

**Projet ExtraFor\_Est Contrat MAAF n° DRAAF-GE-SERFOB-2017-001**

**Période : 20 novembre 2017 – 19 novembre 2020 prolongé à fin juin 2021**



**Appel à Projets national lancé le 13 décembre 2016  
« Innovation et Investissements en forêt (FSFM) »**

**Rapport final**

**30 juin 2021**

## Appel à projet MAA « Innovation et investissement pour l'amont forestier »

### - FICHE SIGNALÉTIQUE

CONVENTION n°DRAAF-GE-SERFOB-2017-001 (n° EJ CHORUS n° 2102257678)

#### 1. IDENTIFICATION

**Titre** : Extractibles des Forêts de l'Est

**Organisme** : porteur du projet : INRAE Grand Est, Nancy

Partenaires : LERMAB responsable : Pr Philippe Gérardin

IGN responsable : Antoine Colin

**Montant** : 495 000 euros maxi (finalement : 462 036 euros)

**Date de notification** : 30 juin 2017

**Durée** : prolongée jusqu'au 31 juin 2021 par avenant émis le 21 octobre 2020

**Nom du Responsable** : Francis Colin

**Téléphone** : 06 15 86 72 48

**Mail** : francis.colin@inrae.fr

**Comité de pilotage** :

Louis Tiers et/ou Jacky Vandeputte (Pôle IAR)

Jean-Baptiste Pichancourt Silva

Fleur Longuetaud Silva

Antoine Colin IGN

Olivier Parisot FEDER Lorraine

Jean-Luc Matte DRAAF Grand-Est

Christine Deleuze ONF RDI Pôle Dôle

Philippe Gérardin LERMAB

Laurence Le Maout gestion Silva

Jérémy Hagenmuller Ingénieur Projet Partenariat INRA Grand Est resp. contrats autres que région ;

Céline Ranger Ingénieure Projet Partenariat INRA Grand Est resp. contrats région, ADEME ;

Eric Masson Ingénieur CRITTBois et/ou directeur CRITTBois

Sylvain Cauria BETA

Emilie Reynaud Fibois Grand Est

Corinne Martin Silva Communication

#### 2. OBJECTIFS VISES

##### **Objectifs principaux atteints :**

« Le projet avait le quintuple objectif de

1) mieux connaître les quantités et l'hétérogénéité des extractibles présents dans les biomasses forestière et industrielle de l'Est, aux échelles arbre et ressource, ainsi que les marchés des molécules identifiées, » **OBJECTIF PRATIQUEMENT ATTEINT (voir plus loin)**

2) « construire un outil d'aide à la décision, permettant d'évaluer la faisabilité de l'émergence d'une filière forêt-chimie, qui dépend de nombreux facteurs socio-technico-économiques en interaction, » **OBJECTIF ATTEINT**

3) identifier le niveau de connaissance sur les extractibles des acteurs de la filière forêt bois et leur réceptivité face à la perspective de cette filière forêt-chimie, **OBJECTIF ATTEINT**

4) communiquer de manière adaptée à l'ensemble des acteurs de la filière forêt-bois les connaissances sur les extractibles, leur utilisation et leur valorisation industrielle

## OBJECTIF ATTEINT

### Objectif non atteint :

5) vulgariser l'outil d'aide à la décision pour répondre aux questions des acteurs et les sensibiliser.

**OBJECTIF NON TOTALEMENT ATTEINT CAR LA MISE AU POINT DE L'OUTIL A ETE TRES PROGRESSIVE ET SON UTILISATION LIMITEE A L'IGN**

### Objectifs particuliers non atteints :

. quantification des volumes des nœuds des feuillus, de leur infra-densité car difficulté de trouver leur limite d'avec le bois hors nœud ; méthodes tomographiques tirant profit d'éventuelles différences de densité entre nœud et bois hors nœud non opérantes

. quantification des infra-densités des écorces des feuillus car difficulté de séchage de rondelles avec écorce de grandes dimensions par manque d'étuve de grande dimension et dégradation rapide par champignons et autres microorganismes

. synthèse des connaissances sur les biomolécules forestières des essences sélectionnées, à partir d'une revue bibliographique mise à jour et des résultats qui seront progressivement obtenus dans le projet (Action T1E)

Cette synthèse globale n'est pas réalisée. Elle est repoussée d'ici à décembre 2021, dans le cadre du contrat ExtraFor\_Est FEDER. Elle complètera l'étude de marché, déjà réalisée dans le cadre de ce contrat FEDER, grâce à la prestation « Etude de marchés » confiée au pôle de compétitivité IAR (Louis Tiers). La synthèse tirera profit des connaissances non encore obtenues dans le présent contrat ExtraFor\_Est MAAF sur les feuillus et de l'étude bibliographique menée par Béatrice Richard dans le cadre de cette action T1E

### D'autres objectifs que ceux prévus ont-ils été atteints ? OUI

. Mise au point de la méthode de caractérisation des composés chimiques par NIRS, particulièrement adaptée à la caractérisation chimique des connexes de l'industrie du bois

. Création de 3 bases de données

. Participation à deux projets d'unités semi-industrielles d'extraction

. Remobilisation et amélioration d'un outil de simulation « recherche » de l'effet des sylvicultures sur la nodosité et l'écorce et la production de composés chimiques extractibles

. mise au point d'un outil IGN de géo-référencement des filières forêts-Bois

. nombreux stages de M1 et M2 organisés

### Est-ce que de nouvelles pistes d'étude ont été mise en évidence ? OUI

. L'analyse et la modélisation des taux, volumes totaux et distribution verticale des volumes, infra-densité et composition chimique des différents compartiments des arbres d'autres essences importantes (Pins, Mélèze, peuplier...)

. L'étude des propriétés chimiques et biologiques des ingrédients (collaborations en cours d'établissement)

. L'organisation de la logistique des filières forêts bois (à mettre en relation avec les dessertes forestières, le transport des biomasses bois...)

. La valorisation des connexes industriels particulièrement l'écorce des résineux et feuillus et les nœuds des résineux

. L'incorporation des statistiques institutionnelles dans la chaîne « données IFN – AF Filières – CAT » afin de représenter au mieux les filières forêt-bois régionales (initiative DRAAF-FIBOIS-IGN-INRIA-INRAE à pérenniser)

. Les co-construction/co-design d'outils d'organisation des filières forêt-bois en territoires

## 3. RAPPORT FINAL

Ses références bibliographiques : ????

Est-il confidentiel : **NON**

Diffusion prévue : nombre d'exemplaires et destinataires ????

#### 4. VALORISATION DES RESULTATS

##### Publications

##### **2018**

. Pichancourt JB, Manso R, Ningre F, Fortin M (2018) A carbon accounting tool for complex and uncertain greenhouse gas emission life cycles *Environmental Modelling and Software*, 107, pp 158-174

##### **2020**

. Billard A, Bauer R, Mothe F, Jonard M, Colin F, Longuetaud F (2020). Improving aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. *Annals of Forest Science*, 77(4)

. Bonin F, Arnould M, Duval P, Robic A, Tapie-Petit ML, Colin F, ... Wernsdorfer H... (2020). Perspectives d'émergence d'une filière forêt-chimie des extractibles Points de vue des acteurs du Nord-Est de la France et du Sud-Ouest de l'Allemagne *Revue Forestière française*, 72 (1), pp 71-84

. Brennan M, Fritsch C, Cosgun S, Dumarçay S, Colin F, Gérardin P (2020) Yield and compositions of bark phenolic extractives from three commercially significant softwoods show intra- and inter-specific variation. *Plant Physiology and Biochemistry* 155, pp. 346-356

. Brennan M, Fritsch C, Cosgun S, Dumarçay S, Colin F, Gérardin P (2020) Quantitative and qualitative composition of bark polyphenols changes longitudinally with bark maturity in *Abies alba* Mill. *Annals of Forest Science* 77 (1): 9

. Brennan M, Hentges D, Cosgun S, Dumarçay S, Colin F, Gérardin P (2020) Intraspecific variability of quantity and chemical composition of ethanolic knotwood extracts along the stems of three industrially important softwood species: *Abies alba*, *Picea abies* and *Pseudotsuga menziesii*. *Holzforschung* DOI :10.1515/hf-2020-0108

##### **2021 (acceptés non publiés)**

. Billard A, Bauer R, Mothe F, Colin F, Longuetaud F, 2021. Modeling the vertical variations in wood basic density for three softwood species. *European J For. Res.*

. Bauer R, Billard A, Longuetaud F, Mothe F, Houballah M, Bouvet A, Cuny H, Colin A, Colin F, Modelling bark volume for six main tree species in France: Assessment of models and application at regional scale. *Annals of Forest Science (accepté)*

. Pichancourt JB, Bauer R, Billard A, Brennan M, Caurila S, Colin A, Contini A, Cosgun S, Cuny H, Dumarçay S, Fortin M, Gérardin P, Hentges D, Longuetaud F, Richard B, Wernsdorfer H, Colin F, 2021. Method, application example and remaining challenges for the design of decision tools that can support forestry actors when entering the bio-molecular resource economy *Annals of Forest Science (accepté)*

##### **2021-2022 (Projets d'articles pratiquement finis d'être rédigés)**

. Mojtaba Houballah, Jean-Luc Matte, Jean-Yves Courtonne, Henri Cuny, Mathieu Fortin, Antoine Colin, Claire Junker, Jean Weber, ..., Francis Colin, 2021. Representation of forestry sector through merging the AF Filières project and a carbon accounting tool: Application to the Grand-Est region, France *Journal of cleaner production*

. Bauer Rodolphe, Billard Antoine, Longuetaud Fleur, Mothe Frédéric, Houballah Mojtaba, Bouvet Alain, Cuny Henri, Colin Antoine, Colin Francis, 2021. Vertical distribution of bark biomass. Assessment and application of bark surface model for six main tree species in France. *Forestry*

. Clément Fritsch, Stéphane Dumarçay, Francis Colin, Philippe Gérardin, 2021. Study of intraspecific variability chemical composition of barks of *Picea abies*, *Abies alba* and *Pseudotsuga menziesii* in north-eastern France in view of potential valorization. *Journal non encore sélectionné*

## **Prestations orales**

### **2018**

Colin F, Gérardin P., 2018. Bio-composés polyphénoliques, terpéniques et dérivés, extraits des écorces de chêne, hêtre, sapin, épicéa ou douglas : quels acteurs de la chimie du végétal s'y intéressent ? Journée Challenges AllEnvi. Le bois, une ressource pour la chimie. 11 décembre

Colin F (2018) Extractibles des Forêts de l'Est : un projet pour sensibiliser la filière forêt-bois à la chimie. *Journée CAQGIS INRA Clermont-Ferrand 28 mars*

### **2019**

#### **Internationales**

. Bauer R, Billard A, Longuetaud F, Mothe F, Colin F (2019) Modelling the Volume of Bark from Thickness Measurement Obtained by Swedish Gauge- Application to the Quantification of Extractives.

*21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, Sep 2019, Freiburg, Germany*

. Colin F (2019) For supporting the forest-wood sector, research in ExtraFor\_Est and other initiatives must now focus on the implementation of an industrial strategy International Conference WoodChem2019 Nancy 20-22 novembre (présentation)

. Colin F (2019). Gemm\_Est. A project for assessing the feasibility of tapping resinous species from Eastern France and extending the resin products offering. Meeting "Resin extraction as a building block of sustainable forest multifunctionality" European Project Incredible Pierroton 5-6 mars (présentation)

. Billard A, Bauer R, Mothe F, Colin F, Longuetaud F (2019) Wood Density Variations between Tree Components Should Be Considered to Correctly Estimate Tree Biomass Available for Different Uses. *21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, September, Freiburg, Germany.*

#### **Nationales**

. Bauer R, Billard A, Longuetaud F, Mothe F, Bouvet A...Colin F (2019) Étude et modélisation des volumes des écorces. 8èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois, Novembre, Epinal, France.

. Bauer R (2019). Modelling the volume of bark from thickness measurements obtained by Swedish bark gauge and from X-ray CT images. Application to the quantification of extractives. Journées CAQGIS IRSTEA Aix-en-Provence 26 mars (présentation)

. Billard A, Colin F, Mothe F, Bauer R, Longuetaud F (2019) Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre : cas du sapin pectiné. 8èmes journées du GDR 3544 Sciences du bois, Novembre, Epinal, France.

. Brennan M, Fritsch M, Cosgun S, Dumarcay S, Colin F, Gérardin P (2019) Quantitative and qualitative composition of softwood bark polyphenols within and among trees. Journée CAQSI IRSTEA Aix-en-Provence 26 mars (présentation)

. Colin F (2019) Extractibles des Forêts de l'Est. Journée CAQSI IRSTEA Aix-en-Provence 26 mars (présentation)

. Colin F (2019) Une double contribution pour la chimie du bois et la bioéconomie régionale : les projets régionaux ExtraFor\_Est et Gemm\_Est. 8<sup>e</sup> journée du GDR Sciences du bois. 18-20 novembre (poster)

2020

Nationales

. Colin F (2020) Le programme de recherche sur les extractibles des forêts de l'Est : une valorisation des ressources forestières. Journée annuelle du Labex Arbre. 10 février (présentation)

### **Communication, diffusion :**

Très nombreuses interventions,...(voir action de communication T2A)

## **5. RESUME**

Ce projet a permis d'améliorer les connaissances sur la ressource, dans les forêts des régions Grand Est et Bourgogne Franche-Comté, en volume, infra-densités et biomasses des différents compartiments de l'arbre (écorce, bois sans nœuds, nœuds) et en taux et quantités de composés chimiques extractibles par des solvants verts. Il a concerné les espèces chênes sessile et pédonculé, hêtre, sapin, épicéa et douglas.

Ces connaissances sont déjà diffusées dans 8 articles scientifiques (publiés ou en cours) et plusieurs autres sont en cours de rédaction. Trois thèses de l'Université de Lorraine seront rédigées d'ici fin 2021, et les connaissances ont été régulièrement communiquées lors de plusieurs réunions/conférences internes aux organismes ou bien nationales voire internationales, et dans des articles davantage de vulgarisation. Trois bases de données ont été construites et seront régulièrement alimentées. Un outil de simulation de l'effet de la sylviculture sur la formation des nœuds, de l'écorce et les quantités d'extractibles a été réactivé (SimCoP-Qualité).

Une belle valorisation des résultats obtenus en chimie et en dendrométrie a consisté en l'assemblage des connaissances acquises, avec le logiciel CAT (*carbon accounting tool*) remobilisé et amélioré, et les données de l'Inventaire Forestier National, permettant une intégration des connaissances depuis l'échelle compartiment de l'arbre jusqu'à l'échelle ressource régionale et territoriale. En parallèle une meilleure estimation des biomasses présentes en forêt est maintenant possible. Tout ceci permet de mieux représenter des filières forêt-bois régionales voire infra-régionales, tirer maximum profit des statistiques institutionnelles disponibles (notamment réconciliées via AF Filières) et simuler l'effet de différents scénarios de modification des filières dans un souci d'apporter toujours plus de valeur ajoutée à la biomasse forestière.

Ces connaissances ont été largement diffusées grâce au site internet <https://www6.inrae.fr/extraforest>, des newsletters, les comptes LinkedIn et Twitter nommés @ExtraGemm\_Est, et lors de 8 réunions publiques bien suivies. L'approche proposée a été définie par le bureau de communication OhWood et a tenu compte des résultats d'enquêtes menées 3 années de suite par des étudiants de Master 2 du parcours AETPF/BFD, auprès de multiples acteurs. Un comité consultatif d'acteurs a en outre aidé à améliorer la manière de diffuser les informations.

Bien qu'une filière forêt-chimie n'aie pas encore vu le jour dans les 2 régions concernées, beaucoup d'acteurs sont maintenant sensibilisés et deux initiatives ont vu le jour qui devraient rapidement déboucher sur des unités pilote d'extraction régionales et de production de volumes importants d'ingrédients bio-sourcés : Wood Chem Valley près d'Epinal et Kemyos près du Parc National des

Forêts. Ces initiatives mobiliseraient toutes les connaissances acquises sur la ressource forestière ; elles nécessiteraient par ailleurs d'innover dans l'organisation territoriale de la logistique des différentes (sous)-filiales. Elles viendraient compléter des initiatives plus modestes tripartites impliquant organismes de recherche, producteurs de bois et/ou de connexes et industries chimiques.

La poursuite du travail devrait concerner une extension/généralisation des résultats dans d'autres situations écologiques et pour d'autres espèces importantes (Pins, Mélèze, Peupliers...), selon des échantillonnages plus extensifs et représentatifs de la ressource nationale. La spécification des propriétés chimiques et biologiques des ingrédients de chaque combinaison compartiment\*espèce, une meilleure caractérisation des marchés, déjà obtenue dans un contrat complémentaire (ExtraFor\_Est FEDER) et l'obtention espérée de volumes d'ingrédients plus importants, correspondant à une montée en échelle de maturation industrielle, devraient pouvoir permettre que de nouveaux bio-produits soient mis sur les marchés. Toutes ces propositions s'intègrent parfaitement dans une contribution affirmée à la transition bioéconomique des territoires.

## **6. MOTS CLES**

Composés chimiques extractibles, flux de biomasse forestière, connexes, polyphénols, terpènes, tanins, lignanes, filiales forêt-bois, chimie du bois, filière forêt-chimie, infra-densité, volumes des compartiments de l'arbre, bio-économie forestière territoriale

**Rapport final du projet ExtraFor\_Est financement DRAAF  
AAP : Innovation, investissement pour l'amont forestier**

**Sommaire**

Etat de l'art et objectif du projet

Présentation générale du projet

Ajustement du projet aux orientations nationales de la filière forêt-bois et de l'industrie chimique

Financement

Organisation et déroulement

Réalisation des actions et résultats

    Tâche T0

    Tâche T1

        Actions T1B

            T1A

            T1C

            T1D

            T1E

    Tâche T2

        Actions T2A

            T2B

            T2C

Perspectives

Conclusions

## Etat de l'art et objectifs du projet

Le bois contient des quantités importantes de composés chimiques à savoir cellulose, hémicellulose, lignines, composés extractibles et cendre dans des proportions de 50, 25, 25, 6 et 4% respectivement chez les essences tempérées, auxquels il convient d'ajouter les oléorésines récupérables par gemmage (environ 3,5 kg/arbre/an récoltable sur le pin maritime). Les écorces possèdent plus de lignine et d'extractibles et moins de polysaccharides que le bois (Nhguele, 2008) ; les nœuds sont d'une richesse en extractibles encore supérieure (Kebbi-Benkeder *et al.*, 2016). Les composés chimiques extractibles, objet de ce projet, peuvent être extraits par différents solvants organiques et l'eau ; ils appartiennent essentiellement aux familles terpéniques (mono-, di-, tri-... terpènes) et phénoliques (lignanes, flavonoïdes, stilbènes, tanins...). Leurs propriétés anti-oxydantes, anti-fongiques, bactéricides...les font rechercher pour des usages en pharmaceutique, cosmétique, nutraceutique. Les tanins sont utilisés traditionnellement pour la tannerie, en œnologie et en cosmétique. Le marché des cosmétiques est de taille relativement importante avec un fort taux de pénétration des produits bio-sourcés comparativement à d'autres marchés plus modestes (« de niche ») avec des taux de pénétration variables (tensioactifs, encres, détergents, composites, lubrifiants, isolants, bétons, peintures, résines, plastiques, colles et solvants) (ADEME Alcimed 2015). Un secteur tout à fait prometteur est celui des mousses isolantes, résines, adhésifs dérivés des tannins. Leur confection expérimentale a connu des succès importants (Tondi *et al.*, 2008 ; Pizzi, 2016) à partir de tanins exotiques de Quebracho ou de Mimosa voire de Pin radiata (Tondi et Pizzi, 2009). Il s'avère que les écorces de résineux régionaux (Epicéa, Sapin, Pin, Douglas) sont tout à fait aptes à produire ces dérivés (Garcia *et al.*, 2014).

Les pouvoirs publics soutiennent fortement le développement de la chimie du végétal, 7<sup>e</sup> principe de la chimie verte (Anastas & Warner, 1998), afin de lutter contre le réchauffement climatique, réduire la dépendance vis-à-vis des matières premières fossiles, anticiper leur épuisement, conformer l'industrie chimique aux nouvelles dispositions environnementales européennes (REACH) et contrecarrer la forte concurrence internationale. A l'échéance 2030, misant sur les riches et abondantes biomasses forestière et agricole métropolitaines, les pouvoirs publics espèrent que les molécules chimiques de base seront produites pour 25-30% à partir des ressources renouvelables. D'après ADEME IGN FCBA (2016), la ressource forestière métropolitaine disposait d'un volume récoltable de 48,3 millions de m<sup>3</sup>/ an dont 27,9 pour les feuillus et 20,3 pour les résineux, sur la période 2011-2015. Par rapport à la récolte actuelle, la disponibilité supplémentaire s'établirait en 2031-2035 à +7,6 Mm<sup>3</sup> /an avec un scénario de sylviculture constante et +19,8 Mm<sup>3</sup> /an avec un scénario dynamisé (pour plus de précisions consulter le document cité). Le plus fort potentiel de développement de la récolte se trouve dans les essences feuillues et en forêt privée.

*Le problème est que la qualité chimique de la ressource forestière est très mal connue.* Toutes les études portant sur les extractibles du bois ont négligé la composante hétérogénéité de la ressource ; les études chimiques ont été rarement réalisées sur plusieurs compartiments à la fois (branches, nœuds, écorce, duramen, aubier) avec les mêmes méthodes d'extraction, empêchant les comparaisons ; chaque compartiment a été mesuré très souvent sans renseigner la hauteur dans l'arbre, l'origine géographique. Ceci est encore plus vrai pour les connexes des industries de première transformation du bois (écorces, nœuds, chutes de sciage...). Le fait de ne pas tenir compte de l'hétérogénéité des approvisionnements est réputé ralentir le développement industriel : *"the intrinsic properties of tannins, the resource variability, polymerization degree and chemical hyperbranched structures have hampered the development of tannin derivatives"* (Arbenz and Avérous, 2015).

*Or de nombreux indices suggèrent que l'hétérogénéité est forte.* Par exemple les taux d'extractibles des nœuds du sapin peuvent varier en moyenne de 1 à 6 entre le sommet de l'arbre et la base du houppier vert (Kebbi-Benkeder *et al.* 2016, 2017). Les nœuds d'épicéas échantillonnés dans le nord de la Finlande sont plus riches que ceux des individus échantillonnés dans le Sud (Piispanen *et al.* 2008) ; cette augmentation avec la latitude, attribuée aux conditions de sol et de climat difficiles dans le nord, pourrait se retrouver, chez nous, en fonction de l'altitude. Pour l'écorce une variabilité est fortement suspectée (Feng *et al.*, 2013). En particulier, plus on descend vers le bas du tronc, plus l'écorce est formée de tissus âgés et morts. Dans le bois du tronc, plus on descend plus le duramen est important

et notamment la zone de duramen mature. L'existence de ces hétérogénéités intra-compartiments, qu'il convient de tester pour chaque espèce en fonction de l'hétérogénéité inter-arbre, influence fortement la variabilité de la qualité chimique des approvisionnements des industries du bois et donc de leurs connexes. Si l'hétérogénéité est forte, se pose la question de savoir où (en termes de partie dans l'arbre, situation géo-pédo-climatique de l'arbre) se trouvent les fractions de la biomasse forestière les plus riches et/ou les plus accessibles d'un point de vue technico-économique. Une autre question se pose, qui concerne les feuillus et/ou arbres gros et/ou de mauvaise qualité : ne contiendraient-ils pas des quantités intéressantes d'extractibles, auquel cas la chimie serait une manière de les valoriser ?

