



## Arbre, bois, forêt et sociétés

Yves Coquet, Isabelle Hippolyte, Bernard Mallet, Jean-Marc Guehl

### ► To cite this version:

Yves Coquet, Isabelle Hippolyte, Bernard Mallet, Jean-Marc Guehl. Arbre, bois, forêt et sociétés : Les cahiers de l'ANR - n° 11. 2019. hal-03413209

**HAL Id: hal-03413209**

**<https://hal.science/hal-03413209>**

Submitted on 21 Nov 2021

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

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



AGENCE NATIONALE DE LA RECHERCHE  
**ANR**

# ARBRE, BOIS, FORÊT ET SOCIÉTÉS

Projets financés sur la période 2010–2018

LES CAHIERS DE L'ANR N° 11 - DÉCEMBRE 2019

## LES « CAHIERS DE L'ANR »

traitent de questions thématiques transverses aux différents appels à projets financés par l'ANR. Cette collection, qui existe depuis 2009, met en perspective les recherches, les innovations et les avancées technologiques en cours dans un domaine spécifique et en explicite les grandes thématiques. Chaque cahier s'adresse aux chercheurs, aux décideurs mais aussi au grand public. Le présent cahier représente un travail préliminaire à l'organisation d'un colloque « Arbre, bois, forêt et sociétés » sur les recherches financées sur ces thèmes par l'ANR. L'analyse sur la période 2010-2018 du financement de l'ANR, y compris les PIA, sur le thème des forêts, est suivie d'un catalogue sous forme de fiches individuelles de la majorité des projets cofinancés sur cette période. Ce cahier fait ressortir l'importance et la diversité des projets de recherche et des équipes scientifiques financés sur ce thème.

### CONTRIBUTEURS

- **Synthèse et analyse** : Yves Coquet, Isabelle Hippolyte, Bernard Mallet pour l'ANR en collaboration avec la Cellule études, données et analyses d'impacts et Jean-Marc Guehl (INRAE)
- **Relecture et conseils** : Frédéric Monot et Antoine Morisot (ANR) et Jean-Luc Peyron (Ecofor)
- **Fiches projets** : Yves Coquet, Isabelle Hippolyte et Antoine Morisot pour l'ANR et l'ensemble des contributeurs aux fiches des projets retenus dans ce cahier

# L'arbre, la forêt et le bois face aux défis sociétaux

**A** en juger par les livres, tribunes et films qui se multiplient à leur égard, l'arbre, la forêt et le bois sont au cœur des sujets d'une société qui, pourtant, n'en embrasse que rarement l'ensemble des facettes. Occupant en moyenne 30 % des terres aussi bien de la planète que de la France métropolitaine, les écosystèmes forestiers constituent un réservoir exceptionnel de biodiversité, un élément irremplaçable du paysage, un stock important et croissant de ressources en carbone, bois et produits non ligneux. Ils offrent ainsi un large éventail de services allant de la régulation des grands cycles bio-géochimiques (énergie, eau, carbone, éléments minéraux) aux aménités socio-culturelles et à la fourniture de biens pour l'alimentation, l'habitat, les activités économiques, l'énergie... Le premier défi forestier est de considérer l'ensemble de ces services écosystémiques et les diverses interactions entre eux, qui apparaissent soit sous l'angle des fonctions écologiques qui sous-tendent ces services, soit au niveau des demandes dont ils font l'objet.

Ces services participent tous à une bioéconomie qui repose cependant beaucoup sur la fourniture de bois, ressource naturelle renouvelable dotée de propriétés singulières (en termes d'esthétique, d'isolation, d'acoustique, de résistance, d'échanges gazeux, d'hygiène) ; cette ressource s'utilise sous forme de matériau, fibres, chimie ou énergie. Non seulement les activités correspondantes participent à la création de richesse et à l'emploi, en particulier dans les zones rurales, mais encore viennent-elles réduire l'utilisation d'énergie dont les concurrents du bois sont particulièrement dépendants : elles contribuent ainsi tout à la fois à la réduction des émissions de gaz à effet de serre, de la facture énergétique et du déficit de la balance commerciale du pays. La recherche de la performance économique, sociale et environnementale est à l'ordre du jour dans ce domaine.

Par leurs dimensions et leur longévité, les arbres sont des éléments marquants des paysages et du cadre de vie, en milieu rural, en montagne, sur le littoral, le long des cours d'eau, à proximité et au cœur des villes. Ils rendent des services socio-culturels forts qui expliquent l'attachement que leur voue une grande partie de la société. La gestion forestière s'en trouve d'ailleurs complexifiée lorsqu'il s'agit de récolter du bois. Comment maintenir ou retisser les liens entre gestion forestière et société est une question incontestablement d'actualité.

L'importance des espaces boisés qui vient d'être décrite est cependant menacée par des risques majeurs : changement climatique, déforestation (surtout sous les tropiques), exploitation forestière illégale, dégradation... Ces changements ont une résonance particulière du fait de la longueur des cycles forestiers : le temps de récupération après les crises est forcément long ; quant à la prévention, elle doit commencer le plus tôt possible pour avoir des chances de fonctionner. Ainsi, l'analyse de la résilience des forêts et de toutes les activités qui en découlent est incontournable.

Dans l'idéal, c'est l'ensemble de ces défis qu'il faut simultanément relever. Une telle approche système n'est pas simple à organiser dans un cadre scientifique mais oriente dorénavant le progrès dans le domaine forestier. Le regroupement dans ce document des diverses actions de recherche financées par l'ANR relatives à l'arbre, à la forêt, au bois et à la société est un pas important dans cette direction.

**Jean-Luc PEYRON**

Directeur d'Ecofor



# ANR et les forêts

**L**es forêts, couvrant 31 % des surfaces de terres émergées (30 % pour la France métropolitaine et 38 % pour l'Union européenne) sont au cœur de multiples enjeux et défis sociétaux et environnementaux aux échelles locale et globale. Leurs dynamiques sont géographiquement contrastées avec une prédominance de la déforestation et de la dégradation en zone intertropicale et une tendance à l'extension des surfaces et des densités de biomasse en zones tempérée et boréale.

Elles sont affectées par les changements climatiques à travers des modifications tendanciellées fortes et rapides mais également à travers l'augmentation de la fréquence et la sévérité de divers aléas (sécheresses extrêmes et canicule, incendies, attaques massives de ravageurs et maladies...). Elles contribuent à ces changements à travers la déforestation et la dégradation des forêts, tropicales principalement.

Les forêts représentent un stock terrestre important de carbone et contribuent également à l'atténuation des changements climatiques, non seulement par leur capacité de stockage du carbone dans la biomasse, la nécromasse, les sols, les produits ligneux, mais également à travers des effets de substitution (utilisation comme matériaux ou sources d'énergie renouvelables) à l'utilisation de ressources fossiles générant des gaz à effet-de-serre.

Les forêts exploitées par l'homme sont en effet à la base de nombreuses activités économiques dans des filières bio-économiques diverses (construction, bio-énergies, industrie papetière et chimie verte...) avec un potentiel important de développement, et sont également le lieu de vie de nombreuses communautés.

Les forêts sont en outre à l'origine de services écosystémiques et écologiques majeurs, au-delà de l'impact sur le bilan carbone et la régulation du climat : régulation du cycle de l'eau, rôle épurateur de l'eau et de l'atmosphère, valorisation de produits non ligneux, réservoirs de biodiversité, aménités diverses.

Le maintien comme le développement des systèmes agroforestiers représente également un enjeu majeur pour les régions chaudes comme dans les pays tempérés.

Il est essentiel de développer des modes de gestion durable des formations forestières (dont la conservation ou la restauration) permettant d'anticiper les conséquences du changement climatique à travers l'adaptation, de contribuer à son atténuation, tout en améliorant la valorisation économique des forêts, et en préservant leurs diverses fonctions écologiques et sociétales.

Il s'agit d'objectifs particulièrement ambitieux soulevant des questions de recherche complexes nécessitant des approches pluridisciplinaires mobilisant les sciences de la nature, biotechniques et socio-économiques dans toutes leurs dimensions (observation, sciences participatives, expérimentation, modélisation/simulation).

Ainsi, les recherches forestières – qu'elles concernent les enjeux climatiques, les questions de biodiversité, l'analyse du génome ou la valorisation sociale et économique des biens et services produits par les forêts – doivent aujourd'hui combiner analyse des enjeux globaux et études des impacts locaux. La combinaison des forces de recherche est indispensable compte tenu des défis majeurs rencontrés par les écosystèmes forestiers quelles que soient les régions concernées.

## Les recherches forestières soutenues par l'ANR

De 2005 à 2018, l'ANR a soutenu, hors Programme d'Investissements d'Avenir (PIA), 186 projets sur la thématique des forêts, pour un montant global de 67,7 M€. Ces données ne prennent pas en compte les projets sur la bioénergie.

Au niveau national, ces travaux ont été financés jusqu'en 2013 dans des appels thématiques (Agrobiosphère, Systerra...) ou non thématiques (blanc, JCJC...), puis à partir de 2014 dans différents comités de l'Appel à projets générique (Biologie des animaux, des végétaux et des micro-organismes/Biotechnologies, Dynamique des écosystèmes en vue de leur gestion durable, Fonctionnement Terre vivante, Interactions Homme-environnement, Produits, Procédés et Matériaux, Villes et bâtiments durables...).

Au niveau international, l'ANR a financé 34 projets sur les forêts dans le cadre d'accord bilatéraux, d'appels pluri partenaires européens (ERA-NET, ERA-NET Cofund) ou internationaux (Belmont Forum) pour un montant total de 8,7 M€.

L'ANR a participé à deux ERA-NET dédiés aux forêts pour soutenir des équipes françaises. En 2016, les équipes françaises de trois projets de l'ERA-NET

Sumforest et en 2018, de trois projets de l'ERA-NET ForestValue ont été financées par l'Agence pour un montant de 1,2 M€.

Ce document détaille les projets que l'Agence a financé pendant cette période via les appels nationaux, européens et internationaux, thématiques, non thématiques, le plan d'action et le PIA.

## La recherche nationale 2010-2018

L'ANR a financé de 2010 à 2018, 132 projets de recherche sur les forêts pour un montant de 57,1 M€. Sur les 127 projets coordonnés par une équipe française (cinq projets internationaux sont coordonnés par un partenaire étranger), 45 projets sont coordonnés par une université et 31 par l'INRA\*, représentant 60 % de la coordination française (Fig. 1). Viennent ensuite le CNRS et le Cirad avec une dizaine de coordinations pour chaque établissement. Avec 17 coordinations, les organismes publics de recherche pour le développement ont une représentation importante, plutôt exceptionnelle dans le périmètre de l'ANR, mettant l'accent sur l'importance de la prise en compte des forêts des régions chaudes dans le domaine forestier.

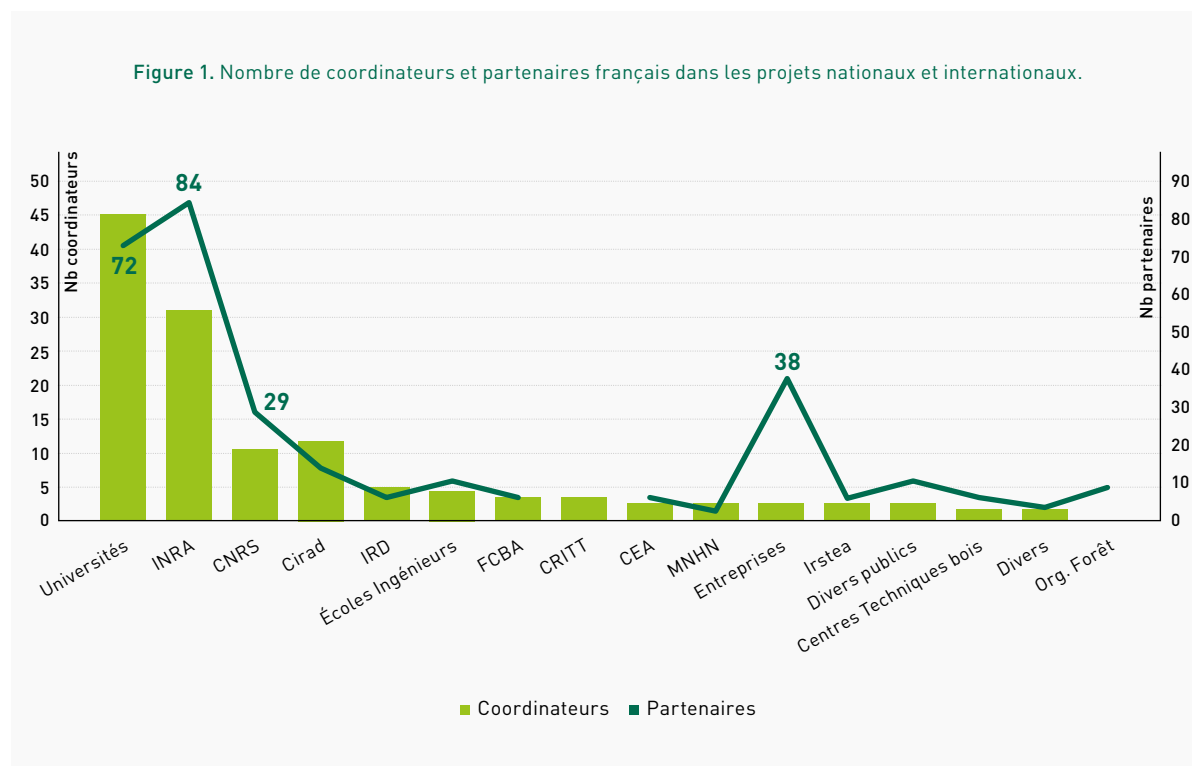
Sept projets sont coordonnés par des centres techniques du bois (FCBA et CRITT notamment) et deux par des entreprises privées. Dans le contexte de l'ANR dont la vocation est plutôt au financement de la recherche amont, ces 2 % représentent malgré tout une particularité de cette thématique.

Pour les 301 partenaires des projets, les universités et l'INRA sont également les partenaires les plus nombreux. Avec 84 partenaires dans les 132 projets bois contre 72 pour les universités, l'INRA est majoritaire.

Le privé collabore très fortement puisque 38 entreprises participent à des projets, se positionnant en troisième position pour le partenariat, devant le CNRS (29). Que ce soit au niveau de la coordination ou du partenariat cette implication du privé à environ 9 % du partenariat est tout à fait notable. Les autres organismes se situent tous en deçà de 20 partenaires dans les 132 projets.

Les consortiums des projets ont en moyenne trois partenaires (y compris la coordination). Toutefois, ce chiffre devrait être modulé car il inclut les 24 projets Jeunes chercheurs Jeunes chercheuses (un seul partenaire financé) et les 30 projets internationaux (partenaires étrangers non pris en compte).

Figure 1. Nombre de coordinateurs et partenaires français dans les projets nationaux et internationaux.



\* L'ensemble du document fait référence aux financements avant la fusion de l'INRA et de l'Irstea au 1<sup>er</sup> janvier 2020.

Un regard croisé entre les quatre grandes thématiques du colloque et les catégories d'organismes (**Tableau 1**) permet d'affiner l'implication des différents acteurs de la recherche et du développement.

Concernant les universités elles interviennent dans tous les domaines, bien qu'elles soient moins présentes sur les recherches sur la forêt et sa gestion. En revanche, l'INRA est très impliqué sur ce secteur et sur toutes recherches concernant l'arbre en tant qu'individu (amélioration génétique, physiologie, biologie...). Concernant les recherches sur l'arbre, l'INRA et les universités sont les acteurs majoritaires représentant 85 % des équipes françaises à travailler sur ce domaine.

Les organismes publics de recherche pour le développement en particulier le Cirad sont impliqués sur

les forêts des régions chaudes tant sur les aspects de leur fonctionnement et de leur gestion que sur les dimensions politiques, sociales et économiques en lien avec les sociétés et l'impact de l'évolution des forêts sur les sociétés.

Les entreprises privées, les centres techniques du bois et les écoles d'ingénieur sont impliqués presque exclusivement sur les études concernant le bois (propriété, transformation, utilisation...). Les entreprises sont extrêmement impliquées et représentent le quart des acteurs de la recherche nationale sur le secteur du bois.

C'est sur ce secteur que le nombre de partenaires par projet est le plus important avec 4 partenaires en moyenne.

**Tableau 1. Nombre de partenaires participant à des projets sur différentes thématiques**

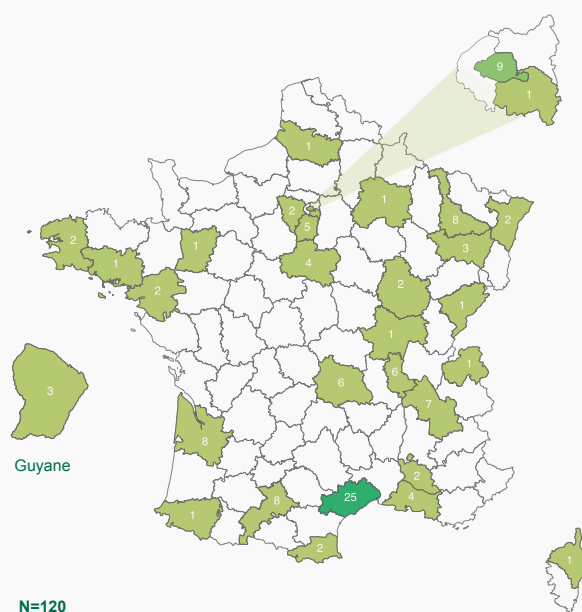
| NOMBRE DE PARTENAIRES                       | BOIS       | ARBRE      | FORÊT      | FORÊT ET SOCIÉTÉS |
|---------------------------------------------|------------|------------|------------|-------------------|
| Universités                                 | 33         | 32         | 24         | 31                |
| INRA                                        | 12         | 40         | 47         | 19                |
| Public pour le développement (Cirad, IRD)   | 2          | 5          | 17         | 18                |
| CNRS                                        | 9          | 9          | 12         | 11                |
| Entreprises                                 | 32         | 1          | 5          | 2                 |
| Divers Public (CEA, Irstea, INRIA, MNHN...) | 10         | 5          | 11         | 9                 |
| Centres Techniques bois                     | 16         | 2          | 1          |                   |
| Écoles Ingénieurs                           | 9          | 2          | 1          | 2                 |
| Organismes Forestiers                       | 2          | 1          | 3          | 2                 |
| Divers                                      | 3          |            |            | 1                 |
| <b>NOMBRE DE PROJETS</b>                    | <b>31</b>  | <b>32</b>  | <b>39</b>  | <b>30</b>         |
| <b>NOMBRE DE PARTENAIRES/PROJET</b>         | <b>4,1</b> | <b>3,0</b> | <b>3,1</b> | <b>3,3</b>        |

Si l'on regarde au niveau national la répartition territoriale des coordinateurs (**Fig. 2 p. 7**) et des partenaires (**Fig. 3 p. 7**), c'est le département de l'Hérault qui vient en tête pour la coordination et le partenariat supplantant en nombre les pôles « historiques » lorrain (Meurthe-et-Moselle associée aux Vosges) et girondin. La Lorraine vient en deuxième position pour le partenariat et en troisième position pour la coordination. Quant à la Gironde, elle se place en 4<sup>e</sup> position pour la coordination et en 3<sup>e</sup> position pour la participation. Paris et l'Île-de-France sont également très impliqués dans les projets financés par l'ANR ainsi que la Haute-Garonne.

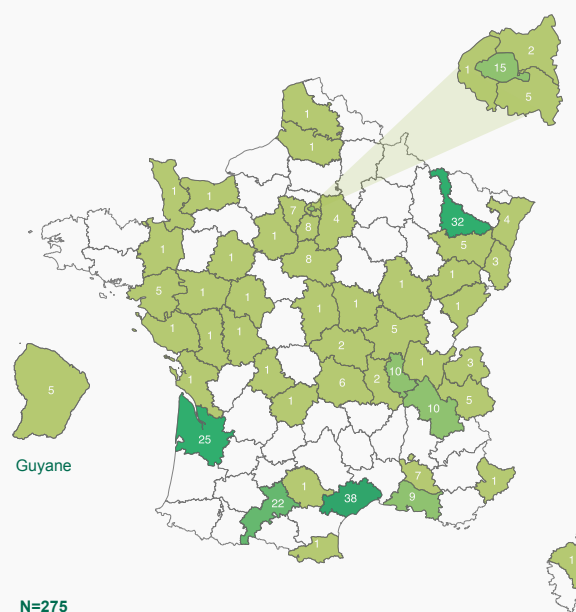
La primauté de l'Hérault est favorisée par les 11 coordinations et 12 partenariats portés par le Cirad, présent sur Montpellier. En Lorraine, c'est l'INRA qui a le plus grand nombre d'équipes coordinatrices (6) et partenaires (21), ainsi qu'en Gironde (7 et 16 respectivement). Sur le reste du territoire, il n'y a pas de prépondérance d'une catégorie spécifique de partenaire.

Sur ces problématiques qui sont d'importance pour son territoire, des équipes de Guyane coordonnent 3 projets et sont par ailleurs impliquées dans LabEx CEBA du PIA (cf. page 94).

**Figure 2.** Répartition géographique des équipes coordinatrices françaises



**Figure 3.** Répartition géographique des équipes partenaires françaises (hors coordination)



Les projets de recherche financés par l'ANR dans le secteur de la forêt, hors énergie, sont caractérisés par des consortiums de trois établissements français en moyenne, une forte implication du secteur privé sur les recherches sur le bois, une coordination majoritaire des universités et un nombre de coordination notable des organismes de recherches pour le développement. D'un point de vue répartition territoriale, les équipes financées par l'ANR, sont situées majoritairement sur un pôle languedocien (Hérault), devançant les pôles historiques lorrain et girondin.

Une particularité de ce domaine est le leadership de quelques projets par des centres techniques sur des projets sur le bois, indicateur du niveau d'excellence de ces structures dans ce secteur. Bien que l'éventail des acteurs de la recherche forestière soit large avec une bonne représentation des différents organismes publics, on note une forte implication des entreprises et l'implication des écoles d'ingénieurs et de structures issues de la société civile (associations, regroupements de propriétaires...), leur engagement n'étant pas homogène dans les différents domaines de recherches.

### **Focus sur les recherches en partenariat international**

Les équipes de recherche françaises, travaillant sur les forêts des régions tempérées ou sur les forêts des régions chaudes, sont également engagées dans des réseaux de recherche européens et internationaux. Pour appuyer ces partenariats, l'ANR a ainsi financé entre 2010 et 2018, 30 projets impliquant au moins une équipe étrangère (**Tableau 1 p.6**) financée sur les fonds de l'appel.

Dans le cadre des accords bilatéraux européens et internationaux (Allemagne, Brésil, Suisse...), six projets ont été financés sur les thématiques forestières depuis 2010.

Le département EERB (Environnement, Ecosystèmes et Ressources Biologiques) de l'ANR a participé et contribué financièrement à de nombreux ERA-NET et ERA-NET Cofund ouverts (*ERA-NET MED*, *Prima*, *Biodiversa*, *LEAP-Agri...*) ou dédiés aux recherches forestières (*SumForest*, *Forest value*) (**Tableau 2 p.8**).

Cet engagement, a ouvert et formalisé les dynamiques partenariales, permettant de financer vingt-deux projets de recherche pluri partenaires entre des équipes françaises et celles de la plupart des pays européens (**Fig. 4 p.8**). Au niveau européen, l'Allemagne est le



partenaire privilégié des équipes françaises puisque la moitié des projets internationaux auxquels participent des partenaires français impliquent au moins une équipe allemande, mais la Suède et l'Espagne collaborent également activement aux recherches forestières avec les équipes françaises.

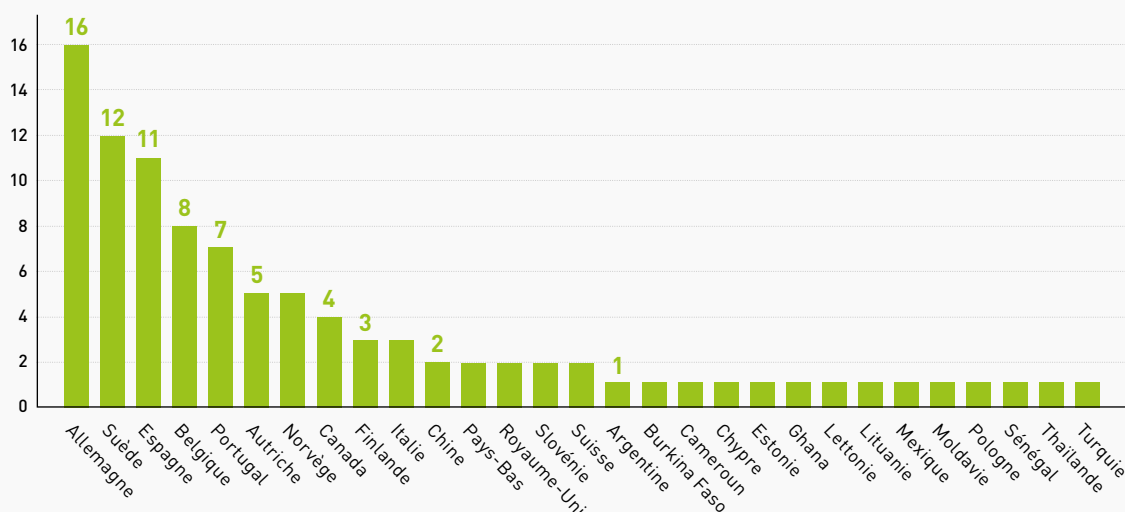
Les deux projets financés dans le cadre de l'ERA-NET Cofund LEAP-Agri ou les deux projets financés dans le cadre du Belmont Forum ont également permis de soutenir financièrement des partenariats internationaux africains ou asiatiques (Fig. 4).

De plus, dans les appels nationaux et internationaux, des partenaires de pays non engagés financièrement sur le programme ou par des accords bilatéraux, peuvent participer sur fonds propre. Ces différentes modalités ont ainsi permis à l'ANR de contribuer à étendre et à développer les partenariats d'équipes françaises avec des équipes des continents américain (Brésil, Canada, Costa Rica, Guatemala, Mexique, Pérou...), africain (Burkina Faso, Cameroun, Congo, Égypte, Ghana, Kenya, Maroc, Ouganda, Sénégal...) ou asiatique (Indonésie, Liban, Vietnam, Thaïlande...). Si l'on considère l'ensemble des projets nationaux ou financés dans le cadre de programmes internationaux, ce sont autour de 200 partenaires de 42 pays qui ont collaboré avec 431 équipes françaises.

**Tableau 2.** Programmes Européens sur lesquels l'ANR a financé des projets sur la recherche forestière

| PROGRAMMES EUROPÉENS ET INTERNATIONAUX SOUTENUS PAR L'ANR SUR LES FORÊTS | NB DE PROJETS « FORÊT » FINANCÉS |
|--------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|
| Belmont Forum                                                            | 1                                |
| Belmont Forum JPI-Climate                                                | 1                                |
| Blanc International – Accords bilatéraux                                 | 6                                |
| ERA-NET BiodivERsA                                                       | 8                                |
| ERA-NET Cofund ERAGAS                                                    | 1                                |
| ERA-NET Cofund FACCE SURPLUS                                             | 1                                |
| ERA-NET Cofund Forest value                                              | 3                                |
| ERA-NET Leap-agri                                                        | 2                                |
| ERA-NET NetBiome                                                         | 1                                |
| ERA-NET Sumforest                                                        | 3                                |
| ERA-NET WaterWorks 2015                                                  | 1                                |
| PLANT KBBE                                                               | 1                                |
| SEA-EU NET                                                               | 1                                |

**Figure 4.** Nombre de projets impliquant au moins un partenaire de pays étranger dans les appels européens ou internationaux



## Les financements sur les forêts dans le Programme « Investissements d'Avenir »



La forêt est présente en particulier dans cinq projets du Programme « Investissements d'Avenir » (aujourd'hui « Grands Programmes d'Investissement de l'État ») piloté par l'ANR pour un montant de 34 M€. Ces projets impliquent de nombreux acteurs de la recherche publique forestière métropolitaine et ultra marine (INRA, CNRS, Irstea, IRD, Cirad, AgroParisTech, Universités des Antilles, de Bordeaux, de la Guyane, de Lorraine, de Montpellier, de Pau et Pays de l'Adour, Arts et Métiers ParisTech, École Supérieure du Bois...).

Deux projets – un Laboratoire d'Excellence (LabEx) et un Equipement d'Excellence (EquipEx) – sont entièrement consacrés à la forêt. Le **LabEx ARBRE** (Recherches Avancées sur la Biologie de l'Arbre et les Ecosystèmes Forestiers), doté d'un budget 2011-2019 de 7,5 M€ pour un budget global de 76,7 M€, a pour objectif d'améliorer les connaissances fondamentales sur la biologie des arbres forestiers et des micro-organismes associés et sur l'écologie fonctionnelle des écosystèmes forestiers, ainsi que de proposer aux professionnels des outils et des bioindicateurs facilitant la gestion raisonnée des forêts. L'**EquipEx XYLOFOREST** (Plateforme d'Innovation « Forêt – Bois-Fibres-Biomasse du futur »), doté d'un budget de 10,2 M€ pour un budget global de 17,6 M€, est un ensemble coordonné de 6 plateformes de recherche, d'innovation et de services pour les forêts cultivées et leurs produits. Ces plateformes, dotées de plus d'une centaine d'équipements scientifiques, concernent la génomique et le phénotypage des arbres, les biotechnologies forestières, la mise au point de systèmes sylvicoles innovants, l'ingénierie avancée du bois, les produits composites à base de bois, la chimie et la

bio-raffinerie du bois. Trois de ces plateformes sont localisées en région Nouvelle-Aquitaine et rattachée à l'Idex de Bordeaux. Les 3 autres sont localisées en région Centre-Val de Loire, Pays de Loire et Bourgogne-Franche-Comté.

Deux autres LabEx ont une composante forêt majeure. Le **LabEx CEBA** (Centre d'étude de la biodiversité amazonienne) vise à faire avancer les connaissances sur la biodiversité amazonienne. Situé à Cayenne, le LabEx CEBA joue un rôle essentiel dans le développement des connaissances sur la forêt guyanaise, encore peu connue. Le **LabEx COTE** (Évolution, adaptation et gouvernance des écosystèmes continentaux et côtiers), intégré à l'Idex de Bordeaux, cherche à comprendre et prévoir les réponses des écosystèmes aux changements induits par l'homme et à fournir des outils et des méthodes de régulation ou de conduite de leur évolution. Il s'intéresse en particulier aux échanges entre écosystèmes forestiers, agricoles et côtiers.

Enfin, l'**Infrastructure de Recherche AnaEE-France** (Analyse et Expérimentation sur les Ecosystèmes) coordonne 14 sites pour l'étude de trois grands types d'écosystèmes forestiers : les forêts tempérées et continentales (6 sites), la forêt méditerranéenne (3 sites), les forêts et plantations tropicales (5 sites). Sur ces différents sites, AnaEE-France met à disposition des scientifiques une gamme de services variés, dont un service d'expérimentation *in situ*, une instrumentation pour le suivi à long terme et la mesure *in situ* des paramètres environnementaux, ainsi que des dispositifs et outils pour la collecte d'échantillons.



# INDEX

|              |      |                    |      |                                                  |      |
|--------------|------|--------------------|------|--------------------------------------------------|------|
| 3DForMod     | p.11 | FOR-WIND           | p.42 | SecPrime <sup>2</sup>                            | p.73 |
| ACOUFREEZE   | p.12 | FRAG&BINV          | p.43 | smallFOREST                                      | p.74 |
| AFRODYN      | p.13 | FUNTASTIC          | p.44 | SOUDABOIS 2                                      | p.75 |
| AGES         | p.14 | FUNTUNE            | p.45 | SPONFOREST                                       | p.76 |
| ALIEN        | p.15 | FUTURE-SAHEL       | p.46 | SPOP                                             | p.77 |
| AMAZ         | p.16 | H2Oak              | p.47 | StressInTrees                                    | p.78 |
| AMTools      | p.17 | HEVEADAPT          | p.48 | SUCROL                                           | p.79 |
| ARBRE        | p.18 | Hydraleaks         | p.49 | SYBIOPOP                                         | p.80 |
| BACTOWEATHER | p.19 | Intens&Fix         | p.50 | SYMActino                                        | p.81 |
| BIOCOP       | p.20 | LIGNOPROG          | p.51 | Tiptree                                          | p.82 |
| BIOFILTREE   | p.21 | MACACC             | p.52 | TIT-OAK                                          | p.83 |
| BIOMANGO     | p.22 | MECA <i>biofor</i> | p.53 | TRANSMUT                                         | p.84 |
| BIO PICK     | p.23 | MeCC               | p.54 | TreeTrace                                        | p.85 |
| BIOPROFOR    | p.24 | MicroWall          | p.55 | TROPIC                                           | p.86 |
| BIOTERRA     | p.25 | MOQAPRO            | p.56 | TWIST                                            | p.87 |
| CHEMLIVAL    | p.26 | MULTIFOREVER       | p.57 | URBANMYCOSERVE                                   | p.88 |
| CLIMTREE     | p.27 | NanoSoilC          | p.58 |                                                  |      |
| COLLENER     | p.28 | NAUTRAM            | p.59 |                                                  |      |
| COOLTREES    | p.29 | NOBEL              | p.60 |                                                  |      |
| CoolWood®    | p.30 | ODORSCAPE          | p.61 | LISTE DE 48 AUTRES PROJETS FINANCÉS SUR LE THÈME | p.89 |
| CWSSEA       | p.31 | OPTIFIN            | p.62 |                                                  |      |
| DENDRAC      | p.32 | PATCH              | p.63 |                                                  |      |
| DIGAS        | p.33 | PENSEE             | p.64 |                                                  |      |
| DYNAMIC      | p.34 | PEROXIDIV          | p.65 |                                                  |      |
| ECOPICS      | p.35 | PHOENIX            | p.66 | LABEX :                                          |      |
| ECOSFIX      | p.36 | PitBulles          | p.67 | ARBRE                                            | p.92 |
| ECOTERA      | p.37 | PRI-MAL            | p.68 | CEBA                                             | p.94 |
| EFEUR5       | p.38 | RAINWEBS           | p.69 | COTE                                             | p.96 |
| EPITREE      | p.39 | RAMSESII           | p.70 | EQUIPEX :                                        |      |
| EXPANDTREE   | p.40 | RESIPATH           | p.71 | XYLOFOREST                                       | p.97 |
| FireCaster   | p.41 | ReVes              | p.72 |                                                  |      |



## 3DForMod

## Combining remote sensing and 3D forest modelling to improve tropical forests monitoring of greenhouse gases emissions

## — Rappel des objectifs

La déforestation et la dégradation des forêts sont considérées comme la deuxième source mondiale d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre (GES). S'il est urgent d'aller au-delà de l'étude par satellite sur l'utilisation des terres et le changement d'occupation du sol (LULCC) pour surveiller avec précision les stocks de carbone sous les tropiques, il n'existe toujours pas de cadre intégré opérationnel pour atteindre cet objectif. En particulier, beaucoup d'incertitude provient de l'évaluation difficile de l'impact de la dégradation des forêts, qui n'implique pas la conversion des forêts. Le projet 3DForMod vise à intégrer les progrès de la modélisation forestière 3D et de la télédétection à très haute résolution pour améliorer la surveillance de la biomasse forestière aérienne, en particulier dans les pays tropicaux signataires de l'Accord de Paris. Notre objectif final est de fournir aux parties prenantes et aux décideurs des informations fiables et accessibles sur les stocks de carbone de la végétation dans les territoires forestiers, ainsi que des modèles prédictifs simples, basés sur des SIG, sur les conséquences de la dégradation forestière en termes d'émissions de GES. Le consortium de partenaires permet de couvrir toutes les étapes qui doivent être prises en compte pour augmenter rigoureusement les estimations de carbone hors sol d'une parcelle forestière à l'autre et d'une région à l'autre. Nous combinerons : une technologie avancée de balayage laser terrestre pour obtenir des données massives sur le volume des arbres (WP1) pour le développement de l'allométrie sans recourir à la récolte destructive (WP2) ; une modélisation forestière 3D pour relier les informations de télédétection aux données au sol afin d'améliorer la capacité des données satellites à haute résolution à estimer la biomasse (WP3) et détecter les changements et émissions liés à la dégradation forestière pour une mise à échelle régionale (WP4) ; une collaboration avec des agences de surveillance forestière des pays en développement pour intégrer les résultats des projets à leur système national REDD+ et renforcer leur capacité avec leurs partenaires internationaux (WP5).

