



**HAL**  
open science

## Traçabilité et évaluation de la qualité des bois ronds à partir de l'analyse d'images d'extrémités de grumes ou de billons

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Guillaume G. Pot, Joffrey Viguier, Benjamin Roux, Robert Collet, Louis Denaud, et al.

► **To cite this version:**

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, et al.. Traçabilité et évaluation de la qualité des bois ronds à partir de l'analyse d'images d'extrémités de grumes ou de billons : Rapport final du projet TreeTrace. INRAE. 2022. hal-04217998v2

**HAL Id: hal-04217998**

**<https://hal.science/hal-04217998v2>**

Submitted on 29 Aug 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.

Projet ANR-17-CE10-0016

## ANR-FWF TreeTrace project:



*Biometric fingerprints of trees: Log tracing from forest to sawmill and early estimation of wood quality*

Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Thiéry Constant, Rémi Decelle (INRAE)  
Isabelle Debled-Rennesson, Phuc Ngo (Loria)  
Robert Collet, Guillaume Pot, Joffrey Viguier, Louis Denaud, Benjamin Roux,  
Jean-Claude Butaud (ENSAM)  
Alexander Petutschnigg (SUAS), Rudolf Schraml, Andreas Uhl (PLUS)  
Karl Entacher (Holztechnikum Kuchl)

<b>A</b>	<b>Identification</b>	<b>2</b>
<b>B</b>	<b>Résumé consolidé public</b>	<b>2</b>
	B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics . . . . .	2
	B.2 Résumé consolidé public en français . . . . .	3
	B.3 Résumé consolidé public en anglais . . . . .	5
<b>C</b>	<b>Mémoire scientifique</b>	<b>7</b>
	C.1 Résumé du mémoire . . . . .	8
	C.2 Enjeux et problématique, état de l'art . . . . .	9
	C.3 Approche scientifique et technique . . . . .	14
	C.4 Résultats obtenus . . . . .	15
	C.5 Exploitation des résultats . . . . .	19
	C.6 Discussion . . . . .	19
	C.7 Conclusions . . . . .	21
	C.8 Références . . . . .	21
<b>D</b>	<b>Liste des livrables</b>	<b>26</b>
<b>E</b>	<b>Impact du projet</b>	<b>26</b>
	E.1 Indicateurs d'impact . . . . .	26
	E.2 Liste des publications et communications . . . . .	27
	E.3 Liste des éléments de valorisation . . . . .	31
	E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires) . . . . .	32

*Ce document est à remplir par le coordinateur en collaboration avec les partenaires du projet. L'ensemble des partenaires doit avoir une copie de la version transmise à l'ANR.  
Ce modèle doit être utilisé uniquement pour le compte-rendu de fin de projet.*

# A Identification

Acronyme du projet	TreeTrace
Titre du projet	Biometric fingerprints of trees: Log tracing from forest to sawmill and early estimation of wood quality
Coordinateur du projet (société/organisme)	Fleur Longuetaud (INRAE)
Période du projet (date de début – date de fin)	01/11/2017 – 30/06/2022
Site web du projet, le cas échéant	

Rédacteur de ce rapport	
Civilité, prénom, nom	Fleur Longuetaud / Frédéric Mothe
Téléphone	03 83 39 41 39
Adresse électronique	fleur.longuetaud@inrae.fr / frédéric.mothe@inrae.fr
Date de rédaction	juillet 2022

Si différent du rédacteur, indiquer un contact pour le projet	
Civilité, prénom, nom	
Téléphone	
Adresse électronique	

Liste des partenaires présents à la fin du projet (société/organisme et responsable scientifique)	INRAE - UMR Silva (Fleur Longuetaud) UL (Université de Lorraine) - UMR Loria (Laboratoire Lorrain de Recherche en Informatique et ses Applications) (Isabelle Debled-Rennesson) ENSAM (Arts et Métiers Sciences et Technologie) - Labomap (Robert Collet) PLUS (Université Paris Lodron de Salzbourg) - Department of Computer Sciences (Andreas Uhl) SUAS (Université des Sciences Appliquées de Salzbourg) - Department of Wood technology and Wood Construction (Alexander Petutschnigg)
---	---

# B Résumé consolidé public

*Ce résumé est destiné à être diffusé auprès d'un large public pour promouvoir les résultats du projet, il ne fera donc pas mention de résultats confidentiels et utilisera un vocabulaire adapté mais n'excluant pas les termes techniques. Il en sera fourni une version française et une version en anglais. Il est nécessaire de respecter les instructions ci-dessous.*

## B.1 Instructions pour les résumés consolidés publics

*Les résumés publics en français et en anglais doivent être structurés de la façon suivante.*

**Titre d'accroche du projet** (environ 80 caractères espaces compris) *Titre d'accroche, si possible percutant et concis, qui résume et explicite votre projet selon une logique grand public : il n'est pas nécessaire de présenter exhaustivement le projet mais il faut plutôt s'appuyer sur son aspect le plus marquant.*

*Les deux premiers paragraphes sont précédés d'un titre spécifique au projet rédigé par vos soins.*

**Titre 1** : *situe l'objectif général du projet et sa problématique (150 caractères max espaces compris)*

**Paragraphe 1** : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 1 précise les enjeux et objectifs du projet : indiquez le contexte, l'objectif général, les problèmes traités, les solutions recherchées, les perspectives et les retombées au niveau technique ou/et sociétal

**Titre 2** : précise les méthodes ou technologies utilisées (150 caractères max espaces compris)

**Paragraphe 2** : (environ 1200 caractères espaces compris)

Le paragraphe 2 indique comment les résultats attendus sont obtenus grâce à certaines méthodes ou/et technologies. Les technologies utilisées ou/et les méthodes permettant de surmonter les verrous sont explicitées (il faut éviter le jargon scientifique, les acronymes ou les abréviations).

**Résultats majeurs du projet** (environ 600 caractères espaces compris)

Faits marquants diffusables en direction du grand public, expliciter les applications ou/et les usages rendus possibles, quelles sont les pistes de recherche ou/et de développement originales, éventuellement non prévues au départ. Préciser aussi toute autre retombée = partenariats internationaux, nouveaux débouchés, nouveaux contrats, start-up, synergies de recherche, pôles de compétitivités, etc.

**Production scientifique et brevets depuis le début du projet** (environ 500 caractères espaces compris)

Ne pas mettre une simple liste mais faire quelques commentaires. Vous pouvez aussi indiquer les actions de normalisation

**Illustration**

Une illustration avec un schéma, graphique ou photo et une brève légende. L'illustration doit être clairement lisible à une taille d'environ 6cm de large et 5cm de hauteur. Prévoir une résolution suffisante pour l'impression. Envoyer seulement des illustrations dont vous détenez les droits.

**Informations factuelles**

Rédiger une phrase précisant le type de projet (recherche industrielle, recherche fondamentale, développement expérimental, exploratoire, innovation, etc.), le coordonnateur, les partenaires, la date de démarrage effectif, la durée du projet, l'aide ANR et le coût global du projet, par exemple « Le projet XXX est un projet de recherche fondamentale coordonné par xxx. Il associe aussi xxx, ainsi que des laboratoires xxx et xxx). Le projet a commencé en juin 2006 et a duré 36 mois. Il a bénéficié d'une aide ANR de xxx € pour un coût global de l'ordre de xxx € »

## B.2 Résumé consolidé public en français

### Les empreintes biométriques des arbres : traçage de la forêt à la scierie et évaluation précoce de la qualité

#### Traçabilité et évaluation de la qualité des bois ronds à partir de l'analyse d'images d'extrémités de grumes ou de billons

Le projet **TreeTrace** visait deux objectifs. Le premier était l'évaluation de la **qualité** des bois ronds (grumes ou billons) le plus tôt possible dans la chaîne d'approvisionnement des industries et le second était la **traçabilité** de ces bois de la forêt à l'industrie.

La caractérisation et la traçabilité des bois ronds entre la forêt et l'industrie sont des enjeux majeurs aujourd'hui. La traçabilité vise à : garantir l'origine des bois, lutter contre l'exploitation illégale des forêts, contribuer à maintenir localement et de façon durable une ressource pour les industries présentes. Associée à la traçabilité, l'évaluation de la qualité permet d'optimiser les flux de matière et la transformation de cette ressource en prenant mieux en compte ses caractéristiques.

Du côté de la traçabilité, les marqueurs physiques utilisés aujourd'hui (plaquettes en plastique avec numéro ou code-barre ou puces RFID) n'apportent pas toujours satisfaction et sont facilement falsifiables. Des travaux récents ont eu pour objectif de développer des méthodes de traçabilité basées sur l'analyse de caractéristiques intrinsèques aux grumes (méthodes biométriques), sous l'hypothèse que chaque grume est unique de par ses caractéristiques, comme celles mesurables sur des photos prises aux extrémités de celles-ci.

Concernant l'évaluation de la qualité, la plupart des scieries n'utilisent que des mesures de volume, de forme et de défilement fournies par les scanners optiques, mais elles n'exploitent pas l'information qui pourrait être récupérée relativement facilement à l'ex-

trémité des billons comme la largeur des cernes, l'excentricité de la moelle, les zones de bois juvénile ou de duramen et d'aubier.

Dans ce projet l'objectif était d'évaluer ce que pourrait apporter l'analyse de ces images obtenues avec des capteurs accessibles à tous et partout (smartphones, caméras fixes ou embarquées, en forêt ou après transport). Les deux objectifs pouvaient être atteints conjointement car ils dépendaient de l'analyse des mêmes images de sections, au même moment dans la chaîne de traitement des bois, mais avec des méthodes de traitement des images potentiellement différentes car spécifiques à l'objectif visé mais aussi complémentaires.

## **Création de deux bases de données et développement d'algorithmes pour l'analyse des sections de grumes**

Deux essences résineuses importantes pour l'industrie du bois en France et en Autriche ont été considérées dans ce projet : l'épicéa et le Douglas. Pour chaque essence, une base d'images a été créée avec des images prises des mêmes billons à plusieurs endroits dans la chaîne de traitement : au moment de la coupe et après transport pour l'épicéa ; sur le parc à grume d'une scierie puis dans la scierie après écorçage et avant débit pour le Douglas. Des mesures ont également été réalisées sur des rondelles prélevées aux extrémités de ces billons : densité du bois, largeurs de cernes, largeur de l'aubier (pour le Douglas).

Des algorithmes pour assurer la traçabilité ou évaluer la qualité du bois à partir de l'analyse des images de sections de grumes ont été élaborés. Des méthodes variées ont été testées, inspirées de la reconnaissance des empreintes digitales ou des iris, de la morphologie mathématique, de la géométrie discrète ainsi que des réseaux de neurones convolutifs.

Plusieurs méthodes sont communes aux objectifs de traçabilité et d'évaluation de la qualité, notamment le prétraitement des images, la segmentation de la zone de bois et l'identification de la moelle. D'autres traitements plus spécifiques à chaque application, comme l'extraction de critères biométriques pour la traçabilité ou l'estimation des largeurs de cernes pour la qualité, ont été réalisés séparément. L'évaluation de la qualité basée sur l'analyse des sections de grumes a été mise en relation avec une expérience industrielle en vraie grandeur dans laquelle des grumes ont été sciées et les produits obtenus classés et testés mécaniquement.

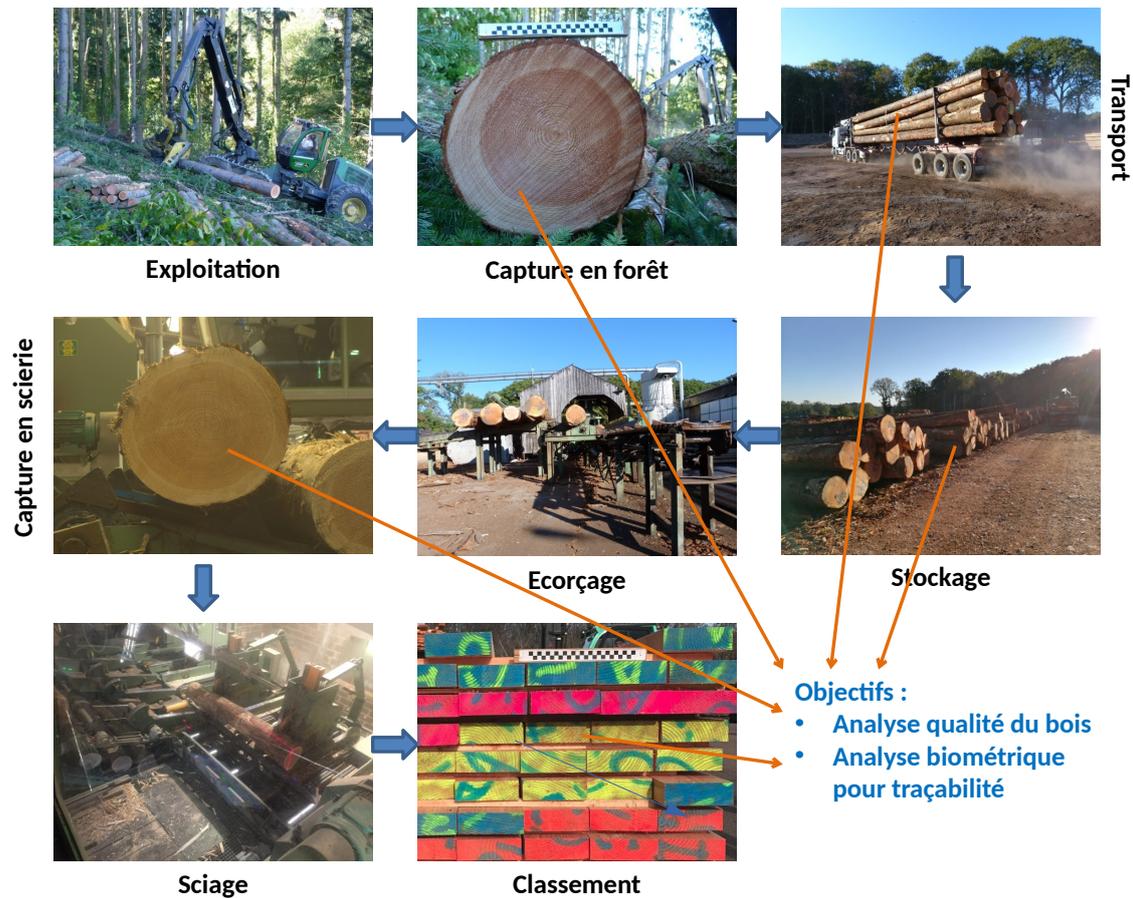
## **Résultats majeurs du projet**

Les méthodes développées pour la traçabilité sont considérées comme satisfaisantes et les résultats sont encourageants, des taux d'égale erreur (EER) inférieurs à 5 % étant obtenus sur le jeu d'images du projet. En ce qui concerne l'évaluation de la qualité, la position de la moelle, la forme de la section et de la zone de duramen sont convenablement détectées, permettant ainsi de qualifier l'excentricité et la circularité des sections (et à terme d'évaluer le rendement au sciage). L'estimation de la largeur des cernes n'est pas encore opérationnelle, même si des résultats encourageants ont été obtenus. Les outils développés dans le cadre du projet sont mis à la disposition de la communauté. Les bases de données (images et mesures de qualité) sont décrites dans deux *datapapers* et sont accessibles sur dépôt « Data INRAE » (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae>). Les logiciels développés ont été publiés et leur code source est disponible sur <https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace>.