Connaître l'hétérogénéité de la ressource nécessite de considérer non pas seulement des taux d'extractibles mais également des quantités. Pour les calculer, il faut disposer des volumes et des densités selon :  $quantité\ d'extractibles = \text{taux d'extractibles} * \text{volume} * \text{densité}$ . Concernant les volumes, ont été particulièrement étudiés ceux des troncs et des écorces à l'échelle nationale pour différentes espèces et selon différents découpes (cf Projet ANR -08-BIOE-003 Emerge « Elaboration de Modèles pour une estimation Robuste et Générique du bois Energie »). Par contre, le volume des nœuds et du duramen est totalement méconnu alors qu'ils présentent des taux d'extractibles parmi les plus forts de l'arbre. Pour analyser ces volumes, il est possible de mobiliser les outils (tomographie à rayons X ; Colin et al., 2010) et les relations statistiques entre diamètre, angle d'insertion des branches et forme et volume de leur nœud. Concernant les densités du bois et de l'écorce, ce sont généralement des valeurs moyennes à 1,30 m dans le bois du tronc sans nœuds, qui sont disponibles, collectées parfois loin de leur zone d'utilisation. Trois bases de données sont disponibles : TROPIX (Paradis et al., 2015 ; [Tropix 7 - Cirad](#)), rassemblée par le CIRAD, qui fournit la masse volumique à 12% d'humidité ; CARBOFOR (Lousteau, 2004), du nom du projet éponyme portant sur la séquestration du carbone forestier en France ; la *Global Wood Density Database* (GWDD) (Chave et al., 2005 ; Zanne et al., 2009 ; <https://opendata.eol.org/dataset/global-wood-density-database>) rassemblant des données internationales. Le tableau suivant rassemble les données disponibles.

Tableau 1. Les données d'infra-densité disponibles pour les espèces étudiées.

Espèce	Projet Carbofor	Tropix (CIRAD)	Wood Density Database
Sapin	380	404	353
Epicéa	370	372	370
Douglas	430	448	453
Chêne	570	600	560
Hêtre	550	564	585

Enfin, pour passer de l'échelle arbre à l'échelle de la ressource d'une région et valoriser les données de l'IGN, on ne dispose pas des relations entre les variables arbre (diamètre, hauteur,...) et les quantités d'extractibles par compartiment.

Une fois les ressources forestières potentielles estimées, selon éventuellement des critères d'accessibilité, il est nécessaire de connaître les quantités des différentes qualités de connexes industriels sous l'hypothèse d'une transformation industrielle respectant la hiérarchie des utilisations : Bois d'œuvre (construction) > Bois d'industrie (papeterie et panneaux) > Bois énergie. A l'heure actuelle, les flux de connexes sont en cours d'analyse à l'échelle nationale (cf Observatoire National de la Ressource en Biomasse ONRB, 2015). Il est nécessaire de les compléter au grain plus fin des régions, des essences forestières et des types de bois (d'éclaircie, billes de pied, surbilles...) qui y sont les plus transformées, afin de repérer les fractions les plus riches (les « filons/gisements »), sans négliger les possibilités de valorisation en cascade (par exemple écorce → extractibles + écorce sans extraits → combustible ou mulch horticole).

La mobilisation des ressources en extractibles ne peut se faire sans la volonté des nombreux acteurs de la filière forêt-bois de développer une filière forêt-chimie. L'état de réceptivité de ces acteurs n'est pas vraiment connu ni d'ailleurs leur niveau de connaissances sur les extractibles et la filière forêt-chimie. Il est absolument nécessaire de les connaître notamment pour adapter les informations à diffuser. Des rapports à visée stratégique commencent à s'accumuler (ADEME, de Cherisey, 2015 ; ADEME, Tech2Market, FRD et CVG, 2015 ; Stevanovic *et al.* 2010) mais pour l'instant très peu d'informations de vulgarisation objectives et adaptées existent. De telles informations risquent même d'être insuffisantes tant sont difficiles à prédire l'effet des multiples interactions entre la disponibilité en extractibles, les comportements des acteurs, les conditions technico-économiques et les marchés de produits biosourcés. Pour mieux comprendre ces interactions, un outil d'intégration des connaissances et de simulation doit être construit et présenté afin que les acteurs de l'amont de la filière forêt-bois aient des réponses à leurs questions et que soient compris les effets des facteurs précités et identifiées les conditions requises pour faire émerger une filière forêt-chimie pérenne. Pour le créer, des modèles existent déjà comme l'outil CAT (*Carbon Accounting Tool*) développé au LERFoB par Mathieu Fortin (Fortin et al., 2012 ; Pichancourt et al., 2018).

Enfin, pour mieux mobiliser les acteurs autant en amont qu'en aval d'une filière forêt-chimie, il est nécessaire de mieux identifier les marchés potentiels des molécules identifiées dans la ressource.

## Présentation générale du projet

Le contrat triennal ExtraFor\_Est\_MAAF supporté par le Ministère de l'Agriculture, de l'alimentaire et de la Forêt (MAAF renommé MAA depuis) a démarré en octobre 2017. Il répond à nombre de questions évoquées précédemment ; il concerne la quantification, l'hétérogénéité et la mobilisation des ressources en composés chimiques extractibles, présents dans les branches, les nœuds, l'écorce, le duramen et l'aubier des principales essences de l'Est.

Il avait le **quintuple objectif** de

- 6) mieux connaître les quantités et l'hétérogénéité des extractibles présents dans les biomasses forestière et industrielle de l'Est, aux échelles arbre et ressource, ainsi que les marchés des molécules identifiées,
- 7) construire un outil d'aide à la décision, permettant d'évaluer la faisabilité de l'émergence d'une filière forêt-chimie, qui dépend de nombreux facteurs socio-technico-économiques en interaction,
- 8) identifier le niveau de connaissance sur les extractibles des acteurs de la filière forêt bois et leur réceptivité face à la perspective de cette filière forêt-chimie,
- 9) communiquer de manière adaptée à l'ensemble des acteurs de la filière forêt-bois les connaissances sur les extractibles, leur utilisation et leur valorisation industrielle,
- 10) vulgariser l'outil d'aide à la décision pour répondre aux questions des acteurs et les sensibiliser.

Ce contrat complète, par l'analyse fine de l'hétérogénéité d'une ressource régionale, les nombreux travaux du LERMAB sur l'obtention de dérivés de tanins, améliorés dans le projet EU BioFoamBark (2012- 2015) et la collaboration entre le LERMAB et le LERFoB sur la biodiversité de la ressource en extractibles des nœuds (contrat INRA-CJS Kebbi-Benkeder 2015). Il est complémentaire de projets focalisés sur les méthodes d'extraction, la caractérisation des propriétés physico-chimiques et biologiques et la valorisation industrielle : projets européens CERBERUS (2003-2006) puis FUI Bioextra (2010-2012), projets sur le Pin maritime (Chupin *et al.*, 2015), projet suisse « Extraction and characterization of bark tannin from domestic softwood species for bonding applications in wood-based materials ».

L'innovation apportée par ce projet a concerné l'amont de la filière forêt-bois depuis les ressources forestières jusqu'aux industries de première transformation du bois ; le projet a contribué à mieux connaître la ressource régionale en extractibles, au moyen d'une articulation originale entre richesse chimique, quantification des compartiments de l'arbre, amélioration des estimations des densités, prise en compte de la variabilité écologique et connexion aux données d'inventaire forestier. L'innovation a concerné également l'outil d'aide à la décision, dédié pour la première fois à une filière « forêt-chimie », et la prise en compte des comportements sociologiques des acteurs de la filière forêt-bois. Le souci de rapidement diffuser les connaissances acquises a été un atout important du projet. Les méthodes et connaissances pourront être facilement transposables à d'autres régions forestières comportant éventuellement d'autres essences (France, Europe), qu'elles soient tempérées ou intertropicales (Guyane).

**La zone géographique du projet** englobe les régions administratives Grand-Est et Bourgogne-Franche Comté (figure 1). Ces 2 régions sont parmi les 3 régions métropolitaines aux plus forts volumes de bois sur pied avec respectivement 217 m<sup>3</sup>/ha et 224 m<sup>3</sup>/ha ; elles présentent également les plus fortes productions biologiques annuelles (Memento FCBA, 2020).

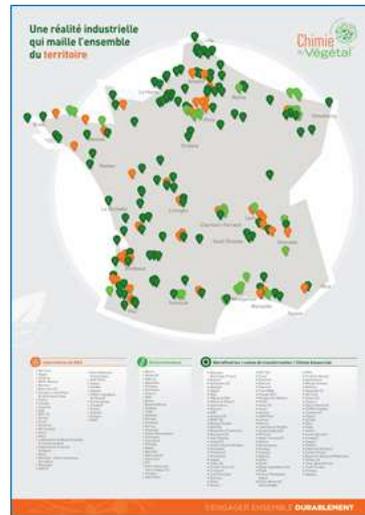
Cette zone fortement boisée, est d'une grande richesse en i. espèces (sapin, épicéa, Douglas, Chêne, Hêtre,...), ii. situations écologiques et iii. industries de première transformation du bois. Elle est bordée à l'Est par 4 pays avec lesquels s'échangent de grandes quantités de bois. Elle correspond au *Living Lab territorial (LIT) « issu du Grand-Est », en tout début de création au moment du démarrage du projet, qui inclut la problématique des biomolécules forestières.* Malgré un contexte extrêmement

favorable, aucune unité d'extraction de biomolécules forestières n'y est encore implantée (figure 2), au contraire de la région Nouvelle-Aquitaine, l'autre grande région fortement boisée et industrialisée.

Figure 1. Les 2 régions concernées



Figure 2. Carte des industries de chimie du végétal ( Cartographie-Bioraffineries-Biotech-France\_Avril2019-HD.jpg (2894x4093) (chimieduvegetal.com)



Les deux régions ont été néanmoins fortement touchées récemment par de fortes mortalités, quantifiées entre 2010 et 2018 dont les causes sont listées dans les tableaux suivants 2 et 3 (<https://agriculture.gouv.fr/sante-des-forets-ressources-et-publications>).

Résumé de l'état de santé des principales essences de la région Grand-Est (Tableau 2) et la région Bourgogne Franche-Comté (tableau 3)

Tableau 2

	Etat sanitaire	Principaux problèmes sanitaires
Indicateurs de la santé	Hêtre	Stress hydrique, gels précoces ou tardifs
	Chêne sessile	Défoliateurs
	Chêne pédonculé	Défoliateurs, stress hydrique, dépérissements
	Frêne	Chalarose
	Peupliers	Rouilles, puceron lanigère
	Epicéa commun	Stress hydrique, Typographe, Fomes
	Sapin pectiné	Stress hydrique
	Pin sylvestre	<i>Sphaeropsis sapinea</i>
	Douglas	Rouille suisse
	Mélèze	Chancre du mélèze

1      Etat de santé : 😊 = bon ; 😐 = moyen ; ☹️ = médiocre

Tableau 3

	Etat sanitaire	Principaux problèmes sanitaires
Indicateurs de la santé	Hêtre	Stress hydrique, chancre du hêtre
	Chêne sessile	Défoliateurs
	Chêne pédonculé	Défoliateurs, stress hydrique, dépérissements
	Frêne	Chalarose
	Peupliers	Rouilles, puceron lanigère
	Epicéa commun	Stress hydrique, Typographe, Fomes
	Sapin pectiné	Stress hydrique, chermès du tronc
	Pin (sylvestre, noir..)	<i>Sphaeropsis sapinea</i> , processionnaire du pin
	Douglas	Stress hydrique, nécroses cambiales en bande
	Mélèze	Chancre du mélèze

1      Etat de santé : 😊 = bon ; 😐 = moyen ; ☹️ = médiocre

**Les essences étudiées** sont, malgré le mauvais état de santé que certaines connaissent, des essences qui y sont particulièrement transformées : le hêtre, les chênes pédonculés et sessiles, le sapin, l'épicéa et le douglas (figure 3).

Figure 3. Les essences étudiées dans le projet : hêtre, chênes pédonculé (en haut) et sessile, sapin, épicéa et douglas.



**Un petit nombre d'extractibles sont analysés** : dans la famille des terpènes les mono-, di-, tri-, ...les acides résiniques, et dans la famille des polyphénols les lignanes (nœuds des résineux), les flavonoïdes (nœuds des feuillus), les stilbènes et les tanins (écorces). Nous nous intéressons *a priori* à des utilisations plutôt de niche, à haute valeur ajoutée (cosmétiques, pharmaceutiques) et aux biomatériaux (mousses isolantes, résines, adhésifs...).

#### **Ajustement du projet aux orientations nationales de la filière forêt-bois et de l'industrie chimique**

Le projet est en parfaite cohérence avec les fiches actions de l'étude « panorama des coproduits et résidus biomasse à usage des filières chimie et matériaux biosourcés en France » (ADEME, Tech2Market, FRD et CVG, 2015).

Les objectifs du projet rejoignent parfaitement les objectifs de la politique pour la filière forêt-bois (#PNFB2025) : mobiliser davantage de bois, augmenter la valeur ajoutée du bois au cours de sa mobilisation et transformation (**Objectif 1** p 12), développer la synergie entre forêt et industrie (**Objectif 4** p 15) notamment du secteur de la chimie du végétal. Il participe à un « renouveau industriel » (p30), en trouvant de nouveaux débouchés aux produits forestiers, particulièrement pour les très gros ou petits bois résineux ainsi que les bois feuillus de tous diamètres. Un préalable est que le matériau bois soit mieux caractérisé pour ses propriétés, ici densité et chimie (cf § Besoins de recherches sur la qualification des performances techniques).

De par leur cohérence avec les propositions du #PNFB2025, les objectifs de ce projet rejoignent également les priorités du programme national de recherche et innovation pour la filière forêt-bois (#FBRI2026). C'est à la priorité B que notre projet s'ajuste le mieux (« Développer les usages du bois et les nouveaux usages du bois dans une perspective bioéconomique en renforçant la compétitivité industrielle »). Notre projet aborde deux aspects qui y figurent : (i) valoriser la ressource nationale et surtout (ii) « développer les nouveaux marchés, procédés et produits, et accompagner les industries françaises dans leur transformation vers la bioéconomie pour mieux valoriser la ressource nationale et optimiser sa transformation » (Projet B.4). Il s'agit notamment de « structurer et amplifier la recherche sur la chimie du bois et de créer des démonstrateurs en s'appuyant sur le tissu industriel et les moyens de recherche ainsi que sur la diversité des ressources ligno-cellulosiques françaises ». Dans la priorité A de ce programme il est souhaité que soient particulièrement mobilisées les sciences économiques, humaines et sociales, au service de la performance du secteur (priorité A1). C'est le cas de notre projet. Il rejoint également le projet A2 à propos de la nécessité d'outil d'aide à la décision. Dans le projet A3 est évoquée la nécessité de favoriser l'innovation ouverte par la création de living labs forestiers territoriaux. *La thématique du projet a été inscrite parmi les composantes du living lab territorial (LIT) « issu du Grand-Est ».*

## Financement

Ce contrat qui a profité de la part du MAAF d'un apport financier de 462 036 euros a été complété/articulé avec d'autres contrats pour constituer le programme de recherche ExtraFor\_Est . Ces contrats sont :

- Labex\_Arbre « Bark-Tan-Bio » : 1<sup>er</sup> juillet 2017 – 31 décembre 2019 (terminé)
- ExtraFor\_Est\_FEDER Lorraine : 1<sup>er</sup> juillet – 31 décembre 2021
- ADEME : 1<sup>er</sup> octobre 2017 – 31 septembre 2020 (1/2 Thèse A. Billard) ; prolongé jusqu'en fin janvier 2021 grâce à un supplément ADEME ;
- Région Grand\_Est : octobre – fin septembre 2020 (1/2 Thèse A. Billard) ; prolongé de juillet à octobre 2021 grâce à un supplément région Grand Est ;
- 2 projets LABEX Arbre d'appui :
  - o Labex\_Arbre « Yulee : collaboration Silva – Université de Georgia et Rayonier USA » : 2019 (projet « au fil de l'eau »)
  - o Labex\_Arbre « Wood properties linked with growth models in CAPSIS » : 2018 (projet « au fil de l'eau »).

Au total ce sont près de 2 750 000 euros de financement extérieurs qui ont été obtenus pour ce programme de recherche, en sus des salaires des permanents pris en charge par les organismes participants.

## Organisation et déroulement

Le projet comporte 1 tâche T0 de management projet et 2 tâches T1 et T2 avec plusieurs actions chacune. La tâche T1 correspond à de la recherche académique et de l'ingénierie tandis que la tâche 2 correspond à l'animation d'une concertation régionale (tableau 4).

Tableau 4. Les différentes tâches et actions du projet

Tâches	Actions
T0	Gestion du projet
T1 Ressources	1A. Chimie : taux et compositions en extractibles
	1B. Quantités d'extractibles
	1C. Inventaire des ressources en extractibles
	1D. Outil d'aide à la décision
	1E. Synthèses sur les extractibles
T2 Animation régionale	2A. Diffusion des synthèses
	2B. Sociologie
	2C. Présentation de l'outil d'aide à la décision

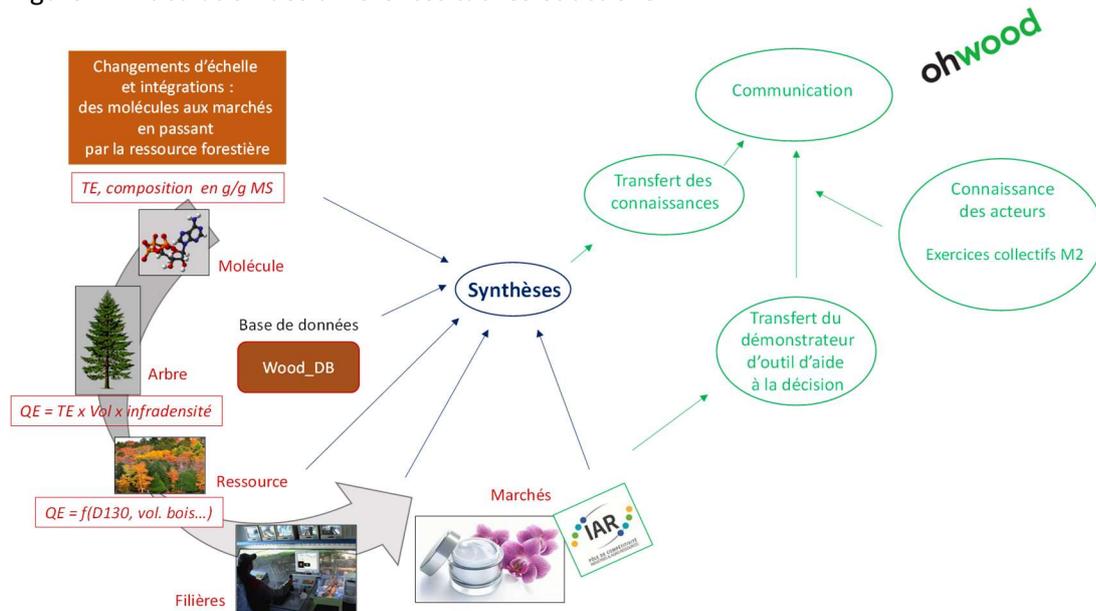
Ces tâches ont été menées selon le diagramme GANTT suivant (tableau 5). Le projet présente la particularité que toutes les actions ont démarré très tôt, même celles qui dépendent d'autres, par exemple celles qui composent l'animation de la concertation régionale. Ceci a été rendu possible par un flux continu de connaissances d'abord bibliographiques puis nouvellement obtenues, vers l'action d'inventaire, vers la synthèse des connaissances, vers leur diffusion, vers l'outil d'aide à la décision... Ce flux a été approvisionné d'abord par l'étude du sapin-épicéa, puis du chêne, du douglas et enfin du hêtre. Ceci a permis notamment d'analyser le comportement des acteurs en réponse à la perspective de l'émergence d'une filière forêt-chimie, au fur et à mesure que les informations leur sont communiquées.

Tableau 5. Répartition des tâches et actions suivant les semestres. A noter que le projet a été prolongé jusqu'à fin juin 2021.

Années		Année 1		Année 2		Année 3	
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
Semestres							
Date début		20-nov.-17	20-mai-18	20-nov.-18	20-mai-19	20-nov.-19	20-mai-20
Date fin		19-mai-18	19-nov.-18	19-mai-19	19-nov.-19	19-mai-20	19-nov.-20
Tâches	Actions						
T0	Management du projet	[Barre verte continue]					
T1A	Taux	[Barre orange]					
T1B	Quantités	[Barre orange]					
T1C	Inventaire	[Barre orange]					
T1D	Outil d'aide à la décision	[Barre orange]					
T1E	Synthèses sur les extractibles	[Barre orange]					
T2A	Communication	[Barre bleue]					
T2B	Sociologie	[Barre bleue]					
T2C	Présentation de l'outil d'aide à la décision	[Barre bleue]					

Les relations entre les différentes tâches et actions (hors tâche T0) sont présentées dans le schéma suivant (figure 4).

Figure 4. Articulation des différentes tâches et actions.



## Intervenants

**Trois participants** ont réalisé le travail, à savoir :

- le Laboratoire d'étude des Ressources Forêt-Bois (LERFOB) devenu depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2018 l'UMR Silva par fusion avec l'unité Ecologie Ecophysiologie Forestières
- le Laboratoire d'Etude et de Recherche du MATériau Bois (LERMAB) de l'université de Lorraine.
- **en collaboration (sous la forme de prestataire) avec l'Institut Géographique National (IGN).**

**Deux prestataires** sont intervenus de manière plus ou moins importante :

- le bureau de communication OhWood ;
- le CRITTBois.

La liste initiale détaillée des produits que ce projet devait fournir est indiquée dans le tableau 6.

Tableau 6. Liste initiale des livrables du projet

<p>T0 : - rapports scientifiques annuels et final, *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rapports annuels et final d'animation régionale, *</li> <li>- rapports financiers annuels et final, *</li> <li>- site Web avec notice et forum de discussion.</li> </ul>
<p>T1A : - rapport de mise à jour des connaissances sur la biodiversité de la ressource, l'effet des facteurs forestiers, l'effet des facteurs industriels ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- articles scientifiques ; *</li> <li>- rapport sur la qualité chimique des bois de mauvaise qualité bois d'oeuvre. *</li> </ul> <p>T1B : - rapport de mise à jour des connaissances sur la variabilité des densités, sur les volumes, biomasses et quantités d'extractibles ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- articles scientifiques. *</li> </ul> <p>T1C : - rapports de premières estimations des ressources chimiques chez les épicéa, sapin, Douglas, chêne ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- cartes selon les facteurs écologiques, sylvicoles ; *</li> <li>- article scientifique. *</li> </ul> <p>T1D : - rapport sur le développement de l'outil d'aide à la décision ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rapport de simulations sous différents scénarios technico-économiques *</li> <li>- article scientifique. *</li> </ul> <p>T1E : - synthèse des connaissances sur les biomolécules des espèces étudiées dans l'Est de la France, leurs marchés et les processus industriels les transformant ; *</p>
<p>T2A : - jeu de fiches sur les espèces ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- articles de vulgarisation dans différents supports de presse ou numériques ; *</li> <li>- organisation de réunions ou interventions à des réunions déjà programmées</li> </ul> <p>T2B : - rapport sur le niveau initial des connaissances sur les extractibles ; *</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- rapport sur les attitudes en réponse à la perspective de l'émergence d'une filière forêt-chimie ; *</li> </ul> <p>T2C : - réunions de présentation de l'outil de planification ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- ateliers d'apprentissage et/ou de simulation ;</li> <li>- propositions d'organisation de la filière et d'implantation d'une unité d'extraction ;</li> <li>- simulation de l'impact de l'émergence d'une filière forêt-chimie. (rapport) *</li> </ul>

## Réalisation des actions et résultats

### Tâche T0

Il est important de noter que la gestion du projet s'est faite de manière bipolaire :

- Une gestion LERMAB
- Une gestion INRAE

Les personnes engagées temporairement sur le projet sont présentées dans les tableaux 7a et 7b.

