



**HAL**  
open science

## **Biomtrace : développement de méthodes BIOMétriques pour l'identification et la TRACabilitE des grumes de chêne**

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Jacquin, Daniel Rittié, Frédéric Bordat, Phuc Ngo, Dorian Martinetto, Isabelle Debled-Rennesson, Alexandre Piboule, Christophe Ginet, et al.

### ► To cite this version:

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Jacquin, Daniel Rittié, Frédéric Bordat, et al.. Biomtrace : développement de méthodes BIOMétriques pour l'identification et la TRACabilitE des grumes de chêne. INRAE; ONF; Université de Lorraine. 2024. hal-04822724

**HAL Id: hal-04822724**

**<https://hal.science/hal-04822724v1>**

Submitted on 6 Dec 2024

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

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

# Biomtrace

*Développement de méthodes BIOMétriques pour  
l'identification et la TRACabilitE des grumes de chêne*

---

**Rapport final de la tranche 1 – Année 2023**

19 septembre 2024

---

*Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Philippe Jacquin, Daniel Rittié,  
Frédéric Bordat (INRAE),  
Phuc Ngo, Dorian Martinetto, Isabelle Debled-Rennesson (Université  
de Lorraine),  
Alexandre Piboule, Christophe Ginet, Aymeric Albert, Claudine  
Richter (ONF)*

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte et objectifs</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>État de l'art</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>Création de la base d'images</b>	<b>9</b>
<b>4</b>	<b>Algorithmes de pré-traitement des images</b>	<b>12</b>
4.1	Calibration spatiale . . . . .	12
4.1.1	Mesures manuelles du damier de calibration. . . . .	12
4.1.2	Calibration automatique des images . . . . .	13
4.2	Segmentation de la section . . . . .	14
4.2.1	Segmentation manuelle . . . . .	14
4.2.2	Segmentation automatique . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Algorithmes pour la traçabilité</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>Tâche 4 : gestion du projet</b>	<b>23</b>
6.1	Réunions de suivi hebdomadaires . . . . .	23
6.2	Comités de pilotage . . . . .	23
6.3	Recherche de financements additionnels . . . . .	23
6.4	Livrables . . . . .	24
<b>7</b>	<b>Perspectives et orientations pour la Tranche 2</b>	<b>25</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>28</b>

# 1. Contexte et objectifs

Aujourd’hui, instaurer une traçabilité performante au sein de la filière forêt-bois est une nécessité. La traçabilité doit permettre de lutter contre les exportations illégales de bois et le commerce qui y est associé, de renseigner le consommateur sur l’origine locale des produits, ou encore de mieux orienter les flux de matière dans la filière pour améliorer l’efficacité de la chaîne d’approvisionnement, de mieux transformer cette matière, notamment quand on est capable d’y ajouter une caractérisation en termes de qualité, et donc de mieux la valoriser.

Cependant, les marqueurs physiques tels que les plaquettes en plastique ou les puces RFID, ou le marquage à la peinture, largement répandus, ne sont pas fiables et sont facilement falsifiables. Il est donc nécessaire de développer d’autres méthodes qui soient réalistes technologiquement et économiquement (KNOWLES et al., 2017; SUN et al., 2022). Une piste prometteuse semble être la traçabilité biométrique des grumes/billons ainsi que des sciages à partir de l’analyse de photos de leur section transversale, c’est-à-dire une traçabilité sans étiquetage, basée sur les caractéristiques intrinsèques des objets étudiés et sous l’hypothèse qu’ils sont uniques de par leurs caractéristiques comme le sont les empreintes digitales pour les humains. **Le fort potentiel des approches biométriques a été souligné récemment dans une revue de la littérature réalisée par KAULEN et al. (2023) sur les méthodes de traçabilité des pièces de bois de la forêt à l’industrie.**

En France, il y a un enjeu tout particulier autour de la traçabilité des grumes de chêne qui constituent une ressource importante en volume et en valeur. La demande d’export vers l’Asie est forte et les entreprises locales ne pouvant pas rivaliser financièrement risquent de manquer de matière première à transformer. C’est dans ce contexte qu’est né le label “Transformation UE” en 2015 créé par l’ONF et l’APECF<sup>1</sup>. Ce label a été mis en place pour donner un accès prioritaire à la ressource en chênes issus des forêts publiques aux clients qui s’engagent à transformer ou faire transformer dans l’UE. Une récente décision du Conseil d’État (mars 2022) impose une évolution et un renforcement du dispositif avec une amélioration de la traçabilité des grumes. Ce problème de l’exportation illégale de grumes de chêne des forêts publiques française vers la Chine a fait l’objet d’un article dans le média Disclose en 2023 (Fig. 1.1)

De plus, le nouveau règlement européen contre la déforestation et la dégradation des forêts (RDUE ou EUDR)<sup>2</sup>, qui remplace le RBUE (ou EUTR) et qui devra être appliqué courant 2025, va également nécessiter une traçabilité accrue dans la filière avec notamment la géolocalisation des parcelles de production.

C’est dans ce contexte particulier que le projet *Biomtrace* a démarré en 2023 sous l’impulsion de l’ONF, coordonné scientifiquement par l’INRAE et le Loria, et

---

1. Association pour la promotion des chênes et feuillus français

2. <https://www.deforestationimportee.ecologie.gouv.fr>



**FIGURE 1.1** – Enquête Disclose (2023) sur les exportations illégales de grumes de chêne.

financé par France Bois Forêt (FBF).

**L'objectif premier du projet *Biomtrace* est d'évaluer si ces méthodes biométriques, basées sur des photos de sections et des approches d'intelligence artificielle (IA), peuvent fonctionner pour l'identification des grumes de chêne et leur traçabilité.** Il devra aussi identifier les éventuels verrous scientifiques et techniques qui seraient encore à lever à la fin du projet, et préciser la faisabilité de développement opérationnel.

## 2. État de l’art

Les premiers travaux sur la traçabilité biométrique des grumes/billons à partir de l’analyse de photos de leur section semblent être ceux de BARRETT (2008) dont le but était de lutter contre les coupes illégales de bois en cherchant à mettre en correspondance une photo de souche avec la section de billon correspondante dans une pile de bois. La méthode proposée n’est que semi-automatique et aucun résultat quantifié n’est présenté. Dans ces approches, les cernes sont censés jouer pour la grume le rôle des empreintes digitales pour les humains. Mais dans la pratique toutes les caractéristiques visibles peuvent être utilisées pour l’identification y compris les marques de tronçonnage et les entailles d’abattage. D’après CHARWAT-PESSLER et al. (2016), la taille et la forme de la section devraient également être prises en compte pour faciliter la mise en correspondance.

Depuis 2013, les chercheurs autrichiens de l’Université de Salzbourg ont investi le sujet de la traçabilité biométrique des bois ronds avec comme objectif la traçabilité des billons d’épicéa. Ils ont proposé des méthodes de segmentation des sections transversales des grumes sur les images (SCHRAML et UHL, 2014), de détection de certaines caractéristiques comme la moelle (SCHRAML et UHL, 2013) ou de pré-traitement des images dans le but de rehausser les cernes de croissance, afin d’utiliser ces différentes caractéristiques comme marqueurs pour la traçabilité. Les premiers travaux sont basés sur peu d’images et utilisent des analyses de texture et des algorithmes utilisés pour la reconnaissance des empreintes digitales pour faire correspondre les images (SCHRAML et al., 2015a,b). En 2019 en Autriche, un hackathon a même été dédié à cette problématique de la traçabilité dans la filière forêt-bois (“Evergreen Innovation Camp Hackathons 2019” à Vienne<sup>1</sup>).

Avec les chercheurs autrichiens cités ci-dessus, les chercheurs des laboratoires de recherche impliqués dans le projet *Biomtrace* ont participé à un projet ANR bilatéral France/Autriche sur l’évaluation de la qualité et la traçabilité biométrique des bois ronds de résineux (projet ANR *TreeTrace* 2017-2022 ; rapport final : LONGUETAUD et al. (2022a)). Dans ce projet, ils ont collecté de manière conjointe deux bases d’images (LONGUETAUD et al., 2022b, 2023) afin de développer des algorithmes de traitement de ces images dans le cadre des thèses de Doctorat de R. Decelle (côté français) et de R. Schraml (côté autrichien). Dans le cadre de la thèse de R. Decelle (DECELLE, 2022), des algorithmes ont été développés pour segmenter les sections de grumes dans les images (DECELLE et JALILIAN, 2020), pour détecter la moelle (DECELLE et al., 2021, 2022), la limite aubier/duramen (DECELLE et al., 2023) ou pour mesurer les largeurs de cernes (DECELLE et al., 2024). Certains de ces algorithmes sont à retravailler comme celui sur la mesure des largeurs de cernes. Ces caractéristiques géométriques, outre leur intérêt pour l’évaluation de la qualité des billons (excentricité, quantité d’aubier, largeurs de cernes), sont autant de singularités pouvant servir à l’identification des grumes.

---

1. <https://evergreen-innovationcamp.at/rueckblick-eic-2019>

Dans un futur projet, les autrichiens envisagent d'utiliser les séries de largeurs de cernes pour retrouver l'origine géographique des grumes. Un objectif du projet était aussi de tester l'utilisation des réseaux de neurones convolutifs (CNNs) pour la traçabilité biométrique des billons de résineux. **La supériorité pour l'identification des grumes des CNNs sur les méthodes inspirées des techniques de reconnaissance des empreintes digitales a été démontrée dans une étude comparative** portant sur cinq jeux de données incluant les images d'épicéa acquises dans le cadre du projet TreeTrace (WIMMER et al., 2021). Les taux de reconnaissances obtenus pour chaque jeu de données sont toujours largement supérieurs avec les réseaux de neurones.

**La supériorité des CNNs sur les méthodes classiques a également été démontrée par HOLMSTRÖM et al. (2023)** à partir d'une base de 1000 images d'extrémités de billons de pin sylvestre.