## — Résultats majeurs

Les principaux résultats portent à ce stade sur deux aspects :

- 1 - la validation de la technologie du LiDAR terrestre pour l'extraction de paramètres pertinents sur la structure 3D des grands arbres de canopée (estimation de la biomasse épigée via le bio-volume de bois, extraction massive de données d'architecture des couronnes et lien avec les stratégies d'allocation des ressources dans les différents compartiments de l'arbre, simulation de la réaction des arbres au vent, estimation de la porosité des couronnes, du LAI/LAD, etc.)
- 2 - la synthèse des sources d'incertitude dans l'estimation des biomasses forestières depuis le terrain jusqu'à la cartographie par satellite (méthodologie de propagation des erreurs, identification des marges d'amélioration, etc.)

## — Production scientifique et valorisation

- Bugnicourt, P., Guitet, S., Santos, V. F., Blanc, L., Sotta, E. D., Barbier, N. & Coutron, P. 2018. Using textural analysis for regional landscape mapping, Eastern Guiana Shield. *Geomorphology*, 317: 23-44.
- Rosca S, Suomalainen J, Bartholomeus H, Herold M. 2018. Comparing terrestrial laser scanning and unmanned aerial vehicle structure from motion to assess top of canopy structure in tropical forests. *Interface Focus* 8: 20170038.



Mise en place d'un scanner terrestre LIDAR pour mesurer la structure des arbres de la forêt amazonienne péruvienne. Crédit photo : Alvaro Lau Sarmiento.

- Lau, A., Bentley, L. P., Martius, C., Shenkin, A., Bartholomeus, H., Raunonen, P., Malhi, Y., Jackson, T., Herold, M. 2018. Quantifying branch architecture of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Trees*, 32: 1219-1231.
- Jackson, T., Shenkin, A., Wellpott, A., Calders, K., Origo, N., Disney, M., Burt, A., Raunonen, P., Gardiner, B., Herold, M., Fourcaud, T. & Malhi, Y. 2018. Finite element analysis of trees in the wind based on terrestrial laser scanning data. *Agricultural of Forest Meteorology*, 265: 137-144.
- Lau, A., Martius, C., Bartholomeus, H., Shenkin, A., Jackson, T., Malhi, Y., Herold, M., Bentley, L. P. 2019. Estimating architecture-based metabolic scaling exponents of tropical trees using terrestrial LiDAR and 3D modelling. *Forest Ecology and Management*, 439: 132-145.
- Jackson, T., Shenkin, A., Moore, J., Bunce, A., van Emmerik, T., Kane, B., Burcham, D., James, K., Selker, J., Calders, K., Origo, N., Disney, M., Burt, A., Wilkes, P., Raunonen, P., Gonzalez de Tanago Menaca, J., Lau, A., Herold, M., Goodman, R. C., Fourcaud, T. & Malhi, Y. 2019. An architectural understanding of natural sway frequencies in trees. *J. R. Soc. Interface*, 16: 20190116.
- Lau, A., Calders, K., Bartholomeus, H., Martius, C., Raunonen, P., Herold, M., Vicari, M., Sukhdeo, H., Singh, J. & Goodman, R. C. 2019. Tree biomass equations from terrestrial LiDAR: a case study in Guyana. *Forests*, 10: 527.
- Réjou-Méchain, M., Barbier, N., Coutron, P., Ploton, P., Vincent, G., Herold, M., Mermoz, S., Saatchi, S., Chave, J., de Boissieu, F., Féret, J.-B., Momo Takoudjou, S. & Pélissier, R. 2019. Upscaling forest biomass from field to satellite measurements: sources of errors and ways to reduce them. *Surveys in Geophysics*, 40: 881-911.

## Le projet 3DForMod

**Partenaires** : UMR AMAP (IRD), Lab. Geoinformation Science and Remote Sensing, Wageningen University and Research (Pays-Bas), Inverse Problem Group-Tampere University of Technology (Finlande), École Normale Supérieure-Université de Yaoundé 1 (Cameroun).

## COORDINATEUR

**Raphaël Pélissier** : [raphael.pelissier@ird.fr](mailto:raphael.pelissier@ird.fr), <http://3dformod.free.fr/>

## ACOUFREEZE

## Suivi des stress liés au gel chez les arbres par l'analyse de la forme des ondes des émissions acoustiques

## — Rappel des objectifs

- Prédire la limite altitudinale des arbres à partir de leurs résistances au gel.
- Utiliser une nouvelle méthode acoustique de mesure des résistances au gel chez les Angiospermes.

Le gel est un facteur limitant pour la vie des plantes, car il peut causer des dommages sur les tissus vivants et la formation d'embolie dans des conduits du xylème. La formation de glace dans les tissus végétaux est habituellement détectée par analyse de dégagement de chaleur ou par thermographie infrarouge, alors que l'embolie induite par les cycles gel-dégels est mesurée par la perte de conductivité hydraulique (PLC). Nous avons utilisé plusieurs méthodes non destructives complémentaires pour comprendre les mécanismes produits lors d'un cycle gel-dégel et pour valider une nouvelle méthode acoustique (EUs). La source exacte des EUs émis lors d'un cycle gel-dégel n'avait pas été identifiée jusqu'à présent, en particulier chez les Angiospermes, dans lesquels les tissus du xylème sont composés de plusieurs types cellulaires différents.

Notre projet a permis de réaliser des progrès importants sur la façon de détecter les EUs afin de permettre le suivi de :

- (i) la formation de la glace et sa propagation (Charrier *et al.* 2015 ; Charra-Vaskou *et al.*, 2016),
- (ii) la localisation de glace dans le xylème (Charrier *et al.* 2014a),
- (iii) la perte de conductivité hydraulique après un cycle de gel-dégel (Charrier *et al.* 2014b),
- (iv) les dommages générés sur les cellules vivantes (Kasuga *et al.* 2015).

## — Résultats majeurs

Nos résultats indiquent que les événements de cavitation sont générés par le front de formation de la glace et produisent des EUs. Les seuils de cavitation des différentes espèces sont ainsi atteints lors de la prise en glace en lien avec le potentiel hydrique de la glace, qui lui dépend également de la température, tandis que l'expansion des bulles de gaz et l'embolie résultante se produisent lors du dégel. Ce potentiel hydrique très faible, rencontré à l'interface eau-glace est crucial, car il peut provoquer à la fois une plasmolyse irréversible des cellules vivantes du bois et de l'écorce (flux d'eau) et l'embolie des vaisseaux du xylème. Contrairement à une embolie causée par la sécheresse, l'analyse des EUs au cours des cycles de gel-dégel peut permettre de distinguer entre les étapes de cavitation et d'embolie, selon les phases de congélation et de décongélation, respectivement. Analyse des EUs permet de nouvelles perspectives dans le processus complexe de la prise en glace du xylème, et peut être utilisé pour surveiller la propagation de la glace dans une plante entière *in natura* en relation avec l'intensité des stress et la physiologie de la plante.

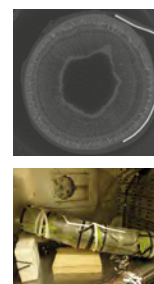


Illustration de quelques productions du projet ACOUFREEZE et photo des équipes Autrichiennes et Françaises lors du 2<sup>nd</sup> plenary meeting d'Innsbruck en décembre 2013.

## — Production scientifique et valorisation

Le consortium de ce projet a permis l'obtention d'une importante production académique (7 publications à comité de lecture) et de qualité (IFmoyen = 5.275 ; toutes de notoriété Excellente ou Exceptionnelle en Forestry et/ou Plant Sciences). Ces très bons résultats sont liés à la complémentarité des deux équipes qui avaient déjà l'habitude de travailler ensemble pour 2 précédents projets Huber Curien et à l'aide du partenaire Industriel, leader mondial des techniques acoustiques utilisées dans ce projet.

## Le projet ACOUFREEZE

**Partenaires :** UMR 547 PIAF (INRA), Université d'Innsbruck (Autriche), MISTRAS (France).

## COORDINATEUR

**Thierry Ameglio :** [thierry.ameglio@inra.fr](mailto:thierry.ameglio@inra.fr)



## AFRODYN

## Central African Rain fOrests: past DYNamics and future resilience

## — Rappel des objectifs

Les forêts tropicales humides (FTH) contiennent plus de 50 % des espèces vivantes réparties sur seulement 10 % de la surface terrestre. De plus, elles procurent un nombre importants de services écosystémiques et jouent un rôle central dans la mitigation du climat au niveau global. Améliorer notre compréhension de la dynamique passée et le potentiel de résilience futur des FTH produira des données vitales pour une meilleure conservation et gestion de cette biodiversité.

AFRODYN se concentre sur les forêts tropicales d'Afrique Centrale où la flore locale est fortement menacée. Les questions majeures adressées durant ce projet sont : Comment est-ce que les espèces se sont adaptées aux changements passés ? Comment est-ce que la diversité génétique sera impactée par les changements climatiques futurs ? Le projet utilisera une approche multi-espèces basée sur un des plus grands jeux de données génétique jamais produits pour des espèces de plantes Africaines. Nos objectifs seront :

1/ tester les différentes hypothèses sur la dynamique passée de la forêt en Afrique Centrale intra et inter espèces ;

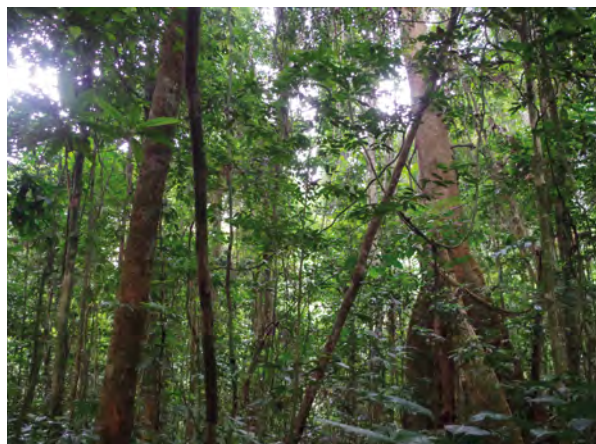
2/ prédire le potentiel de résilience de cet écosystème face aux changements climatiques futurs.

Pour cela, une approche de phylogéographie comparative sera utilisée, combinée à la modélisation de niche écologique simultanément sur six espèces de plantes codistribuées en Afrique Centrale. Les espèces sélectionnées appartiennent à deux familles d'arbre modèles inféodées aux FTH : les Annonaceae et les palmiers. Ces espèces combinent des caractéristiques importantes pour faciliter le projet : facilement identifiables sur le terrain ; caractéristiques et abondantes en FTH d'Afrique Centrale ; et nous disposons de bonnes données préliminaires sur elles.

## — Résultats majeurs

Le projet s'est décliné en plusieurs phases. Tout d'abord nous avons mené une phase intense de collections d'échantillons sur le terrain. Après deux ans nous avons collecté plus de 1 000 individus de 6 espèces d'arbres de la famille des Annonaceae et des palmiers codistribués à travers la forêt tropical Atlantique d'Afrique Centrale. Nous avons ensuite développé un kit de 350 marqueurs nucléaires via des méthodes de séquençage de nouvelle génération particulièrement utiles pour l'étude phylogéographique de la famille des Annonaceae. Un kit similaire pour la famille des palmiers était déjà disponible. Nous avons ensuite utilisé ces deux kits pour séquencer plus de 350 gènes par individu pour une sélection de 600 individus distribués en Afrique Centrale.

Les premiers résultats montrent que les espèces sectionnées ont une structure génétique plus ou moins importante à travers leurs distributions. La plupart des espèces montre une coupure phylogéographique entre les populations du sud et du nord de la région au niveau d'une charnière climatique et malgré une forêt en apparence continue. Ceci est en accord avec d'autres études, mais reste encore mal expliqué. Nous avons montré chez une des espèces étudiées que cette barrière pourrait être liée à une dispersion limitée à travers cette charnière et l'impossibilité des populations dispersées à s'établir et coloniser correctement la région (possiblement à cause de différence climatiques). Dans ce projet nous avons estimé pour la première fois l'origine temporelle, via la datation moléculaire, de la structuration génétique au sein des espèces. Nous montrons qu'elle est asynchrone



Collecte de spécimens botaniques au Gabon. Crédit photos : Thomas Couvreur.

entre espèces indiquant que les populations des différentes espèces réagissent de manière indépendante aux changements climatiques passés. De plus nous montrons que cette structuration s'est principalement mise en place durant les 2,5 millions d'années en accord avec l'intensification des cycles glaciaires qui ont fortement impacté les forêts tropicales d'Afrique centrale.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet a permis la publication à ce jour de huit articles dans des journaux internationaux à comité de lecture.

## Le projet AFRODYN

Partenaire : UMR 232 DIADE (IRD).

## COORDINATEUR

Thomas Couvreur : [thomas.couvreur@ird.fr](mailto:thomas.couvreur@ird.fr)

## AGES

## Approche géographique des services écosystémiques

## — Rappel des objectifs

La notion de services écosystémiques a connu, au cours des années 2000, un succès fulgurant, qui a suscité de nombreux débats : la caractérisation des écosystèmes au travers d'indicateurs extrêmement synthétiques destinés à fonder des décisions d'aménagement ne va pas sans poser des problèmes techniques, épistémiques et, *in fine*, éthiques. C'est sur ces débats que s'est fondé le projet AGES. En insérant la notion de services écosystémiques dans une perspective de « political ecology », il avait pour objectif de poser les bases de son utilisation raisonnée.

## — Résultats majeurs

Nous avons obtenu trois grands types de résultats.

► **Périmètre de validité et de légitimation de la notion de services écosystémiques.** La notion de services écosystémiques apparaît comme un produit de la modernité écologique destiné à renouveler, notamment à l'échelle globale, l'argumentaire de justification de la protection de la biodiversité en incorporant un discours économique (cf. figure illustrative).

► **Appropriations de la notion de services écosystémiques en contexte de forêt tropicale.** Pour comprendre la manière dont la notion de services écosystémiques est effectivement utilisée dans des contextes précis, nous avons travaillé sur l'utilisation des services écosystémiques au Brésil et au Gabon au travers de projet de Réductions des Émissions de gaz à effet de serre dus à la Déforestation et à la Dégradation forestière (REDD). Si la mise en œuvre des REDD donne lieu à des difficultés révélatrices à la fois des débats scientifiques, techniques et politiques autour de la notion de SE, il apparaît surtout que ces mécanismes sont des outils aux mains d'acteurs politiques qui les utilisent en fonction de leurs agendas, le plus souvent dans des dispositifs plus à même de relégitimer la gouvernance environnementale que de la refonder.

► **Pour une utilisation raisonnée des services écosystémiques fondée sur la cartographie de compromis de services.** L'émergence des débats autour des compromis de services se traduit, dans la science, par un nouvel effort de conceptualisation des milieux, de leur fonctionnement et de leur utilisation par l'homme – qui se prolonge dans le développement d'une cartographie des services écosystémiques. En nous fondant sur l'analyse et la critique de la littérature scientifique, nous avons identifié les conditions et les éléments nécessaires à la mise en place d'une méthodologie pour spatialiser les services écosystémiques, mais aussi pour déterminer les enjeux et les limites de cette spatialisation.

## Le projet AGES

**Partenaires :** UMR Société Environnement Territoire (CNRS - Université de Pau et des pays de l'Adour), UMR Laboratoire d'environnement, géomatique, télédétection (CNRS - Université de Rennes).

## COORDINATEUR

**Xavier Arnaud de Sartre :**  
xavier.arnaud@cnrs.fr

Notre approche des services écosystémiques permet de fournir de cette notion une image globale, de déconstruire son apparente objectivité et de proposer une démarche pour son utilisation raisonnée.

## — Production scientifique et valorisation

Un livre, six articles dans des revues internationales classées au meilleur niveau et trois chapitres d'ouvrages ont été tirés de ce projet de recherche, dont :

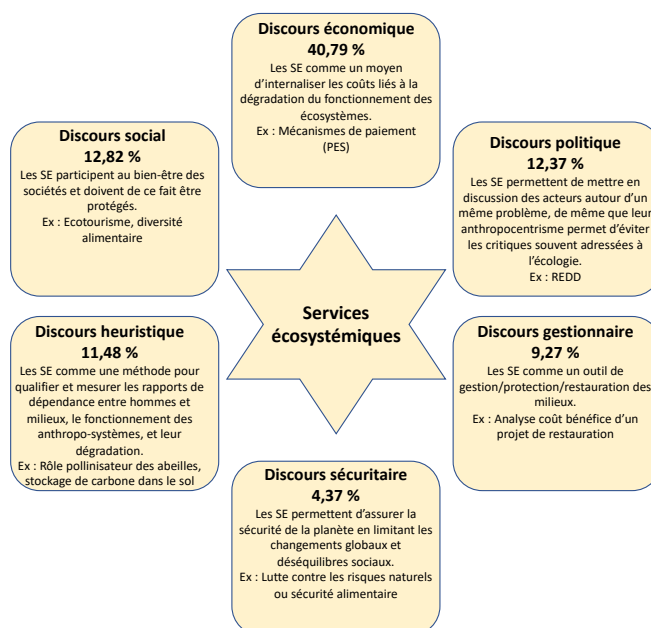
► ARNAULD DE SARTRE, Xavier, CASTRO-LARRAÑAGA, Monica, DUFOUR, Simon, OSZWALD, Johan (dir.), 2014, *Political ecology des services écosystémiques*, Bruxelles, PIE Peter Lang, 287 p.

► ARNAULD DE SARTRE, Xavier, OSZWALD, Johan, VEIGA, Ivan, CASTRO, Monica, DE ASSIS, William Santos, MICHELLOTTI, Fernando, ROCHA, Carla, SOUZA, Haroldo, SEBILLE, Pascal, DOLÉDEC, Sylvain, LAVELLE, Patrick, 2016, « Sustainable development policies and the spread of land-sharing practices – A statistical assessment in a frontier region of the Brazilian Amazon », *Journal of Rural Studies*, 48, p. 65-76.

► LE CLECH, H., Solen ; JEGOU, Nicolas ; ARNAULD DE SARTRE, Xavier ; DECAENS, Thibaud ; DUFOUR, Simon ; GRIMALDI, Michel ; OSZWALD, Johan. 2018, « Impacts of Agricultural Practices and Individual Life Characteristics on Ecosystem Services: A Case Study on Family Farmers in the Context of an Amazonian Pioneer Front », *Environmental Management*, 61 (5), p. 772-785. Article lauréat du Geneva Award 2018 du Swiss Network for International Studies (<https://snis.ch/awards/#igc>)

► CHARTIER, D., LE CORNIER, H., 2014, « La société civile au Sommet de la terre de Rio+20 », in *Regards croisés sur Rio+20 : La modernisation écologique à l'épreuve* (Foyer J. dir.), France, CNRS Editions.

Analyse sous Prospero® des catégories discursives auxquelles est associée la notion de services écosystémiques dans l'ensemble des documents soumis à la Conférence de Rio+20.



Domaines de légitimation de la notion de services écosystémiques à la conférence de Rio+20

## ALIEN

# Évaluation des effets à long terme des espèces d'arbres envahissantes sur la fonction protectrice des forêts contre les chutes de blocs en Suisse et en France : le cas d'*Ailanthus altissima*

## — Rappel des objectifs

*Ailanthus altissima*, aussi dénommé Ailante, est un feuillu importé de Chine en Europe au XVIII<sup>e</sup> siècle. De par sa capacité à coloniser rapidement l'espace, et en particulier les zones perturbées, cette espèce est devenue envahissante. Cet arbre est difficile à éradiquer en raison de sa capacité à rejeter après la coupe. Par conséquent, les forêts des régions chaudes et méridionales des Alpes, sont de plus en plus envahies par l'Ailante. Bon nombre de ces forêts poussent sur des pentes abruptes offrant ainsi aux biens, personnes et activités économiques une protection vis-à-vis des risques naturels tels que les chutes de blocs rocheux. L'objectif du projet ALIEN était, d'une part, d'accroître les connaissances sur la dissémination à long terme de l'Ailante dans les peuplements forestiers des Alpes du Sud et, d'autre part, d'évaluer l'effet de cette espèce sur la capacité de protection des forêts contre les chutes de blocs.

## — Résultats majeurs

Nos travaux ont permis d'affirmer que la dissémination de l'Ailante est majoritairement due à la forte disponibilité de la lumière et qu'elle augmente donc de pair avec l'intensité et la fréquence des perturbations. Cependant, nous avons aussi trouvé qu'en phase de régénération l'Ailante a une tolérance relativement élevée à l'ombre, ce qui explique la persistance plus longue de celui-ci dans les peuplements forestiers que ce qui avait été mentionné précédemment dans la littérature. De plus, il ressort de nos travaux que le comportement mécanique de cette espèce lui permet d'offrir la même capacité de réduction d'énergie de projectiles rocheux que celles des autres espèces d'arbres que l'on trouve typiquement sur les pentes sujettes aux chutes de pierres dans les Alpes. Par conséquent, le risque d'atteinte des enjeux en amont de ces peuplements envahis par l'Ailante ne devrait pas augmenter de manière substantielle suite à l'expansion de l'Ailante, à condition que la structure des peuplements forestiers ne change pas de manière substantielle.

## — Production scientifique et valorisation

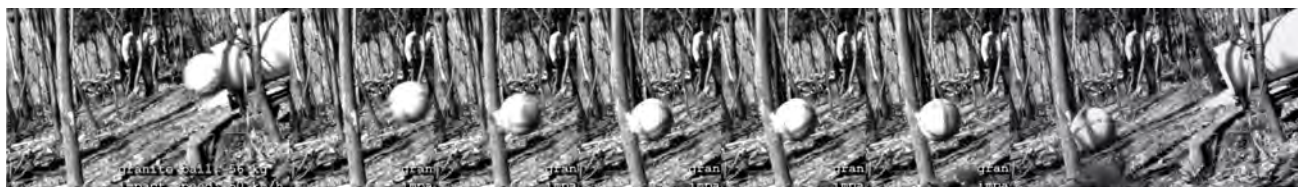
Le projet a donné lieu à plus de 10 publications scientifiques dans des revues à comité de lecture, couvrant les principaux résultats sur l'écologie d'*A. altissima*, les propriétés mécaniques de l'arbre et sa représentation dans des modèles numériques de simulations de comportement mécanique ou d'évaluations des risques générés par les aléas rocheux. Le transfert des connaissances a aussi été initié auprès des gestionnaires forestiers et du grand public.

### Le projet ALIEN

**Partenaires :** LESSEM (Irstea), Bern University of Applied Sciences (Suisse), WSL (Suisse), Université de Genève (Suisse).

### COORDINATEUR

**Björn Reineking :** [bjoern.reineking@irstea.fr](mailto:bjoern.reineking@irstea.fr)



L'ailante résistant à l'impact expérimental d'une boule de granit de 56 kg à 50 km/h. Copyright : Irstea.  
Vidéo complète : <http://content.jwplatform.com/players/arM4XctR-vFo0Mlue.html>



## AMAZ

## Configurations socio-spatiales, enjeux politiques et débats ontologiques en Amazonie

## — Étudier le rôle des Amérindiens dans la conservation des écosystèmes

Depuis maintenant trois décennies, les sociétés indigènes d'Amazonie occupent un rôle de plus en plus important sur l'échiquier politique, participant activement à la lutte contre la déforestation et le réchauffement climatique. Dans ce but, leurs organisations sont entrées en force dans l'arène politique nationale, leurs membres accédant parfois aux postes stratégiques de hauts représentants de l'État. Ces mêmes organisations deviennent les acteurs principaux de centaines de conflits dits « environnementaux » qui secouent la région, et qui les opposent à des entreprises et des appareils d'État dont les activités mettent en péril la diversité écologique. Le projet AMAZ réunit des chercheurs de différents pays (France, Brésil, Pérou, Colombie, Venezuela) dans le but d'analyser de manière comparative le rôle fondamental des peuples amérindiens dans la conservation des écosystèmes amazoniens, en essayant de faire affleurer les spécificités propres à chaque pays de la région et la façon dont s'y déplacent désormais les frontières du politique.

## — Regards croisés sur la représentativité politique, les logiques collectives et l'urbanisation amérindienne

Ce projet s'articule autour de trois axes de recherche. Un premier axe s'intéresse à la façon dont les communautés amazoniennes construisent une représentativité politique en s'engageant, de façon simultanée, dans des processus électoraux officiels et des voies activistes non gouvernementales dont les orientations sont parfois radicalement contraires à celles préconisées par l'État. Un deuxième axe étudie la manière dont chaque peuple amérindien intervient en politique en fonction des logiques culturelles, historiques et sociales qui lui sont propres. Il s'agit ainsi d'analyser les styles d'exercice du politique, qui émanent des formes d'organisation sociale et surtout parentale, des légitimités politiques, et de pratiques rituelles autochtones, encore peu connues par les anthropologues. Enfin, un troisième axe s'intéresse au fait que de plus en plus d'Amérindiens migrent vers les centres urbains des provinces amazoniennes, puis vers les grandes agglomérations du continent. Les allers-retours de plus en plus fréquents entre les villes et la forêt stimulent l'émergence de nouvelles formes institutionnelles qui doivent être examinées.

## — Résultats majeurs

Les sociétés amérindiennes de l'Amazonie, comme d'autres populations autochtones à travers le monde, se trouvent de façon accrue exposées aux inégalités économiques et à la discrimination culturelle et raciale, restant aux marges des dynamiques d'intégration que les états concernés réalisent souvent sans vraie conviction. Celle-ci est en partie le résultat d'une compréhension partielle des demandes des mouvements amérindiens, et des principes ontologiques sur lesquels ces demandes se fondent. En d'autres termes, l'intérêt à entreprendre une recherche de cette nature est de comprendre les détails d'une situation sociale complexe, en fournissant quelques éléments de méthodologie pour étudier des situations sociales multi-ethniques potentiellement conflictuelles et décisives pour les enjeux écologiques que la région d'étude représente, en ce qui concerne la gestion durable des forêts et de la ressource en eau douce la plus importante de la planète. Il est impératif que ses résultats concernant les conditions sociales de l'application des politiques publiques affectant les populations autochtones parviennent à infléchir sur



Pérou, réunion du gouvernement autonome wampis. Crédit photo : A. Chaparro.

les modèles de gestion et de résolution des conflits, entre les décideurs, les parties prenantes et les organisations sociales qui travaillent, tous les jours, sur ces questions.

## — Production scientifique et valorisation

6 missions de terrain (Pérou, Brésil, Venezuela, Guyana), 4 colloques internationaux déjà réalisés, 2 colloques en préparation, ainsi qu'un séminaire mensuel à l'EHESS (8 séances, 14 intervenants) et une dizaine de publications constituent à ce jour la production scientifique du projet AMAZ (voir <https://amaz.hypotheses.org/>). Cette production servira de base à une série de publications scientifiques en cours de consolidation. Parmi les publications publiées, citons :

- Surrallés, A., 2017, « Human rights for nonhumans? », *HAU, Journal of Ethnographic Theory*, 7 (3) : 211-235.
- Descola, P. 2017. « Les défis conceptuels de l'anthropocène », in G. Boeuf & al. (eds.), *L'homme peut-il accepter ses limites ?*, Editions Quae : 180-188.
- Erikson, P., Yvinec, C. et Nahum-Claudel, C., 2017, « Indiens sur scènes, étrangers captivés ? Mise en spectacle de la culture et secret », *Nuevo Mundo Mundos Nuevos*, « Série Colloques ».
- Chaumeil, J.-P., 2017, « Leadership in Movement. Indigenous Political Participation in the Peruvian Amazon », in P. Virtanen (ed.) *Creating dialogues: indigenous perceptions and changing forms of leadership in Amazonia*, University press of Colorado : 279-304.
- Allard, O., 2018, « The pursuit of sorrow and the ethics of crying », in T. Robben (ed.), *A companion to the anthropology of death*, Wiley-Blackwell : 117-129.

## Le projet AMAZ

**Partenaires :** UMR 7130 LAS [Collège de France], UMR 7186 LESC [CNRS-Université de Paris-Nanterre], Institut Français d'études andines (Pérou, CEA - Université de São Paulo (Brésil), NESSI - Université fédérale de Santa Catarina (Brésil).

## COORDINATEUR

**Alexandre Surrallés :** [alexandre.surralles@ehess.fr](mailto:alexandre.surralles@ehess.fr)



## AMTools

## Outils écologiques et légaux pour la migration assistée des forêts

## — Rappel des objectifs

L'objectif général de ce projet est de produire des outils écologiques et des politiques publiques pour la mise en place d'éventuels programmes de migration assistée (MA) d'arbres en France. Les enjeux concernent l'incertitude : a) du type du changement climatique pour un endroit spécifique; b) du degré d'adéquation des populations d'arbres actuelles aux nouveaux climats; et c) de l'équilibre entre la sauvegarde des ressources génétiques locales et les besoins des translocations. Nous cherchons donc des combinaisons de populations et d'espèces d'arbres qui peuvent offrir un équilibre entre les nouvelles conditions et la protection des ressources locales pour la forêt gérée, tout en respectant le principe de précaution. Nous souhaitons collaborer avec les parties prenantes pour trouver des solutions réalistes qui s'adaptent au contexte actuel de la gestion des forêts de protection et de production.

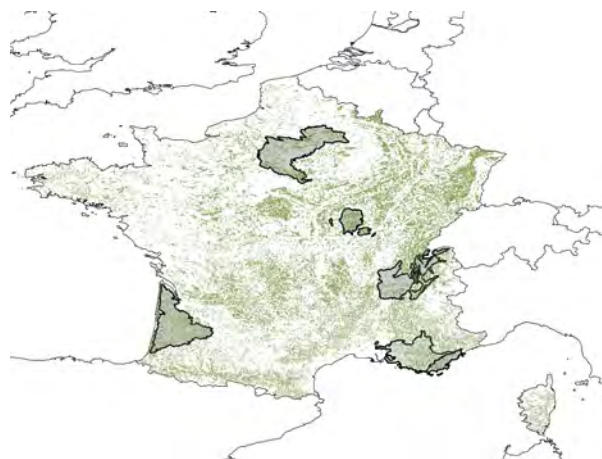
## — Résultats majeurs

Le concept de MA est presque inconnu sur le terrain, même si les gestionnaires sont conscients que les provenances doivent être déplacées dans le futur. Le manque d'effets climatiques forts sur les forêts françaises et l'accent mis sur la régénération naturelle empêchent les forestiers de considérer la MA comme une action nécessaire, au moins pour le court terme. En ce qui concerne les choix de la population d'arbres sur la base de l'exemple de *Abies alba* en Méditerranée, l'utilisation de la théorie de la décision formelle ne réduit pas le nombre de choix possibles car il n'y a pas de meilleure combinaison unique de provenances pour un site cible. Par conséquent, la répartition des risques avec plusieurs provenances constitue encore la meilleure stratégie pour faire face au changement climatique.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet a produit plusieurs manuscrits originaux dont sept publications dans des revues de haut rang, ainsi que d'un outil Web interactif (<https://assistedmigrationtools.shinyapps.io/seedzones>) pour l'observation des variables climatiques liées au changement de la croissance des plantes par rapport au changement climatique. Au moment de la présentation du rapport, trois autres manuscrits sont en cours d'évaluation par des revues. Le projet a également contribué à un atelier international sur le changement climatique organisé en consortium avec le projet EraNet Biodiversa Tiptree. Les articles scientifiques suivants (liste non-exhaustive) sont issus directement du projet :

- M. Benito-Garzon, B. Fady, H. Davi, N. Vizcaino-Palomar, J. Fernandez-Manjarres, Trees on the move: using decision theory to compensate for climate change at the regional scale in forest social-ecological systems. *Regional Environmental Change* 18, 1427-1437 (2018).
- M. Benito-Garzon, J. Fernandez-Manjarres, Testing scenarios for assisted migration of forest trees in Europe. *New Forests* 46, 979-994 (2015).
- M. Benito-Garzon, H. D. Minh, N. Frascaria-Lacoste, J. Fernandez-Manjarres, Habitat Restoration and Climate Change: Dealing with Climate Variability, Incomplete Data, and Management Decisions with Tree Translocations. *Restoration Ecology* 21, 530-536 (2013).