### Tableau 7. Recrutement des personnes non permanentes

#### a. à l'INRAE :

Contractuels financés sur le projet ExtraFor_Est financement MAAF						
AMMOUR	Hakima	Master 2	05/02/2018	05/08/2018	MAAF	3 281,25 €
BAUER	Rodolphe	Doctorant	01/12/2017	30/11/2020	MAAF	31 041,42 €
BISSIEUX	Léa	MOO	04/06/2018	31/07/2018	MAAF	2 697,93 €
CONTINI	Adrien	CDD AI	13/10/2018	30/04/2019	MAAF	10 329,00 €
CONTINI	Adrien	CDD AI	12/03/2018	12/10/2018	MAAF	19 129,97 €
CONTINI	Adrien	CDD AI	13/10/2018	30/04/2019	MAAF	6 447,12 €
LUDOSKY	Daliéna	MOO	01/07/2019	31/07/2019	MAAF	2 603,81 €
PICHANCOURT	Jean-Baptiste	CDD CR3	01/08/2018	31/01/2019	MAAF	3 625,16 €
PICHANCOURT	Jean-Baptiste	CDD CR3	01/12/2017	31/03/2018	MAAF	12 607,88 €
PICHANCOURT	Jean-Baptiste	CDD CR3	01/04/2018	31/07/2018	MAAF	17 445,59 €
PICHANCOURT	Jean-Baptiste	CDD CR3	01/08/2018	31/01/2019	MAAF	21 996,10 €
RAJAONARIVO	Annaëlle	MOO	02/07/2018	03/08/2018	MAAF	2 581,67 €
RANAIVOMIARANA	Nirisoa Rachel	CDD AI	06/08/2018	05/09/2018	MAAF	2 615,46 €
ZANOTTI FANTI	Lea	MOO	09/03/2020	08/04/2020	MAAF	2 750,79 €

#### b. au LERMAB :

Contractuels financés sur le projet Extrafo_Est MAAF					
FRISTCH	Clément	doctorant	01/12/2018	28/02/2020	39774,53
COSGUN	Sylvain	IR	01/04/2018	31/12/2018	77019,51
GERARDIN	Pauline	IE	01/03/2020	31/08/2020	20507,76
SAPTAIKHANOVA	Gaini	stagiaire	01/02/2020	31/07/2020	2948,4

### Réunions de suivi du projet

3 réunions du CoPil (Comité de pilotage) ont été organisées ensemble par Silva et le LERMAB les :

- 5 avril 2018
- 6 juin 2019
- 10 février 2020.

### Comité consultatif

Un comité consultatif a été progressivement constitué, formé des personnes suivantes :

Nicolas Bilot Responsable Recherche Développements Innovation Groupe Coopération Forestière (GCF) au début du projet

Jérémy Boucher Directeur R&D Pavatex Soprema

Antoine de Champeaux Propriétaire forestier du Morvan

Jean-Luc David Vaudey Directeur commercial chez Savoie Pan

Claude Franiatte Propriétaire forestier Docteur en Pharmacie  
Jacques Gény Propriétaire forestier administrateur de la coopérative Forêts et Bois de l'Est  
Cyrille Lambert Animateur industrie CCI Côte d'Or  
Michel Dumoulin Directeur Scientifique Groupe CHARLOIS  
Erik Nastorg Directeur Recherche et Innovation Groupe CHARLOIS  
Hanitra Rakotoarison Économiste à l'ONF R&D&I Fontainebleau  
Bruno Schjoth Propriétaire forestier Chirurgien en activité  
Valia Varnitzky Chimiste et entrepreneur  
Arnaud Favier directeur scierie François  
Emilie Reynaud FIBOIS Grand Est  
Nicolas Attenot Entreprise d'extraction enzymatique Biolie

A chaque réunion publique, ce comité consultatif, partiellement présent, a pu apporter la vision « de terrain » des acteurs forestiers et ou chimistes. Il est intervenu pour animer les forums, introduire les journées, réagir aux exposés. Une journée spéciale de visite des laboratoires a été organisée spécialement pour lui en 2020.

### **Organisation des journées publiques**

Huit journées publiques ont été organisées. Elles sont décrites dans la tâche « Communication, diffusion ».

### **Justification des contrats**

Philippe Gérardin du côté du Lermab, et Francis Colin du côté de Silva, ont pu faire le suivi des dépenses enregistrées par respectivement Laurence Le Maout, responsable de l'équipe gestion de Silva et ????, puis ???? en charge du suivi administratif et financier au Lermab.

### **Réunions internes**

Plusieurs réunions internes pour informer les participants de l'avancement du projet, décider des échantillonnages, établir les interactions entre actions et tâches, pour la construction des bases de données, pour la préparation des réunions publiques et des réunions du comité de pilotage ont été organisées durant tout le temps du projet.

### **Base de données**

Compte tenu de l'importance des données qui allaient être accumulées, il est apparu nécessaire et profitable de disposer d'une base de données (BD). Celle-ci a par ailleurs participé à l'animation scientifique du projet. La création du modèle de base a été assurée par Alain Bénard et Damien Maurice ingénieurs informaticiens INRA du plateau technique SIG BD de l'UMR Silva. Suite à la réunion de démarrage de la création de la BD le 6 avril 2018, plusieurs échanges ont été menés notamment avec Frédéric Mothe en utilisant la forge Renater « Source Sup » adoptée par l'INRA, Alain Bénard et Damien Maurice étant les administrateurs du projet EXTRAFOREST (<https://sourcesup.renater.fr/projects/extraforest/>). Dans les documents métier par exemple, on trouve 1) le guide de rédaction des docs métiers, et 2) un doc métier en cours sur les propriétés physiques du bois et un sur les caractéristiques des arbres échantillonnés. Sur la forge, on a aussi les exemples de fichiers « données » utiles à l'analyse pour la modélisation de la base de données. On y a déposé aussi les modèles de base en cours d'élaboration (ce sont des docs de travail), partagés via la forge. On y trouve également des CR de réunions. Plusieurs fonctionnalités disponibles sur la forge, seront utilisées au fur et à mesure de l'avancement du projet et selon les besoins (par exemple versionnement de code, wiki, forum). Pour le moment a été essentiellement utilisé le gestionnaire de documents qui assure la gestion centralisée via l'outil web qui est la forge.

## Tâche T1

Compte tenu u fait que le matériel végétal a été échantillonné et récolté dans la tâche T1B, cette dernière sera présentée avant la tâche T1A.

### Action T1B. Quantités d'extractibles ; biomasse des compartiments et tarifs de biomasse.

Rappel des objectifs de la tâche 1B

L'objectif de cette tâche était d'estimer la biomasse sèche des différents compartiments de l'arbre pour cinq essences majeures de l'est de la France, en fonction de caractéristiques des arbres disponibles dans la base de données de l'IGN. Pour cela il était nécessaire de faire l'inventaire de ce qui existe en termes de modèles de volume, densité, biomasse des compartiments et si nécessaire en développer de nouveaux. La prise en compte de la variabilité de la densité du bois dans l'arbre a été complètement négligée jusqu'à présent pour les estimations de biomasse or il semble que cela puisse entraîner des biais significatifs pour certaines essences.

#### 1B1 Sous-action *Volumes*

Les efforts ont porté principalement sur le compartiment de l'écorce pour lequel peu de modèles étaient disponibles alors qu'une énorme base de données avait été rassemblée par le FCBA dans le projet EMERGE et à l'IGN. Quelques données concernant les nœuds de Douglas et sapin ont pu être obtenues grâce à des images tomographiques acquises dans le cadre du projet Modelfor.

##### 1B11 Évaluation du volume de nœuds

Des modèles de profils de tige comme celui de REF Tran-Ha et al. 2007 permettent d'estimer avec précision le volume d'une tige à partir de variables dendrométriques simples (diamètre à 1,30 m, hauteur totale). L'objectif était ici d'évaluer la part de ce volume constituée de bois sans nœud et donc de quantifier les volumes de nœuds et de bois sans nœuds dans une tige. Lors du projet Modelfor les tiges de 15 sapins (forêt de Saint-Prix) et 9 Douglas (forêt du Quartier) avaient été intégralement découpées en billons qui ont été amenés au laboratoire pour être scannés par tomographie X. Les 9 Douglas ont tous été scannés mais ce travail très coûteux n'a pu être mené à terme que sur moins de la moitié des billons de sapin. Le tableau 8 présente quelques caractéristiques de ces peuplements gérés par l'ONF dans lesquels trois scénarios d'intensités d'éclaircies avaient été testés. Les Douglas faisaient partie du réseau de placettes géré par le *GIS Coop* (<https://www6.inrae.fr/giscoop>, REF Seynave et al. 2018).

Un protocole de mesure manuelle du volume des nœuds à partir des images tomographiques a été élaboré et tous les nœuds visibles ont été mesurés sur les billons scannés.

Tableau 8 : Caractéristique des peuplements de Douglas et sapin échantillonnés pour le projet Modelfor.

Espèce	Site	Code traitement	Densité initiale (tige.ha <sup>-1</sup> )	Densité finale (tige.ha <sup>-1</sup> )	Surface terrière finale (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Hauteur dominante finale (m)
Douglas	Quartier	QT	2500	2125	31.9	~ 15
		QI	1100	506	15.0	~ 15
		QD	350	341	17.2	~ 15

Espèce	Site	Code traitement	Densité initiale (tige.ha <sup>-1</sup> )	Densité finale (tige.ha <sup>-1</sup> )	Surface terrière finale (m <sup>2</sup> .ha <sup>-1</sup> )	Hauteur dominante finale (m)
Sapin	Saint-Prix	PT	13794	4148	39.5	16.5
		PW	11857	611	24.0	18.3
		PS	13649	350	17.2	17.4

#### 1B111 Protocole de mesure des nœuds

Un protocole était nécessaire pour permettre à des opérateurs sans expertise particulière de délimiter les nœuds de façon répétable et fiable sur les images tomographiques. Pour cela, un jeu réduit d'images a été traité par différents opérateurs avec des consignes préalables précises. Des répétitions par le même opérateur ont également été effectuées. Ce travail a été présenté lors d'un colloque international à Freiburg (REF Billard et al 2019).

Le protocole final adopté (Figure 5) a été appliqué sur les images provenant du projet Modelfor et également sur les billons de nœuds prélevés lors des campagnes de terrain d'Extraforest pour les mesures de densité (voir 1B22).

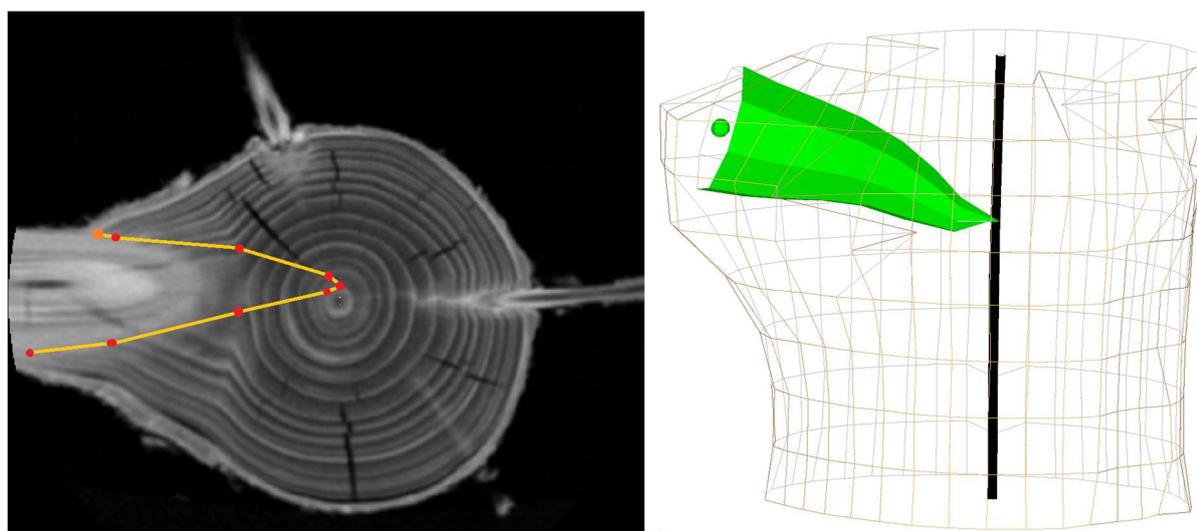


Figure 5 : Détourage d'un nœud d'épicéa sur des coupes tomographiques (gauche) et visualisation 3D de la segmentation (droite).

#### 1B112 Proportion de nœuds dans la tige

Les tableaux 9 et 10 présentent les proportions de nœuds mesurés dans l'ensemble des billons scannés. Les figures 6 et 7 montrent l'évolution de la proportion de nœud avec la hauteur dans l'arbre et l'effet du diamètre et du traitement sylvicole.

Sur les jeunes Douglas de 20 ans qui ont été analysés, la proportion de nœud semble indépendante de la hauteur ou du diamètre des billons. Elle est un peu supérieure sur les arbres les plus fortement éclaircis. L'effet du traitement sylvicole serait peut-être plus apparent sur des arbres plus âgés.

Sur les sapins, la proportion de nœuds augmente plus nettement avec la hauteur dans l'arbre et diminue avec le diamètre. La proportion de nœuds semble d'autant plus importante que le traitement sylvicole est dynamique mais plusieurs arbres semblent faire exception (PT6, PS2).

Le faible nombre d'arbres et de nœuds analysés interdit d'identifier correctement les sources de variabilité. Pour estimer la biomasse des arbres échantillonnés pour Extrafor\_Est, nous appliquerons donc des taux de nœuds constants dans la tige : 1,3 % pour le Douglas, 1 % pour le sapin, et 1 % aussi pour l'épicéa faute de données (Billard et al. 2020). Pour les feuillus, aucune estimation du taux de nœud n'est pour le moment disponible. La banque d'image tomographiques du laboratoire contient un certain nombre de billons de chêne qui permettront sans doute d'obtenir bientôt des informations sur cette essence.

Tableau 9 : Volume moyen de la tige et des nœuds dans 9 Douglas scannés intégralement dans le cadre du projet Modelfor.

Arbre	Hauteur totale (m)	Hauteur de la 1ère branche verte (m)	Diamètre à 1,30 m (cm)	Age (années)	Proportion de billons scannés (%)	Volume des billons scannés (m3)	Volume de nœuds (cm3)	Proportion de nœuds (%)
QT1	11.1	4.5	9	20	100	27.9	0.25	0.91
QT3	12.7	5.5	14	20	100	76.6	1.27	1.66
QT5	14.7	5.3	20	20	100	190.7	2.09	1.10
QI1	11.4	2.3	12	20	100	58.8	0.54	0.92
QI3	14.4	2.6	18	20	100	166.0	2.15	1.30
QI5	17.9	3.4	25	20	100	351.8	3.16	0.90
QD1	10.2	1.1	18	20	100	99.1	1.72	1.74
QD3	12.6	1.9	26	20	100	292.4	4.50	1.54
QD5	14.7	2.3	32	20	100	402.2	6.69	1.66
<b>Moyenne</b>	<b>13.3</b>	<b>3.2</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>100</b>	<b>185.1</b>	<b>2.49</b>	<b>1.30</b>

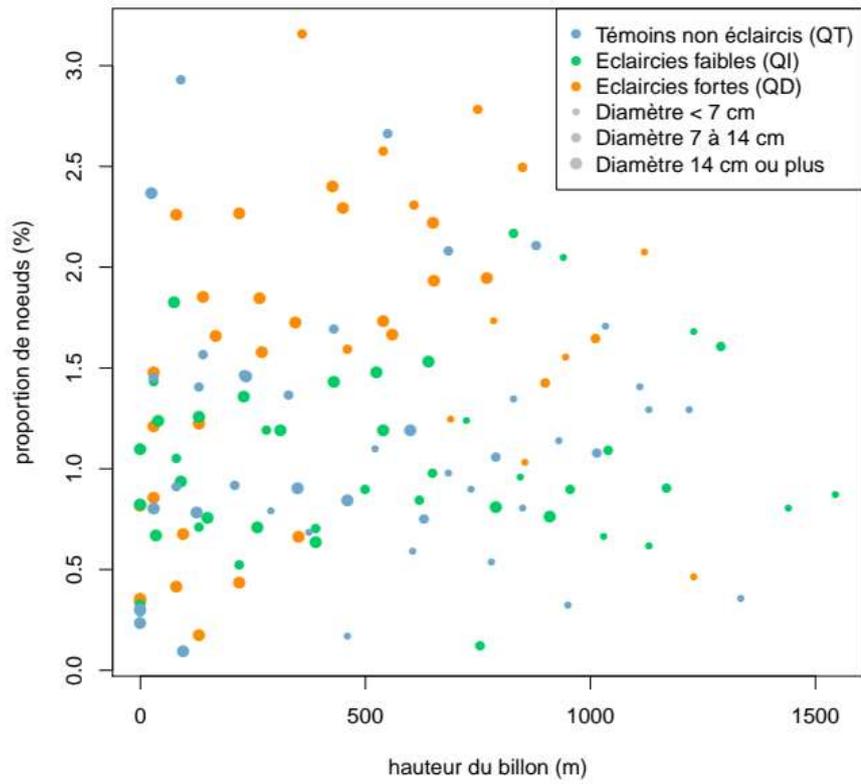


Figure 6 : Proportion de nœuds dans la tige en fonction de la hauteur de prélèvement, du diamètre et du traitement sylvicole sur 9 Douglas scannés intégralement dans le cadre du projet Modelfor.

Tableau 10 : Volume moyen de la tige et des nœuds dans 11 sapins scannés partiellement dans le cadre du projet Modelfor. Le nom des arbres indique leur traitement sylvicole : PT = témoins non éclaircis, PW = traitement intermédiaire, PS = traitement dynamique avec des éclaircies fortes.

Arbre	Hauteur totale (m)	Hauteur de la 1ère branche verte (m)	Diamètre à 1,30 m (cm)	Age (années)	Proportion de billons scannés (%)	Volume des billons scannés (m3)	Volume de nœuds (cm3)	Proportion de nœuds (%)
PT2	11.3	7.1	10	41	78	31.8	0.16	0.51
PT3	9.6	7.4	7	38	94	12.0	0.09	0.71
PT4	9.6	6.0	7	39	73	15.2	0.08	0.55
PT5	10.7	6.2	9	43	100	34.7	0.22	0.63
PT6	13.0	7.2	15	36	12	2.5	0.03	1.29
PW2	15.3	7.4	15	38	35	18.0	0.16	0.86
PW3	16.1	8.2	20	44	100	215.0	1.84	0.86
PS1	14.2	5.7	14	41	32	15.6	0.20	1.31
PS2	14.2	1.8	23	36	33	37.5	0.31	0.83
PS3	13.2	1.9	18	38	100	153.2	2.08	1.36
PS4	19.1	3.8	32	40	24	40.7	0.51	1.25
<b>Moyenne</b>	<b>13.3</b>	<b>5.7</b>	<b>15</b>	<b>39</b>	<b>46</b>	<b>52.4</b>	<b>0.52</b>	<b>0.92</b>

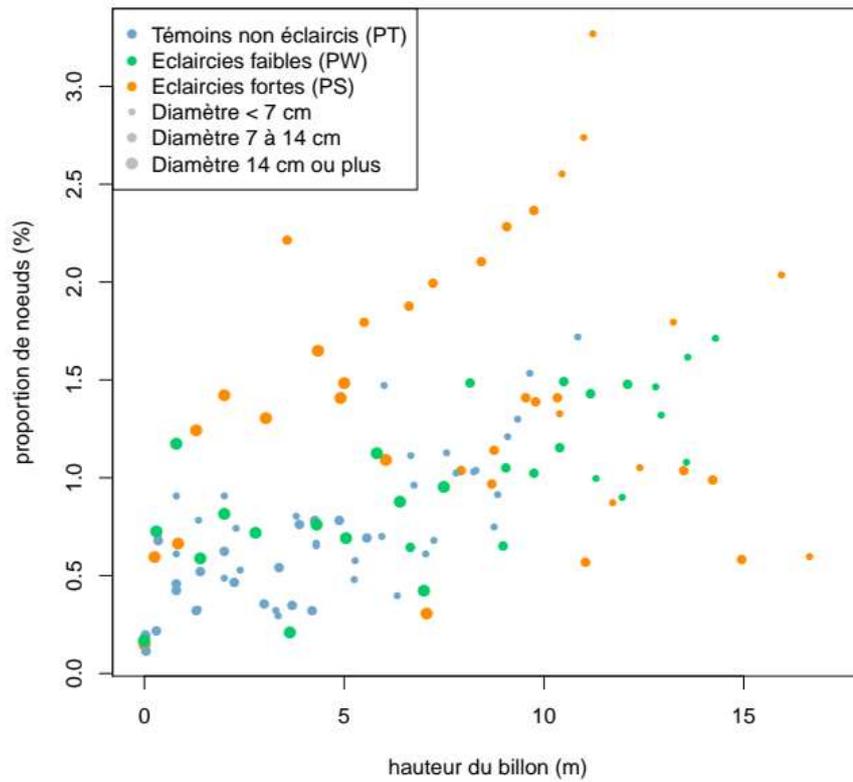


Figure 7 : Proportion de nœuds dans la tige en fonction de la hauteur de prélèvement, du diamètre et du traitement sylvicole sur 11 sapins scannés partiellement dans le cadre du projet Modelfor.

## 1B12 Modélisation du volume d'écorce

La modélisation du volume d'écorce de la tige a été effectuée en collaboration avec le FCBA et l'IGN dans le cadre de la thèse de Rodolphe Bauer. Deux très importantes bases de données ont été mises à notre disposition pour ce travail : une base collectée par le FCBA dans le cadre du projet EMERGE et une base constituée par l'IGN. La base EMERGE comprenait des données d'épaisseur d'écorce collectées à différentes hauteurs (15 à 24 par arbre en moyenne selon les essences). La base IGN était constituée des mesures d'épaisseur d'écorce à 1,30 m effectuées dans la période 2014-2018 dans les régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté. En dehors des épaisseurs d'écorce, le diamètre à 1,30 m, la hauteur totale ainsi que la localisation et l'altitude étaient disponibles pour tous les arbres. Le diamètre sur écorce à chaque hauteur de mesure avait été enregistré dans la base EMERGE. Seules les mesures effectuées à la jauge à écorce ont été conservées pour cette étude (Tableau 11).

Tableau 11 : Nombre d'arbres comprenant des mesures à la jauge à écorce dans les bases de données EMERGE et IGN.

Essence	Nombre d'arbre mesurés à différentes hauteurs (base EMERGE)	Nombre d'arbres mesurés à 1,3 m (base IGN)
sapin	658	25258
épicéa	692	41950
Douglas	313	17537
chêne sessile	1445	46540
chêne pédonculé	481	41291
hêtre	1246	42740

Ces données ont été utilisées pour ajuster trois types de modèles, qui sont décrits dans deux publications en cours de finalisation (Bauer et al. 2021a, Bauer et al. 2021b).

## 1B121 Modèle d'épaisseur d'écorce

Un modèle prédisant l'épaisseur d'écorce à 1,30 m (E130) à partir du diamètre à 1,30 m (D130) a été ajusté à l'aide de la base IGN. Il se présente sous la forme suivante :

$$E130 = a D130^b$$

où a et b sont des coefficients fixes par essence ou, dans le cas du sapin, de l'épicéa et du hêtre, une valeur dépendant de l'altitude par une relation linéaire :

$$a = c \cdot \text{altitude} + d$$

où c et d ont des valeurs fixes par essence.

Les valeurs des paramètres pour chaque essence sont listées dans REF Bauer et al. 2021a. La RMSE (erreur moyenne quadratique) relative est de l'ordre de 30% (36 % pour le hêtre) et le R<sup>2</sup> entre valeurs mesurées et prédites varie entre 0,68 et 0,73 suivant les essences.