## **Production scientifique et brevets depuis le début du projet**

Au total, le projet a donné lieu à 8 articles dans des revues à comité de lecture, 11 communications à des conférences internationales et 2 thèses de doctorat.

## Illustration



## Informations factuelles

**TreeTrace** est un projet de recherche collaborative – international (PRCI) déposé à l'AAP « Usine du futur » pour son édition 2017. C'est un projet de catégorie R&D « Recherche industrielle » bilatéral franco-autrichien coordonné par Fleur Longuetaud (INRAE) et Alexander Petutschnigg (Université de Salzbourg). Les autres partenaires en France sont le LaBoMaP (Arts et Métiers) et le Loria (Université de Lorraine). Le démarrage scientifique du projet a eu lieu en septembre 2018 pour une durée initiale de 36 mois, puis a été prolongé jusqu'en juin 2022. Il a bénéficié d'une aide ANR de 287 937 euros pour un coût global pour les partenaires français de l'ordre de 495 000 euros. Pour ce même projet les partenaires autrichiens ont bénéficié d'une aide financière du FWF de 328 566 euros.

## B.3 Résumé consolidé public en anglais

**Biometric fingerprints of trees : log tracing from forest to sawmill and early estimation of wood quality**

**Traceability and quality assessment of roundwood from image analysis of log ends**

The **TreeTrace** project had two objectives. The first was the evaluation of the quality of roundwood as early as possible in the industrial supply chain and the second was the traceability of the logs from the forest to industry.

The characterisation and traceability of roundwood between the forest and industry are major issues today. Traceability aims to : guarantee the origin of the wood, fight against illegal logging, contribute to maintaining a local and sustainable resource for the industries present. Associated with traceability, quality assessment makes it possible to

optimise the flow of materials and the transformation of this resource by taking better account of its characteristics.

In terms of traceability, the physical markers used today (plastic tags with numbers or barcodes or RFID chips) are not always satisfactory and are easily falsified. Recent work has aimed to develop traceability methods based on the analysis of intrinsic characteristics of logs (biometric methods), under the assumption that each log is unique in its characteristics, such as those measurable in photos taken at the log ends.

For quality assessment, most sawmills only use volume, shape and taper measurements provided by optical scanners, but do not exploit information that could be relatively easily recovered at the end of the logs such as ring width, pith eccentricity, juvenile or heartwood and sapwood areas.

In this project the objective was to evaluate what could be achieved by analysing these images obtained with sensors accessible to everyone and everywhere (smartphones, fixed or on-board cameras, in the forest or after transport). The two objectives could be achieved jointly because they depended on the analysis of the same cross-section images, at the same moment in the wood processing chain, but with potentially different image processing methods because they were specific to each objective but also complementary.

## **Creation of two databases and development of algorithms for log cross-section analysis**

Two important softwood species for the timber industry in France and Austria were considered in this project : spruce and Douglas fir. For each species, an image database was created with images taken of the same logs at several points in the processing chain : at the time of cutting and after transport for spruce ; on the log yard of a sawmill and then in the sawmill after debarking and before cutting for Douglas fir. Measurements were also made on discs taken from the ends of these logs : wood density, ring widths, sapwood width (for Douglas fir).

Algorithms to ensure traceability or to assess the quality of the wood based on the analysis of images of log ends were developed. Various methods have been tested, inspired by fingerprint or iris recognition, mathematical morphology, discrete geometry and convolutional neural networks.

Several methods are common to both traceability and quality assessment objectives, including image pre-processing, wood area segmentation and pith identification. Other more application-specific processes, such as extraction of biometric criteria for traceability or estimation of ring widths for quality, were carried out separately. The quality assessment based on the analysis of log sections was linked to a full-scale industrial experiment in which logs were sawn and the resulting products stress-graded and tested mechanically.

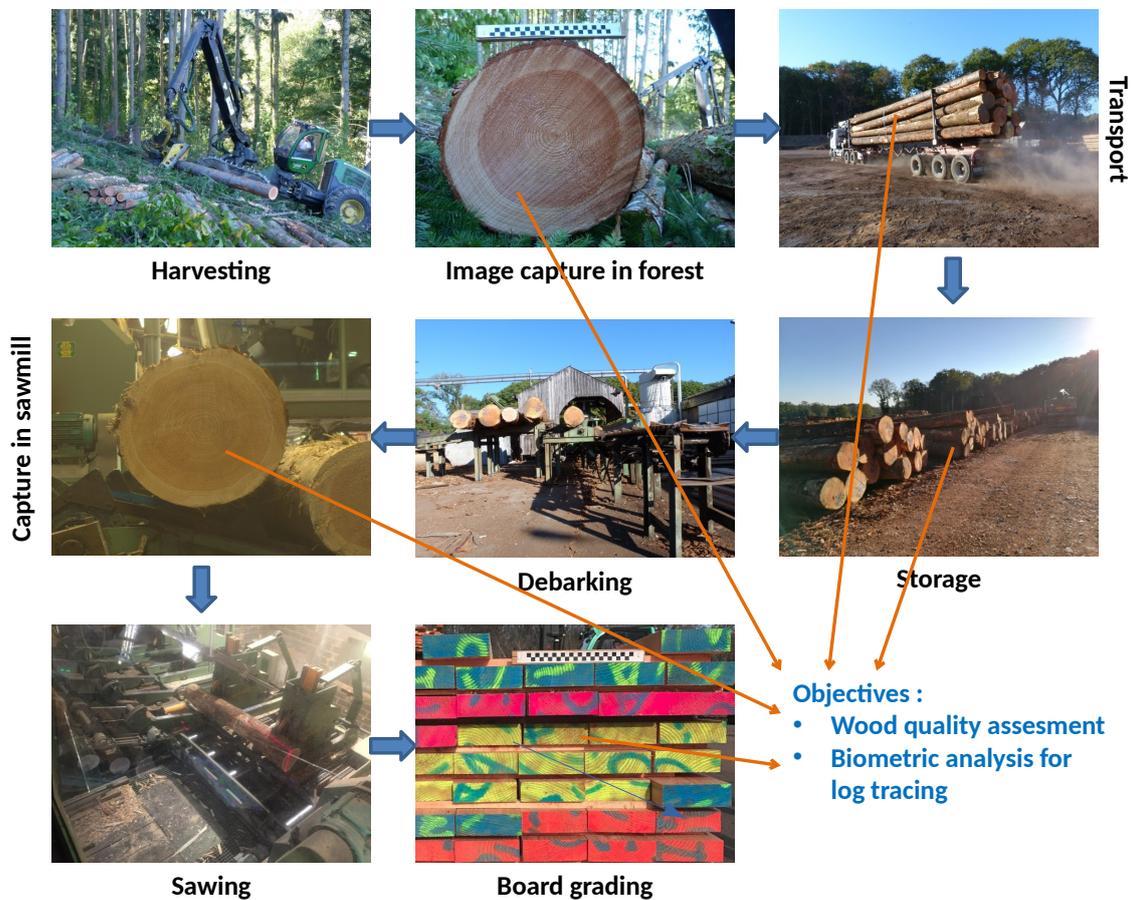
## **Main results of the project**

The methods developed for traceability are considered satisfactory and the results are encouraging, with equal error rates (EER) of less than 5 % being obtained on the project image set. For quality assessment, the position of the pith, the shape of the cross-section and the heartwood area are well detected, allowing the eccentricity and circularity of the cross-sections to be qualified (and eventually the sawing yield to be assessed). Ring width estimation is not yet operational, although encouraging results have been obtained. The tools developed within the framework of the project are made available to the community. The databases (images and quality measurements) are described in two *datapapers* and are available on the “Data INRAE” repository (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae>). The software developed has been published and its source code is available on <https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace>.

## Scientific production and patents since the beginning of the project

In total, the project resulted in 8 articles in peer-reviewed journals, 11 papers in international conferences and 2 PhD theses.

### Illustration



### Factual information

**TreeTrace** is an international collaborative research project (PRCI) submitted to the call for projects “Usine du future” for its 2017 edition. It is a bilateral Franco-Austrian R&D “Industrial Research” project coordinated by Fleur Longuetaud (INRAE) and Alexander Petutschnigg (University of Salzburg). The other partners in France are LaBoMaP (Arts et Métiers) and Loria (University of Lorraine). The scientific start of the project took place in September 2018 for an initial duration of 36 months, then extended until June 2022. It received ANR funding of 287,937 euros for an overall cost for the French partners of around 495,000 euros. For this same project, the Austrian partners received financial support from the FWF of 328,566 euros.

## C Mémoire scientifique

*Maximum 5 pages. On donne ci-dessous des indications sur le contenu possible du mémoire. Ce mémoire peut être accompagné de rapports annexes plus détaillés.*

*Le mémoire scientifique couvre la totalité de la durée du projet. Il doit présenter une synthèse auto-suffisante rappelant les objectifs, le travail réalisé et les résultats obtenus mis en perspective avec les attentes initiales et l'état de l'art. C'est un document d'un format semblable à celui des articles scientifiques ou des monographies. Il doit refléter le caractère collectif de l'effort fait par les partenaires au cours du projet. Le coordinateur prépare ce rapport sur la base des contributions de tous les partenaires. Une version préliminaire en est soumise à l'ANR pour la revue de fin de projet.*

*Un mémoire scientifique signalé comme confidentiel ne sera pas diffusé. Justifier brièvement la raison de la confidentialité demandée. Les mémoires non confidentiels seront susceptibles d'être diffusés par l'ANR, notamment via les archives ouvertes <http://hal.archives-ouvertes.fr>.*

*Mémoire scientifique confidentiel : oui / non*

## C.1 Résumé du mémoire

*Ce résumé peut être repris du résumé consolidé public.*

Le projet **TreeTrace** visait deux objectifs. Le premier était l'évaluation de la **qualité** des bois ronds (grumes ou billons) le plus tôt possible dans la chaîne d'approvisionnement des industries et le second était la **traçabilité** de ces bois de la forêt à l'industrie.

La caractérisation et la traçabilité des bois ronds entre la forêt et l'industrie sont des enjeux majeurs aujourd'hui. La traçabilité vise à : garantir l'origine des bois, lutter contre l'exploitation illégale des forêts, contribuer à maintenir localement et de façon durable une ressource pour les industries présentes. Associée à la traçabilité, l'évaluation de la qualité permet d'optimiser les flux de matière et la transformation de cette ressource en prenant mieux en compte ses caractéristiques.

Du côté de la traçabilité, les marqueurs physiques utilisés aujourd'hui (plaquettes en plastique avec numéro ou code-barre ou puces RFID) n'apportent pas toujours satisfaction et sont facilement falsifiables. Des travaux récents ont eu pour objectif de développer des méthodes de traçabilité basées sur l'analyse de caractéristiques intrinsèques aux grumes (méthodes biométriques), sous l'hypothèse que chaque grume est unique de par ses caractéristiques, comme celles mesurables sur des photos prises aux extrémités de celles-ci.

Concernant l'évaluation de la qualité, la plupart des scieries n'utilisent que des mesures de volume, de forme et de défilement fournies par les scanners optiques, mais elles n'exploitent pas l'information qui pourrait être récupérée relativement facilement à l'extrémité des billons comme la largeur des cernes, l'excentricité de la moelle, les zones de bois juvénile ou de duramen et d'aubier.

Dans ce projet l'objectif était d'évaluer ce que pourrait apporter l'analyse de ces images obtenues avec des capteurs accessibles à tous et partout (smartphones, caméras fixes ou embarquées, en forêt ou après transport vers une industrie). Les deux objectifs pouvaient être atteints conjointement car ils dépendaient de l'analyse des mêmes images de sections, au même moment dans la chaîne de traitement des bois, mais avec des méthodes de traitement des images potentiellement différentes car spécifiques à l'objectif visé mais aussi complémentaires.

Deux essences résineuses importantes pour l'industrie du bois en France et en Autriche ont été considérées dans ce projet : l'épicéa et le Douglas. Pour chaque essence, une base d'images a été créée avec des images prises des mêmes billons à plusieurs endroits dans la chaîne de traitement : au moment de la coupe et après transport pour l'épicéa ; sur le parc à grume d'une scierie puis dans la scierie après écorçage et avant débit pour le Douglas. Des mesures ont également été réalisées sur des rondelles prélevées aux extrémités de ces billons : densité du bois, largeurs de cernes, zones de duramen et d'aubier (pour le Douglas).

