ont été réalisées en calculant la réflectance. Lorsqu'un matériau reflète une partie de la lumière à une longueur d'onde, cela signifie que le reste est absorbé par celui-ci. Une étude a démontré différents pics observés sur les spectres d'absorbance correspondent à des vibrations qui peuvent être attribuées (Kelley et al., 2004). Dans ce cas-ci, cinq zones mises en évidence se situent dans les mêmes gammes spectrales que pour l'absorbance, ils sont simplement complémentaires (Figure 35).

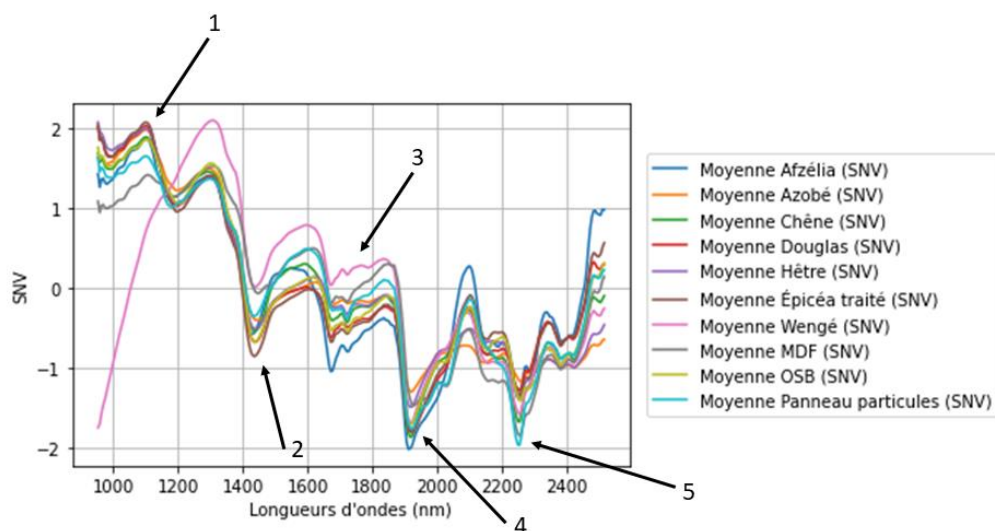


Figure 35 : Mise en évidence de cinq zones indicatrices de vibrations.

Ces zones correspondent à des vibrations d'interactions moléculaires (Kelley et al., 2004) :

- **Zone 1** : Première harmoniques des vibrations carbone/hydrogène aromatiques et aliphatiques de la lignine.
- **Zone 2** : Hydroxyles de cellulose et d'hémicellulose.
- **Zone 3** : Deuxième harmoniques des vibrations carbone/hydrogène aromatiques et aliphatiques de la lignine.

- **Zone 4** : Interactions entre les hydroxyles glucidiques et l'eau.
- **Zone 5** : Vibrations hydroxyles de la cellulose.

Le Wengé ne présente pas la zone 1 sur sa courbe, cela induit qu'il n'aurait pas les vibrations carbone/hydrogène aromatiques et aliphatiques de la lignine.

Une comparaison entre le MDF et trois essences de bois massif (une feuillue tempérée, une feuillue tropicale et une résineuse) est réalisée sur base des moyennes spectrales normalisées de chaque classe (Annexe 9). La même comparaison est faite avec le panneau de particules (Annexe 10) Annexe 11 et le panneau de particules (Annexe 11).

L'OSB présente une courbe plus proche des trois bois massifs que les deux autres types de panneaux. La différence entre l'OSB et les panneaux de particules ainsi que le MDF réside dans l'utilisation du liant. En effet, la colle peut jouer un rôle dans la variation spectrale.

Selon une étude, la longueur d'onde de 2020 nm permet de détecter la présence de la résine d'urée (Niemz et al., 2023). Cependant, il est difficile de voir une nette différence entre les panneaux et les essences de bois massif (Annexe 9 à Annexe 11).

Un graphique en vue de comparer les deux essences résineuses a été réalisé (Annexe 12). Toutefois, seulement de légères variations sont visibles malgré le traitement de l'Épicéa.

#### 4.2.3 Matrice de confusion de la classification du bois

Une matrice de confusion est générée afin d'analyser les performances de classification de l'algorithme (Figure 36).

La matrice de confusion se lit en colonnes et en lignes. Les colonnes nommées « Predicted labels » correspondent aux étiquettes prédites. Cela signifie que pour chaque classe que le modèle tente de prédire, les colonnes de la matrice correspondent aux prédictions du modèle. Tandis que les lignes « True labels » correspondent aux étiquettes réelles de chaque classe.

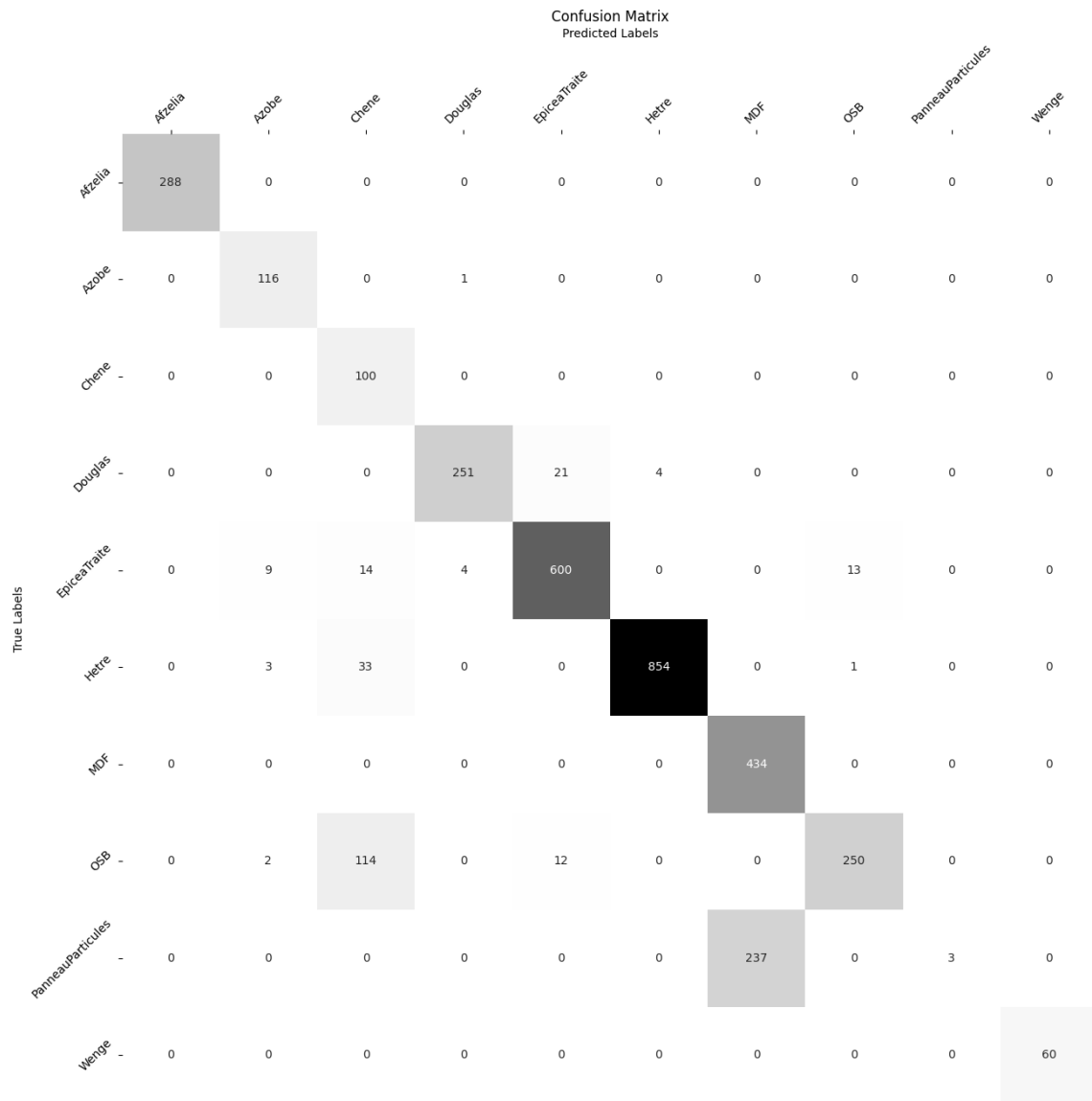


Figure 36 : Matrice de confusion avec les réelles étiquettes, « True labels », en ligne et les étiquettes prédites, « Predicted labels », en colonne par chaque classe de bois. La diagonale correspond aux tuiles correctement identifiées par le modèle.

Chaque chiffre représente une tuile de 10x10 pixels d'un échantillon classé. Chaque catégorie se retrouve une fois dans les lignes et une fois dans les colonnes. La somme d'une ligne donne le nombre total d'échantillons testés et appartenant à ladite catégorie, tandis que la somme d'une colonne donne le nombre d'échantillons prédits par le modèle correspondant à la catégorie en question (Tableau 6).



Tableau 6 : Nombre total d'échantillons, d'échantillons bien classés et mal classés pour chaque catégorie, le pourcentage (%) d'exactitude ainsi que le pourcentage (%) d'erreur calculés selon la matrice de confusion.

Catégorie	Nombre total d'échantillons	Nombre d'échantillons bien classés	Nombre d'échantillons mal classés	Exactitude (%)	Erreur (%)
Afzélia	288	288	0	100,00	0,00
Azobé	117	116	1	99,15	0,85
Chêne	100	100	0	100,00	0,00
Douglas	276	251	25	90,94	9,06
Épicéa Traité	640	600	40	93,75	6,25
Hêtre	891	854	34	95,85	3,82
MDF	434	434	0	100,00	0,00
OSB	378	250	128	66,14	33,86
Panneaux Particules	240	3	237	1,25	98,75
Wengé	60	60	0	100,00	0,00
Total	3424	2956	465	86,33	13,58

D'après la matrice, il ressort que l'Afzélia, le Chêne, le MDF et le Wengé sont identifiés plus facilement que les autres classes de bois, car chaque échantillon portant l'étiquette de l'une de ces catégories a été correctement prédit comme appartenant à celle-ci. Cependant, il y a une confusion où l'étiquette « MDF » est attribuée par erreur à la catégorie « panneau particules ». Cette confusion peut être expliquée par la grande similitude entre les échantillons de ces deux catégories.

L'OSB est régulièrement confondu à tort avec du chêne. En raison de sa composition, où des copeaux plus grands sont retrouvés par rapport au MDF ou au panneau de particules, il est possible que les tuiles d'entraînement ne reflètent pas adéquatement la diversité de la composition d'un panneau d'OSB. Cela pourrait entraîner des erreurs persistantes.

L'exactitude globale peut être calculée en faisant le rapport entre le nombre total d'échantillons correctement classés et le nombre total d'échantillons dans le jeu de données test. Elle permet d'évaluer les performances générales du modèle de prédiction. Ces nombres sont respectivement : 2956 échantillons bien classés et 3424 échantillons au total. L'exactitude globale vaut donc 86,33%.

#### 4.2.4 Précision et Rappel

La précision et le rappel ont été calculés afin d'analyser au mieux le comportement du modèle de classification face à chaque catégorie de bois (Tableau 7).

La précision mesure la proportion d'échantillons correctement classés dans une catégorie de bois spécifique parmi toutes les prédictions qu'il y a pour cette catégorie. Une précision de 1 signifie que le modèle a prédits correctement tous les échantillons pour cette catégorie. La précision s'observe en regardant les résultats par colonne (Predicted labels).

Quant au rappel, lui, mesure la capacité du modèle de classification à identifier correctement les échantillons appartenant réellement à une catégorie de bois spécifique parmi tous les échantillons qui sont réellement de cette catégorie. Lorsque le rappel est égal 1, cela signifie que tous les échantillons qui appartiennent réellement à une catégorie sont tous retrouvés dans la bonne catégorie prédite par le modèle. Le rappel s'observe en regardant les résultats par ligne (True labels).

Tableau 7 : Valeurs de précision et de rappel pour chaque classe de bois.

Catégorie	Précision	Rappel
Afzélia	1,000	1,000
Azobé	0,892	0,991
Chêne	0,383	1,000
Douglas	0,980	0,909
Épicéa Traité	0,948	0,938
Hêtre	0,995	0,958
MDF	0,647	1,000
OSB	0,947	0,661
Panneaux Particules	1,000	0,125
Wengé	1,000	1,000

Au niveau de la précision, trois catégories ont atteint une précision de 100% : Afzélia, panneau de particules et Wengé. Le modèle a fait aucune erreur lorsqu'il a prédit une de ces trois catégories (Figure 37).

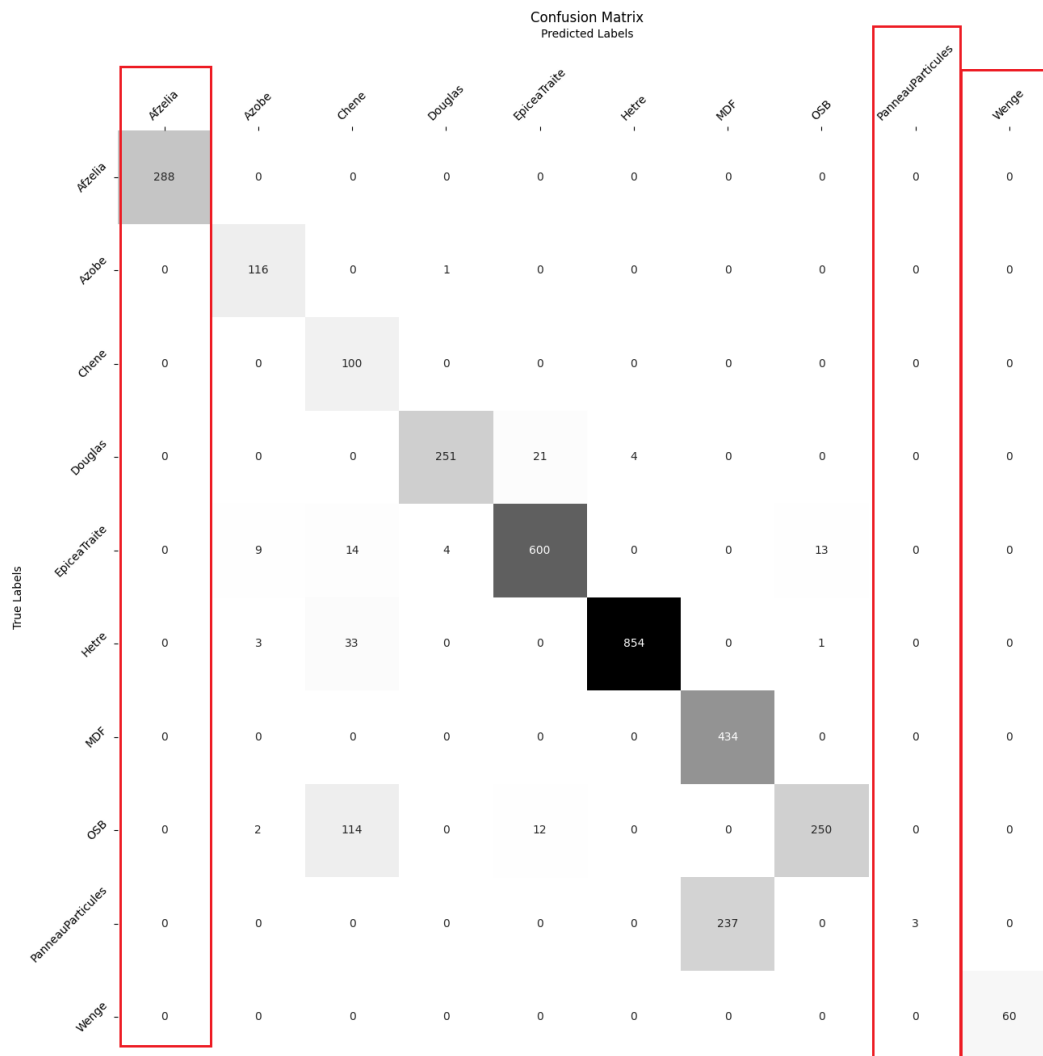


Figure 37 : Matrice de confusion avec une mise en évidence en rouge des trois classes ayant une précision de 1 (100%) : Afzélia, panneau de particules et Wengé.

Tandis que pour le rappel, ce sont les catégories du Chêne, MDF et Wengé qui ont obtenu 100%. Le modèle a correctement reconnu chaque échantillon appartenant à ces trois classes. Il n'a pas commis d'erreur de classification (Figure 38).

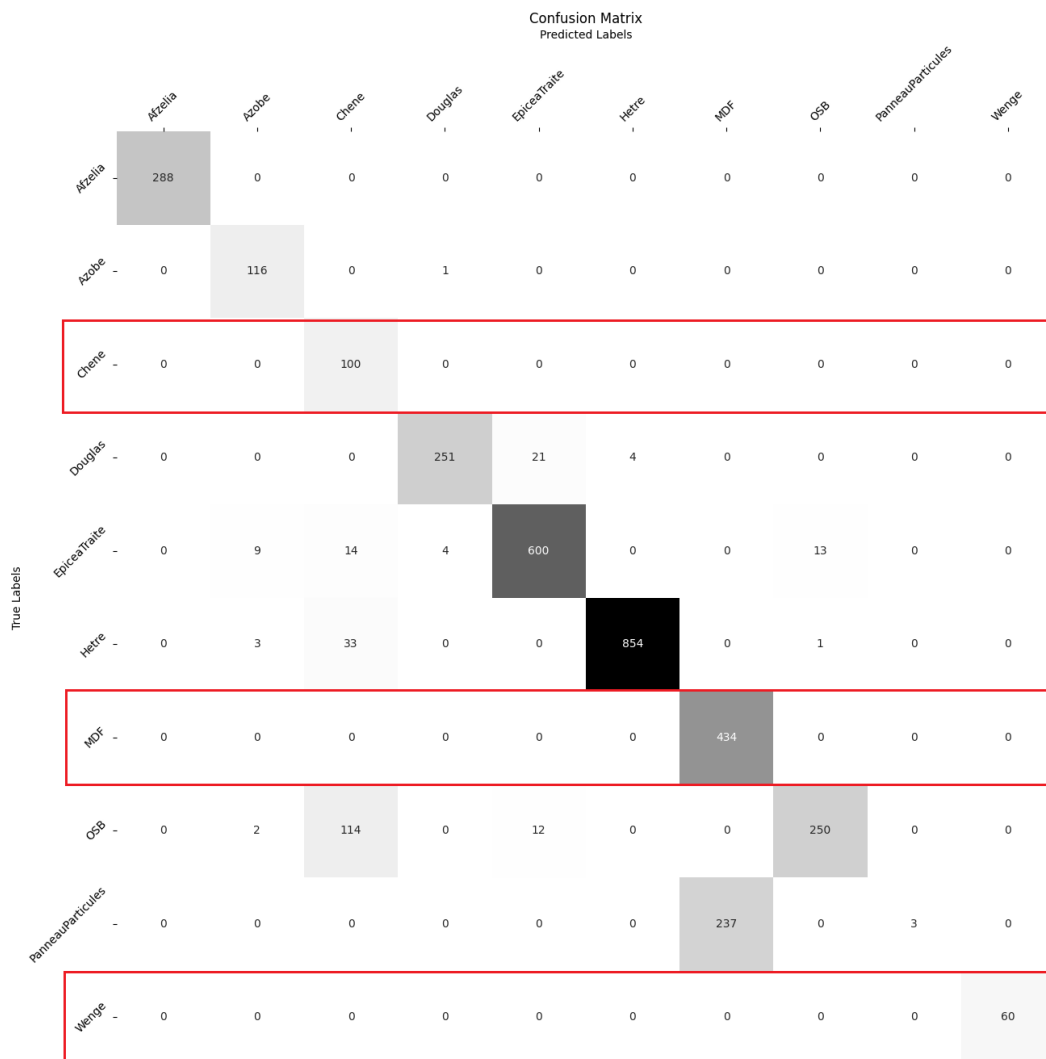


Figure 38 : Matrice de confusion avec une mise en évidence en rouge des trois classes ayant un rappel de 1 (100%) : chêne, MDF et Wengé.