## 1B122 Modèle de volume d'écorce

Dans le même article, REF Bauer et al. 2021a ont recherché des modèles de la littérature prédisant directement le volume d'écorce ( $V_e$ ) à partir de variables dendrométriques. Les modèles ont été ajustés sur les données EMERGE, sur lesquelles le volume d'écorce pouvait être estimé à partir des mesures d'épaisseurs d'écorce et de diamètres. Le modèle qui s'est avéré le plus performant est celui proposé par REF Kozak-Yang 1981 avec la forme suivante :

$$V_e = a D^{130^c} E^{130^d} H_{tot}^e$$

où  $H_{tot}$  est la hauteur totale de l'arbre et  $a$ ,  $c$ ,  $d$  et  $e$  des paramètres fixes par essence.

Les valeurs des paramètres pour chaque essence sont listées dans REF Bauer et al. 2021a. La RMSE (erreur moyenne quadratique) relative est de 17 à 28 % et le  $R^2$  entre valeurs mesurées et prédites de 0,92 à 0,96 suivant les essences.

Ces modèles, appliqués aux régions Grand-Est et Bourgogne-Franche-Comté, ont permis de calculer les volumes d'écorce de chacune des six essences considérées disponibles dans les deux régions (REF Bauer et al. 2021a).

## 1B123 Modèle de profil de surface d'écorce

Pour affiner la connaissance du volume d'écorce disponible dans la tige il était intéressant de modéliser la surface d'écorce à une hauteur donnée. Cela permet par exemple de répartir le volume d'écorce dans chaque billon issu de la tige.

Deux modèles issus de la littérature prédisant l'épaisseur d'écorce en fonction de la hauteur de prélèvement, du diamètre de la tige, de l'épaisseur d'écorce à 1,30 m et de variables dendrométriques ont été testés. Un nouveau modèle, à exposant variable, prédisant directement la surface d'écorce à partir de la hauteur de prélèvement et de l'épaisseur d'écorce à 1,30 m a été comparé aux précédents.

Ce travail, encore en cours, fera l'objet d'une publication prochainement (Bauer et al. 2021b).

## 1B2 Sous-action *Densités*

### 1B21 Campagnes de terrain

Deux campagnes de terrain ont été réalisées. La première en 2018 portant sur les essences résineuses (sapin, épicéa, Douglas), la seconde en 2019 sur les feuillus (chêne et hêtre). Au total 34 arbres ont été échantillonnés (4 arbres x 2 modalités d'éclaircie x 3 essences résineuses + 5 arbres x 2 essences feuillues).

Les informations sur les dispositifs expérimentaux gérés et mis à disposition par l'ONF et investis dans le projet ExtraFor\_Est (figure 8) sont les suivantes. A noter que le dispositif de Goviller concerne l'espèce chêne sessile.

Figure 8. Les dispositifs expérimentaux échantillonnés pour étudier la densité des différents compartiments

Espèce	Sapin	Épicéa	Douglas	Chêne	Hêtre
Peuplement	Saint-Prix (Saône-et-Loire)	Mas-Dorier (Puy-de-Dôme) +1 Champenoux	Mélagues (Aveyron)	Goviller (Meurthe-et-Moselle)	Goviller (Meurthe-et-Moselle)
Echantillon	4 témoins et 4 d'une modalité très dynamique	4 témoins et 4 d'une modalité très dynamique +1	4 témoins et 4 d'une modalité très dynamique	5 d'éclaircies (jeunes) et 5 de récolte finale	5 d'éclaircies (jeunes) et 5 de récolte finale
Nb total par espèce	8	8 + 1	8	10	10
Total			44 + 1		



Sur chaque arbre ont été prélevés pour les mesures de densité : A : 15 rondelles de tige (hors nœuds), B : 7 courts billons de nœuds prélevés dans la tige, C : un tronçon à l'insertion de 10 à 15 branches de différents diamètres et D : un nombre variable de tronçons des même branches pris à différents diamètres de découpe (Figure 9). Les rondelles de tronc ont été emballées sous cellophane immédiatement après la coupe. Des rondelles complémentaires destinées aux mesures chimiques ont été prélevées dans la tige.

Des données équivalentes concernant le sapin et le Douglas, qui avaient été collectées dans le cadre du projet Modelfor ont été jointes aux données ExtraFor\_Est. Ces données concernent 29 sapins et 30 Douglas provenant chacun de deux sites différents avec 3 intensités d'éclaircies.

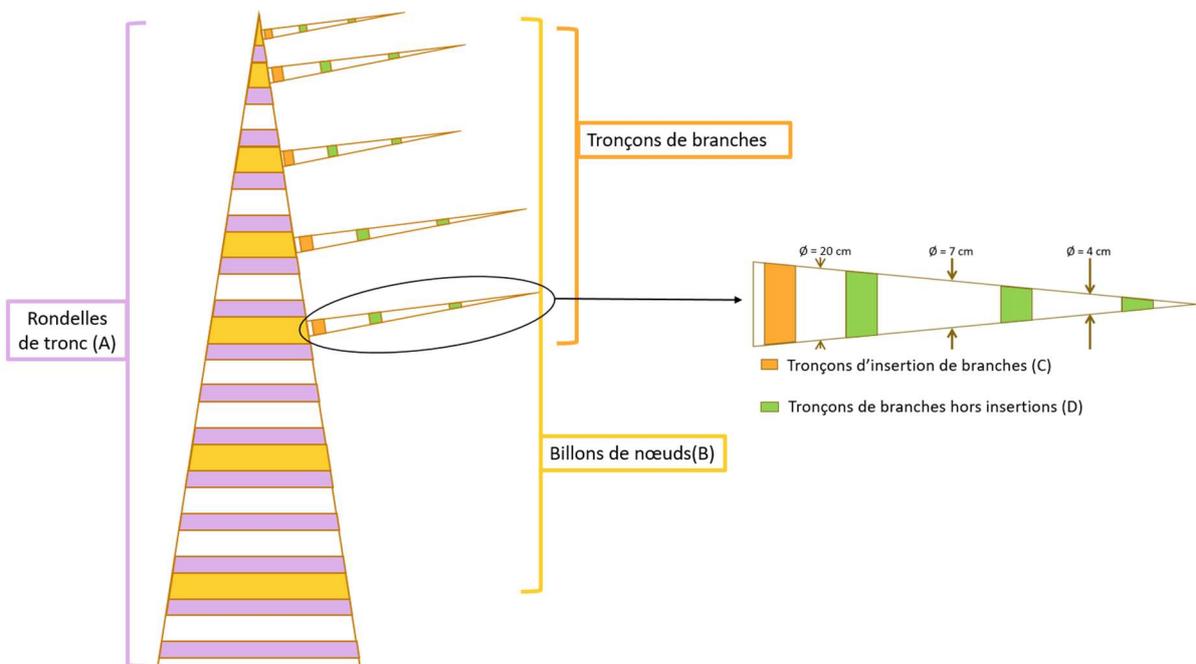


Figure 9 : Prélèvements effectués sur les arbres échantillonnés pour les mesures de densité. Rondelles de tronc A (violet), billons de nœuds B (jaune), tronçons de branches C à l'insertion (orange) et D (vert).

## 1B22 Mesures de densité en laboratoire

La masse volumique (rapport masse sur volume exprimé en  $\text{kg.m}^{-3}$ ) ou la densité (masse volumique divisée par la masse volumique de l'eau, soit  $1000 \text{ kg.m}^{-3}$ , sans unité) a été mesurée sur les échantillons A, B, C et D prélevés sur chaque arbre.

Sur les échantillons A la mesure a été effectuée une première fois à l'état frais puis à l'état anhydre. Le séchage a été effectué dans une étuve à  $103^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation du poids. A partir des mesures de densité aux états frais et anhydre, il est possible de calculer l'infradensité (rapport de la masse anhydre au volume frais) qui permettra donc de convertir des mesures de volumes en biomasses sèches. En plus des valeurs moyennes, la méthode par tomographie utilisée (Longuetaud et al. 2016) permet d'établir des cartographies des densités et de l'infradensité dans chaque éprouvette (Figure 10). Cela a permis notamment de traiter séparément bois et écorce et d'analyser les variations radiales de la densité dans une rondelle.

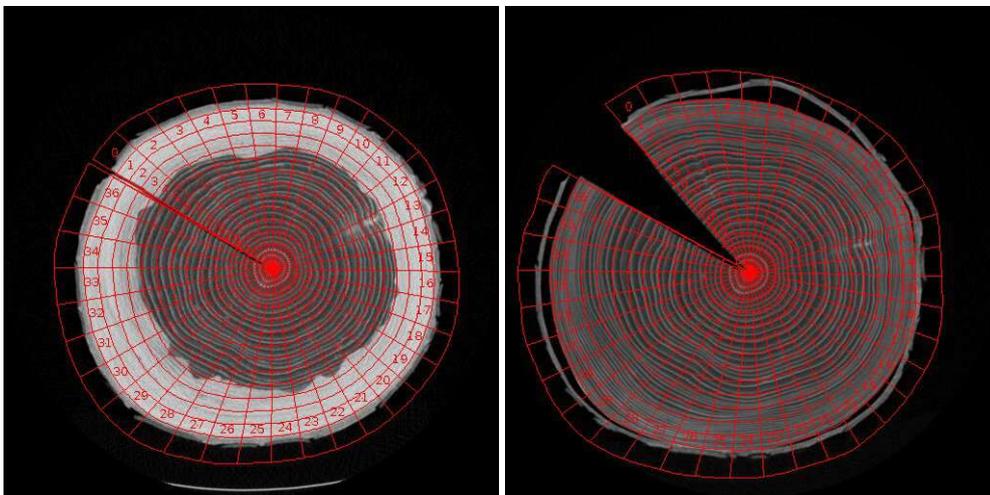


Figure 10 : Image tomographique d'une rondelle d'écicéa à l'état frais (à gauche) et de la même rondelle à l'état anhydre (à droite).

Les billons de nœuds B ont été analysés aussi par tomographie mais seulement à l'état anhydre. Le séchage, effectué dans des étuves à  $103^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation du poids, a nécessité un temps considérable que nous avons largement sous-estimé au départ, et n'est pas encore achevé pour les essences feuillues en 2021. Les nœuds scannés ont été détournés sur les images de façon à pouvoir mesurer la densité moyenne des nœuds de chaque verticille inclus dans les billons. Le protocole de ces mesures a été décrit dans la section 1B111.

Sur les éprouvettes C et D, seule la densité anhydre moyenne a été mesurée. Après séchage en étuve à  $103^\circ\text{C}$  jusqu'à stabilisation du poids, les éprouvettes assemblées en fagots ont été scannées par tomographie, puis une coupe a été isolée sur laquelle les éprouvettes ont été isolées (Fig. 11). Un traitement d'image sommaire (seuillage et érosion d'image) a été effectué pour mesurer la densité anhydre sous écorce.



Figure 11 : Tronçons de branches assemblés en fagot (gauche) et exemple d'image scannée (droite).

L'infradensité des éprouvettes B, C et D a été estimée à partir des mesures de densité anhydre à l'aide de régression linéaires. Ces régressions ont été établies à l'aide des rondelles A sur lesquelles les deux mesures ont été effectuées. Le Tableau 12 présente les coefficients des régressions utilisées.

Tableau 12 : Coefficients des régression utilisées pour convertir la densité anhydre ( $D_0$ ) de chaque essence en infradensité ( $I_d$ ) par la relation  $I_d = \alpha + \beta \cdot D_0$ .

Essence	$\alpha$ (kg.m-3)	$\beta$ (sans unité)
sapin	38	0.790
épicéa	67	0.710
Douglas	0	0.879

La densité anhydre de l'écorce a été mesurée sur les éprouvettes A uniquement. Pour diverses raisons, la méthode utilisée pour mesurer l'infradensité du bois n'était pas applicable à l'écorce. Faute de mieux, nous avons donc utilisé les régressions établies sur le bois pour convertir la densité anhydre de l'écorce en infradensité.

## 1B23 Résultats

### 1B231 Masse volumique des compartiments

La figure 12 résume les principaux résultats de ce travail, qui a été publié dans REF Billard et al. 2020. Les résultats montrent également que l'infradensité des compartiments ne dépend pas du diamètre à 1,30 m des arbres, sauf dans le cas du sapin pour l'écorce, les insertions de branches et les branches sans insertions. L'intensité d'éclaircie ne semble pas non plus influencer la masse volumique des compartiments à l'exception de l'écorce pour le sapin, des branches pour l'épicéa et des insertions de branche pour le douglas. Pour ces trois compartiments, la masse volumique est plus élevée pour l'intensité d'éclaircie forte.

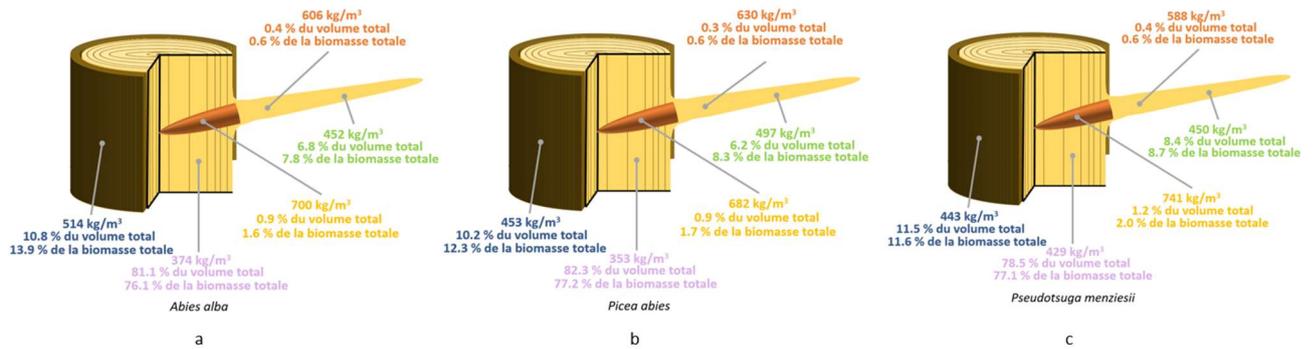


Figure 12 : Infradensité moyenne, volume et biomasse de chaque compartiment pour les trois essences considérées : bois de tronc sans nœuds (violet), écorce (bleu), nœuds (jaune), insertions de branches (orange) et branches hors insertions (vert).

La comparaison de deux calculs de la biomasse d'un arbre, soit en considérant une densité fixe égale à la densité à 1,30 m, soit en prenant en compte la densité de chaque compartiment, montre que la différence est de l'ordre de 5% pour la moyenne de l'arbre, de 1 à 9% pour la moyenne de la tige mais peut atteindre jusqu'à 48% pour certains compartiments (Fig. 13).

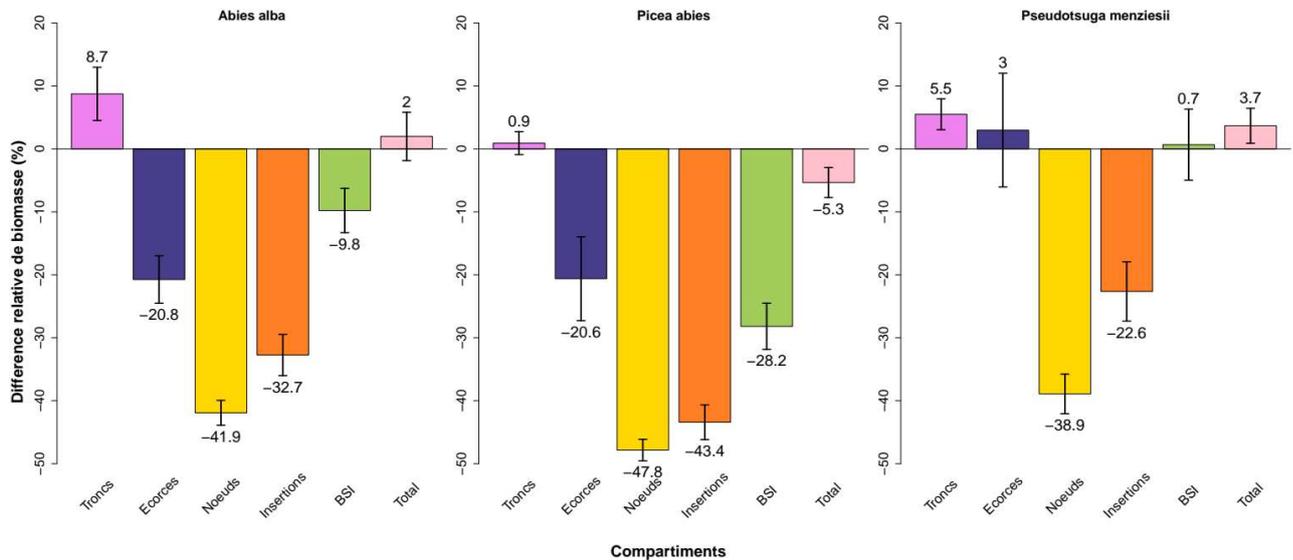


Figure 13 : Différence relative moyenne de biomasse entre la biomasse calculée avec l'infradensité à 1,30 m et la biomasse calculée avec les infradensités moyennes de chaque compartiment rapporté à cette dernière. Troncs signifie bois de troncs hors nœuds, Insertions signifie insertions de branche et BSI signifie branches sans insertions.

## 1B232 Variations verticales en relation avec la sylviculture

Ce travail est en cours de publication dans Billard et al. (2021). L'objectif était de modéliser les variations longitudinales de la masse volumique sur les 3 essences résineuses avec des variables dendrométriques et en particulier d'évaluer la différence entre la densité à 1,30 m et la densité moyenne du tronc. Pour cela, les données sapin et douglas du projet Modelfor ont été jointes aux données ExtraFor\_Est (les données Modelfor décrites à la section 1B11 ont été obtenues avec une partie de cet échantillonnage). A la demande des relecteurs de l'article, l'analyse des épicéas (pour lesquels seuls 8 arbres étaient disponibles) a été retirée de la publication.

Le modèle proposé est de type bi-exponentiel :

$$ID_{hr} = a \exp(b \text{ hr}) + c \exp(d \text{ hr})$$

où  $hr$  est la hauteur relative (hauteur de prélèvement rapportée à la hauteur totale),  $ID_{hr}$  est l'infradensité à la hauteur  $hr$  et  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont des paramètres. Pour faciliter la modélisation, la forme équivalente suivante a été préférée :

$$ID_{hr} = c (\exp(d \text{ hr}) - \exp(b \text{ hr})) + k \exp(b \text{ hr})$$

où  $b$ ,  $c$ ,  $d$  et  $k$  sont les paramètres. L'avantage est que le paramètre  $k$  a ici un sens physique puisqu'il représente l'infradensité à la hauteur 0.

Le modèle a été ajusté sur chaque essence avec deux variantes : un modèle dit NBD dans lequel l'infradensité à 1,30 m ( $ID_{130}$ ) n'intervient pas, et un second modèle dit WBD que l'on force à passer par la valeur  $ID_{130}$  à la hauteur relative correspondant à 1,30 m (ce qui permet de calculer la valeur du paramètre  $c$ ). Les modèles ont été ajustés sur chaque espèce en testant la significativité d'un effet arbre aléatoire sur chaque paramètre. Lorsque l'effet arbre était significatif sur un paramètre, des relations entre la valeur obtenue pour chaque arbre de ce paramètre et les variables dendrométriques ont été recherchées. Des relations différentes ont été obtenues sur chaque espèce et dans les deux variantes de modèles (voir les détails dans REF Billard et al. 2021). Au final les modèles NBD et WBD comprennent respectivement 6 et 7 paramètres fixes. La RMSE relative obtenue pour le modèle NBD (8 % pour le Douglas et 10 % pour le sapin) s'avère sensiblement inférieure à celle obtenue avec d'autres modèles de la littérature. Avec le modèle WBD, la RMSE se réduit à 6 % pour le Douglas et 8 % pour le sapin.

## Bibliographie

Bauer, R., Billard, A., Longuetaud, F., Mothe, F., Houballah, M., Bouvet, A., Cuny, H., Colin, A., Colin, F., 2021a Modelling bark volume for six main tree species in France: Assessment of models and application at regional scale. Accepté pour publication dans *Annals of Forest Science*.

Bauer, R., Billard, A., Longuetaud, F., Mothe, F., Houballah, M., Bouvet, A., Cuny, H., Colin, A., Colin, F., 2021b Modelling variation in bark area along the stem in six main forest species. En cours de rédaction.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Colin, F., Longuetaud, F. 2019 Wood density variations between tree components should be considered to correctly estimate tree biomass available for different uses 21st International Nondestructive Testing and Evaluation (NDTE) of Wood Symposium, 2019, 99-106.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Jonard, M., Colin, F., Longuetaud, F., 2020. Improved aboveground biomass estimates by taking into account density variations between tree components. *Annals of Forest Science* 77. doi:<https://doi.org/10.1007/s13595-020-00999-1>.

Billard, A., Bauer, R., Mothe, F., Colin, F., Deleuze, C., Longuetaud, F., 2021. Vertical variations in wood basic density for two softwood species. *Accepted pour publication dans European Journal of Wood Science*.

Kozak, A., Yang, R., 1981. Equations for estimating bark volume and thickness of commercial trees in British Columbia. *Forestry Chronicle* 57, 112–115. doi:<https://doi.org/10.5558/tfc57112-3>.

Longuetaud, F., Mothe, F., Fournier, M., Dlouha, J., Santenoise, P., 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, 601–614. doi:<https://doi.org/10.1007/s13595-016-0555-4>.

Seynave, I., Bailly, A., Balandier, P., Bontemps, J.D., Cailly, P., Cordonnier, T., Deleuze, C., Dhôte, J.F., Ginisty, C., Lebourgeois, F., Merzeau, D., Paillassa, E., Perret, S., Richter, C., Meredieu, C., 2018. GIS Coop: networks of silvicultural trials for supporting forest management under changing environment. *Annals of Forest Science* 75, 48. doi:<https://doi.org/10.1007/s13595-018-0692-z>.

Tran-Ha, M., Perotte, G., Cordonnier, T., Duplat, P., 2007. Volume tige d'un arbre ou d'une collection d'arbres pour six essences principales en France. *Revue Forestière Française* 59, 609–624.

## Action non initialement programmée :

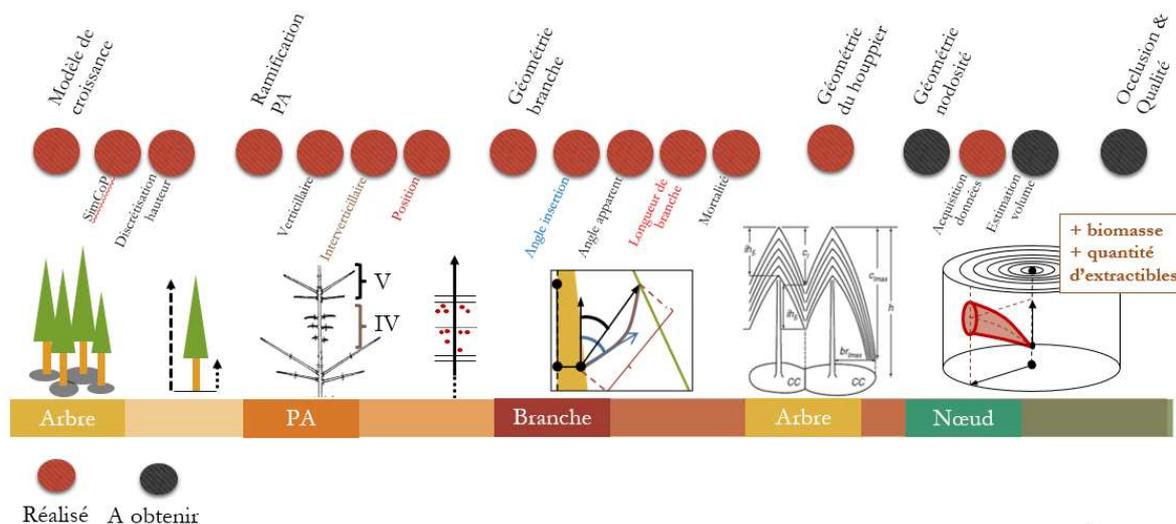
### 1. Mobilisation du logiciel SimCop afin de prédire les effets de la sylviculture sur la nodosité et les quantités d'extractibles présents dans les nœuds et écorce des résineux avec un focus spécial sur le douglas.

