

Wood species Eye

Développement d'un automate de reconnaissance d'essences à destination de la menuiserie

Rapport intermédiaire

Réf : LBO/DR/403/18/506

Du 30 Novembre 2018

Didier Reuling⁽¹⁾ – Nathalie Passedat⁽²⁾

Siège social
10, rue Galilée
77420 Champs-sur-Marne
Tél +33 (0)1 72 84 97 84
www.fcba.fr

Siret 775 680 903 00132
APE 7219Z
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Institut technologique FCBA :
Forêt, Cellulose, Bois – Construction,
Ameublement

Partenaires



Avec le soutien



SOMMAIRE

1.	Contexte.....	3
2.	Objectifs.....	3
3.	Description des matériels de vision	3
3.1	Xylorix	3
3.1.1	Société Agritix Sdn Bhd division Xylorix	3
3.1.2	Le matériel	3
3.1.3	Le principe de fonctionnement	4
3.1.4	Le coût d'achat et de fonctionnement.....	5
3.1.5	Méthode d'identification de l'automate : L'apprentissage.....	5
3.1.6	Prise en compte de l'orientation de la photographie	6
3.1.7	Méthode d'identification de l'automate : La vérification.....	7
3.1.8	Méthode d'identification de l'automate : Finalisation.....	7
3.2	Xylotron	8
3.2.1	USDA Forest service division « Forest Products laboratory »	8
3.2.1	Le matériel	8
3.2.2	Le principe de fonctionnement	8
3.2.3	Le coût d'achat et de fonctionnement.....	9
3.2.4	Méthode d'identification de l'automate : L'apprentissage.....	9
3.2.5	Méthode d'identification de l'automate : La vérification.....	12
3.2.6	Méthode d'identification de l'automate : Finalisation.....	13
4.	Protocole d'évaluation des deux matériels.....	13
4.1	Les échantillons bois	13
4.2	Les photographies.....	13
5.	Suivi technique – Protocole XYLORIX	14
5.1	Modèle Chêne	14
5.1.1	Apprentissage.....	14
5.1.2	Vérification	14
5.2	Modèle Bossé.....	15
5.2.1	Apprentissage.....	15
5.2.2	Vérification	15
5.3	Modèle Sapelli.....	16
5.3.1	Apprentissage.....	16
5.3.2	Vérification	17
5.4	Modèle Sipo	18
5.4.1	Apprentissage.....	18
5.4.1	Vérification	18
5.5	Modèles bois malaisien sur projet antérieur.....	20
6.	Suivi technique – Protocole XYLOTRON	21
6.1	Les modèles.....	21
7.	Conclusion technique.....	21
	Annexe 1 : fiche anatomique Quercus spp. (Chêne blanc).....	22

Annexe 2 : fiche anatomique Guarea spp (Bossé)	24
Annexe 3 : fiche anatomique Entandrophragma cylindricum (Sapelli)	26
Annexe 4 : fiche anatomique Entandrophragma utile (Sipo)	28
Annexe 5 : fiche anatomique Swietenia macrophylla (Acajou Amérique centrale)	30
Annexe 6 : fiche anatomique Khaya spp. (Acajou d'Afrique)	32

Table des illustrations

Figure 1 : Iphone 6S avec macrolens et application Xylorix	4
Figure 2 : Réseau de neurones Xylorix à trois couches.....	6
Figure 3 : Illustration des images analysées par les filtres de Gabor	7
Figure 4 : Matériel Xylotron : PC et caméra à macro-objectif	8
Figure 5 : Décomposition de l'image par ondelettes avec filtres passe-haut et passe-bas	10
Figure 6 : Reconstitution des vaisseaux du bois de l'image grâce à la décomposition par ondelettes	10
Figure 7 : Illustration de l'intensité lumineuse sur une séquence de pixels d'une image	11
Figure 8 : Réseau de neurones Xylotron à trois couches	12
Figure 9 : Illustration des spectres d'intensité lumineuse pour quatre essences différentes	12
Figure 10 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Chêne.....	15
Figure 11 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Bossé	16
Figure 12 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Sapelli	17
Figure 13 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Sipo	19
Figure 14 : Exemple de plateforme déjà développée par Xylorix pour des bois malaisiens : MyWood-ID	20
Figure 18 : Coupe transversale du Quercus spp. (Chêne européen) grossissement x10.....	22
Figure 17 : Coupe transversale du Guarea cedrata (Bossé clair) grossissement x10.....	24
Figure 15 : Coupe transversale du Entandrophragma cylindricum (Sapelli) grossissement x10	26
Figure 16 : Coupe transversale du Entandrophragma utile (Sipo) grossissement x10.....	28
Figure 19 : Coupe transversale du Swietenia macrophylla (Acajou Amérique du sud) grossissement x10	30
Figure 20 : Coupe transversale du Khaya spp. (Acajou d'Afrique) grossissement x10.....	32
Tableau 1 : Prix d'achat de l'appareillage	5
Tableau 2 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Chêne	14
Tableau 3 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Chêne	14
Tableau 4 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Bossé.....	15
Tableau 5 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Bossé	16
Tableau 6 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Sapelli	16
Tableau 7 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Sapelli	17
Tableau 8 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Sipo.....	18
Tableau 9 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Sipo	18
Tableau 10 : Taux de réussite de la reconnaissance Xylorix par essence	21

1. Contexte

Suite à l'exigence grandissante de la déclaration d'essences et de son origine, renforcée par l'entrée en vigueur du Règlement sur le Bois de l'Union Européenne (RBUE / FLEGT – Mars 2013) les professionnels du bois, en particulier ceux de la menuiserie ont besoin de pouvoir afficher et prouver la provenance de leurs bois, qu'ils soient français ou exotiques.

Cette reconnaissance ou identification d'essences est restée pendant très longtemps une affaire de spécialistes puisqu'elle nécessitait en parallèle la construction d'un référentiel sur la base d'une nomenclature botanique pour intégrer des essences au fur et à mesure de leur découverte. Aujourd'hui, bien que ce référentiel soit toujours en évolution, plusieurs techniques se développent autour de la reconnaissance d'essences accessibles aux non spécialistes et transférables en entreprises.

Lors de l'étude CODIFAB « Reconnaissance d'essence en menuiserie » en 2016, FCBA a recensé l'ensemble des techniques existantes par une veille bibliographique à l'échelle mondiale. A la fin de cette étude, le comité de pilotage du projet a identifié une technique de reconnaissances d'essences qui pourrait être une solution intéressante pour reconnaître les essences de façon automatisée et transférable en entreprise.

2. Objectifs

Dans la continuité de l'étude CODIFAB « Reconnaissance d'essence en menuiserie », le projet se propose d'évaluer deux automates de vision pour identifier les essences :

- Détermination du potentiel des deux matériels et adéquation avec les problématiques des professionnels de la menuiserie
- Test de l'algorithme sur un petit panel d'essences ciblées menuiserie (phase de prétest) par les deux automates, évaluation des deux matériels

3. Description des matériels de vision

3.1 Xylorix

3.1.1 Société Agritix Sdn Bhd division Xylorix

Agritix est une société d'analyse spécialisée dans le développement d'application mobile pour le suivi et la gestion des plantations de palmier à huile industriel en Malaisie. La proximité avec le milieu de la forêt et du bois leur a permis de développer une division (Xylorix) spécialisée dans le développement d'une application mobile d'aide à la reconnaissance d'essences. La division est basée à Kuala Lumpur et est dirigé par le Docteur Yong Haur TAY issu de l'Université Technologique de Kuala Lumpur.

3.1.2 Le matériel

Le système d'identification macroscopique du bois proposé par cette société malaisienne utilise la méthode de vision artificielle avec un smartphone standard et un macro-objectif adaptable (grossissement x21). Le smartphone équipé d'une caméra et d'une connectivité Internet couplé à un macro-objectif permet une acquisition numérique simple d'une image macroscopique d'une coupe transversale de bois. L'image obtenue est immédiatement diffusée sur un serveur cloud via la connexion Internet pour identification. La reconnaissance prend quelques secondes, temps qui peut dépendre de la qualité de la connexion internet.

Afin de contrôler la qualité des images, le langage et le système d'exploitation du smartphone, la société Xylorix a décidé de travailler sur la technologie APPLE. Le développement et l'utilisation

de leur application se fait donc sur un Iphone 6S avec une version du système d'exploitation IOS 10.3.



Figure 1 : Iphone 6S avec macrolens et application Xylorix

Si l'application ne fonctionne pour l'instant que sur Iphone 6S, la société Xylorix a en projet de développer son application sur d'autres modèles d'Iphone plus récents ainsi que sur les smartphones de type Android.

3.1.3 Le principe de fonctionnement

L'idée principale du système est un modèle d'intelligence artificielle formé à partir d'une machine à capacité d'apprentissage correspondant à la précision du niveau humain qui utilise la vitesse et la puissance de l'informatique pour constituer un réseau d'éléments statistiques (réseau de neurones) conduisant à l'identification d'une essence de bois. L'ensemble de ce système est appelé Deep learning.

Un algorithme d'apprentissage automatique par essence à identifier est développé pour apprendre à partir d'une base de photographies d'échantillons de bois macroscopiques étiquetés et vérifiés par des professionnels à reconnaître une essence à partir de sa texture en nuance de gris. Pour pouvoir identifier l'essence sur les photos, l'algorithme doit être en mesure de voir la structure anatomique de l'essence de bois de manière précise.

A partir de cette texture, différentes transformations non linéaires sont calculées puis passées dans un réseau de neurones.

Les neurones artificiels assignent ensuite un poids aux différents éléments calculés. La couche finale de neurones va alors rassembler les différentes informations pour déduire s'il s'agit ou non de l'essence apprise. Afin d'y parvenir, le réseau de neurones doit être entraîné.

Ainsi, il est nécessaire de compiler un ensemble d'images d'entraînement conséquent. Cet ensemble va regrouper un ensemble de photos de l'essence à reconnaître. Chaque image est convertie en données et transférées sur le réseau.

Le réseau de neurones nécessite une phase de vérification qui consiste à comparer ses réponses aux bonnes réponses indiquées par les humains. Si les réponses correspondent, le réseau garde cette réussite en mémoire et s'en servira plus tard pour reconnaître l'essence. Dans le cas contraire, le réseau prend note de son erreur et ajuste le poids placé sur les différents neurones pour corriger son erreur. Le processus est répété des milliers de fois jusqu'à ce que le réseau soit capable de reconnaître l'essence sur une photo :

- Le modèle de reconnaissance de l'essence est constitué.
- Cette technique d'apprentissage est appelée apprentissage supervisé ou «supervised learning».

Il y a trois composantes principales dans le système développé par Xylorix :

- Un algorithme d'apprentissage basé sur un grand nombre de photographies pour une essence qui conduit à créer un modèle d'identification essence,
- Un algorithme de vérification effectué à partir d'échantillons de bois n'ayant pas servi lors de l'apprentissage,
- Un module de reconnaissance d'essences composé des différents modèles développés.