Plus récemment, WIMMER et al. (2024) ont proposé des cartes de qualité locale et globale des sections qui permettent d'anticiper si une grume pourra être tracée ou pas selon la qualité de sa section et qui pourront également renseigner sur les zones de la section où les cernes sont bien visibles et où il faudra en priorité chercher des singularités.

**Actuellement, au niveau européen, dans le contexte de l'application du RDUE mais aussi parce que la traçabilité peut contribuer à mieux organiser et à rendre plus compétitive une filière, il y a un intérêt grandissant pour la traçabilité des bois de la forêt au produit fini** qui se manifeste par un certain nombre de projets sur le sujet, y compris à base d'approches biométriques.

Les collègues allemands du "Fraunhofer IPM" et de l'Institut de recherche forestière du Baden-Württemberg (FVA) ont publié en décembre 2023 une note sur le projet *DiGeBaSt*<sup>2</sup>. Ce projet lancé en avril 2021 avait pour objectif de démontrer la faisabilité de la traçabilité biométrique des grumes/billons à partir de photos des sections (*mark-free identification procedure*), comme avec des empreintes digitales (Fig. 2.1). Les images sont acquises à partir de caméras haute résolution puis sont traduites en une séquence de bit qui constitue un code unique (code d'empreinte). Plusieurs systèmes d'acquisition ont été développés pour s'adapter aux différents cas d'usage et aux différentes conditions de lumière : sur abatteuse, en entrée de scierie, et un dispositif portable. Les données sont stockées sur un serveur à distance de type *cloud*. La méthode développée à base de CNNs s'appelle *Track & Trace Fingerprint*. Le projet s'est terminé en 2023 mais dans la note il y a très peu de résultats concrets avec un test sur seulement 65 images ce qui est vraiment très peu et nous n'avons trouvé aucune publication scientifique s'y référant. Les taux de reconnaissance annoncés sur ces 65 grumes sont de 98,5% de la placette à la place de dépôt et de 100% de la place de dépôt à la scierie.

---

2. <https://www.ipm.fraunhofer.de/content/dam/ipm/en/PDFs/press-release/PR-Marker-free-identification-logs-DiGeBaSt-project.pdf>

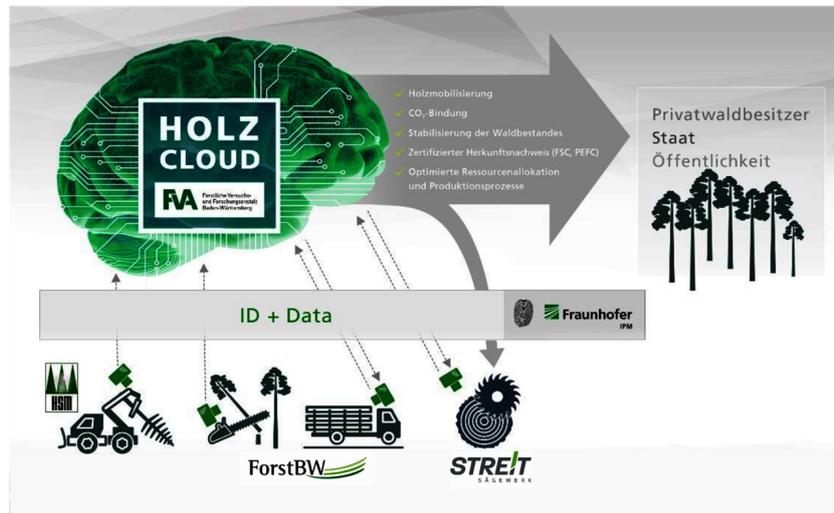


FIGURE 2.1 – Résumé du projet allemand DiGeBaSt.

Côté suédois, la société “Tracy of Sweden”<sup>3</sup> avec l’outil *Tracy Forestry*<sup>TM</sup> propose des solutions commerciales pour la traçabilité. Plusieurs variantes sont proposées selon les cas d’usage. L’outil *Tracy Man* (Fig. 2.2) est dédié au bûcheronnage manuel. Chaque grume est enregistrée au moment de l’abattage avec une photo de sa souche et de sa section transversale. L’outil peut être téléchargé sur *Google Play*. Cette solution permet de tracer l’opérateur, l’opération, l’identité de l’arbre (l’identité de la pièce, la géolocalisation (arbres et pièces) et des informations complémentaires peuvent être renseignées (longueur, diamètre, qualité...). Les données sont envoyées à un centre de calcul IBM sur un cloud. Chaque pièce est stockée dans le cloud et peut être reconnue lors d’une prise d’une nouvelle photo tout au long de son processus exploitation, stockage, transport, douane, scierie. L’abonnement est de 540 euros/mois (6 mois prépayés) et chaque photo coûte 0.09 euros. L’outil *Tracy Aunt* est une déclinaison sur tête d’abattage. Des tests ont été réalisés à petite échelle et une version commerciale est en cours de définition. Un partenariat est en cours avec l’Allemagne.

Que ce soit les outils suédois ou allemands ils semblent être pensés pour les résineux spécifiquement qui ont des sections visuellement très différentes de celles des feuillus. Dans les deux cas, aucune information sur les algorithmes utilisés n’est donnée.



FIGURE 2.2 – Résumé de l’outil *Tracy Man*.

3. <https://tracyofsweden.com/en/startpage/>

Le projet norvégien *SFI SmartForest* (2020 – 2028) a pour objectif de moderniser la filière forêt-bois avec l'utilisation de solutions numériques. La tâche 5 est dédiée à la traçabilité avec pour objectif une traçabilité complète tout au long de la chaîne.

On trouve également l'outil *ProductFingerprint<sup>TM</sup>*<sup>4</sup> créé par une start-up polonaise "Deeplai". Ils expliquent être en mesure de faire de la traçabilité de grumes et de retrouver le site d'origine. La méthode utilisée est basée sur de l'intelligence artificielle. Ils utilisent toutes les caractéristiques visibles sur une grume dont le pattern des cernes de croissance et de l'écorce comme signature. Il n'y a aucun moyen de savoir si ça marcherait pour le chêne d'autant plus que dans notre cas les cernes de croissance ne sont pas ou peu visibles.

Un autre projet intéressant dans le domaine de la traçabilité au sein de la filière forêt-bois et dans le cadre de la réglementation européenne (RDUE) est le projet européen *Sintetic*<sup>5</sup> lancé en 2023 et qui se finira en 2027. Dans ce projet il s'agit de développer un système de traçabilité de la forêt au produit fini mais en utilisant *a priori* plutôt des marqueurs physiques (Fig. 2.3).



FIGURE 2.3 – Résumé du projet européen Sintetic.

4. <https://productfingerprint.com/use-cases/>

5. <https://sinteticproject.eu/the-project/>

### 3. Création de la base d’images

La Section 2 a permis de mettre en évidence la puissance des méthodes basées sur l’intelligence artificielle pour la traçabilité biométrique des grumes de chêne ainsi qu’un intérêt grandissant pour cette technologie de traçabilité, sans support physique, au niveau européen.

Pour entraîner les algorithmes d’intelligence artificielle notamment, de grosses bases d’images sont nécessaires. C’est pourquoi un des premiers objectifs du projet *Biomtrace* a été la création d’une telle base d’images pour le chêne.

La campagne d’acquisition des images a eu lieu de mars 2023 à mars 2024 et elle a permis de collecter **33390 photos de sections transversales prises à la culée de 5135 grumes de chêne**. La plupart des grumes appartenaient à l’ONF. Les photos ont été réalisées sur des chantiers d’exploitation gérés par l’ONF dans trois régions : Grand-Est, Bourgogne Franche-Comté et Centre-Ouest-Aquitaine. Des campagnes de reprise en photo d’une partie des grumes à plusieurs semaines d’intervalle, notamment après la première prise ont été réalisées (quelques grumes ont également été prises une troisième fois en photo). A chaque campagne de prise de photos sur un chantier d’exploitation, une même grume était prise en photo quatre fois en faisant tourner l’appareil photo dans quatre orientations (horizontale, verticale et les deux diagonales) de façon à augmenter le nombre d’images. La Figure 3.1 montre la localisation des sites d’exploitation et leur importance en terme de nombre de grumes prises en photo. Dans le cas où la grume n’était pas encore étiquetée (étiquettes plastiques numérotées de l’ONF), les quatre photos étaient prises sans étiquette et une cinquième photo était prise avec étiquette de façon à pouvoir enregistrer la grume dans la base de données avec son identifiant.

Pour 2284 grumes sur les 5135, une seule campagne de prises de photos a été réalisée. Ce chiffre est obtenu en prenant le nombre de grumes total de 5135 et en lui soustrayant le nombre de grumes pour lesquelles une deuxième session de prises de photos a eu lieu soit le nombre de grume présentes dans shot #2 de 2851. Un des objectifs était de collecter un grand nombre d’images de grumes dans une base de données dans laquelle seraient cherchées des correspondances pour des photos des mêmes grumes prises à des dates ultérieures. Plus la base dans laquelle on cherche est grande, plus les algorithmes devront être performants pour identifier dans cette base la photo prise à une date antérieure de la bonne grume. En résumé, notre objectif du point de vue de la traçabilité sera à partir d’une image d’une grume donnée prise à  $d_2$  ou  $d_3$  d’identifier dans une base de données la photo de la même grume prise à  $d_1$ . Ces reprises de photos à plusieurs semaines d’intervalle permettent de prendre en compte les changements d’aspects des sections et de leur environnement avec le temps passé en forêt ou sur parc dans les algorithmes de traçabilité (Fig. 3.2). Entre la première et la deuxième prise de photos le temps écoulé variait de 25 à 63 jours selon les sites. Les changements entre deux prises de photos pouvaient concerner les conditions de luminosité, la végétation environnante, ou bien l’aspect du bois lui-même avec des colorations,

par exemple au niveau de l’aubier, l’apparition de fentes ou l’ajout d’inscriptions à la peinture.