Ce travail avait pour objectifs de pouvoir simuler l'effet de la croissance, de la sylviculture et des conditions pédo-climatiques sur la variabilité intra-spécifique des quantités et répartition des extractibles et de définir les prochains échantillons de manière plus extensive (plus d'arbres, moins de mesures par arbre très bien localisées).

La méthodologie s'est appliquée au douglas, en tirant profit du modèle SimCop, de l'expertise de Francis Colin en modélisation de la branchaison et des possibilités à Silva d'acquérir des données géométriques et d'infra-densité de la nodosité par tomographie à rayons X. Par ce travail, l'assemblage de modèles emboîtés a été perfectionné afin de fournir des simulations en termes à la fois de tendances moyennes et d'incertitude. Pour ce faire l'approche bayésienne a été choisie.

Les différentes étapes du travail sont représentées par le schéma (figure 14) ci-dessous présenté à la réunion publique qui s'est tenue à Cluny en 2019. Il a fait l'objet d'un stage de M2 d'un élève-ingénieur AgroParisTech, Guillaume Salzet, dont le rapport est intitulé «Analyse et modélisation bayésienne de la qualité du sapin de Douglas en vue de prédire la ressource en extractibles».

Figure 14. Assemblage croissance – nodosité sur la base du simulateur de croissance SimCop, réalisé durant le stage de M2 de Guillaume Salzet (2019). PA = pousse annuelle.



### 2. Création de bases de données

Ces bases de données (BD) ont été créées selon les méthodes les plus récentes de BD, grâce à la supervision de la plateforme SIG-BD de l'unité Silva, dans laquelle ont œuvré, pour ce projet, Alain Benard et Damien Maurice.

#### a. Base de données internationale sur la branchaison du Douglas

L'objectif était de rassembler dans une seule base de données, des données de branchaison du douglas, recueillies selon différents protocoles, en France, en Belgique, en Allemagne et aux USA, afin que ces données puissent être utilisées dans l'assemblage SimCop-Qualité. Cette création a fait l'objet

du rapport de stage de M1 réalisé par Jean Weber 2020 : « Méta-analyse de la structure du houppier du sapin de Douglas ».

- b. Base de données sur les infra-densités des différents compartiments
  
- c. Base de données bibliographiques sur les composés chimiques dans les différents compartiments des arbres (voir plus loin tâche T1E)

## Action T1A

### Introduction et objectifs

#### A COMPLETER

#### **Spécificités méthodologiques**

La ressource cible était constituée de cinq essences dont trois résineux (sapin, épicéa et Douglas) avec, pour chacune desquelles, huit spécimens disponibles dans deux modalités (témoin et dynamique) de sylviculture. Pour les deux essences de feuillus (chêne et hêtre), huit arbres étaient également disponibles mais sans sylviculture particulière. Des prélèvements ont été effectués à un grand nombre de niveaux en fonction de la hauteur et les différents compartiments (écorce, nœud, duramen, aubier) ont été isolés puis broyés et enfin séchés.

- Extractions

Les extractions ont été réalisées en triplicat, à l'aide d'un ASE c'est-à-dire sous pression et température élevées. Suivant les cas, deux phases liquides différentes ont été employées : elles étaient constituées soit d'éthanol pur apportant une certaine sélectivité, soit d'eau/éthanol 50/50 (v/v), mélange déterminé lors du projet BarkTanBio comme offrant le meilleur compromis entre taux d'extraction (gamme large en polarité de molécule), faible gonflement des sciures (réduction des problèmes de colmatage) et caractère écologique prononcé.

Dans un but uniquement analytique de faciliter l'identification individuelle de certains composés dans ces mélanges complexes, il a parfois été effectué des extractions successives avec des solvants organiques de polarité croissante afin de fractionner les extraits.

Le nombre d'échantillon étant très important, l'approche analytique a évolué au cours du projet de manière à pouvoir couvrir dans les délais, l'essentiel des objectifs de départ : le nombre d'extractions et d'analyses a donc progressivement diminué par limitation du nombre de hauteurs et de spécimens étudiés, évidemment en tenant compte des résultats obtenus. D'autre part, l'accent a été placé sur les compartiments les plus accessibles en termes de ressources, les sous-produits de la première transformation du bois, c'est-à-dire les écorces et les nœuds. Par ailleurs les résineux ont été étudiés chronologiquement avant les feuillus avec pour ces derniers, un nombre de spécimens étudiés moins important du fait de l'absence de modalité de sylviculture.

- Ecorces

Le sapin a ainsi été la première essence étudiée et le plus finement avec, pour les écorces, la prise en compte d'une possible variabilité radiale de la composition chimique avec l'extraction de trois échantillons distribués autour du tronc pour les douze rondelles collectées (GOMIS 2018) sur un seul arbre. Les extraits de ces trois secteurs n'ayant pas montré de différence significative tant en quantité que composition, il n'a pas été jugé nécessaire de transposer une telle finesse d'analyse aux autres compartiment/essence. L'extraction des écorces de résineux a donc conduit à l'obtention de plus de six cents valeurs de taux d'extraits éthanol/eau.

Dans le cas des feuillus, cinq arbres par essence avec un nombre de niveaux allant de sept à onze ont été extraits à l'éthanol/eau.

- Nœuds

Pour les résineux, cinq niveaux des huit arbres de chaque essence ont été extraits à l'éthanol. (HENTGES 2018)

Les cinq spécimens de hêtre ont été extraits en général à trois niveaux différents. Pour le chêne, la difficulté d'identifier des nœuds a conduit à extraire de un à quatre niveaux de quatre spécimens.

Pour les feuillus, les extractions ont été faites en duplicat.

- Duramen/Aubier

Seuls trois niveaux par arbre ont été étudiés, préférentiellement les hauteurs 1,30 m, base du houppier et limite bois d'œuvre-bois d'industrie. Les extractions ont été réalisées à l'éthanol et au mélange éthanol/eau. Pour toutes les essences sauf le hêtre, aubier et duramen ont été isolés et traités séparément.

- **Analyses chromatographiques**

Les analyses ont été très majoritairement réalisées par LC-UV-MS/MS pour les extraits éthanol et éthanol/eau.

Pour chaque essence, après un screening de tous les extraits en mode UV-MS "simple" afin d'optimiser les séparations, les identifications ont été réalisées en mode MS/MS pour obtenir la meilleure caractérisation possible par comparaison avec les données bibliographiques, ainsi qu'avec les temps de rétention de quelques composés standards.

Ponctuellement, d'autres équipements ont été mis en œuvre pour des extraits et/ou des échantillons le nécessitant :

- un couplage GC-MS a été employé dans le cas des nœuds après dérivatisation des extraits ainsi que pour des extraits hexane, dichlorométhane, acétone et toluène/éthanol. L'identification est obtenue par comparaison avec la base de données intégrée NIST2011 et les données bibliographiques.

- un chromatographe SEC et un spectromètre de masse MALDI-TOF ont été utilisés pour évaluer la masse moléculaire des composés de nature polymérique obtenus lors des extractions, pour lesquels les autres techniques ne permettaient pas d'obtenir une précision suffisante.

- un spectromètre ATR-FTIR et la spectrométrie RMN ont également été utilisés pour caractériser globalement les grandes fonctions chimiques (et donc certaines propriétés physicochimiques) des molécules présentes dans les extraits.

- **Ecorces**

Les extraits de quatre arbres par essences ont été analysés

Pour les résineux, tous les niveaux de deux arbres de chaque modalité de sylviculture ont été analysés. Seules, trois hauteurs l'ont été dans le cas des feuillus.

- **Nœuds**

Tous les extraits de résineux ont été analysés par GC-MS. Cependant, dans le cas particulier du Douglas, les identifications n'étant pas satisfaisantes pour des composés relativement importants quantitativement, il a été procédé à des analyses complémentaires nécessitant des extractions plus importantes et des chromatographies préparatrices afin de disposer de suffisamment en masse de composés isolés purs pour réaliser des identifications par RMN.

Les extraits de feuillus n'ont pas encore été analysés.

- **Duramen/Aubier**

*Analyse qualitative :*

Au moins un extrait de chaque compartiment de chaque essence a été analysé afin de d'en identifier les composants.

*Analyse quantitative :*

Trois extraits de quatre hêtres ont été analysés.

## **Résultats obtenus**

1. Concernant les écorces

- a. Résineux

- **Taux**

Il existe une variabilité plus ou moins marquée en fonction des arbres échantillonnés et de la hauteur considérée, en particulier au niveau du houppier vert. Les teneurs en extractibles éthanol/eau sont donc assez variables avec des valeurs allant pour les sapins de 15 à 30 %, les épicéas de 15 à 35 % et les Douglas de 10 à 35 %. Elles sont très généralement plus élevées au sommet de l'arbre qu'à la base et il ne semble pas y avoir d'influence significatives des modes de sylviculture pour ce qui concerne les échantillons prélevés.

- Compositions

La nature et l'abondance des différents composés chimiques constituant les extraits (tableau 13) sont globalement les mêmes avec de très légères variations en fonction de la position de la rondelle dans le tronc pour le sapin.

Les variations longitudinales sont un peu plus marquées chez l'épicéa avec une proportion de polysaccharides par rapport aux polyphénols augmentant avec la hauteur de manière concomitante à la diminution des masses moléculaires moyennes de ces tanins de type polyphénolique. L'évolution inverse est constatée chez le Douglas avec une augmentation de la proportion de petites molécules vers le bas de l'arbre, constatation particulièrement évidente pour la taxifoline, un polyphénol très présent dans cette essence.

Tableau 13 : Principaux composés identifiés dans les écorces de résineux

Sapin	Epicéa	Douglas
Gallocatéchine	Acide protocatéchique	Syringaldéhyde
Pinoquercétine	Acide coumarique	Acide protocatéchique
Epigallocatéchine	Aldehyde protocatéchique	Aldéhyde protocatéchique
Catéchine	Acide trans-férulique glucoside	Catéchine
4'-O-Methylepigallocatéchine	Catéchine	Epicatéchine
3-O-Methylquercétine	Astringine	Taxifoline hexoside
5,6,2'-Triméthoxyflavone	Bis (3-methoxy-4-hydroxycinnamic acid) ethylene ester	Taxifoline
7-(2-Methyl-3,4-dihydroxytetrahydropyran5-yloxy)-taxirésinol	Dihydroquercetin-3-O-glycoside	Isomère de taxifoline/ +additif inconnu
Laricirésinol glucoside	7-(2-Methyl-3,4-dihydroxytetrahydropyran5-yloxy)-Taxirésinol	Eriodictyol
Isorhamnetine-3-O-glucuronique-glucoside	Resveratrol glucoside	Lutéoline + Quercétine
	Isorhapontine	Isorhamnetine-3-O-glucuronide glucoside
	Isorhamnetine-3-O-glucoronique-glucoside	

b. Feuillus

- Taux

Pour le chêne, les taux d'extraits éthanol/eau sont compris généralement entre 15 et 20 % (sauf pour un spécimen sur les cinq, beaucoup plus pauvre) et ne montre pas d'évolution notable en fonction de la hauteur. Le hêtre présente des taux compris entre 10 et 20 % avec des minimums obtenus systématiquement pour les niveaux situés à mi-hauteur des arbres.

- Compositions

L'exploitation des données étant encore en cours, les identifications de molécules sont données sous réserve (tableau 14).

Les extraits de chêne présentent une forte proportion de composés polymériques de masses moyennes assez élevées (tanins). Quel que soit l'arbre considéré, certains composés de faibles masses molaires voient leur quantité relative diminuer en fonction de la hauteur comme l'acide gallique ou au contraire augmenter comme les glycosides de taxifoline et d'acide ellagique.

Les profils chromatographiques des extraits de hêtre montrent toujours les mêmes composés avec des intensités relatives parfois variables mais sans tendance claire en fonction de la hauteur dans l'arbre, il est possible de conclure à une absence de variabilité intra- ou inter-arbre marquée. Les composés les plus fréquents et potentiellement isolables sont des dérivés glycosylés d'alcool sinapylique et de taxifoline.

Tableau 14 : Principaux composés identifiés dans les écorces de feuillus

Chêne	Hêtre
Acide gallique	Acide protocatéchique
Acide protocatéchique	Catéchine
Aldéhyde protocatéchique	Coniférine isomère 1
Catéchine	3-méthoxy- vanilline glucoside
Taxifoline hexoside (isomère 1)	Syringine
Taxifoline hexoside (isomère 2)	Coniférine isomère 2
Taxifoline hexoside (isomère 3)	Coniférine isomère 3
Acide ellagique rhamnoside	Synapaldehyde glucoside
Taxifoline	Taxifoline hexoside isomère 1
Quercétine diméthyle-éther	Coumaroyl -di-O-hexoside
Robinétine triméthyle éther	Taxifoline hexoside isomère 2
	3,4-Dimethoxy-5-hydroxybenzaldehyde
	Taxifoline-O-pentoside
	Taxifoline hexoside isomère 3
	Coniferaldehyde + additif inconnu

## 2. Nœuds

### a. Résineux

#### i. Taux

Pour les trois essences étudiées, la variabilité interspécifique en taux d'extraits à l'éthanol est assez importante puisqu'ils peuvent varier de 4 à 30 % pour le sapin et l'épicéa et de 5 à 20 % chez le Douglas. Deux tendances se dégagent : les valeurs de taux sont toujours plus faibles en haut des arbres, en particulier pour le sapin mais si la décroissance est continue chez celui-ci, la courbe des taux passe par un maximum à la moitié de la hauteur pour épicéa et Douglas.

#### ii. Compositions

Aucun des composés identifiés dans les nœuds d'épicéa ne présente une différence significative en fonction de la modalité ou bien de la hauteur. Les lignanes sont les molécules prépondérantes dans ces extraits. Le HMR notamment excède les 50% en abondance relative dans tous les arbres et hauteurs, sauf pour la plus élevée où les acides résiniques et les saccharides voient leur proportion augmenter.

Chez le sapin, les lignanes (Secoisolaricirésinol, Laricirésinol et HMR) constituent la famille la plus importante devant les sesquiterpènes (déhydrojuvabione, épimanol, etc...) dans un rapport assez constant quelle que soit la hauteur considérée. En revanche un composé très peu présent en bas de l'arbre, le D-pinitol, devient le composé le plus présent en haut. La sylviculture n'a pas d'effet visible sur ces observations.

Pour le Douglas, une composition générale est toujours présente, constituée principalement d'acide 4-paratolylvalérique, de di- et tri-méthoxycinnamate de méthyle et d'acide todomatuique dans des proportions assez constantes. Le principal caractère de variabilité est encore apporté par le D-pinitol qui devient très fréquent dans les nœuds des bois d'industrie.

Le tableau 15 résume les observations.

Tableau 15 : Principaux composés identifiés dans les nœuds de résineux

Sapin	Epicéa	Douglas
Secoisolaricirésinol	Hydroxymatairesinol	Acide 4-paratolylvalérique
D-pinitol	Iso-hydroxymatairesinol	D-pinitol
Laricirésinol	Secoisolaricirésinol	Acide phenylhexanoïque
Hydroxymatairesinol	Conidendrine	Nortrachelogenine
Déhydrojuvabione	Acide déhydroabietique	Taxifoline
Epimanol	D-pinitol	3,4-Diméthoxycinnamate de méthyle
Disaccharide	Laricirésinol	Acide todomatuique
Monosaccharide (C6)	Matairesinol	3,4,5-Triméthoxycinnamate de méthyle
Isolaricirésinol		
Juvabione		

### b. Feuillus

#### i. Taux

Etant donné le faible nombre d'extractions réalisées, en partie dû à la difficulté de définir la notion de nœud pour un feuillu et à un échantillonnage choisi autour du niveau où le diamètre du tronc est de 20 cm, il est difficile de se prononcer sur la variabilité générale du taux d'extraits qui est compris entre

2,5 et 4,2 % pour le hêtre et 8.5 et 12.5 % pour le chêne. Cependant, une tendance semble se dégager pour les deux essences, qui est celle d'un taux augmentant en fonction de la hauteur.

## ii. Compositions

L'analyse qualitative des extraits éthanoliques de nœuds de feuillus est en cours.

### 3. Duramen/Aubier

Les résultats des analyses sont consignés dans le tableau 16.

Tableau 16. Taux d'extraits éthanol et eau/éthanol obtenus pour les cinq essences en fonction des compartiments et de la sylviculture.

Essence	Solvant	Duramen		Aubier	
		Témoin*	Dynamique*	Témoin*	Dynamique*
Sapin	EtOH	2 à 6 % ↓	2 à 6 % ↑	1 à 8 % ↓	0,5 à 3 % ↑
	EtOH/H <sub>2</sub> O	2 à 7 % ↑	3 à 7 % ↑	2 à 3,8 %	2,2 à 5 %
Épicéa	EtOH	2 à 7 %	2 à 12 % ↑	2 à 3,8 %	2,2 à 5 %
	EtOH/H <sub>2</sub> O	3 à 9 %	3 à 13 %	4 à 7 %	4 à 7 %
Douglas	EtOH	2 à 5 %	3 à 7,5 % ↑	1,5 à 3,7 %	1,2 à 4,4%
	EtOH/H <sub>2</sub> O	5 à 8 %	5,4 à 12 %	2,7 à 5 %	3 à 5,5 %
Chêne	EtOH	5 à 16 % ↑		4 à 14 % ↑	
	EtOH/H <sub>2</sub> O	5 à 20 % ↑		9 à 20 % ↑	
Hêtre	EtOH	0,8 à 5,5 %			
	EtOH/H <sub>2</sub> O	2 à 6,4 %			

\*: sylviculture si applicable

↑ et ↓: tendances à un taux plus élevé vers le haut et vers le bas de l'arbre respectivement

#### a. Résineux

##### i. Taux

Au vu des fourchettes de taux mesurées, il est incontestable qu'il existe une variabilité assez importante entre les arbres quelle que soit l'essence ou la modalité considérée. Il est cependant possible de dégager quelques tendances :

-L'extraction à l'éthanol/eau 50/50 fournit toujours plus d'extraits que celle à l'éthanol pur.

-Pour épicéa et Douglas, les taux d'extraits de duramen sont toujours supérieurs à ceux de l'aubier et les arbres ayant profité d'une sylviculture dynamique produisent plus d'extractibles que les témoins. Pour ces deux essences, il est difficile de mettre en évidence une variabilité longitudinale.

-Pour le sapin, il semble que les taux obtenus à partir du duramen ne sont pas influencés par la sylviculture alors que ceux de l'aubier décroissent pour les spécimens de modalité dynamique. De plus, pour les arbres témoins les taux dans l'aubier peuvent dépasser ceux du duramen. En termes de variabilité longitudinale, il semble que les taux augmentent en fonction de la hauteur dans l'arbre pour les spécimens dynamiques alors que ce serait plutôt l'inverse pour les témoins.

##### ii. Compositions

L'analyse qualitative des extraits est en cours

b. Feuillus

i. Taux

En considérant l'écart entre les valeurs obtenues, la variabilité est ici aussi très importante.

-L'extraction à l'éthanol/eau 50/50 fournit toujours plus d'extraits que celle à l'éthanol pur.

-Le chêne est l'essence produisant le plus d'extraits avec très peu de différences entre les taux du duramen et de l'aubier. En valeur, ces taux augmentent toujours vers le haut de l'arbre.

-Le hêtre présente également des taux variant de manière importante entre les différents spécimens ainsi qu'entre les hauteurs de prélèvement. Il n'est pas possible de trouver une tendance évidente. En valeur absolue, ces taux sont comparables à ceux du sapin.

ii. Compositions

L'analyse qualitative des extraits est en cours

**Conclusion**

**A compléter**

**Perspectives**

**A compléter**

**Autres travaux annexes**

**Développement de méthodes d'analyse par spectroscopie proche infrarouge (SPIR/NIRS)**

L'objectif de ces travaux réalisés par le CRITT Bois était de développer des méthodes d'analyse rapide des écorces et des nœuds de Douglas, Epicéa et Sapin sous forme de poudre ou d'échantillon brut (morceau) par spectroscopie proche infrarouge pour :

- Déterminer / contrôler l'essence d'origine d'un lot d'écorces ou de nœuds.
- Etablir des droites d'étalonnage afin de pouvoir estimer rapidement la composition chimique des écorces ou des nœuds (dans notre cas, le taux de composés extractibles avec un mélange eau/éthanol déterminé par le LERMAB).

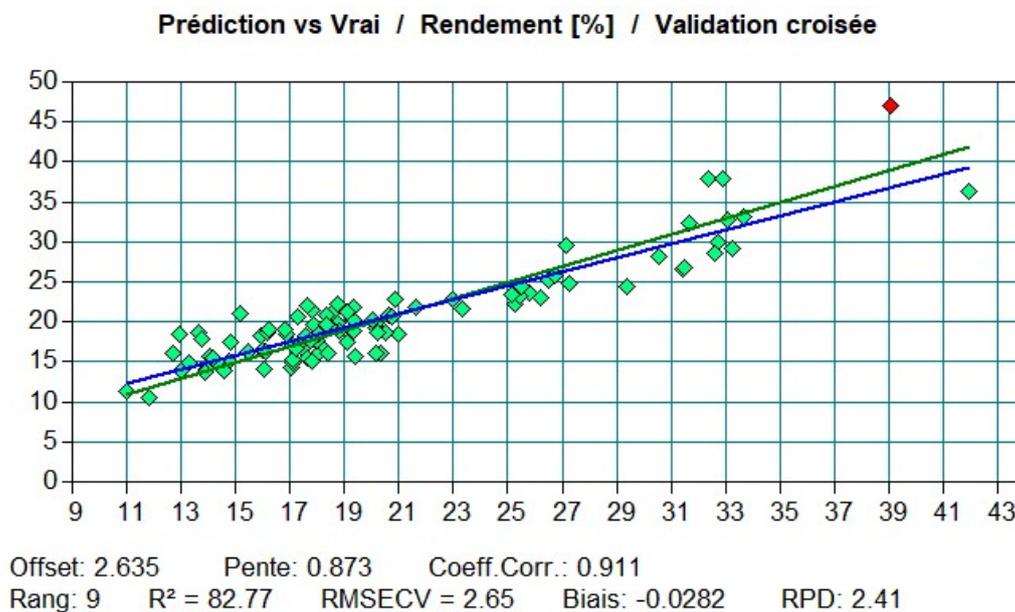
Les échantillons d'écorces et de nœuds ont été préparés par le LERMAB (tableau 17).

Tableau 17. Matériel résineux disponible pour les analyses chimiques

	Douglas	Epicéa	Sapin
<b>Ecorces</b>	97 poudres	98 poudres	88 poudres
	54 morceaux (externe)	51 morceaux (externe)	18 morceaux (externe)
	53 morceaux (interne)	51 morceaux (interne)	18 morceaux (interne)
<b>Nœuds</b>	33 poudres	33 poudres	25 poudres
	16 morceaux	16 morceaux	28 morceaux

Les mesures ont été effectuées avec un spectromètre Matrix F Bruker avec option Emission pour des mesures avec une sonde sans contact. Il s'agit d'un spectromètre NIR-FTIR (proche infrarouge à transformée de Fourier) avec un détecteur de type InGaAs contrôlé en température. Les paramètres d'acquisition étaient les suivants : gamme spectrale de 4000 à 12000  $\text{cm}^{-1}$ , résolution de 8  $\text{cm}^{-1}$ , 10 scans par mesure, 2074 points par spectre.