La classe présentant le rappel le plus bas est celle du panneau de particules, où la quasi-totalité a été identifiée comme étant du MDF. Seulement trois échantillons sur les 240 ont été reconnus comme du panneau de particules, conduisant à un rappel bas qui vaut 0,125. En revanche, la précision pour cette classe est au maximum, car le modèle n'a prédit que trois échantillons comme appartenant à cette classe. La raison potentielle de cette mauvaise prédiction est la ressemblance étroite entre le panneau de particules et le MDF.

Le Chêne a la précision la plus basse qui se justifie par le fait que le modèle prédit plusieurs fois cette classe à d'autres échantillons qui n'y appartiennent pas. Elle vaut ainsi 0,383 étant donné que le total des prédictions « Chêne » du modèle vaut 261 alors qu'il y a seulement 100 échantillons qui sont réellement du Chêne. La mauvaise classification des échantillons d'OSB est la principale cause de cette précision basse pour le Chêne. En effet, 114 échantillons d'OSB se sont retrouvés classés comme « Chêne ».

#### 4.2.5 Analyse en composantes principales (ACP) selon trois dimensions

Une ACP a été réalisée via le logiciel Python (version 3.11) a été employé via l'interface Sypder (version 5.4.3) disponible sur Anaconda Navigator (version 2.4.2). L'ACP été utilisée pour réduire la dimension des données de variance. Les données d'entrée consistaient en 288 valeurs de variance mesurées à des longueurs d'ondes indépendantes. Cette analyse permet de représenter chaque type de bois dans un graphique 3D afin de distinguer leurs différences (Figure 39).

L'objectif de cette réduction de dimension était d'améliorer l'efficacité et la robustesse de l'analyse statistique. Les résultats de l'ACP ont été exprimés sous forme de scores des composantes principales (CP), qui ont permis de conserver les informations essentielles tout en simplifiant la représentation des données (Ma et al., 2019).

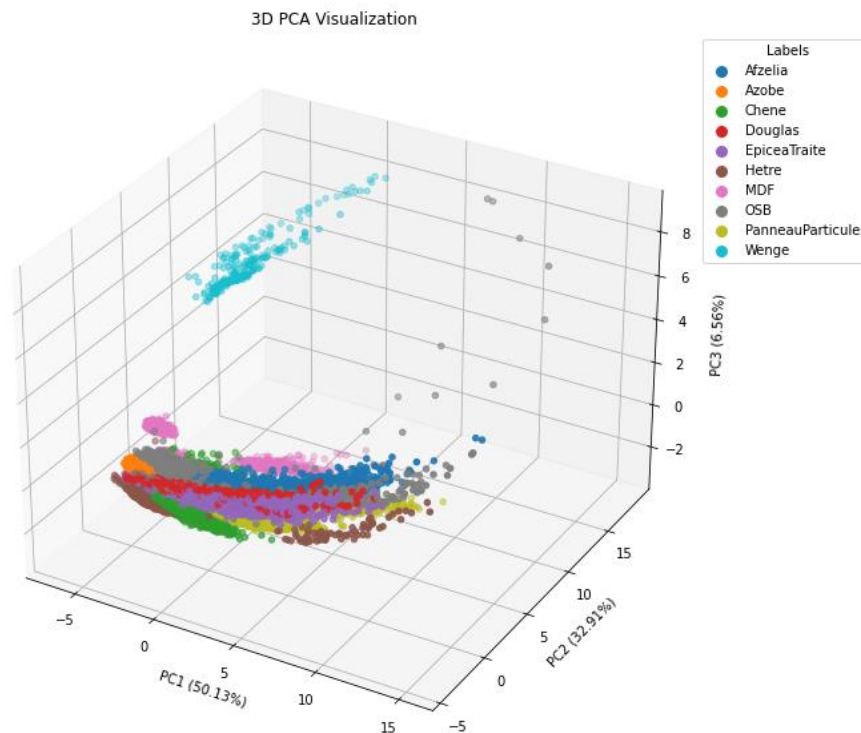


Figure 39 : Visualisation de l'ACP selon trois composantes principales (PC1, PC2 et PC3) permettant de distinguer les dix types de bois après le traitement de leurs données spectrales de réflectance.

Cette analyse montre la possibilité de discriminer les types de bois en maximisant la variance entre les variables. Chaque catégorie de bois est rassemblée en un nuage de points homogène. Le Wengé présente une localisation différente sur le graphique par rapport aux autres. Cette différence était déjà soulignée dans le graphique SNV de sa réflectance (Figure 34).

Le taux de contribution de chaque composante est respectivement de : 50,13%, 32,91% et 6,56%. Cela représente le pourcentage de variance expliquée par la composante. Cumulés, cela donne 89,60% ce qui signifie que l'ensemble des composantes capturent la majeure partie de la variation des données.

Afin de visualiser la corrélation entre les longueurs d'ondes et chacun des trois axes. Un graphique par composante principale du pourcentage de corrélation en fonction de la longueur d'onde a été calculé (Figure 40 à Figure 42).

Les pourcentages de corrélation permettent d'analyser la contribution d'une variable, ici une longueur d'onde, à la composante principale. Globalement, les pourcentages ne sont pas très élevés mais cela est dû au fait qu'il y a 288 longueurs d'ondes qui contribuent à la composante principale.

Les longueurs d'ondes situées entre 2400 et 2500 nm sont celles qui contribuent le plus à la composante principale 1 (PC1). Une légère corrélation correspond à la zone 5 et se situe aux alentours de 2250 nm (Figure 35).

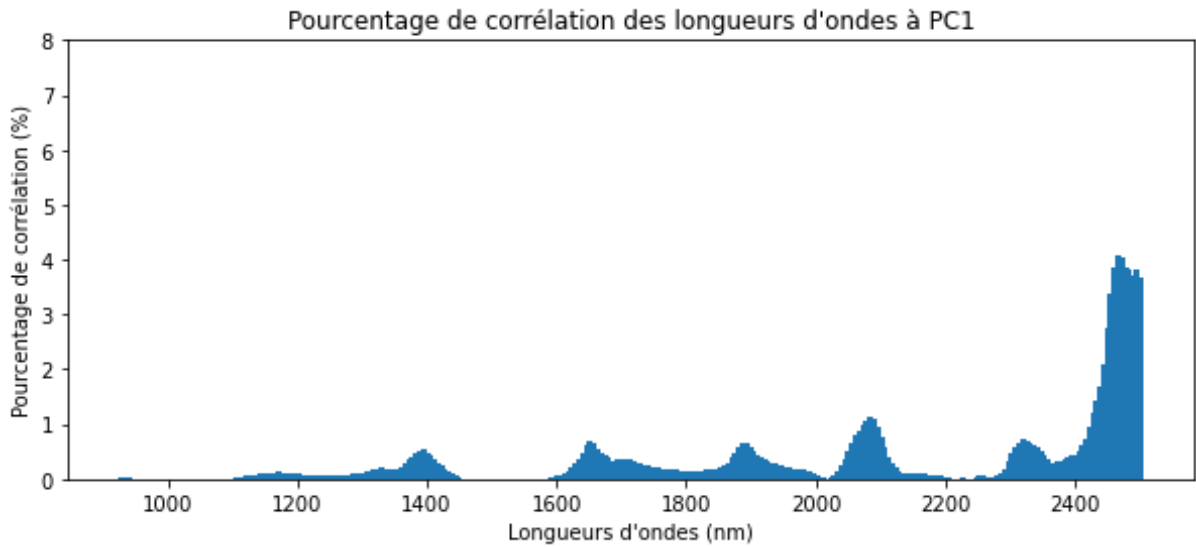


Figure 40 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 1 (PC1).

Les longueurs d'ondes situées entre 930 et 1100 nm sont celles qui contribuent le plus à la composante principale 2 (PC2). Ces longueurs d'ondes peuvent correspondre aux interactions de la zone 1 (Figure 35).

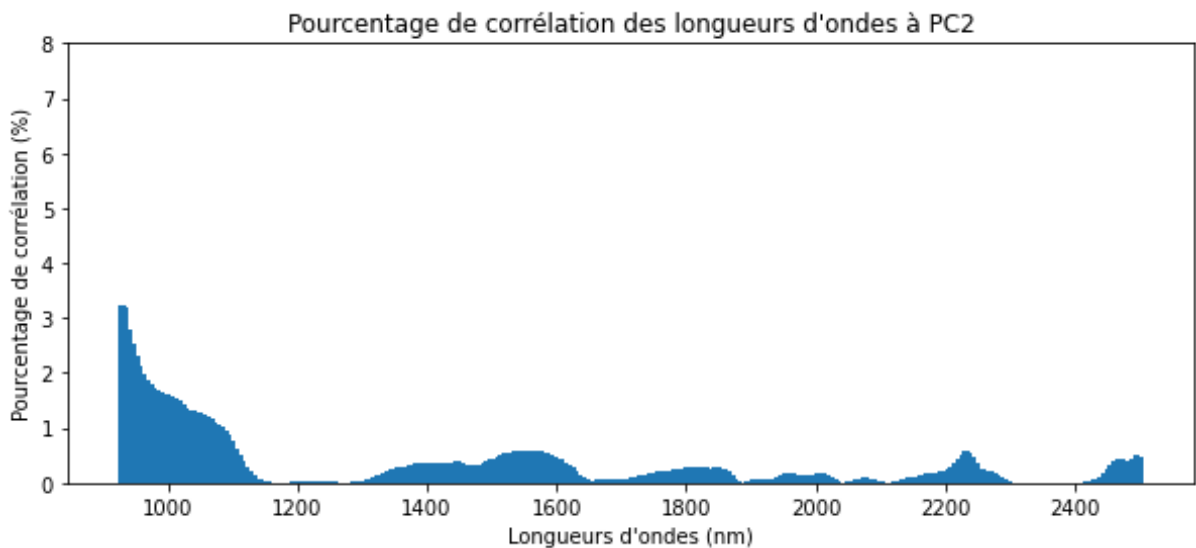


Figure 41 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 2 (PC2).

Longueurs d'ondes situées entre 930 et 1100 nm mais aussi, entre 2200 et 2300 nm sont celles qui contribuent le plus à la composante principale 3 (PC3). La zone 1 peut expliquer les corrélations de la première gamme spectrale tandis que la zone 5 correspond à la deuxième gamme (Figure 35).

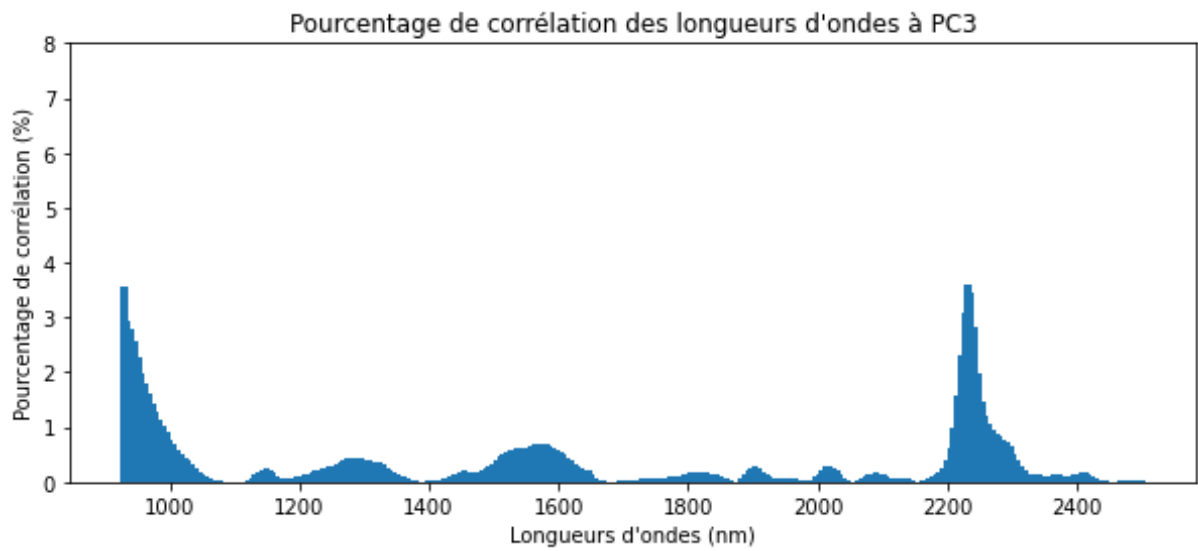


Figure 42 : Pourcentage de corrélation (%) en fonction des longueurs d'ondes (930 à 2500 nm) concernant la composante principale 3 (PC3).

## 5. Discussion

Le premier objectif de ce travail est de quantifier le bois massif retrouvé dans plusieurs recyparcs en vue de le valoriser autrement que par la crémation. Différentes catégories étaient mises en place pour le trier afin d'estimer les proportions retrouvées. Cette quantification vise à déterminer la pertinence d'une éventuelle modification de la chaîne de tri et de recyclage du bois. Cette évaluation s'inscrit également dans la perspective d'utiliser ce bois recyclé pour la fabrication de panneaux de CLT.

La quantification du flux de bois massif dans les recyparcs namurois a été réalisée sur cinq conteneurs, différents par leur provenance et leur composition. En moyenne, 41,52% correspondent à du bois massif, tandis que 58,48% de la composition des conteneurs sont les produits de bois transformés (Tableau 1).

La méthode de tri s'est focalisée sur le bois massif avec un facteur « corps étrangers » et un facteur « dimension ». L'aspect traitement chimique comme la peinture, les produits d'entretien ou autres n'ont pas été pris en compte pour la quantification du flux. Différentes catégories existent déjà concernant le bois : A pour les déchets non traités, B pour les déchets traités non-dangereux, et enfin C pour les déchets traités dangereux. Au sein du BEP Environnement, la catégorie C n'est pas incluse dans les conteneurs de type « bois ». La quantification réalisée concerne les catégories A et B mélangées, concentrée sur le bois massif. Un facteur concernant l'aspect traité du bois pourrait spécifier davantage les résultats obtenus dans ce travail. En effet, le bois traité doit être travaillé en surface avant de pouvoir être utilisé dans la production de CLT.

Une analyse de trois conteneurs a été réalisée l'année dernière. Le classement s'est réalisé sur les critères des catégories A, B et C du bois. Un total de 51,8% représente, en moyenne, ce qui n'est pas du bois massif, traité ou non. Ce pourcentage est principalement représenté par les panneaux de particules et OSB (43,3%) (Dalimier, 2022). Concernant le bois massif, il est retrouvé au sein de la catégorie A et B et correspond, en moyenne, à 47,2%. Une différence s'observe entre ses résultats et ceux de l'analyse des conteneurs du BEP Environnement. Elle peut s'expliquer par la provenance des conteneurs et par le nombre de conteneurs triés.

L'étude réalisée par Cousin et al. exprime la proportion de bois massif non traité et traité recensée sur une plateforme de conditionnement en France, elle vaut respectivement 41% et 27%. Tandis que lorsque le secteur désigne les mobiliers des particuliers, les taux sont de 4% et 30% (Cousin et al., 2017). En Allemagne, 33 à 42% des déchets provenant des centres de recyclage contiennent du bois massif alors que plus de 50% des déchets de bois provenant de la construction et d'autres industries représentent du bois massif (Kharazipour & Kües, 2007). Ces pourcentages correspondent approximativement aux 41,52% moyens des conteneurs triés au BEP. Cependant, il existe une disparité entre le secteur du particulier et le secteur industriel. Ceci souligne l'importance de fusionner les deux sources de récupération afin de maximiser la valorisation du bois massif qu'elles contiennent, contribuant ainsi à une meilleure intégration dans l'économie circulaire et le principe des « 9R ».

Les corps étrangers retrouvés dans le bois sont variés : des vis, des clous, du grillage, du plastique et d'autres encore. Ce facteur provoque une hétérogénéité pour la valorisation du bois (Besserer et al., 2021). Toutefois, les proportions moyennes pour ces deux catégories (2 et 4) accumulées représentent un quart d'un conteneur de bois contenant du bois massif pollué par un corps étranger (Tableau 2). En vue de le valoriser et de prolonger le cycle de vie du bois, il est possible de procéder à un déclouage et de purger les parties présentant un excès de corps étrangers.

Cependant, ce genre de manipulations cause des dégradations dans le bois. Il est difficile d'estimer les répercussions mécaniques qu'un clou enlevé peut laisser derrière lui. De plus, ce procédé est fait manuellement et nécessite du temps. La solution la plus efficace est de procéder à la recoupe systématique des morceaux de bois afin de retirer le morceau contenant un corps étranger. Cela va donc changer les dimensions de chaque échantillon et nécessitera ainsi un nouveau tri pour estimer quels morceaux sont encore assez grands pour la production de panneaux CLT.

Les conteneurs triés proviennent chacun d'une commune différente avec une démographie variée (Figure 16). Le quartier local de Naninne, qui compte 1582 résidents, relève de la commune de Namur, où résident 113 187 personnes. Par conséquent, établir un lien entre les résidents de ce quartier et la quantité de bois collecté s'avère complexe. Le conteneur de cette provenance contenait 3640 kg de bois, dont 31,32 % était du bois massif. Le pourcentage le plus élevé de bois massif, soit 59,41 %, provient des 2020 kg de bois collectés dans le conteneur de La Bruyère, cette commune étant celle avec la plus grande population parmi les trois autres restantes. Bien que la commune de Ohey soit la moins peuplée, le conteneur récolté avait un poids net de bois de 3560 kg avec une proportion en bois massif de 37,64% (Tableau 1). Il est donc difficile de pouvoir clairement relier la démographie d'une commune avec le bois massif retrouvé dans les recyparcs.

Il faut souligner qu'un seul conteneur par commune n'a été trié manuellement pour en évaluer la proportion de bois massif. Il est donc difficile de pouvoir estimer, sur le long terme et de manière rigoureuse, la réelle tendance des proportions de bois massif récupéré au sein d'un recyparc d'une même commune.

Selon une analyse sur la gestion des déchets bois en France ainsi que sur sa valorisation, l'ADEME a mis en place une seconde étude sur le gisement des déchets bois dans la filière bois et bois-énergie sur une période de cinq ans dont les résultats sont prévus pour 2024 (Guilet & Antoine, 2022). Celle-ci permettra d'estimer au mieux les quantités véhiculées au sein des différents flux, mais aussi d'analyser les différentes valorisations. Cette analyse est lancée pour une longue durée, étant donné la difficulté d'estimer le réel volume de bois valorisable et en circulation. Cela appuie le fait que les résultats d'un tri manuel de cinq conteneurs différents ne peuvent être projetés sur du long terme, mais représentent un potentiel de la quantification des flux de déchets bois. Cette même quantification peut également être appliquée au domaine de la déconstruction afin d'unir ces deux sources de déchets bois.