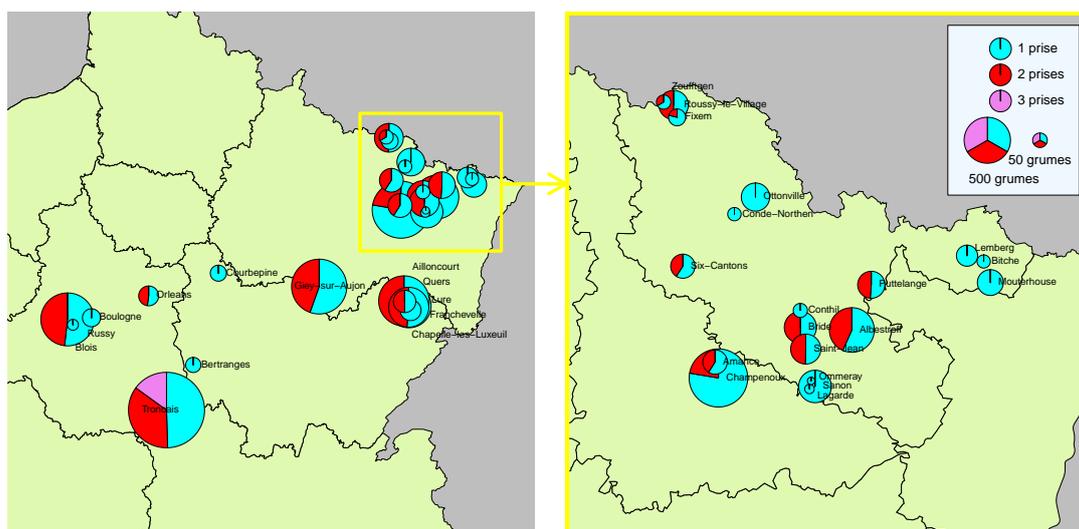
A noter que, pour des raisons liées à la prise de photos sur le terrain, nous faisons une distinction dans la base de données entre les dates de prises de photos des chantiers ( $d_1$ ,  $d_2$  et  $d_3$ ) et les numéros de prises de photos des grumes (shot #1, shot #2 et shot #3) car quand un chantier était repris en photo à la date  $d_2$ , par exemple, il se pouvait que des grumes présentes soient prises en photo alors qu’elles ne l’avaient pas été la première fois à  $d_1$ . Une telle grume est comptabilisée dans les effectifs de grumes prises en photo à la date  $d_2$  mais comme il s’agit d’une première prise en photo, la grume compte dans les effectifs de shot #1. En pratique, la répartition des grumes entre shot #1, shot #2 et shot #3 est suffisante pour développer et tester les algorithmes de traçabilité.

Les nombres de photos et de grumes pour les différentes sessions de prises de photos sont donnés dans le Tableau 3.1.

Tous les aspects de la constitution de la base de données sont détaillés dans un *data paper* soumis à *Annals of Forest Science*. La base de données (LONGUETAUD et al., 2024b) contenant les images ainsi que certains algorithmes et rapports non publiés par ailleurs sont déposés sur la plate-forme *data.gouv.fr* (Fig. 3.3) et seront accessibles à l’adresse suivante : <https://doi.org/10.57745/9DBCL4> (URL privée temporaire : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/privateurl.xhtml?token=e71c17c0-11cb-4d80-86d2-5a91ce2de13b>).

	Shot #1	Shot #2	Shot #3	Total
Nombre de photos	21150	11404	836	33390
Nombre de grumes	5135	2851	209	5135

**TABLE 3.1** – Nombre de photos et de grumes pour chaque campagne de prises de photos (appelées shot #1, shot #2 et shot #3).



**FIGURE 3.1** – Localisation des sites d’exploitation. La surface des disques est proportionnelle au nombre de grumes photographiées. Figure extraite de LONGUETAUD et al. (2024c).



**FIGURE 3.2** – Prises de photos successives de cinq grumes. L'identifiant du site est donné sur la ligne du bas. Extrait de LONGUETAUD et al. (2024c).

**Data INRAE**  
(Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.)

Recherche Data Gov > Data INRAE >

**Info** – Cette version provisoire doit être publiée. Si le jeu de données est prêt à être partagé, veuillez le publier pour que ces changements soient rendus publics.

**URL privée du jeu de données non publié** – URL privée du jeu de données non publié — Partager en privé ce jeu de données avant sa publication : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/privateurl.xhtml?token=e71c17c0-11cb-4d80-86d2-5a91ce2de13b>

## Traceability of oak logs: the Biomtrace database

Version provisoire Non publiée

Longuetaud, Fleur; Mothe, Frédéric; Martinetto, Dorian; Ngo, Phuc; Debled-Rennesson, Isabelle; Piboule, Alexandre; Albert, Aymeric; Richter, Claudine; Rittié, Daniel; Bordat, Frédéric; Jacquin, Philippe, 2024. "Traceability of oak logs: the Biomtrace database", <https://doi.org/10.57745/9DBQL4>, Recherche Data Gov, VERSION PROVISOIRE

Citer le jeu de données [▼](#) Pour en apprendre davantage sur le sujet, consultez le document [Data Citation Standards \[en\]](#).

Modalités d'accès au jeu de données

- Publier le jeu de données
- Modifier le jeu de données [▼](#)
- Contact
- Partager

Fichiers [Métadonnées](#) [Conditions](#) [Versions](#)

Changer l'affichage [Tableau](#) [Arborescence](#)

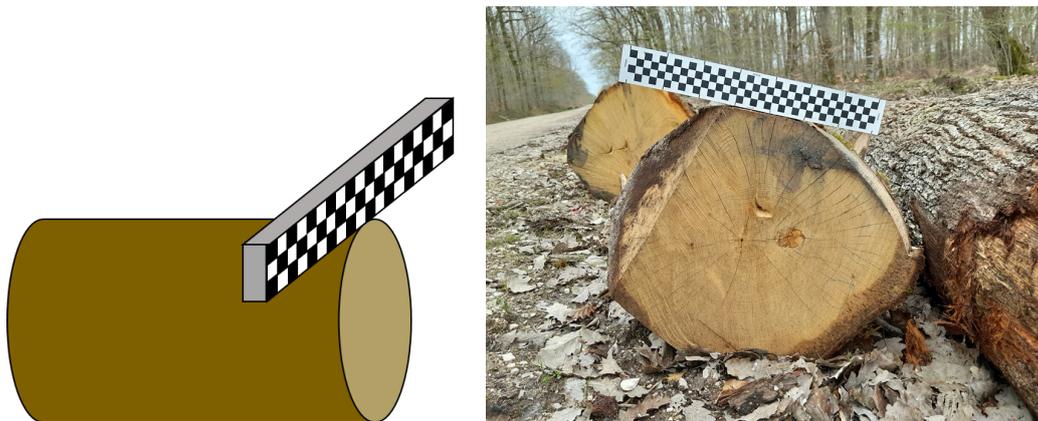
- ▼ Biomtrace
  - ▼ color\_images
    - photo-taking\_protocol.pdf (1.6 Mo)
    - shot\_1
    - shot\_2
    - shot\_3
  - segmentation\_masks
  - tables
  - tools

**FIGURE 3.3** – La page d'accès à la base *Biomtrace* sur [data.gouv.fr](https://data.gouv.fr).

# 4. Algorithmes de pré-traitement des images

## 4.1 Calibration spatiale

La dimension des grumes peut être un critère d'identification utile à la traçabilité. Pour qu'il soit possible de mesurer des distances ou des surfaces sur les images il est nécessaire de les calibrer spatialement, c'est à dire de déterminer la taille en mm d'un pixel de la section. Pour cela, un damier composé de cases noires et blanches de dimensions connues a été placé sur toutes les grumes photographiées de façon à ce que sa face imprimée soit alignée autant que possible avec le plan de la section photographiée (Fig. 4.1). Le damier se composait ici d'une grille de  $35 \times 4$  cases de  $1 \times 1$  cm.



**FIGURE 4.1** – Placement du damier de calibration sur les grumes. Extrait de LONGUE-TAUD et al. (2024c).

### 4.1.1 Mesures manuelles du damier de calibration.

La taille des pixels sur le damier de calibration a été mesurée manuellement sur 1131 images pour construire et valider les logiciels de traitement automatiques décrits ci-dessous. Le logiciel libre ImageJ (SCHNEIDER et al., 2012) a été utilisé pour mesurer la surface en pixels des  $35 \times 4$  cases du damier (ou d'une partie du damier si celui-ci n'était pas entièrement visible). La taille du pixel en mm a été estimée par la racine carrée de la surface de damier mesurée en  $\text{mm}^2$  divisée par la surface correspondante en pixels.

### 4.1.2 Calibration automatique des images

Un algorithme de détection du damier a été développé par deux étudiants de M1 (SERRATORE et SUCK, 2023) qui ont calculé les coordonnées des quatre coins des cases détectées et estimé la taille des pixels en mesurant l'arête moyenne des cases. L'analyse des résultats ayant montré que cette méthode conduisait à surestimer la taille des pixels, deux algorithmes ont été proposés pour compléter le programme initial en mesurant plutôt la distance entre deux cases. La difficulté vient de ce que toutes les cases du damier ne sont en général pas détectées. Pour mesurer la distance moyenne entre 2 cases adjacentes il faut donc au préalable déterminer la position dans la grille (numéro de ligne et de colonne) des cases détectées.

Le premier algorithme (*detec\_mire*) détermine d'abord l'angle d'inclinaison du damier par l'orientation moyenne des arêtes des cases détectées. Les coordonnées des quatre coins sont moyennées pour calculer la position moyenne de chaque case. Une rotation permet d'exprimer ces coordonnées dans un repère défini par la longueur et la largeur du damier. Les numéros de colonne de chaque case sont alors évalués en analysant les coordonnées des cases dans ce repère, en considérant que deux cases de la même ligne doivent avoir approximativement la même coordonnée dans le sens de la largeur du damier et que le nombre de cases qui les séparent est donné par le rapport de leur écartement à la dimension moyenne de l'arête d'une case. Un raisonnement similaire permet de calculer les numéros de ligne et la distance moyenne entre deux cases adjacentes du damier peut alors être facilement calculée. Une analyse sommaire des résultats permet de détecter des incohérences éventuelles (par exemple une distance anormale entre deux cases supposées être adjacentes), notamment lorsque le damier est trop déformé par la perspective, auquel cas le programme ne conserve pas la distance calculée et renvoie l'arête moyenne des cases.