Le logiciel OPUS 7.5 (Bruker) a été utilisé pour l'acquisition, l'analyse et le traitement des données spectrales. Les résultats obtenus montrent qu'il est possible d'utiliser la spectroscopie proche infrarouge pour la classification des écorces ou des nœuds et pour estimer leur taux de composés extractibles. Cela est très intéressant dans l'optique du développement de méthodes de contrôle non destructif à destination des entreprises qui seront amenées à valoriser ces sous-produits de la filière bois. Un exemple de prédiction du taux de composés extractibles des écorces d'épicéa (poudre) par régression PLS (Partial Least Squares) est donné sur la figure 18 suivante.



**Figure 18.** Exemple de prédiction du taux de composés extractibles des écorces d'épicéa (poudre) par régression PLS. L'axe des abscisses donne les valeurs mesurées par le LERMAB et l'axe des ordonnées les valeurs prédites.

## Action T1C Intégration de l'échelle arbre à l'échelle ressource régionale

### Objectifs

La tâche 1C avait pour objectif de développer les connaissances sur les quantités d'extractibles présentes en forêt, à des échelles compatibles avec le dispositif d'inventaire forestier national (IFN) réalisé par l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN), à savoir les régions, les départements, les bassins d'approvisionnement des industries... Elle visait notamment à dresser une première évaluation des quantités d'extractibles potentiellement mobilisables en forêt et à les localiser globalement au sein des massifs des régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté.

La tâche 1C se positionnait à l'interface entre les tâches 1A et 1B d'acquisition de connaissances scientifiques, et la tâche intégrative 1D de création d'un démonstrateur régional destiné à accompagner le développement des nouvelles filières extractibles dans l'Est.

### Réalisation

Concrètement, la tâche a consisté à enrichir le corpus d'informations produit en routine par l'enquête IFN, laquelle permet déjà d'estimer le volume de tiges et de branches au niveau régional. Cet enrichissement a été fait par le calcul des volumes, biomasses et quantités d'extractibles pour différents compartiments (nœuds et écorce en particulier) des essences étudiées. Les coefficients (ou les équations, dans le cas des volumes d'écorce) ont été développés à Silva avec l'objectif d'être directement applicables aux données déjà disponibles à l'IGN. Ils ont été utilisés pour calculer le volume et la biomasse des compartiments, tandis que les teneurs en extractibles établies par le LERMaB ont été appliquées pour estimer les quantités d'extractibles dans ces compartiments (Figure 19).

L'application des équations et coefficients produits par la recherche à l'ensemble des arbres mesurés par l'enquête d'inventaire forestier national permet alors d'estimer pour les différentes essences concernées (douglas, sapin, épicéa, pin sylvestre, chêne, hêtre) les volumes, biomasses et quantités d'extractibles d'écorce ou de nœuds présents dans la ressource forestière et à des échelles macroscopiques, en utilisant les estimateurs statistiques et les outils de calcul standard de l'IFN (Figure 20).

A coefficients constants, les résultats de ressource sont mis à jour chaque année automatiquement avec l'arrivée d'une nouvelle campagne IFN.

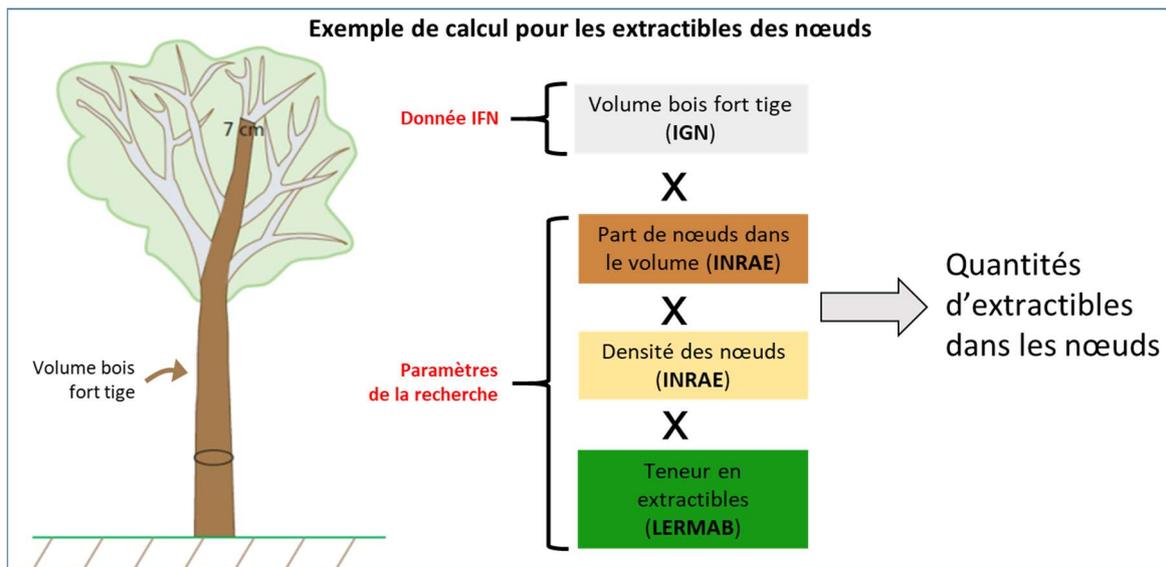


Figure 19 : principe de calcul des quantités d'extractibles à l'échelle de la ressource forestière. L'enquête IFN permet de connaître le volume bois fort tige à l'échelle de la ressource d'un territoire. De leur côté, les recherches menées à Silva et au LERMaB dans le projet ExtraForEst ont permis de préciser la part des différents compartiments (écorce et nœuds en particulier) dans le volume, ainsi que leur densité et leur teneur respectives en extractibles. Le croisement de ces différentes informations permet in fine de calculer les quantités d'extractibles dans l'écorce et les nœuds au niveau agrégé des territoires.

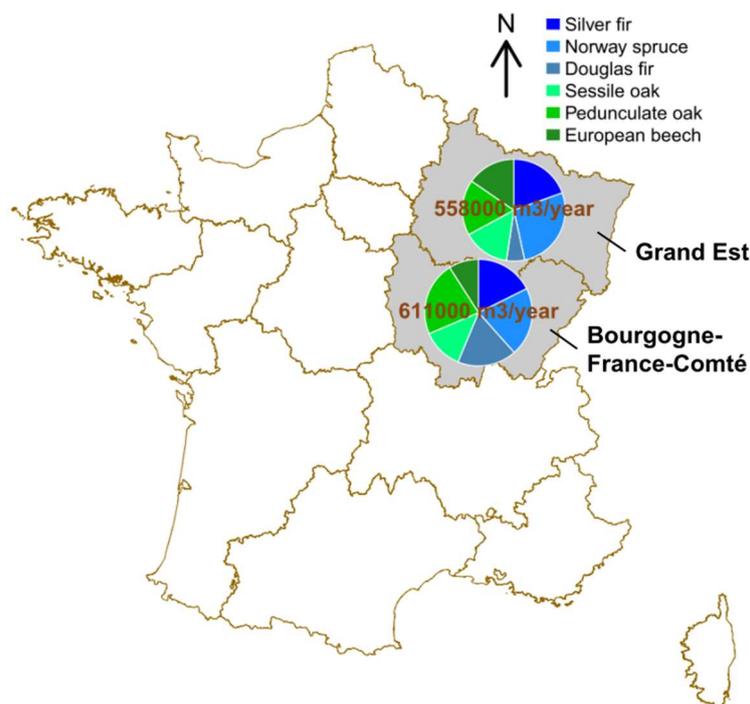


Figure 20 : exemple d'évaluation des volumes d'écorce prélevés annuellement en Grand Est et en Bourgogne-Franche-Comté, par application des équations développées à Silva aux arbres prélevés mesurés par l'IFN, puis intégration des données de niveau arbre à l'échelle agrégée de la ressource régionale grâce aux estimateurs statistiques de l'IFN.

### Faits marquants

- Conception et mise en œuvre d'une « chaîne de production » collaborative entre Silva, le LERMaB et l'IGN pour la production de nouvelles informations bioéconomiques grâce à l'intégration des différentes données.
- Enrichissement de la base de données IFN, avec l'adjonction de 36 nouvelles données interrogeables sur le volume, la biomasse et les quantités d'extractibles dans l'écorce et les nœuds des 6 essences étudiées.
- Présentation de l'approche et de résultats aux différentes réunions publiques ExtraForEst et dans le numéro 96 de la revue IGN magazine.
- Contribution à trois articles scientifiques avec :
  - Estimation des quantités d'extractibles dans l'écorce de sapin prélevée annuellement en région Grand Est (Article Pichancourt *et al.*, en évaluation à *Annals of Forest Science*) ;
  - Estimation des ressources (volume, biomasse et quantités d'extractibles) en écorce prélevées annuellement pour les 6 essences du projet dans les régions Grand Est et Bourgogne-Franche-Comté (Article Bauer *et al.*, accepté par *Annals of Forest Science*) ;
  - Estimation des ressources forestières en écorce respectivement liées au BO et au BIBE (Article Bauer *et al.*, en préparation).

## Action T1D : Construction d'un démonstrateur d'outil d'aide à la décision

### Objectifs

L'objectif de la tâche était de développer un prototype d'outil d'aide à la décision en assemblant des « briques » logicielles déjà existantes à l'IGN et à Silva. Concrètement, l'action a été menée en rapprochant des outils préexistants développés par l'IGN, auxquels ont été ajoutés plusieurs nouvelles fonctionnalités spécifiquement liées à la bioéconomie, avec l'outil CAT (*Carbon Accounting Tool*) développé par Silva. D'un côté, la base de données IFN enrichie des nouvelles données produites dans l'Action 1C et les outils statistiques d'interrogation de la ressource de l'IGN permettent de quantifier les ressources (en volume, biomasse, extractibles) à des échelles macroscopiques (région, département, bassin de production). De l'autre côté, l'outil CAT permet de modéliser les flux de matière entre les secteurs d'une filière afin de distribuer les volumes, biomasses, stocks de carbone et d'extractibles entre les produits récoltés. Le rapprochement des deux outils dans un même environnement logiciel permet ainsi d'avoir une vue plus complète de la filière en connectant l'amont (la ressource forestière) et l'aval (les types d'industries et leurs produits).

### Réalisation

L'outil web développé par l'IGN (<https://extraforest.ign.fr/>) est accessible sur login et mot de passe. Il offre quatre grands types de fonctionnalités (Figure 21) :

- Localisation de points d'intérêts : L'outil permet de créer et décrire des objets géographiques ponctuels (scierie, papeterie...) et de les faire figurer sur un fond cartographique IGN. La couleur et la taille du point varient selon la catégorie qui lui a été affectée et les volumes de matière transformés. L'idée est de pouvoir positionner les différents acteurs dans l'espace, ce qui fournit un premier élément d'analyse du système économique d'un territoire donné (Figure 22).

- Création de bassins géographiques : Divers outils (sélection dans une liste d'entités administratives telles que des communautés de communes, tracé de cercles de rayon donné, calcul d'isochrones ou d'isodistances...) permettent de créer des contours géographiques, qui peuvent par exemple correspondre au bassin d'approvisionnement d'une entreprise dont le ponctuel a été défini lors de l'étape précédente. Il est ensuite possible d'enregistrer les bassins selon différents formats directement utilisables dans un Système d'information géographique, ainsi que d'interroger les surfaces forestières qui s'y trouvent en interrogeant la carte forestière (la BD Forêt v2 de l'IGN), qui décrit la couverture forestière française selon une nomenclature comprenant 32 grands types de peuplements.

- Calcul de résultats sur la ressource : Pour les différents contours créés, il est possible d'interroger les données IFN enrichies des nouvelles données produites dans l'Action 1C afin de calculer les volumes, biomasses ou quantités d'extractibles dans les différents compartiments des ressources forestières (tige, écorce, nœuds, branches). Le calcul peut être fait pour le stock sur pied, les prélèvements actuels ou les disponibilités futures (région Grand Est uniquement) simulées préalablement avec le modèle MARGOT.

- Analyse de filière : Les données sur la récolte actuelle ou les disponibilités futures en bois peuvent être mises en forme dans un fichier csv intégrant toutes les données nécessaires au logiciel CAT. Le fichier exporté de l'environnement logiciel IGN peut ainsi directement être importé dans l'outil CAT (logiciel libre) pour procéder à une analyse de la filière du territoire correspondant.

En plus d'être disponibles dans l'outil spécifiquement développé pour ExtraForEst, ces trois différentes fonctionnalités ont été intégrées à l'Outil de Calcul des Résultats d'inventaire forestier (outil OCRE), qui est l'outil standard développé par l'IGN pour le calcul de résultats statistiques sur la ressource forestière à partir de l'interrogation des données IFN. Elles seront également reprises dans le démonstrateur d'analyse de la ressource développé dans le projet DHDA.

# Bienvenue dans ExtraForEst

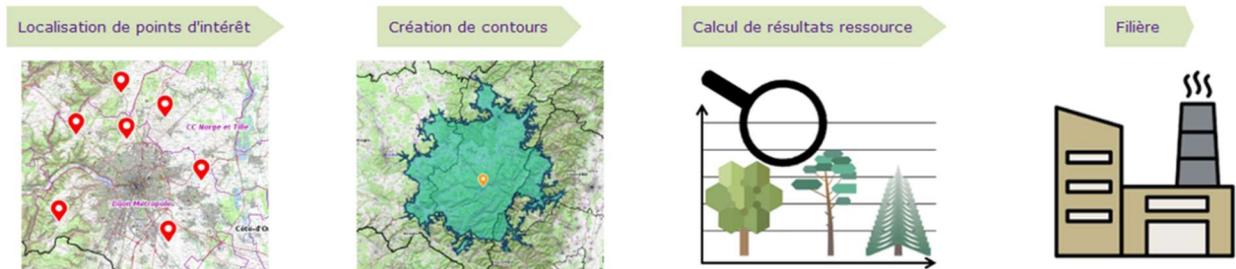
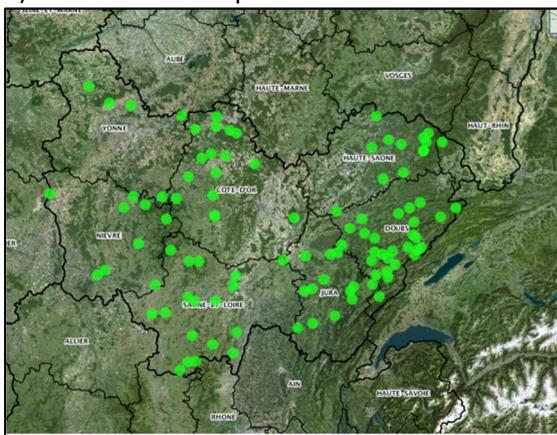
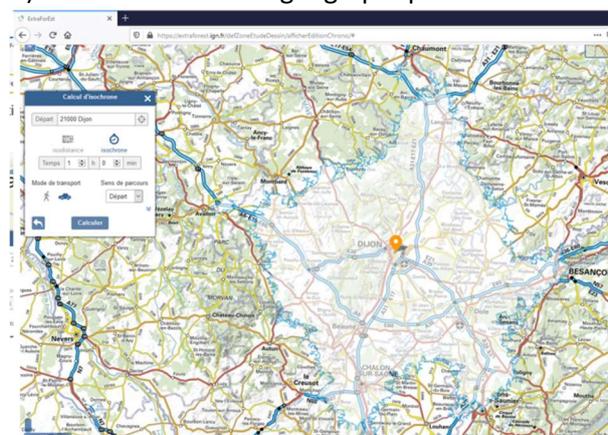


Figure 21 : page d'accueil de l'outil développé par l'IGN dans ExtraForEst, avec les icônes d'accès aux quatre grandes fonctionnalités offertes par l'outil.

## A) Localisation de points d'intérêt



## B) Création de bassins géographiques



## C) Calcul de résultats ressource au sein du bassin correspondant à 1h de voiture depuis Dijon

Essence	Extractibles d'écorce prélevés pour essences ExtraFor_Est x1000tonne / an		
<b>Total</b>	<b>81</b>	<b>±</b>	<b>10</b>
Chêne rouvre	22	±	5
Chêne pédonculé	13	±	4
Hêtre	11	±	3
Épicéa	11	±	4
Sapin	12	±	3
Douglas	13	±	5

Figure 22 : illustration de fonctionnalités offertes par l'outil IGN, dont la création et la visualisation de points d'intérêt, la création de bassins géographiques et le calcul de statistiques forestières relatives aux bassins créés par interrogation des données IFN qui s'y trouvent.

Outre le développement de cet outil intégrateur, un travail plus spécifique a été mené en juillet 2020 à l'occasion d'un CDD de Jean Weber (financé par ExtraFor\_Est et copiloté par Silva et l'IGN), sur le fonctionnement et l'utilisation pratique du logiciel CAT qui permet de calculer les stocks de carbone et d'extractibles entre les différentes catégories de produits bois d'une filière.

Ces travaux se sont poursuivis et étendus de février à juin 2021 dans le cadre du stage de M2 de Jean Weber financé par ExtraFor\_Est et copiloté par Silva et l'IGN. Le stage a permis d'analyser et de tester le rapprochement possible entre l'outil développé par IGN dans ExtraFor\_Est, CAT et l'outil d'analyse des flux des filières biomasse (AF Filières) développé par l'INRIA, lequel permet de décrire

tous les maillons d'une filière et de calculer des données réconciliées sur les flux de bois entre ces maillons. Jean a travaillé en particulier à l'élaboration d'une méthode, basée sur l'utilisation conjointe et complémentaire des outils AF Filières et CAT, qui permet, à partir des données de prélèvement mesurées par l'IFN, de quantifier les flux de bois, de carbone et d'extractibles au sein d'une filière bois territoriale (massif Vosges montagne). Sachant que les données AF Filières décrivent les filières à l'échelle régionale, Jean Weber a également travaillé à la réalisation d'une enquête permettant de recueillir des informations sur la filière locale et ainsi de mieux prendre en compte les spécificités du territoire.

À l'issue de tous ces travaux, il existe une méthode générique pour analyser les flux de matière qui se base sur (1) les données IFN, (2) la traduction des résultats réconciliés d'AF Filières dans CAT et (3) des enquêtes auprès des professionnels. L'utilisation complémentaire de ces différentes sources d'informations et outils permet en effet de mieux connaître les flux de bois entre l'amont forestier et les différents maillons de l'aval à l'échelle territoriale. Cette méthode est entièrement reproductible sur d'autres territoires.

Dans le même temps, l'équipe ExtraFor\_Est a travaillé avec FIBOIS Grand Est, l'INRIA et la DRAAF Grand Est qui, à l'initiative de Jean-Luc Matte, a proposé de procéder à une application d'AF Filières à la région Grand Est afin de promouvoir l'outil auprès des acteurs professionnels. Ce travail a permis d'actualiser les données pour la filière forêt-bois du Grand Est et d'améliorer l'ergonomie de l'outil AF Filières, dont la nouvelle version et les résultats actualisés pour le Grand Est ont été présentés aux professionnels lors d'un webinaire le 10 mai 2021.

En conclusion, les différents développements réalisés (outil IGN, méthodologie développée dans le cadre du stage de Jean Weber, actualisation d'AF Filières) permettent d'appréhender de manière plus exhaustive et détaillée la filière forêt-bois, en faisant la jonction entre la ressource sur pied (stock sur pied, prélèvements...) et le monde économique (flux de matières entre les secteurs d'activité) au travers de plusieurs métriques telles que les stocks de bois, de biomasse, de carbone et d'extractibles. Une telle approche intégrative est indispensable pour évaluer les impacts ou les potentialités de changements dans le schéma organisationnel de la filière, par exemple dans le cas de l'émergence d'une filière extractibles, ainsi que pour apprécier l'impact sur la filière d'éventuelles modifications dans la ressource forestière.

#### **Faits marquants :**

- Développement d'un prototype d'outil fonctionnel à partir d'un assemblage de briques logicielles existantes enrichies de nouvelles données et fonctionnalités bioéconomiques, pour permettre au final une analyse plus exhaustive des flux de matières dans la filière forêt-bois régionale. La méthode est entièrement répliquable sur d'autres territoires ; les outils sont génériques. L'outil est accessible en ligne ici : <https://extraforest.ign.fr/extraforest>.
- Présentation de l'approche et démonstration de l'outil aux différentes réunions publiques ExtraForEst ainsi qu'à un webinaire sur la chimie verte organisée par la CCI Côte d'Or et le Parc national de forêt le 24 novembre 2020. Présentation de l'outil auprès des pôles de compétitivité IAR et Xylofutur. Le support qui a servi à la démonstration de la dernière version de l'outil est disponible ici : [https://www6.inrae.fr/extraforest/Media/Fichier/ExtraFor\\_Est/Manifestations/journee-sensibilisation-chimie-verte/presentation-Henri-Cuni](https://www6.inrae.fr/extraforest/Media/Fichier/ExtraFor_Est/Manifestations/journee-sensibilisation-chimie-verte/presentation-Henri-Cuni).
- Présentation de l'approche du travail de M2 de Jean Weber lors de la 8<sup>e</sup> réunion publique ExtraForEst le 22 avril 2021. Le support de présentation est disponible ici : [https://www6.inrae.fr/extraforest/Media/Fichier/presentation-huitieme-reunion-publique/ExtraFor\\_Est-Jean-Weber-Henri-Cuny--Representation-des-filieres-a-une-echelle-territoriale--methodologie](https://www6.inrae.fr/extraforest/Media/Fichier/presentation-huitieme-reunion-publique/ExtraFor_Est-Jean-Weber-Henri-Cuny--Representation-des-filieres-a-une-echelle-territoriale--methodologie).
- Contacts initiés avec la CCI Côte d'Or, le Parc national de forêts, l'ADEME Bourgogne-Franche-Comté, l'interprofession FIBOIS Grand Est et un panel de professionnels (gestionnaires, exploitants, scieurs) dans le cadre du développement de la méthode d'analyse des flux de matière bois à l'échelle territoriale (stage M2 de Jean Weber).

- Collaboration avec la DRAAF, l'interprofession FIBOIS Grand Est et l'INRIA pour actualiser les données et améliorer l'ergonomie d'AF Filières dans le cadre d'une application de l'outil à la région Grand Est.
- Contribution à un article scientifique sur le rapprochement entre les outils IGN et l'outil CAT (Article Pichancourt *et al.*, accepté à *Annals of Forest Science*)

## Task T1E. Synthèse des connaissances sur la chimie du bois

### Rassemblement des données de chimie du bois

Ce travail est mené par Béatrice Richard Ingénieure à Silva. C'est un travail considérable qui se heurte au fait que les solvants ont évolué au cours du temps, avec une tendance récente à l'utilisation de solvants verts notamment eau et eau + éthanol. Cette évolution des solvants et plus largement des conditions d'extraction rend difficile la comparaison des résultats d'étude. Les solvants doivent donc être soigneusement identifiés. Le matériel végétal est souvent mal précisé et enfin rares absentes ? sont les comparaisons des taux des différents compartiments de l'arbre avec les mêmes protocoles d'extraction.

L'apport essentiel de ce travail ne sera pas d'abord dans la quantification des taux mais bien plutôt dans l'identification des différents composés présents dans les extraits.

Ce travail laborieux est en cours et plusieurs réunions avec les ingénieurs Alain Benard et Damien Maurice de la plateforme SIG-BD de l'UMR Silva de INRAE se sont tenues pour fixer le cadre conceptuel de la base de données.

En tableau 18 est présentée une des nombreuses fiches de synthèse des informations concernant les composés phénoliques identifiés dans les écorces de sapin et d'épicéa, présentées lors de la 4<sup>ème</sup> réunion publique du 4 avril 2019.