En effet, une étude<sup>13</sup> a été réalisée une première fois en avril 2015 par l'institut technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA) pour L'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) (FCBA, 2015) donnant des résultats sur les déchets de bois en France. La principale source provient du secteur de la construction, avec une quantité de 2 millions de tonnes. Ensuite, les ménages et les collectivités constituent la deuxième source de déchets de bois, générant environ 1,9 million de tonnes chaque année. Cette réalité met en évidence l'importance de la quantité de bois produite par les citoyens, ce qui justifie une exploration plus détaillée pour distinguer les divers types de bois présents dans le flux des habitants.

La taille des morceaux de bois est un facteur à prendre en compte pour la production de panneaux CLT. En effet, une taille importante confère une plus grande résistance mécanique et permet aux panneaux d'être robustes (Niemz et al., 2023). Cependant, les bois considérés comme trop petits peuvent également être valorisés notamment en étant utilisés pour des panneaux de type OSB,

---

<sup>13</sup> « Évaluation du gisement de bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie » disponible sur : [bibliothèque.ademe.fr](http://bibliothèque.ademe.fr)



n'utilisant pas de bois en lamelle mais des copeaux de bois de tailles plus ou moins grandes (Verheyen et al., 2016).

Actuellement, ce facteur est négligé lors du recyclage étant donné que les déchets bois sont broyés dans l'option de fabriquer des panneaux à particules. Ce genre de produits recyclés ne cesse d'augmenter (FCBA, 2015). Il permet d'éviter un classement de la matière première selon un critère de taille, contrairement au CLT. Toutefois, ce panneau de construction présente de nombreux avantages et sa production en matière recyclée a déjà fait ses preuves (Arbelaez, 2019). Analyser les flux de déchets bois, en identifiant leurs dimensions lors du tri manuel, permet de faciliter la production de ces panneaux recyclés.

Concernant le pourcentage d'humidité, seulement deux échantillons sur 25 analysés ont une humidité inférieure ou égale à 12%, taux qui correspond à l'humidité idéale pour l'utilisation du bois (Niemz et al., 2023). Ces humidités valent 11,96% et 9,65% (Tableau 3). En moyenne, chaque conteneur présente un taux d'humidité supérieur à 12% (Tableau 4). En effet, les conteneurs sont placés sans protection dans les recyparcs. Le bois récolté est donc exposé aux intempéries. Cependant, le bois est un matériau hygroscopique qui s'adapte à l'environnement dans lequel il est conservé. Étant donné que les conteneurs ne sont pas protégés, le bois va donc adapter sa teneur en humidité au fil du temps (Niemz et al., 2023). Les différences d'humidité peuvent également s'expliquer par la position du bois dans le conteneur. Les premiers morceaux déposés resteront dans le fond et seront ainsi gardés au sec en étant protégés par les morceaux suivants. En vue de l'utilisation de ce bois pour la production de panneaux CLT, un séchage est à envisager, afin d'atteindre le taux de 12%.

Le second objectif de ce travail porte sur la perspective d'automatiser le tri du bois non broyé, sur base de caractéristiques spectrales et tri-dimensionnelles. Pour se faire, une classification SVC sur base de données spectrales a été réalisée sur dix catégories de bois différents : sept essences de bois massifs (cinq feuillues et deux résineuses) et trois panneaux de bois transformés. L'analyse de ces résultats s'est faite par une matrice de confusion et une analyse en composante principale (ACP) 3D.

Des analyses spectrales ont démontré le lien entre certaines composantes chimiques et leur absorbance (Kelley et al., 2004). Dans ce travail, la réflectance a été observée, et des pics complétant ceux de l'absorbance sont présents dans les mêmes zones. Cela permet d'expliquer la raison de variation le long du spectre (Figure 35).

Une étude a été réalisée par Ma et al. en 2019 sur l'évaluation de la diffusion de la lumière au sein de cinq espèces de bois tendre et dix espèces de bois dur, dans une gamme spectrale de 1002 à 2130 nm. Plusieurs analyses ont été faites dont une matrice de confusion et une analyse en composantes principales (Ma et al., 2019).

Leur matrice de confusion montre un résultat de 100% pour quatre espèces de résineux et 5 espèces de feuillus, dont le hêtre fait partie. A contrario, le résultat obtenu pour cette dernière essence par la classification SVC réalisée dans ce travail est de 95,85%. Les deux essences résineuses analysées, le douglas et l'épicéa traité, ont des scores respectifs de 90,94% et 93,75% (Tableau 6). Une différence est donc observée entre les deux types d'analyse. Elle peut s'expliquer par la différence des essences choisies. En effet, les données spectrales peuvent varier, même légèrement, d'une essence à une autre (Figure 22 : Courbes normalisées (SNV) de réflectance des trois échantillons d'Azélia. Figure 22 à Figure 30). Mais aussi, les méthodes d'analyse choisies pour la classification ne sont pas les mêmes. Dans l'étude de Ma et al., une analyse discriminante quadratique (QDA) a été utilisée avec une validation croisée cinq fois (quatre sous-échantillons d'entraînement et un de test). Tandis que dans ce cas-ci, un algorithme SVC a été appliqué avec deux échantillons d'entraînement et un de test. Il faut également souligner que les échantillons dans l'étude de Ma et al. ont tous la même taille, tandis que dans ce

travail ce sont des échantillons de différentes dimensions. Cela engendre un nombre de tuiles propre à chaque classe de bois.

La gamme spectrale prise en compte pour la réalisation de la classification est également différente et pourrait expliquer les résultats plus bas pour le hêtre, le douglas et l'épicéa traité. En effet, Ma et al. se sont focalisés sur la gamme spectrale de 1002 à 2130 nm. Ils expliquent que les longueurs d'ondes inférieures et supérieures à cet intervalle sont bruyantes et moins fiables. C'est pour cela qu'elles n'ont pas été analysées dans leur étude. Ici, une gamme de 930 à 2500 nm a été utilisée pour s'entraîner et tester la classification. La différence de résultat peut être induite par les longueurs d'ondes jugées comme bruyantes et moins fiables (Ma et al., 2019). En revanche, la gamme spectrale située entre 2400 et 2500 nm possède un pourcentage de corrélation élevé dans la Composante Principale 1 (PC1) (Figure 40). Cela signifie que ces longueurs d'ondes sont celles qui contribuent de manière significative à la séparation ou à la discrimination des échantillons en fonction de leurs caractéristiques spectrales. Ces longueurs d'ondes saisissent les variations les plus prononcées dans les spectres parmi les échantillons et permettent la distinction.

Une ACP a été appliquée dans les deux cas. Les résultats de Ma et al. révèlent un taux de contribution pour chaque axe de : 85,7% pour PC1, 9,9% pour PC2 et 2,1% pour PC3, avec un total de 97,7%. Une valeur totale de 89,6% (PC1 : 50,13%, PC2 : 32,91% et PC3 : 6.56%) a été calculée dans l'ACP 3D de ce travail. Une différence inférieure à 10% est observée entre les deux cas d'études. Les jeux de données diffèrent par la gamme spectrale prise en compte. Les longueurs d'ondes jugées bruyantes par Ma et al. peuvent influencer les résultats de l'ACP ayant une gamme spectrale plus large.

Toutefois, les deux cas présentés ci-dessus tendent vers le même objectif et démontrent que l'analyse spectrale du bois est prometteuse en vue d'une classification.

## 6. Perspectives et améliorations

Le monde des conteneurs et des recyparcs est large et représente une source de bois de récupération. Il serait judicieux d'envisager la mise en place d'une collecte de bois massif au sein de plusieurs centres de recyclage, en engageant activement les citoyens dans le processus. Ceux-ci pourraient effectuer une première sélection par eux-mêmes en suivant des instructions de tri détaillées, réduisant ainsi la nécessité de recruter de nouveaux employés. Pour ce nouveau conteneur, il est important d'inclure l'aspect traité ou non, afin de n'obtenir que du bois à l'état brut et sans corps étrangers. Ce projet pourrait se dérouler sur le long terme, en vue d'estimer la quantité de bois massif collectée pour une commune particulière, permettant ainsi de tirer des conclusions solides quant à la pertinence de sa valorisation. Les critères de tri pourraient évoluer et se complexifier en fonction des quantités récoltées, si elles s'avèrent prometteuses.

Concernant la deuxième partie de ce travail qui touche à la classification des différents types de bois en vue d'automatiser le tri, l'aspect 3D n'a pas pu être exploité à cause d'une défaillance technique. En effet, la caméra 3D disponible au laboratoire GeMMe permet, à l'aide algorithmes Run Length Encode, de déterminer les mesures en unité de longueur des échantillons scannés. Une classification selon les dimensions peut donc être envisagée sur des échantillons de bois. Celle-ci pourrait être combinée à une classification spectrale. Ces deux analyses se complètent assez bien en vue de la production de CLT à base de bois recyclé.

Durant une opération de classification, il est possible d'ajuster la manière dont les erreurs de tri sont gérées en utilisant un seuil, appelé « threshold ». Ce seuil joue un rôle crucial en permettant au modèle de classification de décider à partir de quelle probabilité de prédiction il doit choisir une classe spécifique. Par conséquent, il devient possible d'introduire une catégorie de classe « indéterminée » afin d'empêcher le modèle de classification de confondre des éléments non massifs avec ceux qui le sont. Cela permet d'éviter une confusion qui pourrait empêcher une valorisation correcte d'une classe de bois en particulier. En effet, il a été observé que l'OSB a été assimilé à du Chêne. Cette erreur pollue la classe de bois massif et engendrerait une valorisation moins efficace. Il serait préférable d'orienter ces échantillons OSB dans une catégorie « indéterminée » lorsque le modèle de classification tente de le placer dans la classe « Chêne ».

Une dernière piste d'amélioration serait l'emploi des réseaux de neurones convolutionnels (Convolutional Neural Networks, CNN) pour améliorer la classification, surtout celle du bois. Dans le contexte du traitement d'images, les CNN sont conçus pour établir des connexions significatives entre les pixels et pour identifier des zones spécifiques où l'information se regroupe à partir de plusieurs pixels. Cela permet d'analyser la couleur, la texture, la direction des fibres et d'autres caractéristiques anatomiques (Fathurahman et al., 2021). Cette particularité du CNN pourrait être exploitée pour une classification précise des différents types de bois, offrant notamment la capacité de différencier la texture distincte de l'OSB des autres variétés de panneaux.

## 7. Conclusion

En définitive, la complexification du tri du bois au sein des recyparcs peut participer à la valorisation plus spécifique du bois massif et éviter une crémation précoce. Toutefois, le nombre de critères possibles pour effectuer ce triage est à travailler. Il faut déterminer quelles spécificités sont nécessaires pour la valorisation en CLT du bois massif.

La quantité cumulée de bois massif montre une moyenne de 41,52% retrouvée au sein des conteneurs du BEP Environnement, ce qui constitue une quantité intéressante. Cependant, plusieurs paramètres empêchent une valorisation directe et nécessitent d'être traités au préalable. La présence de corps étrangers introduit une hétérogénéité dans le bois et ralentit le processus de valorisation. Cela touche deux catégories du tri manuel représentant 10,73% et 15,96% de bois massif. Une recherche sur l'extraction de ces éléments ou sur la recoupe des morceaux doit être envisagée. Par ailleurs, les taux d'humidité observés dépassent le seuil optimal pour le bois. Par conséquent, un séchage est donc nécessaire avant d'utiliser le bois dans la production de CLT.

Concernant les analyses spectrales, des différences subtiles sont présentes entre les différentes essences et panneaux de bois. La classification SVC donne un taux d'exactitude global de 86,33%, ainsi qu'une ACP ayant un taux de contribution de 89,60%. Ces résultats sont prometteurs et l'utilisation du machine learning peut être envisagée, en vue de classer automatiquement les bois valorisables venant des recyparcs. En améliorant la prise de données sur des échantillons d'entraînement de tailles plus homogènes et en ajoutant l'aspect 3D à la classification, la valorisation du bois peut ainsi prendre plus d'ampleur. Le processus de tri des déchets en bois pourrait être amélioré pour être appliqué de manière plus efficace aux deux sources disponibles : le secteur de la déconstruction et de la démolition, ainsi que celui des recyparcs, qui génèrent tous deux une quantité non négligeable de déchets en bois. Ensemble, elles peuvent donc participer pleinement à une valorisation circulaire du bois.

## 8. Bibliographie

- Akanbi, L. A., Oyedele, L. O., Akinade, O. O., Ajayi, A. O., Davila Delgado, M., Bilal, M., & Bello, S. A. (2018). Salvaging building materials in a circular economy: A BIM-based whole-life performance estimator. *Resources, Conservation and Recycling*, 129, 175-186. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.10.026>
- Akanbi, L., Oyedele, L., Davila Delgado, J. M., Bilal, M., Akinade, O., Ajayi, A., & Mohammed-Yakub, N. (2019). *Reusability analytics tool for end-of-life assessment of building materials in a circular economy*. 16(1), 40-55. <https://doi.org/10.1108/WJSTSD-05-2018-0041>
- Arbelaez, R. E. (2019). *Exploratory Study of Salvaged Lumber as Feedstock for Cross-Laminated Timber (CLT)*. Oregon State University.
- Bertin, I., Saadé, M., Le Roy, R., Jaeger, J.-M., & Feraille, A. (2022). Environmental impacts of Design for Reuse practices in the building sector. *Journal of Cleaner Production*, 349, 131228. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131228>
- Besserer, A., Troilo, S., Girods, P., Rogaume, Y., & Brosse, N. (2021). Cascading Recycling of Wood Waste : A Review. *Polymers*, 13(11), Article 11. <https://doi.org/10.3390/polym13111752>
- Bi, Y., Yuan, K., Xiao, W., Wu, J., Shi, C., Xia, J., Chu, G., Zhang, G., & Zhou, G. (2016). A local pre-processing method for near-infrared spectra, combined with spectral segmentation and standard normal variate transformation. *Analytica Chimica Acta*, 909, 30-40. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2016.01.010>
- Braga, J. W. B., Pastore, T. C. M., Coradin, V. T. R., Camargos, J. A. A., & Silva, A. R. da. (2011). The use of near Infrared Spectroscopy to Identify solid wood Specimens of *Swietenia Macrophylla* (Cites Appendix II). *IAWA Journal*, 32(2), 285-296. <https://doi.org/10.1163/22941932-90000058>
- Caldas, L. R., Saraiva, A. B., Lucena, A. F. P., Da Gloria, M. Y., Santos, A. S., & Filho, R. D. T. (2021). Building materials in a circular economy : The case of wood waste as CO<sub>2</sub>-sink in bio concrete. *Resources, Conservation and Recycling*, 166, 105346. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105346>
- Chioatto, E., & Sospiro, P. (2023). Transition from waste management to circular economy : The European Union roadmap. *Environment, Development and Sustainability*, 25(1), 249-276. <https://doi.org/10.1007/s10668-021-02050-3>
- Churkina, G., Organschi, A., Reyer, C. P. O., Ruff, A., Vinke, K., Liu, Z., Reck, B. K., Graedel, T. E., & Schellnhuber, H. J. (2020). Buildings as a global carbon sink. *Nature Sustainability*, 3(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0462-4>
- Cooper, P. A., Jeremic, D., Radivojevic, S., Ung, Y. T., & Leblon, B. (2011). Potential of near-infrared spectroscopy to characterize wood products1This article is a contribution to the series The Role of Sensors in the New Forest Products Industry and Bioeconomy. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11), 2150-2157. <https://doi.org/10.1139/x11-088>
- Cousin, S., Fleury, M., Boulday, D., Plumail, D., Defaye, S., & Fischer, C. (2017). *État de l'art de la gestion des déchets de bois en Europe*. <https://cibe.fr/cahiers-du-bois-energie/>
- Dalimier, T. (2022). *Valorisation du bois A et B en bois lamellé-collé et lamellé croisé*. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/14930>
- Dantas, T. E. T., de-Souza, E. D., Destro, I. R., Hammes, G., Rodriguez, C. M. T., & Soares, S. R. (2021). How the combination of Circular Economy and Industry 4.0 can contribute towards achieving the Sustainable Development Goals. *Sustainable Production and Consumption*, 26, 213-227. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2020.10.005>
- De Mil, T. (2022). *Cours de Sciences du bois*. Université de Liège.

- Dhanoa, M. S., Lister, S. J., Sanderson, R., & Barnes, R. J. (1994). The Link between Multiplicative Scatter Correction (MSC) and Standard Normal Variate (SNV) Transformations of NIR Spectra. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 2(1), 43-47. <https://doi.org/10.1255/jnirs.30>
- Diyamandoglu, V., & Fortuna, L. M. (2015). Deconstruction of wood-framed houses : Material recovery and environmental impact. *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 21-30. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.04.006>
- Fathurahman, T., Gunawan, P. H., Prakasa, E., & Sugiyama, J. (2021). Wood Classification of Japanese Fagaceae using Partial Sample Area and Convolutional Neural Networks. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, 49(5), 491-503. <https://doi.org/10.5658/WOOD.2021.49.5.491>
- FCBA. (2015). *Évaluation du gisement de déchet bois et son positionnement dans la filière bois/bois énergie*. La librairie ADEME. <https://librairie.ademe.fr/dechets-economie-circulaire/2821-evaluation-du-gisement-de-dechet-bois-et-son-positionnement-dans-la-filiere-bois-bois-energie.html>
- Grubb, M., Okereke, C., Arima, J., Bosetti, V., Chen, Y., Edmonds, J., Gupta, S., Köberle, A., Kverndokk, S., Malik, A., & Sulistiawati, L. (2022). *Introduction and Framing*.
- Guilet, M., & Antoine, P. (2022). *Déchets de bois en France : État des lieux et enjeux liés à leur valorisation*. <https://cibe.fr/cahiers-du-bois-energie/>
- Hasan, A. R., Solo-Gabriele, H., & Townsend, T. (2011). Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology : Part II. Sorting efficiencies. *Waste Management*, 31(4), 695-704. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.10.024>
- Honic, M., Kovacic, I., & Rechberger, H. (2019). Improving the recycling potential of buildings through Material Passports (MP) : An Austrian case study. *Journal of Cleaner Production*, 217, 787-797. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.212>
- Irle, M. (2015). *INTELLIGENT RECYCLING OF SOLID WOOD*. 11.
- Jourez, B. (2022). *Cours d'anatomie du bois*. Université de Liège.
- Kelley, S. S., Rials, T. G., Snell, R., Groom, L. H., & Sluiter, A. (2004). Use of near infrared spectroscopy to measure the chemical and mechanical properties of solid wood. *Wood Science and Technology*, 38(4), 257-276. <https://doi.org/10.1007/s00226-003-0213-5>
- Kharazipour, A., & Kües, U. (2007). Recycling of Wood Composites and Solid Wood Products. In *Wood Production, Wood Technology, and Biotechnological Impacts* (p. 509-533).
- Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the Circular Economy : An Analysis of 114 Definitions* (SSRN Scholarly Paper 3037579). <https://doi.org/10.2139/ssrn.3037579>
- Kobori, H., Gorretta, N., Rabatel, G., Bellon-Maurel, V., Chaix, G., Roger, J.-M., & Tsuchikawa, S. (2013). Applicability of Vis-NIR hyperspectral imaging for monitoring wood moisture content (MC). *Holzforschung*, 67(3), 307-314. <https://doi.org/10.1515/hf-2012-0054>
- Ma, T., Inagaki, T., Ban, M., & Tsuchikawa, S. (2019). Rapid identification of wood species by near-infrared spatially resolved spectroscopy (NIR-SRS) based on hyperspectral imaging (HSI). *Holzforschung*, 73(4), 323-330. <https://doi.org/10.1515/hf-2018-0128>
- Mora, C. R., Schimleck, L. R., Yoon, S.-C., & Thai, C. N. (2011). Determination of Basic Density and Moisture Content of Loblolly Pine Wood Disks Using a near Infrared Hyperspectral Imaging System. *Journal of Near Infrared Spectroscopy*, 19(5), 401-409.
- Muthu, S. S. (2016). *Environmental Footprints and Eco-design of Products and Processes*. <https://www.springer.com/series/13340>
- Nabuurs, G.-J., Hatab, A. A., Bustamante, M., Clark, H., Havlík, P., Ninan, K. N., Popp, A., Roe, S., Aoki, L., Angers, D., Ravindranath, N. H., Ayala-Niño, F., & Emmet-Booth, J. P. (2022). *SPM7 Agriculture, Forestry and Other Land Uses (AFOLU)*.