Le second programme (*pixel\_grid*) corrige la surestimation de la taille des pixels mentionnée précédemment en ne prenant en compte que les cases noires avec voisins, tandis que les cases sans voisins ont des arêtes dépendantes du seuil de binarisation. Les cases situées sur les bords de la mire ou ayant moins de quatre voisins détectés ont des dimensions non fiables. A l'image de *detect\_mire*, *pixel\_grid* utilise également une grille virtuelle, mais celle-ci est alignée sur les coins des cases ayant quatre voisins, excluant ainsi les cases dont les dimensions dépendent de la binarisation. Cette méthode élimine le biais, mais échoue s'il y a trop peu de cases, car le pas variable de la grille, inhérent à l'effet de perspective, devient impossible à calculer. La deuxième méthode se base sur l'arête centrale de groupements de trois cases noires accolées. Les longueurs de ces arêtes centrales sont indépendantes du seuil de binarisation, éliminant également le biais. Moins précise, elle est utilisée en cas d'échec de la première méthode, mais échoue également s'il n'existe pas de cases adjacentes. La troisième méthode, appliquée en dernier recours, considère les arêtes des cases isolées. Elle fonctionne avec une seule case détectée, mais les résultats sont imprécis car dépendants du seuil de binarisation.

Une comparaison des deux algorithmes est donnée dans le Tableau 4.1. Dans les deux cas, la mire a été détectée sur toutes les images exceptées deux, particulièrement floues. L'algorithme *pixel\_grid* est clairement le plus performant avec une erreur quadratique moyenne sur la taille du pixel inférieure à 5 microns. A ce stade nous recommandons donc plutôt l'utilisation du programme *pixel\_grid*.

Le code source des deux algorithmes est disponible dans notre dépôt de données sur la plate-forme <https://www.data.gouv.fr> .

Programme	Taille d'un pixel (mm)		Nombre de pixels/cm		Nombre total d'échecs
	RMSE	biais	RMSE	biais	
<i>detec_mire</i>	0.0088	0.0026	0.644	-0.438	2
<i>pixel_grid</i>	0.0044	0.0008	0.474	-0.120	2

**TABLE 4.1** – Comparaison des deux algorithmes développés pour la calibration automatique des images. Les RMSE et biais sont calculés sur 1129 images mesurées manuellement et sur lesquelles la mire a été détectée ; le nombre d'échecs est calculé sur 33389 images comprenant la mire.

## 4.2 Segmentation de la section

Isoler la section de la grume du fond de l'image est un préalable indispensable pour tous les algorithmes de traitement, et notamment pour la traçabilité des grumes.

### 4.2.1 Segmentation manuelle

Les sections de grumes ont été segmentées manuellement sur un sous-ensemble de 1311 images à l'aide du logiciel libre d'édition d'images Gimp (<https://www.gimp.org/>). Le contour sous-écorce a été rempli en blanc et l'extérieur en noir pour donner un masque binaire de même taille que l'image d'origine.

Nous avons choisi de tracer le contour sous-écorce en considérant que l'écorce peut être endommagée pendant le débardage. De plus, l'écorce des grumes de gros diamètre peut être très irrégulière et donc difficile à mesurer précisément.

D'autre part, les culées des grumes de chêne présentent souvent des pans inclinés dus au bûcheronnage (fente d'abattage, "rabortage" des contreforts) qui peuvent présenter des aspects très différents suivant l'angle de prise de vue. Nous avons décidé de les inclure systématiquement, quel que soit leur aspect sur la photo (Fig. 4.2).

### 4.2.2 Segmentation automatique

Cette tâche a été réalisée à l'aide du réseau de neurones convolutif (CNN) *PointRend* (KIRILLOV et al., 2020). Les détails concernant le choix et les performances de ce réseau sont donnés dans l'article de MARTINETTO et al. (2024b). L'implémentation utilisée ici provient de la plate-forme Detectron2 (<https://ai.meta.com/tools/detectron2/>). Le réseau a été pré-entraîné avec le jeu de données MS COCO (LIN et al., 2014) puis affiné en utilisant les segmentations manuelles des grumes.

Sur un total de 1311 images de sections transversales segmentées manuellement (Section 4.2.1), 116 images ont été mises de côté pour une validation de l'algorithme sur un jeu de données indépendant incluant des cas jugés difficiles. Les résultats obtenus avec le CNN *PointRend* sont très satisfaisants. Le taux de pixels bien classés (exactitude ou *accuracy*) est de 99,1%. Le CNN *YOLOv9* qui a également été testé donne des résultats *a priori* équivalents et est surtout plus rapide. Une comparaison des sorties pour la segmentation d'une section par différents CNNs est illustrée Fig. 4.3.

L'architecture *PointRend* a ensuite été appliquée sur les 33390 de la base de données. Toutefois des erreurs se sont produites pour quelques images de grumes que nous avons réussi à identifier parmi les 33390 images en étudiant (1) la variation

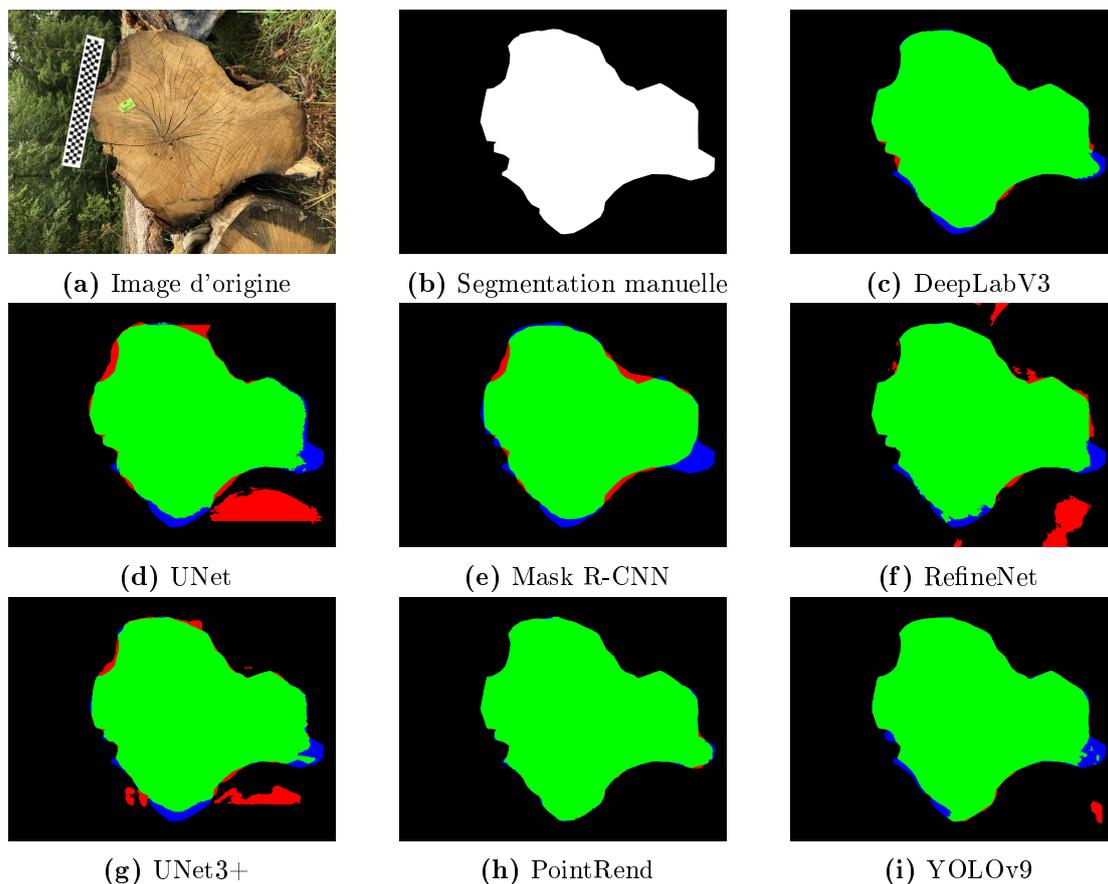


**FIGURE 4.2** – Segmentation manuelle des sections (en jaune) en incluant les pans inclinés liés à l’abattage. Extrait de LONGUETAUD et al. (2024c).

des diamètres mesurés pour une même grume sur les différentes photos disponibles pour cette grume et (2) la distance entre le centre de gravité de la section segmentée et le centre de l’image. Les principales erreurs détectées étaient les suivantes : pour cinq images, la mauvaise grume a été segmentée (une autre section qui était visible sur l’image à côté de la grume centrale a été segmentée) ; pour quatre images la grume était fendue en deux par le centre et l’algorithme n’a segmenté qu’une seule des deux moitiés. Des exemples de ces erreurs sont donnés Fig. 4.4. Pour les cinq cas où la mauvaise section a été segmentée, l’image originale a été modifiée (occultation manuelle de la mauvaise grume) afin d’obtenir un masque de segmentation correct et cohérent pour ces cinq images. Les autres erreurs listées ci-dessus ne posaient pas de problème particulier pour la traçabilité car il restait suffisamment de points caractéristiques dans la zone segmentée pour la reconnaissance de la grume.

Les sorties de *YOLOv9* après application sur la base complète sont en cours d’analyse. De façon générale, *YOLOv9* marche un peu moins bien que *PointRend* avec des formes segmentées qui sont très éloignées en forme et en surface de la section à segmenter. Quelques exemples de cas à problème sont présentés Fig. 4.5. Avec *YOLOv9* il semble qu’une mauvaise grume a été segmentée dans deux cas seulement (mais à confirmer).