3.1.4 Le coût d'achat et de fonctionnement

Le prix du matériel :

Matériel	Prix d'achat (TTC)
Iphone de type 6S	600 à 900 euros
Macrolens	60 à 100 euros

Tableau 1 : Prix d'achat de l'appareillage

Pour l'utilisation de l'application sur Iphone, après l'année d'utilisation prévue dans le contrat, la société offre la possibilité d'un abonnement pour continuer à utiliser les modèles développés.

Les conditions :

Paiement d'un abonnement mensuel de 100 euros ou annuel de 1 000 euros comprenant la reconnaissance de 10 000 échantillons de bois par mois. Au-delà de 10 000 échantillons, 5 euros seront facturés tous les 1 000.

3.1.5 Méthode d'identification de l'automate : L'apprentissage

La méthode d'identification des essences est basée sur la classification générale des textures, appelée matrice de cooccurrence des niveaux de gris (GLCM= Grey Level Co-occurrence Matrix). La GLCM est une matrice qui indique, dans une image, le nombre d'apparitions de couples de pixels ayant des niveaux de gris (i, j) selon une direction et un déplacement donné (d = (dx, dy)). Des attributs calculés sur la GLCM permettent de caractériser la régularité, la répétitivité et le contraste des textures.

Le GLCM est calculé comme suit :

Tout d'abord, une image de texture originale D est re-quantifiée en une image G avec un nombre réduit de niveaux de gris, Ng. Une valeur typique de Ng est 16 ou 32. Ensuite, GLCM est calculé à partir de G en balayant l'intensité de chaque pixel et de son voisin, définis par le déplacement d et l'angle \varnothing . Un déplacement d prendra une valeur de type 1,2,3, ... n alors que l'angle \varnothing est limité à 0, 45, 90 et 135.

Le GLCM P (i, j ; d, \varnothing) est une fonction de densité de probabilité de paires de niveaux de gris dans l'image pour chaque élément de la matrice de cooccurrence en divisant chaque élément par Ng. Enfin, les caractéristiques secondaires scalaires qui seront calculées pour reconnaître l'essence sont extraites des quatre matrices de cooccurrence suivant les angles.

Les caractéristiques secondaires utilisées sont :

1 - Energie : $\sum_{i,j} P(i, j)^2$

aussi appelé second moment angulaire et qui mesure l'uniformité de la texture

2 - Entropie : $-\sum_{i,j} P(i, j) \log P(i, j)$

mesure le caractère aléatoire de l'intensité dans l'image

3 - Inertie : $\sum_{i,j} (i - j)^2 P(i, j)$

représente le contraste d'intensité entre un pixel et son voisinage

$$4 - \text{Corr\u00e9lation} : - \sum_{i,j} \frac{(i-\mu)(j-\mu)}{\sigma^2} P(i, j)$$

mesure la corr\u00e9lation entre un pixel et son voisinage

$$5 - \text{Homog\u00e9n\u00e9it\u00e9} : \sum_{i,j} \frac{1}{1+(i-j)^2} P(i, j)$$

repr\u00e9sente l'homog\u00e9n\u00e9it\u00e9 de la texture localement (aussi appel\u00e9 Moment de diff\u00e9rence inverse)

$$\text{ou } \mu = \mu_x = \mu_y = \sum_i i \sum_j P(i, j) = \sum_j j \sum_i P(i, j)$$

$$\text{et } \sigma = \sqrt{\sum_i (i - \mu_x)^2 \sum_j P(i, j) + \sum_j (j - \mu_y)^2 \sum_i P(i, j)}$$

Toutes ces caract\u00e9ristiques sont ensuite utilis\u00e9es en tant qu'entr\u00e9es dans le classificateur de r\u00e9seau neuronal.

Le r\u00e9seau de neurones consiste \u00e0 relier toutes les entr\u00e9es avec trois couches de neurones au sein desquelles une information circule de la couche d'entr\u00e9e vers la couche de sortie uniquement. Le poids de n\u00e9ud (ou synapse) des diff\u00e9rentes couches est choisi al\u00e9atoirement.

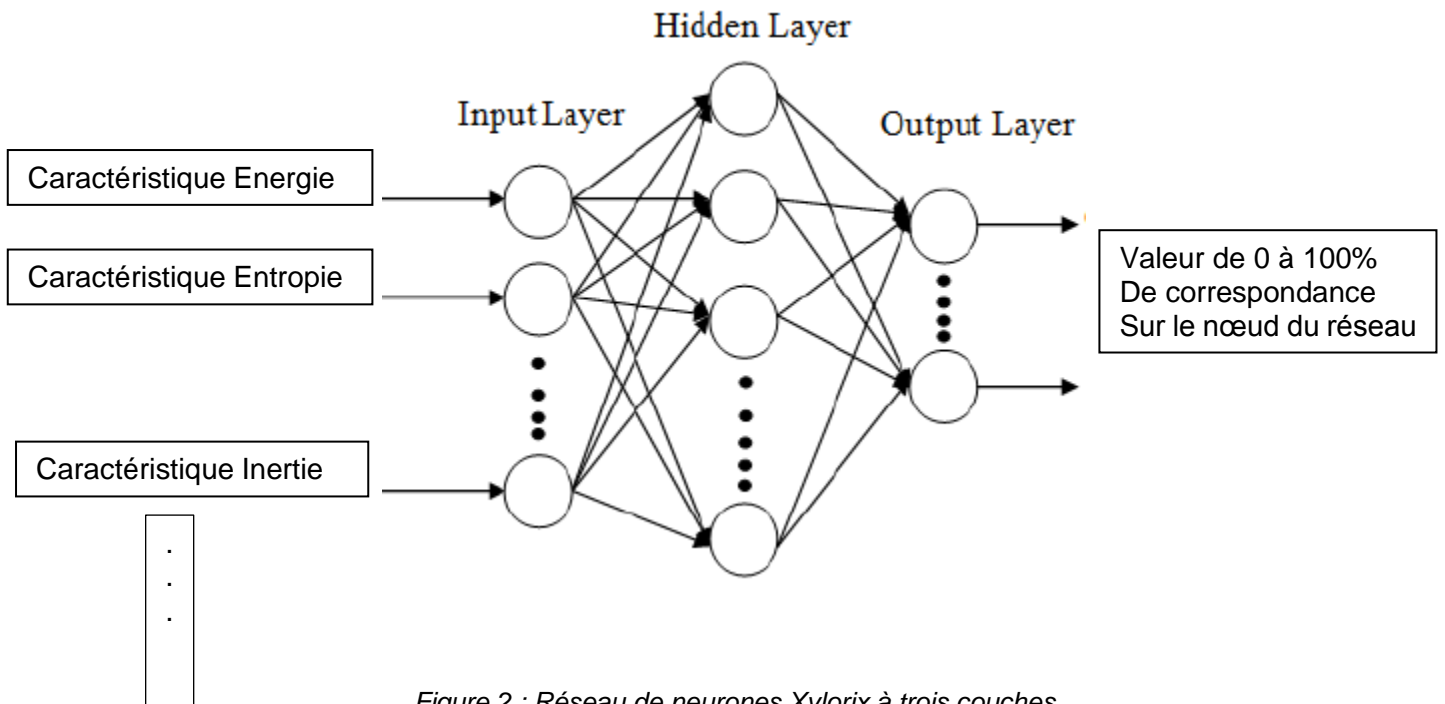


Figure 2 : R\u00e9seau de neurones Xylorix \u00e0 trois couches

3.1.6 Prise en compte de l'orientation de la photographie

L'image du bois peut \u00eatre prise dans un sens al\u00e9atoire par rapport \u00e0 l'orientation du plan de croissance de l'arbre. Afin de faire abstraction de l'orientation de la photographie, les fonctionnalit\u00e9s GLCM sont combin\u00e9es aux filtres de Gabor. Ces filtres de Gabor ont pour objectif d'analyser la fr\u00e9quence des diff\u00e9rentes structures lumineuses dans un angle donn\u00e9.

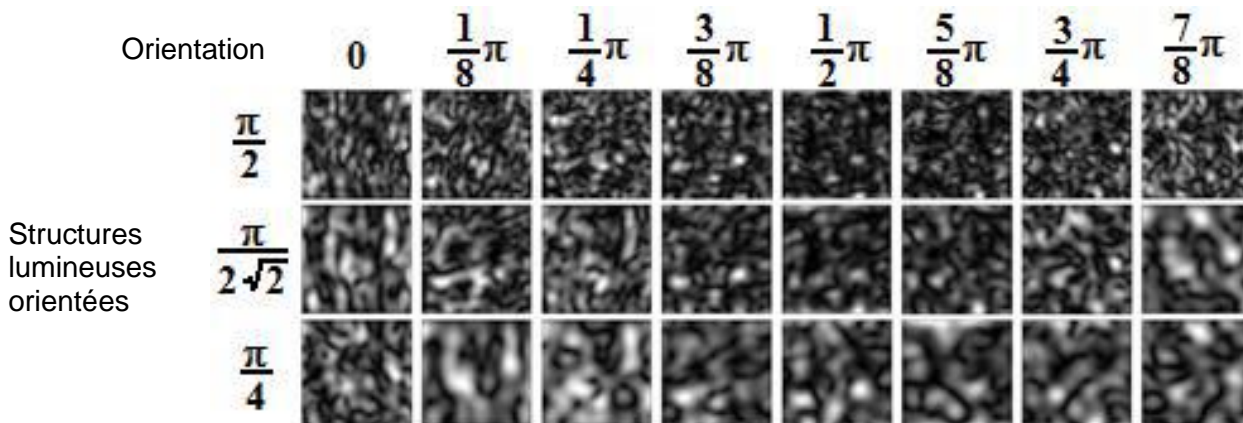


Figure 3 : Illustration des images analysées par les filtres de Gabor

3.1.7 Méthode d'identification de l'automate : La vérification

Une fois l'apprentissage du modèle effectué, une phase de vérification de celui-ci est réalisée sur un petit nombre d'échantillons n'ayant pas servi à l'apprentissage. Le but est de définir une distance seuil qui déterminera si l'échantillon appartient bien à l'essence modélisée. Dans ces échantillons, il est recommandé d'utiliser des échantillons correspondant au modèle que l'on veut mettre en place mais aussi des échantillons de bois qui sont proches anatomiquement.