Zones d'étude où le projet AMTools a évalué la capacité adaptative des parties prenantes en France (Sansilvestri 2015).

- M. Benito-Garzon, H. D. Minh, N. Frascaria-Lacoste, J. F. Fernandez-Manjarres, Extreme Climate Variability Should Be Considered in Forestry Assisted Migration. *Bioscience* 63, 317-317 (2013).
- R. Sansilvestri, N. Frascaria-Lacoste, J. Fernandez-Manjarres, One option, two countries, several strategies: subjacent mechanisms of assisted migration implementation in Canada and France. *Restoration Ecology* 24, 489-498 (2016).
- R. Sansilvestri, N. Frascaria-Lacoste, J. F. Fernandez-Manjarres, Reconstructing a deconstructed concept: Policy tools for implementing assisted migration for species and ecosystem management. *Environmental Science & Policy* 51, 192-201 (2015).

## Le projet AMTools

**Partenaires :** UMR 8079 ESE (UPSUD-CNRS-AgroParisTech), UMR 8568 CIRED (CNRS), UR Ecologie des Forêts Méditerranéennes (INRA), GeeDAAF (Irsstea).

## COORDINATEUR

**Juan Fernandez-Manjarres :** [juan.fernandez@u-psud.fr](mailto:juan.fernandez@u-psud.fr)

# ARBRE

## Agilité pouR les BioRaffineriEs

### — Rappel des objectifs

Le rapport n° 380 présenté en 2016 au Sénat concernant la stratégie française vis-à-vis de la bioéconomie souligne la difficulté d'implémentation des industries de traitement de la biomasse, ainsi que la faiblesse de ce secteur de production qui est soumis à d'amples aléas : irrégularités de production en qualité et quantité, difficulté de l'ancrage territorial, dispersion et variété de l'approvisionnement, et nervosité de la demande. En effet, les bioraffineries actuelles s'appuient sur le modèle structurel et organisationnel des raffineries pétrochimiques. Il en résulte de fait des systèmes extrêmement spécialisés de par le procédé mis en œuvre, les matières premières valorisées, et les produits résultant de la transformation. Ceci constitue donc un obstacle majeur à l'adaptation de la bioraffinerie face aux aléas.

La problématique sous-jacente à ces constats relève d'un besoin d'agilité des bioraffineries, au niveau des systèmes physiques et d'information. Ceci se traduit par la capacité de la bioraffinerie à détecter les aléas (endogènes et exogènes) et à s'adapter à ces aléas. Sur le plan scientifique, le projet ARBRE s'intéresse à la caractérisation et à la conception d'une bioraffinerie agile, en rupture avec la structure figée héritée de la chimie du pétrole. Il s'agit de proposer une vision innovante de la structure de la bioraffinerie où le procédé de transformation est réparti sur différents acteurs et sites existants (récoltants, sites de traitement et de production, transporteurs, consommateurs) à l'échelle d'un territoire. Les acteurs interviennent suivant un processus collaboratif, qui est déduit en fonction de la biomasse disponible, du bioproduit ciblé et du contexte. Le procédé de transformation retenu ainsi que le rôle des acteurs choisis pour réaliser ce procédé peuvent donc changer pour s'adapter aux objectifs et aux contraintes du moment.

Cette vision s'appuie sur une économie de fonctionnalité, où les opérations du procédé sont servicisées, les unités et le matériel existants sont réutilisés. Elle facilite aussi la recherche de nouvelles solutions adaptées aux variabilités. Il devient alors envisageable de créer différents procédés alternatifs en fonction de la biomasse utilisée, des bioproduits visés ou du coût, du délai de traitement, de la distance de transport, ou de tout autre caractéristique de l'écosystème (au sens systémique) jugée pertinente par les décideurs.

Cette bioraffinerie est donc à la fois : virtuelle (au sens d'entreprise virtuelle), car elle résulte de la collaboration entre différents acteurs hétérogènes déjà existants ; et agile, car elle s'adapte structurellement à son écosystème.

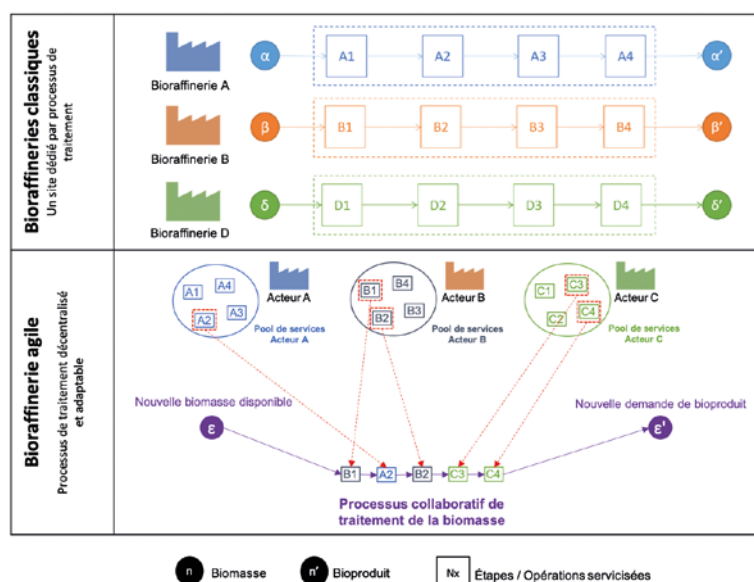
### — Résultats majeurs

Dans la première partie du projet, un méta-modèle permettant la représentation d'une bioraffinerie en tant que réseau collaboratif et de son écosystème a été développé. Les concepts et relations de ce méta-modèle de la Bioraffinerie Agile permettent de représenter les partenaires potentiels et leurs services (Qui ? Quoi ?), les objectifs de la collaboration (Pourquoi ?), l'environnement et le contexte dans lesquels elle s'inscrit (Où ?) et les indicateurs de performance associés (Comment ?). Ce méta-modèle permet d'organiser et de structurer la connaissance nécessaire à la prise de décision dans le choix des acteurs et de leurs services pour constituer le réseau collaboratif de traitement de la biomasse.

La seconde partie du projet s'intéresse au développement d'un algorithme de correspondance pour déduire automatiquement le processus et le réseau collaboratif pour traiter une biomasse ciblée en un bioproduit donné. Il s'appuie sur la connaissance organisée suivant le méta-modèle sus-cité et la connaissance métier relative aux opérations de transformation (opérations unitaires, équipements).

### — Production scientifique et valorisation

- Houngbé, M., Barthe-Delanoë, A. M., & Négny, S. (2019, Septembre). Servitization of biomass processing for a virtual biorefinery: Application to the lignocellulosic biomass in a French local territory. Dans : Working Conference on Virtual Enterprises (à paraître). Springer, Cham.
- Houngbé, M., Barthe-Delanoë, A. M., & Négny, S. (2018, Septembre). Towards Virtual Biorefineries. Dans : Working Conference on Virtual Enterprises (pp. 571-580). Springer, Cham.
- Houngbé, M., Barthe-Delanoë, A. M., & Négny, S. (2018, Juin). Apport d'agilité aux bioraffineries : vers une démarche collaborative et une servicisation des procédés. Dans : MOSIM 2018 Conference Proceedings.



### Le projet ARBRE

**Partenaires :** Laboratoire de génie chimique (ENSIACET), Solagro.

### COORDINATRICE

**Anne-Marie Barthe-Delanoë :**  
annemarie.barthe@ensiacet.fr

Principe de la bioraffinerie agile.

# BACTOWEATHER

## Comprendre et caractériser le rôle des communautés bactériennes dans le cycle des cations nutritifs dans les écosystèmes forestiers

### — Rappel des objectifs

Dans nos régions tempérées, plus de la moitié des écosystèmes forestiers sont développés sur des sols acides et pauvres en cations nutritifs directement accessibles aux racines des arbres. Dans ce contexte, d'où proviennent les éléments nutritifs nécessaires à la croissance des arbres ? En dehors des nutriments issus des pluies, des dépôts atmosphériques, du recyclage des éléments chimiques contenus dans les racines et feuilles mortes, ce sont les minéraux/rocs du sol qui représentent la principale source en cations nutritifs. Néanmoins les minéraux résiduels présents en sol acide sont peu altérables, rendant difficile l'accès des nutriments aux racines des arbres. Si une part de la solubilisation de ces minéraux est imputable à des mécanismes abiotiques, une autre est attribuable à l'action des organismes vivants, et notamment aux communautés bactériennes du sol, encore faut-il le démontrer. C'est dans cette problématique que s'inscrivait ce projet qui visait à déterminer :

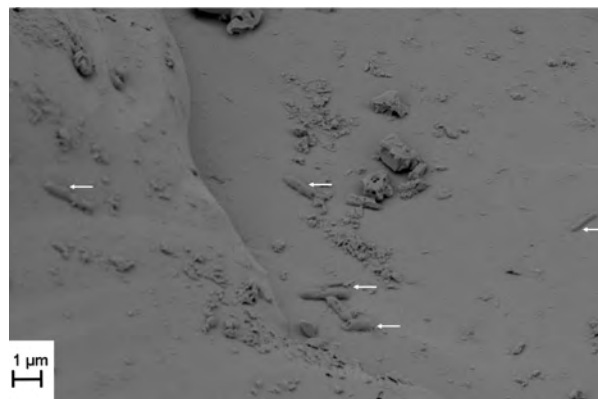
- 1) Quelles sont les communautés bactériennes capables d'altérer les minéraux et quelle est leur distribution ?
- 2) La nature chimique des minéraux et la disponibilité en cations nutritifs déterminent-elles la distribution et le fonctionnement de ces communautés ?

### — Résultats majeurs

Les minéraux sélectionnent des communautés bactériennes particulières à leur surface qui se différencient de celles du sol environnant. Cette sélection, d'autant plus accentuée que le minéral présente un fort niveau d'altération, semble favoriser les Beta-protéobactéries (*Burkholderia* et *Collimonas*) dans les sols forestiers acides. Une approche en microcosme a révélé que les communautés bactériennes actives varient en fonction du type de minéral. Les communautés bactériennes isolées des minéraux présentent des profils métaboliques limités et la capacité à solubiliser les minéraux, faisant de ces taxons de bons bioindicateurs du potentiel de fertilité biologique des sols.

### — Production scientifique et valorisation

- Lepleux *et al.* (2012) Abundance of Beta-Proteobacteria on mineral surfaces correlates with mineral weathering in forest soils. *Applied Environ. Microbiol.* 78:7114-7119
- Lepleux, C., Uroz, S., *et al.* (2013) A short-term mineral amendment impacts the mineral weathering bacterial communities in an acidic forest soil. *Res in Microbiol.* 164:729-739
- Uroz, S., *et al.* (2014) Structure and function of bacterial communities in ageing soils: Insights from the Mendocino ecological staircase. *Soil Biol. and Biochem.* 69:265-274
- Uroz S. and Oger P. (2015) *Burkholderia* sp. strain PML1(12), an ectomycorrhizosphere-inhabiting bacterium with effective mineral weathering ability. *Genome announ.* 3 no. 4 e00798-15
- Jeanbille *et al.* (2015) Soil parameters drive the structure, diversity and functions of the bacterial communities across a temperate beech forest soil sequence. *Microbial Ecol.* 71 :482-493
- Uroz *et al.* (2015) The Mineralosphere concept: mineralogical control of bacterial communities. *Trends in Microbiology.* 23 : 751-762.
- Kelly *et al.* (2016) Mineral type and solution chemistry affect the structure and composition of actively growing bacterial communities as revealed by bromodeoxyuridine immunocapture and 16S rRNA pyrosequencing. *Microbial Ecol.* 72 :428-442.



Observation au microscope électronique à balayage de la surface d'une particule de minéral (apatite) colonisée par des cellules bactériennes. Les cellules bactériennes sont signalées par des flèches blanches.

- Uroz S., *et al.* (2016) Specific impacts of beech and Norway spruce on the structure and diversity of the rhizosphere and soil microbial communities. *Sci Rep.* 6: 27756.
- Colin *et al.* (2017) Mineral type and tree species determine the functional and taxonomic structure of forest soil bacterial communities. *Appl and Environ. Microbiol.* 83. pii: e02684-16.
- Colin *et al.* 2017) Taxonomic and functional shifts in the beech rhizosphere microbiome across a natural soil toposequence. *Sci Rep.* 29:9604.
- Uroz, S. and Oger, P. (2017) *Caballeronia mineralivorans* sp. nov., isolated from oak-Scleroderma citrinum mycorrhizosphere. *System. and Appl Microbiol.* 2:423-424.
- Courty *et al.* 2018) Impact of soil pedogenesis on the diversity and composition of fungal communities across the California soil chronosequence of Mendocino. *Mycorrhiza.* 28:343-356.

#### Le projet BACTOWEATHER

**Partenaires :** UMR 1136 Interactions Arbres/micro-organismes (INRA).

#### COORDINATEUR

**Stéphane Uroz :** stephane.uroz@inra.fr



## BIOCOP

## Suivi de la biodiversité tropicale avec les satellites Sentinel-2 du programme Copernicus

## — Rappel des objectifs

Il y a un besoin urgent d'applications opérationnelles pour le suivi de la biodiversité des forêts tropicales, en raison de leur rôle clé pour la régulation climatique globale et les cycles biogéochimiques et de la menace exercée par l'activité humaine directe et les changements climatiques. Les avancées scientifiques réalisées avec l'imagerie hyperspectrale à haute résolution spatiale démontrent la possibilité de cartographier cette biodiversité, mais cette technologie n'est pas adaptée pour un suivi à grande échelle. Les satellites Sentinel-2 sont actuellement la meilleure opportunité pour transposer les méthodes existantes pour un suivi opérationnel par satellite, et leur potentiel doit être évalué. Le projet BIOCOP veut répondre au besoin de surveillance opérationnelle des milieux naturels et notamment des forêts tropicales, en identifiant le potentiel et les limites de Sentinel-2 pour cartographier la biodiversité de ces forêts. Nous proposons une approche de passage à l'échelle, depuis des observations de terrain jusqu'aux données satellitaires, en nous appuyant sur des données d'imagerie hyperspectrale aéroportée lorsque celles-ci sont disponibles, et en combinant les données expérimentales avec des outils de modélisation physique. Après validation de notre méthodologie, nous l'appliquerons à l'échelle de territoires pour lesquels le suivi de la biodiversité est un enjeu prioritaire, tels que la Guyane Française et le Cameroun.

BIOCOP s'appuie sur une collaboration entre écologues tropicaux, experts en télédétection et physiciens, permettant l'accès à des observations de terrain, des données d'imagerie aéroportée, et des outils de modélisation du transfert radiatif 3D. Il s'appuie également sur une infrastructure nationale donnant accès aux données satellite, ainsi qu'à des possibilités de transfert méthodologique pour une dissémination optimale des résultats issus de la recherche auprès des utilisateurs finaux des produits de télédétection.

## — Résultats majeurs

Le projet BIOCOP a permis le démarrage d'une thèse, intitulée « Potentiel des données satellites multispectrales Sentinel-2 pour la caractérisation de la biodiversité des forêts en milieux tropicaux : étude de l'échelle locale à l'échelle régionale » et réalisée par Éric Chraïbi. Dans le cadre de cette thèse, Éric Chraïbi travaille sur l'analyse de données issues de télédétection acquises sur des sites d'étude localisés notamment en Guyane Française et au Cameroun.

Dans le cadre du projet, un package a été créé dans le langage R. le package *biodivMapR* est mis à disposition du public et fait l'objet d'une publication dans la revue internationale à comité de relecture *Methods in Ecology and Evolution*. Le package *biodivMapR* intègre l'ensemble de la chaîne de traitement permettant de produire des cartes de diversité  $\alpha$  et  $\beta$ , à partir de données optiques, y compris des images multispectrales et hyperspectrales, mais aussi d'autres types d'images.

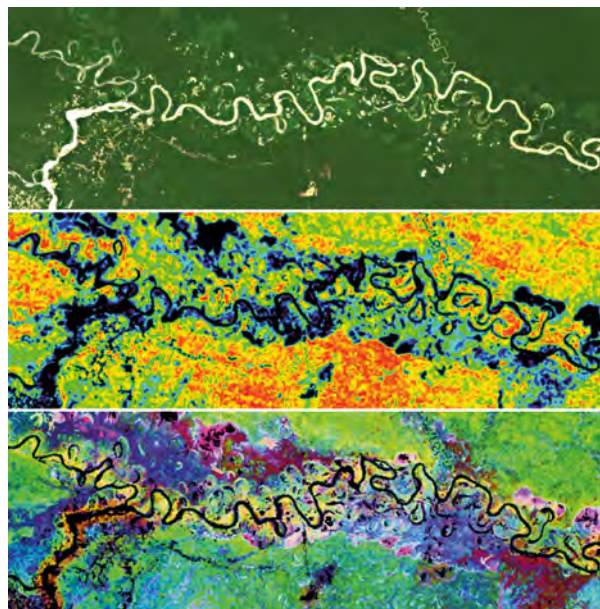


Illustration d'une image Sentinel-2 (canaux rouge, vert et bleu, haut) et des cartes de diversité  $\alpha$  (milieu) et  $\beta$  (bas) correspondantes, produites à l'aide des méthodes développées dans le package R *biodivMapR*.  
Crédits : J.-B. Féret, Irstea.

## — Production scientifique et valorisation

Publication :

- Féret J.-B. & de Boissieu F. (submitted) *biodivMapR*: an R package for  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity mapping using remotely-sensed images, *Methods in Ecology and Evolution*.

Chapitres d'ouvrage :

- Tusa A. *et al.* (2019) Fusion of hyperspectral imaging and LiDAR for forest monitoring. In *Hyperspectral Imaging*, eds. Jose Manuel Amigo, Elsevier. In Press.
- Bajjouk T. *et al.* (2019) Applications in Remote Sensing - Natural Landscapes. In *Hyperspectral Imaging*, eds. Jose Manuel Amigo, Elsevier. In Press.

Conférences :

- Féret J.-B. *et al.*  $\alpha$ - and  $\beta$ -diversity mapping in tropical forests using Sentinel-2 imagery. *Living Planet Symposium*, Milan (Italy), May 2019.
- Féret J.-B. & Barbier N. S2 BOA reflectance in the context of tropical rainforest: preliminary illustration of the challenges for the extraction of vegetation properties. *THEIA workshop 'Sentinel-2 L2A MAJA products'*, Toulouse, June 13-14 2018.

## Le projet BIOCOP

Partenaire : UMR TETIS (Irstea).

## COORDINATEUR

Jean-Baptiste Féret : [jb.feret@teledetection.fr](mailto:jb.feret@teledetection.fr)



## BIOFILTREE

## Filtration biologique pour la réduction des éléments traces dans la biomasse des arbres

## — Rappel des objectifs

L'idée centrale du projet BIOFILTREE repose sur l'utilisation d'espèces ligneuses et de leurs micro-organismes associés comme couverture biologique pour stabiliser les sols contaminés par des contaminants métalliques et ainsi réduire leur transfert dans la biomasse exploitable. Le choix des espèces d'arbres utilisables en phytorestauration doit reposer sur des essais de terrain à grande échelle, car chaque sol présente des historiques et des conditions environnementales qui lui sont propres. Le succès d'un projet de phytostabilisation passera par un certain nombre d'étapes dans la vérification de la faisabilité de la technologie, la sélection des plantes et la conception de l'aménagement du site de phytostabilisation. Pour arriver à ce concept, le projet reposait sur :

- ▶ le choix pertinent d'espèces ligneuses et de consortiums microbiens pour implantation sur des terrains contaminés
- ▶ l'évaluation de la performance de bioremédiation intégrée et le développement de marqueurs moléculaires pour améliorer la sélection des plantes et des micro-organismes en phytotechnologies
- ▶ l'obtention d'une évaluation socio-économique en vue d'une éventuelle exploitation de la technologie.

## — Résultats majeurs

Les principaux défis ont été atteints :

- 1/ la mise en œuvre de 3 ha d'essais de peupliers pour démontrer que l'inoculation mycorhizienne améliore significativement la biomasse produite ;
- 2/ la caractérisation des communautés microbiennes des sols contaminés à l'aide des technologies récentes ;
- 3/ l'isolement des microbes endophytes qui représentent des ressources potentielles pour les technologies de biorestoration à base de ligneux ;
- 4/ la réalisation en pilote d'essais de la filière torréfaction et pyrolyse pour valoriser la phytomasse ;
- 5/ l'évaluation économique du concept. BIOFILTREE continue au travers de deux projets en cours, PROLIPHYT (ADEME) et PHYTOCHEM (ANR).

## — Production scientifique et valorisation

Ce projet s'est avéré extrêmement productif. Quatorze manuscrits ont été publiés en 5 ans, 2 autres manuscrits sont à soumettre ou en révision. Il a donné lieu à près de 20 communications (orales et posters) à des congrès internationaux ou nationaux, et à près d'une dizaine de séminaires techniques et 2 contributions dans les journaux de vulgarisation « la Recherche » et « Environnement Magazine ». Il a aussi débouché sur les projets ANR-PHYTOCHEM (2014-2018) et ERA-NET-SusCrop-H2020 NETFIB (2019-2022).

- ▶ Assad M *et al.* (2016). Chemosphere, 146:1-7. doi: 10.1016/j.chemosphere.2015.11.103
- ▶ Pottier M *et al.* (2015). Environmental Pollution. 199 : 73-82. DOI: 10.1016/j.envpol.2015.01.010
- ▶ Zappellini C *et al.* (2015). Soil Biol Bioch 90: 101-110. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.08.008>
- ▶ Lacercat-Didier L *et al.* (2016). Mycorrhiza. 26:657-671. DOI 10.1007/s00572-016-0699-y.



Parcelle expérimentale de Pierrelaye (95) © M. Chalot  
Impact de l'inoculation par un consortium de champignons symbiotiques sur la croissance de peupliers cv Skado sur le site de Pierrelaye, après 2 années de culture. Les peupliers ont été soit inoculés (droite, soit non inoculés, gauche).

- ▶ Berthelot C *et al.* (2016) FEMS Microbiology Ecology. Oct;92(10). pii: fiw144. doi: 10.1093/femsec/fiw144.
- ▶ Foulon J *et al.* (2016) FEMS Microbiology Ecology (2016) 92 (10): fiw163. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw163>
- ▶ Foulon J *et al.* (2016) of the Total Environment. 571:1230-1240. DOI /10.1016/j.scitotenv.2016.07.151.
- ▶ Bert V *et al.* (2017) Biomass and Bioenergy, 96,1-11.
- ▶ Asad M *et al.* (2017) Industrial Crops & Products, 107 :63-72 ; doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.028
- ▶ Ciadamidaro L *et al.* (2017) Environmental & Experimental Botany, 139: 48-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.04.004>
- ▶ Durand A *et al.* (2017) Microbial Ecology, 74 :795-809. DOI: 10.1007/s00248-017-0984-0.
- ▶ Phanthavongsa P *et al.* (2017) & Experimental Botany, 143 :72-81. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2017.08.012>
- ▶ Berthelot C *et al.* (2018) Mycorrhiza. 28(3):301-314. doi: 10.1007/s00572-018-0826-z.
- ▶ Assad M *et al.* (2018) Journal of Environmental Quality 47(6) : 1496-1503. doi:10.2134/jeq2018.03.0106.

## Le projet BIOFILTREE

**Partenaires :** UMR 6249 Laboratoire de Chrono-Environnement (Université de Franche-Comté), INERIS, Agronutrition, ROCHE LTEE - Groupe conseil, Department of Natural Resource Sciences McGill University (Canada), Université de Laval (Canada), Université de Sherbrooke (Canada).

## COORDINATEUR

**Michel Chalot :** [michel.chalot@univ-fcomte.fr](mailto:michel.chalot@univ-fcomte.fr)

## BIOMANGO

## BIOdiversité et fonctionnement des écosystèmes dans les MANgroves de Guyane française : perspectives pour une gestion de l'éCOsystème dans son contexte amazonien

## — Rappel des objectifs

Les mangroves fournissent des services écosystémiques irremplaçables. 60 % des mangroves françaises se situent sur le littoral guyanais qui est adapté aux perturbations sédimentaires récurrentes liées à la migration de bancs de vase en provenance de l'Amazonie. L'action de creusement dans le sédiment des littoraux par les organismes fouisseurs (appelée bioturbation) joue un rôle clé dans le fonctionnement de la zone critique.

Les objectifs : 1) identifier la diversité des organismes fouisseurs au cours du développement d'une jeune mangrove, 2) évaluer le rôle joué par ces organismes dans le fonctionnement des mangroves de Guyane, 3) apporter des outils scientifiques pour la gestion et la restauration des mangroves, 4) transférer les connaissances scientifiques vers le public d'âge scolaire (primaire, collège et lycée).

## — Résultats majeurs

Malgré une faible biodiversité des organismes fouisseurs, ces communautés changent aussi rapidement que la mangrove croît. L'abondance élevée des organismes de petites tailles (vers et crustacés), la persistance de certaines espèces, et la forte biomasse des crabes associée au système racinaire des palétuviers, maintiennent une forte intensité de bioturbation au cours du développement de la mangrove. Cela favoriserait la circulation de l'eau, des débris organiques, des gaz dissous et des nutriments au sein des sédiments, ce qui *in fine*, stimulerait la croissance de la mangrove.

Les résultats acquis par les scientifiques lors du projet ont été transmis au public d'âge scolaire par des actions pérennes : 1) en France métropolitaine, un atelier pédagogique dédié aux classes de seconde dans le cadre du programme « à l'école de l'océan » proposé par Océanopolis ; 2) En Guyane, une formation spécifique sur l'écologie de la mangrove aux enseignants du secondaire (GRAC, Groupe Action Recherche).

## — Production scientifique et valorisation

BIOMANGO a participé à la formation de 4 doctorants, 1 post-doc, 10 Masters, et 2 techniciens. Les résultats sont valorisés par 16 publications scientifiques de rang A (7 publiées, 3 en révisions et 6 en cours d'écriture), un livre et 13 communications orales à l'échelle internationale.

Publications dans des revues internationales de rang A :

- Aschenbroich, A., E. Michaud, T. Stieglitz, F. Fromard, A. Gardel, M. Tavares, G. Thouzeau. 2016. Brachyuran crab community structure and associated sediment reworking activities in pioneer and young mangroves of French Guiana, South America. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 182, 60-71. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.09.003.
- Aschenbroich, A., E. Michaud, F. Gilbert, F. Fromard, A. Alt, V. Le Garrec, I. Bihannic, A. de Coninck, G. Thouzeau. 2017. Bioturbation functional roles associated with mangrove development in French Guiana, South America. *Hydrobiologia*, 794: 179-202. DOI: 10.1007/s10750-017-3093-7.
- Brunier, G., J. Fleury, E.J. Anthony, V. Pothin, C. Vella, P. Dusouillez, A. Gardel, E. Michaud. 2016. Structure-from-Motion photogrammetry for high-resolution coastal and fluvial geomorphic surveys. *Geomorphology: Relief, Processes, Environment*. 22, 2, 15-29. DOI: 10.4000/11358.



Site d'étude du projet BIOMANGO à la sortie de l'estuaire du Sinnamary (Guyane) : un banc de vase colonisé par une jeune mangrove à *Avicennia germinans* et entrecoupé de criques, favorables à la multiplication des habitats pour la biodiversité benthique. Vue aérienne prise par drone. Crédit photo : Jules Fleury, Université Aix Marseille.

- Ray, R., E. Michaud, R. C. Aller, V. Vantrepotte, G. Gleixner, R. Walcker, J. Devesa, M. Le Goff, S. Morvan, G. Thouzeau. 2018. Sources and distribution of carbon (DOC, POC, DIC) in a mangrove dominated estuary (French Guiana, South America). *Biogeochemistry*, DOI: 10.1007/s10533-018-0447-9.

- Rayman, S., Aller, R.C., Cochran JK. 2016. Cosmogenic <sup>32</sup>Si as a tracer of biogenic silica burial and diagenesis: Major deltaic sinks in the silica cycle. *Geophysical Research Letters*, 43(13): 7124-7132. DOI: 10.1002/2016GL069929.

- Walcker, R., L. Gandois, C. Proisy, D. Corenblit, É. Mouglin, R. Ray, F. Fromard. 2018. Control of 'blue carbon' storage by mangrove ageing: evidence from a 66-year-chronosequence in French Guiana. *Global Change Biology*, doi.org/10.1111/gcb.14100

- Walcker R., Anthony E. J., Cassou C., Aller R. C., Gardel A., Proisy C., Martinez J-M. & Fromard F. 2015 Fluctuations in the extent of mangroves driven by multi-decadal changes in North Atlantic waves. *Journal of Biogeography*, 42, 2209-2219.

Livre :

- Burgos A., Cormier-Salem, M-C., Fromard F., Gardel A., Hossaert-McKey, Imbet D., Leflaive J., Marchand C., Michaud E., Proisy C., Walcker R. *Mangrove, une forêt dans la mer*. Paru le 2 février 2018. Eds Cherche-Midi. Direction scientifique de l'ouvrage : F. Fromard, E. Michaud, M. Hossaert-McKey. 167 p. ISBN 978-2-7491-5764-1

Documentaire télévisé :

- « Le monde de Jamy : des forêts et des hommes », France 3, 15 juillet 2015.

## Le projet BIOMANGO

**Partenaire** : UMR 6539 LEMAR (Université Bretagne Ouest-CNRS-Irremer-IRD).

## COORDINATEUR

**Emma Michaud** : emma.michaud@univ-brest.fr

# BIOPICK

## Émulsions de pickering stabilisées par des nanoparticules issues de la biomasse

### — Rappel des objectifs

L'objectif général de ce travail a été de montrer comment le bois peut être valorisé sous forme de particules pour la stabilisation d'émulsions de Pickering. La valorisation de la biomasse pour des applications de haute valeur ajoutée est un véritable défi scientifique, technologique et environnemental. Ces recherches constituent une réponse aux axes « Matériaux et procédés » et « Nanomatériaux et nanotechnologies pour les produits du futur » dans le cadre du défi « Stimuler le renouveau industriel » proposé par l'ANR pour la substitution de surfactifs issus de la pétrochimie par des matériaux naturels, renouvelables et biodégradables. Le développement de méthodes de caractérisation, aux échelles nano- et micrométriques, doit permettre la compréhension des mécanismes de stabilisation des émulsions, directes, inverses et multiples.

### — Résultats majeurs

Le bois possède des fonctionnalités natives qui lui confèrent des propriétés hydrophiles et hydrophobes pour se placer aux interfaces et stabiliser des émulsions de Pickering. Le bois, matériau biosourcé et renouvelable, apparaît comme un candidat d'intérêt. Le bois et la forêt sont des puits de carbone. Valoriser les sous-produits du bois non utilisés vers des applications durables est un enjeu climatique.

Une méthode de préparation de particules a été mise au point à partir de différentes essences de bois. Une sélection des particules permet d'affiner la distribution en taille de particules, qui passe d'une distribution grossière < à 40 µm, à une distribution fine centrée autour de 200 nm.

Les études de caractérisation de surface ont montré que les particules de bois sont bien responsables de la stabilisation d'émulsions.

Aux interfaces eau/air, une relation a été établie entre la concentration en particules dans l'eau et la vitesse de diminution des tensions superficielles.

Ce projet a permis de démontrer la capacité des particules de bois à stabiliser des émulsions directes, inverses et multiples, avec les particules localisées à l'interface eau/huile.

Des études multiparamètres ont permis de comparer l'efficacité d'émulsification et de stabilisation d'émulsions en fonction des paramètres de procédés d'émulsification et de formulation.

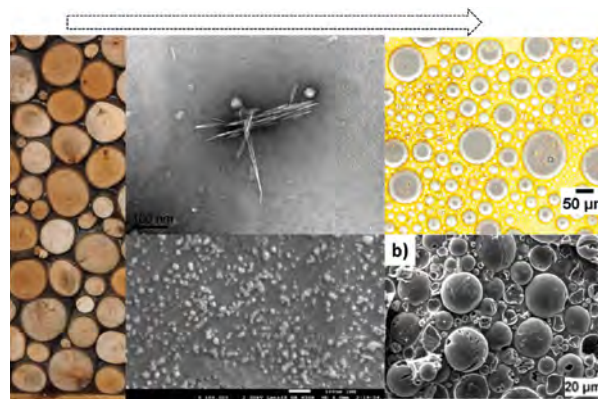
En formulation, des bornes de concentration en particules, en fraction volumique ont été déterminées. Les influences du pH et de la salinité ont été étudiées.

Les émulsions de Pickering stabilisées par des particules de bois présentent dans leur ensemble un comportement rhéofluidifiant. Une différence d'impact des technologies d'agitation sur la rhéologie a été notée.

Ces émulsions stabilisées par les particules de bois ont été utilisées pour former des matériaux qui entrent dans la catégorie de super-isolants.

Enfin, une étude a été réalisée pour préparer le changement d'échelle de travail et se diriger vers des échelles TRL supérieurs à 4.

Ce travail s'est montré exploratoire du potentiel du bois pour la stabilisation des émulsions de Pickering. Les résultats de ce projet offrent de très nombreuses perspectives pour étendre l'utilisation du bois pour la stabilisation des émulsions de Pickering, en chimie, dans les peintures, les cosmétiques ou les détergents...



Crédit photos : Romain Valentin.

### — Production scientifique et valorisation

Articles scientifiques :

- C. Jiménez Saelices, I. Capron, Design of Pickering Micro- and Nanoemulsions Based on the Structural Characteristics of Nanocelluloses, Biomacromolecules 2018 19 (2), 460-469.
- C. Jimenez-Saelices, B. Seantier, Y. Grohens, I. Capron, Thermal Superinsulating Materials Made from Nanofibrillated Cellulose-Stabilized Pickering Emulsions, ACS Applied materials & interfaces 10(18), 16193-16202

Communications orales :

- C. Jiménez Saelices, Pickering emulsions stabilized by cellulose nanocrystals and nanofibrillated cellulose: characteristics and properties, GDR SYMBIOSE, 29 - 1er Juin 2017, La Grande-Motte.
- F. Vasquez, R. Valentin, Z. Mouloungui, E. Ré, Study of bio-sourced particles for oil-in-water emulsion stabilization . AOCS 17th Latin American Congress and Exhibition of fats, oils and lipids Cancun (Mexique), 11-14 septembre 2017.