- Niemz, P., Teischinger, A., & Sandberg, D. (Éds.). (2023). *Springer Handbook of Wood Science and Technology*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4>
- Nunes, A., Palmeri, J., & Love, S. (2019). *Deconstruction vs. Demolition : An evaluation of carbon and energy impacts from deconstructed homes in the City of Portland Submitted to: City of Portland Bureau of Planning and Sustainability (BPS)*.
- Ramage, M. H., Burrige, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D. U., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. F., & Scherman, O. (2017). The wood from the trees : The use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *68*, 333-359. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Ramos Huarachi, D. A., Gonçalves, G., de Francisco, A. C., Canteri, M. H. G., & Piekarski, C. M. (2020). Life cycle assessment of traditional and alternative bricks : A review. *Environmental Impact Assessment Review*, *80*, 106335. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2019.106335>
- Rasem Hasan, A., Schindler, J., Solo-Gabriele, H. M., & Townsend, T. G. (2011). Online sorting of recovered wood waste by automated XRF-technology. Part I : Detection of preservative-treated wood waste. *Waste Management*, *31*(4), 688-694. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.11.010>
- Ratajczak, E., Bidzińska, G., Szostak, A., & Herbeć, M. (2015). Resources of post-consumer wood waste originating from the construction sector in Poland. *Resources, Conservation and Recycling*, *97*, 93-99. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.02.008>
- Risse, M., Weber-Blaschke, G., & Richter, K. (2019). Eco-efficiency analysis of recycling recovered solid wood from construction into laminated timber products. *Science of The Total Environment*, *661*, 107-119. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.117>
- Ross, R. J., C. Adam, S., & Zhiyong, C. (2010). *Centennial Edition, Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*. <https://www.fs.usda.gov/research/news/highlights/centennial-edition-wood-handbook-wood-engineering-material>
- Russ, A., & Fiserova, M. (2011). Estimation of hardwood species in mixture by near infrared spectroscopy. *Wood Research*, *56*, 93-104.
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ : 25 years of image analysis. *Nature Methods*, *9*(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nmeth.2089>
- Thomsen, A., Schultmann, F., & Kohler, N. (2011). Deconstruction, demolition and destruction. *Building Research & Information*, *39*(4), 327-332. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.585785>
- Trouy, M.-C., & Triboulot, P. (2019). *Matériau bois*. Techniques de l'Ingénieur. <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/construction-bois-42824210/materiau-bois-c925/>
- Van Buren, N., Demmers, M., Van der Heijden, R., & Witlox, F. (2016). Towards a Circular Economy : The Role of Dutch Logistics Industries and Governments. *Sustainability*, *8*(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/su8070647>
- Verheyen, M., Beckers, W., Claesen, E., Moonen, G., & Demeester, E. (2016). Vision-based sorting of medium density fibreboard and grade A wood waste. *2016 IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ETFA.2016.7733546>
- Villoria Saez, P. (2011). European Legislation and Implementation Measures in the Management of Construction and Demolition Waste. *The Open Construction and Building Technology Journal*, *5*(1), 156-161. <https://doi.org/10.2174/1874836801105010156>
- Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., Rooney, D. W., & Yap, P.-S. (2023). Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, *21*(1), 55-80. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6>

Yang, Z., JIANG, Z., & Lü, B. (2012). Investigation of Near Infrared Spectroscopy of Rosewood. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 32(9), 2405-2408. [https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593\(2012\)09-2405-04](https://doi.org/10.3964/j.issn.1000-0593(2012)09-2405-04)



## 9. Annexes

Annexe 1 : Photographies des différentes catégories de tri du bois par jour.



Jour 1 : Conteneur entier (Fernelmont).



Jour 1 : Bois catégorie 1 (Fernelmont).



Jour 1 : Bois catégorie 2 (Fernelmont).





Jour 1 : Bois catégorie 3 (Fernelmont).



Jour 1 : Bois catégorie 4 (Fernelmont).



Jour 1 : Bois catégorie 5 (Fernelmont).





Jour 1 : Bois catégorie 6 (premier tas) (Fernelmont).



Jour 1 : Bois catégorie 6 (deuxième tas) (Fernelmont).



Jour 3 : Bois catégorie 1 (Naninne).



Jour 3 : Bois catégorie 2 (Naninne).



Jour 3 : Bois catégorie 3 (Naninne).



Jour 3 : Bois catégorie 4 (Naninne).





Jour 3 : Bois catégorie 5 (Nanine).



Jour 3 : Bois catégorie 6 (Nanine).



Jour 4 : Conteneur entier (Ohey).



Jour 4 : Bois catégorie 1 (Ohey).



Jour 4 : Bois catégorie 2 (Ohey).



Jour 4 : Bois catégorie 3 (Ohey).





Jour 4 : Bois catégorie 4 (Ohey).



Jour 4 : Bois catégorie 5 (Ohey).



Jour 5 : Bois catégorie 1 (La Bruyère).



Jour 5 : Bois catégorie 2 (La Bruyère).



Jour 5 : Bois catégorie 3 (La Bruyère).



Jour 5 : Bois catégorie 4 (La Bruyère).





Jour 5 : Bois catégorie 6 (La Bruyère).

Annexe 2 : Ensemble des échantillons scannés au laboratoire GeMMe à Liège par les caméras 3D et SWIR.



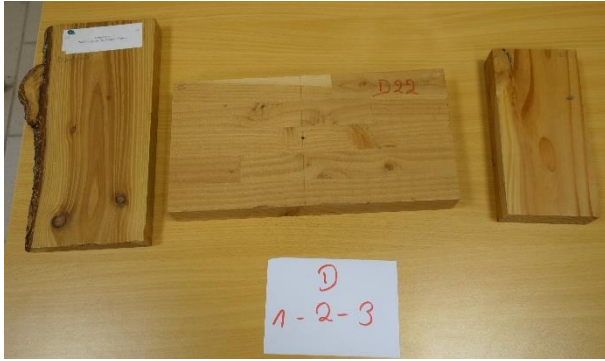
Ensemble des échantillons de bois tropicaux : (1) Afzélia (*Afzelia bipindensis*), (2) Azobé (*Lophira alata*), (3) Wengé (*Milletia laurentii*).



Ensemble des échantillons de panneaux particules : (1) MDF, (2) Panneaux particules, (3) OSB



Ensemble des échantillons de bois feuillu : (1) Chêne (*Quercus robur*), (2) Hêtre (*Fagus sylvatica*).



Ensemble des échantillons de bois résineux : (1) Douglas (*Pseudotsuga menziesii*), (2) Épicéa traité (*Picea abies*).

### Annexe 3 : Code Python permettant d'obtenir les graphiques de l'intensité de réflectance, du pourcentage de réflectance et des courbes SNV en fonction des longueurs d'ondes.

La base du code a été réalisée Dominik Zians (chercheur au laboratoire GeMME à Liège) et modifié par l'étudiante.

```
1 import spectral
2 from PIL import Image
3 import numpy as np
4
5 from matplotlib import pyplot as plt
6
7
8 dir_name = r"C:\Users\flore\Desktop\TFE\acquisition_bois"
9
10
11 #Conversion Tiff 3D aux dimensions RAW
12 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
13 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
14 Image.fromarray(img_swir1[:, :, 0]).save(f'{dir_name}/batch1_swir_channel0.tiff')
15
16 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
17 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
18 Image.fromarray(img_swir2[:, :, 0]).save(f'{dir_name}/batch2_swir_channel0.tiff')
19
20 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
21 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
22 Image.fromarray(img_swir3[:, :, 0]).save(f'{dir_name}/batch3_swir_channel0.tiff')
23
24 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
25 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
26 Image.fromarray(img_swir4[:, :, 0]).save(f'{dir_name}/batch4_swir_channel0.tiff')
27
28 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
29 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
30 Image.fromarray(img_swir5[:, :, 0]).save(f'{dir_name}/batch5_swir_channel0.tiff')
31
32 #Graphique de courbes : Hêtre
33 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
34 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
35 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
36
37 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
38 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
39 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
40 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[3611:4056, 15:163, :].mean(axis=0, 1)), label='Hêtre 1')
41 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8559:9346, 160:218, :].mean(axis=0, 1)), label='Hêtre 2')
42 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8022:8290, 12:341, :].mean(axis=0, 1)), label='Hêtre 3')
43 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
44 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
45 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
46 plt.title("Courbes de réflectance du Hêtre")
47 plt.grid(True)
48 plt.show()
49
50 #Graphique % réflectance : Hêtre
51 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
52 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
53 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
54
55 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
56 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
57 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
58 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[3611:4056, 15:163, :].mean(axis=0, 1))/655.35, label='Hêtre 1')
59 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8559:9346, 160:218, :].mean(axis=0, 1))/655.35, label='Hêtre 2')
60 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8022:8290, 12:341, :].mean(axis=0, 1))/655.35, label='Hêtre 3')
61 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
62 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
63 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
64 plt.title("Courbes de réflectance du Hêtre")
65 plt.grid(True)
66 plt.show()
67
68 #SNV Hêtre
69 # Charger les données spectrales
70 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
71 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
72 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
73
74 # Calculer et appliquer le SNV aux données
75 def snv(spectra):
76     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
77     return corr_spectra
78
79 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
80 y_values_hetre1_snv = snv(img_swir2[3611:4056, 15:163, :].mean(axis=0, 1))
81 y_values_hetre2_snv = snv(img_swir1[8559:9346, 160:218, :].mean(axis=0, 1))
82 y_values_hetre3_snv = snv(img_swir1[8022:8290, 12:341, :].mean(axis=0, 1))
83
84 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
85 plt.figure(figsize=(10, 6))
86
87 # Tracer les courbes SNV
88 plt.plot(wavelengths2, y_values_hetre1_snv, label='Hêtre 1 (SNV)')
89 plt.plot(wavelengths1, y_values_hetre2_snv, label='Hêtre 2 (SNV)')
90 plt.plot(wavelengths1, y_values_hetre3_snv, label='Hêtre 3 (SNV)')
91
92 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
93 plt.ylabel("SNV")
94 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
95 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du Hêtre")
96 plt.grid(True)
97 plt.show()
98
```

```

99 #Graphique de courbes : Chêne
100 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
101 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
102 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
103
104 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
105 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
106 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
107
108 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
109 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
110 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
111
112 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[7489:7869, 37:324, :].mean(axis=(0, 1)), label='Chêne 1')
113 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3408:5370, 329:346, :].mean(axis=(0, 1)), label='Chêne 2')
114 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4267:4323, 13:212, :].mean(axis=(0, 1)), label='Chêne 3')
115 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
116 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
117 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
118 plt.title("Courbes de réflectance du Chêne")
119 plt.grid(True)
120 plt.show()
121
122 #Graphique % réflectance : Chêne
123 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
124 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
125 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
126
127 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
128 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
129 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
130
131 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
132 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
133 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
134
135 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[7489:7869, 37:324, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Chêne 1')
136 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3408:5370, 329:346, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Chêne 2')
137 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4267:4323, 13:212, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Chêne 3')
138 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
139 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
140 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
141 plt.title("Courbes de réflectance du Chêne")
142 plt.grid(True)
143 plt.show()
144
145 #SNV Chêne
146 # Charger les données spectrales
147 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
148 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
149 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
150
151 # Calculer et appliquer le SNV aux données
152 def snv(spectra):
153     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
154     return corr_spectra
155
156 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
157 y_values_chêne1_snv = snv(img_swir1[7489:7869, 37:324, :].mean(axis=(0, 1)))
158 y_values_chêne2_snv = snv(img_swir5[3408:5370, 329:346, :].mean(axis=(0, 1)))
159 y_values_chêne3_snv = snv(img_swir2[4267:4323, 13:212, :].mean(axis=(0, 1)))
160
161 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
162 plt.figure(figsize=(10, 6))
163
164 # Tracer les courbes SNV
165 plt.plot(wavelengths1, y_values_chêne1_snv, label='Chêne 1 (SNV)')
166 plt.plot(wavelengths5, y_values_chêne2_snv, label='Chêne 2 (SNV)')
167 plt.plot(wavelengths2, y_values_chêne3_snv, label='Chêne 3 (SNV)')
168
169 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
170 plt.ylabel("SNV")
171 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0)
172 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du Chêne")
173 plt.grid(True)
174 plt.show()
175
176 #Graphique de courbes : Douglas
177 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
178 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
179 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
180
181
182 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
183 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
184 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
185
186 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8519:9503, 29:88, :].mean(axis=(0, 1)), label='Douglas 1')
187 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3356:4408, 224:286, :].mean(axis=(0, 1)), label='Douglas 2')
188 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8630:9325, 274:318, :].mean(axis=(0, 1)), label='Douglas 3')
189
190
191 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
192 plt.ylabel("Intensité")
193 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.30, 0.5), loc='upper right')
194 plt.title("Courbes de réflectance du Douglas")
195 plt.grid(True)
196 plt.show()

```



```

198 #Graphique % : Douglas
199 spec_img1 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch1.hdr')
200 wavelengths1 = spec_img1.bands.centers
201 img_swir1 = np.array(spec_img1[:, :, :])
202
203
204 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
205 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
206 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
207
208 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8519:9503, 29:88, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Douglas 1')
209 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3356:4408, 224:286, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Douglas 2')
210 plt.plot(wavelengths1, img_swir1[8630:9325, 274:318, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Douglas 3')
211
212
213 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
214 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
215 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.30, 0.5), loc='upper right')
216 plt.title("Courbes de réflectance du Douglas")
217 plt.grid(True)
218 plt.show()
219
220 #SNV Douglas
221 # Charger les données spectrales
222 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
223 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
224 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
225
226 # Calculer et appliquer le SNV aux données
227 def snv(spectra):
228     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
229     return corr_spectra
230
231 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyennes
232 y_values_douglas1_snv = snv(img_swir1[8519:9503, 29:88, :].mean(axis=(0, 1)))
233 y_values_douglas2_snv = snv(img_swir5[3356:4408, 224:286, :].mean(axis=(0, 1)))
234 y_values_douglas3_snv = snv(img_swir1[8630:9325, 274:318, :].mean(axis=(0, 1)))
235
236 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
237 plt.figure(figsize=(10, 6))
238
239 # Tracer les courbes SNV
240 plt.plot(wavelengths1, y_values_douglas1_snv, label='Douglas 1 (SNV)')
241 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas2_snv, label='Douglas 2 (SNV)')
242 plt.plot(wavelengths1, y_values_douglas3_snv, label='Douglas 3 (SNV)')
243
244 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
245 plt.ylabel("SNV")
246 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
247 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du Douglas")
248 plt.grid(True)
249 plt.show()
250
251 #Graphique de courbes : Épicéa
252 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
253 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
254 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
255
256 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4552:4751, 17:123, :].mean(axis=(0, 1)), label='Épicéa traité 1')
257 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[5049:5208, 20:120, :].mean(axis=(0, 1)), label='Épicéa traité 2')
258 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4457:4861, 176:337, :].mean(axis=(0, 1)), label='Épicéa traité 3')
259
260 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
261 plt.ylabel("Intensité")
262 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.35, 0.5), loc='upper right')
263 plt.title("Courbes de réflectance de l'Épicéa traité")
264 plt.grid(True)
265 plt.show()
266
267 #Graphique % : Épicéa
268 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
269 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
270 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
271
272 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4552:4751, 17:123, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Épicéa traité 1')
273 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[5049:5208, 20:120, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Épicéa traité 2')
274 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[4457:4861, 176:337, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Épicéa traité 3')
275
276 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
277 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
278 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.35, 0.5), loc='upper right')
279 plt.title("Courbes de réflectance de l'Épicéa traité")
280 plt.grid(True)
281 plt.show()
282
283 #SNV
284 # Charger les données spectrales
285 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
286 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
287 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
288
289 # Calculer et appliquer le SNV aux données
290 def snv(spectra):
291     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
292     return corr_spectra
293
294 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
295 y_values_epicea1_traite_snv = snv(img_swir2[4552:4751, 17:123, :].mean(axis=(0, 1)))
296 y_values_epicea2_traite_snv = snv(img_swir2[5049:5208, 20:120, :].mean(axis=(0, 1)))
297 y_values_epicea3_traite_snv = snv(img_swir2[4457:4861, 176:337, :].mean(axis=(0, 1)))
298
299 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
300 plt.figure(figsize=(10, 6))
301
302 # Tracer les courbes SNV
303 plt.plot(wavelengths2, y_values_epicea1_traite_snv, label='Épicéa traité 1 (SNV)')
304 plt.plot(wavelengths2, y_values_epicea2_traite_snv, label='Épicéa traité 2 (SNV)')
305 plt.plot(wavelengths2, y_values_epicea3_traite_snv, label='Épicéa traité 3 (SNV)')
306
307 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
308 plt.ylabel("SNV")
309 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
310 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance de l'Épicéa traité")
311 plt.grid(True)
312 plt.show()
313
314 #Graphique de courbes : OSB
315 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
316 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
317 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
318
319 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
320 wavelengths4 = spec_img4.bands.centers
321 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
322
323 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[4750:5095, 38:284, :].mean(axis=(0, 1)), label='OSB 1')
324 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[4045:4315, 38:262, :].mean(axis=(0, 1)), label='OSB 2')
325 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[5057:5261, 153:337, :].mean(axis=(0, 1)), label='OSB 3')
326
327 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
328 plt.ylabel("Intensité")
329 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
330 plt.title("Courbes de réflectance de l'OSB")
331 plt.grid(True)
332 plt.show()