Sur ces échantillons, la caractéristique secondaire de l'énergie est calculée en tant que distance entre les échantillons de bois ayant servi lors de l'apprentissage :

$$E'(x, y) = \sum_{i=1}^n (f'_x(i) - f'_y(i))^2$$

Une valeur de seuil est calculée pour l'essence modélisée :

$$T(x) = \mu_x(E'_x) - \frac{1}{2} \sigma_x(E'_x)$$

La valeur de l'énergie de l'échantillon qui est retenue correspond à l'énergie minimale obtenue pour les huit directions :

$$E = \sum_{i=1}^n \min_{\theta=0^\circ \dots 360^\circ} (f'_\theta(i) - f_\omega(i))^2$$

3.1.8 Méthode d'identification de l'automate : Finalisation

Si l'ensemble des échantillons utilisés durant la phase de vérification donnent les résultats attendus, le modèle peut être considéré comme abouti. Si des erreurs de reconnaissance sont constatés, le poids de chaque synapse du réseau neuronal peut être revu ainsi que la valeur seuil définie lors de la vérification.

3.2 Xylotron

3.2.1 USDA Forest service division « Forest Products laboratory »

Le Forest Products Laboratory (FPL), laboratoire de recherche du Service des forêts américain travaille sur le territoire national et à l'international pour fournir des outils de lutte contre l'exploitation forestière illégale et le commerce associé. Un prototype de système d'identification automatisé du bois basé sur la vision artificielle (Xylotron) a été mis au point pour permettre aux non-spécialistes d'identifier les bois inconnus. Ce projet se veut un projet collaboratif international en vue de développer la base d'essences reconnaissables par le système. Des prototypes de XyloTron sont utilisés pour la validation du concept dans des laboratoires aux États-Unis, au Brésil, en Allemagne, en Angleterre et en Chine (et aujourd'hui en France). Il a été testé sur le terrain dans le port de la Nouvelle-Orléans en 2013. Des améliorations sont apportées au système grâce à son utilisation à travers le monde.

3.2.1 Le matériel

Le système d'identification macroscopique du bois proposé par FPL utilise la méthode de vision artificielle avec un ordinateur portable fonctionnant sous système Linux et une caméra macro-objectif (grossissement x21) connecté via port USB. La caméra au macro-objectif (Xyloscope) permet une acquisition numérique simple d'une image macroscopique d'une coupe transversale de bois. L'image obtenue est immédiatement analysée en local sur l'ordinateur pour identification. La reconnaissance prend quelques secondes.

Le programme d'identification a été développé sous Julia. Julia est un langage de programmation développé en 2009 par le MIT (Massachusetts Institute of Technology)

Le système d'exploitation et les logiciels du système sont « open source » et le matériel du système est construit à partir de composants standard.

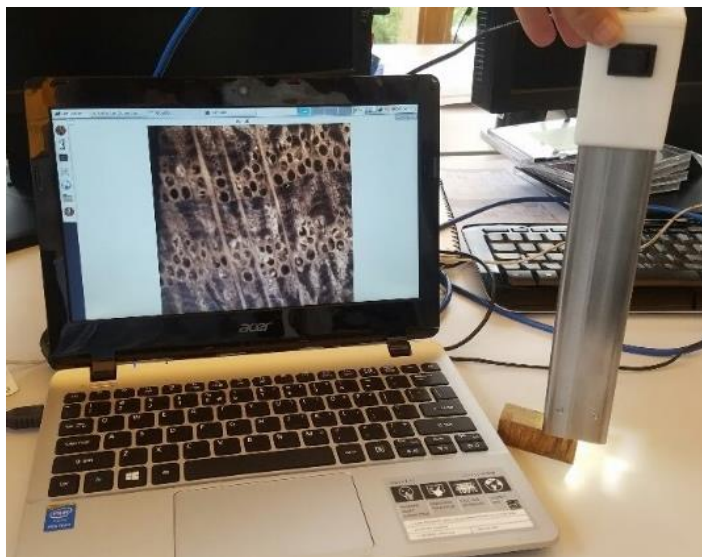


Figure 4 : Matériel Xylotron : PC et caméra à macro-objectif

3.2.2 Le principe de fonctionnement

Tout comme Xylorix, le système développé ici est un modèle d'intelligence artificielle formé à partir d'une machine à capacité d'apprentissage correspondant à la précision du niveau humain

qui utilise la vitesse et la puissance de l'informatique pour constituer un réseau d'éléments statistiques conduisant à l'identification d'une essence de bois.

Un algorithme d'apprentissage automatique par essence à identifier est développé pour apprendre à partir d'une base de photographies d'échantillons de bois macroscopiques étiquetés et vérifiés par des professionnels à reconnaître une essence à partir de sa texture en nuance de gris.

Il y a deux composantes principales pour le système :

- Un algorithme d'apprentissage basé sur un grand nombre de photographies pour une essence qui conduit à créer un modèle d'identification essence
- Un module de reconnaissance d'essences composé des différents modèles développés

3.2.3 Le coût d'achat et de fonctionnement

Le prix du matériel est de 5 000 dollars US comprenant le portable, la caméra et le logiciel. En ce qui concerne les modèles, seront disponibles ceux déjà développés par FPL et les organismes partenaires (ayant acceptés de laisser les modèles libres de droit) et ceux qui seront développés au cours du projet.

Il n'y a donc aucun cout de fonctionnement et le propriétaire du matériel est libre de développer ces propres modèles de reconnaissance.

3.2.4 Méthode d'identification de l'automate : L'apprentissage

La méthode d'identification des essences est basée sur la technique des ondelettes. La transformation en ondelettes fournit une représentation de la variation locale autour d'un pixel donné de l'image en fonction de la résolution.

La décomposition par ondelettes (wavelet WT) consiste à repérer les discontinuités d'un signal à deux dimensions, et à des échelles différentes.

Une image étant un signal bidimensionnel, la décomposition bidimensionnelle par ondelettes commence par la décomposition unidimensionnelle de chaque ligne de l'image $f(x,y)$ puis vient la décomposition unidimensionnelle de chaque colonne.

Un filtre passe-bas (séparation des basses fréquences) et un filtre passe-haut (séparation des hautes fréquences) sont choisis de manière à diviser par deux la plage de fréquences entre eux. Cette paire de filtres s'appelle la paire de filtres d'analyse. Tout d'abord, le filtre passe-bas est appliqué à chaque rangée de données, obtenant ainsi les composantes basse fréquence de la rangée. Maintenant, le filtre passe-haut est appliqué à la même rangée de données et, de même, les composants passe-haut sont séparés et placés à côté des composants passe-bas. Cette procédure est effectuée pour toutes les lignes.

Lorsque les deux filtres sont passe-bas, l'image fournie correspond à l'information de basse fréquence, également appelée approximation (LL). Un filtre passe-bas sur les lignes suivi d'un filtre passe-haut sur les colonnes donne les hautes fréquences, ou détails horizontaux (LH), l'inverse permet d'obtenir les détails verticaux (HL). Enfin, l'utilisation de deux filtres passe-haut donne les détails diagonaux (HH). En répétant cette procédure sur les images d'approximations, il est possible d'obtenir une transformation en ondelettes d'ordre 2, la figure 5 ci-dessous montre un schéma illustrant cette méthode.

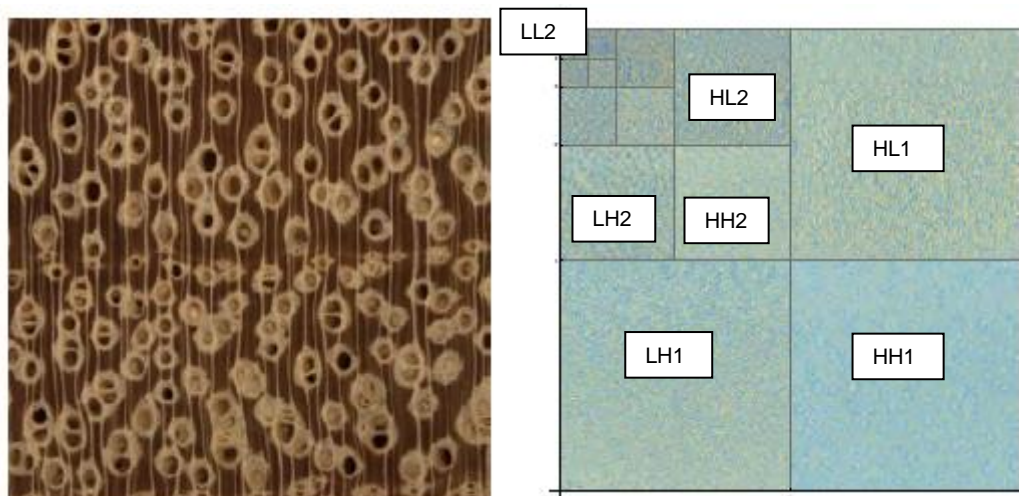


Figure 5 : Décomposition de l'image par ondelettes avec filtres passe-haut et passe-bas

Des motifs locaux sont donc utilisés sur les différentes sous-images fournies par la décomposition en ondelettes afin d'obtenir une représentation complète des éléments constituant la texture des quatre éléments du bois :

- En fonction des seuils de détection et des détections de bords les vaisseaux sont identifiés
- Les rayons ligneux sont identifiés par rapport à leur caractère parallèle de la matrice
- Le parenchyme et les fibres sont identifiés avec leur intensité lumineuse et leur proximité des vaisseaux



Figure 6 : Reconstitution des vaisseaux du bois de l'image grâce à la décomposition par ondelettes

L'intensité lumineuse est aussi mesurée selon le schéma suivant ligne par ligne :

Sur la moitié de l'image le pixel de droite est comparé au pixel le plus proche à gauche (Horizontal) en bas (Vertical) et en diagonal. L'échelle 10 représente deux pixels.

Les deux pixels sont comparés aux deux suivants (H,V,D) (échelle 2 = 4pixels) et ainsi de suite jusqu'à aboutir à 10 échelles pour l'analyse.

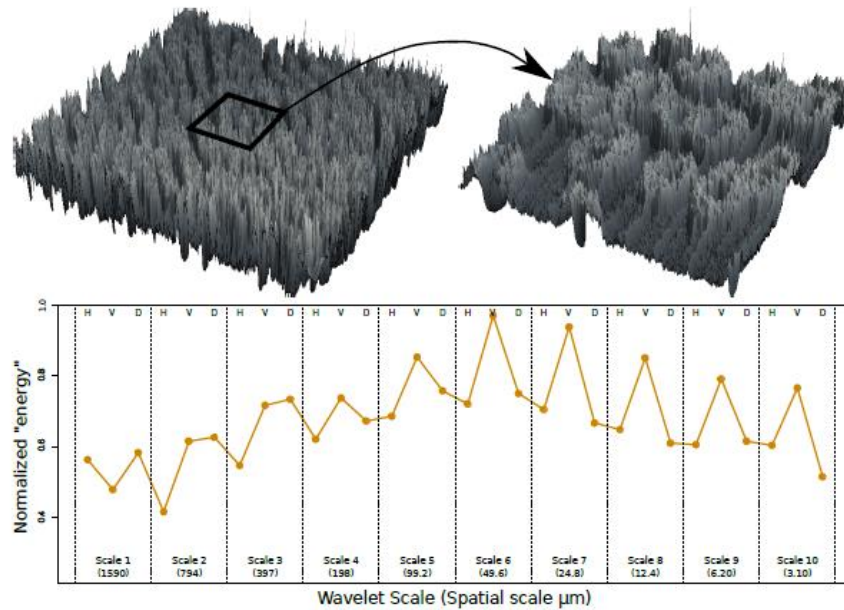


Figure 7 : Illustration de l'intensité lumineuse sur une séquence de pixels d'une image

Enfin, les caractéristiques secondaires scalaires sont extraites des fréquences d'énergie sur les différentes sous-images.