Communications par Poster :

- R. Valentin, F. Vasquez, Z. Mouloungui, Pickering emulsions stabilized by wood particles, RRB-15 Toulouse, 3-5 June 2019.
- F. Vasquez, R. Valentin, Z. Mouloungui, Travail de recherche doctorale sur les émulsions de Pickering, Doctoriales, 18-23 juin 2017, Albi.

Brevet :

- Émulsion et émulsion multiple de Pickering avec des particules de bois, R. Valentin, Z. Mouloungui, F. Vasquez, S. Tapin-Lingua, I. Capron, C. Jimenez-Saelices, FR859602, 17/10/2018.

Thèse de Doctorat INPT :

- VASQUEZ Francisco (01-04-2019) Emulsions de Pickering stabilisées par des particules de bois.

### Le projet BIOPICK

**Partenaires :** UMR 1010 Laboratoire de Chimie Agro-industrielle (INRA-INP), ENSIACET, UR 1268 Biopolymères Interactions Assemblages (INRA), Institut technologique (FCBA).

### COORDINATEUR

**Romain Valentin :** romain.valentin@toulouse-inp.fr



# BIOPROFOR

## Impact des changements globaux sur la biodiversité et la productivité des forêts alpines

### — Rappel des objectifs

Les forêts sont des écosystèmes de grand intérêt à l'échelle globale, car elles constituent à la fois d'importants puits de carbone et ont un rôle crucial dans les rétroactions de la biosphère sur le climat, tout en cristallisant de nombreux enjeux à l'échelle locale (biodiversité, production de bois, aspects récréatifs). Les changements globaux ont un impact direct sur la productivité forestière en modifiant les conditions abiotiques environnementales, comme le climat, mais ce fonctionnement est aussi modifié de façon indirecte, à travers l'impact des changements globaux sur la répartition des espèces et la composition en espèces. Pourtant, nous ne disposons toujours pas d'une approche intégrative qui considérerait les deux types d'effets (directs et indirects). Le but de BIOPROFOR était de combler ce manque, en proposant d'établir des prédictions de l'effet de la biodiversité sur la productivité des écosystèmes forestiers de montagne - écosystèmes-modèles identifiés comme particulièrement sensibles au changement climatique - en prenant en compte l'effet de facteurs biotiques et abiotiques depuis l'échelle régionale jusqu'à l'échelle locale. Les objectifs du projet étaient donc les suivants :

- 1/ Comment la composition des communautés influe-t-elle sur la productivité forestière et à travers quelle(s) composante(s) (richesse en espèces, diversité fonctionnelle...) ?
- 2/ Comment les conditions environnementales affectent-elles la relation diversité-productivité à l'échelle locale, le long de gradients environnementaux ?
- 3/ Peut-on établir des scénarios de changements de biodiversité et de productivité forestière en fonction de la réponse aux changements globaux ?

Pour mener à bien ces objectifs, le projet a reposé sur des résultats issus d'observations le long de gradients écologiques *in situ* et de travaux de modélisation.

### — Résultats majeurs

Ce projet a permis de montrer comment la diversité en arbres pouvait influencer le fonctionnement des écosystèmes forestiers et leur stabilité, et comment les conditions climatiques pouvaient modifier ces relations. Les résultats issus de modélisation

montrent en effet une sensibilité forte de la productivité à la composition en espèces, et suggèrent également que les extinctions locales dues au changement climatique vont avoir un impact négatif sur le fonctionnement, plus fort que l'effet direct du climat sur la physiologie. Quant aux analyses des données de terrain, elles montrent que les placettes monospécifiques ont une variabilité plus forte dans les valeurs de densité de bois. Ces résultats suggèrent donc le rôle primordial de la richesse spécifique et sa composition dans la productivité des écosystèmes forestiers, tant au niveau inter-spécifique qu'intra-spécifique.

Sur le long terme, BIOPROFOR a permis d'initier un réseau de placettes semi-permanentes de peuplements forestiers monospécifiques et mélangés le long de gradients environnementaux (GMAP, <https://oreme.org/observation/foret/gmap/>), ainsi que le développement du modèle *ForCEEPS* ([http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_en/forceeps](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/forceeps)), permettant de simuler des peuplements mélangés selon diverses conditions climatiques. Ces deux outils ont depuis été inclus dans plusieurs projets nationaux et internationaux.

### — Production scientifique et valorisation

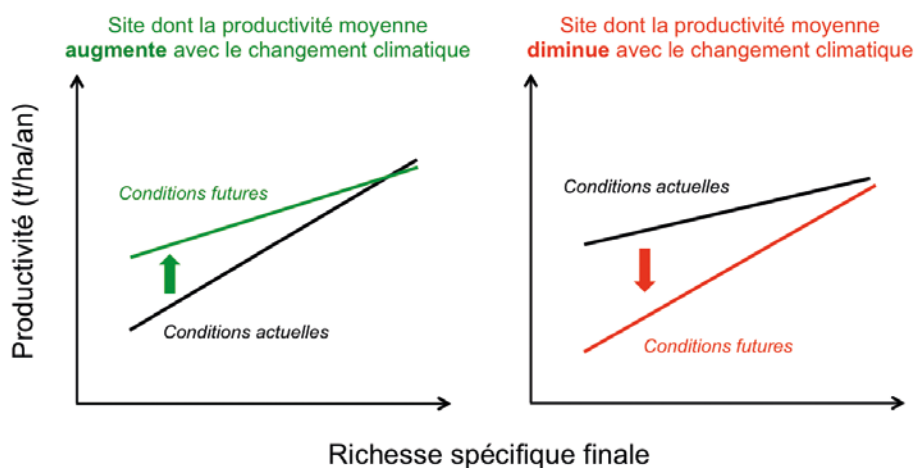
Ce projet a mené à la publication de 7 articles dans de très bons journaux généralistes et en écologie (Nature Scientific Reports, Ecology Letters, Functional Ecology, Diversity & Distributions), et à 15 communications internationales et nationales.

#### Le projet BIOPROFOR

**Partenaires :** UMR 5175 CEFE (CNRS), UMR 5553 LECA (CNRS-Université Grenoble Alpes-Université Savoie Mont-Blanc).

#### COORDINATEUR

**Xavier Morin :** [xavier.morin@cefe.cnrs.fr](mailto:xavier.morin@cefe.cnrs.fr)



Relation entre richesse spécifique et productivité simulée en conditions actuelles (ligne noire) et en conditions futures (ligne en couleur), pour un site dont la productivité moyenne augmente avec le changement climatique [à gauche], et pour un site dont la productivité moyenne diminue avec le changement climatique [à droite]. Les flèches représentent la tendance moyenne sur la productivité. À droite, pour les sites expérimentant des conditions futures plus sévères vis-à-vis de la croissance des arbres, la pente de la droite rouge est plus forte que la droite noire, montrant que l'effet diversité sur la productivité est accru en conditions futures, à l'inverse du panneau de gauche. D'après Morin X. *et al.* 2018. Long-term response of forest productivity to climate change is mostly driven by change in tree species composition. *Scientific Reports*, 8, 5627.



## BIOTERRA

## Maîtriser la prolifération microbienne dans des produits biosourcés pour des bâtiments sains et durables

## — Rappel des objectifs

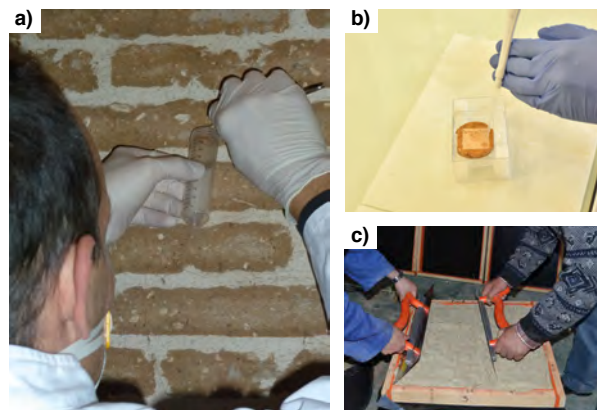
L'état de l'art montre qu'il existe depuis plusieurs années un regain d'intérêt pour l'utilisation de la terre crue à l'intérieur des bâtiments pour de multiples raisons (écologiques, esthétiques, patrimoniales et de confort). L'étude de la littérature montre qu'il est fréquent de renforcer et d'alléger ces matériaux en terre crue par l'ajout de matières végétales. La terre crue avec ou sans matière végétale est connue pour être un matériau sain et l'objectif principal du projet BIOTERRA est de démontrer scientifiquement l'absence de prolifération microbienne à la surface de ces matériaux dans des conditions normales d'exposition à l'intérieur des bâtiments.

Ainsi, pour atteindre cet objectif principal, le projet BIOTERRA s'est organisé autour de différentes tâches visant à atteindre les objectifs secondaires suivants :

- Formuler et caractériser des briques et des enduits adjuvants de fibres ou de granulats végétaux afin de vérifier si ces ajouts permettent d'améliorer les performances de ces matériaux de construction en terre crue.
- Développer des méthodologies innovantes pour prélever et identifier les souches microbiennes à l'intérieur de plusieurs ouvrages en terre crue ainsi qu'étudier les conditions de prolifération de ces souches microbiennes sur des produits biosourcés en terre crue,
- Et, en cas de prolifération, proposer des solutions de lutte microbiologique à appliquer sur ces produits.

## — Résultats majeurs

Les résultats sur les briques ont montré que l'ajout de faibles quantités de matières biosourcées (3 et 6 %) réduit les performances mécaniques tout en améliorant trop faiblement l'isolation thermique. Cet intermédiaire entre terre crue seule et mélanges type terre-paille (15 % massique environ) ne semble donc pas pertinent. Par contre, les propriétés hygrothermiques mesurées sur briques et sur enduits ont confirmé l'intérêt de la terre pour améliorer le confort intérieur. De plus, des avancées importantes ont été réalisées, elles concernent la formalisation et la validation d'un ensemble de méthodes d'essais réutilisables et reproductibles pour la caractérisation des enduits de terre crue fibrée. Concernant la partie microbiologique du projet, les résultats ont permis de confirmer les qualités sanitaires de la terre crue avec ou sans matière biosourcée à l'intérieur des bâtiments. L'analyse par métabarcoding des communautés bactériennes et fongiques issues des prélèvements de neuf bâtiments a permis de constituer une première base de données des micro-organismes présents naturellement sur ce type de support utilisés dans l'habitat. Les principaux taxons identifiés sont associés à : i) des environnements extérieurs et intérieurs conventionnels dans le cas des champignons et ii) aux poussières intérieures ou à l'environnement extérieur type sol dans le cas des bactéries. De plus, des essais de prolifération réalisés en laboratoire (LMDC/LGC/LRSV) ont montré l'absence de prolifération microbienne à la surface des matériaux en terre crue, même avec des matières biosourcées, dans des conditions normales d'utilisation de ces matériaux.



a) Prélèvements in-situ, b) Essai de prolifération. Crédit photos : Jean-Emmanuel Aubert. c) Fabrication de plaque d'enduits. Crédit photo : Fabrice Rojat.

## — Production scientifique et valorisation

Ce projet a permis la publication de 10 articles scientifiques internationaux (et au moins cinq supplémentaires devraient être soumis dans les prochains mois), 9 communications internationales et 11 communications dans des conférences françaises. De plus, à la suite de ce projet (début 2017), le CTMNC a coordonné la rédaction d'une norme sur les briques de terre crue et 4 partenaires du projet BIOTERRA (LMDC, Cerema, LGCB et CTMNC) font partie du comité de rédaction de cette norme.

## Le projet BIOTERRA

**Partenaires :** Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions (Université Toulouse III Paul Sabatier), Cerema, Laboratoire de Génie Civil et Bâtiment (ENTPE), UMR 5503 Laboratoire de Génie Chimique (Université Toulouse III Paul Sabatier), UMR 5546 Laboratoire de Recherche en Sciences Végétales (Université Toulouse III Paul Sabatier), Centre Technique de Matériaux Naturels de Construction, Agencement-structure, Agronutrition, Carrières du Boulonnais.

## COORDINATEUR

**Jean-Emmanuel Aubert :**  
jean-emmanuel.aubert@univ-tlse3.fr

## CHEMLIVAL

## Valorisation chimique des Lignines : application en chimie fine et polymères techniques

## — Rappel des objectifs

CHEMLIVAL vise la découverte de voies de production de molécules aromatiques à partir de lignines, préférentiellement par catalyse hétérogène, avec comme applications à long terme la synthèse de molécules bioactives ou de polymères techniques. En effet, la lignine, une bioressource non-alimentaire, est potentiellement valorisable pour l'obtention de synthons aromatiques à des fins de production de molécules bioactives et polymères techniques. Ces dernières applications visent à développer des procédures respectueuses de l'environnement alternatives aux voies « pétrochimiques » pour la synthèse de molécules organiques élaborées en valorisant la biomasse lignocellulosique. Ces méthodes permettraient aussi de répondre à de nombreuses préoccupations sociétales et industrielles. Pour ce faire, le projet réunit trois partenaires académiques (IRCELYON, ICBMS et C2P2) et deux partenaires industriels (FCBA et Novasep Process).

## — Résultats majeurs

Ainsi, dans le cadre du projet, une méthode de production de lignine de haute pureté à partir de liqueurs noires d'usine Kraft a été mise au point dans le cadre du projet (FCBA). La lignine est précipitée par acidification d'une liqueur noire avec du  $\text{CO}_2$ . Après lavage et séchage, la lignine a une pureté d'environ 96 %. Novasep a notamment travaillé sur la désulfatation de cette dernière. La majeure partie des études a porté sur la dépolymérisation de cette lignine par ozonolyse (FCBA), ou par catalytique homogène (ICBMS) et hétérogène (IRCELYON, C2P2). Les travaux réalisés en dépolymérisation catalytique de la lignine, en réacteur batch ou « trickle-bed » continu, ont permis de développer des catalyseurs et protocoles d'extraction conduisant à trois fractions bien distinctes : des monomères monoaromatiques (15-20 %<sub>mas.</sub>), des oligomères (fragments inférieurs de lignine, produits polyinsaturés issus de la dégradation des cycles aromatiques) (65-70 %<sub>mas.</sub>), et une partie de lignine réfractaire (10-15 %<sub>mas.</sub>) (IRCELYON). Optimisées à l'aide d'un modèle cinétique, les procédures développées conduisent à env. 0.8 %<sub>mas.</sub> de guaiacol en conditions hydrothermales (azote) ou env. 5 %<sub>mas.</sub> de vanille en conditions oxydantes (air). À court terme, la fraction la plus facilement valorisable est celle constituée d'oligomères.

En application « chimie fine » (IRCELYON), la transformation palladocatalysée des acides benzoïques donne des diphenyles et autres stilbènes par couplage décarboxylant. Après optimisation, le système catalytique (0.1 éq.  $\text{PdCl}_2$ , 0.75 éq.  $\text{Cu}(\text{OH})_2$ ,

$\text{K}_2\text{CO}_3$ , DMSO) donne les biaryles correspondants avec des rendements pouvant atteindre 70 %. Les stilbènes sont quant à eux obtenus avec des rendements atteignant 78 %. Parallèlement, nous avons étudié la décarboxylation sélective des dérivés coumariques qui permet l'obtention de styrènes hautement fonctionnalisés. Le système catalytique ( $\text{PEG-6000}$ ,  $\text{Cu}(\text{OH})_2$  5 %mol, 1,10-Phénantroline 6 %mol) s'est révélé très efficace et a abouti à la mise au point d'un procédé de synthèse de styrènes à l'échelle laboratoire illustré à travers la décarboxylation de différents précurseurs (charge de 5g).

Concernant l'ACV (FCBA), le scénario de fin de vie considéré correspond à 48 % de recyclage, 32 % d'incinération et 20 % de mise en décharge. L'impact sur le changement climatique de la production et de la fin de vie de 1 kg de lignine est de 2,91 kg  $\text{CO}_2$ , soit environ 34 % de moins que pour 1 kg de phénol. Si l'on considère la production de la colle, utiliser 40 % de lignine à la place de phénol, par rapport aux impacts environnementaux totaux de la colle, permet de réduire de 7 % l'impact sur le changement climatique. Utiliser de la lignine à la place du phénol permet donc de contribuer à la réduction de l'impact environnemental sur le changement climatique. En termes d'analyse de cycle de coûts, l'utilisation de lignine en remplacement du phénol n'a pas un impact majeur.

## — Production scientifique et valorisation

- ICMCB : Eur. J. Org. Chem., 2014, 781-787; Ind. Engineer. Chem. Res., 2015, 54, 6046-6051; Tet. Lett., 2015, 56, 2517-2520.
- IRCELYON : Top Catal., 2014, 57, 1430-1433; Green Chem., 2014, 16, 3089-3097; Appl. Catal. A: Gen., 2018, 560, 132-143.
- IRCELYON/FCBA : 2019, doi.org/10.1007/s13399-019-00435-z.
- Plateforme de production de lignines à l'échelle de 15 kg de lignine purifiée par semaine.

## Le projet CHEMLIVAL

**Partenaires :** UMR 5256 IRCELYON (Université de Lyon), UMR 5246 ICBMS (Université Lyon1), FCBA, UMR 5265 C2P2 (CNRS), Novasep.

## COORDINATEUR

**Laurent Djakovitch :**

laurent.djakovitch@ircelyon.univ-lyon1.fr



Schéma récapitulatif du projet CHEMLIVAL.

## CLIMTREE

## Ecological and socioeconomic impacts of climate-induced tree diebacks in highland forests

## — Rappel des objectifs

Le dépérissement forestier lié aux sécheresses et aux pullulations de quelques insectes ravageurs s'est intensifié de manière globale, en conséquence directe du changement climatique. Les résineux des forêts de montagne sont parmi les essences les plus atteintes mais peu d'études d'ampleur ont cherché à déterminer l'impact de leur mortalité massive sur ces écosystèmes importants. Le projet CLIMTREE vise donc à comprendre d'une part la réponse des invertébrés, d'importance majeure dans le fonctionnement des écosystèmes, à ces changements environnementaux et d'autre part l'attitude des différents usagers de la forêt face à ces dépérissements massifs et aux menaces induites sur la biodiversité, en France (sapin, Pyrénées), en Allemagne (épicéa, Bavière) et en Chine (pin, Yunnan).

► **Quantifier l'impact du changement climatique et de la gestion forestière sur les communautés d'invertébrés en forêt de montagne.**

Pour le volet écologique, vu l'échelle géographique du projet et l'hyperdiversité des Invertébrés, une approche génomique a facilité la caractérisation de la richesse spécifique. Utilisant les techniques de méta-codes-barres ADN, les échantillons de centaines de pièges à insectes et de prélèvements de sol ont été séquencés pour obtenir une vision globale des communautés d'invertébrés. Les milieux forestiers échantillonnés ont été sélectionnés sur un gradient croisant l'intensité du dépérissement aux échelles du peuplement et du paysage, et l'exploitation ou non des arbres dépérissants et morts par les gestionnaires. L'objectif méthodologique majeur était de développer des méthodes simples et standardisées, efficaces, peu coûteuses et répétables pour faciliter la description de la faune. *In fine*, cette large étude permettra de déterminer les potentiels changements de composition ou de richesse spécifique du milieu, tout en servant de point temporel initial à la bio-surveillance de ces écosystèmes en parallèle de l'évolution du climat.

► **Comprendre les enjeux socio-économiques afin d'améliorer les plans d'aménagement en forêt de montagne.**

Outre leur intérêt sur le plan écologique, les forêts de montagne sont aussi des espaces à enjeux économiques, récréatifs et culturels de première importance pour les habitants, les touristes ainsi que les propriétaires et gestionnaires forestiers. Dès lors, comprendre la perception des dépérissements par les différents usagers et évaluer leurs attentes et leurs capacités d'action est primordial pour co-construire les aménagements forestiers futurs et proposer des mesures intégratives. La recherche de solutions conciliant la production de bois, la conservation de la biodiversité y compris celle liée aux dépérissements, l'attractivité des territoires (en termes de cadre de vie et d'activités touristique) et les capacités d'adaptation des forêts d'aujourd'hui aux climats de demain est donc au cœur de CLIMTREE.

## — Résultats majeurs

Un réseau de 116 placettes (56 dans les sapinières des Pyrénées françaises, 30 dans les pessières du Bavarian Forest National Park et 30 dans les pineraies du Yunnan) a été mis en place. En France, la structure du peuplement local y a été finement décrite par un lot de variables dendrométriques. Le niveau régional de dépérissement des sapinières a été établi à trois échelles spatiales par l'analyse de séries temporelles de données de télédétection MODIS (2000-2016).



Membres de CLIMTREE évaluent le niveau de dépérissement du sapin pectiné dans le pays de Sault. Crédit photo : Carlos Lopez-Vaamonde.

En plus des variables environnementales, nous avons échantillonné les insectes sur chaque placette par deux méthodes: (i) des pièges d'interception multi-directionnels Polytrap® visant le groupe focal des coléoptères saproxyliques (associés aux bois morts et aux dendromicrohabitats), et (ii) des pièges Malaise® plus généralistes pour l'ensemble des insectes volants.

Les riches jeux de données écologiques colligés par les laboratoires des pays partenaires offrent des opportunités de mutualisation et de co-analyses assurant des conclusions plus génériques. Les enquêtes sociologiques montrent que les propriétaires et gestionnaires forestiers restent encore très marqués, même 15 ans plus tard, par les dépérissements massifs des sapins en France en 2003, par les attaques de scolytes sur épicéa en Allemagne et par les conséquences de sécheresses prolongées sur les pins en Chine. Dans le cas français, et loin du climat-scepticisme des années 2000, notre enquête montre que 90% des propriétaires et gestionnaires forestiers comme des usagers admettent aujourd'hui que le climat est en train de changer. Si l'impact économique de ces dépérissements a été bien évalué, aucun bilan écologique n'a été mené. De fait les recommandations édictées par les organisations professionnelles forestières proposent des mesures adaptatives qui ciblent la sauvegarde des niveaux de production forestière mais peu la biodiversité. Il s'agit notamment de diminuer l'âge d'exploitation, de favoriser la diversité des essences autochtones (hêtre en France, sapin en Allemagne, pin en Chine), ou en cas d'échec, de remplacer par des essences exotiques plus résistantes à la sécheresse (cèdre en France, Douglas en Allemagne). Mais ces différentes options ont un coût et exigent une maîtrise technique qu'une partie des propriétaires forestiers ne possèdent pas. Donner à tous la capacité de mettre en place ces mesures constitue donc un autre défi.

## Le projet CLIMTREE

**Partenaires :** UPR 633 Unité de Recherche de Zoologie Forestière (INRA), UMR 1201 DYNFOR (INRA), UMR 7261 Institut de Recherche sur la Biologie de l'Insecte (CNRS), Irstea, UMR 7205 ISYEB (MNHN), Bavarian Forest National Park - Univ Greifswald - Leibniz Institute of freshwater Ecology and inland fisheries (Allemagne), Kunming Institute of Zoology- Kunming Institute of Botany (Chine), National Research Council of Italy, Univ Padova (Italie).

## COORDINATEUR

**Carlos Lopez-Vaamonde :** carlos.lopezvaamonde@inra.fr



## COLLENER

## Collectifs socio-techniques et transition énergétique

## — Rappel des objectifs

La notion de « *transition énergétique* » a émergé au cours de la dernière décennie. Elle répond à l'enjeu climatique et au défi d'une décarbonisation massive de nos systèmes énergétiques. Les trajectoires de transition sont le plus souvent discutées à partir de scénarios et de visions quantifiées. Ces derniers sont élaborés à partir de « potentiels » de contribution associés aux nouvelles technologies de l'énergie, étant supposé que ces technologies possèdent chacune une capacité déterminée de réduction des émissions de dioxyde de carbone. Comme en témoigne le nombre croissant de controverses suscitées par ces technologies, ce cadrage quantitatif, technologique et économique peine à inscrire la transition énergétique dans des visions et des trajectoires partagées. Il devient donc stratégique d'*analyser les processus concrets d'émergence et de déploiement des nouvelles technologies de l'énergie* afin de mieux comprendre les conditions d'émergence de solutions partagées et soutenables.

Le questionnement sur la transition énergétique s'en trouve renouvelé. Il ne se limite plus aux conditions de l'opérationnalisation des scénarios qui la sous-tendent mais explore la *capacité des nouvelles technologies de l'énergie* - du fait de leur modularité et de leur potentiel de décentralisation - à *redistribuer les pouvoirs, les richesses et les risques*, et à contribuer à l'*émergence d'un potentiel de développement soutenable* à l'occasion de la décarbonisation de notre économie. Il s'agit donc tout autant d'apprendre sur la transition énergétique en cours, avec le déploiement des nouvelles technologies de l'énergie, que sur le potentiel de recompositions sociétales et environnementales dont elle peut être porteuse.

Le projet COLLENER suit le déploiement de *processus de transitions énergétiques à différentes échelles* (transnationale, nationale, locale), *pour différentes technologies* (photovoltaïque, éolien, réseaux intelligents, bois-énergie, bâtiment performant, capture et stockage géologique du dioxyde de carbone) et *dans différents pays* (France, Allemagne, Tunisie). Il totalise 31 études de cas.

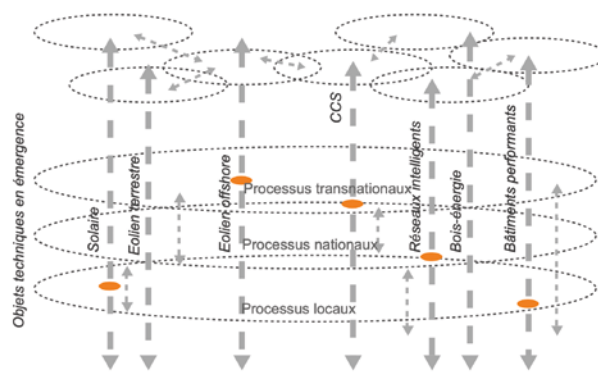
Les cas d'étude ont été abordés à différentes échelles - local, national, transnational - afin de faire émerger une perspective *transcendante* sur les processus contemporains de transitions énergétiques. En cela, le projet vise à contribuer à une approche renouvelée de la transition énergétique (attention portée aux processus, aux dynamiques, à une perspective transcendantale) et de la définition de la notion de « potentiel ».

Les nouvelles technologies de l'énergie sont abordées dans une perspective de sciences sociales, en tant que « systèmes socio-techniques » émergents. Les technologies ne sont pas dotées d'un potentiel intrinsèque, constitué par avance : elles peuvent être configurées de multiples façons, selon les collectifs - humains et non-humains (connaissances, artefacts, entités « naturelles »...) - qui s'organisent à l'occasion de leur déploiement et qui tentent d'en orienter le cours.

Un argument central du projet COLLENER est que les seuls potentiels qui existent sont des « potentiels de transition » : ces potentiels sont en émergence, ils résultent des processus sociaux, spatiaux et techniques suscités par le déploiement des nouvelles technologies de l'énergie.

## — Résultats majeurs

Outre les études de cas elles-mêmes, des lignes transversales d'analyse des processus contemporains de transition énergétique ont été élaborées. Elles permettent de caractériser ces processus et leur enjeu au travers de quelques dimensions clés



Les cas d'études sont des 'sites' autorisant le suivi de processus de transition énergétique

Principe de positionnement des études de cas pour l'analyse de la transition énergétique.

relatives à la manière dont cette transition est conduite, à savoir : la construction des ressources énergétiques renouvelables, le recours au marché, aux instruments économiques et aux politiques de démonstration technologiques dans le pilotage des politiques de transition énergétique, enfin les dimensions spatiales et temporelles de la transition.

Le projet a permis, d'une part, de souligner la nécessité de rendre visible et discutable l'ensemble des ressources (ex. le foncier, le paysage, les engagements individuels, les solidarités locales, les régimes d'appropriation, etc.) qui sont convoquées dans la construction de nouvelles ressources énergétiques. Il a par ailleurs permis de caractériser les conséquences, en termes de production et de distribution de richesses et de pouvoirs, d'un recours dominant au marché, aux instruments économiques et aux politiques de démonstration technologiques.

## — Production scientifique et valorisation

Les chercheur.e.s du projet COLLENER ont produit :

- ▶ 1 projet éditorial d'ouvrage en anglais en cours de soumission chez Plaggrave "Energy transition in the making: a sociotechnical inquiry" ;
- ▶ 2 nouveaux projets collaboratifs ;
- ▶ 12 articles dans des revues anglophones et 9 dans des revues francophones ;
- ▶ 7 chapitres dans des ouvrages anglophones et 6 dans des ouvrages francophones ;
- ▶ 28 communications dans des colloques anglophones et 35 dans des colloques francophones ;
- ▶ 18 actions de diffusion/vulgarisation et 3 manifestations scientifiques.

## Le projet COLLENER

**Partenaires :** CIRED, Irstea, UMR 5194 Politiques publiques, Action politique, Territoires (Université Joseph Fourier), UMR 5600 Environnement Ville Société (CNRS-Université Lyon 3), Électricité de France Recherche et Développement, EA 1135 Centre d'Étude et de Recherche sur les Paysages (Université de Lorraine).

## COORDINATEUR

**Alain Nadaï :** [nadai@centre-ciired.fr](mailto:nadai@centre-ciired.fr)



## COOLTREES

# Le rafraîchissement des villes par les arbres – Quantification et modélisation pour le développement de villes durables

## — Rappel des objectifs

L'objectif général est d'évaluer et de modéliser l'évapotranspiration des arbres urbains en relation avec leur environnement et de relier leur rôle dans le climat urbain à leurs traits structurels et fonctionnels en modélisant des processus à 3 échelles différentes: l'échelle des arbres, l'échelle du canyon et l'échelle de la ville. Sur la base des expériences en cours dans la ville de Strasbourg (France), le projet vise i) à quantifier l'évapotranspiration et l'ombrage d'arbres urbains (tilleuls argentés - *Tilia tomentosa* Moench.) en relation avec leur structure (fraction de gap, indice de surface foliaire, densité de surface foliaire), leur physiologie (réponse de la conductance stomatique au climat, azote foliaire), la disponibilité en eau et le climat, ii) à intégrer dans un modèle de bilan énergétique 3D d'un canyon urbain les processus d'ombrage et d'évapotranspiration des arbres en suivant le formalisme d'un modèle écophysique d'arbre validé (RATP), et iii) à effectuer une comparaison entre le flux de chaleur latent fourni par le schéma SURFEX et les modèles à moyenne échelle Meso-NH et LASER / F.

D'un point de vue plus méthodologique, ce projet vise à évaluer la variabilité des espèces d'arbres et de leur structure observée dans les villes en fournissant une méthode rapide, efficace et robuste pour estimer les métriques de structure de la canopée urbaine (géométrie, topologie, LAI, LAD) basées sur des acquisitions par scanner laser terrestre (LiDAR).

## — Résultats majeurs

1. La première année du projet a permis de finaliser la thèse d'Elena Bournez soutenue en novembre 2018 sur l'« Étude du rôle de la végétation dans la création de microclimats urbains. Approche combinée de mesures et de modélisations à différentes échelles. », en collaboration avec le partenaire 2 du projet. Le travail entrepris dans le cadre du projet COOLTREES a donné lieu à une publication dans une revue avec comité de lecture sur les liens entre représentation de la surface foliaire et simulation de la transpiration et de l'ombrage : Bournez, *et al.* (2019).
2. Depuis janvier 2019 une stagiaire de MII, Alice Maison d'Agro-ParisTech, a été recrutée sur le projet COOLTREES afin de mettre en place les bases de données regroupant toutes mesures effectuées sur la zone d'étude du jardin historique de Strasbourg. La période va de l'année 2014 à l'année 2018 et concerne les

données géométriques (acquisitions LIDAR) des bâtiments et des arbres, les données météorologiques (rayonnement, température et hygrométrie de l'air), les flux de chaleur latente des arbres estimés via des flux de sève, et des suivis de température de sol et de couvert. L'objectif de ce travail est de publier un « data paper » rendant les données accessibles à la communauté scientifique.

3. En première année du projet à + 6 mois, un CDD a été recruté pour une durée de 1 an renouvelable afin de réécrire le code de calcul LASER/F en C++. Toute la partie géométrique des bâtiments, des arbres et le forçage radiatif ont été intégrés dans la version C++ du code. Le modèle de fonctionnement des arbres est en cours d'intégration.

## — Production scientifique et valorisation

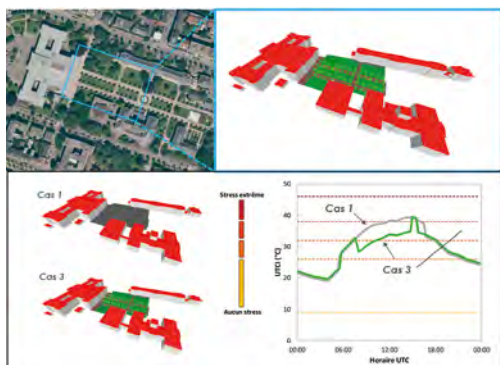
- Bournez, *et al.*, 2019. Sensitivity of simulated light interception and tree transpiration to the level of detail of 3D tree reconstructions. Urban Forestry and Urban Greening, (38), 1-10. , DOI : 10.1016/j.ufug.2018.10.016).
- Bournez E., Landes T., Kastendeuch P., Najjar G., Saudreau M., Colin J., Ngao J. 2018. Simulation of urban vegetation impact based on the microclimate model LASER/F: the case study of a park in Strasbourg. International Conference on UrbanClimate (ICUC 10), New-York, 6-10 août.
- Bournez E., Kastendeuch P., Landes T., Najjar G., Saudreau M., Colin J., Ngao J., 2018. Simulation du rôle de la végétation d'un parc urbain à partir du modèle microclimatique LASER/F : le cas du jardin du Palais Universitaire à Strasbourg. Colloque AIC, Nice, 4-7 juillet 2018, 6 p.
- Bournez E., Kastendeuch P., Landes T., Saudreau M., Najjar G. 2018. Reconstruction 3D d'un environnement urbain à partir de données photogrammétriques et lasergramétriques acquises par voies aériennes pour la simulation du microclimat d'un parc urbain. Atelier TEMU, Strasbourg, 19-20 mars 2018.