```

```

334 #Graphique % : OSB
335 spec_img2 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch2.hdr')
336 wavelengths2 = spec_img2.bands.centers
337 img_swir2 = np.array(spec_img2[:, :, :])
338
339 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
340 wavelengths4 = spec_img4.bands.centers
341 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
342
343 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[4750:5095, 38:284, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='OSB 1')
344 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[4045:4315, 38:262, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='OSB 2')
345 plt.plot(wavelengths2, img_swir2[5057:5261, 153:337, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='OSB 3')
346
347 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
348 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
349 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
350 plt.title("Courbes de réflectance de l'OSB")
351 plt.grid(True)
352 plt.show()
353
354 #SNV
355 # Charger les données spectrales
356 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
357 wavelengths4 = spec_img4.bands.centers
358 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
359
360 # Calculer et appliquer le SNV aux données
361 def snv(spectra):
362     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
363     return corr_spectra
364
365 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
366 y_values_osb1_snv = snv(img_swir4[4750:5095, 38:284, :].mean(axis=(0, 1)))
367 y_values_osb2_snv = snv(img_swir4[4045:4315, 38:262, :].mean(axis=(0, 1)))
368 y_values_osb3_snv = snv(img_swir2[5057:5261, 153:337, :].mean(axis=(0, 1)))
369
370 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
371 plt.figure(figsize=(10, 6))
372
373 # Tracer les courbes SNV
374 plt.plot(wavelengths4, y_values_osb1_snv, label='OSB 1 (SNV)')
375 plt.plot(wavelengths4, y_values_osb2_snv, label='OSB 2 (SNV)')
376 plt.plot(wavelengths2, y_values_osb3_snv, label='OSB 3 (SNV)')
377
378 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
379 plt.ylabel("SNV")
380 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
381 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance de l'OSB")
382 plt.grid(True)
383 plt.show()
384
385 #Graphique de courbes : Afzélia
386 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
387 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
388 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
389
390 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3885:4236, 240:328, :].mean(axis=(0, 1)), label='Afzélia 1')
391 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3781:4135, 102:187, :].mean(axis=(0, 1)), label='Afzélia 2')
392 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4317:4673, 24:100, :].mean(axis=(0, 1)), label='Afzélia 3')
393
394 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
395 plt.ylabel("Intensité")
396 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
397 plt.title("Courbes de réflectance de l'Afzélia")
398 plt.grid(True)
399 plt.show()
400
401 #Graphique % : Afzélia
402 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
403 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
404 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
405
406 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3885:4236, 240:328, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Afzélia 1')
407 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3781:4135, 102:187, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Afzélia 2')
408 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4317:4673, 24:100, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Afzélia 3')
409
410 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
411 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
412 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
413 plt.title("Courbes de réflectance de l'Afzélia")
414 plt.grid(True)
415 plt.show()
416
417 #SNV
418 # Charger les données spectrales
419 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
420 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
421 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
422
423 # Calculer et appliquer le SNV aux données
424 def snv(spectra):
425     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
426     return corr_spectra
427
428 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
429 y_values_afzelia1_snv = snv(img_swir3[3885:4236, 240:328, :].mean(axis=(0, 1)))
430 y_values_afzelia2_snv = snv(img_swir3[3781:4135, 102:187, :].mean(axis=(0, 1)))
431 y_values_afzelia3_snv = snv(img_swir3[4317:4673, 24:100, :].mean(axis=(0, 1)))
432
433 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
434 plt.figure(figsize=(10, 6))
435
436 # Tracer les courbes SNV
437 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia1_snv, label='Afzélia 1 (SNV)')
438 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia2_snv, label='Afzélia 2 (SNV)')
439 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia3_snv, label='Afzélia 3 (SNV)')
440
441 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
442 plt.ylabel("SNV")
443 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
444 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance de l'Afzélia")
445 plt.grid(True)
446 plt.show()

```

```

448 #Graphique de courbes : Azobé
449 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
450 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
451 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
452
453 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4899:5221, 162:178, :].mean(axis=(0, 1)), label='Azobé 1')
454 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4837:5220, 218:240, :].mean(axis=(0, 1)), label='Azobé 2')
455 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4818:5207, 277:303, :].mean(axis=(0, 1)), label='Azobé 3')
456
457 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
458 plt.ylabel("Intensité")
459 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
460 plt.title("Courbes de réflectance de l'Azobé")
461 plt.grid(True)
462 plt.show()
463
464 #Graphique % : Azobé
465 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
466 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
467 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
468
469 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4899:5221, 162:178, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Azobé 1')
470 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4837:5220, 218:240, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Azobé 2')
471 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4818:5207, 277:303, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Azobé 3')
472
473 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
474 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
475 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
476 plt.title("Courbes de réflectance de l'Azobé")
477 plt.grid(True)
478 plt.show()
479
480 #SNV
481 # Charger les données spectrales
482 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
483 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
484 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
485
486 # Calculer et appliquer le SNV aux données
487 def snv(spectra):
488     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
489     return corr_spectra
490
491 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
492 y_values_azobe1_snv = snv(img_swir3[4899:5221, 162:178, :].mean(axis=(0, 1)))
493 y_values_azobe2_snv = snv(img_swir3[4837:5220, 218:240, :].mean(axis=(0, 1)))
494 y_values_azobe3_snv = snv(img_swir3[4818:5207, 277:303, :].mean(axis=(0, 1)))
495
496 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
497 plt.figure(figsize=(10, 6))
498
499 # Tracer les courbes SNV
500 plt.plot(wavelengths3, y_values_azobe1_snv, label='Azobé 1 (SNV)')
501 plt.plot(wavelengths3, y_values_azobe2_snv, label='Azobé 2 (SNV)')
502 plt.plot(wavelengths3, y_values_azobe3_snv, label='Azobé 3 (SNV)')
503
504 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
505 plt.ylabel("SNV")
506 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
507 plt.title("Standard Normal Variate courbes de réflectance de l'Azobé")
508 plt.grid(True)
509 plt.show()
510
511 #Graphique de courbes : MDF
512 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
513 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
514 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
515
516 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
517 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
518 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
519
520 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3309:4112, 17:172, :].mean(axis=(0, 1)), label='MDF 1')
521 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3172:3643, 185:293, :].mean(axis=(0, 1)), label='MDF2')
522 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3279:3593, 6:145, :].mean(axis=(0, 1)), label='MDF3')
523 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
524 plt.ylabel("Intensité")
525 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
526 plt.title("Courbes de réflectance du MDF")
527 plt.grid(True)
528 plt.show()
529
530 #Graphique % : MDF
531 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
532 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
533 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
534
535 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
536 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
537 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
538
539 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[3309:4112, 17:172, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='MDF 1')
540 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3172:3643, 185:293, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='MDF2')
541 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3279:3593, 6:145, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='MDF3')
542 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
543 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
544 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.25, 0.5), loc='upper right')
545 plt.title("Courbes de réflectance du MDF")
546 plt.grid(True)
547 plt.show()
548

```



```

549 #SNV
550 # Charger les données spectrales
551 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
552 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
553 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
554
555 # Calculer et appliquer le SNV aux données
556 def snv(spectra):
557     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
558     return corr_spectra
559
560 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
561 y_values_mdf1_snv = snv(img_swir5[3309:4112, 17:172, :].mean(axis=(0, 1)))
562 y_values_mdf2_snv = snv(img_swir3[3172:3643, 185:293, :].mean(axis=(0, 1)))
563 y_values_mdf3_snv = snv(img_swir3[3279:3593, 6:145, :].mean(axis=(0, 1)))
564
565 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
566 plt.figure(figsize=(10, 6))
567
568 # Tracer les courbes SNV
569 plt.plot(wavelengths5, y_values_mdf1_snv, label='MDF 1 (SNV)')
570 plt.plot(wavelengths3, y_values_mdf2_snv, label='MDF 2 (SNV)')
571 plt.plot(wavelengths3, y_values_mdf3_snv, label='MDF 3 (SNV)')
572
573 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
574 plt.ylabel("SNV")
575 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
576 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du MDF")
577 plt.grid(True)
578 plt.show()
579
580 #Graphique de courbes : Panneau de particules
581 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
582 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
583 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
584
585 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
586 wavelengths4 = spec_img4.bands.centers
587 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
588
589 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
590 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
591 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
592
593 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[4388:5360, 28:150, :].mean(axis=(0, 1)), label='Panneau de particules 1')
594 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[3260:3927, 221:321, :].mean(axis=(0, 1)), label='Panneau de particules 2')
595 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4350:4648, 147:216, :].mean(axis=(0, 1)), label='Panneau de particules 3')
596
597 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
598 plt.ylabel("Intensité")
599 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.5, 0.5), loc='upper right')
600 plt.title("Courbes de réflectance du panneau de particules")
601 plt.grid(True)
602 plt.show()
603
604 #Graphique % : Panneau de particules
605 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
606 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
607 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
608
609 spec_img4 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch4.hdr')
610 wavelengths4 = spec_img4.bands.centers
611 img_swir4 = np.array(spec_img4[:, :, :])
612
613 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
614 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
615 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
616
617 plt.plot(wavelengths5, img_swir5[4388:5360, 28:150, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Panneau de particules 1')
618 plt.plot(wavelengths4, img_swir4[3260:3927, 221:321, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Panneau de particules 2')
619 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4350:4648, 147:216, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Panneau de particules 3')
620
621 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
622 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
623 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.5, 0.5), loc='upper right')
624 plt.title("Courbes de réflectance du panneau de particules")
625 plt.grid(True)
626 plt.show()
627
628 #SNV
629 # Charger les données spectrales
630 spec_img5 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch5.hdr')
631 wavelengths5 = spec_img5.bands.centers
632 img_swir5 = np.array(spec_img5[:, :, :])
633
634 # Calculer et appliquer le SNV aux données
635 def snv(spectra):
636     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
637     return corr_spectra
638
639 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
640 y_values_pp1_snv = snv(img_swir5[4388:5360, 28:150, :].mean(axis=(0, 1)))
641 y_values_pp2_snv = snv(img_swir4[3260:3927, 221:321, :].mean(axis=(0, 1)))
642 y_values_pp3_snv = snv(img_swir3[4350:4648, 147:216, :].mean(axis=(0, 1)))
643
644 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
645 plt.figure(figsize=(10, 6))
646
647 # Tracer les courbes SNV
648 plt.plot(wavelengths5, y_values_pp1_snv, label='Panneau de particules 1 (SNV)')
649 plt.plot(wavelengths4, y_values_pp2_snv, label='Panneau de particules 2 (SNV)')
650 plt.plot(wavelengths3, y_values_pp3_snv, label='Panneau de particules 3 (SNV)')
651
652 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
653 plt.ylabel("SNV")
654 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
655 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du panneau de particules")
656 plt.grid(True)
657 plt.show()
658
659 #Graphique de courbes : Wengé
660 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
661 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
662 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
663
664 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4880:5267, 26:47, :].mean(axis=(0, 1)), label='Wengé 1')
665 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4857:5254, 88:110, :].mean(axis=(0, 1)), label='Wengé 2')
666 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3255:3558, 332:355, :].mean(axis=(0, 1)), label='Wengé 3')
667
668 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
669 plt.ylabel("Intensité")
670 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
671 plt.title("Courbes de réflectance du Wengé")
672 plt.grid(True)
673 plt.show()
674
675

```

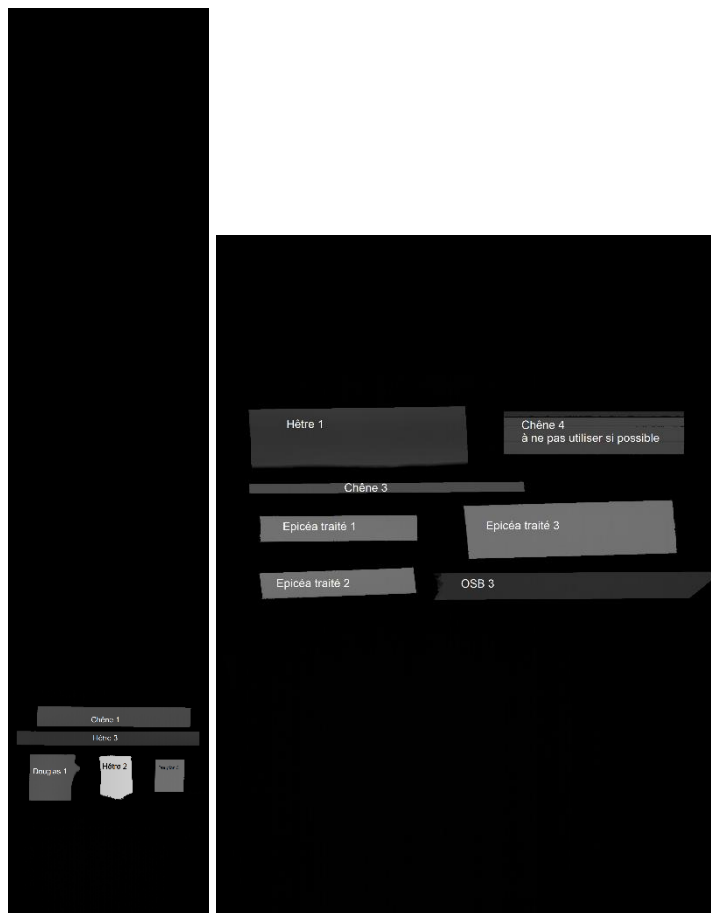
```

677 #Graphique % : Wengé
678 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
679 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
680 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
681
682 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4880:5267, 26:47, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Wengé 1')
683 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[4857:5254, 88:110, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Wengé 2')
684 plt.plot(wavelengths3, img_swir3[3255:3558, 332:355, :].mean(axis=(0, 1))/655.35, label='Wengé 3')
685
686 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
687 plt.ylabel("Pourcentage de réflectance (%)")
688 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.27, 0.5), loc='upper right')
689 plt.title("Courbes de réflectance du Wengé")
690 plt.grid(True)
691 plt.show()
692
693 #SNV Wengé
694 # Charger les données spectrales
695 spec_img3 = spectral.open_image(f'{dir_name}/batch3.hdr')
696 wavelengths3 = spec_img3.bands.centers
697 img_swir3 = np.array(spec_img3[:, :, :])
698
699 # Calculer et appliquer le SNV aux données
700 def snv(spectra):
701     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
702     return corr_spectra
703
704 # Appliquer le SNV aux données de réflectance moyenne
705 y_values_wenge1_snv = snv(img_swir3[4880:5267, 26:47, :].mean(axis=(0, 1)))
706 y_values_wenge2_snv = snv(img_swir3[4857:5254, 88:110, :].mean(axis=(0, 1)))
707 y_values_wenge3_snv = snv(img_swir3[3255:3558, 332:355, :].mean(axis=(0, 1)))
708
709 # Créer un nouveau graphique pour le SNV
710 plt.figure(figsize=(10, 6))
711
712 # Tracer les courbes SNV
713 plt.plot(wavelengths3, y_values_wenge1_snv, label='Wengé 1 (SNV)')
714 plt.plot(wavelengths3, y_values_wenge2_snv, label='Wengé 2 (SNV)')
715 plt.plot(wavelengths3, y_values_wenge3_snv, label='Wengé 3 (SNV)')
716
717 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
718 plt.ylabel("SNV")
719 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
720 plt.title("Standard Normal Variate des courbes de réflectance du Wengé")
721 plt.grid(True)
722 plt.show()
723
724 #Graphiques que bois massif
725 # Moyenne des courbes SNV pour chaque catégorie bois massif
726 y_values_afzelia_mean_snv = np.mean([y_values_afzelia1_snv, y_values_afzelia2_snv, y_values_afzelia3_snv], axis=0)
727 y_values_azobe_mean_snv = np.mean([y_values_azobe1_snv, y_values_azobe2_snv, y_values_azobe3_snv], axis=0)
728 y_values_chene_mean_snv = np.mean([y_values_chene1_snv, y_values_chene2_snv, y_values_chene3_snv], axis=0)
729 y_values_douglas_mean_snv = np.mean([y_values_douglas1_snv, y_values_douglas2_snv, y_values_douglas3_snv], axis=0)
730 y_values_hetre_mean_snv = np.mean([y_values_hetre1_snv, y_values_hetre2_snv, y_values_hetre3_snv], axis=0)
731 y_values_epicea_traite_mean_snv = np.mean([y_values_epicea1_traite_snv, y_values_epicea2_traite_snv, y_values_epicea3_traite_snv], axis=0)
732 y_values_wenge_mean_snv = np.mean([y_values_wenge1_snv, y_values_wenge2_snv, y_values_wenge3_snv], axis=0)
733
734 # Créer un nouveau graphique pour les courbes moyennes SNV
735 plt.figure(figsize=(10, 6))
736
737 # Tracer les courbes moyennes SNV pour chaque catégorie
738 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia_mean_snv, label='Moyenne Afzélia (SNV)')
739 plt.plot(wavelengths3, y_values_azobe_mean_snv, label='Moyenne Azobé (SNV)')
740 plt.plot(wavelengths3, y_values_chene_mean_snv, label='Moyenne Chêne (SNV)')
741 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
742 plt.plot(wavelengths1, y_values_hetre_mean_snv, label='Moyenne Hêtre (SNV)')
743 plt.plot(wavelengths3, y_values_epicea_traite_mean_snv, label='Moyenne Epicea traité (SNV)')
744 plt.plot(wavelengths3, y_values_wenge_mean_snv, label='Moyenne Wengé (SNV)')
745
746 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
747 plt.ylabel("SNV")
748 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
749 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) par catégorie de bois massif")
750 plt.grid(True)
751 plt.show()
752
753 #Graphique que panneaux
754 #moyenne pour panneaux
755 y_values_mdf_mean_snv = np.mean([y_values_mdf1_snv, y_values_mdf2_snv, y_values_mdf3_snv], axis=0)
756 y_values_osb_mean_snv = np.mean([y_values_osb1_snv, y_values_osb2_snv, y_values_osb3_snv], axis=0)
757 y_values_pp_mean_snv = np.mean([y_values_pp1_snv, y_values_pp2_snv, y_values_pp3_snv], axis=0)
758
759 # Créer un nouveau graphique pour les courbes moyennes SNV
760 plt.figure(figsize=(10, 6))
761
762 # Tracer les courbes moyennes SNV pour chaque catégorie
763 plt.plot(wavelengths5, y_values_mdf_mean_snv, label='Moyenne MDF (SNV)')
764 plt.plot(wavelengths4, y_values_osb_mean_snv, label='Moyenne OSB (SNV)')
765 plt.plot(wavelengths5, y_values_pp_mean_snv, label='Moyenne Panneau particules (SNV)')
766
767 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
768 plt.ylabel("SNV")
769 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
770 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) par catégorie de panneaux de bois")
771 plt.grid(True)
772 plt.show()
773
774 #Graphique des 18 catégories
775 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia_mean_snv, label='Moyenne Afzélia (SNV)')
776 plt.plot(wavelengths3, y_values_azobe_mean_snv, label='Moyenne Azobé (SNV)')
777 plt.plot(wavelengths5, y_values_chene_mean_snv, label='Moyenne Chêne (SNV)')
778 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
779 plt.plot(wavelengths1, y_values_hetre_mean_snv, label='Moyenne Hêtre (SNV)')
780 plt.plot(wavelengths3, y_values_epicea_traite_mean_snv, label='Moyenne Epicea traité (SNV)')
781 plt.plot(wavelengths3, y_values_wenge_mean_snv, label='Moyenne Wengé (SNV)')
782 plt.plot(wavelengths5, y_values_mdf_mean_snv, label='Moyenne MDF (SNV)')
783 plt.plot(wavelengths4, y_values_osb_mean_snv, label='Moyenne OSB (SNV)')
784 plt.plot(wavelengths5, y_values_pp_mean_snv, label='Moyenne Panneau particules (SNV)')
785 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
786 plt.ylabel("SNV")
787 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
788 plt.grid(True)
789 plt.show()
790
791 #Graphique MDF et 3 bois massif
792 #tracer courbes moyennes des classes
793 plt.plot(wavelengths5, y_values_mdf_mean_snv, label='Moyenne MDF (SNV)')
794 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia_mean_snv, label='Moyenne Afzélia (SNV)')
795 plt.plot(wavelengths5, y_values_chene_mean_snv, label='Moyenne Chêne (SNV)')
796 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
797 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
798 plt.ylabel("SNV")
799 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
800 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) du MDF et de trois essences de bois massif")
801 plt.grid(True)
802 plt.show()
803
804 #Graphique OSB et 3 bois massif
805 plt.plot(wavelengths4, y_values_osb_mean_snv, label='Moyenne OSB (SNV)')
806 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia_mean_snv, label='Moyenne Afzélia (SNV)')
807 plt.plot(wavelengths5, y_values_chene_mean_snv, label='Moyenne Chêne (SNV)')
808 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
809 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
810 plt.ylabel("SNV")
811 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
812 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) de l'OSB et de trois essences de bois massif")
813 plt.grid(True)
814 plt.show()
815
816 #Graphique Panneau particules et 3 bois massif
817 plt.plot(wavelengths5, y_values_pp_mean_snv, label='Moyenne Panneau particules (SNV)')
818 plt.plot(wavelengths3, y_values_afzelia_mean_snv, label='Moyenne Afzélia (SNV)')
819 plt.plot(wavelengths5, y_values_chene_mean_snv, label='Moyenne Chêne (SNV)')
820 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
821 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
822 plt.ylabel("SNV")
823 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
824 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) du Panneau particules et de trois essences de bois massif")
825 plt.grid(True)
826 plt.show()

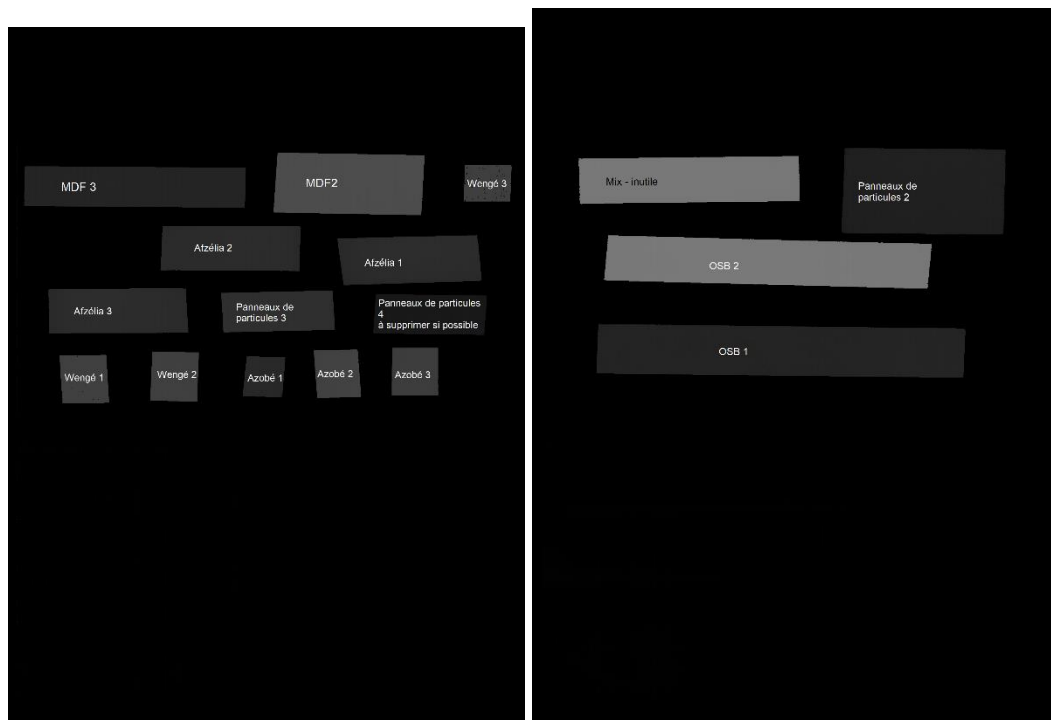
```

```
828 #Graphique résineux
829 plt.plot(wavelengths5, y_values_douglas_mean_snv, label='Moyenne Douglas (SNV)')
830 plt.plot(wavelengths2, y_values_epicea_traité_mean_snv, label='Moyenne Épicéa traité (SNV)')
831 plt.xlabel("Longueurs d'ondes (nm)")
832 plt.ylabel("SNV")
833 plt.legend(bbox_to_anchor=(1.03, 0.5), loc='center left', borderaxespad=0.)
834 plt.title("Courbes de réflectance moyenne (SNV) du Douglas et de l'Épicéa traité")
835 plt.grid(True)
836 plt.show()
```