Les caractéristiques secondaires utilisées sont :

1 - Energie : $\sum_{i,j} P(i, j)^2$

aussi appelé second moment angulaire et qui mesure l'uniformité de la texture

2 - Entropie : $-\sum_{i,j} P(i, j) \log P(i, j)$

mesure le caractère aléatoire de l'intensité dans l'image

3 - Inertie : $\sum_{i,j} (i - j)^2 P(i, j)$

représente le contraste d'intensité entre un pixel et son voisinage

4 - Corrélacion : $-\sum_{i,j} \frac{(i - \mu)(j - \mu)}{\sigma^2} P(i, j)$

mesure la corrélation entre un pixel et son voisinage

5 - Homogénéité : $\sum_{i,j} \frac{1}{1 + (i - j)^2} P(i, j)$

représente l'homogénéité de la texture localement (aussi appelé Moment de différence inverse)

ou $\mu = \mu_x = \mu_y = \sum_i i \sum_j P(i, j) = \sum_j j \sum_i P(i, j)$

et $\sigma = \sum_i (i - \mu_x)^2 \sum_j P(i, j) = \sum_j (j - \mu_y)^2 \sum_i P(i, j)$

Toutes ces caractéristiques sont ensuite utilisées en tant qu'entrées dans le classificateur de réseau neuronal.

Le réseau de neurones consiste à relier toutes les entrées avec trois couches de neurones entièrement connecté au sein desquelles une information circule de la couche d'entrée vers la

couche de sortie uniquement. Le poids de nœud (ou synapse) des différentes couches est choisi aléatoirement.

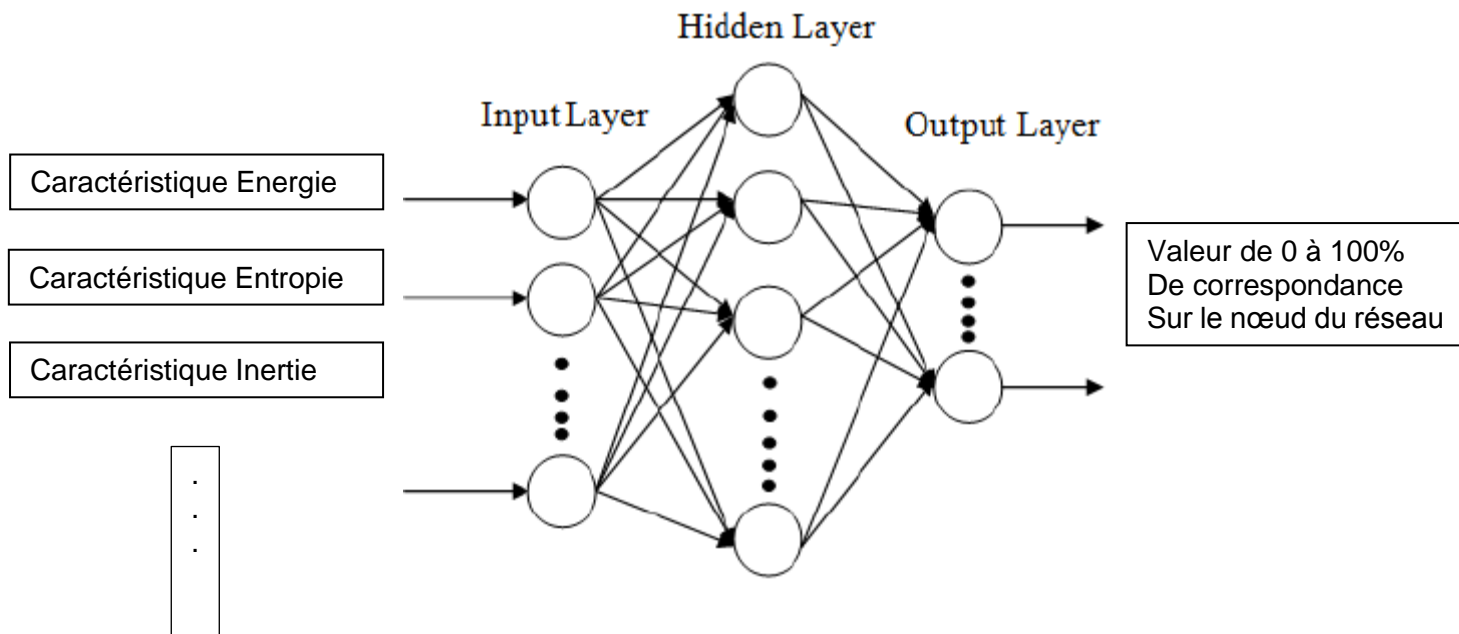


Figure 8 : Réseau de neurones Xylotron à trois couches

3.2.5 Méthode d'identification de l'automate : La vérification

Une fois l'apprentissage du modèle effectué, une phase de vérification de celui-ci est réalisé sur un petit nombre d'échantillons n'ayant pas servi à l'apprentissage.

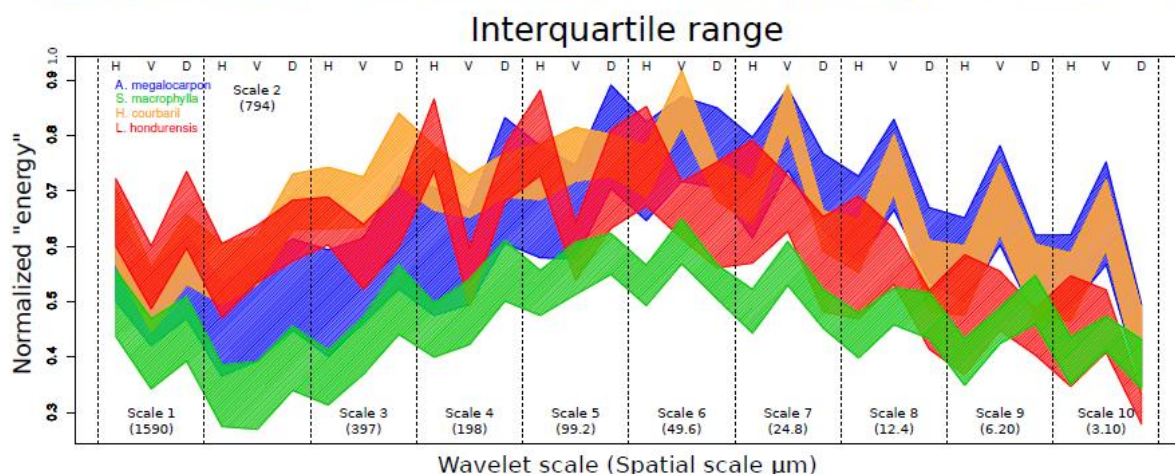
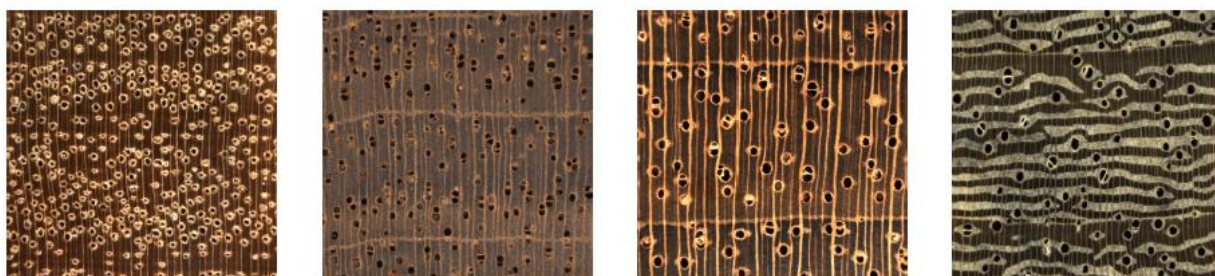


Figure 9 : Illustration des spectres d'intensité lumineuse pour quatre essences différentes

3.2.6 Méthode d'identification de l'automate : Finalisation

Si l'ensemble des échantillons utilisés durant la phase de vérification donnent les résultats attendus, le modèle peut être considéré comme abouti. Si des erreurs de reconnaissance sont constatés, le poids de chaque synapse du réseau neuronal peut être revu ainsi que la valeur seuil définie lors de la vérification.

4. Protocole d'évaluation des deux matériels

Les deux matériels sont en phase d'évaluation de leur capacité à reconnaître les différentes essences lors du développement de plusieurs modèles de reconnaissance.

4 modèles de reconnaissance ont été développés avec le matériel Xylorix et 4 modèles de reconnaissance seront développés avec le matériel Xylotron

Parmi les 8 modèles, 3 modèles seront communs aux 2 matériels :

- Un modèle pour le Bossé (*Guarea cedrata*, *Guarea thompsonii*, *Guarea laurentii*),
- Un modèle pour le Sapelli (*Entandrophragma cylindricum*),
- Un modèle pour le Sipo (*Entandrophragma utile*)

Les deux autres essences étudiées seront le Chêne européen (*Quercus petraea* et *Quercus robur*) pour Xylorix et l'Acajou (*Khaya anthotheca*, *Swietenia macrophylla*) pour Xylotron

4.1 Les échantillons bois

Trois sources d'approvisionnement ont été utilisées pour réunir les bois nécessaires à la modélisation :

- Échantillons présents dans la Xylothèque FCBA (plaquette de bois de section 60*10 mm)
- Prélèvement d'échantillons de carrelés auprès des adhérents CTB-LCA (tris plis de section 85*63 mm)
- Échantillons provenant de campagne de caractérisation bois français pour le Chêne (plaquette de section 50*20 mm)

Le nombre d'échantillons nécessaire par essence a été variable et sera décrit pour chaque essence.

L'état de surface de la coupe transversale du bois demande de voir correctement la structure anatomique. Il y a eu deux modes de préparation qui ont été utilisés :

- La lame de rasoir
- Le polissage

Les deux fabricants (FPL et Xylorix) nous ont donné leurs recommandations pour la préparation des échantillons. Ainsi, la lame de rasoir a été privilégiée pour les échantillons ayant servi à Xylorix et le polissage a été systématiquement utilisé pour le Xylotron.