### Le projet COOLTREES

**Partenaires :** UMR 547 PIAF (INRA), UMR 7357 ICUBE (Unistra), Eurométropole de Strasbourg, Plante et Cité.

### COORDINATEUR

**Marc Saudreau :** marc.saudreau@inra.fr



Simulation du rôle des arbres dans l'indice de confort thermique (UTCi) sur le parc du jardin du palais universitaire de la ville de Strasbourg à l'aide du modèle de simulation LASER/F.  
Cas 1 : jardin sans les arbres. Cas 3 : jardin avec les arbres.



Méthodologie de simulation de l'effet rafraîchissant d'un arbre : de l'acquisition par Lidar terrestre à la simulation de la transpiration.

## CoolWood®

## Développement industriel d'un procédé innovant de stockage et de conservation des bois par maîtrise de la température et de l'humidité

## — Rappel des objectifs

Chaque année, la valeur ajoutée de toute la filière industrielle du bois se trouve amputée de manière très importante par les attaques des agents biologiques qui détériorent les bois fraîchement abattus. En effet, depuis l'abattage des arbres en forêt jusqu'au séchage des débits, la qualité des bois stockés est constamment remise en cause par des attaques d'origine biologique (champignons, bactéries...). Les produits bois peuvent ainsi perdre une partie, voire la totalité de leur valeur marchande. Dans les situations d'urgence (tempêtes, épidémies...), cette difficulté est encore exacerbée.

Actuellement, il existe trois grandes techniques pour maintenir la qualité des bois : la protection humide (aspersion, immersion) ; la conservation par ensilage (sous bâche) ; le traitement chimique. Aucune n'apporte pleinement satisfaction (manque d'efficacité technique, contraintes, coût économique et environnemental élevé...).

Le projet « CoolWood® » a visé le développement d'une nouvelle technologie de maintien de la qualité des bois. Les grumes et billons sont stockés dans une enceinte maintenue à basse température, pour bloquer l'action des agents biologiques dégradateurs ; à un degré d'hygrométrie élevé, pour ralentir le séchage des bois ronds et éviter leur déformation (fentes et gerces).

Le projet a permis de lever différents verrous scientifiques et technologiques :

- l'effet de la température sur la dégradation biologique des bois était mal connu et difficile à prédire notamment car d'autres facteurs viennent interagir (humidité et oxygène du milieu...). La validité de notre procédé devait donc être confirmée par le biais d'une expérimentation scientifique rigoureuse ;
- l'effet des basses températures sur le séchage naturel des bois, sujet également peu étudié mais dont la connaissance était primordiale pour notre projet.

Aujourd'hui, la mobilisation des bois entre la forêt et les industries de transformation s'organise autour d'une mise en œuvre des techniques traditionnelles de stockage des bois, qui ne sont pas optimales. Les possibilités offertes par notre procédé pour améliorer cette organisation devaient donc être définies, sur le plan de la mise en œuvre industrielle du procédé. L'enjeu technique a consisté à réunir des technologies existantes pour concevoir des systèmes industriels globalement optimisés.

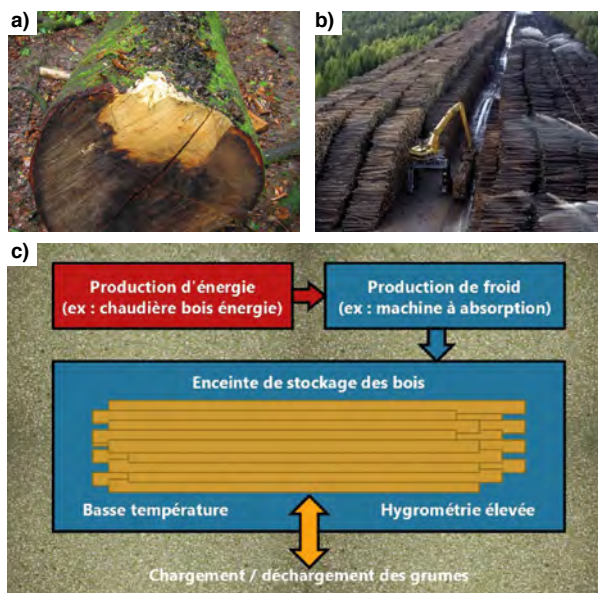
## — Résultats majeurs

Le programme de recherche industrielle CoolWood® a permis :

- d'améliorer la connaissance des phénomènes de dégradation biologique des bois et du séchage des bois à basse température ;
- d'étudier l'impact des techniques existantes de maintien de la qualité des bois (analyse des cycles de vie) ;
- de valider la faisabilité scientifique et technique de notre procédé innovant ;
- de développer une nouvelle technologie industrielle de stockage / conservation des bois, basée sur ce procédé.

Les résultats des travaux montrent que :

- le procédé permet de maintenir une qualité des bois meilleure que les autres méthodes (aspersion en particulier) ;
- les besoins énergétiques du procédé sont faibles : 25 à 40 kW de puissance maximale appelée pour 1 000 m<sup>3</sup> de bois stockés.



a) Pourriture blanche, b) Protection humide par aspersion, c) Schéma de procédé « CoolWood® ».

## — Production scientifique et valorisation

Production scientifique depuis le début du projet :

- LERMAB : transport d'humidité et sorption dans les écorces de hêtre et d'épicéa,
- LERMAB : publication en préparation sur la modélisation,
- LERMAB / LERFOB : publication sur l'effet de la température sur la dégradation du bois,
- LRGP : 2 articles sur la lixiviation de matières organiques du bois en stockage sous aspersion,
- BIOMASSE CONSEIL : dossier dans le magazine « Le Bois International » n°22, juin 2017.

Valorisation :

- Une société « CoolWood® » va être créée pour valoriser commercialement le procédé
- Une installation industrielle pilote va voir le jour dans une scierie intéressée par le procédé.

## Le projet CoolWood®

**Partenaires :** Société BIOMASSE CONSEIL, Société INDDIGO, Coopérative Forestière Forêts et Bois de l'Est, Société Forestière de la Caisse des Dépôts et Consignations, UMR 7563 LEMTA (Université de Lorraine), UMR 1092 LERFOB (INRA), EA 4370 LERMAB (Université de Lorraine), Laboratoire LRGP (CNRS).

## COORDINATEUR

**Luc Evrard, Biomasse Conseil :** luc.evrard@coolwood.fr

## CWSSEA

## Assessments of vulnerability of mature and secondary forests to climatic water stress in Southeast Asia

## — Rappel des objectifs

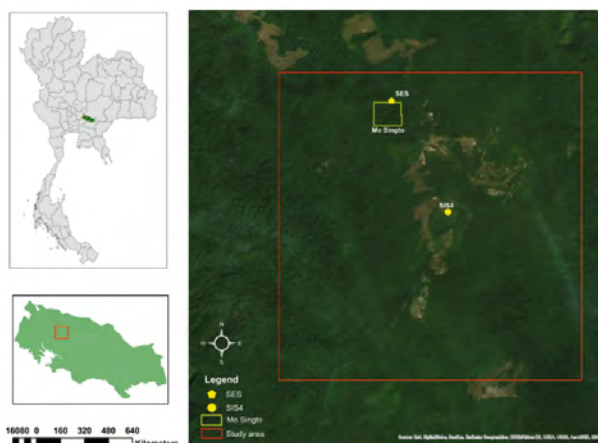
Le stress hydrique climatique, comme les sécheresses et les températures plus hautes, peuvent accélérer la mortalité forestière. En outre, il est prévu que la fréquence et l'intensité des sécheresses augmenteront dans les forêts tropicales de mousson d'Asie du Sud-Est. Ces écosystèmes sont connus pour être des points chauds de la biodiversité et des puits de carbone pérennes dans le cycle terrestre du carbone. Ces augmentations pourraient entraîner des changements rapides et à grande échelle dans la structure des forêts et la composition en espèces, ainsi que provoquer une diminution spectaculaire de la quantité de carbone stockée par ces forêts tropicales. La majorité des zones boisées des tropiques sont des forêts secondaires, mais comparées aux forêts primaires, nous en savons relativement peu sur l'écophysiologie des écosystèmes forestiers secondaires. De plus, les différences dans la composition en espèces des forêts primaire et secondaires peuvent compliquer notre compréhension de la façon dont les écosystèmes forestiers réagiront au stress hydrique. Il est donc nécessaire de mieux comprendre la vulnérabilité à la sécheresse des forêts primaires et secondaires pour prédire plus précisément le cycle global du carbone et de l'eau en relation avec les futurs changements climatiques. Dans cette étude, nous mesurerons la transpiration de la canopée qui est fréquemment utilisée pour estimer la conductance stomatique de la canopée; une variable centrale dans la modélisation de l'apport de carbone par les forêts. Des mesures seront effectuées dans les forêts primaires et secondaires, ce qui nous permettra d'étudier les réponses spécifiques des espèces au stress hydrique en évaluant l'hydraulique des arbres et la vulnérabilité des espèces dominantes dans chaque type de forêt. Nous explorerons également le degré de répartition de l'eau du sol entre les espèces dans chaque forêt afin de fournir une compréhension plus mécanistique de la façon dont les individus sont capables de surmonter le stress dû à la sécheresse. Ce sera la première étude à notre connaissance qui quantifie la transpiration de la canopée, l'hydraulique des arbres et la vulnérabilité à la sécheresse ainsi que les principaux mécanismes mis en œuvre par les arbres des forêts tropicales primaires et secondaires pour surmonter la sécheresse. Ces travaux permettront de fournir l'information nécessaire pour prédire plus précisément l'incidence du changement climatique sur le cycle du carbone et de l'eau dans les forêts tropicales.

## Les objectifs spécifiques :

1. Estimer la transpiration de la canopée et évaluer ses réactions aux conditions climatiques dans les forêts tropicales primaires et secondaires sur des échelles de temps diurnes à interannuelles.
2. Évaluer les réponses physiologiques au stress hydrique de certaines espèces dominantes dans les forêts primaires et secondaires et prédire la productivité forestière en conditions de déficit hydrique prédits par les scénarios climatiques futurs.
3. Étudier la répartition de l'eau du sol entre les espèces forestières dans une forêt primaire et secondaire et comment le stress hydrique atmosphérique peut affecter cette répartition et la structure de la forêt. Par exemple, si le site connaît des épisodes de précipitations plus faibles, les espèces peu profondes peuvent obtenir de meilleurs résultats que si elles étaient soumises à des précipitations moins fréquentes, qui profiteraient à des espèces d'enracinement plus profond.



Photos de la zone d'étude.



Une forêt primaire (Mo Singto) et une forêt secondaire (SIS4) dans le parc national de Khao Yai, Thaïlande.

## Le projet CWSSEA

**Partenaires :** Chulalongkorn University (Thailand), Bordeaux Sciences Agro (France), Swedish University of Agricultural Sciences (Sweden).

## COORDINATEUR-RICE

**Jean-Christophe Domec :** [jc.domec@agro-bordeaux.fr](mailto:jc.domec@agro-bordeaux.fr)  
**Pantana Tor-ngern, Ph.D. :** [pantana.t@chula.ac.th](mailto:pantana.t@chula.ac.th)



## DENDRAC

## Développement d'outils dendrométriques appliqués à l'étude des bois carbonisés : études des relations-ressources-environnement

## — Rappel des objectifs

La carbonisation du bois est un processus qui implique une fragmentation et une perte de matière (réduite en cendre du fait de la combustion). Elle a également des conséquences sur son anatomie et sa composition chimique, notamment isotopique. Ces modifications peuvent altérer l'information et fausser notre compréhension du signal enregistré dans les arbres. Ainsi, faute d'outils adaptés, l'étude des charbons de bois archéologiques (anthracologie) est le plus souvent réduite à l'étude d'une liste d'essences et de leurs fréquences sans que l'information contenue dans l'anatomie et la chimie du bois ne soit exploitée. De fait, les modes de collecte du bois et de gestion des boisements des sociétés passées sont souvent discutés mais les preuves directes restent rares. L'objectif du programme DENDRAC est de développer des outils adaptés à des bois carbonisés et fragmentés qui permettent de remonter aux modes de sélection du bois, aux pratiques sylvicoles et aux conditions environnementales dans lesquelles les forêts passées se sont développées. Cette recherche s'est appuyée sur des études actualistes (référentiels sur des bois actuels) et expérimentales. Elle a nécessité une approche interdisciplinaire avec différents spécialistes (dendro-archéologique, dendrochronologues, écophysiologistes, biogéochimistes, morphométriciens, statisticiens).

## — Résultats majeurs

Au cours de ce programme, plusieurs ateliers ont été développés dans l'objectif de répondre à des questions archéologiques précises.

Le premier atelier a consisté à caractériser les bois et les boisements exploités : diamètres, âge, croissance. Différents outils dendro-anthracologiques ont été mis en place et testés sur des forêts actuelles puis adaptés à l'application archéologique. Ainsi, l'anthraco-typologie est une nouvelle démarche fondée sur la combinaison de trois d'entre eux : i) les largeurs des cernes (anneaux concentriques observables sur des sections de bois dont la largeur dépend de l'organe de l'arbre et reflètent les conditions de croissance de l'individu), ii) la mesure de la distance entre le fragment de charbon et le centre hypothétique de la tige. Les valeurs de distance, projetées en diamètre, sont modélisées pour revenir aux diamètres des bois exploités, iii) la présence ou l'absence, pour le chêne, de duramen (ou bois de cœur). Le duramen ne se forme qu'à partir de l'âge de 20 ans et son absence permet d'identifier l'exploitation de jeunes arbres ou de jeunes branches. Dans un deuxième atelier, nous avons rendu possible l'identification par l'étude des cernes de la pratique du taillis (coupe des arbres à ras du sol pour favoriser une multiplication végétative par rejets de souche) et de l'étêtage (coupe des branches latérales et du tronc à une certaine hauteur au-dessus du sol), deux pratiques de taille développées dans un objectif de production du matériau bois pour répondre à une multitude de besoins.

Dans un troisième atelier, nous avons développé une nouvelle approche, fondée sur la combinaison de l'anthraco-typologie et de l'analyse isotopique du  $\delta^{13}\text{C}$  sur charbons de bois à l'échelle annuelle et intra-annuelle. Cet axe de recherche a permis de mettre en place les bases d'un cadre méthodologique rigoureux pour la dendroclimatologie isotopique sur charbons archéologiques. Des combustions expérimentales ont permis de caractériser les effets de la combustion oxygénée sur la composition isotopique du bois et mettre au point des critères diagnostiques de l'état de préservation du signal paléoclimatique dans les charbons de bois.



Étêtage dans le Parc naturel régional des Boucles de la Seine Normande.  
Crédit photo : A. Dufraisne.

## — Production scientifique et valorisation

Plus d'une vingtaine d'articles ont été publiés (7 revues indexées, 5 actes de colloques internationaux, 12 actes de colloques nationaux) auxquels s'ajoutent deux conférences invitées en colloque international et une dizaine de posters.

Ce programme a par ailleurs fait l'objet de 2 sujets de Licence, un sujet de Master I, 4 sujets de Master II (dont un qui a donné suite à une thèse) et un chapitre de thèse.

[https://www.researchgate.net/profile/Alexa\\_Dufraisne](https://www.researchgate.net/profile/Alexa_Dufraisne)

## Le projet DENDRAC

**Partenaire :** UMR 7209 Archéozoologie, archéobotanique : sociétés, pratiques et environnements (CNRS-MNHN).

## COORDINATRICE

**Alexa Dufraisne :** alexa.dufraisne@mnhn.fr



## DIGAS

## Synthèse directe de diméthyle éther à partir de biosyngaz

## — Rappel des objectifs

- **Conception et préparation des catalyseurs** : La distribution spatiale des sites actifs pour la synthèse du méthanol et sa déshydratation ensuite en diméthyle éther (DME) doivent être contrôlés avec précision à l'échelle nanométrique afin d'obtenir une activité et une sélectivité optimales.
- **Tests catalytiques** : Les réactions catalytiques impliquées dans la synthèse directe du DME étant hautement exothermiques, un contrôle précis du transfert de chaleur est nécessaire pour maintenir une température constante et uniforme à l'intérieur de la zone de réaction. Au cours du projet DIGAS, la stabilité de l'activité catalytique était étudiée. L'étude du mécanisme réactionnel doit aussi être prise en compte pour la conception et la modélisation des prototypes de réacteurs catalytiques à grande échelle afin d'optimiser les transferts de masse et de chaleur. Le projet DIGAS concerne le développement de la synthèse directe de DME à partir de bioressources en tant que technologie de production d'énergie sûre, efficace et délocalisée.

## — Résultats majeurs

- Développement de la synthèse microfluidique** : un nouveau type de synthèse de la co-précipitation en continu assisté par un système microfluidique a été développé, où la taille de la zone de co-précipitation est mieux gérée et donc les paramètres de synthèse peuvent être modifiés de façon contrôlée. Cette étude, réalisée par l'ICPEES, a mis en évidence la possibilité de fabriquer les matériaux solides de type oxydes mixtes parfaitement homogènes tout en gardant une large surface spécifique.
- Développement de catalyseurs bi-fonctionnels** : des catalyseurs type oxydes mixtes  $\text{CuO-ZnO-ZrO}_2$  et catalyseurs acides ont été combinés par plusieurs méthodes : co-précipitation-déposition, core-shell, one-pot, mélange physique et structuré en couches. La préparation par mélange physique a prouvé son efficacité en terme de l'activité catalytique et la stabilité de paramètres réactionnels. La meilleure productivité en DME dans la synthèse directe à partir de  $\text{CO}_2$  est de  $151 \text{ g}_{\text{DME}} \cdot \text{kg}_{\text{cata}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  à  $10\,000 \text{ h}^{-1}$  et  $450 \text{ g}_{\text{DME}} \cdot \text{kg}_{\text{cata}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  à  $25\,000 \text{ h}^{-1}$  (20 bar) ; à partir de biosyngaz ( $\text{CO/CO}_2/\text{H}_2$ ) est de  $240 \text{ g}_{\text{DME}} \cdot \text{kg}_{\text{cata}}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$  à  $10\,000 \text{ h}^{-1}$  (20 bar). Le matériau catalytique optimisé est  $\text{CuO-ZnO-ZrO}_2$  avec rapport  $\text{ZnO/ZrO}_2=66/34$  mélangé au zéolite microcristalline type ZSM5 avec le rapport  $\text{Si/Al}=266$ .

3. Aspects mécanistiques de la synthèse directe de DME à partir de  $\text{CO}_2/\text{CO}/\text{H}_2$ 

L'acidité de catalyseur joue un rôle essentiel, les zéolites microporeuses et microcristallines à faible acidité ont montré une meilleure efficacité que les matériaux mésoporeux amorphes AI-TUD-1. La grande quantité d'eau produite dans le procédé a l'effet négatif sur la performance des catalyseurs, l'intégration des réacteurs innovant avec transferts de masse améliorés ou le développement des matériaux catalytiques à forte hydrophobicité peut être envisagé. L'exothermicité des réactions impacte grandement la stabilité des matériaux catalytiques. Le développement d'un réacteur à échange de chaleur parfaitement contrôlé pour l'intensification du procédé est considéré nécessaire pour la future industrialisation du procédé.

Ces résultats ont ainsi permis d'identifier les orientations et axes de développement et d'optimisation à mener par la suite en vue d'une stratégie d'industrialisation en ligne avec les projections du marché. L'ICPEES s'est entouré de partenaires européens souhaitant poursuivre ces travaux dans le cadre du projet européen DREAMS déposé en août 2019 « Decentralized and flexible conversion Routes of bio-derived  $\text{CO}_2$  Emissions into Aviation and Maritime fuels » dans le cadre de l'appel à projets H2020-LC-SC3-2018-2019-2020. L'objectif majeur de ce nouveau projet est d'augmenter le niveau de maturation technologique (TRL jusqu'à 5) du procédé pour convertir sélectivement (e.g. avec grande efficacité énergétique et moindre empreinte carbone) le  $\text{CO}_2$  biogénique et le  $\text{H}_2$  renouvelable (de l'électrolyse de l'eau) en carburants drop-in pour l'aviation et le transport maritime. Deux routes chimiques ont été sélectionnées via DME ou via oléfines comme des intermédiaires.

## — Production scientifique et valorisation

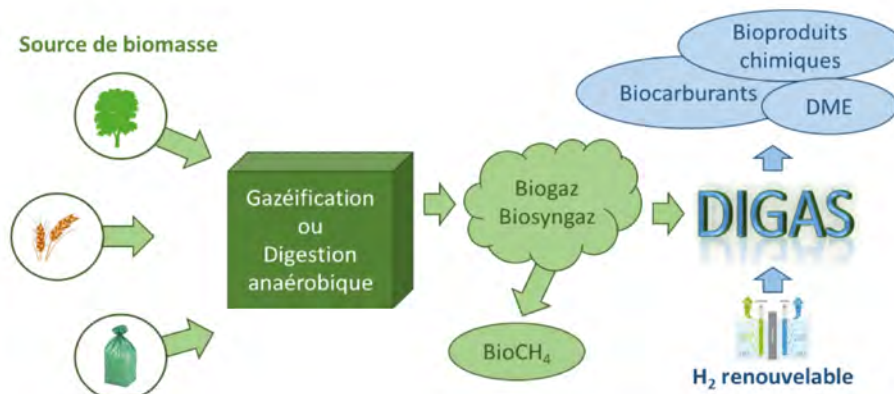
- 2 publications vont bientôt voir le jour, un chapitre est rédigé pour le livre « Carbon dioxide conversion into hydrocarbons Vol 2: Technology » de Springer, 8 communications ont permis de présenter les résultats obtenus aux congrès nationaux et internationaux tels que ICCDU, GECAT, EUCOR...
- 3 autres publications sont en préparation.

## Le projet DIGAS

**Partenaires** : UMR7515 ICPEES (CNRS-Université de Strasbourg).

## COORDINATRICE

**Ksenia Parkhomenko** :  
parkhomenko@unistra.fr



## DYNAMIC

# Décryptage des réseaux symbiotiques dans les agroécosystèmes méditerranéens à base de caroubiers

## — Rappel des objectifs

Le caroubier (*Ceratonia siliqua*), fruitier des forêts thermophiles méditerranéennes et des paysages ruraux traditionnels, est actuellement utilisé à des fins industrielles, agricoles et de restauration des sols. Son exploitation a cependant fortement décliné au profit d'autres secteurs fruitiers, malgré des rendements de production élevés, même sur des sols marginaux. Récemment, son fruit, la caroube, fait un retour remarquable en nutrition humaine en tant qu'aliment fonctionnel, et son adaptation à une large diversité d'habitats méditerranéens ainsi que sa relative tolérance aux carences en nutriments en font un modèle clé pour une agriculture et une production alimentaire durables. Cependant, son histoire écologique a très certainement causé d'importantes modifications génétiques et physiologiques, entraînant des changements probables dans un compartiment important de son fonctionnement : le microbiote végétal.

La différenciation génétique des lignées phylogéographiques est-elle un facteur majeur contrôlant la diversité du microbiote du caroubier, optimisant ainsi le fonctionnement de cet arbre ? DYNAMIC s'intéresse à cette question en (i) identifiant la structure génétique et les lignées évolutives du caroubier à l'échelle méditerranéenne, (ii) caractérisant la diversité du microbiote du caroubier, (iii) explorant les liens entre cette diversité, les paramètres génétiques et les données environnementales, et enfin en (iv) testant expérimentalement l'efficacité des interactions caroubier-microbiote. Grâce à DYNAMIC une meilleure compréhension des facteurs écologiques qui régissent la spécificité et l'efficacité des interactions plante-microbiote ouvrira de nouvelles pistes pour la conservation / restauration des écosystèmes et l'intensification écologique des agroécosystèmes.

## — Résultats majeurs

Une revue des données paléobotaniques a révélé la présence du genre *Ceratonia* depuis des millions d'années en Méditerranée, contredisant le paradigme d'un seul refuge oriental et une dissémination humaine vers l'Ouest concomitante à sa domestication (= hypothèse du refuge oriental unique). Les analyses phylogéographiques, basées entre autres sur des données de génotypes microsatellites acquises par séquençage haut-débit, ont révélé une structure génétique Ouest-Est et la différenciation de quatre lignées antérieures à la domestication du caroubier. Des niveaux de diversité génétique très bas soutiennent quant à eux l'hypothèse d'un effondrement démographique récent à l'échelle de son histoire, probablement au Pléistocène, dû à l'augmentation de la continentalité climatique. La présence de caroubiers cultivés et non cultivés dans les quatre lignées identifiées suggère plusieurs événements de domestication à partir de différentes populations indigènes autour du bassin méditerranéen. L'ensemble des résultats rejette donc l'hypothèse du refuge oriental unique.

L'analyse du microbiote racinaire du caroubier par séquençage haut-débit démontre une relation significative avec la diversification des lignées phylogéographiques. Les deux lignées de l'Ouest de la Méditerranée présentent les différences les plus importantes au niveau de leur microbiote, avec les niveaux de diversité et de richesse les plus élevés en Andalousie. Une diversité globale moindre a été observée dans les habitats cultivés, suggérant un impact de l'agriculture sur le microbiote racinaire. Un microbiote racinaire hautement conservé a pu être mis en évidence, composé de milliers de taxons microbiens.



Consortium DYNAMIC, Université de Catane (Italie, avril 2018).  
Crédit photo : M. Bou Dagher Kharrat, USJ.

À l'opposé, plus d'une centaine de taxons ont été significativement associés à une des lignées génétiques du caroubier. La phylogéographie du caroubier explique cependant moins de 10 % de la variance totale du microbiote racinaire endophyte, 60 % à 90 % n'étant expliqué par aucun des trois paramètres testés (génétique, édaphique, anthropique). Des expérimentations en milieu contrôlé confirment néanmoins le lien entre génétique du caroubier et microbiote, avec un impact de la composition du microbiote sur la tolérance du caroubier au stress hydrique ainsi qu'une diminution potentielle d'efficacité symbiotique pour certaines provenances.

## — Production scientifique et valorisation

DYNAMIC a actuellement donné lieu à 3 publications scientifiques (plus une dizaine en préparation), 1 article de vulgarisation, 13 présentations orales et 5 communications sous forme de poster, l'ensemble référencé sur le site du projet. Les résultats constituent d'importantes ressources qui seront nécessaires pour assurer la persistance du caroubier dans le cadre du changement climatique en cours. Un symposium clôturant le projet a été organisé au Maroc sur l'écologie des arbres fruitiers et de leur interaction avec l'environnement, traitant des relations homme-fruitiers dans les paysages traditionnels, de génétique et d'écologie végétale, d'écologie microbienne, d'ingénierie écologique et de conservation. Les résultats scientifiques ont aussi permis l'obtention de deux projets parallèles adossés à une bourse doctorale en cotutelle et un stage ERASMUS entre la France, le Maroc et l'Italie (PHC-Toubkal BARACA ; Erasmus-AMU CLIMACAROB).

### Le projet DYNAMIC

**Partenaires :** UMR LSTM (CIRAD), UMR 7263 IMBE (Université d'Aix-Marseille), Université de Catane (Italie), Université Cadi Ayyad (Maroc), Université Saint Joseph (Liban).

### COORDINATEUR

**Hervé Sanguin :** [hervé.sanguin@cirad.fr](mailto:hervé.sanguin@cirad.fr)

## ECOPICS

## Services écosystémiques souterrains produits par les communautés végétales le long de gradients altitudinaux en France et au Mexique

## — Rappel des objectifs

ECOPICS est un projet multidisciplinaire avec deux objectifs liés entre eux :

- i) Répondre à des questions de recherche fondamentale sur les processus des écosystèmes du sol et les liens avec les communautés végétales dans des climats et des types d'utilisation du sol particuliers.
- ii) Déterminer comment la promotion de services écosystémiques spécifiques est bénéfique (ou non) aux communautés anthropiques locales et à la qualité des sols. Nous définissons la qualité des sols en ECOPICS en termes de séquestration du carbone, de macroporosité, d'abondance et de diversité faunistique et microbienne.

## — Résultats majeurs

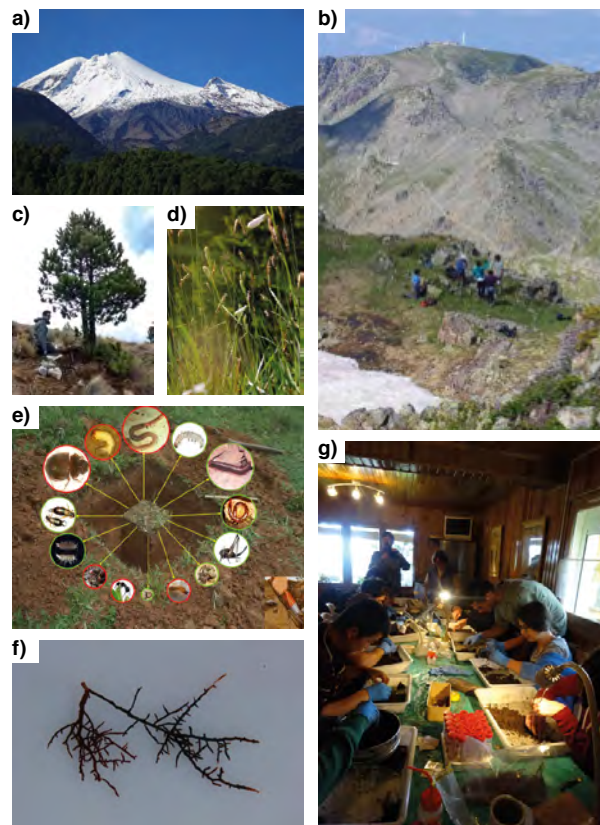
► **Modélisation des services écosystémiques et de la biodiversité dans une communauté de montagne.** Nous avons examiné les aspects socio-économiques et environnementaux de la ville de montagne, Chamrousse, Isère. Chamrousse promeut les sports d'hiver (ski), la randonnée et le VTT en été. Au moyen d'entrevues, de questionnaires et de recherches documentaires, nous avons identifié 13 services écosystémiques sur un total potentiel de 40 qui ont eu des répercussions importantes sur la communauté. À l'aide d'un modèle de réseau de Petri et d'algorithmes de Pareto, nous avons examiné les trajectoires possibles entre les services et la biodiversité, et comment optimiser leur état pour améliorer la biodiversité et les services des écosystèmes. Nous avons constaté une corrélation positive très significative entre les services et la biodiversité, démontrant que les services écosystémiques peuvent apporter des avantages économiques mondiaux.

► **Diversité des traits racinaires.** Les traits racinaires ont été mesurés au niveau de la communauté. Nous avons analysé les relations entre la morphologie de la racine (diamètre, longueur, densité du tissu) et la composition chimique (C, N, concentrations de fibres) le long du gradient altitudinal et dans les parcelles. Les analyses statistiques montrent qu'en altitude, où la température et la fertilité sont moindres, les communautés produisent plus de racines fines ayant une longueur spécifique élevée ; une stratégie permettant d'acquérir plus de ressources pendant la courte saison de croissance. Les racines ont également des tissus plus denses afin d'assurer la survie pendant la période défavorable. L'érodibilité et l'infiltration diminuent avec l'altitude, et sont expliquées par les caractéristiques du sol et dans une moindre mesure par les racines.

► **Faune du sol.** Les communautés de vers de terre étaient caractérisées par leur densité, leur biomasse, leur richesse spécifique et leur masse corporelle. Les données suggèrent que les communautés de vers de terre le long du gradient altitudinal sont largement déterminées par les propriétés du sol et montrent une augmentation de la diversité fonctionnelle et taxonomique vers la limite forestière. La masse corporelle ne semble diminuer qu'après avoir franchi un certain seuil de température.

## — Valorisation

Un film de vulgarisation a été produit sur le travail de terrain et est disponible sur Internet : <https://vimeo.com/315257143>



Les travaux ont été effectués le long de gradients altitudinaux à a) Belledonne, France (climat tempéré) et b) Pico d'Orizaba, Mexique (climat tropical). L'échantillonnage a été effectué pour plusieurs espèces le long du gradient, y compris c) les arbres, les arbustes et d) les herbes. e) Les monolithes ont été extraits du sol et de la faune, les micobes et f) les racines, ainsi que les propriétés du sol ont été mesurées. g) Des laboratoires ont été installés pour un échantillonnage immédiat. Photos avec autorisation de H. Rey (CIRAD, UMR AMAP), A. Stokes (INRA, UMR AMAP), Hans Reijnen (CNRS, UMR CEFÉ), Isabelle Barois (INECOL, Mexico).

## Le projet ECOPICS

**Partenaires :** UMR AMAP [CIRAD-INRA], UMR CEFÉ [CNRS], INECOL [University Veracruz], Mexique.

## COORDINATRICE

**Alexia Stokes :** [alexia.stokes@cirad.fr](mailto:alexia.stokes@cirad.fr)



## ECOSFIX

## Services écosystémiques des racines – redistribution hydrique, séquestration du carbone et fixation du sol

## — Rappel des objectifs

Afin d'améliorer notre compréhension fondamentale de la façon dont les racines des plantes modifient les processus de formation et de perte de masse du sol, et de transport du carbone dans les réservoirs souterrains de carbone, nous avons étudié le rôle, la fonction et la forme des racines fines et situées dans la couche supérieure comparativement à celles situées plus profondément dans le sol.

## — Résultats majeurs

► **Traits racinaires et communautés végétales.** Nous avons mesuré un ensemble de traits racinaires dans vingt communautés végétales situées le long de gradients d'intensité d'utilisation des terres et dans trois zones climatiques. Les traits racinaires variaient, conformément au compromis entre l'acquisition des ressources et la conservation. Les racines présentaient différentes suites de caractères à différentes profondeurs, ce qui suggère des disparités dans la fonction racinaire et les capacités d'exploitation. Cette étude démontre également l'existence d'un compromis général dans la construction des racines au niveau communautaire, qui fonctionne indépendamment du type de racine. L'existence de tels compromis cohérents dans les organes végétaux souterrains, s'ils sont largement applicables, aurait un impact significatif sur leurs services écosystémiques.

► **Décomposition racinaire et implications pour les stocks de carbone.** Nous avons mesuré la décomposabilité des racines fines et l'avons mise en relation avec neuf traits fonctionnels. Les résultats ont montré que les racines des communautés végétales agricoles et agroforestières se décomposaient plus rapidement que les racines des sites forestiers. Dans l'ensemble des communautés végétales, on a observé une décomposabilité toujours plus grande dans les racines peu profondes. Ensemble, ces résultats suggèrent que le passage des forêts aux sites agricoles finira par entraîner des pertes de carbone dans le sol, surtout dans les couches peu profondes.