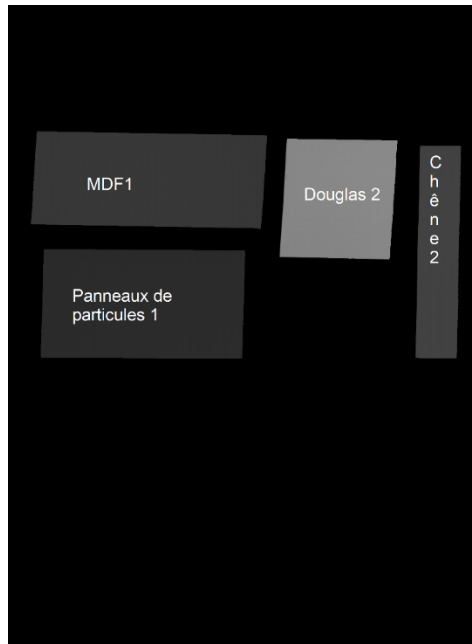
Annexe 4 : Images .TIFF des cinq groupes d'échantillons scannés par la caméra 3D et images .TIFF modifiés à la dimension des fichiers RAW.



Groupe 1 (gauche) et groupe 2 (droite).



Groupe 3 (gauche) et groupe 4 (droite)



Groupe 5



Groupes 1 à 5 (de gauche à droite) dans les dimensions des fichiers RAW.

## Annexe 5 : Code Python utilisé pour la classification SVC, l'optimisation des hyperparamètres, la matrice de confusion, les calculs de précisions et de rappel.

La base du code a été réalisée par Benjamin Delvoye et modifié par l'étudiante.

```

1 import os
2 import spectral
3 import xml.etree.ElementTree as ET
4 from PIL import Image
5 import numpy as np
6 import seaborn as sns
7 import plotly.graph_objects as go
8 import plotly.figure_factory as ff
9 from sklearn.decomposition import PCA
10 from sklearn.model_selection import GridSearchCV
11 from sklearn.metrics import confusion_matrix, precision_score, recall_score, precision_recall_curve, roc_curve
12 from sklearn.preprocessing import label_binarize
13
14 from collections import Counter
15
16 from matplotlib import pyplot as plt
17
18
19
20 dir_src_swir = 'C:\\Users\\flore\\Desktop\\TFE\\acquisition_bois\\data\\swir'
21 dir_swir_tiff = 'C:\\Users\\flore\\Desktop\\TFE\\acquisition_bois\\data\\swir\\tiff'
22
23 labels = ['Afgalia', 'Azobe', 'Chene', 'Douglas', 'EpiceaTraite', 'Hatre', 'MRS', 'OSB', 'PanneauParticules', 'Menge']
24 x = [952.367928, 957.819231, 963.270533, 968.721835, 974.173137, 979.624439, 985.075742, 990.527044, 995.978346,
25 1001.429648, 1006.880951, 1012.332253, 1017.783555, 1023.234857, 1028.686160, 1034.137462, 1039.588764,
26 1045.040066, 1050.491369, 1055.942671, 1061.393973, 1066.845275, 1072.296578, 1077.747880, 1083.199182,
27 1088.650484, 1094.101787, 1099.553089, 1105.004391, 1110.455693, 1115.906995, 1121.358298, 1126.809600,
28 1132.260902, 1137.712204, 1143.163507, 1148.614809, 1154.066111, 1159.517413, 1164.968716, 1170.420018,
29 1175.871320, 1181.322622, 1186.773925, 1192.225227, 1197.676529, 1203.127831, 1208.579134, 1214.030436,
30 1219.481738, 1224.933040, 1230.384343, 1235.835645, 1241.286947, 1246.738249, 1252.189551, 1257.640854,
31 1263.092156, 1268.543458, 1273.994760, 1279.446063, 1284.897365, 1290.348667, 1295.799969, 1301.251272,
32 1306.702574, 1312.153876, 1317.605178, 1323.056481, 1328.507783, 1333.959085, 1339.410387, 1344.861690,
33 1350.312992, 1355.764294, 1361.215596, 1366.666899, 1372.118201, 1377.569503, 1383.020805, 1388.472108,
34 1393.923410, 1399.374712, 1404.826014, 1410.277316, 1415.728619, 1421.179921, 1426.631223, 1432.082525,
35 1437.533828, 1442.985130, 1448.436432, 1453.887734, 1459.339037, 1464.790339, 1470.241641, 1475.692943,
36 1481.144246, 1486.595548, 1492.046850, 1497.498152, 1502.949455, 1508.400757, 1513.852059, 1519.303361,
37 1524.754664, 1530.205966, 1535.657268, 1541.108570, 1546.559872, 1552.011175, 1557.462477, 1562.913779,
38 1568.365081, 1573.816384, 1579.267686, 1584.718988, 1590.170290, 1595.621593, 1601.072895, 1606.524197,
39 1611.975499, 1617.426802, 1622.878104, 1628.329406, 1633.780708, 1639.232011, 1644.683313, 1650.134615,
40 1655.585917, 1661.037220, 1666.488522, 1671.939824, 1677.391126, 1682.842428, 1688.293731, 1693.745033,
41 1699.196335, 1704.647637, 1710.098940, 1715.550242, 1721.001544, 1726.452846, 1731.904149, 1737.355451,
42 1742.806753, 1748.258055, 1753.709358, 1759.160660, 1764.611962, 1770.063264, 1775.514567, 1780.965869,
43 1786.417171, 1791.868473, 1797.319776, 1802.771078, 1808.222380, 1813.673682, 1819.124985, 1824.576288,
44 1830.027589, 1835.478891, 1840.930193, 1846.381496, 1851.832798, 1857.284100, 1862.735402, 1868.186705,
45 1873.638007, 1879.089309, 1884.540611, 1889.991914, 1895.443216, 1900.894518, 1906.345820, 1911.797123,
46 1917.248425, 1922.699727, 1928.151029, 1933.602332, 1939.053634, 1944.504936, 1949.956238, 1955.407541,
47 1960.858843, 1966.310145, 1971.761447, 1977.212749, 1982.664052, 1988.115354, 1993.566656, 1999.017958,
48 2004.469261, 2009.920563, 2015.371865, 2020.823167, 2026.274470, 2031.725772, 2037.177074, 2042.628376,
49 2048.079679, 2053.530981, 2058.982283, 2064.433585, 2069.884888, 2075.336190, 2080.787492, 2086.238794,
50 2091.690097, 2097.141399, 2102.592701, 2108.044003, 2113.495306, 2118.946608, 2124.397910, 2129.849212,
51 2135.300514, 2140.751817, 2146.203119, 2151.654421, 2157.105723, 2162.557026, 2168.008328, 2173.459630,
52 2178.910932, 2184.362235, 2189.813537, 2195.264839, 2200.716141, 2206.167444, 2211.618746, 2217.070048,
53 2222.521350, 2227.972652, 2233.423955, 2238.875257, 2244.326559, 2249.777862, 2255.229164, 2260.680466,
54 2266.131768, 2271.583070, 2277.034373, 2282.485675, 2287.936977, 2293.388279, 2298.839582, 2304.290884,
55 2309.742186, 2315.193488, 2320.644791, 2326.096093, 2331.547395, 2336.998697, 2342.450000, 2347.901302,
56 2353.352604, 2358.803906, 2364.255209, 2369.706511, 2375.157813, 2380.609115, 2386.060418, 2391.511720,
57 2396.963022, 2402.414324, 2407.865626, 2413.316928, 2418.768231, 2424.219533, 2429.670835, 2435.122138,
58 2440.573440, 2446.024742, 2451.476044, 2456.927347, 2462.378649, 2467.829951, 2473.281253, 2478.732556,
59 2484.183858, 2489.635160, 2495.086462, 2500.537765, 2505.989067, 2511.440369, 2516.891671]
60
61 # Transform first channel of SWIR data to TIFF file.
62 def raw_to_tiff(i):
63     for j in range(1, 6):
64         img_swir = np.array(spectral.open_image(f'{dir_src_swir}/batch{i}.hdr'))[:, :, 0]
65         print(np.squeeze(img_swir).shape)
66         pil_img = Image.fromarray(np.squeeze(img_swir))
67         pil_img.save(f'{dir_src_swir}/batch{i}.tiff')
68
69
70 # Standard normal variate
71 def snv(spectra):
72     corr_spectra = np.zeros_like(spectra)
73     corr_spectra = (spectra - np.mean(spectra)) / np.std(spectra)
74     return corr_spectra
75
76
77 # Store samples based on pixel segmentation from xml and raw swir to npy.
78 # Names are formed by concat of label and unique identifier.
79 def extract_samples():
80     for i in range(1, 6):
81         path_xml = f'{dir_src_swir}\\segments_labels\\batch{i}.xml'
82         tree = ET.parse(path_xml)
83         for c, child in enumerate(tree.getroot()):
84             if child.tag == 'object':
85                 name = child.find('name').text
86                 bbox = child.find('bbox').text
87                 coord_bbox = np.array([int(coord.text) for coord in bbox.split(',')])
88
89                 img_swir = np.array(spectral.open_image(f'{dir_src_swir}/batch{i}.hdr'))[coord_bbox[1]:coord_bbox[3],
90                                     coord_bbox[0]:coord_bbox[2], :]
91
92                 print(f'Save to {dir_src_swir}\\mat\\{name}.np')
93                 np.save(f'{dir_src_swir}\\mat\\{name}', img_swir)
94
95
96 # Plot snv of meaned pixels per sample. Create one image per label.
97 def plot_samples_snv():
98     dict_fig = {}
99     for filename in os.listdir(f'{dir_src_swir}\\mat'):
100         filepath = f'{dir_src_swir}\\mat\\{filename}'
101         noext = filename.split('.')[0]
102         if noext == 'learning':
103             continue
104         label = filename.split('_')[0]
105         pxls = np.load(filepath)
106         ymean = snv(np.squeeze(pxls.mean(axis=(0, 1))))
107         # ystd = snv(np.squeeze(pxls.std(axis=(0, 1))))
108
109         if label not in dict_fig.keys():
110             dict_fig[label] = go.Figure()
111
112         fig = dict_fig[label]
113         # plots per sample with spectra of all pixels
114         fig.add_trace(go.Scatter(x=x, y=ymean, mode='lines', name=noext))
115
116         for (label, fig) in dict_fig.items():
117             fig.update_layout(yaxis_range=[-3, 3],
118                               title=f'Standard normal variate of {label} samples',
119                               width=800, height=500)
120             fig.update_yaxes(automargin=True)
121             plotpath = f'{dir_src_swir}\\plots\\{label}.png'
122             fig.write_image(plotpath)
123             print(f'Saved to {plotpath}')
124

```

```

126 # Plot means of mean snv of labels on a single image for comparison.
127 def plot_snv_comparison():
128     dict_fig = {}
129     for filename in os.listdir(f'{dir_src_swir}\\mat\\'):
130         filepath = f'{dir_src_swir}\\mat\\{filename}'
131         noext = filename.split('.')
132         if noext[0] == 'learning':
133             continue
134
135         label = filename.split('_')[0]
136         pxls = np.load(filepath)
137         ymean = snv(np.squeeze(pxls.mean(axis=(0, 1))))
138         # ystd = snv(np.squeeze(pxls.std(axis=(0, 1))))
139
140         print(label)
141         if label not in dict_fig.keys():
142             dict_fig[label] = [ymean]
143         else:
144             dict_fig[label].append(ymean)
145
146     fig = go.Figure()
147     for (label, y) in dict_fig.items():
148         ymean = np.mean(np.vstack(y), axis=0)
149         fig.add_trace(go.Scatter(x=x, y=ymean, mode='lines', name=label))
150     fig.update_layout(width=800, height=500,
151                       yaxis_range=[-3, 3],
152                       title=f'Mean Standard normal variate comparison per label')
153     plotpath = f'{dir_src_swir}\\plots\\mean_snv_label.png'
154     fig.write_image(plotpath)
155     print(f'Saved to {plotpath}')
156
157
158 # generate list of sv, mean spectra from tiled image
159 def snv_mean_tiles(image):
160     tile_size = (10, 10)
161     step = (10, 10)
162     tiles_list = []
163     for i in range(int(image.shape[0] / step[1])):
164         for j in range(int(image.shape[1] / step[0])):
165             x_min = step[1] * i
166             x_max = min(step[1] * i + tile_size[1], image.shape[0])
167             y_min = step[0] * j
168             y_max = min(step[0] * j + tile_size[0], image.shape[1])
169             if x_max == image.shape[0] or y_max == image.shape[1]:
170                 continue
171             cropped_img = image[x_min:x_max, y_min:y_max]
172             ymean = snv(np.squeeze(cropped_img.mean(axis=(0, 1))))
173             tiles_list.append(ymean)
174     return tiles_list
175
176
177 def map_label2index(label):
178     return labels.index(label)
179
180
181 def map_index2label(i):
182     return labels[i]
183
184
185 # Create sets for learning from manually separated samples into training and testing
186 def create_sets():
187     print("Create tiles sets..")
188     x_train = []
189     x_test = []
190     y_train = []
191     y_test = []
192
193     for filename in os.listdir(f'{dir_src_swir}\\mat\\learning\\trainset\\'):
194         filepath = f'{dir_src_swir}\\mat\\{filename}'
195         noext = filename.split('.')
196         label = filename.split('_')[0]
197         image = np.load(filepath)
198         list_tiles = snv_mean_tiles(image)
199         x_train = x_train + list_tiles
200         y_train = y_train + [label for i in range(len(list_tiles))]
201
202     for filename in os.listdir(f'{dir_src_swir}\\mat\\learning\\testset\\'):
203         filepath = f'{dir_src_swir}\\mat\\{filename}'
204         noext = filename.split('.')
205         label = filename.split('_')[0]
206         image = np.load(filepath)
207         list_tiles = snv_mean_tiles(image)
208         x_test = x_test + list_tiles
209         y_test = y_test + [label for i in range(len(list_tiles))]
210
211     print(f'Train set size : {len(x_train)}\n')
212     print(f'Test set size : {len(x_test)}\n')
213     return np.array(x_train), np.array(x_test), np.array(y_train), np.array(y_test)
214
215
216 # plot confusion matrix
217 def plotconfmat(cm):
218     # Create and save the confusion matrix plot
219     plt.figure(figsize=(15, 15))
220     ax = sns.heatmap(cm, annot=True, fmt='d', xticklabels=labels, yticklabels=labels, cmap='Greys', cbar=False)
221
222     ax.xaxis.tick_top() # x axis on top
223     plt.xticks(rotation=45)
224     plt.yticks(rotation=45)
225     ax.xaxis.set_label_position('top')
226     plt.xlabel("Predicted Labels")
227     plt.ylabel("True Labels")
228     plt.title(f'Confusion Matrix')
229     plotpath = f'{dir_src_swir}\\plots'
230     plt.savefig(os.path.join(plotpath, f'confusionmat.png'))
231     plt.close()
232
233
234 # Supported vector machine classification with rbf kernel. Output
235 def rbfsvm():
236     x_train, x_test, y_train, y_test = create_sets()
237     classifier = SVC(kernel='rbf', random_state=0, probability=True)
238     print('Fit SVC on training data..')
239     classifier.fit(x_train, y_train)
240     print('Predict test set..')
241     y_pred = classifier.predict_proba(x_test)
242     perform(y_test, y_pred)
243

```



```

244 # Grid search on SVM hyperparam
245 def gssvm():
246     x_train, x_test, y_train, y_test = create_sets()
247     classifier = SVC(kernel='rbf', random_state=0, probability=True)
248
249     param_grid = {
250         'C': [0.1, 1, 10, 100], # Regularization parameter
251         'gamma': [1, 0.1, 0.01, 0.001], # Kernel coefficient for 'rbf'
252     }
253     grid_search = GridSearchCV(classifier, param_grid, cv=3, verbose=2, scoring='f1_macro')
254     print('Fit SVC on training data (grid search)..')
255     grid_search.fit(x_train, y_train)
256     # Train the SVC classifier with the best hyperparameters on the training set
257     best_classifier = grid_search.best_estimator_
258     print(f'Best estimator:\n {best_classifier}')
259     print('Fit SVC on training data (best classifier)..')
260     best_classifier.fit(x_train, y_train)
261     print('Predict on testing data (best classifier)..')
262     y_pred = best_classifier.predict_proba(x_test)
263
264     perform(y_test, y_pred)
265
266
267 def perform(y_test, y_proba):
268     y_pred = list(map(map_index2label, np.argmax(y_proba, axis=1)))
269     y_bin = label_binarize(y_test, classes=labels)
270     cm_rbf = confusion_matrix(y_test, y_pred)
271     plotconfmat(cm_rbf)
272
273     prcs_score = precision_score(y_test, y_pred, average=None)
274     rcll_score = recall_score(y_test, y_pred, average=None)
275     print(f'Precision: {prcs_score} \n Recall: {rcll_score}')
276     tpr = {}
277     fpr = {}
278     thresh = {}
279
280     for i in range(len(labels)):
281         fpr[i], tpr[i], thresh[i] = roc_curve(y_bin[:, i], y_proba[:, i])
282         rocfig = go.Figure()
283         rocfig.add_trace(go.Scatter(x=fpr[i], y=tpr[i], mode='lines'))
284         rocfig.update_layout(title_text=f'ROC {labels[i]}', xaxis_title='fpr', yaxis_title='tpr')
285         rocfig.write_image(f'{dir_src_swir}\\plots\\ROC_{labels[i]}.png')
286
287     """
288     Uncomment function to run.
289     """
290     raw_to_tiff()
291     create_sets
292     extract_samples()
293     plot_samples_snvs()
294     plot_snv_comparison()
295     rbfsvm()
296     gssvm()

```

Annexe 6 : Scans des 25 échantillons de bois massif prélevés dans la catégorie 5 du tri manuel.