4.2 Les photographies

Plusieurs photographies ont été prises par échantillons pour appréhender la variabilité des textures des bois et prendre en compte l'orientation de l'image (uniquement pour Xylorix). Ainsi nous avons pris :

- Pour le matériel Xylorix : 10 photos minimum multi-orientation (luminosité extérieure)
- Pour le matériel Xylotron : 10 photos minimum avec une orientation des rayons ligneux à la verticale

Pour l'apprentissage et la vérification des matériels nous avons utilisé au minimum :

- 20 échantillons par essence en calibration et 10 en validation (avec essences proches anatomiquement) pour le matériel Xylorix
- 30 échantillons par essence en validation avec une calibration du modèle réalisée avec des échantillons de la xylothèque FPL pour le matériel Xylotron

5. Suivi technique – Protocole XYLORIX

Nous nous proposons dans ce chapitre de décrire la phase d'apprentissage et de vérification pour chaque modèle développé avec XYLORIX.

La phase de vérification nous permet ici d'évaluer la performance des modèles créés par matériel. Cependant cette phase d'évaluation sera à compléter par la mise à disposition du matériel en entreprise pour son utilisation par des bêta-testeurs dans des conditions de production comme il a été demandé dans l'élaboration du projet. Cette étape de tests consistera à prêter le matériel à des utilisateurs (après formation) pendant un laps de temps à déterminer pour recueillir des informations sur la fiabilité du matériel, les erreurs de reconnaissance éventuelles, son ergonomie d'utilisation et l'avis des bêta-testeurs sur les possibilités d'intégration du matériel dans l'entreprise.

5.1 Modèle Chêne

5.1.1 Apprentissage

L'apprentissage du chêne a été effectué sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Chêne européen (duramen de chêne sessile ou pédonculé)	Autres chênes (alba, libani, rubra etc...)	Essence proche châtaignier
Echantillons bois	40	13	10
Zone photographiée	10 photos * 5 zones rafraichies /échantillon	10 photos * 1 zone rafraichie /échantillon	10 photos * 1 zone rafraichie /échantillon
Nombre d'images total	2000	130	100

Tableau 2 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Chêne

5.1.2 Vérification

Le modèle Chêne a été refait quatre fois afin de pouvoir éviter toute confusion avec le châtaignier et les autres types de chêne (chêne rouge américain et chêne autres que sessile et pédonculé). La vérification du quatrième modèle a été effectuée sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Chêne européen (duramen de chêne sessile ou pédonculé)	Autres chênes (alba, libani, rubra etc...)	Essence proche châtaignier
Echantillons bois	19 échantillons	14 échantillons	7 échantillons
Zone photographiée	3 photos * 1 zones rafraichies /éch		
Nombre d'images total	57	42	21

Tableau 3 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Chêne

Sur 24 échantillons de chêne européen 100% ont été reconnus comme du chêne européen.

Toute essence confondue (proches anatomiquement des chênes sessiles et pédonculés) le modèle est fiable à plus de 98 %
 Pour d'autres essences (autres que la famille des Fagacées), la réponse 0% a été systématique.

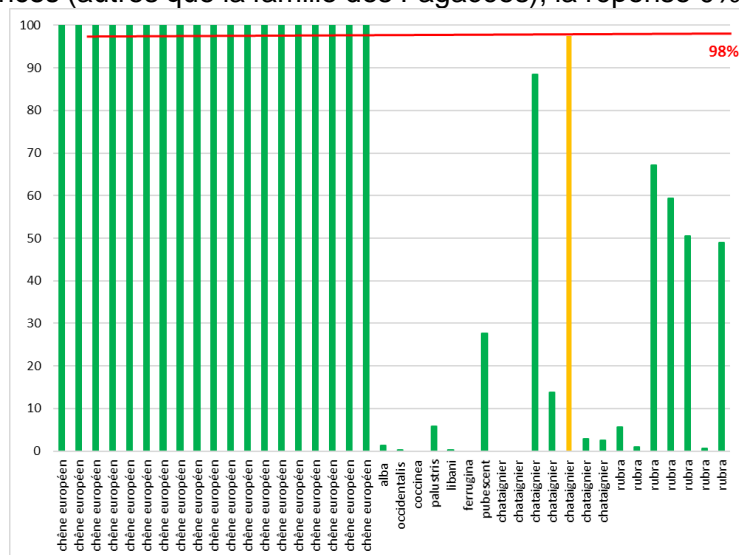


Figure 10 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Chêne

Nous considérons que si le pourcentage moyen de 3 photos est supérieur ou égal à 98% l'échantillon est bien du chêne sessile ou pédonculé, dans le cas contraire il s'agit d'une autre espèce.

5.2 Modèle Bossé

5.2.1 Apprentissage

L'apprentissage du Bossé a été effectué sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Bosse « clair » Guarea cedrata
Echantillons bois	23
Zone photographiée	10 photos * 2 zones rafraichies /éch
Nombre d'images total	460

Tableau 4 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Bossé

La préparation des échantillons a été très difficile. Le polissage n'a pas pu être utilisé pour avoir une plus grande surface à observer car celui-ci entraînait des fibres qui obstruaient les vaisseaux et qui perturbaient le modèle. Afin d'être dans les futures conditions de test par les professionnels nous avons choisi de réaliser le modèle à partir de petites zones rafraichies à la lame de rasoir.

5.2.2 Vérification

Le modèle Bossé a donné satisfaction dès le premier développement
 La vérification du modèle a été effectuée sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous :

	Bosse « clair » Guarea cedrata	Autres guarea (thompsonii, laurentii)	Essence proche Sipo, sapelli
Echantillons bois	9 échantillons	3 échantillons	4 échantillons
Zone photographiée	10 photos * 2 zones rafraichies /éch		10 photos * 1 zone rafraichie /éch
Nombre d'images total	180	60	40

Tableau 5 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Bossé

Sur 9 échantillons de Bossé clair 100% ont été reconnus Bossé clair (Guarea cedrata)

Pour les autres genre Guarea :

Les 2 échantillons Bossé foncé (Guarea thompsonii) n'ont pas été reconnus Bossé clair.

L'échantillon Bossé clair (Guarea laurentii) est reconnu à 100 % Bossé clair

Les 4 échantillons autres que Guarea (Sipo et Sapelli) n'ont pas été reconnus Bossé clair.

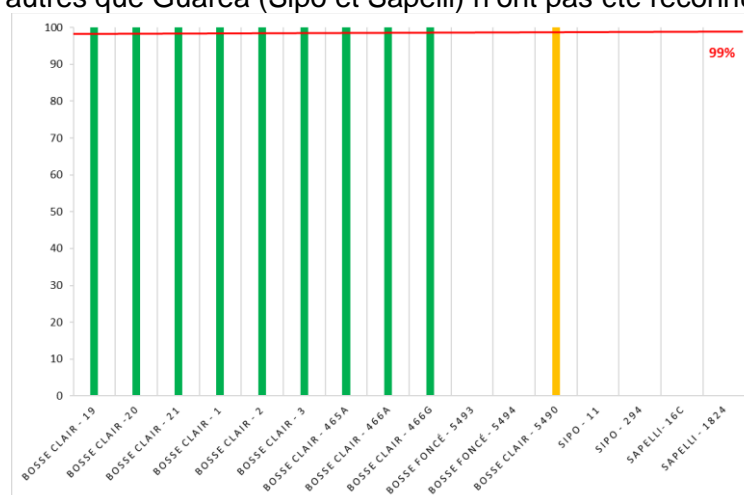


Figure 11 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Bossé

Nous considérons que si le pourcentage moyen de 3 photos est supérieur ou égal à 99% il s'agit de Bossé « clair » (Guarea cedrata ou Guarea laurentii), dans le cas contraire il s'agit d'une autre espèce.

5.3 Modèle Sapelli

5.3.1 Apprentissage

L'apprentissage du Sapelli a été effectué sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Sapelli	Acajou et Tiama
Echantillons bois	20 échantillons	8 échantillons
Zone photographiée	10 photos * 2 zones polies /éch	10 photos * 1 zone rafraichie ou polie /éch
Nombre d'images total	400	80

Tableau 6 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Sapelli

5.3.2 Vérification

Le modèle Sapelli a été refait deux fois. Le premier modèle était trop dépendant de l'état de surface des échantillons. Le deuxième modèle donne satisfaction mais l'apprentissage a été effectué uniquement sur du duramen.

La vérification du modèle 2 Sapelli a été effectuée sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Sapelli	Essences proches : Sipo, kosipo, bosse, tiama , acajou...
Echantillons bois	14 échantillons	12 échantillons
Zone photographiée	3 photos * échantillon poli	
Nombre d'images total	42	36

Tableau 7 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Sapelli

100 % des échantillons Sapelli ont été reconnus comme du Sapelli

Sur les autres espèces appartenant à la même famille (Méliacée) et au même genre Entandrophragma (Sipo, Kosipo et Tiama) 100 % des échantillons n'ont pas été reconnus comme du Sapelli.

Sur les autres espèces appartenant à la même famille (Méliacée) mais pas au même genre (Bosse et Acajou) : 100 % des échantillons testés n'ont pas été reconnus comme du Sapelli

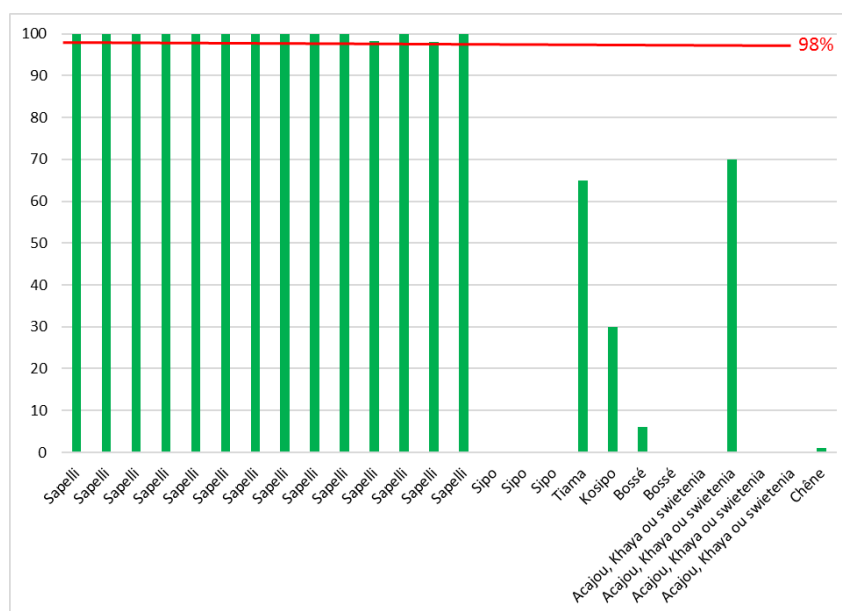


Figure 12 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Sapelli

Nous considérons que si le pourcentage moyen de 3 photos est supérieur ou égal à 98% il s'agit bien de Sapelli, dans le cas contraire il s'agit d'une autre espèce.