Les méthodes d’IA évoluent très vite. Un article récent sur la segmentation des grumes (NACK et al., 2024), utilisant les images de nos bases de données *TreeTrace\_spruce* et *TreeTrace\_Douglas*, montre l’intérêt de la *Vision Transformers* (ViT) par rapport aux CNNs pour cette tâche. Nous pourrions donc également tester ces nouvelles techniques sur nos images. Et l’étape de post-processing en sortie des CNNs peut sûrement être améliorée également.

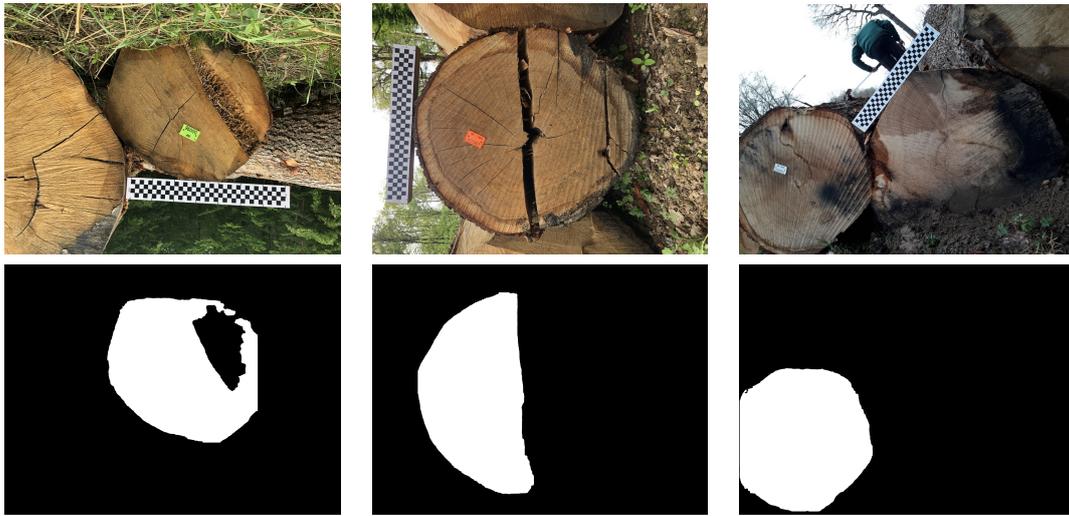


**FIGURE 4.3** – Segmentation d’une section avec différents réseaux de neurones convolutifs testés par MARTINETTO et al. (2024b). En vert : pixels de la section correctement classés; en noir : pixels du fond correctement classés; en rouge : faux positifs (pixels du fond attribués à la section); en bleu : faux négatifs (pixels de la section attribués au fond). Les réseaux *PointRend* et *YOLOv9* sont clairement les plus efficaces sur cette image. Extrait de LONGUETAUD et al. (2024c).

### Estimation du diamètre des grumes

En associant la mesure automatique de la mire (Section 4.1.2) et la segmentation automatique des grumes dans les images nous pouvons obtenir de façon entièrement automatique le diamètre moyen de chaque grume à partir d’une simple photo (Fig. 4.6 à gauche). Le diamètre ainsi mesuré de chaque grume, ainsi que plusieurs caractéristiques géométriques mesurées à partir des masques (notamment reliées à la circularité de la section), sont fournis dans le tableau de sortie `database_images.txt` disponible sur le dépôt de données.

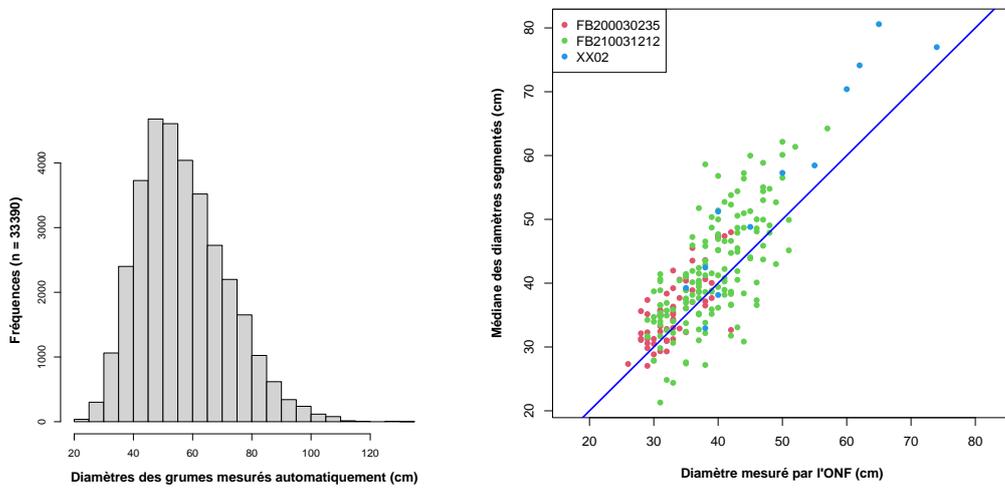
Sur certains sites, nous avons pu obtenir les diamètres médians sur écorce mesurés sur le terrain par les agents de l’ONF. La Figure 4.6 (à droite) montre les résultats de la comparaison entre ce diamètre mesuré sur une grume et la médiane des diamètres calculés sur toutes les images segmentées de la même grume. On constate une assez bonne corrélation entre les deux variables ( $r = 0,81$ ), le diamètre calculé tendant à surestimer la mesure de terrain. La surestimation s’explique probablement en grande partie par le fait que le diamètre médian est mesuré plus haut dans la grume que le diamètre calculé sur les images des culées. Par ailleurs, le diamètre calculé devrait plutôt correspondre à un diamètre sous-écorce, puisque le réseau de neurones a été entraîné avec des images segmentées sous-écorce.



**FIGURE 4.4** – Exemples de segmentations automatiques réalisées avec le CNN *PointRend* pour lesquelles des erreurs ont été détectées : un trou dans la zone à segmenter (à gauche) ; une seule moitié de section segmentée sur une grume fendue en deux (au centre) ; une grume périphérique segmentée (à droite).



**FIGURE 4.5** – Exemples de segmentations automatiques réalisées avec le CNN *YOLOv9* pour lesquelles des erreurs ont été détectées : une grume prise en long à côté de la section à segmenter (à gauche) ; toute la zone en bas à droite de l'image est segmentée bien qu'il n'y ait pas de bois (au centre) ; une zone qui n'appartient pas à la grume est segmentée avec celle-ci (à droite).



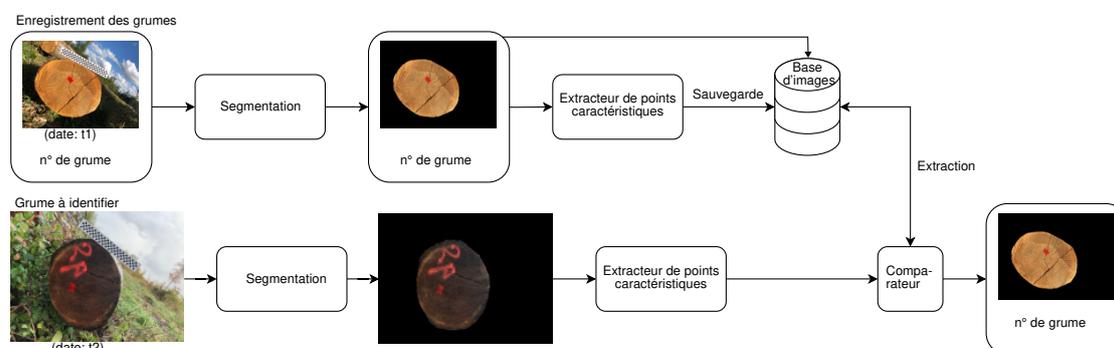
**FIGURE 4.6** – A gauche : histogramme des diamètres de grumes mesurés automatiquement sur les images. Les 33390 photos de la base ont été traitées (i.e., 4 ou 5 photos par grume à une date donnée). A droite : comparaison des diamètres mesurés par l’ONF sur 227 grumes avec la médiane des diamètres calculés sur les images segmentées. Chaque point représente une grume.

## 5. Algorithmes pour la traçabilité

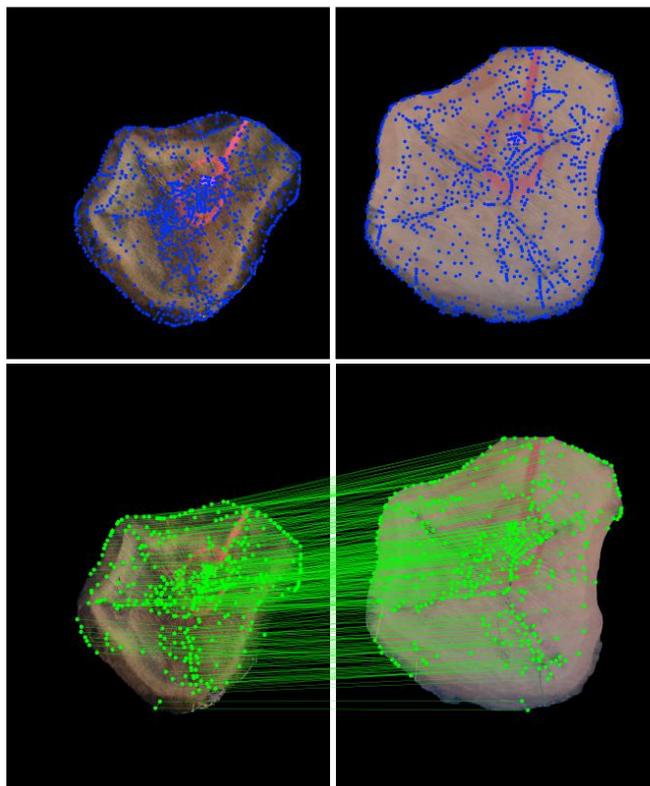
L’objectif est de parvenir à identifier parmi les 5135 grumes photographiées à une première date  $d_1$  celle qui correspond à une photo prise à une date ultérieure  $d_2$  ou  $d_3$ . Pour y arriver il était nécessaire de trouver un algorithme permettant de décider si deux images correspondent ou non à la même grume. Pour cela nous avons mis en place une nouvelle méthode basée sur l’apprentissage profond qui se divise en deux étapes (Fig. 5.1) :

- la première est l’**extraction de points caractéristiques** sur chaque section avec *SuperPoint* (DETONE et al., 2018) qui s’est avéré plus performant que *SIFT* (LOWE, 2004) ;
- la seconde est la **mise en correspondance (*matching*)** pour laquelle nous utilisons des “deep matchers” qui sont des réseaux profonds entraînés à faire correspondre de tels ensembles de points caractéristiques. Parmi les réseaux existants nous avons choisi *LightGlue* (LINDENBERGER et al., 2023) pour ses performances en temps de calcul essentiellement. De plus, il n’a pas été nécessaire de refaire un apprentissage sur nos données, ce qui est un gros avantage. *LightGlue* a été entraîné à base d’homographies synthétiques échantillonnées à partir d’un million d’images de Paris et d’Oxford. Ensuite, ce réseau a été affiné en utilisant un ensemble de données composé d’un million d’images de 196 points d’intérêt touristiques. La correspondance entre les images est validée lorsque la proportion de points mis en correspondance dépasse un seuil donné, fixé arbitrairement à 37%.