► **Fixation des sols.** Bien que la végétation soit de plus en plus utilisée pour atténuer les risques de glissements de terrain, les effets de la végétation sur la variabilité temporelle de la stabilité des pentes est mal comprise. Nous avons comparé la stabilité des pentes, avec et sans arbres dans les régions tropicales, subtropicales et tempérées, sujettes aux glissements de terrain et aux tremblements de terre. La présence des arbres a amélioré la stabilité du sol pendant 5 à 12 mois par année en raison de l'abaissement de l'humidité du sol, ce qui a réduit la variabilité interannuelle dans la durée des périodes de haute stabilité par rapport aux pentes sans arbres.

## — Production scientifique et valorisation

Plus de 70 articles scientifiques et de vulgarisation, médias électroniques et des présentations orales ont été produites à partir des travaux.

Une sélection de trois articles scientifiques :

- Prieto I., Roumet C., Cardinael R., Kim J., Maeght J.L., Mao Z., Portillo N., Thammahacksa C., Dupraz C., Jourdan C., Pierret A., Rouspard O., Stokes A. 2015. *Journal of Ecology*, 103, 361–373.
- Kim J.H., Fourcaud T., Jourdan C., Maeght J.L., Mao Z., Metayer J., Meylan L., Pierret A., Rapidel B., Rouspard O., de Rouw A., Villatoro Sanchez M., Wang Y., Stokes A. 2017. *Geophysical Research Letters*, 44, 4897–4907



Des travaux de terrain ont été effectués sur quatre sites : a) des plantations de café au Costa Rica, b) des plantations de teck au Laos, c) une forêt montagnarde dans les Alpes françaises et d) une agroforêt dans le sud de la France. e) Une croissance hivernale des racines a été observée en *Picea sitchensis* et f) installation des rhizotrons dans un puits. La croissance des racines a été mesurée jusqu'à 5 m dans une plantation de teck (*Tectona grandis*) au nord du Laos. Crédits photos : J.-L. Maeght (IRD, UMR BIOEMCO, UMR AMAP), O. Rouspard (CIRAD, UMR Eco&Sol), H. Rey (CIRAD, UMR AMAP), A. Stokes, J.H. Kim (INRA, UMR AMAP), L. Dufour (INRA, UMR SYSTEM).

- Le Bissonnais Y., Prieto I., Roumet C., Nespoulous J., Metayer J., Huon S., Villatoro M., Stokes A. 2018. *Plant and Soil*, 424: 303-317.

Nous avons créé une plateforme un webdocumentaire qui comprend des vidéos, du texte et du matériel téléchargeable : <https://www.ecosfix.projet-agroforesterie.net/>

## Le projet ECOSFIX

**Partenaires :** UMR AMAP (INRA-CIRAD), UMR SYSTEM (INRA), UMR 5175 CEFE (CNRS), UMR Eco&Sol (Cirad), UMR 7618 BIOEMCO (IRD-Université Pierre et Marie Curie), Irstea, l'AFAP et le CATIE (Costa Rica).

## COORDINATRICE

**Alexia Stokes :** [alexia.stokes@cirad.fr](mailto:alexia.stokes@cirad.fr)



## ECOTERA

## Eco-efficacités et développement territorial durable en Amazonie Brésilienne

## — Rappel des objectifs

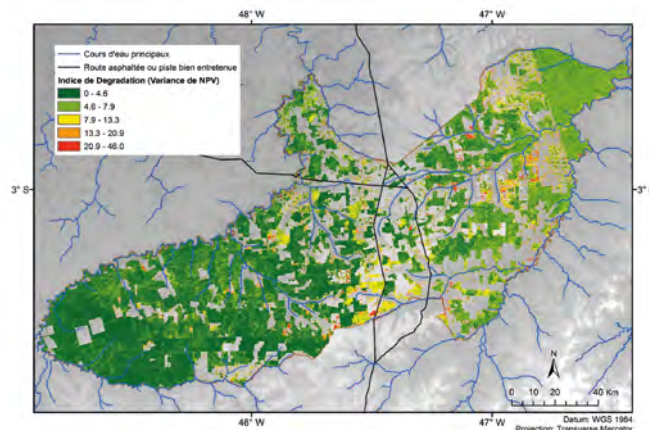
Au Brésil, en 2013, comme dans beaucoup de pays forestiers qui se sont engagés à enrayer la déforestation à cette époque, l'expansion agricole sur la forêt amazonienne, motrice du développement des territoires depuis cinq décennies, n'est plus envisageable. Dans un espace agricole désormais limité, les acteurs amazoniens doivent planifier et promouvoir une transition agricole rapide tout en gérant durablement les espaces forestiers qui subsistent et en répondant à des demandes sociales et productives croissantes. Le territoire tient une place centrale dans ce nouvel équilibre à construire. Dans ce contexte, l'objectif général du projet ECOTERA était de produire des connaissances pluridisciplinaires et d'élaborer des outils permettant aux acteurs locaux d'un territoire de concilier leur objectif de développement durable avec la mise en place de systèmes productifs et d'utilisation des terres et des forêts éco-efficacités. Il s'agissait d'identifier et mesurer un jeu d'indicateurs d'éco-efficacités pertinents à différentes échelles, d'analyser comment les règles publiques et privées ainsi que les modèles techniques étaient appropriés ou rejetés, de construire une démarche et des outils permettant d'intégrer ces connaissances et d'articuler les choix des agriculteurs et les projets territoriaux.

Le projet de recherche a mis en place une démarche interdisciplinaire sur un territoire emblématique d'Amazonie Brésilienne, la commune de Paragominas, dans l'État du Pará, premier « *município verde* » d'Amazonie. En 2008, le gouvernement fédéral brésilien a concentré ses mesures coercitives de lutte contre le déboisement sur certaines communes, dont Paragominas, auparavant connue pour une exploitation minière de ses ressources naturelles. Les acteurs publics et privés de cette commune ont proposé un pacte territorial autour d'objectifs clés partagés, faisant de cette commune une référence pour l'ensemble des territoires amazoniens.

La conception d'indicateurs d'éco-efficacités et leur intégration dans une base de données opérationnelle se sont appuyées sur la combinaison de méthodes agronomiques, écologiques et géographiques (télédétection et analyse spatiale). L'économie des proximités et les méthodes d'agronomie systémique ont été mobilisées pour analyser la construction et l'appropriation de modèles techniques et organisationnels. Les connaissances et outils élaborés ont été intégrés dans une démarche d'accompagnement.

## — Résultats majeurs

Le projet a permis d'appliquer la notion de paysages éco-efficacités, en conjuguant des méthodes de caractérisation de niveaux différenciés de dégradation des forêts et d'aptitude des terres pour l'intensification agricole et la production de services écosystémiques. L'arrêt de la déforestation n'a pas entraîné l'arrêt de la dégradation des forêts. Des forêts très dégradées sont parfois localisées sur des terres à forte aptitude pour l'agriculture et sont très exposées aux risques de dégradations supplémentaires, notamment par les incendies. À l'inverse, certaines zones d'une importance majeure pour la conservation de services écosystémiques, par exemple le long des cours d'eau, sont totalement déforestées et doivent être recomposées en priorité pour garantir l'éco-efficacité du paysage et, partant, la durabilité du développement agricole du territoire. La réorganisation des paysages agricoles et forestiers à différentes échelles est donc nécessaire pour améliorer les éco-efficacités. Elle implique d'intégrer les différents producteurs dans un processus collectif de gouvernance



Cartographie de la dégradation des forêts de Paragominas (Plus l'indice NPV est élevé, plus la forêt est dégradée). Source : Thèse de doctorat d'Ali Fadhil Hasan, UMR ESO, Le Mans Université. Copyright : Ali Fadhil Hasan.

territoriale avec les autorités municipales. Il ressort également du projet que les pratiques d'intensification agricole avec un apport d'intrants externes modéré sont les plus efficaces au regard de différents indicateurs économiques et écologiques. L'adoption de nouvelles pratiques, généralement induite par des facteurs économiques, se heurte toutefois à l'instabilité et l'asymétrie des réseaux d'échanges. Ainsi, l'adoption généralisée sur le long terme de pratiques éco-efficaces dépend avant tout de la gestion de la coexistence des modèles de production et des rapports de domination entre groupes sociaux et économiques qui la sous-tendent. Une démarche prospective avec les agriculteurs familiaux a permis d'identifier un plan d'action à mettre en œuvre avec le gouvernement municipal pour renforcer la place de ces acteurs au sein du territoire.

## — Production scientifique et valorisation

Les résultats du projet ont fait l'objet de 12 publications dans des revues à comité de lecture, 5 chapitres d'ouvrages, une vingtaine de communications dans des conférences et un « policy brief ». Les supports de la valorisation scientifique du projet sont très majoritairement interdisciplinaires. Quatre nouveaux projets scientifiques internationaux ont été élaborés dans la suite d'ECOTERA. Enfin, il a contribué au démarrage de 6 doctorats.

## Le projet ECOTERA

**Partenaires :** UMRs SELMET, Têtis, Innovation et URs GREEN, Aïda et Forêts et Sociétés (Cirad), UMR 6590 Espace et Sociétés (Université du Maine), UMR 1048 SADAPT (INRA), EMBRAPA d'Amazonie Orientale (Brésil), Université Fédérale du Para (Brésil).

## COORDINATRICE

**Marie-Gabrielle Piketty :** marie-gabrielle.piketty@cirad.fr

## EFEUR5

Comportements structuraux des Essences de bois  
Feuillus français en vue de leur meilleure intégration  
aux EURcodes 5

## — Rappel des objectifs

La France est la première forêt de feuillus d'Europe mais le marché de la construction bois s'approvisionne essentiellement en bois résineux. La tension sur la ressource résineuse, l'augmentation du marché de la construction bois en France et la ressource locale feuillue mobilisable poussent logiquement les acteurs de la filière bois à réfléchir et commencer à mettre en œuvre ces essences dans le bâtiment. Les Eurocodes et les normes européennes associées sont bâtis sur les expériences et recherches sur les résineux. L'optimisation des structures feuillues ne pourra se faire qu'en redéfinissant les mêmes paramètres et propriétés pour les bois feuillus.

Le projet EFEUR5 vise à développer des outils et des connaissances nécessaires à la mise sur le marché de produits structuraux en bois feuillus français (chêne, hêtre et peuplier). L'objectif est de fiabiliser l'utilisation de ces essences pour les structures en bois justifiées selon les règles Eurocode 5 par les validations ou les corrections nécessaires.

## — Résultats majeurs

Des campagnes expérimentales ont été réalisées à partir de bois de chêne, hêtre et peuplier issus de grumes de différentes classes échantillonnées au début du projet.

En s'appuyant sur des essais de diffusion et des simulations numériques alimentées par des modèles de comportement mécanique et hydrique originaux, des profils hydriques volumiques de toutes les essences ont pu être approchés ; ces informations sont utiles pour maîtriser le conditionnement des pièces de bois avant toute transformation, et la distribution interne de l'humidité dans les pièces en service.

La conception et l'instrumentation de trois bancs de fluage de poutres en bois en flexion sur 2 sites expérimentaux a permis de suivre les déformations à long terme du bois en conditions de service 2 et 3. Les phénomènes de retrait gonflement, viscoélasticité, mécanosorption ont été implémentés sous CASTEM pour des champs hydriques hétérogènes. Les résultats obtenus sont à la base d'une proposition de modification du coefficient  $k_{def}$  de l'Eurocode.

Des campagnes d'essais de flexion, traction et compression ainsi que la détermination des propriétés physiques associées ont été réalisées selon les normes EN408, EN384 et EN13183 :

- La probabilité d'avoir un défaut majeur dans une pièce de bois augmente avec les dimensions de sa section notamment. C'est pourquoi l'Eurocode propose d'augmenter les valeurs caractéristiques en flexion et traction pour les pièces de petites dimensions (hauteur  $\leq 150$  mm). Les résultats obtenus montrent qu'il faut définir une hauteur de 200 mm pour les bois feuillus. On détermine ainsi un coefficient de hauteur  $k_h$  qui correspond plus aux phénomènes observés au cours des essais tout en se plaçant du point de vue de la sécurité.

- La norme EN384 définit un lien direct entre la masse volumique et la résistance caractéristique en compression transversale par une formule qui est validée par les résultats obtenus pour les 3 essences. En revanche, la formule reliant les résistances en compression axiale et en flexion est pénalisante pour le hêtre et le chêne. Tout comme pour les résineux, la correction de la résistance en compression axiale en fonction de l'humidité proposée par l'EN 384 n'est pas assez restrictive et nécessite une modification.

Les lois de portance utilisées pour la justification des assemblages ont été étudiées. Dans le sens longitudinal, une nouvelle



Banc de fluage en flexion (Egletons). Crédit photo : Maximin Varnier (GC2D).

équation permet d'augmenter la résistance prédite par le code de calcul. A contrario, la résistance perpendiculairement au fil du bois est surestimée par la norme et doit être modifiée. Néanmoins, la sous-estimation de la masse volumique faite actuellement par le système de classement mécanique reste le principal frein à la valorisation des bois feuillus.

## — Production scientifique et valorisation

- Plusieurs communications scientifiques orales et par posters aux niveaux international et national : 5th meeting of International Network on Timber Engineering Research - INTER (Tallinn 2018, Estonie), 11th International Conference on Mechanics of Time-Dependent Materials (Milan 2018, Italie), 8th Hardwood Conference (Sopron 2018, Hongrie), International Conference on Computational Methods in Wood Mechanics - CompWood (Växjö 2019, Suède), INTER 2019 (Tacoma, USA) / GDR Sciences du bois (Bordeaux 2016, Nantes 2017, Cluny 2018), 6e Journées de l'Association Française de l'Adsorption (Paris 2017), Rencontres Universitaires de Génie Civil de l'AUGC (Nantes 2017, Saint-Etienne 2018).

- Participation aux concours : Thèses des bois (2018, 2019), Prix René Houpert AUGC (2018).

- Diffusion des résultats du projet auprès des professionnels de la filière bois-forêt : 8e Forum International Bois Construction (Dijon 2018), Journée « Feuillus dans la construction » (Epinal 2018).

- Thèse de doctorat soutenue par Maximin Varnier le 15 mars 2019. Une seconde thèse doit être soutenue par Thibault Benistand fin 2019.

- Un article scientifique soumis pour publication dans *Wood Science and Technology*.

## Le projet EFEUR5

**Partenaires :** CRITT Bois, EA4370 LERMAB (Université de Lorraine), EA3178 GC2D (Université de Limoges), UMR 5508 LMGC (Université de Montpellier-CNRS), UMR 1434 SILVA (AgroParis-tech-INRA-Université de Lorraine).

## COORDINATEUR

**Eric Masson :** [eric.masson@cricbois.net](mailto:eric.masson@cricbois.net)

# EPITREE

## Impacts évolutif et fonctionnel de variations épigénétiques chez les arbres forestiers

### — Rappel des objectifs

Le projet EPITREE a pour objectif d'étudier l'impact de la marque épigénétique (méthylation de l'ADN) ainsi que de l'expression génique et de la variation allélique sur l'adaptation des arbres forestiers ainsi que la plasticité phénotypique. En particulier, nous explorerons les avantages de considérer les marques épigénétiques en plus des polymorphismes génétiques et des phénotypes dans la caractérisation, conservation et valorisation des ressources génétiques, chez deux essences forestières majeures (peuplier et chêne). EPITREE réunit des experts en épigénétique des arbres, génomique, statistiques, modélisation mathématique, sélection et écophysiologie.

### — Résultats majeurs

Projet en cours 2018-2021.

<https://www6.inra.fr/epitree-project/>

### — Production scientifique et valorisation

► Sow MD, Segura V, Chamailard S, Jorge V, Delaunay A, Lafon-Placette C, Fichot R, Faivre-Rampant P, Villar M, Brignolas F, Maury S (2018) Narrow-sense heritability and PST estimates of DNA methylation in three *Populus nigra* L. populations under contrasting water availability. *Tree Genetics & Genomes* 14:78. <https://doi.org/10.1007/s11295-018-1293-6>

► Sow, M. D. Allona I, Ambroise C, Conde D, Fichot R, Gribkova S, Jorge V, Le-Provost G, Pâques L, Plomion C, Salse J, Sanchez-Rodriguez L, Segura V, Tost J, Maury S (2018) Epigenetics in forest trees: state of the art and potential implications for breeding and management in a context of climate change. *Advances in Botanical Research* 88, 387-453. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2018.09.003>

► Maury S, Sow MD, Le Gac A-L, Genitori J, Lafon-Placette C, Mozgová I (2019) Phytohormone and chromatin Crosstalk: The Missing Link For Developmental Plasticity? *Frontiers in Plant Science*. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00395>

► Maury S, Le Gac AL, Lafon-PlacetteC, Sow MD, Fichot R, Delaunay A, Le Jan I, Lelu-Walter MA, Segura V, Rogier O, Trontin JF, Plomion P, Le Provost G, Ehrenmann F, Salse J, Ambroise C, Gribkova S, Mirouze M, Grunau C, Chaparro C, Strauss SH, Conde D, Allona I, Tost J (2019) Epigenetics in trees: a source of plasticity and adaptation in the context of climate change. *Proceedings of the Fifth International Conference of the IUFRO Unit 2.09.02: Somatic Embryogenesis and Other Vegetative Propagation Technologies*. <http://www.iufro.org/publications/proceedings/proceedings-meetings-2018/>

► Maury, S (2018) Travaux pionniers sur la mémoire de la sécheresse chez les arbres. <http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Biologie-vegetale/Toutes-les-actualites/Travaux-pionniers-sur-la-memoire-de-la-secheresse-chez-les-arbres>

► Maury, S (07/06/2019) L'épigénétique : un levier pour l'amélioration variétale ? Webinaires pour les professionnels de l'amélioration végétale du pôle de compétitivité Végépolys.

<https://www.vegepolys.eu/agenda/5911-lepigenetique-un-levier-pour-l-amelioration-varietale-universite-d-orleans-lblgc.html>

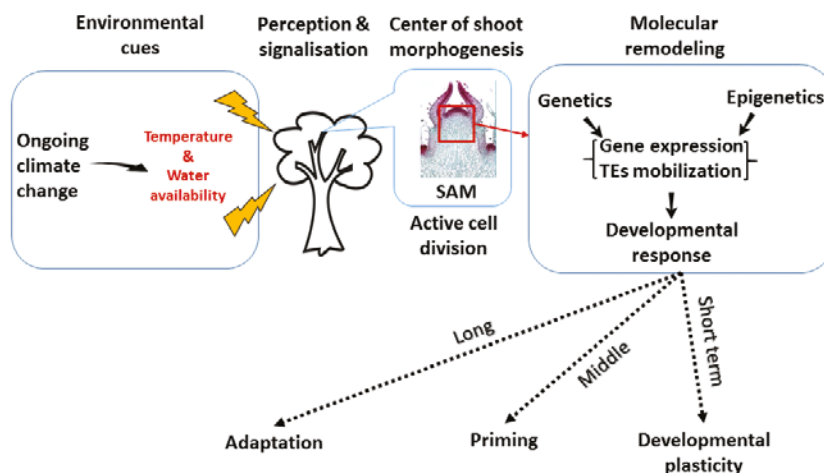
### Le projet EPITREE

**Partenaires :** UPRES EA 1207-USC 1328 LBLGC (INRA-Université Orléans), UMR 0588 BioForA (INRA-ONF), UMR 1202 BIOGECO (INRA-Univ. Bordeaux), GDEC (INRA-Université Clermont Auvergne), UMR 8071 LaMME (CNRS-Université d'Évry Val d'Essonne), Laboratoire Epigénétique et Environnement (CNRGH-CEA).

### COORDINATEUR

**Stéphane Maury :** [stephane.maury@univ-orleans.fr](mailto:stephane.maury@univ-orleans.fr)

Logo EPITREE (réalisé par Christophe Ambroise).





## EXPANDTREE

# Patrons spatio-temporels de colonisation dans une population d'arbres en expansion : une approche intégrant génétique et génomique

## — Explorer les processus démo-génétiques à l'œuvre dans un front de colonisation

### ► S'appuyer sur deux populations d'arbres en expansion depuis seulement quelques générations pour étudier à fine échelle les processus démo-génétiques :

Une proportion conséquente de forêts méditerranéennes sont actuellement sujettes à une expansion démographique ou au déplacement spatial de leur aire de répartition. Cela peut être le fait des changements environnementaux à l'œuvre, à la déprise des activités humaines ou faire suite à une récente translocation. Si de nombreuses études passées ont exploré la dynamique spatio-temporelle de populations en expansion, beaucoup moins se sont penchées sur la manière dont la diversité génétique se distribue dans le temps et dans l'espace sous l'effet des principaux processus écologiques à l'œuvre (dispersion à longue distance, effets Allee, dispersion groupée...). De plus, dans le contexte des changements climatiques et de la fragmentation spatiale des milieux, comprendre les dynamiques à fines échelles de temps et d'espace est particulièrement pertinent pour des espèces à longue durée de vie, comme les arbres, qui doivent s'adapter à de nouvelles conditions en seulement quelques générations. C'est l'orientation principale suivie dans le projet EXPANDTREE.

### ► Des avancées méthodologiques pour exploiter des données issues de photographies aériennes historiques, de marqueurs génétiques et de relevés de terrain :

Le projet s'est appuyé sur deux populations en expansion récente : le cèdre du Mont Ventoux introduit en 1870 et le genévrier de Phœnicie dans le parc de Doñana en expansion à partir de fragments depuis 1950. Peu d'arbres ayant été coupés, ces deux sites offrent une rare opportunité d'étudier plusieurs cohortes successives toujours en place dans le même environnement, et résultant des processus écologiques d'intérêt pour le projet. Pour coupler des aspects de démographie et des aspects de génétique des populations, nous avons rassemblé des chroniques spatio-temporelles par l'exploitation de photographies historiques, et des données génétiques après avoir développé de nouveaux marqueurs pour ces deux espèces. Des méthodes d'analyse statistique adaptées aux fines échelles spatio-temporelles ont été spécifiquement développées pour traiter les données hétérogènes collectées. Finalement ces approches statistiques ont été accompagnées de modèles de simulations pour étudier dans une large gamme de paramètres les effets attendus de différents processus écologiques, comme la dispersion groupée en particulier.

## — Résultats majeurs

Les analyses démographiques ont montré une vitesse d'expansion rapide du cèdre et du genévrier, expliquée par la dispersion à longue distance présente dès le début de l'expansion. Les hétérogénéités environnementales et génétiques attendues le long d'un gradient d'expansion ont un effet sur la fitness des *juniperus* lors d'une sécheresse, confirmant la spécificité du front de colonisation en termes démo-génétiques. Mais finalement, sur le cèdre, aucune structure génétique n'est mise en évidence à l'échelle de la zone d'expansion (pas d'effets de fondation avec l'avancée du front, diversité conservée), du fait de la longue durée de la phase juvénile.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet a donné lieu à 11 publications principales dans des revues d'écologie et 5 autres sont encore au stade de manuscrit. Les données accumulées dans EXPANDTREE sur les deux populations de *Cedrus atlantica* et de *Juniperus phoenicea* sont encore l'objet de nouvelles analyses et le support à de développements méthodologiques originaux. Les marqueurs génétiques (SSR et SNP) développés dans ce projet sont utilisés dans d'autres études de génétique des populations sur ces espèces. Ce projet a également donné lieu à une session thématique du meeting annuel de la British Ecological Society (Edimbourg, 2016), suivie de l'édition d'un numéro spécial de *Journal of Ecology*. EXPANDTREE a également renforcé notre réseau de collaboration et a contribué à la participation de certains membres au projet SPONFOREST, financé par l'EU (Biodiversa) et coordonné par Arndt Hampe (INRA, Bordeaux).

### Le projet EXPANDTREE

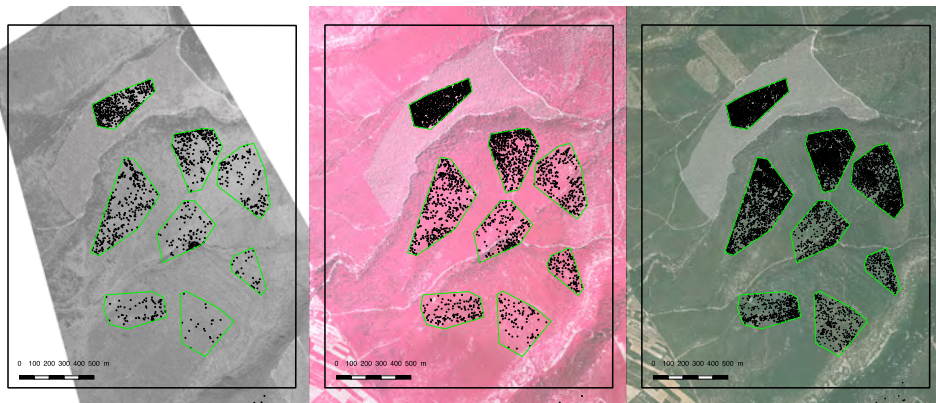
**Partenaires :** UR Biostatistique et Processus Spatiaux (INRA), CIBIO Porto (Portugal).

### COORDINATEURS

**Étienne Klein (INRA, France) :** [etienne.klein@inra.fr](mailto:etienne.klein@inra.fr)

**Cristina Garcia (CIBIO, Portugal) :** [cristinagarcia@cibio.up.pt](mailto:cristinagarcia@cibio.up.pt)

Individus de cèdres géolocalisés dans 8 polygones instrumentaux à partir de photographies aériennes datant de 1973, 1996 et 2005. Crédit : IGN.



# FireCaster

## Simuler les incendies à haute résolution et estimer les risques sur le territoire

### — Un ensemble cohérent, des données aux résultats, chaîne numérique pré-opérationnelle d'aide à la décision en crise et prévision de risque

Le contexte de changement climatique couplé à une occupation humaine grandissante des espaces végétaux complexifie la gestion des incendies de forêt. Il existe cependant un contexte favorable au développement de nouveaux systèmes d'aide à la décision en incendie, des ordinateurs de plus en plus puissants, des données plus précises et une avancée des méthodes. L'objectif de FireCaster est de les développer de manière cohérente afin de pouvoir les assembler dans une plateforme pré-opérationnelle. Pour cela il est nécessaire de modifier, généraliser et valider un ensemble d'approches prototypes (ayant fonctionné sur quelques événements) afin de proposer des méthodes pertinentes dans un contexte prédictif, de réponse courte avec des observations effectivement disponibles en condition réelle. Un modèle de végétation de nouvelle génération permet ainsi de fournir par calcul probabiliste une carte du risque quotidien (grâce à une estimation des enjeux économiques potentiels) et de déterminer les paramètres pour un autre modèle activé en situation de crise. Il permet d'estimer rapidement les scénarios de lutte, leur coût, la position du front, la dispersion de fumées et la micro-météorologie locale. Le système développé est basé sur des outils de modélisation avancés (méthodes d'ensemble, modèle de sol, couplage multi-physique) et l'utilisation de calcul haute performance. Un modèle de végétation de nouvelle génération est au centre du système, permettant de fournir les paramètres nécessaires pour les modèles de combustion. Les modèles MesoNH et ISBA (humidité du végétal mort) (CNRM) sont ainsi utilisés pour disposer d'une prévision quotidienne à haute résolution et haute fréquence (inférieure à 1 heure). Ces prévisions permettent d'envisager le test de simulation probabiliste (INRIA) de propagation où il sera possible de quantifier la fiabilité du modèle. Couplé à un volet économique (LISA), ces probabilités de danger permettent d'estimer le risque potentiel quotidien. Une méthode d'assimilation de données d'observation de flamme (CECI) est aussi développée pour réduire l'incertitude sur la position future du front. Enfin, initialisée quotidiennement par les prévisions du modèle de prévision numérique du temps AROME, la simulation couplée feu/atmosphère (CNRM/

LA/SPE) détermine les effets météorologique locaux ainsi que la dispersion du panache de l'incendie. Une version compressible du modèle Meso-NH est par ailleurs développée en mode recherche, afin d'évaluer l'apport sur la version anélastique classiquement utilisée dans le voisinage du feu.

### — Résultats majeurs

La série exceptionnelle d'incendies de l'été 2017 en Corse a poussé à mettre en place des prototypes de méthodes dès le mois de juin. Sept cas d'études ont ainsi pu être traités, en temps réel, mais sans disposer de l'intégralité des développements. Une chaîne de prévision, banc d'essai des méthodes, est ainsi en place depuis 2 ans. Elle propose la météorologie à T+42h et 600 m de résolution. La disponibilité du nouveau modèle de combustible et les deux thèses commencées vont y ajouter les dimensions probabilistes et d'assimilation de données. Une action de mise à disposition des résultats avec les services incendies et un transfert vers un centre opérationnel national sont prévus avant la fin du projet.

<http://firecaster.universita.corsica>

### — Production scientifique et valorisation

- ▶ 6 papiers issus de conférences internationales avec actes
- ▶ 1 article, 1 soumis et 2 en préparation
- ▶ 4 conférences invitées
- ▶ 1 déclaration d'invention mise à jour

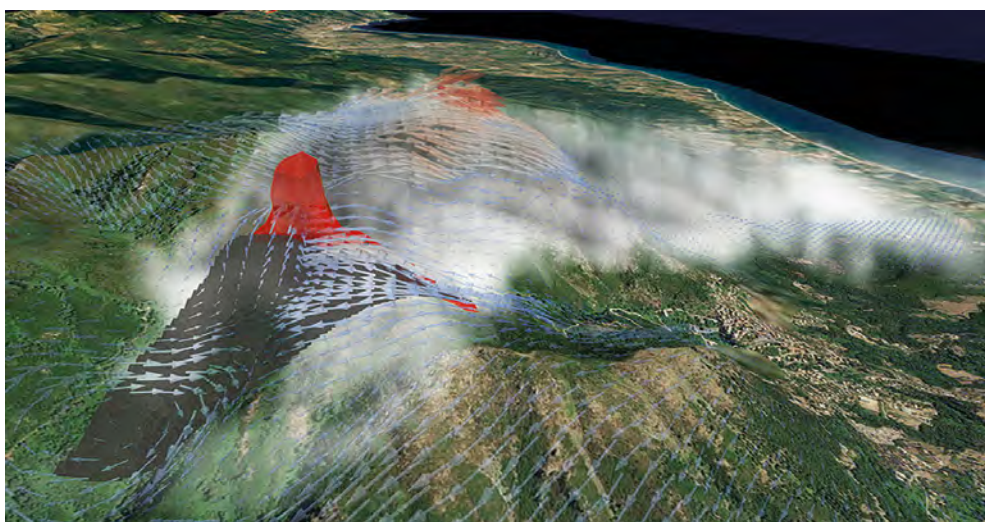
#### Le projet FireCaster

**Partenaires :** UMR 6134 Sciences Pour l'Environnement (Université de Corse), UMR 5318 CECI (CNRS), UMR 3589 Centre National de Recherches Météorologiques (CNRS), INRIA, UMR 5560 Laboratoire d'Aérodynamique (Université Toulouse Paul Sabatier), UMR 6240 LISA (Université de Corse).

#### COORDINATEUR

**Jean-Baptiste Filippi :** [filippi@univ-corse.fr](mailto:filippi@univ-corse.fr)

Simulation couplée MesoNH/ForeFire de l'aérodynamique et propagation de l'incendie de Cervione, 2 janvier 2018. Champ de vent (vecteurs), zone brûlée (au sol, gris), iso-surface d'énergie cinétique turbulente au-dessus de la zone de flamme et traceur de fumée.





# FOR-WIND

## Concevoir et simuler les forêts dans le vent – Adaptation sylvicole et économique de l'aménagement forestier au risque vent

### — Rappel des objectifs

Le vent est à la fois une cause majeure de dégâts pour les forêts lors des tempêtes, un signal environnemental indispensable à la bonne croissance des arbres car il les endure et les rend moins vulnérables, un risque « modèle » pour penser la gestion économique des forêts, par le particulier et la décision publique, sur le long terme et dans l'incertitude. FOR-WIND est un projet interdisciplinaire qui vise à produire des connaissances et outils nouveaux – des données, des modèles, des outils de simulation – pour concevoir la gestion des forêts en tenant compte de l'interaction biophysique entre vent et arbres et de l'économie de l'environnement et du risque. Deux questions scientifiques majeures : en biologie et mécanique environnementale, comment intégrer les effets positifs des vents chroniques sur la croissance dans la prédiction du risque face aux vents forts ? ; en économie et aménagement forestier, quelle complémentarité entre l'assurance contre le risque (soft adaptation) et la transformation des sylvicultures (hard adaptation) ?

### — Résultats majeurs

FOR-WIND a permis d'intégrer les effets du vent avec les autres facteurs du milieu dans les modèles de vulnérabilité et de croissance des forêts en faisant converger des recherches en écophysiologie et biomécanique de l'arbre et des modèles de croissance des forêts développés pour l'ingénierie de la gestion forestière, en s'attachant à décrire l'incertitude. En économie, il a permis de mieux formaliser la question de l'assurance et du soutien des politiques publiques pour l'adaptation au risque, tout en insérant, en amont des modèles théoriques économiques, des itinéraires sylvicoles réalistes simulés par les modèles de croissance.

### — Production scientifique et valorisation

- ▶ Albrecht AT, Fortin M, Kohnle U, Ningre F 2015. Coupling a tree growth model with storm damage modeling - Conceptual approach and results of scenario simulations. *Environmental Modelling & Software* 69: 63-76.
- ▶ Bonnesœur V, Constant T, Mouliat B, Fournier M 2016. Forest trees filter chronic wind-signals to acclimate to high winds. *New Phytologist*.
- ▶ Brunette M., Couture S., Pannequin F. (2017). Is forest insurance a relevant vector to induce adaptation efforts to climate change ? *Annals of Forest Science*, 74:41.
- ▶ Dupont S. (2016) A simple wind-tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level. *Agricultural and Forest Meteorology*, 224, 49-63.
- ▶ Gardiner, B., Berry, P., Mouliat, B. (2016). Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science*, 245, 94-118.
- ▶ Kamimura K., Gardiner B., Dupont S., Guyon D., Meredieu C. (2016). Mechanistic and statistical approaches to predicting wind damage to individual maritime pine trees in forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 45, 88-100.
- ▶ Hart, E., Sims, K., Kamimura, K., Gardiner, B., (2017). A Hybrid Method for Feature Construction and Selection to Improve Wind-Damage Prediction in the Forestry Sector, in: *GECCO '17*. Berlin, Germany. doi:10.475/123 4.
- ▶ Manso R, Morneau F, Ningre F, Fortin M 2015 Incorporating stochasticity from extreme climatic events and multi-species competition relationships into single-tree mortality models. *Forest Ecology and Management* 354: 243-253.