5.4 Modèle Sipo

5.4.1 Apprentissage

L'apprentissage du sipo a été effectué sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Sipo	Acajou , tiama et bosse
Echantillons bois	22 échantillons	12 échantillons
Zone photographiée	10 photos * 2 zones polies /échantillon	10 photos * 1 zone rafraichie ou polie /échantillon
Nombre d'images total	440	120

Tableau 8 : Descriptif échantillons d'apprentissage pour le modèle Sipo

5.4.1 Vérification

Le modèle Sipo a été refait deux fois. Le premier modèle était satisfaisant sauf pour les espèces Bossé, Acajous et Tiama qui étaient reconnus comme du Sipo.

La vérification du modèle 2 Sipo a été effectué sur la base des échantillons décrit dans le tableau ci-dessous

	Sipo	Sapelli, kosipo, bosse, tiama , acajou...
Echantillons bois	12 échantillons	11 échantillons
Zone photographiée	10 photos * 1 zone polie / échantillon	10 photos * 1 zone rafraichie ou polie / échantillon
Nombre d'images total	120	110

Tableau 9 : Descriptif échantillons de vérification pour le modèle Sipo

92% des échantillons Sipo sont reconnus comme du Sipo

Pour les autres espèces appartenant à la même famille (Méliacée) et au même genre Entandrophragma (Sapelli, Kosipo et Tiama) : 100 % des échantillons ne sont pas reconnus comme du Sipo.

Pour les autres espèces appartenant à la même famille (Méliacée) mais pas au même genre (Bossé et Acajou) 100 % des échantillons testés ne sont pas reconnus comme du Sipo

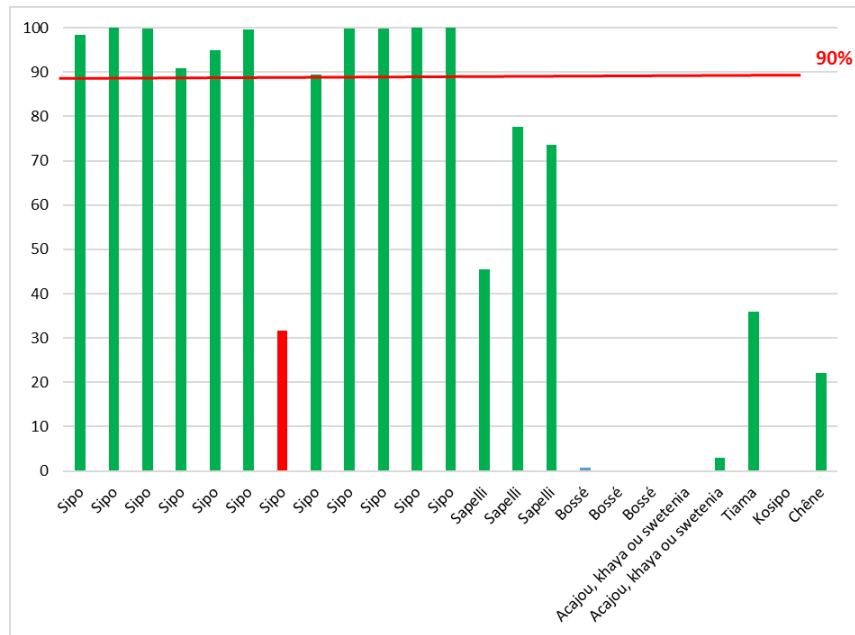


Figure 13 : Histogramme des réponses Xylorix sur modèle Sipo

Nous considérons que si le pourcentage moyen de 3 photos est supérieur ou égal à 90% il s'agit bien de Sipo, dans le cas contraire il s'agit d'une autre espèce.

5.5 Modèles bois malaisien sur projet antérieur

Avant ce projet, Xylorix a développé en partenariat avec l'Institut de recherche forestière de Malaisie (FRIM) une application pour reconnaître 20 essences de bois malaisien (Balau, Chengal, Dark red meranti, Jelutung, Karas, Keranji, Keruing, Kempas, Light red meranti, Mengkulang, Merbau, Nyatoh, Ramin, Red Balau, Rubberwood, Teak, Tualang, White Meranti, Yellow Meranti, Bintangor).



MyWood-ID

By Omar ali Abdul rahim

Category: **Utilities**

Release Date: 2018-01-23

Current Version: 0.2

Adult Rating: 4+

Developer: Omar ali Abdul rahim

Compatibility: Android

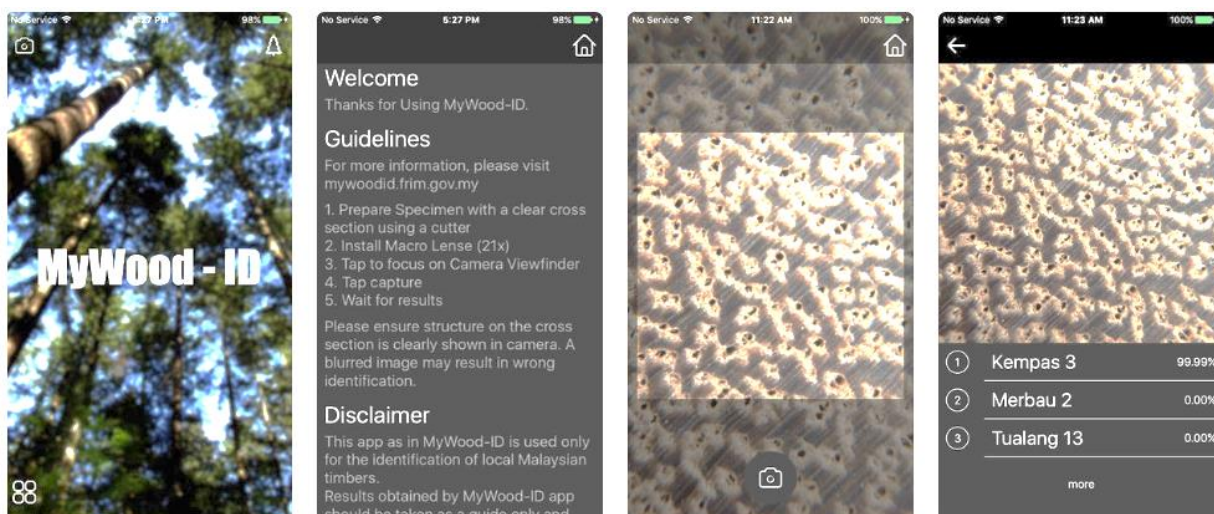


Figure 14 : Exemple de plateforme déjà développée par Xylorix pour des bois malaisiens : MyWood-ID

Cette application n'a pas fait l'objet d'évaluation mais a été mise à disposition par Xylorix durant les tests effectués. L'utilisation de cette application sur quelques échantillons nous a montré des résultats intéressants notamment sur les Meranti. Cependant, le nombre plus élevé d'essences reconnues nous a montré aussi les limites du système puisque le système doit gérer de nombreux recouvrements de textures (voir l'exemple de la figure 9) qui pourraient engendrer plus d'erreurs.

6. Suivi technique – Protocole XYLOTRON

6.1 Les modèles

Aujourd’hui, la remise tardive du matériel ne permet pas pour l’instant l’évaluation de ce matériel. Cette partie sera donc complétée et amendée une fois les différents tests effectués (courant 2019).

7. Conclusion technique

Si les modèles développés aujourd’hui sur le matériel Xylorix ont été vérifiés sur quelques échantillons en notre possession, il nous apparaît important de continuer la phase de fiabilisation des modèles directement en entreprises, là où ceux-ci seront employés. En effet, la fiabilité des automates de vision sur la reconnaissance d’essences dépend fortement du nombre d’échantillons ayant servi pour la constitution du modèle et de la prise en compte des sources de variabilité qui peut exister dans la texture de l’essence (suivant son origine géographique, les conditions de croissance du bois, la coloration du bois, ...). Ainsi dès l’année 2019, grâce à la contribution du CODIFAB, nous pourrions mettre à disposition deux smartphones au sein des menuiseries qui pourront tester le fonctionnement de l’appareil et enrichir la base d’apprentissage des différents modèles d’essences développées. Le protocole de mise en place du matériels et le choix des bêta-testeurs reste à effectuer et les résultats de ces tests feront l’objet de la mise à jour de ce rapport.

Aujourd’hui, sur le matériel Xylorix, nous pouvons dire à partir des tests effectués durant la phase de vérification que les différents modèles développés sont fiables à plus de 92%. Ils existent des petites différences selon les essences qui sont présentées dans le tableau suivant :

Essences	Pourcentage de réussite de la reconnaissance (%)	Pourcentage minimum à obtenir sur 3 photos pour valider la reconnaissance
Bossé (Guarea cedrata, Guarea laurentii)*	98%	99%
Sapelli (Entandrophragma cylindricum)	100%	98%
Sipo (Entandrophragma utile)	92%	90%
Chêne européen (Quercus petraea et Quercus robur)	98%	98%

Tableau 10 : Taux de réussite de la reconnaissance Xylorix par essence

En terme de contrôle des essences sur les produits menuiserie, il nous paraît important de faire au minimum trois photographies sur l’échantillon de bois à reconnaître en se servant du seuil établi dans le tableau ci-dessus pour être sûr de la validité de l’identification.

Sur le matériel Xylotron, les premiers tests sur les essences Sipo et Sapelli (phase d’apprentissage) nous montrent, des résultats assez variables pour le moment et qui ne sont pas passé par la phase de vérification. Ainsi, nous présenterons les résultats sur ce matériel lors de la révision de ce rapport.

(*) Le Bossé foncé (*Guarea thompsonii*) ne sera pas reconnu par le modèle Bossé

Annexe 1 : fiche anatomique *Quercus* spp. (*Chêne blanc*)

Nomenclature : famille des FAGACEAE. *Q. robur* L. - Syn.: *Q. pendunculata* Ehrh.; *Q. petraea* (Mattuscka) Liebl. - Syn.: *Q. sessiliflora* Salisb.; *Q. grosseserrata* Bl.- Syn.: *Q. crispula* Bl., *Q. mongolica* Fisch. ex Turcz. var. *grosseserrata* (Bl.) Rehd. & Wils.; *Q. alba* L., *Q. muehlenbergii* Engelm. Nom commercial : Weißeiche (D), European oak (GB), European white oak (USA), Europees eiken (NL), farnia (I), roble (E); *Q. robur*: Stieleiche, Sommereiche (D); *Q. petraea*: Traubeneiche, Wintereiche, Spessarteiche (D), Chêne pédonculé (F); *Q. grosseserrata*: Japanische Eiche (D).



Figure 18 : Coupe transversale du *Quercus* spp. (*Chêne européen*) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Europe, sauf régions méditerranéennes, ou Régions méditerranéennes, y compris l'Afrique du Nord et le Moyen-Orient, ou Asie tempérée, ou Amérique du Nord (*Q. alba*).

Caractères généraux : Limites de cernes distinctes. Bois de coeur brun à jaune à blanc ou gris. Couleur de l'aubier différente du bois de coeur. Densité basale: (0.39–)0.6–0.65(–0.93) g/cm³.