Tableau 18. Un exemple de fiche de synthèse des données bibliographiques.

composés extractibles <b>phénoliques</b> <i>Abies alba</i> Mill. <i>Picea abies</i> Karst.						
	Famille	Nom composé	Ecorces tige € = epicatechin equivalent (dosage Folin) R = callus resin			Ecorce racine
	<b>lignanes</b>	Secoisolariciresinol Lariciresinol Taxirésinol et dérivés Pinoresinol	(R)1,4% – 2,5% (R)3,2% – 6,1%  (R)10,4% 18,6%			
	<b>Acides phénoliques et dérivés glucosides</b>	Gallic, Homovanillic, Protocatehuic, P-hydrobenzoïc Vanillic, P-coumaric, Cinnamic, Ferulic, benzoïc	0,2% (e) <b>(R)7,7%-17,7%</b> <b>=p-coumaric acid</b>			
<b>Monomères phénoliques</b>	<b>Stilbènes glycoside</b>	<b>Astringin, (E)-Astringin</b> Flavan-3-ol gallates, <b>(E)-Isorhapontin, (E)-piceid</b>	1,4% (e) 0,6% (e)	1,5 %	(e) 2,7 % - 4,8% (e) 3,6 % - 5,4% (+)=écorceinterne	0,53%-8,29% (+)=près tige
	<b>Stilbènes aglycon</b>	Piceatannol Resveratrol isorhapontigenin		0,14%	(e) 0,18%-1,53% (+)=à 10m souche et 1 jour de l'abattage	
	<b>Flavonoïdes</b>	<b>Taxifolin</b> Catechin Epicatechin, Catechin tetramethyl ether, (epi)robinetinidol, (epi)fisetinidol, Taxifolin-3'-O-glucoside				Cathéchin 0,05% - 0,1%
<b>Oligomères phénoliques</b>	<b>Stilbènes dimériques</b>	Astringin-astringin Astringin-isorhapontin (piceasides)		0,26%		
	<b>Tanins condensés</b>	<b>81% : Prodelphinidines</b> <b>100% : 19% : Procyanidine</b>	(e) 1,74% , (e)1% 1,56% (thiolysé) <b>0,4% (thiolysé)</b>		(e) 0,4% -1,6% 0,13% – 1%	

### Synthèse globale

La synthèse globale n'est pas réalisée. Elle est repoussée à décembre 2021, dans le cadre du contrat ExtraFor\_Est FEDER. Elle complètera l'étude de marché, déjà réalisée dans le cadre de ce contrat FEDER, grâce à la prestation « Etude de marchés » confiée au pôle de compétitivité IAR (Louis Tiers). La synthèse tirera profit des connaissances issues de l'étude bibliographique menée dans le cadre de cette action T1E et des résultats non encore obtenus dans le présent contrat ExtraFor\_Est MAAF sur les feuillus particulièrement.

## Tâche T2 Communication Diffusion

### Action T2A Communication

**Personnes impliquées** : Francis Colin (Silva), Corinne Martin (Silva [APT]), Sarah-Louise Filleux (INRAE jusque juillet 2020), Dalièna Ludovsky (Stagiaire Licence communication 2019), Théo Brisset (stagiaire M2 communication 2020), Tatyana Ramazzotti (stagiaire M1 communication 2021) et Karim Bendouba (stagiaire M1 communication 2021).

Mise en place d'une stratégie de communication

La mise en place de cette stratégie a été permise au travers de la prestation de service du bureau de communication OhWood durant une année à cheval entre 2019 et 2020.

**Les objectifs généraux** suivants ont été définis :

- Favoriser une sensibilisation aux enjeux de la chimie du bois
- Convaincre des acteurs de la filière forêt bois de devenir partie prenante du projet
- Sensibiliser le monde de la chimie à la biomasse forestière
- Co-construire un outil d'aide à la décision
- Participer à la diffusion des résultats au fil de l'eau.

Ces objectifs ont été déclinés en **objectifs opérationnels** :

**1. Construire une stratégie de communication globale**

- ✓ Identifier les cibles
- ✓ Vulgariser les résultats d'EXTRA FOR\_EST au fur et à mesure auprès des forestiers/chimistes (*Francophone : France/Belgique/Québec*)
- ✓ Faire rayonner le projet au-delà auprès des élus et des journalistes (*Français*)

**2. Sensibiliser et impliquer des acteurs de la filière forêt-bois et de la chimie**

- ✓ Concevoir le format des 3 comités consultatifs : OAD, diffusion, enquêtés
- ✓ Animer les comités pour assurer une participation des acteurs
- ✓ Assurer un suivi

**3. Diffuser les connaissances auprès de la filière forêt-bois et chimie**

- ✓ Vulgariser l'information
- ✓ Mettre en lumière les potentiels
- ✓ Adapter le discours aux cibles identifiées

Les moyens mis en œuvre ont été décomposés en moyens de diffusion, relations presse, influence et animation.

La diffusion a été réalisée via

- La création et la réorganisation en cours de projet du site internet
- La création régulière de contenu pour le site
- L'animation des réseaux sociaux
- La création d'une newsletter

L'animation a consisté en :

- La coordination et animation des réunions publiques
- La constitution d'un fil rouge en lien avec les différents intervenants
- L'animation des temps de questions/réponse
- Les compte-rendus à l'issue des réunions publiques
- La création de contenus pour alimenter les supports d'ExtraFor\_Est

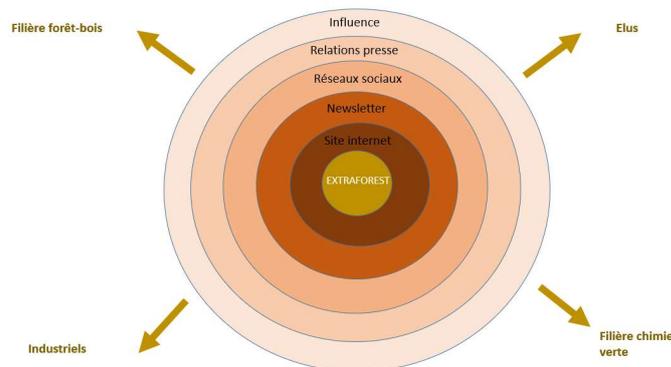
Les relations presse se sont concrétisées par :

- La création d'un fichier presse
- La rédaction & l'envoi de communiqués de presse
- L'organisation de points presse.

- Une revue de presse
- Enfin l'influence du projet a été recherchée au travers
- De relation avec **les élus** (*territorial et national*)
  - La cartographie & listes des cibles à rencontrer
  - L'identification de leurs intérêts
  - La production d'argumentaire
  - La présence aux événements (*chimie (verte) du végétal/bois-forêt/valorisation du territoire/scientifique*)
  - Le recensement des événements sur ces 4 thématiques
  - La présence d'un membre d'ExtraFor\_Est dans des événements bien identifiés.

Toute cette approche peut être schématisée selon la figure 23.

Figure 23. Schéma de l'emboîtement des différents moyens de communication-diffusion organisés par le bureau de communication OhWood pour le projet ExtraFor\_Est.



## Résultats

### Communication interne

Une communication a été réalisée régulièrement au sein du laboratoire Silva pour informer du projet mais aussi des événements ou actions relatives à ce dernier. Cela s'est fait par le biais des journaux internes aux structures d'AgroParisTech (La Feuille), le PJJ (INRAE) et la Gazette Silva (journal interne au laboratoire) ainsi que par le biais de listes de diffusions. Une communication spécifique a été conçue pour les faits suivants :

- Annonce de la création du site internet
- Organisation des différentes réunions publiques
- Arrivées des différents stagiaires travaillant sur le projet
- Les retombées Presses et articles scientifiques publiés

Le projet a été aussi présenté lors de différents séminaires internes tels que les journées d'animations scientifiques Silva.

- Journée Jeunes Scientifiques Silva du 18 juin 2018 : présentations par des doctorants et stagiaires de travaux de recherches portant sur le projet
  - . Hakima Ammour stagiaire M2 : « Mesure et modélisation de la densité du bois des nœuds pour l'estimation des quantités d'extractibles chez le sapin et le Douglas »
  - . Antoine Billard doctorant : « Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre »
  - . Rodolphe Bauer doctorant : « Estimation des volumes des compartiments des arbres riches en composés chimiques extractibles »
- Journée d'animations scientifique du 21 mai 2019 :

. Francis Colin : « Le projet Extrafor\_Est : État d'avancement »  
. Rodolphe Bauer : « Biomasse des compartiments écorce et nœuds »  
. Jean-Baptiste Pichancourt : « Assemblage de modèles, propagation des erreurs et intervalles de confiance des simulations. Le cas de l'outil d'aide à la décision d'Extrafor\_Est »

- Journée d'animation scientifique Silva du 04 décembre 2020 :

. Mojtaba Houballah : « Introducing data reconciliation functionality to the carbon accounting tool CAT for better quantifying flows of wood, carbon, and chemicals in regional forest-wood chains »

- Journée d'animation scientifique Silva du 07 juin 2021 :

. Colin Francis, Cuny Henri, Gérardin Philippe : « Bioéconomie et Forêt – De nouvelles données et de nouveaux outils pour l'analyse des ressources forestières »

Enfin des séances de présentations ont été organisées au sein de l'équipe PHARE et Woodstock des travaux et résultats des recherches menées dans le cadre des stages dédiés au projet.

## **Communication externe**

### Participation à des colloques ou conférences

Les membres du projet ont depuis le début régulièrement, chaque année, pu présenter le projet ainsi que les travaux de recherches et les résultats qui en ont découlés à différents types de publics : étudiants, chercheurs, communauté scientifique, grand public....

Cela s'est fait au travers de plusieurs types de manifestations :

- Conférences internationales

-Conférence WoodChem2019 20-22 novembre 2019 :

. Francis Colin and the ExtraFor\_Est's team, 2019. For supporting the forest-wood sector, research in ExtraFor\_Est and other initiatives must now focus on the implementation of an industrial strategy. Invited speech. International

. Clément Fritsch, Maree Brenan, Sylvain Cosgun, Stéphane Dumarçay, Francis Colin, . . Philippe Gérardin, 2019. Characterization of variability of extractives presents in the bark of selected industrial wood species of North-East France. Poster.

- Colloque « 21st International Nondestructive Testing & Evaluation of Wood Symposium » Freiburg 24-27septembre 2019

Rodolphe Bauer et al., 2019 : « Modelling the volume of bark from thickness measurements obtained by Swedish bark gauge, optical reading and X-ray CT images. Application to extractives quantifying.”

Antoine Billard et al., 2019 : “Wood density variations between tree components should be considered to correctly estimate tree biomass”

- Colloques francophones

-Journée d'animation scientifique du GDR Sciences du Bois 20-22 novembre 2018 à Cluny :

Pichancourt Jean-Baptiste, Caurla Sylvain, Colin Antoine, Cuny Henri, Fortin Mathieu, Colin Francis « Extraforest : conception d'un outil d'aide à la décision pour rapprocher la chimie et les filières forêt-bois en régions Grand-Est et Bourgogne Franche- Comté » Poster + flashtalk

-Journées d'animations scientifiques du GDR Sciences du bois 18-20 novembre 2019 à Épinal :

Bauer Rodolphe, Longuetaud Fleur, Mothe Frédéric, Bouvet Alain, Billard Antoine, Colin Francis, 2019. Étude et modélisation des volumes des écorces. Poster + flashtalk

Billard Antoine, Colin Francis, Mothe Frédéric, Bauer Rodolphe, Longuetaud Fleur, 2019. Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre : cas du sapin pectiné. Poster + flashtalk GDR

Colin Francis, 2019. Une double contribution pour la chimie du bois et la bioéconomie régionale : les projets régionaux ExtraFor\_Est et Gemm\_Est. Poster + flashtalk

- Journée d'animation scientifique du GDR Sciences du Bois 18-20 novembre 2020 Grenoble

Fritsch Clément, Brennan Maree, Cosgun Sylvain, Dumarçay Stéphane, Colin Francis, Gérardin Philippe : « Valorisation des extractibles présents dans les écorces d'essences du Nord-Est de la France » Poster + flashtalk

- Colloques spécialisés ou Workshop

-Journées CAQSI 2018 UMR PIAF Clermont Ferrand 27 - 29 mars 2018 : présentation orale de F. Colin : « Extractibles des Forêts de l'Est : un projet pour sensibiliser la filière forêt-bois à la chimie »

-Journées CAQSI 2019 26-28 mars IRSTEA Aix en Provence :

. Maree Brennan, Clément Fritsch, Sylvain Cosgun, Stéphane Dumarçay, Francis Colin & Philippe Gérardin, 2019. "Bark-Tan-Bio. Quantitative and qualitative composition of softwood bark polyphenols within and among trees"

. Rodolphe Bauer, 2019. « Modelling the volume of bark from thickness measurements obtained by Swedish bark gauge and from X-ray CT images. Application to the quantification of extractives. »

. Francis Colin, 2019. « Extractibles des forêts de l'Est. *Extractible chemicals from eastern forests* »

-Workshop "modélisation socio-écologique des systèmes bioéconomiques" 6-7 novembre 2019 Clermont-Ferrand

. Jean-Baptiste Pichancourt, 2019. "Théorie de la diversité bio-culturelle : formulation d'hypothèses et modèles réfutables d'intérêt pour la bioéconomie et le développement durable".

. Francis Colin, Jean-Baptiste Pichancourt, 2019. « Projet ExtraFor\_est et autres initiatives forêt-chimie dans l'Est : nécessité de quantifier, localiser et accompagner la mobilisation des biomasses forestières et des connexes industriels ».

- Colloque AllEnvi "Le bois ressources pour la chimie » Paris 11 décembre 2018 /

. F. Colin et P. Gérardin « Bio-composés polyphénoliques, terpéniques et dérivés, extraits des écorces de chêne, hêtre, sapin, épicéa ou douglas : quels acteurs de la chimie du végétal s'y intéressent ? »

F. Colin a ensuite participé à une table ronde.

- Participation au deuxième workshop, le 07 décembre 2019 à Golbey chez Norske Skog, sur l'étude de faisabilité de la Plateforme technologique chimie verte du bois. Implication dans le WP4 – Stratégie de communication –mobilisation des acteurs avec l'ONF, les Pôle de compétitivités, l'interpro FIBOIS

- Réunions

-Première réunion du comité de pilotage (CoPil) du projet ExtraFor-Est à AgroParisTech Nancy. Francis Colin y a fait un exposé faisant le bilan des premiers mois d'activités du projet

-Francis Colin, 2019. Extractibles des Forêts de l'Est. 2<sup>e</sup> réunion du CoPil Extra\_For\_Est. 6 juin 2019, AgroParisTech Nancy.

-Rencontre Colmar 18 septembre 2019 :

Francis Colin, 2019. Rencontre Colmar. « Extractibles des forêts de l'Est ».

Pichancourt Jean-Baptiste, Bauer Rodolphe, Billard Antoine, Bouvet Alain, Brennan Maree, Cauria, Sylvain, Colin Antoine, Contini Adrien, Cuny Henri, Dumarçay Stephane, Fortin Mathieu, Gérardin Philippe, Kawalec Loic, Longuetaud Fleur, Mothe Frédéric, Cosgun Sylvain, Colin Francis, 2019. « Outils numériques pour les politiques d'adaptation de filières bioéconomiques face aux enjeux des extractibles. Le cas de la filière forêt-bois dans la région Grand Est (EXTRAFORREST). »

-Journée "forêt-bois-paysage. Pacte de développement territorial pour la Nièvre. Château-Chinon 14 octobre 2019 :  
Philippe Gérardin, 2019. « Extractibles des forêts de l'Est ».

-Journée d'information sur la chimie verte du bois organisée par la CCI Côte d'Or Dijon le 24 novembre 2020 :

. Philippe Gérardin « valorisation du chêne et hêtre : quelles innovations pour demain ? »  
. Henri Cuny « les connaissances des quantités de composés chimiques extractibles à l'échelle de territoire »  
. Francis Colin « Identification des composés chimiques présents dans les principales essences des régions Grand Est et Bourgogne Franche-Comté afin d'approvisionner de potentiels nouveaux marchés de la chimie verte », ainsi que « l'étude de marché « extractibles bois » menée dans le cadre du projet.

-Comités de thèse 27 mai 2019 à AgroParisTech Nancy :

. Antoine Billard, 2019. « Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre.  
. Rodolphe Bauer, 2019. « Estimations des volumes des compartiments riches en composés chimiques extractibles »

- Conférences

- Conférence du 10 juin 2018 : « Parfums des bois : Quelle diversité chimique se cache dans nos forêts ? » par Francis Colin

-Journée de l'école doctorale SReNa le jeudi 7 février 2019 à l'École des Mines, site ARTEM.  
Rodolphe Bauer et al., 2019 « Étude et modélisation des volumes des écorces » poster + résumé  
Antoine Billard et al., 2019 « Pour une valorisation optimisée de la biomasse forestière tenant compte de la variabilité de la masse volumique du bois dans l'arbre » poster + résumé

#### Événements organisés par les membres du projet :

En plus de sa participation à diverses manifestation les membres du projet se sont engagés à communiquer régulièrement auprès des membres de la filière et des professionnels. Cela s'est fait au travers de l'organisation de réunions publiques, qui à ce jour sont au nombre de 8 ; les programmes de ces journées ainsi que certaines de présentations peuvent être retrouvées à la page <https://www6.inrae.fr/extraforest/Actualites2/Les-rendez-vous> :

- Journée sur 29 janvier 2018 (1ère rencontre publique) : séminaire de réflexion sur les « Perspectives d'émergence d'une filière forêt-chimie des extractibles : Le point de vue d'acteurs dans le nord-est de la France et le sud-ouest de l'Allemagne. Ce thème a fait l'objet d'un projet collectif des étudiants du Master FAGE (AgroParisTech et Université de Lorraine), spécialité « Bois Forêt Développement durable » (BFD), et de l'Université de Freiburg (Allemagne). Ils ont recueilli les avis d'une trentaine d'acteurs intervenant dans le nord-est de la France et dans le sud-ouest de l'Allemagne dans les domaines de la transformation du bois, de la valorisation chimique des végétaux, et de la recherche, auxquels sont ajoutés les avis d'une vingtaine d'acteurs interviewés un an auparavant.

- Seconde réunion publique le 05 avril 2018 : le séminaire a été accès sur une présentation de l'outil d'aide à la décision. La première partie de l'événement consistait en la présentation d'un outil de prospective par Jean-Baptiste Pichancourt et Antoine Colin. Cet outil vise à fournir des outils

d'aide à la décision d'investir et/ou s'engager dans la chimie, adapté aux différents acteurs de la filière forêt-bois. Un débat a suivi sur l'intérêt d'un tel outil et les possibilités de le co-construire. La seconde partie a fait intervenir Nicolas Attenot de Biolie, François Vulser de FORINVEST et Christine Robach de SOPREMA. Victoire Reneaume de la société OhWood qui animait cette partie, a demandé à ces intervenants d'exposer leur activité liée aux composés chimiques extraits des arbres pendant 7 mn, avant de constituer une table ronde permettant de comprendre les défis techniques, financiers et réglementaires de leurs innovations.

- Le 18 novembre 2018 la troisième réunion publique a eu comme thématique principale de mettre en avant les premiers résultats sur les écorces et les nœuds. Cette édition est vue labellisée par le projet II « Des Hommes et des Arbres ; les racines de demain ». Les acteurs de R&D du projet à savoir l'UMR Silva, le LERMAB, l'IGN, le FCBA et le CRITTBois ont axé leur présentation sur les compartiments écorces et nœuds, principalement du sapin.
- 4<sup>ème</sup> réunion publique du projet ExtraFor\_Est le 04 avril 2019 sur le thème : l'avenir des forêts de l'Est se trouve (aussi) dans la chimie. Demain les molécules contenues dans les bois des forêts de l'Est seront intégrées dans des produits à haute valeur ajoutée pour la pharmacie, le BTP, la cosmétique... Mais aujourd'hui : il faut identifier la ressource et la qualifier. Tel était l'objectif de cette manifestation, ce demi-journée a permis aux participants d'échanger, de discuter et de s'informer autour de ces thématiques.
- Suite à la présentation des travaux du projet au journées du GDR Bois de Cluny en 2018, une rencontre a été organisée dans la région Bourgogne Franche-Comté afin de répondre à un public local fort intéressé par le projet. Cette réunion s'est donc déroulée le 08 octobre 2019 au sein de l'ENSAM de Cluny en présence de Sylvain Mathieu Vice-président de la région Bourgogne-Franche-Comté en charge de la filière bois, de la forêt, de la montagne et des parcs. La thématique abordée Chimie du bois : le champ des possibles.
- La 6<sup>ème</sup> réunion publique a été organisée le 30 janvier 2020 sur le thème Chimie du bois : à la conquête des marchés ! Lors de cette édition les membres du projet ont accès leur présentations vers les outils développés pour qualifier et quantifier la ressource, cartographier les industries, repérer les gisements et donner les éléments généraux de l'étude de marché menée par le pôle IAR.
- 7<sup>ème</sup> réunion publique projet ExtraFor\_Est le 13 octobre 2020 sur le centre INRAE de Champenoux. Du fait de la situation sanitaire, la manifestation s'est déroulée via un format hybride. Une quarantaine de participants étaient autorisés en présentiel. "Chimie du bois : aujourd'hui, et demain ?" était le thème de cette journée. A cette occasion étaient présentées les connaissances accumulées depuis le début du projet. Cet événement a servi également à lancer une réflexion collective sur l'après projet, avec l'ensemble des participants.
- La 8<sup>ème</sup> et dernière réunion publique, a eu lieu en format 100% en distanciel le 22 avril 2021 via la plateforme Livestorm. Cette manifestation sur une grande demi-journée a été combinée avec des présentations du projet scientifique Gemm\_Est, projet porté par le laboratoire Silva et relatif lui aussi à la chimie du bois. Pour cette édition, qui marque aussi la dernière année de financement du projet, les conférences se sont accès sur Les nouveaux résultats obtenus dans le projet afin d'être replacés dans le souci général d'accompagner la transition bioéconomique de nos territoires.

Plusieurs comptes rendus détaillés ont été élaborés à la suite de ces manifestations afin de faire un retour aux participants mais aussi d'informer toutes les personnes n'ayant pu être présentés et fortement intéressées ou impliquées dans le projet. Tous les comptes rendus rédigés sont consultables à cette page <https://www6.inrae.fr/extraforest/Actualites2/Comptes-rendus-des-reunions-publiques>

### Réunions, colloques planifiés pour la suite

- 9<sup>ème</sup> réunion publique : une journée est prévue en fin d'année 2021 pour faire un bilan de l'ensemble des travaux des projets ExtraFor\_Est\_MAAF et ExtraFor\_Est FEDER et de ses perspectives.
- Des présentations des travaux seront proposés aux prochaines journées scientifiques du GDR sciences du bois qui se tiendront en novembre 2021 à Montpellier.
- Soutenances des thèses des doctorants recrutés lors du projet qui devraient se dérouler sur le second semestre 2021 : Antoine Billard, Rodolphe Bauer et Clément Frisch.
- Présentation des derniers résultats et certainement de la conclusion du projet lors de la prochaine journée « d'animation scientifique Silva qui sera organisée en décembre 2021.

### Au niveau des réseaux sociaux et média :

Création de deux comptes : choix des plateformes LinkedIn et Twitter. Nom des comptes @ExtraGemm\_Est.