Des algorithmes pour assurer la traçabilité et évaluer la qualité du bois à partir de l'analyse des images de sections de grumes ont été élaborés dans le cadre de deux thèses de doctorat en informatique. Des méthodes variées ont été testées, inspirées de la reconnaissance des empreintes digitales ou des iris, de la morphologie mathématique, de la géométrie discrète ainsi que des réseaux de neurones convolutifs.

Plusieurs méthodes sont communes aux objectifs de traçabilité et d'évaluation de la qualité, notamment le prétraitement des images, la segmentation de la zone de bois et l'identification de la moelle. D'autres traitements plus spécifiques à chaque application, comme l'extraction de critères biométriques pour la traçabilité ou l'estimation des largeurs de cernes pour la qualité, ont été réalisés séparément. L'évaluation de la qualité basée sur

l'analyse des sections de grumes a été mise en relation avec une expérience industrielle en vraie grandeur dans laquelle des grumes ont été sciées et les produits obtenus classés et testés mécaniquement.

Les méthodes développées pour la traçabilité sont considérées comme satisfaisantes, notamment les approches par réseaux de neurones convolutifs, et les résultats sont encourageants sur nos données mais les développements doivent être poursuivis. En ce qui concerne l'évaluation de la qualité, la position de la moelle, la forme de la section et de la zone de duramen sont convenablement détectées, permettant ainsi de qualifier l'excentricité et la circularité des sections (et à terme d'évaluer le rendement au sciage). L'estimation des largeurs de cernes n'est pas encore opérationnelle, même si des résultats encourageants ont été obtenus récemment. Les outils développés dans le cadre du projet sont mis à la disposition de la communauté. Les bases de données (images et mesures de qualité) sont décrites dans deux *datapapers* et sont accessibles sur dépôt « Recherche Data Gouv » (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae>). Les logiciels développés ont été publiés et leur code source est disponible sur <https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace>.

Au total, le projet a donné lieu à 8 articles dans des revues à comité de lecture, 11 communications à des conférences internationales et 2 thèses de doctorat.

## C.2 Enjeux et problématique, état de l'art

*Présenter les enjeux initiaux du projet, la problématique formulée par le projet, et l'état de l'art sur lequel il s'appuie. Présenter leurs éventuelles évolutions pendant la durée du projet (les apports propres au projet sont présentés en C.4).*

### C.2.1 Enjeux

**Lutter contre l'exploitation et le commerce illégaux de bois.** Depuis le 3 mars 2013, le Règlement sur le Bois de l'Union Européenne (RBUE) s'applique (UE n° 995/2010 [Parlement Européen, 2010]). Il vise à lutter contre le commerce du bois récolté illégalement en imposant aux opérateurs européens qui mettent du bois et des produits dérivés sur le marché européen de mettre en place un système de « diligence raisonnée » sous peine de sanctions, c'est-à-dire qu'ils doivent prendre toutes les précautions possibles pour éviter de commercialiser du bois issu d'une récolte illégale ou un produit dérivé de ce bois. Ce règlement a été motivé par l'observation au niveau mondial de la part importante de bois récolté et commercialisé illégalement qui est estimée entre 20 et 40% [Smith *et al.*, 2003, Richards *et al.*, 2003, Kuemmerle *et al.*, 2009] et qui constitue une menace pour l'environnement, l'économie et même la stabilité sociale et politique dans différentes régions du monde [United Nations, 1992, Dykstra *et al.*, 2003].

**Mieux organiser la filière forêt-bois.** Faciliter et généraliser la traçabilité individuelle des grumes depuis la forêt jusqu'au parc des scieries permettrait de faire face à ces exigences juridiquement contraignantes. De plus, une chaîne d'approvisionnement en bois transparente combinée à une base de données, incluant aussi des informations de caractérisation des grumes, offrirait un potentiel d'amélioration en termes d'efficacité au sein de la chaîne d'approvisionnement logistique (forêt-scierie) et de compétitivité de la filière (par exemple, meilleure allocation des bois selon leur qualité, augmentation du rendement lors de la transformation et de la valeur des produits), la pression sur les coûts dans les industries forestières ne cessant d'augmenter. Ces améliorations sur le plan logistique permettraient aussi de minimiser les impacts environnementaux et de soutenir le principe de durabilité dans le domaine de la filière forêt-bois (objectifs affichés du projet « Indisputable Key » [Uusijärvi, 2010]). À cet égard, les technologies de l'information sont essentielles pour relever une série de défis énumérés dans la stratégie pour la filière-bois de l'UE :

par exemple, la disponibilité des ressources, l'amélioration de la logistique, les limitations légales et l'innovation [Parlement Européen, 2013, Commission Européenne, 2017].

**Développer une méthode innovante de traçabilité des bois ronds.** Différentes études ont été conduites dans le passé pour permettre la traçabilité le long de la chaîne d'approvisionnement. De nombreuses méthodes ont été développées, des techniques les plus simples (poinçonnage, marquage à la peinture, agrafage de plaquettes contenant des numéros ou des code-barres) jusqu'à des techniques avancées à base d'empreintes génétiques [Degen et Fladung, 2007, Lowe et Cross, 2011] ou l'utilisation de puces RFID [Kvarnström et Oja, 2008, Uusijärvi, 2010, Hekli *et al.*, 2013]. Cependant, ces solutions techniques de traçage basées sur un marquage physique nécessitent un temps et un coût supplémentaire [Tzoulis et Andreopoulou, 2013, Picchi *et al.*, 2022]. L'utilisation de plastique et de métal pour les puces RFID, même en faible quantité, n'est pas toujours bien accueillie par les scieurs. Ces marqueurs physiques ne garantissent pas non plus l'absence de fraude par retrait, substitution ou falsification du marquage [Knowles *et al.*, 2017, Sun *et al.*, 2022].

**Développer une méthode innovante d'évaluation de la qualité des bois ronds.** Du point de vue de la qualité, la mesure et le classement des bois ronds constituent un défi majeur pour l'industrie forestière et l'industrie du sciage. Les industries de transformation secondaire, en particulier l'industrie du sciage, utilisent la mesure, le classement et le tri des grumes pour optimiser la transformation du bois et augmenter la production économique et le rendement. En outre, des règles de mesure et de classement prédéfinies garantissent un commerce équitable des billons et des grumes pour toutes les parties concernées et c'est un point sur lequel il serait important de progresser. En ce qui concerne l'industrie du sciage, l'utilisation de dispositifs automatiques de mesure et de classement a considérablement augmenté (par exemple, outre les caméras vidéo, on utilise principalement des scanners laser 3D pour créer un profil 3D de la forme et des dimensions de la grume), mais les méthodes de mesure mécaniques et manuelles sont encore principalement utilisées. Dans les sciences du bois, la tomographie à rayons X (CT) est bien connue pour le contrôle non destructif du bois depuis près de 30 ans. Cependant, le premier scanner CT industriel rapide (environ 120 m/min) et robuste a été développé dans le cadre du projet CT-Pro en 2010 [Giudiceandrea *et al.*, 2011, Giudiceandrea *et al.*, 2012]. En fait, quelques-uns de ces scanners CT ont été produits et sont déjà installés dans des scieries, en Allemagne, en France et au Chili, par exemple. Des recherches récentes ont confirmé qu'un positionnement optimal des grumes à l'entrée de la scie, sur la base de l'information sur la structure interne obtenue avec un scanner CT, augmente la valeur de chaque grume jusqu'à environ 20% [Berglund *et al.*, 2013, Stängle *et al.*, 2015]. On peut s'attendre à ce que le nombre de scieries équipées d'un scanner CT augmente rapidement, ce qui se traduira par la disponibilité de données correspondantes potentiellement utilisables pour le traçage des grumes et l'évaluation de la qualité. Mais pour l'heure, les scanners CT pour les grumes entraînent des coûts élevés et sont réservés aux grandes entreprises plutôt qu'aux petits propriétaires de bois et aux petites scieries (2 scieries seulement en France disposent d'un scanner de grumes à rayons X).

## C.2.2 Problématique

Dans ce projet nous souhaitons développer une technologie qui soit pertinente afin de **répondre de façon conjointe aux problématiques de traçabilité et d'évaluation de la qualité des grumes et billons**, une technologie peu coûteuse, qui soit accessible à tous et partout, qui soit robuste et difficilement falsifiable. Nous avons décidé de baser cette technologie sur **l'analyse des éléments visibles à l'extrémité des grumes (sur la section transversale) et l'utilisation de caractéristiques intrinsèques aux**

**grumes. L'identification biométrique des bois est une méthode de traçabilité sans marquage physique qu'il serait très facile et peu coûteux de mettre en œuvre et qui serait difficilement falsifiable.** Des travaux récents ont été menés à l'Université de Salzbourg en ce sens et sont encourageants.

L'hypothèse principale sur laquelle repose ce travail est que les caractéristiques visibles et mesurables à l'extrémité d'une grume sur sa section transversale permettent de l'identifier de façon unique. Pour rendre la traçabilité possible, il faudrait qu'une grume puisse être identifiée sur deux images différentes de son extrémité, la première capturée en forêt pendant l'exploitation, la seconde en scierie de façon à assurer la traçabilité le long de la chaîne d'approvisionnement. La même méthode pourra être appliquée pour suivre les grumes à l'intérieur de la la scierie. Les premiers résultats obtenus par l'équipe autrichienne du projet indiquent que les photographies des extrémités des grumes sont bien adaptées à l'identification des grumes dans les conditions étudiées. L'évaluation de la qualité dans le même temps, à partir des mêmes images, permettrait un tri des billons par classes de qualité puis une optimisation de leur transformation. L'enjeu dans le projet était de démontrer que les informations présentes à la surface des sections sont à la fois mesurables automatiquement et pertinentes pour l'évaluation de la qualité des grumes et billons.

Cependant, les capteurs d'images installés dans les scieries sont assez divers et la précision de la méthode est fortement dépendante des conditions d'acquisitions (type de capteur, salissures, qualité du tronçonnage, conditions lumineuses, etc). Dans la forêt, la disponibilité des scanners CT n'est de toute façon pas réaliste. Par conséquent, seules des méthodes d'imagerie plus traditionnelles peuvent être utilisées pour acquérir les données requises en forêt. Dans l'idéal, un système de reconnaissance biométrique des grumes devrait fonctionner quel que soit le capteur utilisé de façon à permettre le suivi depuis la forêt jusqu'à la scierie, et dans la scierie depuis l'amenage des grumes jusqu'aux produits sciés (images RVB, CT ou hyperspectrales). C'est pour cette raison que dans ce projet des images RVB classiques, mais aussi obtenues avec un scanner CT ainsi que des images hyperspectrales ont été utilisées. Les algorithmes devraient également être capables de gérer le changement de couleur et d'aspect des sections lié au phénomène d'oxydation du bois, à l'apparition de salissures et de fentes. **La grande variabilité des images à traiter constitue l'un des obstacles techniques à lever.**

L'un des principaux objectifs est donc de développer une technologie d'avenir à faible coût, facile à mettre en œuvre, afin de toucher un public aussi large que possible (propriétaires, gestionnaires, scieurs).

**Résultats attendus.** Outre des publications scientifiques et des participations à des conférences internationales, nous attendons les résultats suivants de ce projet :

- Une base de données contenant des images et des mesures rendue disponible pour la communauté ;
- Des algorithmes de pré-traitement des images qui soient partagés pour les deux objectifs affichés de traçabilité et d'évaluation de la qualité ;
- Des algorithmes pour la traçabilité biométrique (incluant le croisement d'images obtenues avec des capteurs et des modalités d'imagerie différents) ;
- Des algorithmes pour l'évaluation de la qualité (forme, excentricité, duramen/aubier, largeurs de cernes) ;
- Des résultats étendus de validation expérimentale sur la performance des techniques développées (précision de reconnaissance pour le traçage, précision de l'évaluation de la qualité).

### C.2.3 État de l’art

**Analyse d’images appliquée à la traçabilité des grumes.** Les premiers travaux sur l’identification biométrique des grumes [Chiorescu et Grönlund, 2003, Chiorescu et Grönlund, 2004, Flodin *et al.*, 2008a] se concentraient sur des caractéristiques géométriques externes obtenues à l’aide de scanners 2D ou 3D souvent déjà présents dans les scieries. D’autres travaux [Flodin *et al.*, 2007, Flodin *et al.*, 2008b], utilisant cette fois des rayons X, ont montré que la position des nœuds pouvait permettre la traçabilité des grumes jusqu’aux produits sciés. Tous ces travaux sont basés sur la mesure de caractéristiques intrinsèques aux grumes et font l’hypothèse que chaque grume est unique de par ses caractéristiques. Les capteurs utilisés dans ces travaux sont cependant difficilement transposables en forêt.

La première étude utilisant la section transversale des grumes pour les identifier a été réalisée dans le but de réduire les coupes illégales d’arbres aux États-Unis [Barrett, 2008]. Une méthode capable de mettre en correspondance une photo de souche avec la section de la grume correspondante dans une pile de bois a été développée en s’aidant de la forme des sections et de l’aspect des traits de scie.

Plus récemment, des travaux un peu similaires ont concerné la reconnaissance biométrique de planches basée sur les images de leurs surfaces [Pahlberg *et al.*, 2015a, Pahlberg *et al.*, 2015b, Johansson *et al.*, 2013].

Concernant la traçabilité des grumes à partir de méthodes biométriques appliquées à des images de sections, les partenaires autrichiens du projet avaient déjà testé plusieurs approches [Charwat-Pessler *et al.*, 2009, Charwat-Pessler *et al.*, 2015].