Vaisseaux : Vaisseaux présents. Bois à zones poreuses. Disposition des vaisseaux en files ou plages obliques et, ou radiales ou en flammes (rarement dendritique), vaisseaux bois initial exclusivement isolés et accolés dans le bois final, vaisseaux accollements radiaux de 2–3 et accollements en amas (seulement dans le bois final). Vaisseaux de bois final sont très petits, nombreux et à parois minces contrairement au Chêne rouge. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 130–290–420 µm. Thyllés présents (très fréquentes), de parois mince.

Trachéides et fibres : Trachéides vasculaires ou juxtavasculaires normalement présentes. Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : Parenchyme axial présent. Parenchyme axial le plus souvent apotrachéal et paratrachéal. Parenchyme apotrachéal cellules isolées disséminées, ou en chaînettes (agrégats en courtes lignes tangentielles entre les rayons). Parenchyme paratrachéal juxtavasculaire. Cellules de parenchyme axial en files. Nombre moyen de cellules de parenchyme axial par file: 4–8.

Rayons : Nombre de rayons par mm: 5–12 (rayons unisériés; large 1–2/mm), *rayons multisériés, même si seulement sporadiques*, rayons (2–)10–30 sériés. *Rayons de deux tailles différentes.* Rayons composés de cellules du même type. Cellules des rayons homocellulaires couchées.

Dépôts minéraux : Cristaux présentes (rare), rhomboédriques (prismes), situés dans: cellules des rayons et cellules du parenchyme axial. Cellules cristallifères dans les rayons couchés. *Cristaux dans les cellules couchées des rayons non en files radiales.* Cellules cristallifères du parenchyme axial recloisonnées. Nombre de cristaux par loges: un seul. Silice non observé.

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.

Annexe 2 : fiche anatomique *Guarea* spp (Bossé)

Nomenclature : famille des MELIACEAE. *G. cedrata* (A. Chev.) Pellegr. (syn: *G. alatipetiolata* de Wild., *Trichilia cedrata* A. Chev.); *G. laurentii* de Wild. (syn.: *Trichilia reygartii* de Wild.); *G. thompsonii* Sprague & Hutch. Nom commercial : *G. cedrata*: scented or white guarea (GB, NG); bossé claire (FR); bosasa, lisasa, dumbala (CD); divuiti (GA); bossi, kwabohoro (GH); akuraten, obobonufua (NG); timbi, ebangbembra, obobo (CM); krassé, ibotou, anakué, krassain, m'bossa (CI); *G. thompsonii*: mutigbanaye (CI); black guarea (NG); bossé foncé (FR); bolon (CM); guarea, diambi (CD). Non protégé selon les normes CITES.

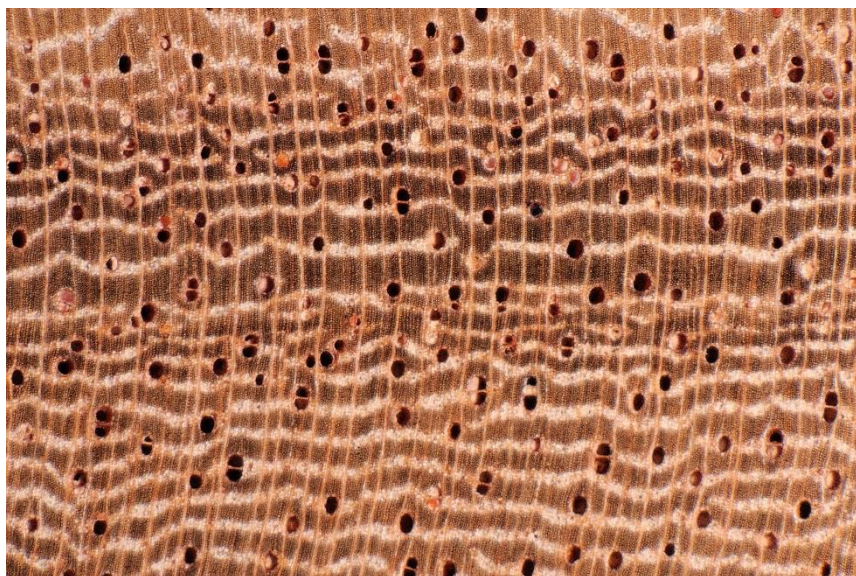


Figure 17 : Coupe transversale du *Guarea cedrata* (Bossé clair) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Afrique tropicale.

Caractères généraux : Bois de coeur rouge à brun (*G. cedrata*: couleur saumon devenant brun orangé à la lumière), jaune à brun à rouge (*G. thompsonii*: fonçant à brun cuivré). Couleur de l'aubier différente du bois de coeur. **Odeur caractéristique.** Densité 0.52–0.55–0.65 g/cm³ (*G. thompsonii* souvent plus lourd). **Parfois exudations colorées en surface.**

Vaisseaux : Bois à pores disséminés. Vaisseaux accolés, accolements radiaux de 2–3. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 85–140–215 µm. Nombre moyen de vaisseaux par mm²: 7–10–15. **Thylles absents.** Autres dépôts dans les vaisseaux du bois de coeur présents (brun sombre).

Trachéides et fibres : Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : Parenchyme axial en lignes et non en lignes. Lignes marginales (ou semblant marginales) ou non marginales (ou semblant marginales). Lignes fines ou épaisses. Parenchyme axial apotrachéal, ou paratrachéal. Parenchyme apotrachéal en chaînettes. Parenchyme paratrachéal aliforme, anastomosé, et unilatéral (principalement unilatéral). Parenchyme aliforme: en ailes. Cellules de parenchyme axial en files. Nombre moyen de cellules par file: 6–8–10.

Rayons : Nombre de rayons par mm: 6–12, rayons multisériés, (1–)2–3 séries. Rayons composés de cellules du même type (homocellulaires) et composés de deux types de cellules ou plus (hétérocellulaires); cellules des rayons homocellulaires couchées. Rayons hétérocellulaires

avec cellules carrées et dressées seulement dans les rangées terminales, généralement avec 1 rangée terminale des cellules carrées ou dressées.

Tissus de sécrétion : Canaux intercellulaires absents.

Dépôts minéraux : Cristaux présents, rhomboédriques (prismes), situés dans: cellules du parenchyme axial. Cellules cristallifères du parenchyme axial recloisonnées. Nombre de cristaux par loges: un seul. **Silice présent**, en corpuscules; localisée dans les cellules des rayons et localisée dans les cellules du parenchyme axial.

Caractères physiques et chimiques : Bois de coeur non fluorescent.

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.

Annexe 3 : fiche anatomique *Entandrophragma cylindricum* (Sapelli)

Nomenclature : famille des MELIACEAE. Syn.: *Entandrophragma tomentosum* A. Chev., *E. lebrunii* Staner. Nom commercial : sapelli (DE, FR, BE); sapele, sapele mahogany (GB, NG); sapeli Mahonie (NL); aboudikro (CI, FR, DE); bibitu, lotouhé, abitigbro, boubousson, pan (CI); penkwa (GH); agiekpogo, ubilesan, ukwekan (NG); assié (CM); lifaki (UG); lifaki, libuyu, bobwe, m'boyoy (CF); lifuti, livuite (AO). Non protégé selon les normes CITES.



Figure 15 : Coupe transversale du *Entandrophragma cylindricum* (Sapelli) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Afrique tropicale.

Caractères généraux : Limites de cernes distinctes. Bois de coeur brun à rouge. Couleur de l'aubier différente du bois de coeur. **Odeur caractéristique.** Densité 0.49–0.62–0.72 g/cm³.

Vaisseaux : Bois à pores disséminés. **Vaisseaux accolés**, accolements radiaux de 2–3. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 90–140–200 µm. Nombre moyen de vaisseaux par mm²: 9–17. Autres dépôts dans les vaisseaux du bois de coeur présents (brun rouge).

Trachéides et fibres : Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : Parenchyme axial en lignes ou non en lignes. Lignes marginales (ou semblant marginales). Lignes fines ou épaisses. Parenchyme axial apotrachéal (chaînettes indépendantes ou attachées aux vaisseaux), ou paratrachéal. Parenchyme apotrachéal en chaînettes. Parenchyme paratrachéal en manchon et unilatéral. Cellules de parenchyme axial en files. Nombre moyen de cellules par file: 8.

Rayons : Nombre de rayons par mm: (3–)5–7, rayons multisériés, 2–5 sériés. Rayons composés de deux types de cellules ou plus (hétérocellulaires). Rayons hétérocellulaires avec cellules carrées et dressées seulement dans les rangées terminales, généralement avec 1 rangée terminale des cellules carrées ou dressées.

Tissus de sécrétion : **Canaux intercellulaires présents**, d'origine traumatique, **d'orientation axiale**, axiaux en lignes tangentielles longues ou en lignes tangentielles courtes.

Dépôts minéraux : Cristaux présents, rhomboédriques (prismes), situés dans: cellules des rayons et cellules du parenchyme axial. Cellules cristallifères dans les rayons dressés et, ou carrées, des rayons dressées et/ou carrées cristallifères reclouisonnées. Cellules cristallifères du parenchyme axial reclouisonnées, ou non reclouisonnées. Nombre de cristaux par loges: un seul. Silice non observée.

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.

Annexe 4 : fiche anatomique *Entandrophragma utile* (Sipo)

Nomenclature : famille des MELIACEAE. Syn.: *Entandrophragma macrocarpa* A. Chev., *E. roburoides* Vermeesen, *E. thomasi* Ledoux. Nom commercial : assié (FR, CM); bada, mébrou, zuiiri (CI); assi, ombolobolo, mouragalamando, kos-kosi (GA); efou-konkonti (GH); muyoyu (UG); timbi, assang-assié (CM); kalungi, m'vovo, tshimai rouge/noir (CD); akuk, ogipogo, ubilesan (NG); momboyo (CG); njeli (LR). Non protégé selon les normes CITES.

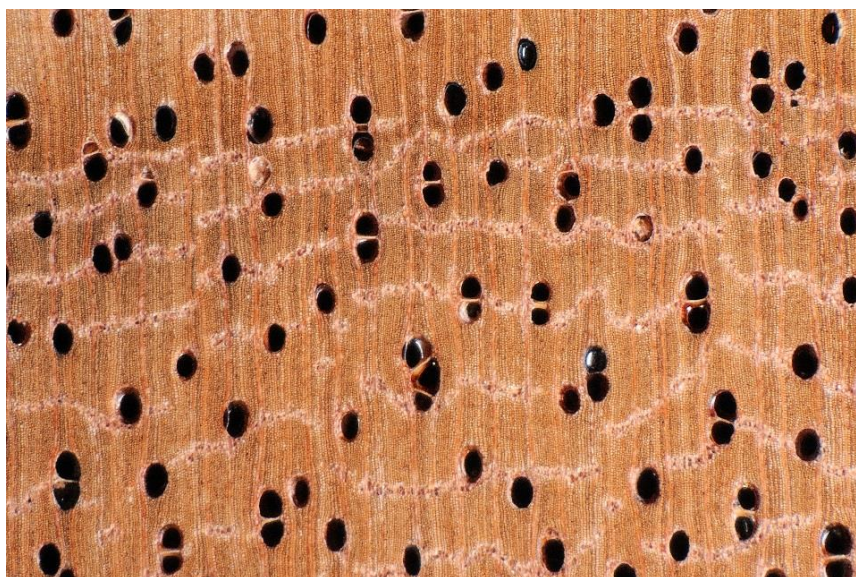


Figure 16 : Coupe transversale du *Entandrophragma utile* (Sipo) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Afrique tropicale.