Les deux étapes sont effectuées sur les images de grumes après segmentation de la section transversale (Fig 5.2). La première étape peut être réalisée préalablement sur toutes les images prises à une date  $d_1$ , au moment de leur première acquisition. Seule l’extraction des points caractéristiques de l’image à identifier et la seconde étape de mise en correspondance doivent être effectuées lors d’une acquisition ultérieure.



**FIGURE 5.1** – Schéma du processus proposé pour la traçabilité biométrique des grumes de chêne. Extrait de MARTINETTO et al. (2024a).



**FIGURE 5.2** – Exemple de mise en correspondance de deux images (gauche à  $d_2$  et droite à  $d_1$ ). Première étape (en haut) : détection de points caractéristiques sur chacune des deux sections segmentées (en bleu) ; seconde étape (en bas) : mise en correspondance des points ; les points reliés par des lignes vertes correspondent. On considère que les deux images correspondent lorsque la proportion de points mis en correspondance dépasse un seuil donné.

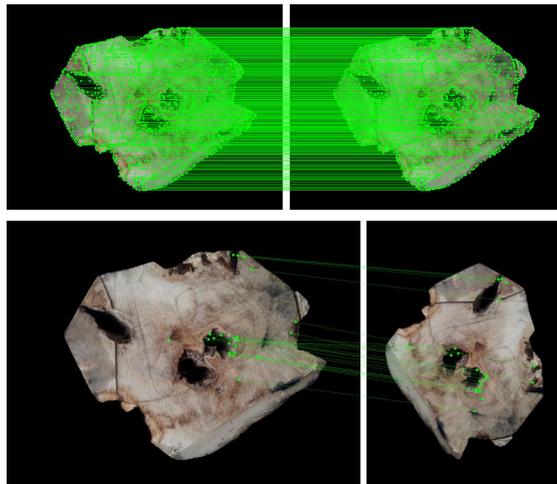
L’efficacité de cette méthode et sa supériorité sur une méthode basée sur l’analyse de triplets d’images (“triplet loss function”) dérivée de celles qu’ont utilisé précédemment WIMMER et al. (2021) et HOLMSTRÖM et al. (2023) ont été démontrées par MARTINETTO et al. (2024a).

La principale difficulté a été d’arriver à mettre en correspondances deux images de la même grume lorsque celle-ci a subi une rotation trop importante (de plus de  $45^\circ$ ) ce qui a pour effet de perturber SuperPoint (Fig. 5.3). La solution à ce problème consiste pour l’instant à effectuer des rotations des grumes pour lesquelles la mise en correspondance a échoué à la première itération par pas de  $45^\circ$ . L’algorithme de mise en correspondance s’arrête dès que le seuil de “matching” est dépassé. Donc on ne teste pas à chaque fois les 8 orientations possibles pour une grume. Plus précisément, pour une photo prise à  $d_2$  d’une grume donnée, des points caractéristiques sont extraits, puis on parcourt une première fois toute la base des images prises à  $d_1$  (ou plutôt leurs points caractéristiques préalablement extraits) et si le seuil n’est pas dépassé alors une première rotation de  $45^\circ$  des points caractéristiques de la grume prise à  $d_2$  est effectuée et ainsi de suite.

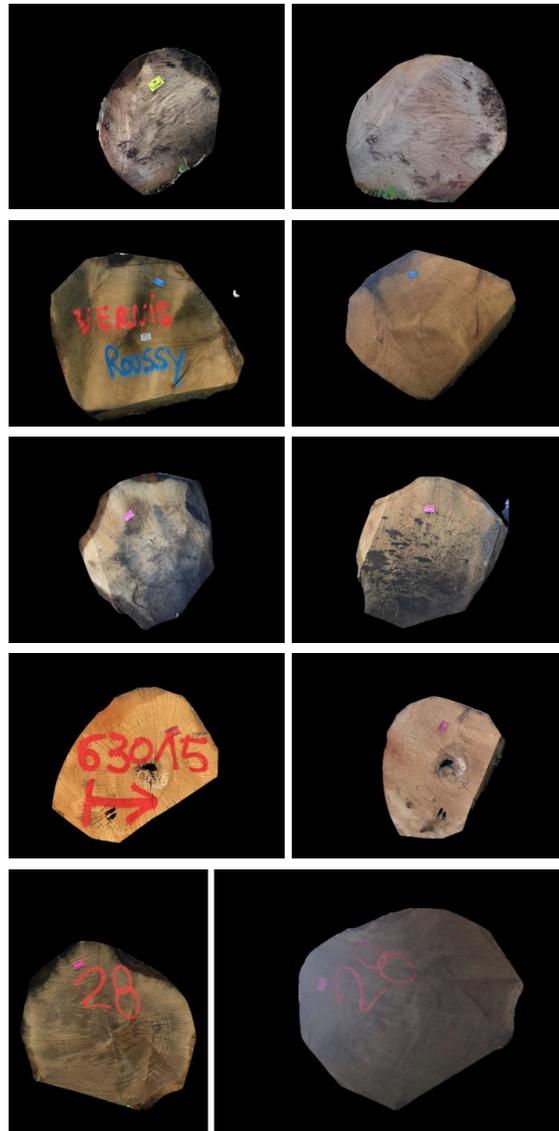
Pour l’instant nous avons pu tester l’algorithme de traçabilité sur un sous-ensemble de la base de données (la base complète n’était pas encore disponible au moment des tests). La reconnaissance de 7868 images issues de 1967 grumes différentes prises en photo à une date  $d_2$  (uniquement, pas de  $d_3$  ici), dans une base de données contenant 4085 grumes (avec une seule photo par grume), a été

tentée. Pour cette expérience, toutes les grumes testées avaient bien une image leur correspondant dans la base de données. Des tests sur la base entière seront réalisés dans la Tranche 2 du projet. Dans ces conditions, **un taux de mise en correspondance de 100% a été obtenu** (c'est à dire que toutes les grumes ont été correctement identifiées à partir des images prises à  $d_2$ ).

Sur deux jeux de données utilisés pour comparer les méthodes (un sous-ensemble du nôtre, car il était nécessaire de mettre des données de côté pour l'apprentissage des méthodes de la littérature, et un autre jeu d'images de sections de pin utilisé dans HOLMSTRÖM et al. (2023)), les méthodes de la littérature basées sur la "triplet loss function" ne dépassent pas 90% de mises en correspondance là où nous atteignons 100%. La Fig. 5.4 présente des exemples de mise en correspondance réussie sur des cas non triviaux.



**FIGURE 5.3** – Effet de la rotation des grumes sur la mise en correspondance. Bonne correspondance lorsque l'orientation des grumes est identique ou proche (en haut) ; mauvaise correspondance lorsque l'orientation diffère de plus de  $45^\circ$  (en bas).



**FIGURE 5.4** – Exemples de mises en correspondance correctes dans des cas non triviaux (ajouts de peinture, changements de couleur, surexposition...). Les images prises à  $d_1$  sont à droite ; les images prises à  $d_2$  sont à gauche.

## 6. Tâche 4 : gestion du projet

### 6.1 Réunions de suivi hebdomadaires

Depuis le début du projet, des réunions de suivi ont lieu chaque semaine au LORIA, auxquelles participent le LORIA, l'INRAE et parfois l'ONF, qui permettent de suivre l'avancée du travail de Dorian Martinetto et des stagiaires de M1 ou M2 quand il y en a.

### 6.2 Comités de pilotage

Membres du COPIL : UCFF, FNB, FNCOFOR, MASA, ONF, INRAE, LORIA  
Membre invité : FBF

Un premier COPIL a eu lieu le 30 janvier 2024 au siège de l'ONF à Maisons-Alfort, de présentation des résultats obtenus un après le démarrage du projet, et avec la réalisation en séance d'une démonstration de reconnaissance faite à l'aide d'un prototype en développement (compte-rendu en Annexe A).

Le second COPIL a été organisé en visio le 24 juin 2024, pour dresser le bilan de la tranche 1 du projet, et discuter de la programmation des travaux de la tranche 2 (compte-rendu en Annexe B).

### 6.3 Recherche de financements additionnels

Initialement le travail devait être réalisé par un post-doctorant en informatique. Nous n'avons pas pu trouver de candidat d'un niveau suffisant pour contribuer à ce projet. Finalement, c'est Dorian Martinetto, titulaire d'un M2 en informatique et alors en stage avec les équipes du projet, que nous avons recruté en tant qu'ingénieur d'études contractuel. Dorian s'est montré très performant et a réalisé un excellent travail depuis son recrutement en octobre 2023. Il a émis le souhait de réaliser une thèse de doctorat sur ce sujet. Nous avons donc cherché des financements pour lui permettre de réaliser cette thèse.