Un premier pré-traitement nécessaire était la segmentation de la section de bois dans les images RVB brutes. [Schraml et Uhl, 2014] ont proposé une méthode rapide par accroissement de région pour segmenter la section de bois sur des images d’extrémité de grume non préparée.

Des techniques d’identification des empreintes digitales et de l’iris ont été appliquées à des sections transversales d’épicéa photographiées plusieurs fois à différentes périodes et à différentes hauteurs dans le tronc [Schraml *et al.*, 2014a, Schraml *et al.*, 2014b, Schraml *et al.*, 2015a, Schraml *et al.*, 2015c, Schraml *et al.*, 2016]. L’analyse montre que les scores d’appariements entre images décroissent avec le temps et avec la distance entre deux prises d’images. Un taux de reconnaissance de 100% peut être obtenu en intégrant, en plus des variations interannuelles des cernes, des caractéristiques géométriques de l’extrémité du tronc [Schraml *et al.*, 2015b, Schraml *et al.*, 2015d].

### **Analyse d’images appliquée à l’évaluation de la qualité du bois des grumes.**

Dans la littérature, la plupart des travaux visant à produire des informations sur la qualité du bois à partir d’images de sections concernent les scanners 3D à rayons X (ou tomographes) qui génèrent des piles d’images tomographiques (images CT). Ces équipements très coûteux et encore peu présents dans les scieries (deux scieries seulement sont équipées en France) sont particulièrement adaptés à l’évaluation de la qualité puisqu’ils permettent l’inspection en 3D de l’intérieur des grumes. Dans les laboratoires de recherche, des scanners médicaux sont parfois utilisés comme cela est le cas à l’INRAE Grand-Est – Nancy qui dispose d’un scanner médical essentiellement dédié à l’analyse du bois. Une revue détaillée des différentes propriétés du bois (et plus particulièrement des défauts) qui peuvent être détectées par tomographie à rayons X est donnée dans [Wei *et al.*, 2011]. La nodosité est le défaut le plus étudié quand on dispose de piles d’images CT, le but étant souvent de créer une représentation 3D de la branchaison dans la grume [Longuetaud *et al.*, 2012, Krähenbühl, 2014, Krähenbühl *et al.*, 2014, Roussel *et al.*, 2014]. Les nœuds, comme d’autres défauts tels que la pourriture, les poches de résine ou les fentes, peuvent en général être détectés en associant des algorithmes de seuillage et de reconnaissance de forme, et en utilisant leurs position et orienta-

tion dans l'image. [Entacher *et al.*, 2007a] a par exemple évalué des algorithmes basés sur les changements de niveaux de gris pour détecter l'angle du fil. Pour ce projet, nous nous intéressons aux algorithmes capables de traiter des sections uniques (et non des piles d'images) car ces algorithmes, bien que développés pour des images CT, seraient susceptibles de fonctionner également des images RVB. En dehors des défauts, les éléments le plus souvent détectés sur les images tomographiques sont la moelle, la limite aubier/duramen et l'écorce [Bhandarkar *et al.*, 1996, Andreu et Rinnhofer, 2001, Longuetaud *et al.*, 2004, Entacher *et al.*, 2008, Boukadida *et al.*, 2012]. La détection des cernes annuels est plus problématique en raison de la faible résolution de ces images [Entacher *et al.*, 2007b, Entacher *et al.*, 2008].

Les travaux visant à exploiter des images RVB obtenues par photographie de sections brutes de sciage sont beaucoup plus rares. La plupart des traitements informatiques sur des images RVB concernent des surfaces soigneusement préparées, souvent des éprouvettes radiales, analysées par exemple pour des études en dendrochronologie [Sliwa *et al.*, 2003, Borianne *et al.*, 2011, Henke et Sloboda, 2014, Kennel *et al.*, 2015, Lara *et al.*, 2015] et sont difficilement transposables à des images de sections brutes de sciage, obtenues en contexte industriel, comme celles dont il est question dans le projet TreeTrace.

Or il y a un réel enjeu à traiter des images RVB de sections de grumes car ces images seraient très facilement accessibles à toutes les scieries et leur analyse permettrait de fournir des informations importantes, que ce soit pour le tri des billons en fonction de leur qualité avant sciage, ou pour optimiser le sciage ensuite. Ces images RVB pourraient également être obtenues facilement en forêt ou sur des plates-formes de tri pour des évaluations de la qualité très en amont qui permettraient de mieux allouer la matière première dans la filière.

Parmi les méthodes de détection de la moelle sur des images RVB de sections [Wu et Liew, 2000, Hanning *et al.*, 2003, Österberg *et al.*, 2004] seules les approches de [Norell et Borgfors, 2008, Schraml et Uhl, 2013] concernent des surfaces brutes de sciage. Dans [Norell et Borgfors, 2008], deux méthodes qui calculent les orientations locales des cernes par convolution de noyaux de filtres dans le domaine spatial sont présentées. Sur des images de sections sciées non préparées mais de bonne qualité, [Marjanen *et al.*, 2008, Kumpulainen et Marjanen, 2010] ont estimé la largeur de cernes moyenne par analyse du spectre de Fourier. L'approche est améliorée dans le dernier article en utilisant une transformée de Radon dans une étape intermédiaire. [Cerdeja *et al.*, 2007] ont proposé une approche d'approximation des cernes par des polygones fermés. Les travaux les plus complets concernant la détection des cernes sur des images de sections non préparées ont été proposés par [Norell, 2009] et utilisent leur détection préalable de la moelle [Norell et Borgfors, 2008]. L'algorithme détecte les limites de cernes à l'aide d'une transformée en distance polaire pondérée par les niveaux de gris (GWPD) [Norell *et al.*, 2007]. La méthode a été mise au point sur 24 images puis évaluée sur 20 images de sections de pin sylvestre sur lesquelles les cernes pouvaient être comptés visuellement. [Norell, 2011] a ensuite appliqué cette méthode pour compter le nombre de cernes sur 75 billons de pin sylvestre bruts de sciages après avoir effacé les traces de sciage par filtrage du spectre de Fourier.

Les équipes françaises du projet TreeTrace ont déjà une certaine expérience dans l'extraction de données de qualité du bois à partir d'images. En dehors des travaux déjà cités ci-dessus sur la détection de la moelle et la nodosité, on peut citer [Longuetaud *et al.*, 2007] qui ont proposé une méthode de détection de la limite aubier/duramen sur des images tomographiques d'épicéa frais. Plus récemment, [Longuetaud *et al.*, 2016] ont proposé une méthodologie pour cartographier les variations de densité et d'humidité du bois sur des coupes tomographiques obtenues aux états frais puis anhydre. En mesurant ces propriétés sur des rondelles prises à différents niveaux de hauteur dans le tronc, cette méthode a permis d'analyser la répartition de la biomasse et de l'eau dans la tige de différentes essences. Un algorithme de classement mécanique conforme aux normes européennes a été développé

par [Viguier, 2015]. A l'aide d'un système optique permettant de cartographier l'angle du fil sur des surfaces de bois couplé à un système de radiographie, [Viguier *et al.*, 2017] ont pu déterminer les propriétés mécaniques de planches sciées.

### C.3 Approche scientifique et technique

Deux campagnes d'échantillonnage ont été conduites, une pour chaque essence du projet.

La campagne « épicéa » a été menée en étroite collaboration avec les partenaires autrichiens du projet en septembre 2018. Elle a concerné 100 billons de 4,5 m de long prélevés dans les Vosges. Des images en bout des billons ont été prises en forêt, puis les billons ont été acheminés à Freiburg pour de nouvelles prises de photos des sections après transport. La Fig. 1 montre des images de sections transversales prises lors de cette campagne sur le site d'exploitation puis à Freiburg. Dans le but de tester les algorithmes de reconnaissance des billons, plusieurs photos ont été prises de chaque section en faisant varier l'angle d'inclinaison de l'appareil. Les billons ont ensuite été scannés par un tomographe industriel à rayons X à l'Institut de recherche forestière du Baden-Württemberg (FVA) (Fig. 2 droite). Un LiDAR terrestre a aussi été utilisé pour recueillir des informations sur la forme tridimensionnelle des billons en complément des informations disponibles sur les sections pour évaluer la qualité (Fig. 2 gauche). Des rondelles ont été découpées aux deux extrémités de chaque billon pour être analysées avec des caméras hyperspectrales (Fig. 2 milieu) puis permettre les mesures de qualité au laboratoire (densité du bois et largeurs de cernes).



**FIGURE 1** – Exemples d'images du billon d'épicéa E024B. En haut sur le site d'exploitation, en bas au FVA à Freiburg. Dans chaque cas plusieurs images ont été prises en faisant varier l'angle d'inclinaison de l'appareil.



**FIGURE 2** – Mesures effectuées sur les épicéas collectés : T-LiDAR (gauche), caméra multi-spectrale (milieu), scanner X (droite).

La campagne « Douglas » a plutôt concerné les équipes françaises, et notamment le LaBoMaP et AMVALOR pour les essais industriels. La scierie BBF (sur la commune

de La Machine) a accepté d'équiper sa chaîne d'amenage d'une caméra et de réaliser l'expérience de sciage pour la collecte des planches. Après des essais de prises d'images sur un site d'exploitation puis suivi des billons jusqu'au parc de la scierie, nous avons décidé de prélever plutôt les grumes sur parc en sélectionnant quatre sites d'exploitation. Treize grumes (12-13 m) ont été choisies dans chaque site. Après billonnage, 156 billons de 3,5 à 4 m ont été obtenus. Des rondelles ont été prélevées entre chaque billons. Les billons ont été photographiés sur le parc avec un smartphone puis avec la caméra de la chaîne d'amenage, et enfin sciés (à l'exception de 4 billons qui ont servi à des essais de déroulage). Les produits du sciage ont été collectés sur 32 billons (4 sites  $\times$  4 arbres  $\times$  2 billons). Les 346 planches ont ensuite été acheminées à Cluny pour être testées par une machine d'essai puis par des essais en flexion statique jusqu'à la rupture. La Fig. 3 illustre cette campagne. La Fig. 4 illustre le repositionnement des planches dans leur billon d'origine.



**FIGURE 3** – Exemples d'images du billon de Douglas C04a. En haut sur le parc à grume avec de gauche à droite le fin bout peint pour faciliter le repositionnement des planches, le gros bout tenu par une tête de tronçonnage et l'image segmentée manuellement de la section. En bas : gros bout vu depuis une caméra installée sur la chaîne de sciage et image segmentée de la section. Sur les images segmentées l'aubier est en blanc et le duramen en rouge.

## C.4 Résultats obtenus

*Positionner les résultats par rapports aux livrables du projet et aux publications, brevets etc. Revisiter l'état de l'art et les enjeux à la fin du projet.*

### C.4.1 Algorithmes développés pour l'analyse de sections transversales de grumes

Plusieurs éléments logiciels nécessaires à l'interprétation des images, aussi bien pour des fins d'identification que pour l'évaluation de la qualité, ont été développés dans le



**FIGURE 4** – Repositionnement des planches sur les images de sections du Douglas C04a. A gauche : fin bout sur le parc à grume. A droite : gros bout sur la chaîne de sciage.

cadre du projet :

- **Calibration spatiale des images**

Pour mesurer des grandeurs comme le diamètre des sections ou la largeur des cernes sur des photographies, il est nécessaire de calibrer spatialement les images. Un algorithme de détection d’une mire en damier noir et blanc placée à proximité de la section photographiée et de calcul de la résolution spatiale des images a été élaboré [28].

- **Segmentation de la grume**

Sur une photographie de section de grume prise en conditions réelles, la première étape du traitement consiste à éliminer l’arrière-plan des images qui risque de perturber l’analyse. Parmi les méthodes expérimentées [27, 28], les réseaux de neurones convolutifs se sont avérés les plus performants. Différentes architectures de réseaux (U-Net, Mask R-CNN, RefineNet) ont été testées [11, 21, 27]. Les meilleurs résultats dépendent du jeu d’images considéré mais ils sont sensiblement équivalents.

- **Détection de la moelle**

L’excentricité de la moelle est un critère de qualité important et facilement accessible sur une coupe transversale. La localisation de la moelle facilite aussi l’identification ultérieure des cernes de croissance. Plusieurs méthodes existent dans la littérature mais peu d’entre elles sont applicables à des sections brutes de sciages. Un algorithme inspiré des méthodes existantes dans la littérature a été implémenté [13, 33], puis une optimisation originale par un algorithme de colonies de fourmis a été proposée [1, 15, 27].

- **Segmentation du duramen**

Pour un bois comme le Douglas, la proportion en surface du duramen est un critère important de qualité du fait de sa bonne durabilité naturelle. L’efficacité des réseaux de neurones convolutifs a là encore été démontrée pour segmenter automatiquement le duramen [16, 27].

- **Détection des cernes annuels**

L’identification des limites de cernes est primordiale, aussi bien pour l’identification des grumes que pour l’évaluation de la qualité. Même si des progrès importants ont été accomplis, notamment pour filtrer les traces de sciage et mettre en évidence les limites de cernes sur des sections brutes de tronçonnage, les résultats restent à améliorer. Une méthode de filtrage basée sur les notions de droites et segments

discrets a été mise en place [12, 14, 27, 34]. Des travaux complémentaires sont encore nécessaires pour la rendre plus efficace.

### C.4.2 Traçabilité

Les avancées concernant la traçabilité ont été obtenues par nos collègues autrichiens dans deux domaines qui avaient motivé leur implication dans le projet.