Mesure de la résistance mécanique des hêtres lorrains faisant intervenir les équipes nancéennes et bordelaises.

- ▶ Renaud, J. P., Vega, C., Durrieu, S., Lisein, J., Magnussen, S., Lejeune, P., & Fournier, M. (2017). Stand-level wind damage can be assessed using diachronic photogrammetric canopy height models. *Annals of Forest Science*, 74(4), 74.
- ▶ Yang M, Défossez P, Danjon F, Fourcaud T (2014) Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method. *Ann Bot* 114:695-709.

Outils de simulation pour l'aide à la décision :

- ▶ Simulateur Mathilde de la croissance et de la mortalité des peuplements mélangés hêtraies-chênaies.
- ▶ Bibliothèque de calculs ForestGales de la vulnérabilité des peuplements aux vents forts.
- ▶ Développés sous la plate-forme ouverte CAPSIS.  
[http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_fr/mathilde](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_fr/mathilde)  
[http://capsis.cirad.fr/capsis/help\\_en/forestgales](http://capsis.cirad.fr/capsis/help_en/forestgales)

### Le projet FOR-WIND

**Partenaires** : UMR 1092 LERFoB (INRA), UMR 356 LEF (INRA), UMR AMAP (CIRAD), UMR 1202 BIOGECO (INRA), UPR 1263 EPHYSE (INRA), UMR 547 PIAF (INRA), Département Recherche Développement Innovation (ONF), ISPA (Agro Bordeaux).

### COORDINATRICE

**Meriem Fournier** : [meriem.fournier@inra.fr](mailto:meriem.fournier@inra.fr)



## FRAG&amp;BINV

# Conséquences de la fragmentation forestière et conditions des invasions biologiques : le cas des oiseaux des caraïbes

## — Rappel des objectifs

Les activités anthropiques modifient les écosystèmes à un rythme qui s'accélère. Responsable du déclin de nombreuses espèces, la fragmentation des habitats et les invasions biologiques constituent deux menaces majeures pour la biodiversité. Ce projet a permis d'étudier, sur un ensemble d'espèces d'oiseaux représentant un gradient de spécialisation à l'habitat forestier, les effets de la fragmentation sur : (i) la diversité génétique, en réponse aux changements démographiques (populations plus petites et plus isolées), (ii) la qualité phénotypique des individus (morphologie, immunologie, couleur), et (iii) les interactions entre les oiseaux et leurs parasites. De plus, deux hypothèses récentes visant à expliquer le succès des invasions biologiques (l'hypothèse de la perte des ennemis naturels, et l'hypothèse d'une allocation différentielle dans les composantes du système immunitaire) ont été testées. Ce projet concernait quatre territoires (Guyane, Guadeloupe, Martinique, et Montserrat) qui abritent une importante biodiversité souvent endémique, et ont connu une importante érosion du manteau forestier mais aussi de nombreuses introductions ou invasions, essentiellement liées aux activités humaines et à une forte croissance démographique.

## — Résultats majeurs

En plus de contribuer à une meilleure connaissance des conséquences écologiques et évolutives de la fragmentation de l'habitat et des invasions biologiques, ce projet a produit des résultats précieux pour les acteurs de la gestion de la biodiversité. Ce projet a révélé une différenciation génétique significative à très petite échelle spatiale (au sein de chaque territoire étudié), ce qui est relativement inattendu pour des organismes a priori mobiles tels que les oiseaux et suggère que les effets de la fragmentation ont pu être sous-estimés chez ces organismes. Par ailleurs, plus une espèce est spécialiste de la forêt, plus la fragmentation de cet habitat affecte négativement sa diversité génétique. Les déplacements des oiseaux forestiers sont en effet contraints par les autres habitats, mais de manière hétérogène. Par exemple, l'habitat urbain est 100 fois plus résistant que la forêt à la dispersion de la Paruline caféïette, alors que les terres agricoles semblent seulement 4 fois plus difficiles à traverser. Concernant les parasites des oiseaux, plusieurs souches nouvelles de parasites sanguins (Haemosporidés) ont été décrites dans la région Caraïbe. Plus la forêt est fragmentée, plus la prévalence de ces parasites est élevée chez les oiseaux. Par ailleurs la configuration spatiale des fragments forestiers semble avoir un effet bien plus important que la surface totale de forêt restante.

Enfin, ce projet a fourni des résultats soutenant deux hypothèses couramment avancées pour expliquer le succès des invasions biologiques : l'hypothèse de la perte des ennemis naturels ("Enemy Release Hypothesis") et l'hypothèse d'une allocation différentielle dans les composantes du système immunitaire. En effet, les oiseaux des populations invasives ont moins de parasites et une réaction immunitaire inflammatoire plus faible que ceux des populations natives.



Crédit photos : CNRS.

## — Production scientifique et valorisation

8 articles:

- Pérez-Rodríguez A *et al.* (2018) Habitat fragmentation, but not habitat loss, drives the prevalence of blood parasites in a Caribbean passerine. *Ecography* 41: 1835-49.
- Khimoun A *et al.* (2017) Landscape genetic analyses reveal fine-scale effects of forest fragmentation in an insular tropical bird. *Mol. Ecol.* 26: 4906-19.
- Khimoun A *et al.* (2017) Level of genetic differentiation affects relative performances of EST- and genomic SSRs. *Mol. Ecol. Res.* 17: 893-903.
- Bailey J *et al.* (2016) Reduced inflammation in expanding populations of a neotropical bird species. *Ecol. Evol.* 6: 7511-21.
- Khimoun A *et al.* (2016) Habitat specialisation predicts genetic response to fragmentation in tropical birds. *Molecular Ecology* 25: 3831-44.
- Khimoun A *et al.* (2016) Contrasted patterns of genetic differentiation across eight bird species in the Lesser Antilles. *Genetica* 144: 125-38.
- Arnoux E *et al.* (2014) Morphology and genetics reveal an intriguing pattern of differentiation at a very small geographic scale in a bird species, the forest thrush *Turdus lherminieri*. *Heredity* 113: 514-25.
- Arnoux E *et al.* (2013) Phenotypic variation of Forest Thrushes *Turdus lherminieri* in Guadeloupe: evidence for geographic differentiation at fine spatial scale. *J. Ornithol.* 154: 977-85.

### Le projet FRAG&BINV

**Partenaires :** UMR 6282 Biogéosciences (Université de Bourgogne), CNERA Avifaune migratrice (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage), Cellule Technique Antilles (Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage), GEPOG Guyane, CIBIO (Portugal), Département de l'Environnement (UK).

### COORDINATEUR

**Stéphane Garnier :** [stephane.garnier@u-bourgogne.fr](mailto:stephane.garnier@u-bourgogne.fr)

## FUNTASTIC

# Nouvelles Oxydases à Radical Cuivre Fongiques Utilisées comme Biocatalyseurs pour la Valorisation de la Biomasse Végétale et d'Alcools

## — Rappel des objectifs

La vision de ce projet, basé sur un partenariat international Franco-Canadien (ANR-NSERC), est d'exploiter les connaissances fondamentales acquises grâce à la découverte de nouvelles enzymes, afin de développer de nouveaux procédés biotechnologiques utilisables pour la valorisation des ressources naturelles retrouvées de manière abondante sur les territoires Français et Canadien. Dans la nature, les champignons filamenteux jouent un rôle crucial dans la dégradation/modification des glucides et des métabolites secondaires à travers la production d'enzymes oxydatives. Ce projet repose donc sur la révélation du potentiel catalytique inexploité de la famille diversifiée des oxydases à radical cuivre (CROs), dont il a été démontré la capacité à modifier les polysaccharides et autres alcools à travers l'introduction de groupements fonctionnels de type carbonyle, dans le but de valoriser les composants de la biomasse, en particulier les glucides complexes et les alcools en travaillant explicitement dans le sens de la biologie synthétique.

Ainsi, l'objectif principal de ce projet est de découvrir de nouvelles CROs avec de nouvelles fonctionnalités et d'élucider leur mécanisme moléculaire par une approche structure-fonction. En détails, les objectifs initiaux fixés sont les suivants : (I) identifier et caractériser de nouveaux biocatalyseurs fongiques de la sous-famille AA5\_2 de la classification CAZy, (II) identifier les motifs structuraux qui dictent la spécificité de substrat au sein des AA5\_2, et (III) envisager de nouvelles applications biotechnologiques en utilisant ces nouveaux biocatalyseurs. Précisément, la stratégie de recherche mise en œuvre est : (i) d'exploiter les bases de données de séquences publiques/privées et la biodiversité fongique de la collection du CIRM-CF pour cibler les nouveaux gènes AA5\_2, (ii) de produire un grand nombre de nouvelles enzymes AA5\_2 fongiques couvrant la phylogénie de cette famille, (iii) de caractériser en détail (c'est-à-dire aux niveaux biochimique, enzymatique, structural et biophysique) les nouvelles enzymes ciblées ayant des activités spécifiques élevées et/ou larges contre un panel de substrats comprenant des alcools et des polysaccharides, (iv) de comprendre le mécanisme catalytique de ces enzymes par analyse des produits de réaction par des analyses cinétiques en temps réel, (v) d'identifier les relations structure/activité par des approches structurales et par mutagenèse dirigée, (vi) d'améliorer et d'étendre la fonctionnalisation des polysaccharides naturels, l'oxydation d'alcools en aldéhydes correspondants, (viii) d'amener la pro-

duction des biocatalyseurs et des aldéhydes par un procédé de bioconversion à une échelle industrielle et, (ix) de transférer la technologie pour mettre la propriété intellectuelle issue de ces objectifs pratiques au service de l'industrie en collaboration avec des entreprises françaises et canadiennes.

## — Résultats majeurs

Ce projet impliquant deux partenaires industriels, les résultats sont donc confidentiels.

## — Production scientifique et valorisation

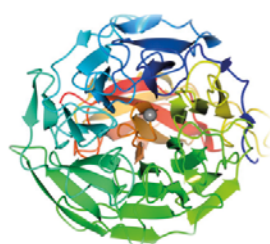
Ce projet étant dans le début de sa seconde année et impliquant de surcroît deux partenaires industriels, les résultats ne sont par conséquent pas publiés pour le moment.

### Le projet FUNTASTIC

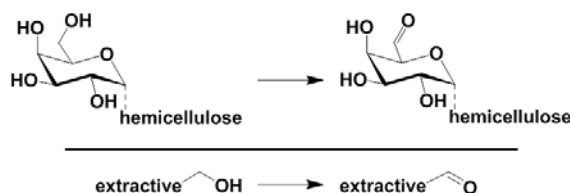
**Partenaires :** UMR7313 Institut des Sciences Moléculaires (Aix-Marseille Université, Marseille), UMR 1163 Biotechnologie et Biodiversité Fongiques (INRA), Société Mane & Fils, Michael Smith Laboratories-University of British Columbia (Canada), Société Novozymes Canada Ltd (Canada).

### COORDINATEUR

**Mickaël Lafond :** mickael.lafond@univ-amu.fr



Discover novel oxidative enzymes  
(CROs from AA5)



Biocatalytically upgrade key biomass components  
(carbohydrates and extractives)



**New bioproducts,  
further chemistry to  
produce additional  
chemicals and  
biomaterials**

Crédit : Brumer H. 2016.

## FUNTUNE

## Cocktails enzymatiques inspirés de modèles fongiques pour la déconstruction contrôlée de la biomasse végétale

## — Rappel des objectifs

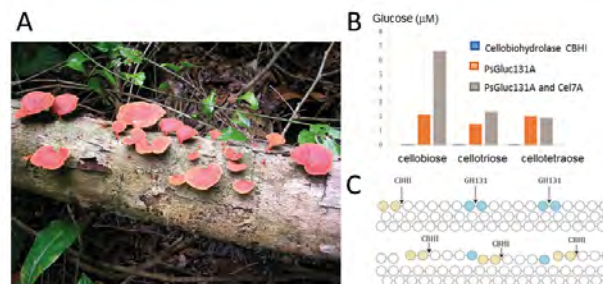
Le développement de bioprocédés basés sur la transformation de la biomasse végétale en alternative au carbone fossile est limité par deux verrous majeurs : la récalcitrance de la lignocellulose, qui augmente le coût des traitements, et la diversité des biomasses disponibles. La récalcitrance de la biomasse végétale est principalement due à la structure cristalline de la cellulose et à la présence de lignine, un polymère polyphénolique qui limite l'accès des enzymes cellulolytiques à leur substrat. Des prétraitements thermochimiques rendent la fraction polysaccharidique accessible aux enzymes hydrolytiques. Cependant, outre leur coût, ces prétraitements ont un impact environnemental non négligeable. Une alternative aux prétraitements thermochimiques est le développement de procédés enzymatiques, respectueux de l'environnement, capables d'agir sur la lignocellulose récalcitrante. Le second défi est le développement de bioprocédés adaptés à une ressource en biomasse variée, permettant de valoriser les ressources locales. Une réponse à ces deux défis est le développement de cocktails enzymatiques capables de réduire la récalcitrance d'une large gamme de biomasses.

Les champignons associés aux plantes ont développé au cours de l'évolution des outils enzymatiques adaptés à des hôtes et substrats variés. Ces outils enzymatiques sont des facteurs déterminants d'une déconstruction contrôlée des parois végétales pendant l'interaction avec la plante. Tandis que les champignons du bois dégradent les parois végétales grâce à une large gamme d'enzymes actives sur carbohydrates (CAZymes) et sur la lignine (péroxydases et oxidoréductases partenaires), les champignons symbiotiques causent des modifications subtiles des parois. Les champignons pathogènes quant à eux entraînent différents degrés de modification ou de dégradation des parois.

Dans ce projet nous explorons les mécanismes enzymatiques fongiques afin de concevoir des cocktails enzymatiques bio-inspirés capables d'agir sur des biomasses variées pour en réduire la récalcitrance. Au-delà de l'analyse comparative de répertoires de gènes de la lignocellulolyse, nous étudions la part active de ces jeux enzymatiques lors de la colonisation de tissus végétaux.

## — Résultats majeurs

- Nous avons identifié un jeu d'enzymes communément sécrétées par les champignons saprotrophes, pathogènes et mycorhiziens au cours de la colonisation de tissus végétaux. Parmi elles, des endoglucanases de la famille GH131, des  $\beta$ -1,4-endoglucanases, des expansines et des polygalacturonases semblent jouer un rôle clé dans la déstructuration des parois végétales.
- L'étude comparative de champignons dégradeurs du bois du groupe des *Trametes* a montré que ces champignons produisent simultanément une panoplie d'enzymes ciblant les différentes liaisons des chaînes polysaccharidiques qui pourraient agir de façon coordonnée dès les étapes précoces de la colonisation du bois. En particulier, des laccases, des  $\alpha$ -galactosidases et des arabinofuranosidases semblent importantes pour le succès de la colonisation du bois.
- Nous avons montré chez ces champignons l'importance des mécanismes oxydatifs de dégradation de la lignocellulose. Nous avons identifié les partenaires rédox des peroxydases actives sur la lignine et des Lytic Polysaccharide Monooxygenases (LPMOs) actives sur la cellulose et certains polymères d'hémicellulose.



Synergie entre GH131 et cellobiohydrolase pour la libération de glucose à partir de fibres de bois de bouleau. La GH131 PsGluc131A a été identifiée chez le champignon *Pycnoporus sanguineus* (A). La synergie entre PsGluc131A et la cellobiohydrolase CBH1 de *Trichoderma reesei* (B) pourrait être liée à l'activité endoglucanase de PsGluc131A générant des sites accessibles pour l'activité exoglucanase de la CBH1. Modified from Anasontzis *et al.*, Environ. Microbiol. 2019.

- Les endoglucanases de la famille GH131 étaient encore peu caractérisées à l'initiation du projet. Nous avons montré que ces enzymes clivent les liaisons glycosidiques  $\beta$ -1,3,  $\beta$ -1,4 et les polymères de liaisons mixtes  $\beta$ -1,3/1,4. Nous avons mis en évidence une synergie enzymatique entre GH131s et cellobiohydrolases qui permet d'augmenter le taux d'extraction de glucose à partir de fibres de bois.

- L'étude de l'endoglucanase GH5 d'un champignon mycorhizien a montré que cette enzyme est importante pour l'établissement de la mycorhize, et pourrait jouer un rôle dans la modification des parois des cellules racinaires des arbres hôtes lors de la symbiose.

## — Production scientifique et valorisation

- Anasontzis GE *et al.* 2019. *Environmental Microbiology* doi: 10.1111/1462-2920.14596.
- Zhang F *et al.* 2018. *New Phytologist* 220(4):1309-1321.
- Jurak E *et al.* 2018. *BMC Genomics* 19(1):815.
- Miyauchi S *et al.* 2018. *Biotechnology for Biofuels* 11:201.
- Haitjema CH *et al.* 2017. *Nature Microbiology* 2:17087.
- Miyauchi S *et al.* 2017. *PLoS One* 12(4):e0175528.
- Miyauchi S *et al.* 2016. *Frontiers in Microbiology* 7: 1335.

## Le projet FUNTUNE

**Partenaires :** UMR 1163 Biotechnologie des Champignons Filamenteux (INRA), UMR 1136 Interactions Arbres Micro-organismes (INRA), UR 1290 Biologie et Gestion des Risques En Agriculture (INRA), UMR 7257 Architecture et Fonction des Macromolécules Biologiques (Université Aix Marseille).

## COORDINATRICE

**Marie-Noëlle Rosso :** marie-noelle.rosso@inra.fr



## FUTURE-SAHEL

## La gestion des ressources sahéliennes : approches à échelles multiples dans le contexte de la Grande Muraille Verte (GMV) en Afrique

## — Rappel des objectifs

FUTURE-SAHEL (FS) est un programme de recherche fortement interdisciplinaire dont l'objectif général est de produire des connaissances conceptuelles et expérimentales issues du terrain qui serviront comme base pour contribuer au bien-être environnemental et humain au Sahel, et ceci en s'appuyant sur le projet de la GMV comme vecteur de transformation potentielle. Notre activité se positionne à l'interface recherche-développement et les connaissances sont coproduites par les chercheurs, mais aussi d'autres acteurs du terrain (l'Agence Nationale de la GMV, qui est partenaire du projet, ainsi que les populations locales). Au-delà des applications pour la gestion des ressources naturelles, nous approfondissons nos connaissances sur les socio-écosystèmes sahéliens, et ce à différentes échelles, du fonctionnement de la composante individuelle (i.e. espèces d'arbres) jusqu'à celui des systèmes complexes au sein desquels les composantes environnementales et humaines sont en interaction constante et évolutive.

## — Résultats majeurs

Dans le cadre du Workpackage (WP1), nous avons créé une base de données qui intègre un ensemble de données spatialisées dont la finalité est l'aide à la compréhension des interconnexions complexes entre les diverses composantes des socio-écosystèmes occupant le tracé de la GMV. Il constitue également un outil d'aide à la décision destiné aux gestionnaires des ressources naturelles. La détection à très haute résolution spatiale des formes arborées, leur mise en relation avec des variables dendrométriques et de croissance de plusieurs espèces arborées sahéliennes acquises sur le terrain nous permettent d'évaluer la contribution de la zone sahélienne à la séquestration du carbone et la plus-value de l'activité de reboisement de la GMV pour cette séquestration.

Des expérimentations ont été conduites dans des parcelles de recherche localisées dans des situations hydroclimatiques contrastées sur le tracé de la GMV (WP2). Grâce à elles, on est aujourd'hui en mesure d'identifier les stratégies de reverdissement les plus appropriées par zone. La pratique de l'agriculture pluviale en association avec les arbres (agroforesterie) a été testée. Elle crée un élément de résilience supplémentaire pour les populations (diversification alimentaire et moyens de subsistance), malgré le dogme d'une vocation unique d'élevage de cette zone sylvopastorale du Sénégal.

Le WP3 a constitué une première étape vers une meilleure valorisation économique des fruits de *Balanites aegyptiaca*, espèce arborée dominante sur la majeure partie du tracé de la GMV. Nous avons caractérisé des peuplements de *B. aegyptiaca* en lien avec les propriétés physicochimiques des sols et les données climatiques, et étudié les facteurs environnementaux et génétiques dictant la quantité et la qualité des fruits.

Au sein de WP4, nous avons créé un cadre conceptuel multi-échelle basé sur les principes de la résilience et l'accès aux services écosystémiques (SE) abondants, diversifiés, équitables et durables, pour guider les actions de la GMV visant à une meilleure gestion des ressources naturelles. Par une étude des services écosystémiques à l'échelle paysagère, nous avons pu appréhender la contribution relative des différentes unités paysagères (u.p.) à la fourniture de multiples SE. C'est précisément cette mosaïque d'u.p. qui participe à la résilience socio-environ-



Socio-écosystèmes près de Widou-Thiengoly forage, une des bases principales de l'Agence Nationale de la Grande Muraille Verte sénégalaise. Crédit photo : J.-L. Peiry, août 2017.

nementale. On a pu montrer que la GMV contribue à créer de nouvelles unités paysagères : i.e. jardins communaux, réserves de faune; ces u.p. présentant un fort potentiel de diversification des moyens d'existences locaux.

Enfin, FUTURE-SAHEL a piloté un processus de *resilience assessment*, intitulé « *Wayfinder* », développé par un groupe d'experts mondialement reconnus dans le domaine. Ce travail collectif a été conduit dans le département de Ranérou-Ferlo, sur le tracé de la GMV. Il a impliqué des acteurs de tous niveaux (national, gouvernance locale et société civile) et a permis de dégager les grandes orientations qui pourraient conduire cette zone vers un futur désirable.

## — Production scientifique et valorisation

Publications :

► Wade TI, Ndiaye O, Mauclair M, Mbaye B, Sagna M, Guissé A, Goffner D (2018) *New Forests*.

<https://doi.org/10.1007/s11056-017-9623-3>

► Goffner D, Sinare H, et Gordon LJ (2019) *Reg Environ Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01481-z>

► Goffner D, Peiry J-L (2019).

<https://www.encyclopedia-environnement.org/vivant/grande-muraille-verte-afrique-espoir-reverdir-sahel/>

Rapport :

► Perretton A, Ka A, Goffner D (2019). WAYFINDER et amélioration collective de la résilience dans le département de Ranérou Ferlo : rapport stratégique pour le changement. 125 pp.

Pour les liens vers le média/web articles :

<http://future-sahel.blogspot.com/>

## Le projet FUTURE-SAHEL

**Partenaires :** UMR 3189 Environnement, Santé, Sociétés (CNRS), Agence Nationale de la Grande Muraille Verte (Sénégal), Stockholm Resilience Centre (Suède).

## COORDINATRICE

**Deborah Goffner** : [deborah.goffner@cnrs.fr](mailto:deborah.goffner@cnrs.fr)

## H2Oak

## Diversité de traits adaptatifs liés à l'utilisation de l'eau chez deux chênes blancs européens

## — Rappel des objectifs

L'objectif principal du projet H2Oak vise à déterminer si l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE : le rapport entre la biomasse accumulée et l'eau transpirée) et les traits sous-jacents jouent un rôle adaptatif chez les chênes en termes (i) d'incidence sur la fitness, (ii) d'adaptation des provenances à leur environnement spécifique et (iii) d'existence d'une diversité génétique suffisante pour assurer l'adaptation au changement climatique. L'objectif final est de définir des critères pouvant être utilisés pour évaluer l'incidence de la gestion forestière sur le potentiel adaptatif de WUE dans des chênaies.

## — Résultats majeurs

Le projet est encore en cours, et il manque encore quelques résultats clés pour assembler les résultats des différentes tâches. Des résultats préliminaires sont : la mise en évidence de régions génomiques (WTL) liées à la WUE pour des familles de chêne sessile et des familles d'hybrides sessile x pédonculé. Certains de ces QTL étaient co-localisés avec des QTL chez le chêne pédonculé, confirmant ainsi une région génomique importante pour les deux espèces. En utilisant la séquence du génome d'un chêne pédonculé (projet ANR Genoak), une liste de gènes sous-jacents a été établie.

Des expérimentations de sécheresse menées sur les deux espèces ou sur le chêne sessile seul ont permis d'étudier plus en détails les traits sous-jacents. Il a été montré que les variations de WUE à un stade jeune ont été principalement liées à des différences d'accumulation de biomasse. Les deux espèces affichent en effet des stratégies d'allocation du carbone divergentes notamment au niveau du compartiment racinaire. Ainsi le chêne sessile produit un système racinaire plus fin et ramifié que le chêne pédonculé. Cet état de fait est d'autant plus marqué sous conditions de stress, conditions auxquelles le chêne pédonculé est plus sensible que le chêne sessile en termes de production de biomasse. Des études d'expression de gènes ont permis d'établir une liste de gènes différemment exprimés entre individus à forte ou à faible WUE, sous sécheresse ou non. Seize provenances du chêne sessile, choisies sur un gradient de disponibilité de l'eau dans le sol puis étudiées en plantation comparative, ont montré des différences de WUE et de croissance. Cependant, il est aussi apparu que la plus grande diversité d'expression de WUE et de croissance en réponse à la sécheresse résidait à l'intérieur des provenances. Les différents gènes candidats caractérisés dans les deux premières tâches ont fait l'objet d'une analyse de la littérature scientifique. De cette liste une sélection de gènes a été retenue pour une étude de la diversité génétique parmi les arbres des différents provenances. Cette diversité sera associée à celle de WUE pour identifier les gènes et fonctions clés qui conditionnent la diversité de WUE chez les chênes.

Enfin, une plantation comparative de six provenances de chêne sessile et de six provenances de chêne pédonculé a été établie en forêt sur une parcelle sèche et une parcelle humide. Cette plantation permettra l'étude de l'impact à long terme des variations climatiques ainsi que de la sylviculture sur la diversité des gènes clés et ainsi de la valeur adaptative de la WUE.



Les seize provenances du chêne sessile utilisées pour l'analyse de WUE, de la croissance et de la diversité génétique. Crédit : S. Ponton.



Récolte des 600 arbres de la plantation comparative de provenances du chêne sessile (a) et Provenances du chêne sessile et du chêne pédonculé utilisées pour la plantation comparative en forêt (b). Crédit : O. Brendel.

## — Production scientifique et valorisation

Plusieurs articles sont en cours d'écriture. Certains résultats ont été présentés à une session supplémentaire du congrès 125<sup>e</sup> Anniversaire d'IUFRO : « Water use efficiency under drought » à Nancy (France), 18 septembre 2017 et au « Workshop on Fagaceae and Nothofagaceae Genetics and Genomics » à Shanghai (Chine), 1-3 Novembre 2017.

## Le projet H2Oak

**Partenaires :** UMR 1137 Ecologie et Ecophysiologie Forestières (INRA), UMR 1202 Biodiversité, Gènes et Ecosystèmes (INRA), UMR 1165 Génomique Végétale (INRA), UR 1261 Forestière de Lorraine (INRA), ONF.

## COORDINATEUR

**Olivier Brendel :** [oliver.brendel@inra.fr](mailto:oliver.brendel@inra.fr)

## HEVEADAPT

## Comment les plantations familiales peuvent-elles s'adapter aux changements globaux ?

## — Le pari des petits planteurs d'hévéas

Les plantations d'hévéa en Thaïlande sont un modèle d'exploitations familiales intégrées à une filière agro-industrielle globalisée. Comment peuvent-elles s'adapter et rester durables face à des conditions climatiques variables et à des changements profonds dans leur environnement socioéconomique ? Nous avons étudié les facteurs socioéconomiques et biophysiques qui déterminent la vulnérabilité ou l'adaptabilité des exploitations aux changements. La volatilité des cours, la raréfaction de la main-d'œuvre et la petite taille des exploitations sont les principaux facteurs de risques socioéconomiques. Les changements climatiques et l'extension des plantations dans des zones moins favorables induisent des risques pour la durabilité du sol (qualité physique et biodiversité fonctionnelle) et de stress hydrique pour les plantes. Au-delà des plantations d'hévéas, l'enjeu générique est de déterminer des indicateurs pertinents pour évaluer l'adaptation à long terme et la durabilité des exploitations familiales à base d'arbres.

## — Une approche multidisciplinaire

Notre équipe a caractérisé les changements en cours et leurs conséquences. Des dispositifs pérennes de recherche en partenariat (LUSES et HRPP) ont permis l'accès à des terrains couvrant une large gamme de contraintes agro-écologiques. L'étude des exploitations s'est fondée sur des enquêtes avec des approches centrées sur la variable-clé « travail », les concepts de « sustainable rural livelihood » et de système d'activité. Nous avons intégré les données dans des indicateurs de durabilité des exploitations ou des simulations technico-économiques de scénarios.

Sur sites expérimentaux ou en parcelles paysannes, nous avons étudié les fonctions des sols des plantations : recyclage du C, mobilisation des nutriments, régulation de l'eau. Un outil intégrateur a été développé (Biofunctool®). Nous avons établi des scénarios locaux de changement climatique et déterminé la nature et l'intensité des stress hydriques ainsi que la stratégie d'adaptation des hévéas. Toutes les compétences se sont réunies en particulier pour étudier le fonctionnement et les conditions de succès des systèmes agroforestiers, une alternative prometteuse à la monoculture.

## — Résultats majeurs

Les plantations familiales demeurent majoritaires et ne sont pas moins durables que les exploitations entrepreneuriales. En période de cours bas, elles s'adaptent par des stratégies variées, dont la diversification mais n'abandonnent pas la culture d'hévéa. La rémunération par partage de la production (métayage), largement majoritaire en Thaïlande, favorise la résilience face à la volatilité des cours. Mais ce système peut rendre difficile l'évolution des pratiques, comme la réduction de la fréquence de saignée pour accroître la productivité du travail.

Les phases d'abattage/replantation perturbent fortement les sols. Leur qualité s'améliore ensuite avec l'âge des plantations grâce aux apports de matière organique par les litières et à l'activité croissante des organismes du sol. Cependant, la restauration n'est que partielle et la résilience baisse donc après 2 replantations. De plus, sur forte pente, les sols des plantations d'hévéas subissent une érosion et un ruissellement bien plus élevés que les cultures annuelles. La couverture effective du sol



HEVEADAPT, une approche pluridisciplinaire de la durabilité des plantations familiales d'hévéa. Biodiversité du sol, entretien avec des planteurs, systèmes agroforestiers, adventices et érosion.

Crédits photos : A. Thoumazeau, B. Chambon, P. Thaler, H. Robain.

par des cultures de sous-étage ou un recu herbacé naturel est déterminante pour protéger les sols.

Face à la contrainte hydrique, les génotypes d'hévéa développent une même stratégie d'esquive et d'évitement mais il existe une certaine variabilité génétique dans le degré d'évitement. Elle offre une base intéressante de sélection et de choix variétal, sous-exploitée à l'heure actuelle.

Les systèmes agroforestiers sont prometteurs car ils diversifient et augmentent les revenus mais ils nécessitent des plateformes d'innovation pour une plus large diffusion.

## — Production scientifique et valorisation

- ▶ 12 articles publiés à ce jour dans des revues internationales.
- ▶ Forte contribution à 3 événements régionaux : Intern. Soil Conf. 2015, Thailand ; Sustainable Rubber Conf. 2016, China ; Intern. Rubber Conf. 2016 et 2017.
- ▶ Journée de communication avec le projet ANR RUBBex, Bangkok 2017.
- ▶ Deux marques ont été déposées pour l'évaluation des sols : SituResp® et Biofunctool®.

## Le projet HEVEADAPT

**Partenaires** : UMR Eco&Sols (CIRAD), UPR Performance des systèmes de culture des plantes pérennes (CIRAD), UMR Innovation (CIRAD), UMR MOISA (CIRAD), UMR 242 iEES(IRD), Asian Institute of Technology (Thaïlande), HRPP Research Platform et LUSES Joint International Laboratory (Thaïlande).

## COORDINATEUR

**Philippe Thaler** : philippe.thaler@cirad.fr



# Hydrauleaks

## Comprendre les effets combinés des stress hydriques et thermiques sur la mortalité des arbres

### — Rappel des objectifs

Les sécheresses provoquent plus de dépérissements dans les forêts lorsqu'elles sont associées à des vagues de chaleur, comme au cours de l'été 2003 en France. Cependant, les mécanismes physiologiques sous-jacents de ces dépérissements restent à élucider. L'objectif principal de ce projet est d'explorer une nouvelle hypothèse de mortalité, selon laquelle la défaillance hydraulique du xylème serait causée par une augmentation brusque de la perte d'eau cuticulaire résiduelle ( $g_{min}$ ) au-delà d'une température critique  $T_p$ . Les valeurs de  $T_p$  issues de la littérature et des simulations préliminaires d'un nouveau modèle mécaniste (SurEau) justifient cette hypothèse. Nous mesurerons  $g_{min}$  et sa dépendance à la température pour des espèces d'arbres forestiers couvrant une large gamme de tolérance à la sécheresse. Pour deux espèces menacées par les changements climatiques (*Fagus sylvatica* et *Abies alba*), nous explorerons la variabilité de  $g_{min}$  sur des provenances d'origines contrastées dans leur aire de répartition naturelle en travaillant à la fois sur des tests de provenance et « in situ ».  $g_{min}$  sera également comparé pour des génotypes de peupliers contrastés pour leur tolérance à la sécheresse. La plasticité phénotypique de ce caractère sera évaluée pour un génotype de peuplier cultivé dans des environnements contrôlés pour l'humidité du sol, l'ombrage et la température. Nous développerons un nouvel outil (DroughtBox) pour le phénotypage de  $g_{min}$  et  $T_p$  qui sera distribué à l'ensemble des partenaires du projet.