Un financement complet de thèse a ainsi été obtenu constitué d'une demi-bourse de la *Région Grand Est* (AAP 2024 Projet doctoral) (à compléter potentiellement avec un peu du financement disponible dans le projet FBF *Biomtrace*) et d'une demi-bourse de l'*ADEME* (AAP thèses 2024). Ce financement va permettre à Dorian Martinetto de commencer une thèse en octobre 2024. Il s'agira d'une thèse de recherche en informatique. La première année de la thèse sera consacrée pleinement à remplir les engagements pris dans le cadre du projet *Biomtrace* soutenu par FBF en se concentrant sur les points de travail identifiés dans la Section 7. Plusieurs pistes ont été identifiées pour améliorer les algorithmes et les rendre plus

robustes. Les limites des algorithmes devront également être testées avec de nouvelles expériences. Les algorithmes devront être publiés. Et enfin une application de démonstration pour smartphone sera rendue disponible. Au-delà du projet *Biomtrace*, la thèse pourra permettre de creuser certains points particuliers au niveau des algorithmes (nécessaire dans le cadre d’une thèse en informatique) ou d’envisager de nouvelles approches, toujours sur le sujet de la traçabilité des grumes, de tester les méthodes développées sur d’autres essences, ou bien d’étendre l’analyse d’images de sections à d’autres problématiques comme la caractérisation de la qualité (mesure automatique des cernes de croissance, reconnaissance automatique des essences...).

## 6.4 Livrables

Concernant la tranche 1 du projet, les livrables sont les suivants :

- **Constitution d’une base de données de 33 390 images** de culées de grumes de chêne, appelée *Biomtrace*, incluant des photos prises à au moins deux dates espacées d’environ un mois pour une majorité des grumes, et **dépôt de la base sur data.gouv.fr** (LONGUETAUD et al., 2024b) (voir Section 3). La base une fois publiée sera accessible au lien suivant : <https://doi.org/10.57745/9DBCL4>. En attendant sa publication, elle est accessible à l’adresse privée suivante : <https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/privateurl.xhtml?token=e71c17c0-11cb-4d80-86d2-5a91ce2de13b>. Cette base pourra être complétée par la suite ;
- **Data paper** associé à la base de données et permettant de la décrire en détails (LONGUETAUD et al., 2024c) ;
- **Rapport de stage “Initiation à la recherche” de M1 sur la détection/mesure automatique de la mire** en damier noir et blanc dans les images (SERRATORE et SUCK, 2023) ;
- **Rapport interne sur la méthode de mesure automatique de la mire** dans les images reprenant et améliorant le rapport précédent (MOTHE et al., 2024) ;
- **Article scientifique sur une comparaison de méthodes de “deep learning” pour la segmentation** automatique de la grume dans l’image (MARTINETTO et al., 2024b) ;
- **Article scientifique sur un algorithme de traçabilité combinant méthodes traditionnelles et CNNs** (MARTINETTO et al., 2024a) ;
- **Code source des algorithmes** développés durant la tranche 1 (détection/mesure de la mire, segmentation et traçabilité) ;
- Première version d’une **application de démonstration pour smartphone** permettant de segmenter les grumes et de tester la reconnaissance dans une base de données en interrogeant un serveur à distance. Une démonstration a été réalisée lors du premier COPIL à partir de rondelles de chêne prélevées en forêt sur des sites déjà pris en photo et reprises en photo lors du COPIL ;
- **Rapport final de la tranche 1 du projet *Biomtrace*** (LONGUETAUD et al., 2024a)

## 7. Perspectives et orientations pour la Tranche 2

Concernant la segmentation automatique des grumes, les résultats sont très satisfaisants et *a priori* suffisants pour l'application sur les images segmentées de l'algorithme de traçabilité avec succès. Cependant **la segmentation peut probablement être encore améliorée pour éviter des problèmes dans certains cas** (segmentation de la mauvaise grume dans l'image quand plusieurs sont visibles, segmentation d'une demi-section en cas de grume fendue en deux mais dans ce cas une demi-section peut tout de même être suffisante pour la reconnaissance de la grume). Notamment, les *Transformers* pourront être utilisés et leurs performances comparées avec celles des CNNs.

Les résultats obtenus par l'algorithme proposé à la Section 5.2 sont vraiment très encourageants. Cependant l'algorithme n'a pas été appliqué sur l'ensemble de la base de données car cette dernière était encore en cours de constitution lors de la réalisation de ce travail. Dans l'article soumis (MARTINETTO et al., 2024a) l'objectif était d'identifier 7868 photos de 1967 grumes issues de reprises (i.e., shot #2 uniquement car il n'y avait pas encore de grumes dans shot #3 ; les quatre photos d'une même grume lors d'une reprise sont chacune testées pour la traçabilité) parmi 4085 photos de grumes prises à une date antérieure (i.e., shot #1 ; en revanche, dans ce jeu d'images, une seule photo choisie aléatoirement par grume est gardée). **Une première étape va être de tester cet algorithme sur l'ensemble de la base de données** et donc d'identifier cette fois 12240 photos de 2851 grumes prises lors des sessions 2 ou 3 (i.e., shot #2 et shot #3 ; plusieurs photos d'une même grume à chaque session) parmi 5135 photos de grumes prises lors d'une première session (i.e., shot #1 ; une seule photo choisie aléatoirement par grume).

Puisque dans la base d'enregistrement dans laquelle on cherche une correspondance une seule photo par grume est utilisée, nous répéterons l'opération de façon à ce que toutes les photos d'une grume aient été utilisées et soient mises en correspondance avec une photo prise à  $t_2$  ou  $t_3$  si une reprise a bien eu lieu pour la grume. Cela peut permettre de mettre à jour certains problèmes de segmentation ou d'enregistrement des numéros de grumes qui nous auraient échappé.

**Nous avons vu que l'algorithme est très sensible à la rotation des grumes (c'est également le cas de ceux proposés dans la littérature) et il faudrait un moyen d'optimiser cette rotation ou de rendre l'algorithme invariant à la rotation.** Un objectif sera de chercher une méthode permettant de tourner les grumes en les positionnant selon un critère qui permettrait d'augmenter le taux de mise en correspondance et qui éviterait d'avoir à tester des rotations supplémentaires. Mais il faudra évaluer ce qui est le moins coûteux en temps de calcul : appliquer une rotation sur toutes les images et gagner potentiellement sur

la mise en correspondance ou bien tester directement la mise en correspondance sur les images brutes et appliquer des rotations supplémentaires en cas d'échec comme c'est le cas actuellement. Une autre approche consisterait à utiliser une méthode invariante à la rotation.

Pour évaluer la fiabilité d'une mise en correspondance entre deux photos d'une même grume, il est nécessaire de définir des seuils. **Un travail un peu plus approfondi doit encore être réalisé pour justifier du choix des seuils.** Pour une photo donnée en entrée, l'algorithme renvoie actuellement la photo dans la base qui a le meilleur score de "matching" après avoir éventuellement testé des rotations si le score était sous un certain seuil. Si une photo en entrée n'a pas de correspondance dans la base, il faut que l'algorithme soit capable de le détecter et dans ce cas il ne doit renvoyer aucune correspondance. Ce point est à finaliser.

Pour la phase d'extraction de points caractéristiques deux méthodes ont été testés : la méthode traditionnelle d'extraction de points de référence *SIFT* et la méthode basée sur le CNN *SuperPoint*, la seconde donnant des résultats légèrement meilleurs. **Une combinaison de plusieurs approches pourrait être testée pour rendre les résultats plus robustes.** Étant donné la sensibilité à la rotation des algorithmes d'extraction de points clés, il serait intéressant d'utiliser une méthode invariante à la rotation.

**La question de la robustesse des algorithmes de traçabilité et de leurs limites se pose également**, notamment en cas de modification de la surface de la section (ajout de peinture, salissures...) et aussi en cas de **purge** frauduleuse à l'extrémité de la grume. L'ajout de peinture entre la première et la deuxième session de prises de photos de certaines grumes n'a pas posé de problème particulier à l'algorithme mais il serait important d'évaluer cette robustesse de manière plus fine et de la quantifier. Lors du second COPIL en juin 2024, des acteurs se sont posés la question de la présence de **salissures** qui pouvaient apparaître entre l'abattage des arbres et le stockage sur la place de dépôt sur les terrains boueux. Il serait intéressant de pouvoir **quantifier la surface nécessaire à la reconnaissance**. A titre d'exemple, dans le cas des sections fendues en deux par le centre, quand une seule des deux moitiés avait été segmentée, la traçabilité marchait encore en utilisant uniquement la moitié de la surface initiale. A ce même COPIL, une question a été posée concernant la **perspective pour la prise de photos** : est-il possible de prendre une photo de la section sans se baisser avec un certain angle ou bien faut-il absolument se baisser pour la prendre bien de face ? La question de la **traçabilité de la placette au moment de l'abattage à la place de dépôt** a également été abordée dans le cadre de l'application prochaine du RDUE. Pour répondre à toutes ces questions, **une campagne de nouvelles prises de photos pourra être réalisée à l'automne 2024**, incluant la problématique des purges. Nous pourrions également tester la limite des algorithmes par rapport à la qualité des images en réduisant progressivement leur **résolution** avec pour objectif principal d'alléger le stockage.

En parallèle aux différentes avancées, **une application pour smartphone est développée** qui intègre les différents algorithmes dans le but de proposer des démonstrations sur le terrain. Cette application est mise à jour au fur et à mesure des avancées du travail de Dorian Martinetto.

Enfin, il sera intéressant de **tester la méthode de traçabilité développée sur d'autres essences**. Nous disposons par exemple de bases de données contenant des images d'épicéa (LONGUETAUD et al., 2023) et de douglas (LONGUETAUD et al., 2022b) qui pourront être utilisées en ce sens.

# Remerciements

Merci à tous les personnels ONF et INRAE ayant participé aux campagnes d'acquisition des photos sur les différents sites.