#### — **Apport de l'imagerie hyperspectrale pour la traçabilité**

Entre le moment de l'abattage et le stockage industriel des grumes, les surfaces des sections subissent des changements de couleur et d'aspect (Fig. 1-4) dont il faut faire abstraction pour assurer le traçage. Pour vérifier si des images obtenues hors du spectre visible permettraient d'améliorer l'identification, des images hyperspectrales des rondelles d'épicéa collectées dans le cadre du projet ont été acquises à des fréquences comprises entre 445 et 1665 nm. La méthodologie basée sur les techniques de reconnaissance des empreintes digitales développée à l'Université de Salzburg a ensuite été appliquée aux images obtenues à chaque fréquence. Les résultats montrent qu'en effet certaines bandes de fréquences dans le proche infra-rouge sont plus favorables pour l'identification [8, 10].

Dans une étude plus récente [22], il est montré qu'une combinaison d'informations provenant d'images à différents spectres de fréquences permettait d'obtenir une bien meilleure visibilité des cernes de croissance, qui sont les éléments de l'image les plus importants pour la traçabilité, que des images RVB ou des images provenant d'un spectre unique.

Un capteur spécifique à bas coût pourrait ainsi être imaginé pour exploiter ces fréquences.

#### — **Application des réseaux de neurones convolutifs pour l'identification des grumes**

La supériorité pour l'identification des grumes des réseaux de neurone convolutifs 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 [10, 21]. Les taux de reconnaissance obtenus dans chaque jeu de données sont toujours largement supérieurs avec les réseaux de neurones. Dans cette application, les réseaux de neurones sont même utilisés deux fois : pour la segmentation des sections, puis pour la reconnaissance.

Une seconde étude traite d'une application qui pourrait concerner une scierie équipée d'un tomographe à grumes (il en existe déjà deux en France) pour lui permettre d'identifier au passage dans le scanner une grume qui aurait été photographiée à l'abattage. La difficulté est ici de reconnaître les grumes sur des images aux caractéristiques très différentes (photos couleur et coupes tomographiques). L'étude montre que les réseaux de neurones offrent des performances acceptables pour cette application, avec un taux d'erreur égale de 13% [23].

### C.4.3 Qualité du bois

Des propriétés du bois ont été mesurées sur les deux essences du projet. Les essais industriels menés sur le Douglas ont permis de plus d'évaluer la qualité des produits finaux. L'analyse de ces bases de données [4, 5], qui n'a pu être qu'ébauchée dans le cadre du projet, a déjà fourni des résultats intéressants.

#### — **Développement d'une méthode hybride de mesure de la densité à l'échelle du cerne**

L'analyse des bases de données disponibles nous a permis de développer une méthode d'estimation de la densité des cernes individuels par couplage de deux méthodes : une méthode optique de mesure des largeurs de cernes sur des images RVB

de haute résolution et une méthode par tomographie à rayons X de mesure de la densité du bois sur des rondelles permettant une acquisition rapide mais d'une résolution moindre [7, 32].

— **Relation entre largeur de cerne, densité et qualité du bois**

La densité du bois est un critère essentiel pour la qualité, notamment dans les emplois en structure. Les données collectées sur l'épicéa ont permis de construire des modèles pour expliquer les variations de la densité des cernes en fonction de leur âge cambial, de leur largeur et de la hauteur dans la tige. Les résultats montrent que l'effet de l'âge cambial du cerne est déterminant, même si la largeur du cerne et sa hauteur interviennent également [7, 32]. Un bois juvénile particulier a été observé à la base de la tige, ayant une densité plus élevée à largeur de cerne égale que le bois mature, alors que plus haut dans l'arbre, le bois juvénile se caractérise par une densité faible et une largeur de cernes élevée. Ces résultats ont permis de souligner l'importance de distinguer les notions de juvénilité et de bois de cœur qui sont souvent confondues. Ces résultats semblent aussi montrer que, pour prédire la qualité d'une grume par l'analyse de sa section, le nombre de cernes et la proportion de bois juvénile sont sans doute des variables essentielles, plus peut-être que la largeur moyenne des cernes.

Les données recueillies sur le Douglas dans le cadre de la campagne industrielle font l'objet d'une analyse similaire qui est encore en cours.

— **Positionnement des sciages dans la grume**

Pour faire le lien entre d'une part les caractéristiques mesurées sur les images prises en bout des billons (ou, dans le cadre du projet, les propriétés du bois mesurées sur des rondelles) et d'autre part les propriétés des sciages, il est utile de déterminer la position initiale des sciages dans la grume. Pour les 346 planches de Douglas analysées dans le cadre du projet, ce travail a été réalisé manuellement en se basant sur le dessin des cernes. Il s'agit cependant d'un travail difficile qui demande beaucoup de patience et de minutie. Dans l'idée que d'autres expériences similaires seront réalisées dans l'avenir, des outils ont été réalisés pour d'une part extraire les images des bouts de planches dans une pile (Fig. 5), et d'autre part pour replacer ces images dans l'image de la grume (Fig. 4) [25]. Ces travaux se poursuivent actuellement dans le cadre du projet ANR EffiQuAss.



**FIGURE 5** – Pile de planches obtenues pendant la campagne industrielle de sciage.

— **Caractérisation mécanique des produits**

La campagne industrielle de sciage du Douglas a concerné 152 billons de 3,5 à 4 m qui ont été sciés en conditions réelles de production. Sur 32 de ces billons, les sciages obtenus ont été collectés (Fig. 5) et caractérisés mécaniquement. Il reste à évaluer dans quelle mesure on pourrait expliquer la qualité des sciages par les propriétés du bois mesurées en bout des billons (densité et largeur de cernes), en prenant éventuellement en compte des informations sur la position des sciages comme la distance à la moelle ou la position sur l'axe d'excentricité de la grume.

Une première analyse portant sur un échantillonnage de huit Douglas a déjà montré l'importance de la distance à la moelle sur le classement des pièces [20].

Quatre autres billons ont été divisés en 15 billons courts pour être déroulés sur la dérouleuse expérimentale du LaBoMaP de Cluny et tester un outil prototype de mesure de l'orientation des fibres et de caractérisation mécanique des placages. Les placages obtenus ont été classés visuellement et mécaniquement et ont servi à confectionner des panneaux LVL dont les propriétés mécaniques ont été mesurées [2, 3, 18].

## C.5 Exploitation des résultats

Les résultats du projet ont montré que des informations essentielles pour la traçabilité et l'évaluation de la qualité peuvent être obtenues sur des images prises en bout des billons.

En ce qui concerne la qualité, il reste à finaliser certains algorithmes, notamment pour la détection des cernes de croissance (travaux poursuivis par Rémi Decelle dans le cadre d'un post-doctorat jusque décembre 2022), et à les intégrer dans un logiciel qui pourrait idéalement être distribué sous forme d'application pour smartphone. Un prototype d'application comprenant uniquement la détection de la moelle a d'ailleurs déjà été réalisé par Rémi Decelle et présenté lors du GDR Bois de 2019.

Les résultats concernant la traçabilité sont plus aboutis. Ils sont suffisamment prometteurs pour que l'Office National des Forêts soit intéressé par un projet dans la continuité de TreeTrace pour vérifier la faisabilité d'un traçage des grumes de chêne à l'aide d'images prises en bout des billons.

## C.6 Discussion

*Discussion sur le degré de réalisation des objectifs initiaux, les verrous restant à franchir, les ruptures, les élargissements possibles, les perspectives ouvertes par le projet, l'impact scientifique, industriel ou sociétal des résultats.*

Le projet TreeTrace a permis de progresser sur plusieurs étapes qui seront nécessaires aussi bien pour l'évaluation de la qualité aux différents endroits de la chaîne de traitement des bois (en forêt, sur parc à grumes ou en scierie), que pour la traçabilité des bois ronds, et même des sciages. Le couplage traçabilité – évaluation de la qualité est essentiel pour améliorer la gestion des ressources et l'organisation de la filière forêt-bois. Il reste cependant à améliorer certains algorithmes, à construire un outil global intégrant toutes ces avancées, et à évaluer la faisabilité d'un développement opérationnel.

Suite à ce projet, il est maintenant acquis qu'il est possible d'extraire des informations essentielles de qualité du bois à partir du traitement d'images de sections de grumes/billons brutes de sciage. La taille de la section, sa forme, son éventuelle excentricité, et ses zones de duramen et d'aubier quand elles sont présentes, sont des caractéristiques qui se détectent bien. Pour la taille, il reste à régler le problème de la calibration automatique de l'image. Dans le projet nous avons positionné une mire en damier noir et blanc sur les photos prises en forêt ou sur le parc à grumes. Le problème ne se posait pas avec la caméra industrielle installée en scierie car une mesure de distance à l'objet était disponible. Mais avec les smartphones récents il devient possible de mesurer une distance à l'objet et donc de récupérer une taille des pixels dans l'image. Enfin, les résultats sont très encourageants pour la détection des cernes mais des améliorations restent à apporter aux algorithmes. Il n'y a pas de doute sur le fait qu'il sera possible de récupérer une largeur moyenne des cernes dans l'image. L'identification précise de chaque cerne individuel est une tâche plus complexe qui fonctionne pour l'instant partiellement et qui est très dépendante de l'état de surface des sections.

La campagne d'essais industriels réalisée dans le cadre du projet a permis de constituer une base de données précieuse pour continuer à progresser, et dont l'exploitation est loin

d'être achevée. Un projet ANR JCJC intitulé « EffiQuAss » est d'ailleurs en cours, piloté par Guillaume Pot du LaBoMaP, qui va largement utiliser cette base de données. A très court terme, l'analyse des relations entre propriétés du bois mesurées sur des rondelles prélevées en bout des grumes et qualité des sciages obtenus fera l'objet d'une publication. Dans un second temps, si la pertinence des mesures en bout de grumes est confirmée, le lien pourra être fait avec les propriétés mesurables automatiquement sur les images de façon à améliorer les algorithmes pour cibler les plus pertinentes pour l'évaluation de la qualité. Par exemple, bien que la densité du bois ne soit pas mesurable directement sur les images, la mesure de largeur de cernes et de distance à la moelle pourraient suffire à obtenir une information équivalente de qualité.

Il sera enfin possible, grâce aux données obtenues par LiDAR terrestre sur les épicéas d'évaluer dans quelle mesure, en complément des informations disponibles sur les images en bout, la forme de la grume doit être prise en compte pour évaluer correctement la qualité. Le projet ANR « WoodSeer » actuellement en cours, piloté par Thiéry Constant (UMR Silva, INRAE), est en fait extrêmement complémentaire au projet TreeTrace car il s'intéresse à l'acquisition d'informations présentes sur l'enveloppe externe des grumes (singularités, défauts) pour en déduire la qualité interne. Ces données peuvent être acquises avec des LiDAR terrestres pour les arbres sur pied ou bien avec des scanners optiques sur des plates-formes de tri ou en scierie. En rassemblant toutes ces technologies et résultats il sera possible d'obtenir des mesures de qualité un peu partout le long de la chaîne de traitement et cela, si on y ajoute la traçabilité, permettra de mieux organiser la filière, de la rendre plus compétitive, en optimisant les flux de matière et la transformation de la ressource.

Des progrès sensibles ont été obtenus dans le domaine de la traçabilité, notamment grâce à l'emploi des réseaux de neurones convolutifs mais aussi par la mise en évidence à l'aide des caméras hyperspectrales des fréquences optimales pour faciliter l'identification. Il serait maintenant envisageable d'appliquer cette technique en vraie grandeur, éventuellement en développant un capteur spécifique à bas coût utilisant ces fréquences optimales.

Le projet TreeTrace a eu un fort effet intégrateur. La collaboration entre les équipes françaises, déjà ancienne, a été renforcée par le projet au travers notamment de nombreux échanges (réunions hebdomadaires entre Loria et Silva dans le cadre du suivi de la thèse de Rémi Decelle, réunions régulières avec le LaBoMaP) et s'est traduite par de nombreux résultats et publications, et la création de deux bases de données libres d'accès essentielles pour la suite des travaux. Le projet a aussi permis d'entamer une collaboration fructueuse avec les deux équipes autrichiennes impliquées et de faire émerger du côté français la thématique du couplage qualité – traçabilité à partir de méthodes biométriques basées sur le traitement d'images en bout des grumes. Même si les échanges ont été contrariés par la crise sanitaire liée au Covid, les deux doctorants financés par le projet (un côté autrichien par le FWF et un côté français par l'ANR) ont pu chacun effectuer un séjour dans l'autre pays, et soutenir à la fin du projet leurs thèses respectives.

Ce projet a été la première pierre d'un ensemble plus large dont l'objectif est de répondre à des enjeux autour de la meilleure gestion des ressources, de l'organisation de la filière en général et de l'optimisation de son fonctionnement à plusieurs niveaux. Les travaux continuent aujourd'hui avec des projets encore en cours et d'autres en construction. En 2021 ce sont tenues les Assises de la Forêt et du Bois, dont l'objectif était de faire dialoguer les différents acteurs et de se mettre d'accord sur une vision commune des enjeux et des stratégies à mettre en place pour atteindre les différents objectifs, avec une déclinaison dans les territoires. Parmi les enjeux mentionnés figurent : la pleine valorisation de la ressource disponible et la pérennité des approvisionnements, la réconciliation entre les besoins de l'aval et la ressource forestière, l'augmentation de la valorisation matière des arbres récoltés ainsi que la meilleure valorisation des coproduits de la sylviculture et du sciage. Tous ces questionnements ne peuvent être envisagés sans une caractérisation fine de la ressource adaptée aux besoins de l'aval et un dialogue pour orienter les recherches

et fournir des éléments de réponse et d'anticipation pour le futur. Le projet TreeTrace a permis d'avancer dans cette direction.