Échantillon 1



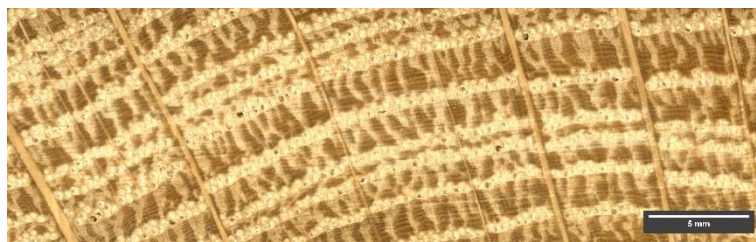
Échantillon 2



Échantillon 3



Échantillon 4



Échantillon 5





Échantillon 6



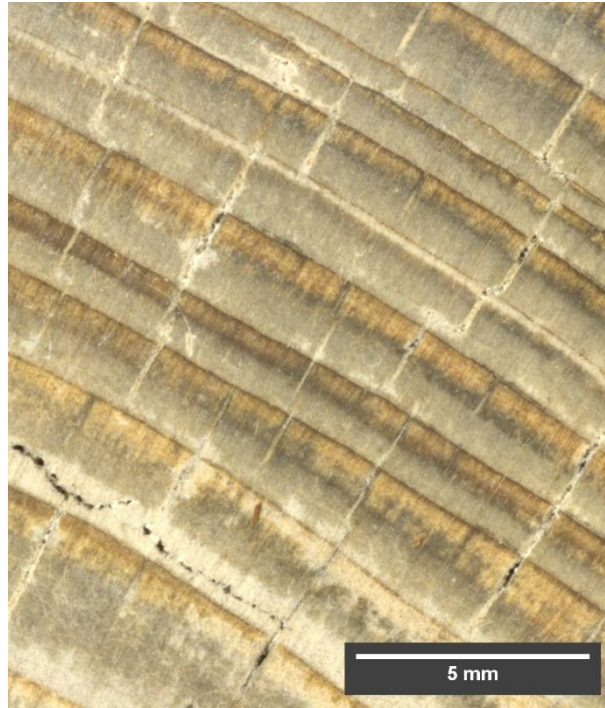
Échantillon 7



Échantillon 8



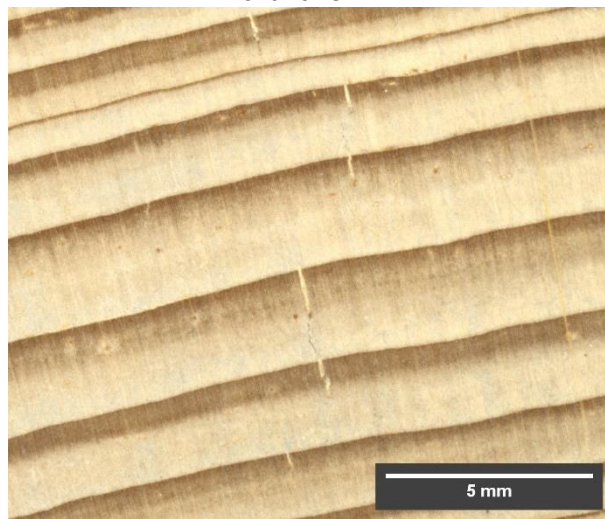
Échantillon 9



Échantillon 10

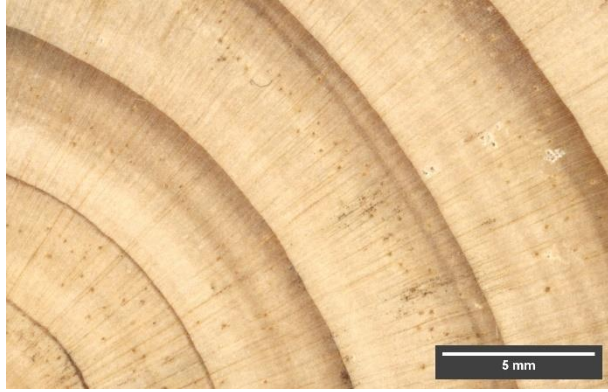


Échantillon 11



Échantillon 12

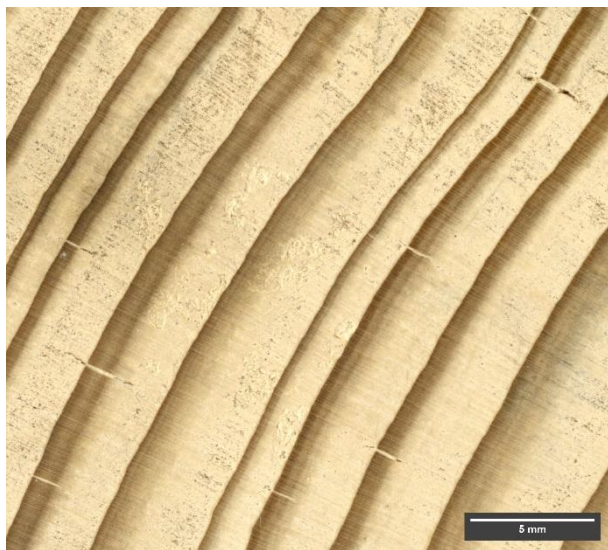




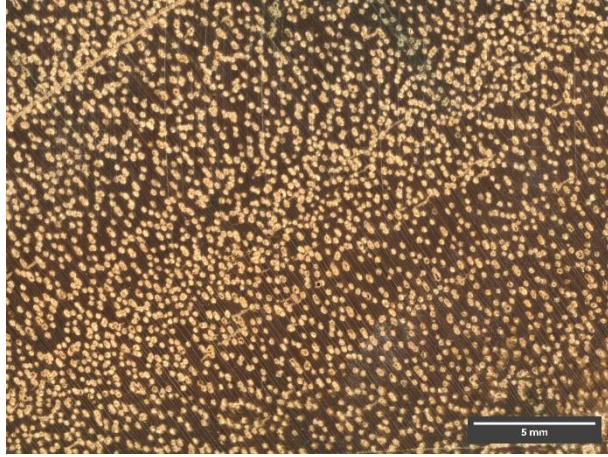
Échantillon 13



Échantillon 14



Échantillon 15



Échantillon 16



Échantillon 17



Échantillon 18





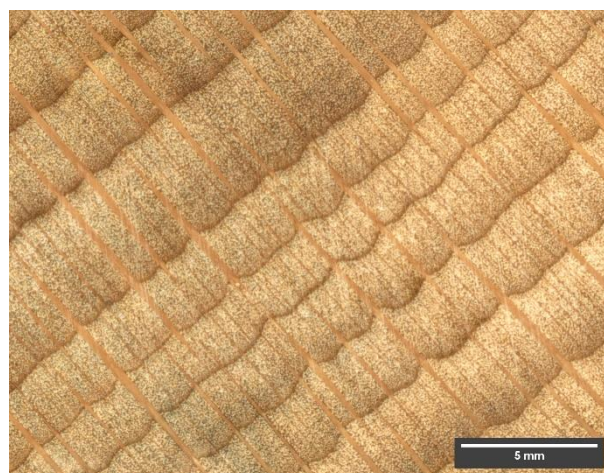
Échantillon 19



Échantillon 20



Échantillon 21



Échantillon 22





Échantillon 23



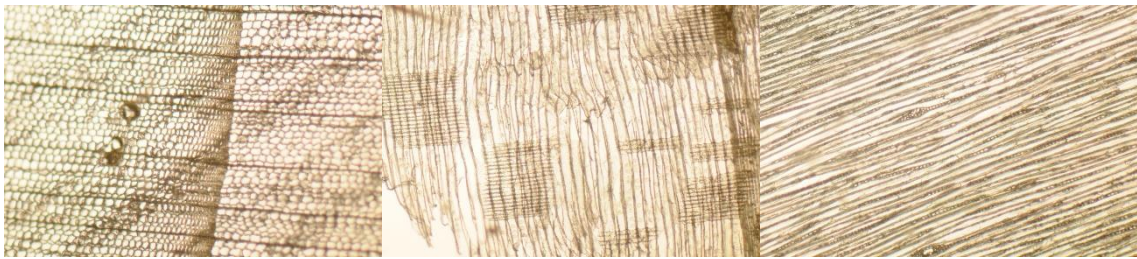
Échantillon 24



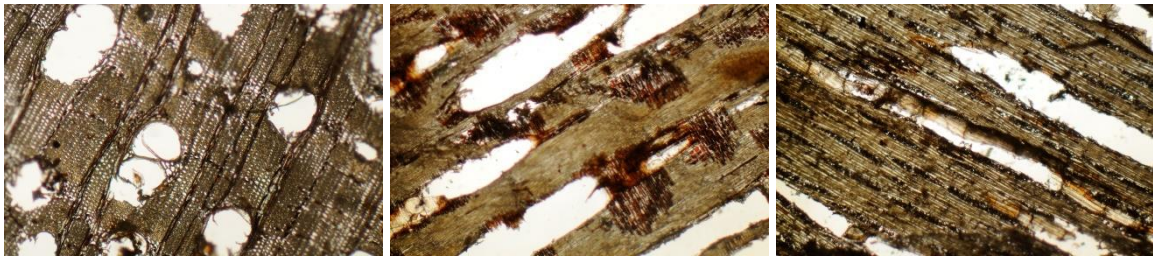
Échantillon 25



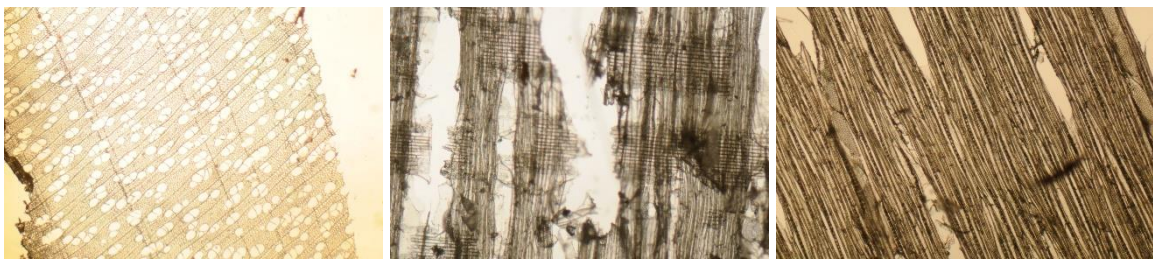
Annexe 7 : Coupes microscopiques transversales, radiales et tangentielles des échantillons non identifiables à l'oeil nu.



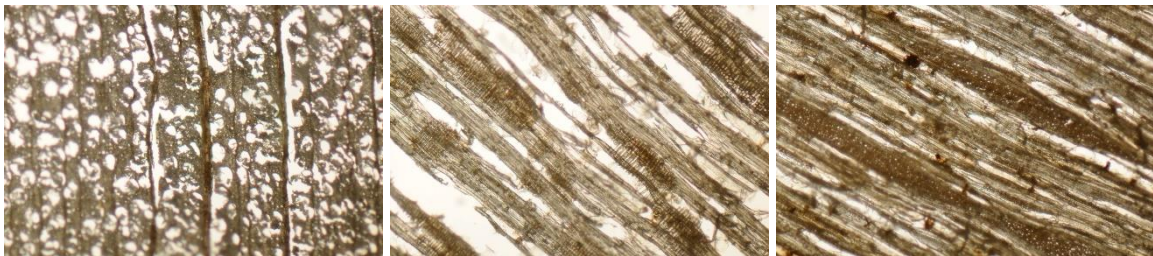
Échantillon 1



Échantillon 2



Échantillon 4

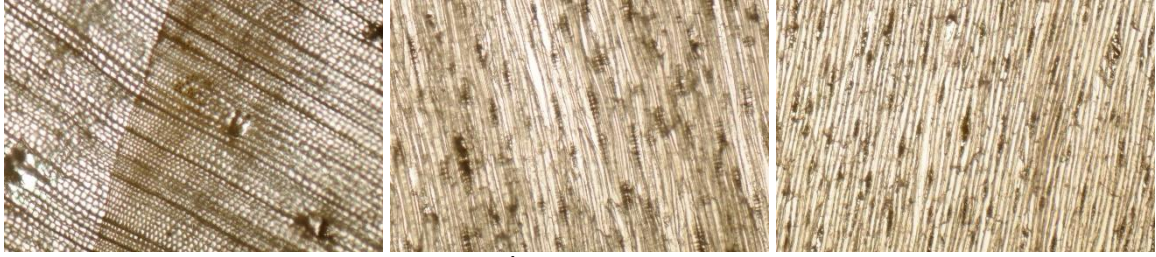


Échantillon 7



Échantillon 8





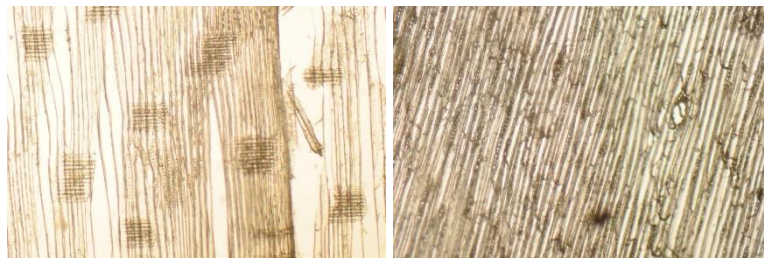
Échantillon 9



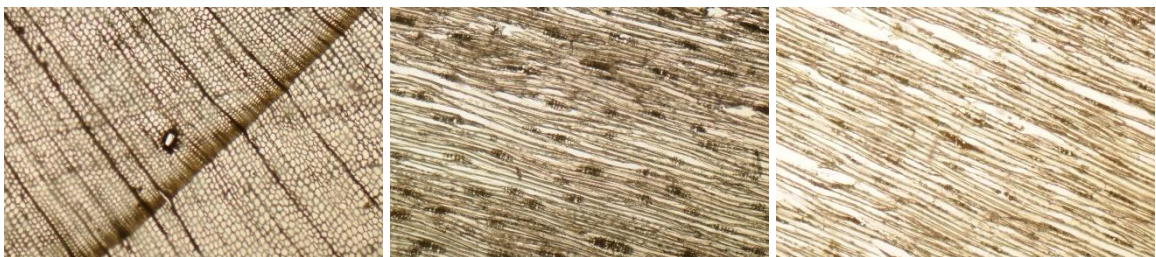
Échantillon 10



Échantillon 11



Échantillon 12 (pas de coupe transversale exploitable)