Merci à Adriel et Anaëlle Rajaonarivo pour avoir effectué les mesures de référence ayant servi au développement et au test des différentes méthodes informatiques de traitement des images.

Nous remercions également tous les membres du COPIL pour leurs remarques pertinentes qui permettent de faire avancer ce projet dans la bonne direction.

Merci aux collègues de l'Université de Salzbourg pour les échanges et le travail réalisé en commun et valorisé dans deux publications.

Merci à France Bois Forêt pour le financement de ce projet.

Ce travail a également bénéficié d'une aide de Lorraine Université d'Excellence issu du Programme FRANCE 2030 de l'Etat, portant la référence ANR-15-IDEX-04-LUE.

# Bibliographie

- BARRETT, W. 2008, «Biometrics of cut tree faces», dans *Advances in computer and information sciences and engineering*, Springer, p. 562–565.
- CHARWAT-PESSLER, J., R. SCHRAML, K. ENTACHER et A. PETUTSCHNIGG. 2016, «Tracking logs with rgb images within the wood supply chain : A preliminary study on image acquisition», *Forest products journal*, vol. 66, n° 3-4, p. 176–184.
- DECELLE, R. 2022, *Éléments pour l'analyse et le traitement d'images : application à l'estimation de la qualité du bois*, Thèse, Université de Lorraine. URL <https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03794911>.
- DECELLE, R. et E. JALILIAN. 2020, «Neural networks for cross-section segmentation in raw images of log ends», dans *2020 IEEE 4th International Conference on Image Processing, Applications and Systems (IPAS)*, IEEE, p. 131–137.
- DECELLE, R., P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, F. MOTHE et F. LONGUETAUD. 2021, «Pith estimation on tree log end images», dans *International Workshop on Reproducible Research in Pattern Recognition*, Springer, p. 101–120.
- DECELLE, R., P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, F. MOTHE et F. LONGUETAUD. 2022, «Ant colony optimization for estimating pith position on images of tree log ends», *Image Processing on Line*, vol. 12, p. 558–581.
- DECELLE, R., P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, F. MOTHE et F. LONGUETAUD. 2023, «Light u-net with a new morphological attention gate model application to analyse wood sections», dans *ICPRAM 2023-12th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, p. 759–766.
- DECELLE, R., P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, F. MOTHE et F. LONGUETAUD. 2024, «Directional filter for tree ring detection», dans *ICPRAM*.
- DETONE, D., T. MALISIEWICZ et A. RABINOVICH. 2018, «Superpoint : Self-supervised interest point detection and description», dans *IEEE CVPR*, p. 224–236.
- HOLMSTRÖM, E., A. RAATEVAARA, J. POHJANKUKKA, H. KORPUNEN et J. UUSITALO. 2023, «Tree log identification using convolutional neural networks», *Smart Agricultural Technology*, vol. 4, p. 100–201.
- KAULEN, A., L. STOPFER, K. LIPPERT et T. PURFÜRST. 2023, «Systematics of forestry technology for tracing the timber supply chain», *Forests*, vol. 14, n° 9, p. 1718.

- KIRILLOV, A., Y. WU, K. HE et R. B. GIRSHICK. 2020, «Pointrend : Image segmentation as rendering», *2020 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, p. 9799–9808.
- KNOWLES, C., K. BOSTON et E. BERECIBAR. 2017, «A new method for tagging and tracking logs», *international forestry review*, vol. 19, n° 3, p. 294–305.
- LIN, T.-Y., M. MAIRE, S. BELONGIE, J. HAYS, P. PERONA, D. RAMANAN, P. DOLLÁR et C. L. ZITNICK. 2014, «Microsoft coco : Common objects in context», dans *Computer Vision–ECCV 2014 : 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13*, Springer, p. 740–755.
- LINDENBERGER, P., P.-E. SARLIN et M. POLLEFEYS. 2023, «Lightglue : Local feature matching at light speed», dans *IEEE/CVF ICCV*, p. 17 627–17 638.
- LONGUETAUD, F., F. MOTHE, T. CONSTANT, R. DECELLE, I. DEBLED-RENNESON, P. NGO, R. COLLET, G. G. POT, J. VIGUIER, L. DENAUD, B. ROUX, J.-C. BUTAUD, A. PETUTSCHNIGG, R. SCHRAML, A. UHL et K. ENTACHER. 2022a, «Traçabilité et évaluation de la qualité des bois ronds à partir de l’analyse d’images d’extrémités de grumes ou de billons», URL <https://hal.science/hal-04217998>, Projet ANR-17-CE10-0016, TreeTrace, rapport final.
- LONGUETAUD, F., F. MOTHE, D. MARTINETTO, P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, A. PIBOULE, A. ALBERT, C. RICHTER, D. RITTIÉ, F. BORDAT et P. JACQUIN. 2024a, «Rapport final de la tranche 1 du projet biomtrace», cahier de recherche, INRAE.
- LONGUETAUD, F., F. MOTHE, D. MARTINETTO, P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, A. PIBOULE, A. ALBERT, C. RICHTER, D. RITTIÉ, F. BORDAT et P. JACQUIN. 2024b, «Traceability of oak logs : the Biomtrace database», doi :10.57745/9DBCL4. URL <https://doi.org/10.57745/9DBCL4>.
- LONGUETAUD, F., F. MOTHE, D. MARTINETTO, P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, A. PIBOULE, A. ALBERT, C. RICHTER, D. RITTIÉ, F. BORDAT et P. JACQUIN. 2024c, «Traceability of oak (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. and *Quercus robur* L.) logs : the Biomtrace database», *soumis à Annals of Forest Science*.
- LONGUETAUD, F., G. POT, F. MOTHE, A. BARTHELEMY, R. DECELLE, F. DELCONTE, X. GE, G. GUILLAUME, T. MANCINI, T. RAVOAJANAHARY et al.. 2022b, «Traceability and quality assessment of douglas fir (*pseudotsuga menziesii* (mirb.) franco) logs : the treetrace\_douglas database», *Annals of Forest Science*, vol. 79, n° 1, p. 46.
- LONGUETAUD, F., R. SCHRAML, F. MOTHE, T. RAVOAJANAHARY, R. DECELLE, T. CONSTANT, P. NGO, I. DEBLED-RENNESON, K. ENTACHER, A. PETUTSCHNIGG, F. BRÜCHERT et A. UHL. 2023, «Traceability and quality assessment of norway spruce (*picea abies* (l.) h. karst.) logs : the treetrace\_spruce database», *Annals of Forest Science*, vol. 80, n° 1, p. 9.

- LOWE, D. 2004, «Distinctive image features from scale-invariant keypoints», *International Journal of Computer Vision*, vol. 60, doi :10.1023/B:VISI.0000029664.99615.94, p. 91.
- MARTINETTO, D., G. WIMMER, P. NGO, F. MOTHE, A. PIBOULE, A. UHL, I. DEBLED-RENNESON et F. LONGUETAUD. 2024a, «A new approach to biometric log traceability combining traditional methods and CNN», dans *Submitted to the 27th International Conference on Pattern Recognition (ICPR 2024)*.
- MARTINETTO, D., G. WIMMER, P. NGO, F. MOTHE, A. PIBOULE, A. UHL, I. DEBLED-RENNESON et F. LONGUETAUD. 2024b, «Deep learning-based segmentation of oak log ends», *Soumis à Computers and Electronics in Agriculture*.
- MOTHE, F., P. JACQUIN, P. NGO et F. LONGUETAUD. 2024, «Calibration spatiale d'une image à l'aide d'une mire à damier noir et blanc», cahier de recherche, INRAE.
- NACK, F., M. R. STEMMER et M. E. STIVANELLO. 2024, «Comparison of modern deep neural networks architectures for cross-section segmentation in images of log ends», *IEEE Latin America Transactions*, vol. 22, n° 4, p. 286–293.
- SCHNEIDER, C. A., W. S. RASBAND et K. W. ELICEIRI. 2012, «Nih image to imagej : 25 years of image analysis», *Nature methods*, vol. 9, n° 7, p. 671–675.
- SCHRAML, R., J. CHARWAT-PESSLER, A. PETUTSCHNIGG et A. UHL. 2015a, «Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 119, p. 112–122.
- SCHRAML, R., H. HOFBAUER, A. PETUTSCHNIGG et A. UHL. 2015b, «Tree log identification based on digital cross-section images of log ends using fingerprint and iris recognition methods», dans *Computer Analysis of Images and Patterns : 16th International Conference, CAIP 2015, Valletta, Malta, September 2-4, 2015 Proceedings, Part I 16*, Springer, p. 752–765.
- SCHRAML, R. et A. UHL. 2013, «Pith estimation on rough log end images using local fourier spectrum analysis», dans *Proceedings of the 14th Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM'13), Innsbruck, AUT*, vol. 10, Citeseer, p. 2013–797.
- SCHRAML, R. et A. UHL. 2014, «Similarity based cross-section segmentation in rough log end images», dans *Artificial Intelligence Applications and Innovations : 10th IFIP WG 12.5 International Conference, AIAI 2014, Rhodes, Greece, September 19-21, 2014. Proceedings 10*, Springer, p. 614–623.
- SERRATORE, A. et H. SUCK. 2023, «Calibration automatique basée sur la détection du damier», Rapport de stage M1 Master Informatique - Université de Lorraine.
- SUN, Y., G. DU, Q. LIN, L. ZHONG, Y. ZHAO, J. QIU et Y. CAO. 2022, «Individual wood board tracing method using oriented fast and rotated brief method in the wood traceability system», *Wood Science and Technology*, vol. 56, n° 3, p. 947–968.

WIMMER, G., R. SCHRAML, H. HOFBAUER, A. PETUTSCHNIGG et A. UHL. 2021, «Two-stage cnn-based wood log recognition», dans *International Conference on Computational Science and Its Applications*, Springer, p. 115–125.

WIMMER, G., R. SCHRAML, A. PETUTSCHNIGG et A. UHL. 2024, «Log cross section quality metrics : Assessing the usability of roundwood image data for roundwood tracking», *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 221, p. 108945.