- Une stratégie de communication pour la publication de ces comptes a été élaborée en partenariat avec le cabinet de communication Ohwood. Cette stratégie a été revue et adaptée avec l'arrivée des différents stagiaires successifs, afin d'étudier l'impact des publications de manière à augmenter l'audience et la visibilité et réajuster le plan de communication.
- Modification du nom des comptes de réseaux sociaux en ExtraGemm\_Est suite à l'intégration en 2019 du projet Gemm\_est, relatif au gemmage dans l'Est de la France (Au départ @Extrafor\_Est).
- Élaboration de différents visuels accompagnant les publications de manière à augmenter l'impact et la visibilité.
- Mise en ligne régulière sur divers sites internet, des manifestations organisées dans le cadre du projet tel que le site du GDR (Groupement de Recherche) des Sciences du Bois, le site du Pôle Fibres Energivie ainsi qu'un relaie sur leurs comptes de réseaux sociaux.
- Les travaux sont régulièrement mis en avant sur divers sites internet, quelques url où on parle du projet :

<https://www.bioeconomie-grandest.fr/projets/extraforest/>

<https://www.fibois-grandest.com/chimie-du-bois-projet-extraforest/>

<https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/agenda/6eme-rencontre-publique-du-projet-extraforest-chimie-du-bois-la-conquete-des-marches>

<https://www.scoop.it/t/agroparistech-enseignement-superieur-et-recherchescientifique/p/4098009429/2018/05/24/extractibles-forestiers-de-l-est-extrafor-est-journee-du-05-avril-2018>

<https://valbiomag.labiomasseenwallonie.be/news/france-extra-est-booste-le-developpement-de-la-chimiedu-bois>

<http://www.leboisinternational.com/35-projets-dedies-a-linvestissement-linnovation-lamont-forestier/>

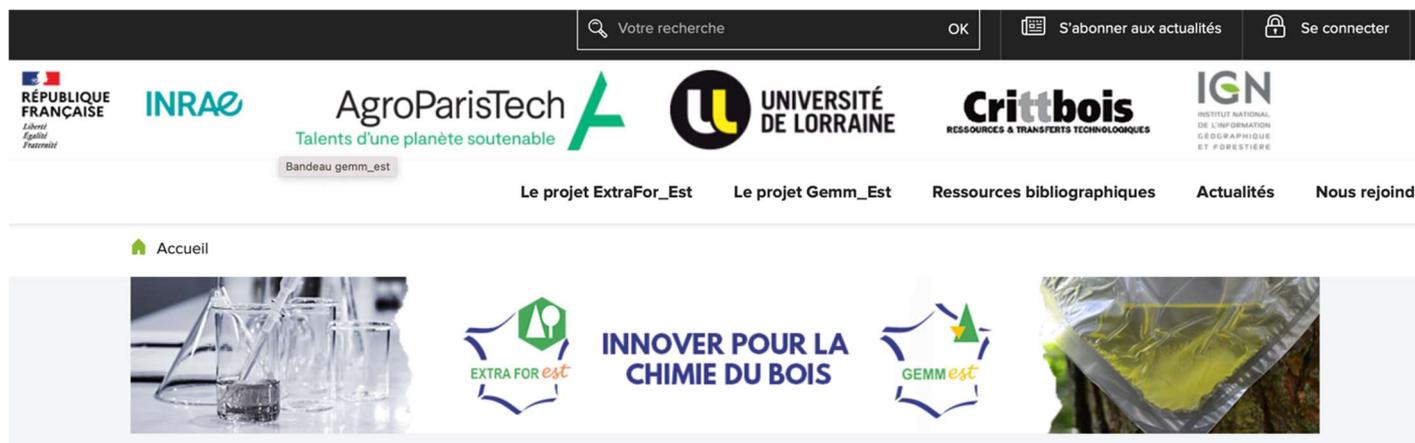
<http://maisons-bois.com/actualites-pros/35-projets-dinnovation-foret-ressources/10204>

<https://www.zimmersa.com/blog-forestier/les-composes-chimiques-extractibles-du-bois-quel-interet-pour-le-forestier--n38>

- Des relations avec la Presse ont été initiées dès le début du projet, ce qui a permis un grand nombre de publication ou reportage aussi bien de la presse locale que de la Presse spécialisée. Un partenariat avec la revue Forestopic a été initié et 5 articles ont été publiés dans la Rubrique Agora du média. Toutes les retombées presse sont consultables sur le site internet à ce lien <https://www6.inrae.fr/extraforest/Actualites2/Ils-parlent-de-nous>

## Site internet (figure 24)

Figure 24. Page de présentation du site web <https://www6.inrae.fr/extraforest>



### Calendrier

- Demande de création du site le 19 juillet 2017
- Obtention des URL le 19 juillet 2017
- Demande de validation du site le 26 janvier 2018
- Diffusion de l'URL le 29 janvier 2018
- Demande de référencement de site sur les moteurs de recherche le 8 mars 2018
- Référencement sur les sites 29 juin 2018

Le site est consultable à l'adresse suivante <https://www6.inrae.fr/extraforest>

Depuis la construction et la mise en production du site 10 édito ont été mis en ligne.

2 refontes du site internet ont été réalisées La première suite au contrat avec le cabinet de communication Ohwood en 2019 (modification du titre de certaines rubriques, créations de nouvelles). Puis en 2020, avec l'intégration du projet Gemm\_Est, refonte complète du site et modification du visuel (changement de bandeau pour intégrer les thématiques et objectifs des deux projets).

Une newsletter a été mise en place en 2019. Elle est transmise à plus de 500 personnes via une liste de diffusion. En 2020 le format de diffusion a été basculé sur une plateforme spécifique de newsletter : Sendiblu. Actuellement 4 newsletters ont été publiée, une cinquième est en projet pour septembre 2021 L'ensemble des articles de cette lettre d'informations sont est consultable sur [le site internet](#). Elle est constituée de plusieurs rubriques. Le choix de ces rubriques a été réfléchi avec le cabinet de communication Ohwood. En plus d'information relative au domaine scientifique et aux travaux de recherche, le point de vue de différents acteurs locaux et de la filière est mis en avant.

Le site internet dispose d'indicateurs d'audience qui sont étudiés chaque année afin de modifier, le cas échéant, la rédaction des articles en ligne et une révisions de leur contenu. Une illustration ci-dessous d'extraction (figure 25) permettant d'analyser l'audience et la fréquentation du site.

Figure 25. Visualisation des extractions des statistiques de fréquentation du site ExtraFor\_Est



Le nombre de visites sur l'ensemble du site a continuellement augmenté. Les pages les plus fréquentées sont celles relatives à l'accueil, les actualités mais aussi aux manifestations organisées. Autres constatations significatives : l'accès au site via l'url directe reste le moyen d'accès privilégié. Nous avons cependant pu constater dernièrement une forte augmentation de l'accès à notre site via des sites influents (sites extérieurs sur lesquels nous sommes référencés).

Nous avons aussi constaté via ces indicateurs que même si le projet a une portée très locale, Grand Est de la France, les travaux réalisés et les informations publiées ont une portée plus internationale. Plusieurs connexions ont été recensées en particulier en Amérique du Nord, du Brésil et, en ce qui concerne l'Europe les travaux du projet sont observés plutôt dans les pays du Nord et de l'Est de l'Europe.

### Plan de communication fin 2021, début 2022

Le projet arrivant à son terme, quelle stratégie adopter sur le projet en termes de communication

- Continuer à maintenir une présence sur les réseaux sociaux en adaptant la fréquence de la publication. Afin d'augmenter la visibilité réfléchir à poster du contenu sur les activités et non pas uniquement sur des faits d'actualités du projet. Adapter la publication en fonctions des jours et horaires d'audience les plus favorables, une analyse devra être réalisée à cet effet, un stagiaire pourra être envisagé pour la réalisation de ce travail.
- Deux newsletters peuvent être envisagée, une pour l'automne 2021 (fin septembre) et une dernière début 2022 (janvier-février).
- Valoriser les vidéos réalisées dans le cadre de présentations lors de séminaires et si possible réaliser quelques vidéos de vulgarisation sur l'objectif du projet mais aussi des résultats.

- L'organisation de mini séminaires ou conférences en live sur des plateformes de type YouTube permettraient de partager plus rapidement des informations, données et résultats en ayant l'avantage d'avoir les interventions qui restent en streaming sur les plateformes et de ce fait nécessitent une gestion moins lourde et longue que dans le cadre de l'organisation d'un séminaire dédié avec plusieurs conférenciers.
- Un certain nombre de fiches descriptives relatives au projet ont été élaborées en 2019 par une stagiaire (Daliène Ludovsky). De nouvelles pourraient être éditées pour informer sur les résultats et protocoles. Un stagiaire sur une période courte (2 mois) pourrait être envisagé en 2022 afin de procéder à la conception de ces fiches.

### **Action T2B. Sociologie – sensibilisation des acteurs**

L'objectif de cette tâche était à double sens :

- . comprendre le niveau de connaissance sur- et de sensibilité à- la chimie des extractibles parmi les acteurs de la filière forêt-bois et des industries chimiques
- . pour en retour bien configurer les messages et supports de diffusion des connaissances acquises dans la tâche 1.

Cette tâche a été entièrement réalisée sous la forme d'exercices d'enquêtes réalisées par des étudiants du master FAGE (UL et AgroParisTech), spécialité Bois Forêt Développement durable (BFD), de la formation d'ingénieur (AgroParisTech), dominante Ressources Forestières et Filière Bois (RFF) et du master en sciences forestières (Université de Freiburg, Allemagne). Ces exercices ont été encadrés par Holger Wernsdorfer et Marieke Blondet, enseignants-chercheurs à AgroParisTech Nancy et par Philippe Gérardin et Francis Colin (resp. LERMAB et UMR Silva).

- Une enquête sur les extractibles en général en 2017-2018

#### **Présentation .ppt**

. Perspectives d'émergence d'une filière forêt-chimie des extractibles Promotion 2017-2018 Master FAGE (UL et AgroParisTech), spécialité Bois Forêt Développement durable (BFD) Formation d'ingénieur (AgroParisTech), dominante Ressources Forestières et Filière Bois (RFF) Master en sciences forestières (Université de Freiburg, Allemagne)  
6 février 2018 CONFIDENTIEL

#### **. Article**

Bonin F, Arnould M, Duval P, Robic A, Tapie-Petit ML, Colin F,... Wernsdorfer H,...(2020). Perspectives d'émergence d'une filière forêt-chimie des extractibles Points de vue des acteurs du Nord-Est de la France et du Sud-Ouest de l'Allemagne *Revue Forestière Française*, 72 (1), 71-84

- Une enquête sur les tanins d'écorce de chêne en 2018-2019

#### **. Rapport et présentation .ppt**

Arthur Maudet, Coline Lebreton, Chloé Agro, Antoine Sarrouille, Emilie Dupuy, Amélie Taupin, Mohamed Ali Ouessou et Antoine Cambien, 2019. Comprendre et valoriser les tanins issus des écorces de chêne en France.

- une enquête sur les tanins des écorces de résineux en 2019-2020

## Perspectives

Parmi les perspectives les plus importantes on peut citer :

- celles qui interviendront au cours du dernier semestre 2021, dans le cadre strict du programme de recherche ExtraFor\_Est permis par le contrat complémentaire ExtraFor\_Est FEDER, notamment :
  - la fin des mesures d'infra-densité et des analyses chimiques particulièrement sur les feuillus chêne et hêtre ;
  - la synthèse des résultats sur les composés chimiques (action T1E),
  - l'analyse des marchés, déjà réalisée par le pôle de compétitivité IAR (Louis Tiers) mais non encore diffusée ; les marchés sélectionnés sont présentés en figure 26 ;

Figure 26. Un extrait de l'étude des marchés par le pôle de compétitivité IAR présentant les grands domaines sélectionnés.

Secteurs	Applications	Description
 <b>Cosmétique</b>	Actifs cosmétiques	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les <b>actifs</b> sont des ingrédients ayant une <b>activité biologique</b> sur la peau et qui apportent au produit fini les efficacités qu'ils revendiquent</li> </ul>
	Conservateurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les conservateurs sont indispensables à toute préparation cosmétique pour éviter la prolifération des germes, bactéries, levures et moisissures (champignons) qui trouvent dans les produits de soin un milieu propice à leur développement. Ce sont des substances d'origine naturelle ou synthétique qui permettent à un produit cosmétique de se conserver dans le temps sans s'oxyder (<b>antioxydant</b>) ou être altéré par la présence de germes (<b>antimicrobien</b>).</li> </ul>
 <b>Alimentation humaine</b>	Nutraceutique/complément alimentaire	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les compléments alimentaires sont des sources concentrées de nutriments ou d'autres substances ayant un effet nutritionnel ou physiologique et destinés à compléter un régime alimentaire normal. Les compléments alimentaires sont commercialisés sous forme de doses, par exemple de pilules, de comprimés, de gélules ou de liquides en capsules, etc. Les compléments peuvent être utilisés pour corriger des déficiences nutritionnelles ou maintenir un apport approprié de certains nutriments.</li> </ul>
	Conservateurs	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les conservateurs alimentaires regroupent les fonctions <b>d'antioxydant, d'antimicrobien et d'antifongique</b>. Ils permettent de garantir la sécurité des aliments et augmentent la durée de vie des produits.</li> </ul>
	Arômes et vinifications	En cours de finalisation
 <b>Alimentation animale</b>	Additifs	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Les <b>additifs destinés à l'alimentation animale</b> sont des produits utilisés dans la nutrition des animaux pour leurs effets sur les aliments eux-mêmes, sur les animaux, sur les produits alimentaires obtenus à partir d'animaux ayant consommé cet additif, ou sur l'environnement. Les additifs alimentaires sont essentiels pour la nutrition animale, car ils <b>améliorent la qualité des aliments et améliorent ainsi les performances et la santé des animaux</b>. L'industrialisation du secteur de l'élevage et de la viande est un facteur important qui stimule la demande d'additifs alimentaires dans le monde.</li> </ul>
 <b>Agriculture</b>	Biocontrôle	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produit issu de ressource naturelle ou présentation de très faible risque tox/ecotox pour la protection des cultures contre les stress biotiques contre les biotiques</li> </ul>
	Biostimulant	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Produit issu de ressource naturelle pour la protection des cultures contre les stress abiotiques</li> </ul>

- les initiatives qui pourraient rapidement déboucher sur des unités pilote d'extraction régionales et de production de volumes importants d'ingrédients bio-sourcés : **Wood Chem Valley** près d'Epinal et **Kemyos** près du Parc National des Forêts. Ces initiatives mobiliseraient toutes les connaissances acquises sur la ressource forestière ; elles nécessiteraient par ailleurs d'innover dans l'organisation territoriale de la logistique des différentes (sous)-filiales. Elles viendraient compléter des initiatives plus modestes tripartites impliquant organismes de recherche, producteurs de bois et/ou de connexes et industries chimiques.

**Wood Chem Valley.** Début 2020, le CRITT a repris le leadership d'un projet de PLATEFORME qui a été baptisé Woodchem Valley. Il s'agit d'une initiative qui tend à promouvoir l'utilisation des connexes et de sous-produits pour la chimie du bois et la production de matériaux innovants. La feuille de route du projet a été écrite avec pour ambition d'accompagner la filière dans un changement de paradigme régional. Cela permettra à la filière de s'adapter pour valoriser le bois, et en particulier les connexes dans des nouvelles applications en chimie et en matériaux. La gouvernance de cette plateforme sera assurée par un comité de pilotage composé d'un comité scientifique et d'un club d'entrepreneurs, animés par le CrittBois. Les industriels devront faire partie intégrante du projet de plateforme et la première mission du Critt consiste à essayer de fédérer la filière amont qui produit les connexes. Il est souhaité que soit menée de l'ingénierie projet basée sur la valorisation des ressources locales et identifiés quelques projets porteurs (dont certains sont déjà connus sur le Campus Bois) dont les réalisations serviront de départ à l'activité de la plateforme. Dans un

premier temps, l'initiative se basera sur notre équipement de recherche pour déboucher ensuite sur un équipement « pilote » préindustriel et les acteurs industriels sont incontournables ! Les missions complémentaires s'articuleront autour de l'animation, la communication et la promotion de la plateforme. Un volet de formation devrait y être éclairé (d'après Alain Contal, Directeur du CRITTBois, in Compte-Rendu de la 8ème réunion publique). Philippe Gérardin et Francis Colin ont participé à plusieurs réunions et composent le noyau des initiateurs du projet.

**Kemyos.** Le Parc National des Forêts est le onzième parc national de France qui a été établi par décret au mois de novembre 2019. Il a la particularité d'être le seul parc national dans une zone avec du peuplement et de l'activité économique représentée de manière significative.

En son sein, 3 cercles sont délimités, dont une réserve intégrale d'un peu plus de 3000 hectares dans laquelle la forêt est laissée dans son état naturel afin de devenir un sujet d'observations scientifiques. Mais la création du parc national a rencontré une certaine opposition auprès des entreprises de la filière bois, car les zones où tout prélèvement de bois sera interdit représentent entre 15 et 20 000 m<sup>3</sup> de bois chaque année, qui vont être maintenant soustraits à une exploitation commerciale.

La création du filière bois-chimie est donc une réponse apportée face aux inquiétudes de la filière forêt-bois, qui voit se mettre en place une contrainte forte de réduction de ses approvisionnements. Le Parc national se base sur une charte qui est valable pour 15 ans et qui promeut la transformation et la valorisation locale du bois tout en incitant à l'innovation. C'est un outil qui pourrait permettre aux Chambres de Commerces et d'Industrie de Côte d'Or et de Meuse Haute-Marne de concilier développement économique et pérennité des entreprises au sein du Parc national.

Qui plus est, il s'agit d'une opportunité pour développer le territoire, que ce soit d'un point de vue touristique et que d'un point de vue industriel. C'est également une opportunité pour valoriser le bois par l'extraction de composés chimiques. Mais, il s'agit en plus de cela d'une réponse à la transition écologique et aux demandes sociétales de composés biosourcés (les plus CCI Côte d'Or, in Compte-Rendu de la 8ème réunion publique)

Philippe Gérardin, Francis Colin et Henri Cuny ont participé au travers d'exposés, à la réunion d'introduction de cette initiative lors de la « Journée chimie verte du bois » organisée par les CCI Côte d'Or et CCI Haute-Marne le 24 nov. 2020 à Châtillon sur Seine (en visio). La prochaine réunion aura lieu le Jeudi 8 juillet 2021 à Châtillon-sur-Seine.

- Le démarrage en octobre 2021 d'une thèse dont le double financement est maintenant acquis d'une part auprès de la Région Grand-Est et d'autre part grâce au dispositif FCPER (formation complémentaire par la recherche) d'AgroParisTech ; elle est intitulée : « Living BioForTer (bioéconomie forestière durable pour un territoire vivant) ». Cette thèse est en quelque sorte une concrétisation et l'étape ultérieure de l'association des acteurs des filières forêt-bois comme expérimenté dans le programme de recherche ExtraFor\_Est. Il se trouve que l'enjeu d'innovation collaborative dans la filière forêt bois attachée à son territoire et à ses ressources est bien identifié par les politiques du secteur. Plusieurs territoires offrent déjà des réalisations emblématiques de l'écologie industrielle et de la bioraffinerie territoriale du bois comme la Green Valley (où devrait être implantée l'initiative Wood Chem Valley) ou le Parc National des Forêts (où devrait s'implanter l'initiative Kemyos). Face à des chocs inédits et répétés, les territoires infrarégionaux souhaitent de plus en plus s'engager dans des projets collectifs d'innovation pour la valorisation durable de leurs ressources forestières, qui font émerger des idées nouvelles mais aussi des incertitudes et des controverses : comment garantir des systèmes de production durables, créateurs de valeur ajoutée avec des impacts sociaux et environnementaux positifs ? des *supply chains* agiles, décentralisées, adaptables et résilientes ?

L'objectif de la thèse est de développer une méthodologie pour que les modèles de représentations de systèmes développés par les équipes de recherche éclairent efficacement ces questionnements. La thèse tirera profit d'une collaboration originale entre les sciences forestières de l'UMR Silva et le Génie des systèmes industriels de l'ERPI. Elle se positionnera dans les cadres de l'analyse de durabilité des filières, de la modélisation d'accompagnement pour la prospective et la conception de systèmes bioéconomiques territoriaux, de l'innovation « living lab » par les usages et centrée sur l'utilisateur.

- L'orientation prise par le LERMAB de caractériser les propriétés chimiques et surtout biologiques des composés chimiques/ingrédients extraits des différents compartiments des arbres ; une collaboration se met ainsi en place avec l'Unité de Recherche « Résistance Induite et Bio-protection des Plantes - USC INRAE 1488, Université de Reims Champagne Ardenne » pour démarrer des expérimentations autour du bio-contrôle et de la bio-stimulation ; cette collaboration se concrétisera en juin-juillet 2021 par le stage de Julie Paysant Élève en deuxième année de l'Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier (ENSCM) ;
- La poursuite du travail de connaissance/caractérisation des propriétés de la ressource forestière (propriétés physiques et chimiques) intégrant d'une part pour les espèces déjà étudiées d'autres situations écologiques et d'autre part d'autres espèces importantes (Pins, Mélèze, Peuplier, espèces plus adaptées aux climats futurs...), selon des échantillonnages plus extensifs et davantage représentatifs de la ressource nationale ; cette caractérisation devra être réfléchie en tenant compte des changements climatiques et de la gestion sylvicole, et de la satisfaction de l'ensemble des services éco-systématique que la société souhaite voir assurés par la forêt ;
- Ce travail devra intégrer les ressources que constituent les connexes des industries essentiellement de première transformation ; à l'échelle régionale, les outils de représentation des flux de matière dans les filières sont maintenant pratiquement mis au point et les données pour les alimenter disponibles pour des intervalles de temps de plusieurs années ; pour passer à des échelles infra-régionales il est nécessaire de sensibiliser/mobiliser davantage les acteurs de l'exploitation, de la logistique et de la transformation pour disposer de données plus précises ; le problème de la confidentialité des données que les acteurs souhaitent préserver, restera une forte contrainte ;
- D'une manière stratégique, des études devant se focaliser sur des espèces dont les molécules initialement identifiées sont susceptibles de pénétrer des marchés repérés par l'étude de marché menée par le pôle de compétitivité IAR ; la spécification des propriétés chimiques et biologiques des ingrédients de chaque combinaison compartiment\*espèce, la sélection des marchés à investir, et l'obtention espérée de volumes d'ingrédients plus importants grâce aux pilotes d'extraction devraient permettre qu'émergent de nouvelles filières de bio-produits ; toutes ces propositions s'intègrent parfaitement dans une contribution affirmée à la transition bioéconomique des territoires ;
- La mise en place de collaborations tripartites « organisme de recherche - Fournisseur de biomasse riche en ingrédients désirés – extracteur/industriel de la chimie comme par exemple le projet PSPC Résineœud (coordonné par Christine Gérardin LERMAB) dont l'objectif est le développement de produits cosmétiques à partir de molécules extraites de nœuds de différentes essences résineuses ; projet formé par le consortium formé de Alban Muller International , Clarins, le LERMAB Université de Lorraine et le Centre de Biophysique Moléculaire CNRS Orléans ainsi que Poirot Construction et Savoie Pan comme partenaires industriels du bois.

## Conclusions

Le contrat de recherche ExtraFor\_Est MAAF a permis de fortement progresser non pas seulement sur l'identification des composés chimiques présents dans les différents compartiments de l'arbre mais de comprendre comment se structure la variabilité des composés chimiques extractibles depuis le compartiment de l'arbre jusqu'à la ressource forestière d'une zone, région ou territoire.

Pour passer aux quantités disponibles, la quantification des volumes des compartiments et de leur infra-densité s'est avéré indispensable ; ceci a contribué à un accroissement significatif des connaissances sur les propriétés des bois en général.

A l'occasion de ce contrat, un consortium d'acteurs académiques s'est constitué durablement et une certaine confiance s'est instaurée avec plusieurs élus et acteurs socio-économiques.

Les conditions sont donc réunies pour poursuivre les efforts de recherche avec le souci de mieux prendre en compte les préoccupations tant socio-économiques exprimées par les acteurs des filières, qu'écologiques notamment pour que tous les services écosystémiques puissent être satisfaits, dans un contexte de changements climatiques et de gestion sylvicole.