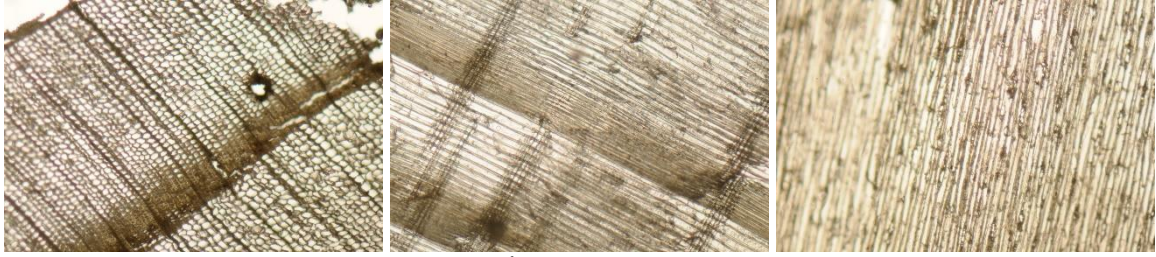


Échantillon 13



Échantillon 15

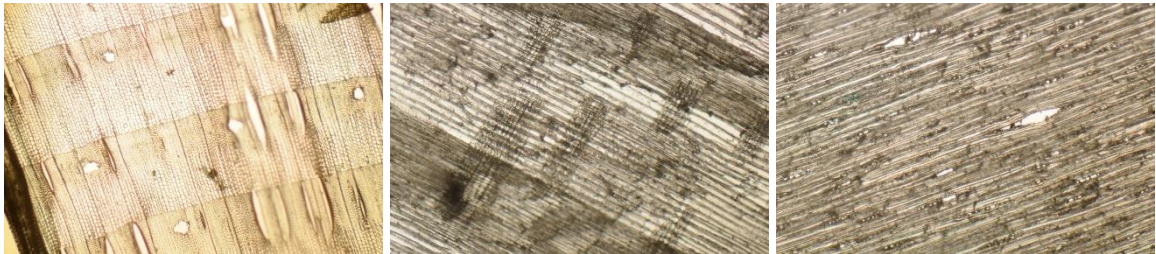




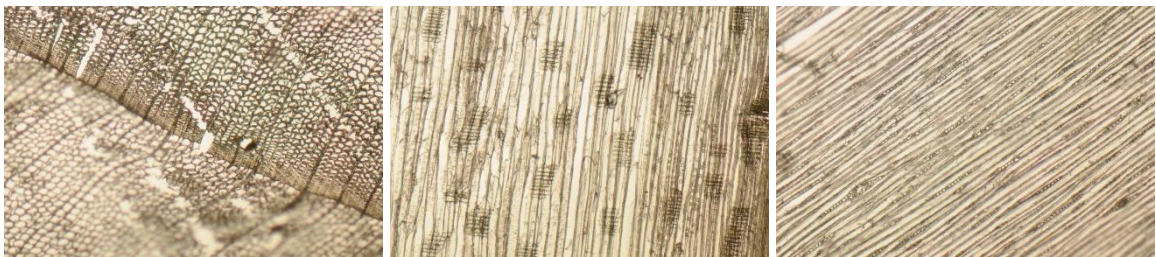
Échantillon 17



Échantillon 18



Échantillon 19



Échantillon 20



Échantillon 21



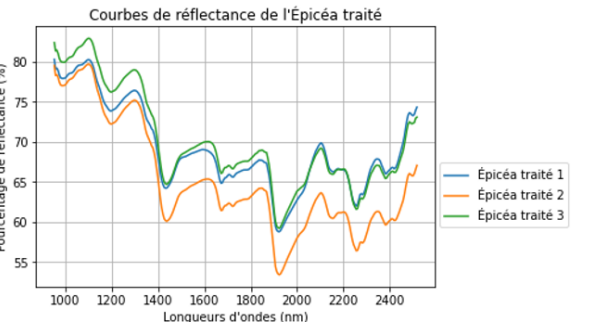
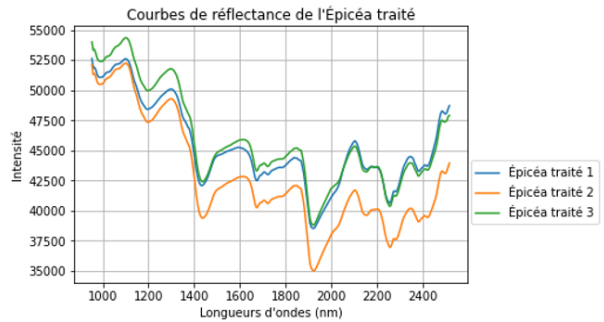
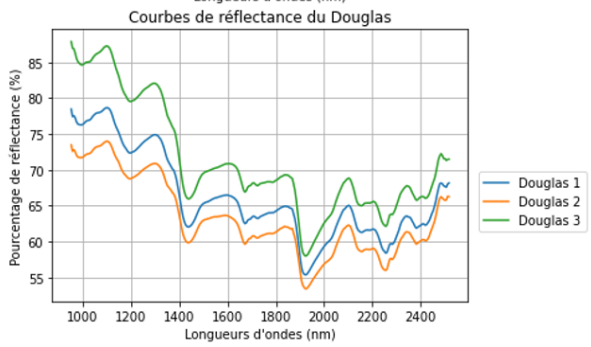
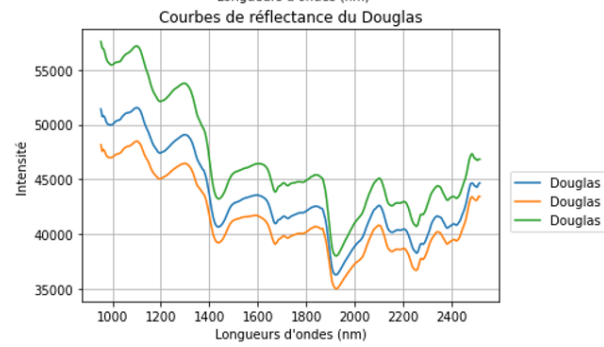
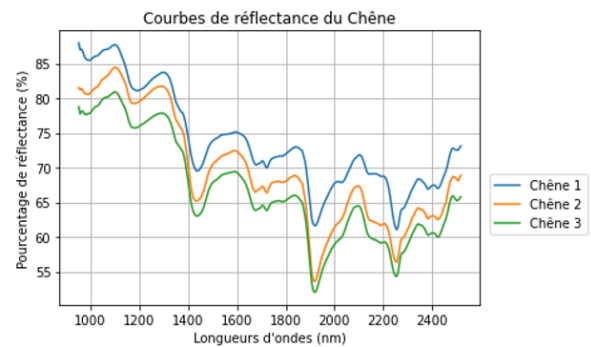
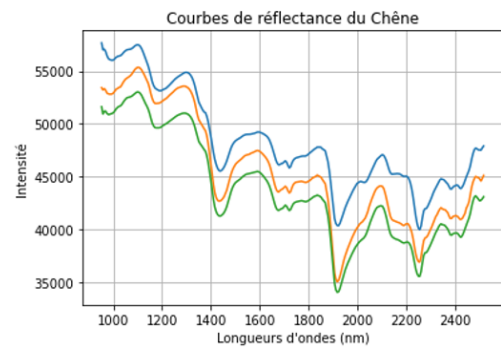
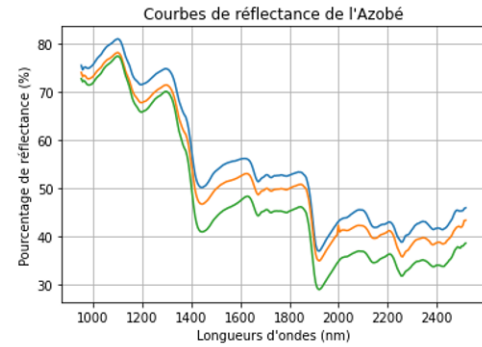
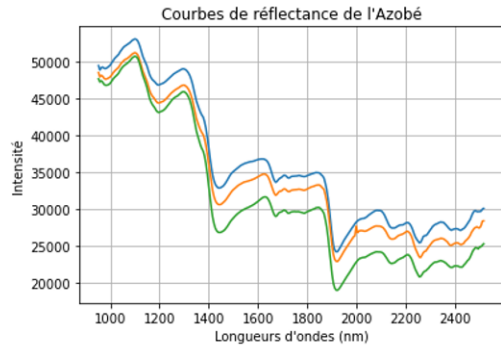
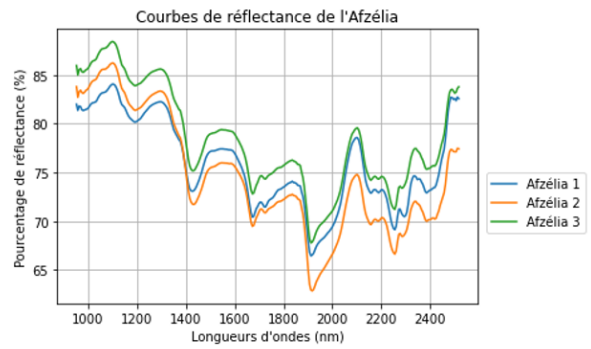
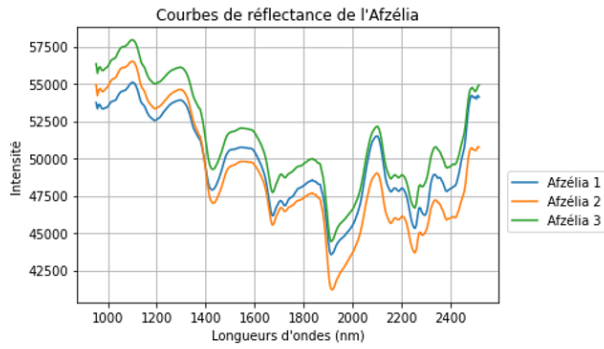
Échantillon 24

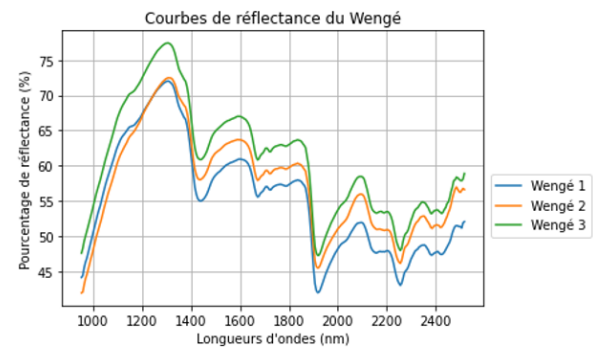
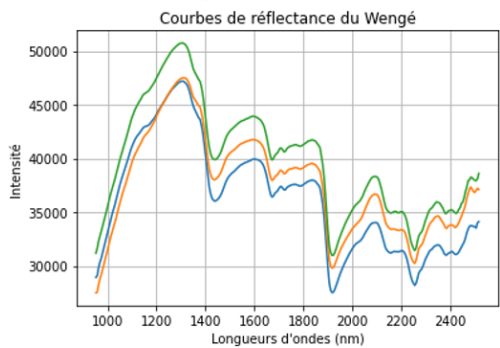
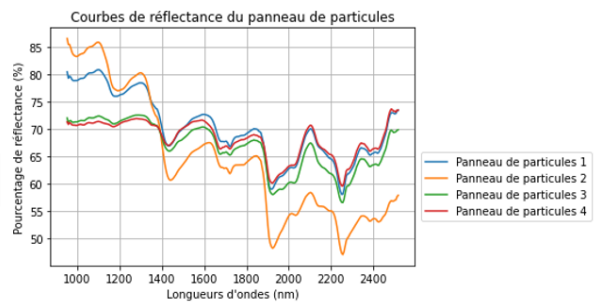
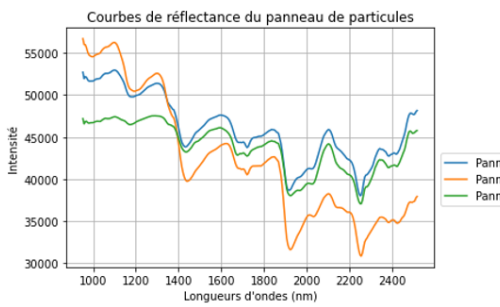
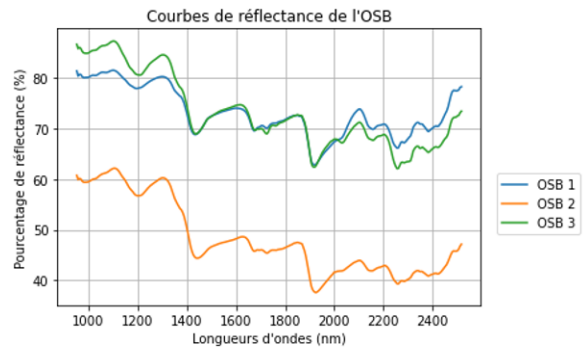
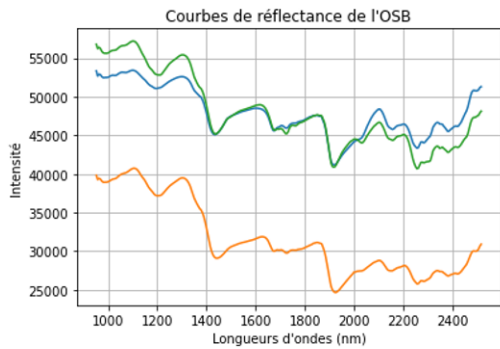
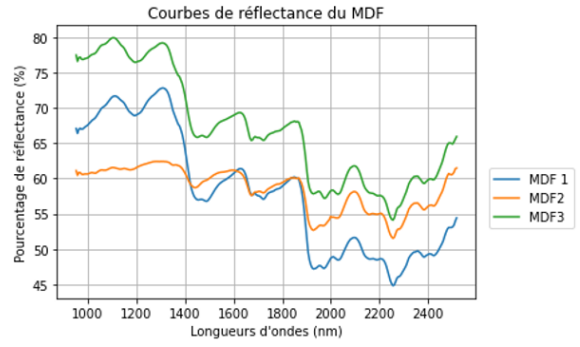
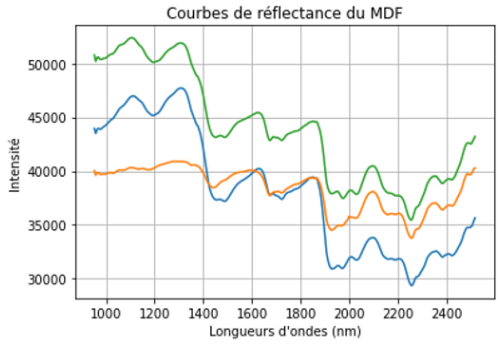
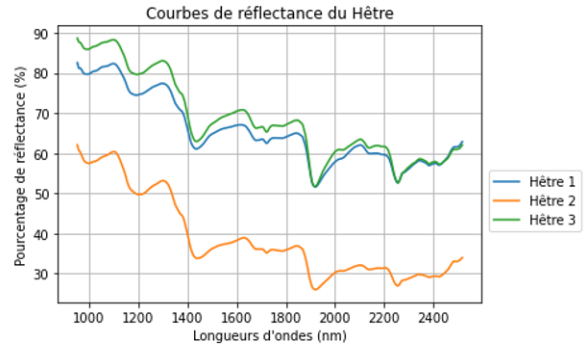
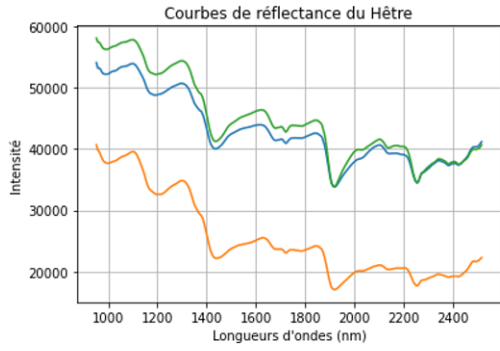




Échantillon 25

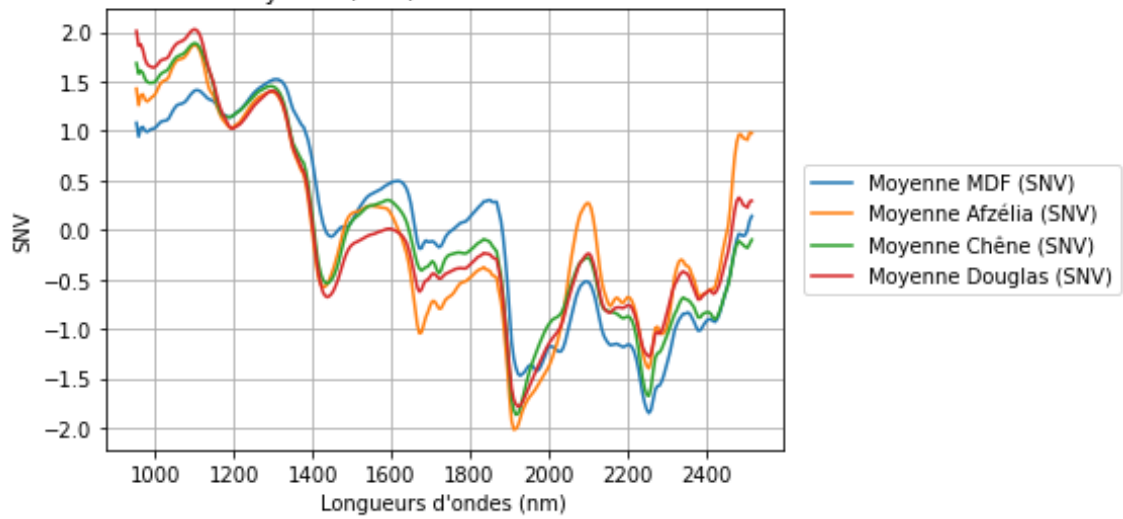
Annexe 8 : Graphiques des intensités et pourcentages (%) d'absorbance pour chaque classe de bois.





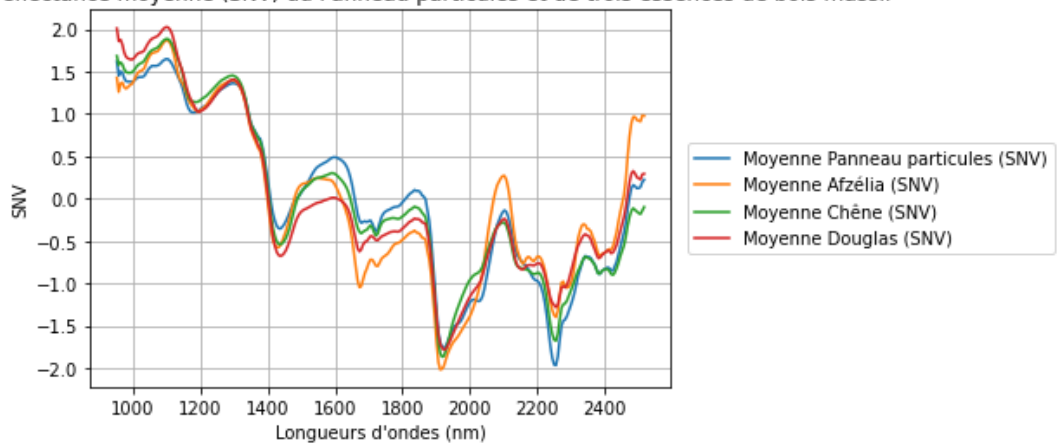
Annexe 9 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du MDF et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical).

Courbes de réflectance moyenne (SNV) du MDF et de trois essences de bois massif



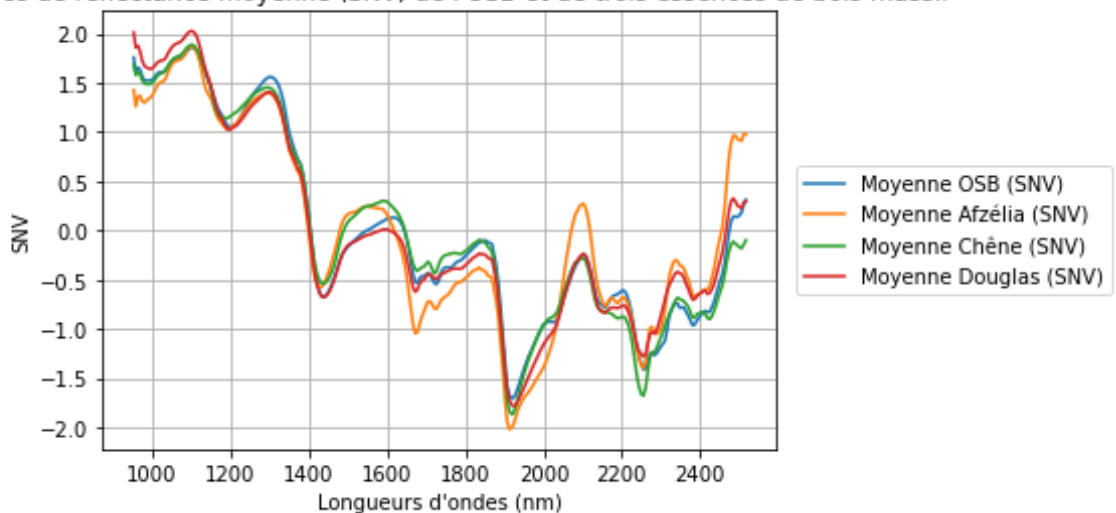
Annexe 10 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du panneau de particules et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical).

Courbes de réflectance moyenne (SNV) du Panneau particules et de trois essences de bois massif



Annexe 11 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance de l'OSB et de trois bois massif (feuillu, résineux et tropical).

Courbes de réflectance moyenne (SNV) de l'OSB et de trois essences de bois massif





Annexe 12 : Graphique des courbes moyennes normalisées (SNV) d'absorbance du Douglas et de l'Épicéa traité.

Courbes de réflectance moyenne (SNV) du Douglas et de l'Épicéa traité