Caractères généraux : Limites de cernes distinctes. **Bois de coeur** brun à rouge, brun à jaune (à la lumière); **sans veines**. **Couleur de l'aubier différent du bois de coeur**. **Odeur absente**. **Densité 0.45–0.59–0.7 g/cm³**.

Vaisseaux : Bois à pores disséminés. **Disposition des vaisseaux sans disposition particulière, vaisseaux accolés**, vaisseaux accolements radiaux de 2–3. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 140–230–295 µm. Nombre moyen de vaisseaux par mm²: 3–6. Autres dépôts dans les vaisseaux du bois de coeur présents (brun rouge sombre).

Trachéides et fibres : Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : Parenchyme axial en lignes ou non en lignes. **Lignes marginales (ou semblant marginales)**. Lignes fines. Parenchyme axial apotrachéal, ou paratrachéal. Parenchyme apotrachéal de cellules isolées disséminées, ou en chaînettes (lignes courtes et onduleuses généralement non associées aux vaisseaux). Parenchyme paratrachéal juxtavasculaire, en manchon, et anastomosé. Cellules de parenchyme axial en files. **Nombre moyen de cellules par file: 7–8**.

Rayons : **Nombre de rayons par mm: (2–)5–7**, rayons multisériés, 2(–4) sériés. Rayons composés de cellules du même type (homocellulaires), ou composés de deux types de cellules ou plus (hétérocellulaires); cellules des rayons homocellulaires couchées. Rayons hétérocellulaires avec cellules carrées et dressées seulement dans les rangées terminales,

généralement avec 1 rangée terminale des cellules carrées ou dressées et généralement avec 2–4 rangées terminales des cellules carrées ou dressées (rarement).

Tissus de sécrétion : Canaux intercellulaires présents ou absents, d'origine traumatique, d'orientation axiale, axiaux en lignes tangentielles courtes.

Dépôts minéraux : Cristaux présents, rhomboédriques (prismes), situés dans : cellules du parenchyme axial. Cellules cristallifères du parenchyme axial recloisonnées, ou non recloisonnées. Nombre de cristaux par loges: un seul. **Cristaux rhomboédriques se produisent de façon très sporadique alors dans les cellules marginales des rayons, mais ne sont pas typiques de l'espèce. Silice non observée.**

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.

Annexe 5 : fiche anatomique *Swietenia macrophylla* (Acajou Amérique centrale)

Nomenclature : famille des MELIACEAE. Syn.: *S. candollei* Pittier, *S. krukovii* Gleason, *S. tessmannii* Harms, *S. belizensis* Lundell. Nom commercial : Amerikanisches Mahagoni, echtes Mahagoni, Honduras-, Tabasco-, Nicaragua-Mahagoni (DE);, caoba (cAm), aguano (PA, PE, BR); orura (VE); zopilote (MX); sapotón (SR); yulu (NI), crura (BO); acajou d'Amérique (FR), American mahogany, baywood (GB), broadleaf mahogany (US). Protégé selon les normes CITES Annex II (*S. humilis*, *S. macrophylla*, *S. mahagoni*, 2002).



Figure 19 : Coupe transversale du *Swietenia macrophylla* (Acajou Amérique du sud) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Mexique et Amérique Centrale, Amérique du Sud tropicale (sauf dans le bassin de l'Amazonie).

Caractères généraux : **Limites de cernes distinctes.** Délimités par une ligne de parenchyme marginal. **Bois de coeur** brun (brun clair), brun à rouge (fonçant à la lumière, reflets dorés); **sans veines. Couleur de l'aubier différente du bois de coeur. Odeur absente. Densité 0.4–0.5–0.65 g/cm³.** Contrefilé (rubanage) et/ou avec diverses variations de fil autour des branches ou des fourches, donnant des bois diversement figurés.

Vaisseaux : **Bois à pores disséminés. Disposition des vaisseaux sans disposition particulière, vaisseaux accolés,** vaisseaux accolements radiaux de 2–3. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 90–160–255 µm. Nombre moyen de vaisseaux par mm²: 2–18. Autres dépôts dans les vaisseaux du bois de coeur présents (généralement brun rouge sombre, plus rarement blancs).

Trachéides et fibres : Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : **Parenchyme axial présent, en lignes. Lignes marginales (ou semblant marginales).** Lignes fines ou épaisses. Parenchyme apotrachéal en chaînettes. Parenchyme paratrachéal juxtavasculaire à en manchon. Cellules de parenchyme axial en files. Nombre moyen de cellules par file: 4–8.

Rayons : **Nombre de rayons par mm: 5–10, rayons multisériés,** 1–2–4(–5) sériés. Rayons composés de cellules du même type (homocellulaires), ou composés de deux types de cellules

ou plus (hétérocelulaires); cellules des rayons homocellulaires couchées, ou carrées ou dressées. Rayons hétérocellulaires avec cellules carrées et dressées seulement dans les rangées terminales, généralement avec 1 rangée terminale des cellules carrées ou dressées ou généralement avec 2–4 rangées terminales des cellules carrées ou dressées. **Cellules bordantes absentes. Cellules palissadiques absentes.**

Tissus de sécrétion : Cellules à huile ou à mucilage absentes. Canaux intercellulaires présents ou absents, d'origine traumatique, d'orientation axiale, axiaux rarement en lignes tangentiels longues ou en lignes tangentiels courtes. Laticifères ou tubes à tanins absents.

Dépôts minéraux : Cristaux présents, rhomboédriques (prismes), situés dans: cellules des rayons et cellules du parenchyme axial. Silice non observée.

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.

Annexe 6 : fiche anatomique *Khaya* spp. (*Acajou d'Afrique*)

Nomenclature : famille des MELIACEAE. *K. ivorensis* A. Chev.; *K. anthotheca* - Syn. *Garretia anthotheca* Welw.; *K. grandifoliola* C.DC. Nom commercial : Afrikanisches Mahagoni, Khaya (D), Benin-, Lagos-mahagoni (WAN), Dubini-, Axim-, Accra-, Tacoradi mahagoni (GH), n'gollon, n'dola, Kap Lopez mahagoni (G), Grand Bassam mahagoni (CI), undianunu (ANG), acajou d'Afrique (F), African mahagoni (GB), Khaya (USA), Douala mahonie (NL).

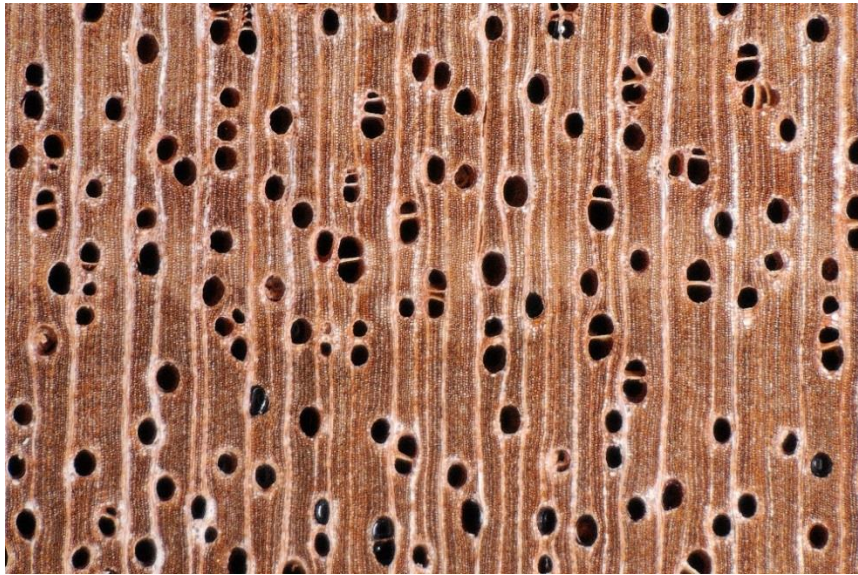


Figure 20 : Coupe transversale du *Khaya* spp. (*Acajou d'Afrique*) grossissement x10

Arbre : Répartition géographique: Afrique tropicale.

Caractères généraux : Bois de coeur brun à rouge. Couleur de l'aubier différente du bois de coeur. Densité basale: 0.42–0.47–0.57 g/cm³.

Vaisseaux : Bois à pores disséminés. *Vaisseaux accolés*, accolements radiaux de 2–3. Diamètre tangentiel moyen des vaisseaux: 110–160–245 µm. Nombre moyen de vaisseaux par mm²: 2–3–7. Perforations simples. Autres dépôts dans les vaisseaux du bois de coeur présents (orange marron).

Trachéides et fibres : Fibres de parois d'épaisseur moyenne.

Parenchyme axial : *Parenchyme axial non en lignes*. Parenchyme axial paratrachéal. Parenchyme paratrachéal juxtavasculaire, ou en manchon. Cellules de parenchyme axial en files. Nombre moyen de cellules de parenchyme axial par file: 4(–8). Parenchyme à bandes parfois présent mais non caractéristique du genre.

Rayons : Nombre de rayons par mm: 8–11, *rayons multisériés, même si seulement sporadiques*, rayons (2–)4–7 sériés. *Rayons avec des parties multisériées aussi larges que les parties unisériées présents*. Rayons composés de deux types de cellules ou plus. Rayons hétérocellulaires cellules carrées et dressées seulement dans les rangées terminales. Nombre de rangées terminales avec des cellules carrées ou dressées 1 et 2–4 (rarement).

Tissus de sécrétion : *Canaux intercellulaires présents (rarement)*, d'origine traumatique, *axiaux*, en lignes tangentielles longues et en lignes tangentielles courtes.

Dépôts minéraux : Cristaux présents, rhombohédriques (prismes), situés dans : cellules des rayons et cellules du parenchyme axial. Cellules cristallifères dans les rayons dressées et, ou carrées. Cellules cristallifères du parenchyme axial non recloisonnées. Nombre de cristaux par loges: un seul. Silice non observée.

Extrait de la fiche : 'Richter, H.G., and Dallwitz, M.J. 2000 onwards. Commercial timbers: descriptions, illustrations, identification, and information retrieval. In English, French, German, Portuguese, and Spanish. Version: 7th August 2018. delta-intkey.com'.