## C.7 Conclusions

Le projet TreeTrace a permis des avancées significatives dans deux domaines qui ont du sens à être traités conjointement : l'évaluation de la qualité des bois et la traçabilité. Le projet a surtout concerné les bois ronds de la forêt à la scierie mais a aussi abordé la qualité et la traçabilité des sciages. Des algorithmes ont été développés pour traiter les différentes questions mais certaines parties comme la mesure des largeurs de cernes, bien que donnant des résultats très encourageants, restent à retravailler. Ce projet a débouché sur une collaboration nouvelle avec des équipes autrichiennes et initié un transfert de compétences pour la traçabilité par analyse d'images de sections en bout de grumes (méthodes biométriques à opposer aux méthodes de traçabilité utilisant des marqueurs physiques plus facilement falsifiables). Aujourd'hui il est très important de continuer le travail initié en fournissant les algorithmes manquants dans un premier temps puis en testant ces méthodologies en vraie grandeur sur un territoire afin d'évaluer plus précisément leur potentiel. Des projets complémentaires au projet TreeTrace sont encore en cours et d'autres sont en construction. Les données collectées durant le projet sont libre d'accès et permettront à la communauté des chercheurs de poursuivre les travaux.

## C.8 Références

- [Andreu et Rinnhofer, 2001] ANDREU, J.-P. et RINNHOFFER, A. (2001). Automatic detection of pith and annual rings on industrial computed tomography log images. *In Procs. of the 9<sup>th</sup> International Conference on Scanning Technology and Process Optimization for the Wood Industry*, pages 37–47, Washington, USA.
- [Barrett, 2008] BARRETT, W. (2008). Biometrics of cut tree faces. *In SOBH, T., éditeur : Advances in Computer and Information Sciences and Engineering*, pages 562–565. Springer Netherlands.
- [Berglund *et al.*, 2013] BERGLUND, A., BROMAN, O., GRÖNLUND, A. et FREDRIKSSON, M. (2013). Improved log rotation using information from a computed tomography scanner. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90:152 – 158.
- [Bhandarkar *et al.*, 1996] BHANDARKAR, S., FAUST, T. et TANG, M. (1996). A system for detection of internal log defects by computer analysis of axial CT images. *In Proceedings of the 3<sup>rd</sup> Workshop on Applications of Computer Vision (WACV '96)*, pages 258–263.
- [Borianne *et al.*, 2011] BORIANNE, P., PERNAUDAT, R. et SUBSOL, G. (2011). Automated delineation of tree-rings in X-Ray Computed Tomography images of wood. *In 18th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, pages 437–440. IEEE.
- [Boukadida *et al.*, 2012] BOUKADIDA, H., LONGUETAUD, F., COLIN, F., FREYBURGER, C., CONSTANT, T., LEBAN, J. M. et MOTHE, F. (2012). Pithextract : A robust algorithm for pith detection in computer tomography images of wood - application to 125 logs from 17 tree species. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85:90–98.
- [Cerdea *et al.*, 2007] CERDEA, M., HITSCHFELD-KAHLER, N. et MERY, D. (2007). Robust tree-ring detection. *In MERY, D. et RUEDA, L., éditeurs : Procs. of Advances in Image and Video Technology*, volume 4872 de LNCS, pages 575–585. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Charwat-Pessler *et al.*, 2009] CHARWAT-PESSLER, J., PETUTSCHNIGG, A. et ENTACHER, K. (2009). Traceability of logs with digital image processing. *In Proceedings of COST E53 Quality Control for Wood and Wood Products Meeting*.

- [Charwat-Pessler *et al.*, 2015] CHARWAT-PESSLER, J., SCHRAML, R., ENTACHER, K. et PETUTSCHNIGG, A. (2015). Tracking logs with rgb images within the wood supply chain : a preliminary study on image acquisition. *Forest Products Journal*. in Press.
- [Chiorescu et Grönlund, 2003] CHIORESCU, S. et GRÖNLUND, A. (2003). The fingerprint approach : using data generated by a 2-axis log scanner to accomplish traceability in the sawmill's log yard. *Forest Products Journal*, 53:78–86.
- [Chiorescu et Grönlund, 2004] CHIORESCU, S. et GRÖNLUND, A. (2004). The fingerprint method : Using over-bark and under-bark log measurement data generated by three-dimensional log scanners in combination with radiofrequency identification tags to achieve traceability in the log yard at the sawmill. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 19(4):374–383.
- [Commission Européenne, 2017] COMMISSION EUROPÉENNE (2017). Strategy for forest-based industries.
- [Degen et Fladung, 2007] DEGEN, B. et FLADUNG, M. (2007). Use of dna-markers for tracing illegal logging. In *Proceedings of the international workshop "Fingerprinting methods for the identification of timber origins"*, pages 258–263.
- [Dykstra *et al.*, 2003] DYKSTRA, D. P., KURU, G., TAYLOR, R., NUSSBAUM, R., MARGRATH, W. B. et STORY, J. (2003). Technologies for wood tracking. Rapport technique, World Bank - WWF Alliance report.
- [Entacher *et al.*, 2008] ENTACHER, K., HEGENBART, S., KERSCHBAUMER, J., LENZ, C., PLANITZER, D., SEIDEL, M., UHL, A. et WEIGLMAIER, R. (2008). Pith detection on CT-cross-section images of logs : An experimental comparison. In *Proceedings of the 3<sup>rd</sup> International Symposium on Communications, Control and Signal Processing*, pages 478–483, St.Julians, MT.
- [Entacher *et al.*, 2007a] ENTACHER, K., LENZ, C., SEIDEL, M., UHL, A. et WEIGLMAIER, R. (2007a). Applicability of motion estimation algorithms for an automatic detection of spiral grain in CT cross-section images of logs. In *CAIP*, pages 36–44.
- [Entacher *et al.*, 2007b] ENTACHER, K., PLANITZER, D. et UHL, A. (2007b). Towards an automated generation of tree ring profiles from CT-images. In *Proceedings of 5<sup>th</sup> International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis (ISPA'07)*, pages 174–179.
- [Flodin *et al.*, 2007] FLODIN, J., OJA, J. et GRÖNLUND, A. (2007). Fingerprint traceability of sawn products using x-ray log scanning and sawn timber surface scanning. In *Proceedings of Quality control for wood and wood products : COST Action E 53 the first conference*.
- [Flodin *et al.*, 2008a] FLODIN, J., OJA, J. et GRÖNLUND, A. (2008a). Fingerprint traceability of logs using the outer shape and the tracheid effect. *Forest Products Journal*, 58(4):21–27.
- [Flodin *et al.*, 2008b] FLODIN, J., OJA, J. et GRÖNLUND, J. (2008b). Fingerprint traceability of sawn products using industrial measurement systems for x-ray log scanning and sawn timber surface scanning. *Forest Products Journal*, 58:11.
- [Giudiceandrea *et al.*, 2011] GIUDICEANDREA, F., URSELLA, E. et VICARIO, E. (2011). A high speed ct scanner for the sawmill industry. In *Proceedings of the 17th International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Sopron, HU.
- [Giudiceandrea *et al.*, 2012] GIUDICEANDREA, F., URSELLA, E. et VICARIO, E. (2012). From research to market : a high speed ct scanner for the sawmill industry. In *Proceedings XXXI Scuola Annuale di Bioingegneria*, Brixen, ITA.
- [Hanning *et al.*, 2003] HANNING, T., KICKINGEREDER, R. et CASASANT, D. (2003). Determining the average annual ring width on the front side of lumber. In OSTEN, W., KUJAWINSKA, M. et CREATH, K., éditeurs : *Proceedings of SPIE : Optical Measurement Systems for Industrial Inspection*, volume 5144, pages 707–716, Munich, Germany.

- [Hekli *et al.*, 2013] HEKLI, J., SIRKKA, A., JAAKKOLA, K., PUNTANEN, V. et NUMMILA, K. (2013). *Challenges and Possibilities of RFID in the Forest Industry*, chapitre 15. InTech.
- [Henke et Sloboda, 2014] HENKE, M. et SLOBODA, B. (2014). Semiautomatic tree ring segmentation using active contours and an optimised gradient operator. *Forestry Journal*, 60(3):185–190.
- [Johansson *et al.*, 2013] JOHANSSON, E., JOHANSSON, D., SKOG, J. et FREDRIKSSON, M. (2013). Automated knot detection for high speed computed tomography on *pinus sylvestris* l. and *picea abies* (l.) karst. using ellipse fitting in concentric surfaces. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96:238 – 245.
- [Kennel *et al.*, 2015] KENNEL, P., BORIANNE, P. et SUBSOL, G. (2015). An automated method for tree-ring delineation based on active contours guided by dt-cwt complex coefficients in photographic images : Application to *abies alba* wood slice images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 118:204–214.
- [Knowles *et al.*, 2017] KNOWLES, C., BOSTON, K. et BERECIBAR, E. (2017). A new method for tagging and tracking logs. *International Forestry Review*, 19(3):294–305.
- [Krähenbühl, 2014] KRÄHENBÜHL, A. (2014). *Segmentation et analyse géométrique : application aux images tomodensitométriques de bois*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- [Krähenbühl *et al.*, 2014] KRÄHENBÜHL, A., KERAUTRET, B., DEBLED-RENNESON, I., MOTHE, F. et LONGUETAUD, F. (2014). Knot segmentation in 3d ct images of wet wood. *Pattern Recognition*, 47:3852–3869.
- [Kuemmerle *et al.*, 2009] KUEMMERLE, T., CHASKOVSKYY, O., KNORN, J., RADELOFF, V. C., KRUHLOV, I., KEETON, W. S. et HOSTERT, P. (2009). Forest cover change and illegal logging in the ukrainian carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sensing of Environment*, 113:1194–1207.
- [Kumpulainen et Marjanen, 2010] KUMPULAINEN, P. et MARJANEN, K. (2010). Directional variance analysis of annual rings. *Journal of Physics Conference Series*, 238(1).
- [Kvarnström et Oja, 2008] KVARNSTRÖM, B. et OJA, J. (2008). *Applications of RFID to Improve Traceability in Continuous Processes*, chapitre Sustainable Radio Frequency Identification Solutions, page 19. InTech.
- [Lara *et al.*, 2015] LARA, W., BRAVO, F. et SIERRA, C. (2015). measuRing : an R package to measure tree-ring widths from scanned images. *Dendrochronologia*.
- [Longuetaud *et al.*, 2004] LONGUETAUD, F., LEBAN, J.-M., MOTHE, F., KERRIEN, E. et BERGER, M.-O. (2004). Automatic detection of pith on CT images of spruce logs. *Computers and Electronics in Agriculture*, 44(2):107–119.
- [Longuetaud *et al.*, 2012] LONGUETAUD, F., MOTHE, F., KERAUTRET, B., KRÄHENBÜHL, A., HORY, L., LEBAN, J. M. et DEBLED-RENNESON, I. (2012). Automatic knot detection and measurements from x-ray CT images of wood : A review and validation of an improved algorithm on softwood samples. *Computers and Electronics in Agriculture*, 85:77–89.
- [Longuetaud *et al.*, 2007] LONGUETAUD, F., MOTHE, F. et LEBAN, J.-M. (2007). Automatic detection of the heartwood/sapwood boundary within Norway spruce (*picea abies* (l.) karst.) logs by means of CT images. *Computers in Electronics and Agriculture*, 58(2):100–111.
- [Longuetaud *et al.*, 2016] LONGUETAUD, F., MOTHE, F., SANTENOISE, P., DLOUHA, J., FOURNIER, M. et DELEUZE, C. (2016). Within-stem maps of wood density and water content for characterization of species : a case study on three hardwood and two softwood species. *Annals of Forest Science*, 73(3):601–614.

- [Lowe et Cross, 2011] LOWE, A. et CROSS, H. (2011). The application of dna methods to timber tracking and origin verification. *IAWA Journal*, 32(2):251–262.
- [Marjanen *et al.*, 2008] MARJANEN, K., OJALA, P. et IHALAINEN, H. (2008). Measurement of annual ring width of log ends in forest machinery. In *Proceedings of the SPIE Conference on Image Processing : Algorithms and Systems*, volume 6812, San Jose, USA.
- [Norell, 2009] NORELL, K. (2009). An automatic method for counting annual rings in noisy sawmill images. In *Proceedings of the Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP)*, numéro 5716 de LNCS, pages 307–316. Springer Berlin / Heidelberg.
- [Norell, 2011] NORELL, K. (2011). Automatic counting of annual rings on pinus sylvestris end faces in sawmill industry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 75:231–237.
- [Norell et Borgefors, 2008] NORELL, K. et BORGEFORS, G. (2008). Estimation of pith position in untreated log ends in sawmill environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 63(2):155–167.
- [Norell *et al.*, 2007] NORELL, K., LINDBLAD, J. et SVENSSON, S. (2007). Grey weighted polar distance transform for outlining circular and approximately circular objects. In *Procs. of 14th International Conference on Image Analysis and Processing (ICIAP'07)*, pages 647–652.
- [Österberg *et al.*, 2004] ÖSTERBERG, P., IHALAINEN, H. et RITALA, R. (2004). Method for analyzing and classifying wood quality through local 2D-spectrum of digital log end images. In *Proceedings of International Conference on Advanced Optical Diagnostics in Fluids*, Tokyo, JP.
- [Pahlberg *et al.*, 2015a] PAHLBERG, T., HAGMAN, O. et THURLEY, M. (2015a). Recognition of boards using wood fingerprints based on a fusion of feature detection methods. *Computers and Electronics in Agriculture*, 111:164–173.
- [Pahlberg *et al.*, 2015b] PAHLBERG, T., JOHANSSON, E., HAGMAN, O. et THURLEY, M. (2015b). Wood fingerprint recognition using knot neighborhood k-plet descriptors. *Wood Science and Technology*, 49(1):7–20.
- [Parlement Européen, 2010] PARLEMENT EUROPÉEN (2010). Règlement (UE) n ° 995/2010 du Parlement européen et du Conseil du 20 octobre 2010 établissant les obligations des opérateurs qui mettent du bois et des produits dérivés sur le marché.
- [Parlement Européen, 2013] PARLEMENT EUROPÉEN (2013). Commission staff working document a blueprint for the eu forest-based industries.
- [Picchi *et al.*, 2022] PICCHI, G., SANDAK, J., GRIGOLATO, S., PANZACCHI, P. et Tognetti, R. (2022). Smart harvest operations and timber processing for improved forest management. In *Climate-Smart Forestry in Mountain Regions*, pages 317–359. Springer, Cham.
- [Richards *et al.*, 2003] RICHARDS, M., WELLS, A., DEL GATTO, F., CONTRERAS-HERMOSILLA, A. et POMMIER, D. (2003). Impacts of illegality and barriers to legality : a diagnostic analysis of illegal logging in Honduras and Nicaragua. *International Forestry Review*, 5(3):282–292.
- [Roussel *et al.*, 2014] ROUSSEL, J.-R., MOTHE, F., KRÄHENBÜHL, A., KERAUTRET, B., DEBLE-RENNESON, I. et LONGUETAUD, F. (2014). Automatic knot segmentation in CT images of wet softwood logs using a tangential approach. *Computers and Electronics in Agriculture*, 104:46–56.
- [Schraml *et al.*, 2014a] SCHRAML, R., CHARWAT-PESSLER, J., PETUTSCHNIGG, A. et UHL, A. (2014a). Robustness of biometric wood log traceability using digital log end images. Rapport technique 2014-08, Department of Computer Sciences, University of Salzburg, Austria, <http://www.cosy.sbg.ac.at/tr>.

- [Schraml *et al.*, 2015a] SCHRAML, R., CHARWAT-PESSLER, J., PETUTSCHNIGG, A. et UHL, A. (2015a). Towards the applicability of biometric wood log traceability using digital log end images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 119:112–122.
- [Schraml *et al.*, 2014b] SCHRAML, R., CHARWAT-PESSLER, J. et UHL, A. (2014b). Temporal and longitudinal variances in wood log cross-section image analysis. In *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'14)*, Paris, FR.
- [Schraml *et al.*, 2015b] SCHRAML, R., HOFBAUER, H., PETUTSCHNIGG, A. et UHL, A. (2015b). Tree log identification based on digital cross-section images of log ends using fingerprint and iris recognition methods. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computer Analysis of Images and Patterns (CAIP'15)*, LNCS, pages 752–765. Springer Verlag.
- [Schraml *et al.*, 2016] SCHRAML, R., HOFBAUER, H., PETUTSCHNIGG, A. et UHL, A. (2016). On rotational pre-alignment for tree log end identification using methods inspired by fingerprint and iris recognition. *Machine Vision and Applications*, 27(8):1289–1298.
- [Schraml *et al.*, 2015c] SCHRAML, R., HOFBAUER, H. et UHL, A. (2015c). Tree log identification based on digital cross-section images of log ends using fingerprint and iris recognition methods. Rapport technique 2015-01, Department of Computer Sciences, University of Salzburg, Austria, <http://www.cosy.sbg.ac.at/tr>.
- [Schraml *et al.*, 2015d] SCHRAML, R., PETUTSCHNIGG, A. et UHL, A. (2015d). Validation and reliability of the discriminative power of geometric wood log end features. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'15)*.
- [Schraml et Uhl, 2013] SCHRAML, R. et UHL, A. (2013). Pith estimation on rough log end images using local fourier spectrum analysis. In *Proceedings of the 14th Conference on Computer Graphics and Imaging (CGIM'13)*, Innsbruck, AUT.
- [Schraml et Uhl, 2014] SCHRAML, R. et UHL, A. (2014). Similarity based cross-section segmentation in rough log end images. In ILIADIS, L. *et al.*, éditeurs : *Proceedings of the 10th Artificial Intelligence Applications and Innovations Conference (AIAI'14)*, volume 436 de *Springer IFIP AICT*, pages 614–621, Rhodes, GR.
- [Sliwa *et al.*, 2003] SLIWA, T., BRUNET, P., VOISIN, Y., C., O. M., STOLZ, C. et A. DIOU, A. (2003). Détection automatique des stries de croissance des arbres par transformée en ondelettes (automatic detection of growth rings of trees by wavelet transforms). In *Proceedings of the 16<sup>th</sup> International Conference on Vision Interface*, Halifax, CAN.
- [Smith *et al.*, 2003] SMITH, J., OBIDZINSKI, K., SUBARUDI et SURAMENGGALA, I. (2003). Illegal logging, collusive corruption and fragmented governments in kalimantan, Indonesia. *International Forestry Review*, 5:293–302.
- [Stängle *et al.*, 2015] STÄNGLE, S., BRÜCHERT, F., HEIKKILA, A., USENIUS, T., USENIUS, A. et SAUTER, U. (2015). Potentially increased sawmill yield from hardwoods using x-ray computed tomography for knot detection. *Annals of Forest Science*, 72(1):57–65.
- [Sun *et al.*, 2022] SUN, Y., DU, G., LIN, Q., ZHONG, L., ZHAO, Y., QIU, J. et CAO, Y. (2022). Individual wood board tracing method using oriented fast and rotated brief method in the wood traceability system. *Wood Science and Technology*, pages 1–22.
- [Tzoulis et Andreopoulou, 2013] TZOULIS, I. et ANDREOPOULOU, Z. (2013). Emerging traceability technologies as a tool for quality wood trade. *Procedia Technology*, 8(0):606–611.
- [United Nations, 1992] UNITED NATIONS (1992). United nations conference on environment & development. In *Agenda 21*, Rio de Janeiro, BR.
- [Uusijärvi, 2010] UUSIJÄRVI, R. (2010). Forest RFID transponder and reader design - indisputable key project. Rapport technique, IST - ICT for Networked Businesses - Extended products and services. [last accessed : 22.03.2012].

- [Viguiier, 2015] VIGUIER, J. (2015). *Classement mécanique des bois de structure. Prise en compte des singularités dans la modélisation du comportement mécanique*. Thèse de doctorat, Université de Lorraine.
- [Viguiier et al., 2017] VIGUIER, J., BOURREAU, D., BOCQUET, J.-F., POT, G., BLÉRON, L. et LANVIN, J.-D. (2017). Modelling mechanical properties of spruce and douglas fir timber by means of x-ray and grain angle measurements for strength grading purpose. *European Journal of Wood and Wood Products*, page 1–15.
- [Wei et al., 2011] WEI, Q., LEBLON, B. et LA ROCQUE, A. (2011). On the use of x-ray computed tomography for determining wood properties : a review 1 1 this article is a contribution to the series the role of sensors in the new forest products industry and bioeconomy. *Canadian Journal of Forest Research*, 41(11):2120–2140.
- [Wu et Liew, 2000] WU, J. et LIEW, D. (2000). A computer vision method for detection of external log cracks and pith in log cross-section images. *In Procs. of the World Automation Congress : International Symposium on Intelligent Automation and Control (ISIAC'00)*, Hawaii, USA.

## D Liste des livrables

Quand le projet en comporte, reproduire ici le tableau des livrables fourni au début du projet. Mentionner l'ensemble des livrables, y compris les éventuels livrables abandonnés, et ceux non prévus dans la liste initiale.

Date de livraison	N°	Titre	Nature (rapport, logiciel, prototype, données, ...)	Partenaires (souligner le responsable)	Commentaires
	1				

## E Impact du projet

Ce rapport rassemble des éléments nécessaires au bilan du projet et plus globalement permettant d'apprécier l'impact du programme à différents niveaux.

### E.1 Indicateurs d'impact

#### E.1.1 Nombre de publications et de communications (à détailler en E.2)

Comptabiliser séparément les actions monoparttenaires, impliquant un seul partenaire, et les actions multiparttenaires résultant d'un travail en commun. Attention : éviter une inflation artificielle des publications, mentionner uniquement celles qui résultent directement du projet (postérieures à son démarrage, et qui citent le soutien de l'ANR et la référence du projet).

		Publications multiparttenaires	Publications monoparttenaires
International	Revue à comité de lecture	5	4
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		1
	Communications (conférence)	13	
France	Revue à comité de lecture		
	Ouvrages ou chapitres d'ouvrage		1
	Communications (conférence)	3	1
Actions de diffusion	Articles vulgarisation		
	Conférences vulgarisation	2	
	Autres	2	

Dans les publications sont comptabilisées celles qui sont actuellement soumises ou en cours de révision (le statut est précisé dans ce cas dans la liste des publications); ne

sont pas comptabilisées celles qui sont en cours de rédaction. D'autres publications sont également déjà prévues sur la base des données collectées durant le projet.

Rémi Decelle, le doctorant côté français sur le projet a obtenu trois récompenses :

- Prix *Best student paper Award* à DGMM 2021 pour la référence [14] ;
- Prix *Best Session Paper Award* pour la référence [11] ;
- Prix du meilleur poster de la session C au GDR Bois 2019 à Epinal pour la référence [33].

Dans la catégorie « Actions de diffusion », « Autres », ce sont les deux bases de données qui sont indiquées : **TreeTrace\_Douglas** et **TreeTrace\_spruce**.

### E.1.2 Autres valorisations scientifiques (à détailler en E.3)

*Ce tableau dénombre et liste les brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet, du savoir faire, des retombées diverses en précisant les partenariats éventuels. Voir en particulier celles annoncées dans l'annexe technique).*

	Nombre, années et commentaires (valorisations avérées ou probables)
<b>Brevets internationaux obtenus</b>	
<b>Brevet internationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Brevets nationaux obtenus</b>	
<b>Brevet nationaux en cours d'obtention</b>	
<b>Licences d'exploitation (obtention / cession)</b>	
<b>Créations d'entreprises ou essaimage</b>	
<b>Nouveaux projets collaboratifs</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>— 1 projet actuellement soumis Biomtrace avec l'ONF, l'INRAE, le Loria et les partenaires autrichiens sur la traçabilité des grumes de chêne</li> <li>— 1 perspective de projet TreeTrace chêne avec l'INRAE, le LaBoMaP (Arts et Métiers Cluny) et le Loria (sur l'évaluation de la qualité et la traçabilité des billons et sciages de chêne)</li> <li>— 1 projet ANR EffiQuAss en cours piloté par le LaBoMaP (Arts et Métiers Cluny) avec le Loria et l'INRAE (sur la traçabilité et le contrôle de qualité des sciages de Douglas)</li> </ul>
<b>Colloques scientifiques</b>	
<b>Autres (préciser)</b>	<p><b>2 bases de données déposées sur Data INRAE</b> (<a href="https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae">https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae</a>) :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>— <b>TreeTrace_Douglas</b> (<a href="https://doi.org/10.15454/YUNEGE">https://doi.org/10.15454/YUNEGE</a>)</li> <li>— <b>TreeTrace_spruce</b> (<a href="https://doi.org/10.57745/WKLTJI">https://doi.org/10.57745/WKLTJI</a>)</li> </ul> <p><b>Le code source des algorithmes développés pendant la thèse de doctorat de Rémi Decelle</b> (<a href="https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace">https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace</a>)</p>

## E.2 Liste des publications et communications

*Répertorier les publications résultant des travaux effectués dans le cadre du projet. On suivra les catégories du premier tableau de la section E.1 : en suivant les normes éditoriales habituelles. En ce qui concerne les conférences, on spécifiera les conférences invitées.*

## E.2.1 International

### — Revues à comité de lecture

- [1] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric F. Mothe, and Fleur Longuetaud. Ant Colony Optimization for Estimating Pith Position on Images of Tree Log Ends. *Image Processing On Line (IPOL)*, 12 :558–581, 2022.
- [2] Robin Duriot, Guillaume Pot, Stéphane Girardon, and Louis Denaud. New Perspectives for LVL Manufacturing from Wood of Heterogeneous Quality - Part 2 : Modeling and Manufacturing of Variable Stiffness Beams. *Forests*, 12(9) :1275, 2021.
- [3] Robin Duriot, Guillaume Pot, Stéphane Girardon, Benjamin Roux, Bertrand Marcon, Joffrey Viguier, and Louis Denaud. New Perspectives for LVL Manufacturing from Wood of Heterogeneous Quality - Part. 1 : Veneer Mechanical Grading Based on Online Local Wood Fiber Orientation Measurement. *Forests*, 12(9) :1264, 2021.
- [4] Fleur Longuetaud, Guillaume Pot, Frédéric Mothe, Alexis Barthelemy, Rémi Decelle, Florian Delconte, Xihe Ge, Grégoire Guillaume, Théo Mancini, Tojo Ravoajanahary, Jean-Claude Butaud, Robert Collet, Isabelle Debled-Rennesson, Bertrand Marcon, Phuc Ngo, Benjamin Roux, and Joffrey Viguier. Traceability and quality assessment of Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) logs : the TreeTrace\_Douglas database. *Annals of Forest Science*, 79 :46, 2022.
- [5] Fleur Longuetaud, Rudolf Schraml, Frédéric Mothe, Tojo Ravoajanahary, Rémi Decelle, Thiéry Constant, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Andreas Uhl, Karl Entacher, and Alexander Petutschnigg. Traceability and quality assessment of Norway spruce (*Picea abies*) logs : the TreeTrace\_spruce database. *Annals of Forest Science*, 80 :9, 2023.
- [6] Anders Olsson, Min Hu, Guillaume Pot, Joffrey Viguier, and Jan Oscarsson. Performance of timber board models for prediction of local bending stiffness and strength – with application on Douglas fir sawn timber. *Accepté dans Wood and Fiber Science*, 2022.
- [7] Tojo Ravoajanahary, Frédéric Mothe, and Fleur Longuetaud. A method for estimating tree ring density by coupling CT scanning and ring width measurements : Application to the analysis of the ring width - ring density relationship in *Picea abies* trees. *Trees – Structure and Function*, 2022.
- [8] Rudolf Schraml, Karl Entacher, Alexander Petutschnigg, Timothy Young, and Andreas Uhl. Matching score models for hyperspectral range analysis to improve wood log traceability by fingerprint methods. *Mathematics*, 8(7) :1071, 2020.
- [9] Georg Wimmer, Rudolf Schraml, Alexander Petutschnigg, and Andreas Uhl. Log cross section quality metrics : Assessing the usability of roundwood image data for roundwood tracking. *Computers and Electronics in Agriculture*, 221 :108945, 2024.

### — Ouvrages ou chapitres d’ouvrage

- [10] Rudolf Schraml. *Physical Object Identification and Authentication Applications*. PhD thesis, Department of Computer Sciences, University of Salzburg, Austria, March 2021.

### — Communications (conférence)

- [11] Rémi Decelle and Ehsaneddin Jalilian. Neural Networks for Cross-Section Segmentation in Raw Images of Log Ends. In *IPAS 2020 - Fourth IEEE International Conference on Image Processing, Applications and Systems*, Gênes, Italy, September 2020.
- [12] Rémi Decelle, Phuc Ngo, and Isabelle Debled-Rennesson. About the digital straight segment in a square grid. In *DGMM 2022 - IAPR Second International Conference on Discrete Geometry and Mathematical Morphology*, Strasbourg, France, 2022.
- [13] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frederic Mothe, and Fleur Longuetaud. A new algorithm to automatically detect the pith on rough log-end images. In *NDTE 2019 - 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium*, Freiburg, Germany, September 2019.
- [14] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, and Fleur Longuetaud. Digital Straight Segment Filter for Geometric Description. In *DGMM 2021 - IAPR International Conference on Discrete Geometry and Mathematical Morphology*, Uppsala, Sweden, May 2021.
- [15] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, and Fleur Longuetaud. Pith Estimation on Tree Log End Images. In *RRPR 2021 - Reproducible Research on Pattern Recognition*, Milan, Italy, 2021.
- [16] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, and Fleur Longuetaud. Light U-Net with a new morphological attention gate model Application to analyse wood sections. In *ICPRAM 2023 - 12th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, Lisbon, Portugal, 2023.
- [17] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric Mothe, and Fleur Longuetaud. Directional filter for tree ring detection. In *ICPRAM 2024 - 13th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*, Rome, Italy, 2024.
- [18] Robin Duriot, Rémy Frayssinhes, Francisco J. Rescalvo, Robert Collet, Stéphane Girardon, and Guillaume Pot. Bending, Shearing, and compression properties of fast growing French Douglas fir LVL. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2021)*, pages 2328–2336, 2021.
- [19] Fleur Longuetaud, Guillaume Pot, Frédéric Mothe, Alexis Barthélémy, Rémi Decelle, Florian Delconte, Xihe Ge, Grégoire Guillaume, Théo Mancini, Tojo Ravoajanahary, Jean-Claude Butaud, Robert Collet, Isabelle Debled-Rennesson, Bertrand Marcon, Phuc Ngo, Benjamin Roux, and Joffrey Viguier. The TreeTrace Douglas database : quality assessment and traceability of Douglas fir. In *CompWood 2023 – 3rd ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Wood Mechanics*, Dresden, Germany, 2023.
- [20] Guillaume Pot, Robert Collet, Anders Olsson, and Joffrey Viguier. Structural properties of Douglas fir sawn timber - Significance of distance to pith for yield in strength classes. In *Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2021)*, pages 2284–2289, 2021.
- [21] Georg Wimmer, Rudolf Schraml, Heinz Hofbauer, Alexander Petutschnigg, and Andreas Uhl. Two-stage cnn-based wood log recognition. In *ICCSA 2021 - International Conference on Computational Science and Its Applications*, pages 115–125. Springer, 2021.
- [22] Georg Wimmer, Rudolf Schraml, Heinz Hofbauer, Alexander Petutschnigg, and Andreas Uhl. An analysis of the use of hyperspectral data for round-

wood tracking. In *ICCSA 2022 - International Conference on Computational Science and Its Applications*, pages 294–307, Malaga, Spain, 2022. Springer.

- [23] Georg Wimmer, Rudolf Schraml, Lukas Lamming, Alexander Petutschnigg, and Andreas Uhl. Cross-modality wood log tracing. In *ISM 2021 - International Symposium on Multimedia*, pages 191–195. IEEE, 2021.

## E.2.2 France

### — Ouvrages ou chapitres d’ouvrage

- [24] Mohamed Larbi Aloui. *Caractérisation de la qualité du bois par analyse d’images*. Master’s thesis, M1 AETPF, spécialité BFD, Université de Lorraine, Nancy, France, 2019.
- [25] Alexis Barthélémy. *Reconstruction de billon*. Master’s thesis, M2 Informatique (Apprentissage, Vision, Robotique) - Université de Lorraine, 2020.
- [26] Rémi Decelle. *Reconstruction d’objets discrets à partir d’images TrueDepth embarquées sur téléphone mobile et applications afin de faire des mesures*. Master’s thesis, M2 Informatique (Apprentissage, Vision, Robotique) - Université de Lorraine, 2018.
- [27] Rémi Decelle. *Éléments pour l’analyse et le traitement d’images : Application à l’estimation de la qualité du bois*. PhD thesis, Thèse de Doctorat de l’Université de Lorraine, Mention Informatique, July 2022.
- [28] Florian Delconte. *Estimation de la qualité de grumes de bois*. Master’s thesis, M2 Informatique (Apprentissage, Vision, Robotique) - Université de Lorraine, 2019.
- [29] Xihe Ge. *Etude de la qualité (au sens des propriétés mécaniques) de sciages en relation avec des informations « arbre »*. Master’s thesis, M1 Ecole Nationale Supérieure Paris-Saclay, 2020.
- [30] Grégoire Guillaume. *Contribution à l’évaluation des propriétés mécaniques longitudinales, transversales et au classement du Douglas français*. Master’s thesis, M2 Génie Mécanique et Matériaux, Université Bretagne Sud, 2021.
- [31] Théo Mancini. *Effets de la traçabilité des arbres pour le classement mécanique des bois dans la scierie du futur*. Master’s thesis, stage de fin d’études d’ingénieur – Arts et Métiers Sciences et Technologies, 2021.
- [32] Tojo Ravoajanahary. *Estimation de la densité du bois d’épicéa à l’échelle de groupes de cernes à partir d’analyses d’images de sections de grumes*. Master’s thesis, Rapport de stage de M2, Master Agrosociétés, Environnement, Territoires, Paysage, Forêt) - Université de Lorraine, 2021.

### — Communications (conférence)

- [33] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Mothe Frédéric, and Fleur Longuetaud. Détection automatique de la moelle sur des images d’extrémités de grumes de Douglas brutes de sciage. In *GDR 2019 - 8èmes Journées du Groupement de Recherche 3544 Sciences du Bois*, November 2019. Poster.
- [34] Rémi Decelle, Phuc Ngo, Isabelle Debled-Rennesson, Frédéric F. Mothe, and Fleur Longuetaud. Description géométrique à l’aide de segments discrets. In *Journée du Groupe de Travail de Géométrie Discrète et Morphologie Mathématique (GT GDMM)*, Nancy, France, 2021.
- [35] Leyne Demoulin, Guillaume Pot, Stéphane Girardon, Fabrice Cottin, Roger Letourneau, and Louis Denaud. Caractérisation et modélisation de placages pour l’optimisation et l’homogénéisation des propriétés mécaniques de

LVL/contreplaqué. In *Actes des 10e journées scientifiques du GDR 3544 Sciences du Bois (Vol. 10)*, Montpellier, France, 2021.

- [36] Fleur Longuetaud et al. TreeTrace - Biometric fingerprints of trees : log tracing from forest to sawmill and early estimation of wood quality . In *Journée d'animation Silva, 4 décembre 2020, INRAE Champenoux*, 2020.

### E.2.3 Actions de diffusion

- [37] Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Thiéry Constant, and Julien Ruelle. Caractérisation de la qualité des bois et traçabilité. In *Visite des délégués PEFC France-Allemagne*, INRAE, Grand-Est – Nancy, 2022.
- [38] Fleur Longuetaud, Frédéric Mothe, Rémi Decelle, Tojo Ravoajanahary, Isabelle Debled-Rennesson, Phuc Ngo, Guillaume Pot, Joffrey Viguié, Robert Collet, Rudolf Schraml, Andreas Uhl, and Alexander Petutschnigg. Les empreintes biométriques des arbres : traçage de la forêt à la scierie et évaluation précoce de la qualité. Colloque ANR « Arbre, forêt, bois et sociétés », 2021.

## E.3 Liste des éléments de valorisation

*La liste des éléments de valorisation inventorie les retombées (autres que les publications) décomptées dans le deuxième tableau de la section E.1. On détaillera notamment :*

- brevets nationaux et internationaux, licences, et autres éléments de propriété intellectuelle consécutifs au projet.
- logiciels et tout autre prototype
- actions de normalisation
- lancement de produit ou service, nouveau projet, contrat,...
- le développement d'un nouveau partenariat,
- la création d'une plate-forme à la disposition d'une communauté
- création d'entreprise, essaimage, levées de fonds
- autres (ouverture internationale,...)

*Elle en précise les partenariats éventuels. Dans le cas où des livrables ont été spécifiés dans l'annexe technique, on présentera ici un bilan de leur fourniture.*

Dans le cadre du projet **TreeTrace**, deux bases de données ont été créées, pour le Douglas et l'épicéa, respectivement. Elles ont été alimentées par les partenaires du projet et font l'objet chacune d'un dépôt sur le serveur Data INRAE (<https://entrepot.recherche.data.gouv.fr/dataverse/inrae>) :

- **TreeTrace\_Douglas** (<https://doi.org/10.15454/YUNEGE>)
- **TreeTrace\_spruce** (<https://doi.org/10.57745/WKLTJI>)

. Ces bases contiennent essentiellement des images mais des mesures réalisées sur des échantillons de bois (rondelles, barreaux, planches) sont également disponibles. Le contenu des ces bases de données est décrit dans deux datapapers, pour le Douglas [4] et l'épicéa [5], respectivement.

Le code source des algorithmes développés pendant la thèse de doctorat de Rémi Decelle est disponible sur le dépôt suivant : <https://gitlab.com/Ryukhaan/treetrace>.

## E.4 Bilan et suivi des personnels recrutés en CDD (hors stagiaires)

Ce tableau dresse le bilan du projet en termes de recrutement de personnels non permanents sur CDD ou assimilé. Renseigner une ligne par personne embauchée sur le projet quand l'embauche a été financée partiellement ou en totalité par l'aide de l'ANR et quand la contribution au projet a été d'une durée au moins égale à 3 mois, tous contrats confondus, l'aide de l'ANR pouvant ne représenter qu'une partie de la rémunération de la personne sur la durée de sa participation au projet. Les stagiaires bénéficiant d'une convention de stage avec un établissement d'enseignement ne doivent pas être mentionnés. Les données recueillies pourront faire l'objet d'une demande de mise à jour par l'ANR jusqu'à 5 ans après la fin du projet.

Identification			Avant le recrutement sur le projet				Recrutement sur le projet				Après le projet				
Nom et prénom	Sexe H/F	Adresse email (1)	Date des dernières nouvelles	Dernier diplôme obtenu au moment du recrutement	Lieu d'études (France, UE, hors UE)	Expérience prof. Antérieure, y compris post-docs (ans)	Partenaire ayant embauché la personne	Poste dans le projet (2)	Durée missions (mois) (3)	Date de fin de mission sur le projet	Devenir professionnel (4)	Type d'employeur (5)	Type d'emploi (6)	Lien au projet ANR (7)	Valorisation expérience (8)
Decelle Rémi	H	remi.decelle@inria.fr	05/07/2022	M2 IPAC	France		INRAE	M2 puis Doctorant	36 + 9 (hors M2)	05/07/2022	Post-doc au LIRIS Université Lumière Lyon 2	Enseignement et recherche publique	Enseignant - chercheur	oui	oui
Ravoajanahary Tojo	H	tojo.ravoajanahary@inrae	07/07/2022	M2 BFD	Madagascar France		INRAE	M2 puis Ingénieur d'études	11 (hors M2)	31/12/2021	CDD (en attente CIFRE)	PME (scierie)	Ingénieur	oui	oui

### Aide pour le remplissage

1. Adresse email : indiquer une adresse email la plus pérenne possible
2. Poste dans le projet : post-doc, doctorant, ingénieur ou niveau ingénieur, technicien, vacataire, autre (préciser)
3. Durée missions : indiquer en mois la durée totale des missions (y compris celles non financées par l'ANR) effectuées sur le projet
4. Devenir professionnel : CDI, CDD, chef d'entreprise, encore sur le projet, post-doc France, post-doc étranger, étudiant, recherche d'emploi, sans nouvelles
5. Type d'employeur : enseignement et recherche publique, EPIC de recherche, grande entreprise, PME/TPE, création d'entreprise, autre public, autre privé, libéral, autre (préciser)
6. Type d'emploi : ingénieur, chercheur, enseignant-chercheur, cadre, technicien, autre (préciser)
7. Lien au projet ANR : préciser si l'employeur est ou non un partenaire du projet
8. Valorisation expérience : préciser si le poste occupé valorise l'expérience acquise pendant le projet.

Les informations personnelles recueillies feront l'objet d'un traitement de données informatisées pour les seuls besoins de l'étude anonymisée sur le devenir professionnel des personnes recrutées sur les projets ANR. Elles ne feront l'objet d'aucune cession et seront conservées par l'ANR pendant une durée maximale de 5 ans après la fin du projet concerné. Conformément à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée, relative à l'Informatique, aux Fichiers et aux Libertés, les personnes concernées disposent d'un droit d'accès, de rectification et de suppression des données personnelles les concernant. Les personnes concernées seront informées directement de ce droit lorsque leurs coordonnées sont renseignées. Elles peuvent exercer ce droit en s'adressant l'ANR (<http://www.agence-nationale-recherche.fr/Contact>).