Nous émettons l'hypothèse (H1) que les espèces, les génotypes et les phénotypes plus résistants aux sécheresses caniculaires présentent une  $g_{min}$  plus basse et plus thermo-stable. Les mécanismes physiques sous-jacents seront étudiés sur des cuticules réelles et biomimétiques. La composition chimique des cuticules des feuilles sera mesurée sur du matériel végétal sélectionné à partir des expériences précédentes pour identifier les composants structuraux clés associés aux variations inter et intraspécifiques de  $g_{min}$ . L'effet de ces composants sur  $g_{min}$  et sa thermostabilité sera évalué chez des mutants d'*Arabidopsis* modifiés pour leur biosynthèse.

Nous émettons l'hypothèse (H2) que la thermostabilité de  $g_{min}$  est causée par la présence ou la proportion de molécules spécifiques dans la cuticule. Des tests expérimentaux seront menés ex-situ dans des conditions contrôlées pour évaluer l'impact d'une sécheresse caniculaire sur la défaillance hydraulique et la mortalité des arbres afin de valider les prédictions du modèle SurEau. Enfin, nous couplerons le modèle SurEau à des modèles des flux forestiers afin de prédire le risque de mortalité des arbres sur des sites ICOS-France. Les risques futurs de mortalité causée par les sécheresses caniculaires seront prédits pour ces peuplements selon plusieurs scénarios climatiques.



Mise en place d'une expérimentation sur la plateforme de phénotypage de la résistance à la sécheresse des arbres du site INRA de Crouël. Les arbres sont placés sur des balances sous un abri roulant et exposés à une sécheresse. Des panneaux radiants chauffants seront utilisés pour simuler une vague de chaleur. Crédit photo : H. Cochard.

### — Résultats majeurs

Le projet ayant débuté en janvier 2019, peu de résultats sont à ce jour disponibles. Nous avons finalisé la construction de 3 prototypes de DroughtBox, un nouvel outil conçu pour le phénotypage de  $g_{min}$  et de  $T_p$  (une publication soumise). Nous avons poursuivi le développement du modèle SurEau et effectué une analyse de sensibilité des effets de la température sur la rupture hydraulique en situation de stress hydrique caniculaire (Cochard 2019). Une première expérimentation a été mise en place pour tester l'effet d'une vague de chaleur sur la mortalité de 4 espèces d'arbres.

### — Production scientifique et valorisation

- Cochard H. 2019. A new mechanism for tree mortality due to drought and heatwaves. *bioRxiv*, 531632.
- Billon LM *et al.* (submitted) The DroughtBox: a new standard tool for phenotyping plant residual transpiration.

#### Le projet Hydrauleaks

**Partenaires :** UMR 547 PIAF (INRA-Université Clermont Auvergne), Institut de chimie de Clermont (université Clermont Auvergne), UR Ecologie des Forêts Méditerranéennes (INRA) .

#### COORDINATEUR

**Hervé Cochard :** herve.cochard@inra.fr

# Intens&Fix

## Intensification écologique des écosystèmes de plantations forestières. Modélisation biophysique et évaluation socio-économique de l'association d'espèces fixatrices d'azote

### — Rappels des objectifs

Les plantations forestières devant fournir une part croissante de la demande en bois, dans un contexte de raréfaction et/ou de renchérissement des terres disponibles, leur rendement doit augmenter de manière durable, via des pratiques innovantes et attractives pour les acteurs. L'objectif général était d'accroître la productivité des plantations forestières et la disponibilité de N et P dans le sol via une intensification écologique de leur production par l'association d'espèces fixatrices d'azote. Les objectifs du projet étaient de :

- 1) quantifier les principales interactions biophysiques inter et intra-spécifiques au sein des plantations forestières en mélange avec des espèces fixatrices d'azote, en comparaison aux monocultures.
- 2) prendre explicitement en compte le contexte technique et socio-économique afin de proposer des systèmes de gestion novateurs.

### — Résultats majeurs

#### ► Accroissement durable de la production des plantations forestières et de la disponibilité de N et P dans le sol :

Les modèles ont visé à simuler le fonctionnement et la croissance des plantations mixtes, évaluer leur faisabilité économique et tester les règles de décision adaptées à leur gestion. Par la diversité des systèmes et des conditions écologiques, le projet a contribué à une compréhension générale des processus de compétition et facilitation au sein des plantations forestières associant des espèces fixatrices d'azote.

#### ► Modélisation biophysique et évaluation socio-économique de l'association d'espèces fixatrices d'azote dans les plantations forestières :

Le projet a principalement reposé sur des essais au champ, testant les associations eucalyptus-acacia, peuplier-robinier et noyer-aulne. La croissance des arbres et la production des plantations ont été estimées par mesures allométriques et équations de biomasse. La photosynthèse, la respiration des arbres et du sol ont été mesurées avec des analyseurs infra-rouge de gaz. Couplée aux chutes de litière et aux analyses de sol, la respiration du sol a permis d'estimer le carbone alloué aux parties

souterraines. La consommation hydrique des arbres a été évaluée au niveau de l'arbre par des capteurs thermiques de flux de sève, les résultats étant croisés au niveau peuplement avec le bilan hydrique du sol. La fixation symbiotique de  $N^2$  a été estimée par abondance naturelle du  $^{15}N$ , par dilution isotopique après apport d'une solution enrichie en  $^{15}N$  et par méthode des bilans. Les deux premières méthodes ont été utilisées pour estimer le transfert global de N entre les espèces fixatrice et non fixatrice. Le transfert rapide souterrain de N entre espèce fixatrice et non fixatrice a été estimé *in situ* par marquage  $^{15}N$  de l'espèce fixatrice et suivi temporel du  $^{15}N$  dans les compartiments de l'espèce non fixatrice. La possibilité de transfert par réseaux mycorhiziens a été étudiée par identification de mycorhizes communes. Des acteurs et fonctions biologiques du cycle de N ont été caractérisés par biologie moléculaire. Le cycle de P a été étudié en isolant sur des milieux spécifiques des bactéries capables de solubiliser le P minéral ou minéraliser le phytate (P organique). La diversité fonctionnelle des communautés de nématodes a été caractérisée pour établir le lien entre activités microbiennes et dynamique du N. Un modèle CEM a permis de simuler la dynamique conjointe du C et du N durant la décomposition des litières. Le modèle MAESTRA a permis de simuler l'évolution des principaux paramètres écophysologiques des arbres, en monoculture et en mélange. Un modèle conceptuel a été couplé à l'analyse mathématique et informatique dans une démarche de modélisation ad hoc en fonction des objectifs et des données, pour une simulation générique du partage de la lumière, de l'eau et ses conséquences sur la production de biomasse et la fixation d'azote. Le modèle FarmSafe a été utilisé pour simuler la production et estimer la rentabilité de systèmes agroforestiers avec des espèces fixatrices en France.

### — Production scientifique et valorisation

Le projet a conduit à 23 articles dans des revues à facteur d'impact et quatre dans des revues techniques ainsi que 22 communications scientifiques, dont 4 invitées. Par ailleurs neuf thèses et 31 travaux de masters ont été menés dans le cadre du projet. <https://intens-fix.cirad.fr/produits>

#### Le projet Intens&Fix

**Partenaires :** UPR 80 FPEP (Cirad), UMR Eco&Sols (INRA), UMR System (INRA), UMR Ecologie et écophysiologie forestière (INRA) - UMR Eco&Sols (INRA), UMR Innovation (Cirad), Association Française d'AgroForesterie, CRDPI (Congo).

#### COORDINATEUR

**Jean-Pierre Bouillet :**  
jean-pierre.bouillet@cirad.fr

Essai sur les plantations mixtes d'*Eucalyptus grandis* et d'*Acacia mangium* - Station expérimentale USP-Esalq à Itatinga (SP) au Brésil. Crédit photo : Jean-Pierre Bouillet.



## LIGNOPROG

## Modélisation de la progression d'enzymes dans des assemblages et parois lignocellulosiques

## — Rappel des objectifs

La biomasse lignocellulosique est une source de carbone renouvelable issue de la photosynthèse qui peut servir pour produire des carburants, matériaux et intermédiaires chimiques car la lignocellulose est composée de polysaccharides (cellulose et hémicellulose) et de molécules aromatiques (lignine) hautement valorisables. Deux grandes voies de transformation complémentaires sont envisagées : la voie thermochimique et la voie biotechnologique. Dans cette dernière, la lignocellulose doit d'abord subir une étape de pré-traitement afin de favoriser l'accessibilité aux polymères pour que les enzymes hydrolytiques dégradent leurs substrats. Cependant, à cause de la complexité chimique et structurale de la lignocellulose, différents types d'enzymes en quantité élevée doivent être utilisées. Surtout, les enzymes peuvent interagir de manière non-spécifique avec les structures hydrophobes que la lignine forme, ce qui limite leur activité. Ainsi, les études économiques montrent que le coût des enzymes représente près de 30 % du coût de transformation de la lignocellulose dans une bioraffinerie. Réduire ce coût est donc critique pour rendre les bioprocédés rentables, notamment en comprenant mieux la diffusion des enzymes et leurs interactions non-spécifiques avec la lignocellulose.

Actuellement, peu d'approches dynamiques sont développées pour appréhender la mobilité des enzymes. De plus, ces approches traitent la plupart du temps de substrats isolés qui ne sont pas représentatifs de la complexité de la lignocellulose.

L'enjeu du projet LIGNOPROG a consisté à développer de nouvelles approches pour étudier la mobilité et les interactions de molécules dans des matrices lignocellulosiques. Globalement, la stratégie a été développée en deux volets :

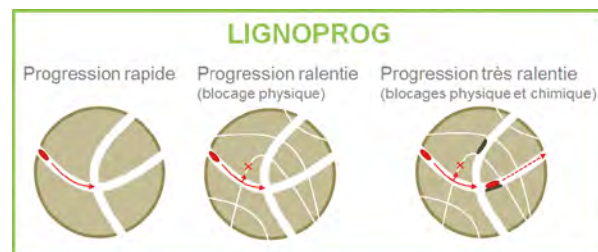
- la préparation et la caractérisation de matrices ou assemblages lignocellulosiques modèles afin de mettre en place les méthodes expérimentales et analytiques sur des objets maîtrisés ;
- l'application de ces méthodes sur des matrices lignocellulosiques plus complexes comme des coupes fines d'échantillons de plantes.

Le challenge est constitué par le choix des méthodes de mesure de mobilité et d'interactions. Le choix s'est porté sur les techniques de fluorescence, en particulier la microscopie confocale de fluorescence. En effet, la fluorescence est un processus de luminescence très sensible et différentes méthodes étaient déjà disponibles dans la littérature pour étudier la mobilité (technique de FRAP) et les interactions (FRAP et FRET). Cependant, ces techniques n'avaient pas été appliquées aux assemblages lignocellulosiques modèles ou natifs, car peu d'équipes de recherche maîtrisent la préparation, la caractérisation et la manipulation de polymères lignocellulosiques partiellement solubles et l'autofluorescence naturelle des assemblages natifs est une forte contrainte pour des mesures de fluorescence de sondes *in situ*.

## — Résultats majeurs

Grâce à l'utilisation de systèmes modèles de substrats lignocellulosiques, il est possible de mesurer la progression et les interactions d'enzymes dans des systèmes représentatifs de l'architecture des parois végétales et de déterminer finement les motifs structuraux impliqués dans les interactions non-spécifiques.

De la même manière, une nouvelle technique de fluorescence multi-modale permet de se servir de l'autofluorescence naturelle de la lignocellulose pour évaluer des interactions avec des sondes fluorescentes.



Description schématique des facteurs limitant la progression des enzymes dans des substrats lignocellulosiques. Crédit : Gabriel PAËS.

Enfin, la quantification de la déconstruction de la lignocellulose à l'échelle nanométrique est possible et démontre le rôle de la lignine même à faible concentration.

## — Production scientifique et valorisation

- Fong M, Berrin JG and Paës G (2016) Investigation of the binding properties of a multi-modular GH45 cellulase using bioinspired model assemblies. *Biotechnology for Biofuels* 9, 12. <http://dx.doi.org/10.1186/s13068-016-0428-y>
- Paës G. Bioinspired assemblies of plant cell walls for measuring protein-carbohydrate interactions by FRAP. In *Methods in Molecular Biology - Protein-Carbohydrate Interactions: Methods and Protocols*. Volume 1588. Edited by Abbott DW, Lammerts van Bueren A. New York (USA): Springer; 2017: 169-179. [http://doi.org/10.1007/978-1-4939-6899-2\\_13](http://doi.org/10.1007/978-1-4939-6899-2_13)
- Paës G, Habrant A and Terryn C (2018) Fluorescent nano-probes to image plant cell walls by super-resolution STED microscopy. *Plants* 7, 11. <http://dx.doi.org/10.3390/plants7010011>
- Terryn C, Paës G and Spriet C (2018) FRET-SLiM on native autofluorescence: a fast and reliable method to study interactions between fluorescent probes and lignin in plant cell wall. *Plant Methods* 14, 74. <http://doi.org/10.1186/s13007-018-0342-3>
- Herbaut M, Zoghalmi A and Paës G. Dynamical assessment of fluorescent probes mobility in poplar cell walls reveals nanopores govern saccharification. *Biotechnology for Biofuels* 2018, 11, 271. <http://doi.org/10.1186/s13068-018-1267-9>
- Lambert E, Aguié-Béghin V, Dessaint D, Foulon L, Chabbert B and Paës G, Molinari M. Real time and quantitative imaging of bioinspired films hydrolysis by atomic force microscopy reveals lignin recalcitrance at nanoscale. *Biomacromolecules* 2019; 20:515-527. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.8b01539>
- Terryn C and Paës G. Fluorescence Lifetime Imaging of Plant Cell Walls. In *Plant Cell Morphogenesis: Methods and Protocols*. Edited by Cvrčková F, Žárský V. New York, NY: Springer New York; 2019: 77-82. [https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9469-4\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-9469-4_5)

## Le projet LIGNOPROG

**Partenaire :** UMR 614 Fractionnement des Agroressources et Environnement (INRA).

## COORDINATEUR

**Gabriel Paës :** [gabriel.paes@inra.fr](mailto:gabriel.paes@inra.fr)



## MACACC

# Modélisation pour l'accompagnement des Acteurs, vers l'Adaptation des Couverts pérennes ou agroforestiers aux Changements globaux

## — Rappel des objectifs

- Esquisse de la base de référence des Acteurs en fonction de leurs scénarios d'adaptation aux changements globaux.
- Estimation de la volonté et de la capacité des Acteurs à adapter les systèmes de culture au changement global, en fonction des incitations.
- Évaluation de la « résilience écologique » des scénarios d'adaptation aux changements climatiques.
- Élaboration des profils de « résilience globale » par scénario et validation avec les Acteurs.

## — Résultats majeurs

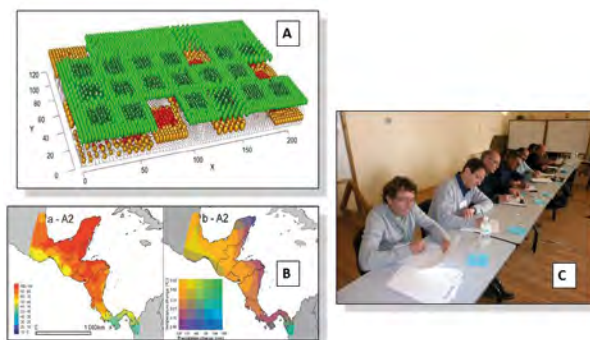
► **Pin maritime (Les Landes-France)** : après concertation avec le panel de forestiers, nous avons retenu les scénarios de gestion les mieux documentés en termes de données disponibles croisant les niveaux de préparation du sol, de régime d'éclaircies et de durée de rotation ainsi que les compartiments récoltés, selon 3 classes de sol. Il est apparu de la comparaison des résultats que la gestion « standard » pourrait être parmi les plus résilientes au climat, avec une bonne efficacité d'utilisation de l'eau et des minéraux majeurs et sous condition de ne pas exporter les aiguilles et les branches.

Les résultats de l'expérience de choix réalisée auprès d'un échantillon de 60 propriétaires forestiers volontaires suggèrent que les forestiers tendent à favoriser les options de gestion dont les rendements espérés sont les plus élevés et les risques d'incendie associés les plus faibles.

► **Café agroforestier (Costa Rica)** : nous avons étudié deux sites contrastés (Aquiaries, limite basse de la zone de production et Tarrazu, en altitude) en fonction de scénarios de gestion de plein soleil, ou sous ombrage d'érythrinées taillée (arbre de service) ou encore sous ombrage de *Cordia alliodora* (bois d'œuvre), avec deux variétés de café (Caturra ou hybrides F1). Les simulations biophysiques ont indiqué que le rendement de café de faible altitude serait fortement impacté aux horizons 2050 et 2100, contre un impact en 2100 seulement pour les hautes altitudes. L'effet fertilisant du CO<sub>2</sub> permettrait de compenser en partie l'impact négatif des températures élevées sur la production primaire nette. Un ombrage adéquat permettrait d'atténuer significativement les températures, de l'ordre de -1.7°C sur les T<sub>max</sub>, mais cela ne suffirait pas à compenser durablement l'impact des températures sur le rendement.

Les préférences des producteurs pour divers scénarios d'adaptation au changement climatique ont été estimées à partir d'un échantillon de 200 producteurs de café dans la région de Tarrazu. Les résultats de l'analyse suggèrent que les stratégies d'adaptation préférées par les producteurs de l'échantillon sont celles qui consistent à doubler la densité de l'ombrage d'érythrinées. En revanche, les producteurs tendent à rejeter les stratégies basées sur la solution Cordia, celle-ci présentant comme inconvénient majeur la prévalence de l'American Leaf Spot du caféier (maladie foliaire fréquente en altitude et sous ombrage).

► **Eucalyptus (Brésil)** : les scénarios d'adaptation proposés combinent des changements de densité (3x2 m ou 4x3 m), des types de matériel génétique (*E. grandis* ou une variété tolérante à la sécheresse), des degrés de fertilisation (90/75/150 ou 30/25/50 NPK) et/ou des durées de rotation (6 ou 4 ans). L'un des résultats les plus intéressants mesuré sur les expérimentations concerne le bilan hydrique des plantations, qui s'est avéré très variable entre les années de croissance du peuplement et selon les saisons, avec une très forte évapotranspiration. L'image



A) Exemple de scène multi-espèce esquissée dans le modèle MAESPA 3D à l'échelle de la parcelle : *Acacia mangium* (orange) croissant sous *Eucalyptus* (vert). B) Exemple de changements climatiques au niveau régional : changements de précipitations et de températures en Mésomérique pour 2070-99 par rapport à la période de référence 1950-2000. C) Exemple de groupe de discussion élaborant des scénarios d'adaptation *a priori* pour MACACC.

globale montre l'importance de l'enracinement profond pour accéder à une réserve d'eau disponible durant la saison sèche.

Les préférences des producteurs pour divers scénarios d'adaptation au changement climatique ont été estimées à partir d'un échantillon de 80 producteurs d'eucalyptus dans le bassin du Rio Dolce dans l'état du Minas Gerais. Les résultats de l'analyse réalisée à partir des données d'enquête montrent que les producteurs de l'échantillon valorisent positivement la stratégie d'adaptation basée sur une réduction de la rotation et négativement la stratégie basée sur une réduction de la densité de la plantation.

## — Production scientifique et valorisation

Environ 35 publications de rang A, 34 communications à conférences, 1 chapitre de livre, 41 actions de dissémination et trois bases de données originales collectées auprès de plus de 300 producteurs. Les modèles biophysiques (GO+) développés dans MACACC pour le pin maritime et d'autres espèces françaises de plantation sont mobilisés par le Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation et des Forêts dans un projet opérationnel national, *Forêts-21* (2018-2020) qui débouchera sur la mise à disposition de simulations 2000-2100 pour l'ensemble de la forêt française métropolitaine. Le code GO+ (Python) est publié et déposé à l'APP.

### Le projet MACACC

**Partenaires** : UMR Eco & Sol (Cirad), UPR1263 Ephyse (INRA), UMR 5474 LAMETA (CNRS), UMR 1391 ISPA (INRA), UMR SYSTEM (CIRAD-Montpellier Sup agro-INRA-CIHEAM-IAMM) UMR MOISA (CIRAD-INRA), UMR 1220 TCEM (INRA), UPR 106 Bioagresseurs (Cirad), Centre Régional de la Propriété Forestière, Hawkesbury-Institute for the Environment (Australie), Macquarie University (Australie), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (Costa Rica), Cooperative Program for the Technological Development and Modernization of Coffee (Costa Rica), Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais (Brésil).

### COORDINATEUR

**Olivier Rounsard** : [olivier.rousard@cirad.fr](mailto:olivier.rousard@cirad.fr)

MECA**bio**for

# Mécanisation et optimisation des techniques de production et d'exploitation de biomasse forestière issue de cultures dédiées ou semi-dédiées

## — Une mécanisation plus efficace des cultures ligneuses dédiées pour une biomasse plus attractive

Le développement des cultures forestières dédiées à la biomasse (Taillis à Courte Rotation TCR, Taillis à très Courte Rotation TTCR, et plantation semi-dédiée) est conditionné par l'amélioration de la mécanisation des opérations de plantation, d'entretien et de récolte. Diminuer leurs coûts, tout en facilitant les travaux, est un véritable challenge.

### ► Objectif 1 : Industrialiser les techniques de plantation, d'entretien et de récolte des cultures de biomasse.

La récolte de biomasse, sur des rotations généralement inférieures à 10 ans, est un enjeu stratégique pour faire face à une demande croissante en biomasse d'origine ligno-cellulosique à des fins énergétiques (bioénergie) ou industrielles (bio-produits pour la chimie verte). Les cultures dédiées d'espèces forestières pourront contribuer à l'apport de cette matière première. Cependant, le recours à des méthodes « artisanales » de production, essentiellement manuelles, n'est plus possible économiquement.

Aussi, il faut rationaliser la mécanisation des opérations liées à ces cultures afin de diminuer leurs coûts tout en facilitant les travaux par une main d'œuvre, par ailleurs, en pénurie. Les choix des matériels et des techniques culturales sont orientés pour intégrer également la dimension environnementale.

Les réalisations obtenues dans le cadre de ce projet ont une portée internationale.

### ► Objectif 2 : Innover pour être performant en conditions forestières.

La définition des besoins, exprimés par les praticiens de terrain et l'évaluation des matériels existants réalisée par les partenaires, ont permis de définir les cahiers des charges fonctionnels des équipements à développer. L'objectif est d'être performant en conditions forestières, qui sont très différentes du milieu agricole traditionnel : terrain irrégulier, en pente, présence de souches et de débris ligneux, récolte de bois durs sollicitant énormément les matériels de coupe...

Sur ces bases, des avant-projets d'ensemble détaillés ont été élaborés en recherchant les innovations technologiques adéquates, associant les chercheurs, les coopératives forestières, les partenaires industriels et le constructeur Vignieu Matériels Forestiers.

Ils ont donné lieu à des développements d'outils, testés en conditions réelles et améliorés pour aboutir à des équipements commercialisables et à la réalisation de prototypes. Les essais sur chantier ont permis de recueillir les informations nécessaires à la réalisation des bilans économiques et environnementaux.

## — Résultats majeurs

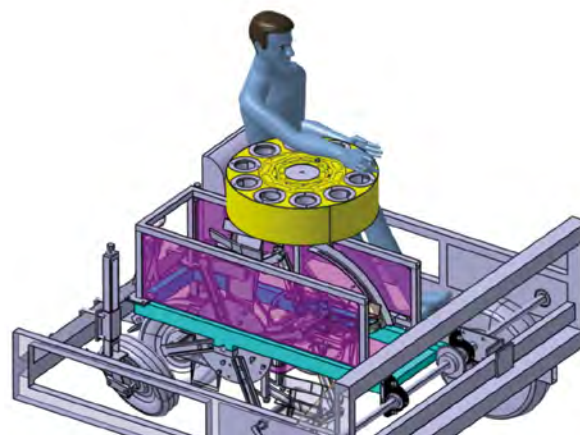
MECA**bio**for a permis de réaliser pour les opérations de :

#### ► Plantation :

- une canne à planter plus ergonomique ;
- un kit de modifications pour adapter une planteuse horticole en planteuse pour plants forestiers ;
- un prototype d'une planteuse forestière de grande capacité.

#### ► Entretien :

- un prototype d'outil mécanique travaillant au plus près du rang avec un système de guidage par GPS.



Planteuse moyenne capacité avec barillet d'alimentation et bec planteur pour plants en mottes ou racines nues. Crédit image : Irstea.

#### ► Récolte :

- un sècheur plus performant ;
- un prototype de tête à disques ;
- un prototype de capteur de longueur pour sècheur.

L'ensemble des améliorations devrait permettre de diminuer le coût de revient de la plaquette de 8 à 20 % selon les cultures (hors TTCR), sans dégradation du bilan GES global.

Actuellement, le frein au développement des cultures dédiées et semi-dédiées n'est pas lié à la mécanisation (pour laquelle MECA**bio**for apporte des réponses) mais au recul de la politique forestière et des aides existantes, à la baisse des reboisements et aux évolutions sociétales. Conscients de ces éléments, les machines ou accessoires ont été conçus pour pouvoir travailler également dans les peuplements forestiers traditionnels. Ainsi, les perspectives de développement industriel, en France et à l'étranger, sont réelles pour la plupart des équipements conçus.

## — Production scientifique et valorisation

Deux publications ont été produites pour des conférences internationales : le capteur de longueur (RHEA, Madrid 2014) et les analyses de cycle de vie des cultures dédiées (FEC, Gérardmer, 2014). Les résultats sur les sècheurs ont été présentés sur le terrain lors de cette dernière conférence. Une enveloppe SOLEAU a été déposée par le constructeur VIGNEAU.

### Le projet MECA**bio**for

**Partenaires :** Fibre Excellence R&D Kraft, Irstea, SARL Vignieu Matériels Forestiers, Smurfit Kappa Comptoir du Pin, Institut technologique (FCBA), Union de la Coopération Forestière Française.

#### COORDINATEUR

**Philippe Ruch :** philippe.ruch@fcba.fr

## MeCC

# Mécanismes de l'adaptation au Changement Climatique: comment plasticité phénotypique, micro-évolution et migration affecteront-elles la phénologie des arbres forestiers ?

## — Rappel des objectifs

Un changement rapide du climat est en train de se produire et affecte d'ores et déjà les populations, les écosystèmes et leurs services. Il est donc nécessaire de prévoir l'adaptation des populations naturelles à ce changement. La migration peut permettre aux espèces de traquer les conditions climatiques favorables. La plasticité phénotypique peut permettre aux individus d'ajuster dans une certaine mesure leurs performances aux nouvelles conditions climatiques. La sélection naturelle peut permettre aux populations de s'y adapter génétiquement sur le long terme. Néanmoins, les projections des impacts du changement climatique sur la biodiversité incorporent très rarement ne serait-ce qu'un de ces mécanismes d'adaptation.

Notre objectif était d'étudier l'interaction entre ces trois mécanismes pour prévoir l'adaptation des arbres forestiers au changement climatique. Nous avons (1) évalué la valeur adaptative de la plasticité phénotypique dans les climats actuels et futurs, (2) cherché à comprendre comment l'évolution génétique, en interaction avec la plasticité et les échanges génétiques, façonnait les différences entre populations au sein d'une espèce, (3) utilisé notre compréhension accrue de ces variations afin de mieux prédire la distribution future des espèces.

## — Résultats majeurs

Nous nous sommes intéressés à un trait clé de l'adaptation des arbres à leur environnement, la date de débourrement des bourgeons, chez le hêtre, le chêne et le sapin, trois essences forestières d'intérêt majeur en France. Nous avons cherché à incorporer différents mécanismes d'adaptation dans les prévisions des impacts du changement climatique sur ces trois espèces. Nous avons combiné des modèles théoriques, des modèles de fonctionnement de l'arbre et des observations de terrain pour prévoir leurs capacités d'adaptation au changement climatique dans un futur proche. Ces modèles ont été confrontés aux données récoltées sur la date de débourrement et son déterminisme génétique le long de différents gradients d'altitude dans les Pyrénées et sur le mont Ventoux où les espèces sont suivies depuis plusieurs années.

Nous avons montré que la date optimale de débourrement augmentait avec l'altitude chez les trois espèces. La plasticité phénotypique permet d'atteindre cet optimum chez le sapin, mais pas chez le hêtre et le chêne, où nous prédisons et observons *in natura* une sélection pour une date plus précoce. Cette sélection pourrait s'intensifier ou se relâcher dans le futur selon les régions considérées. Nos modèles révèlent d'autres sources d'incertitude : les réponses évolutives futures pourraient être ralenties par le lent cycle de vie des arbres ; ou accélérées par les croisements préférentiels entre individus précoces, ainsi que par la dispersion à longue distance du pollen.

## — Production scientifique et valorisation

17 articles ont été publiés dans des revues généralistes d'écologie, évolution et sciences forestières de très bon impact ; une dizaine de manuscrits supplémentaires sont en cours de rédaction ou en révision ; les résultats ont également été communiqués à travers plus d'une vingtaine de séminaires internationaux, en grande majorité invités. Les productions du projet incluent également un programme de simulation du climat, et le développement d'une plate-forme de modélisation fortement utilisée en sciences forestières avec l'addition d'un modèle de gestion adaptative et d'une librairie de modélisation de la phénologie.

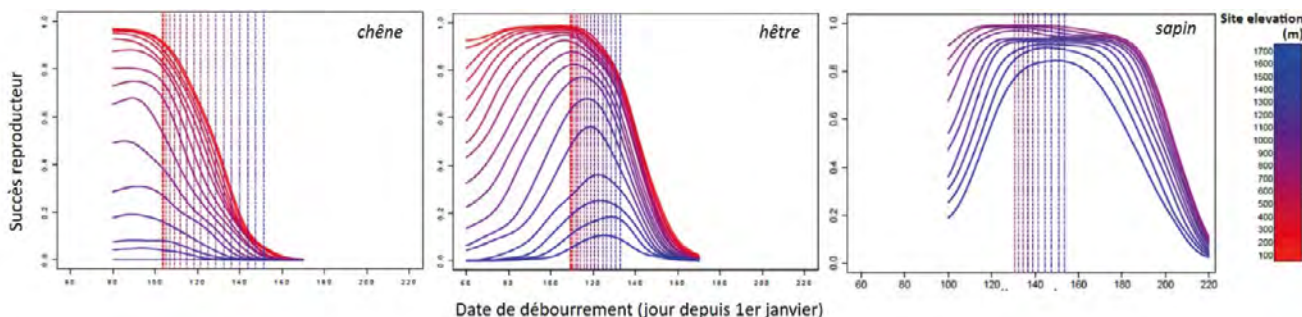
### Le projet MeCC

**Partenaires :** Institut des sciences de l'Evolution de Montpellier (ISEM), UMR 5175 CEFE (CNRS), UPR 629 URFM (INRA), UPR 546 BioSp (INRA), UMR 1202 BioGeCo (INRA), UMR 5554 ISEM (CNRS).

### COORDINATRICE

**Ophélie Ronce :** ophelie.ronce@umontpellier.fr

Prédiction des relations entre date de débourrement et succès reproducteur chez le hêtre (*Fagus sylvatica*), le chêne (*Quercus petraea*) et le sapin (*Abies alba*) dans la vallée des Gaves par le modèle PHENOFIT (Gauzère *et al.* in prep). Chaque courbe représente le succès de reproduction moyen d'une population à une altitude donnée en fonction de sa date de débourrement moyenne. Chaque trait pointillé vertical représente la date de débourrement moyenne de la population prédite selon sa réponse actuelle à la température. Le succès de reproduction diminue avec l'altitude chez les trois espèces, et il existe une date optimale de débourrement qui maximise ce succès, qui tend à être plus tardive à haute altitude. Le succès de reproduction du sapin, espèce à feuillage persistant, apparaît beaucoup moins contraint par la date de débourrement que le chêne et le hêtre.





# MicroWall

## Les assemblages moléculaires de microdomaines pariétaux contrôlent la dynamique des parois végétales

### — Rappel des objectifs

La diversité et la dynamique des parois végétales (ex: polysaccharides, protéines) montrent des spécificités spatiotemporelles multi-échelles (ex: évolution, développement, cellulaire, subcellulaire) qui impactent leur valorisation. L'influence de cette hétérogénéité pariétale peut être positive (fibres de coton et leurs propriétés mécaniques liées à leur forte teneur en cellulose). Inversement, cette hétérogénéité peut influencer négativement la valorisation (production de biocarburants ou pâte à papier nécessitent une matière première la plus homogène possible). L'hétérogénéité pariétale est méconnue à l'échelle subcellulaire et résulte de l'assemblage de multiples microdomaines spécifiquement révélés par (immuno)marquages. De plus, les interactions moléculaires gouvernant la spécificité et le rôle de ces microdomaines restent obscures. « MicroWall » a pour but de caractériser les interactions moléculaires dans des microdomaines pariétaux et d'attribuer une fonction biologique à ces assemblages moléculaires complexes. Les molécules d'intérêt considérées sont un polysaccharide de composition et de structure variables et des protéines codées par 3 familles multigéniques : (i) les peroxydases de classe III (PRX), (ii) les pectines méthylesterases (PME) et (iii) les inhibiteurs de PME (PMEI) qui contrôlent le degré de méthylation des pectines. L'hypothèse de travail est que des patrons spécifiques de méthylation de pectines forment un polysaccharide hautement variable pouvant permettre des combinaisons d'ancrage spécifique de PRXs dans des microdomaines pariétaux particuliers. Ces localisations polarisées de PRX contribueraient à la dynamique pariétale par relâchement ou renforcement localisé. MicroWall a pour but : (i) d'établir la preuve de concept en caractérisant un microdomaine d'assemblage moléculaire impliqué dans le développement de la graine d'Arabidopsis, pour lequel nous avons des données préliminaires convaincantes, et (ii) d'amener des preuves que cet exemple fait partie d'un concept plus universel. Le premier but de ce projet, sera abordé par l'étude pluridisciplinaire d'un microdomaine d'homogalacturonane (HG) dont le degré de méthylation est contrôlé durant le développement des cellules sécrétrices du mucilage des graines d'Arabidopsis par une PME à identifier qui est régulée par PME16. Notre hypothèse est que ce microdomaine pectique permettrait l'accrochage spécifique de PRX36 durant le développement de la graine. Ce positionnement de PRX36 permettrait successivement (i) le relâchement polarisé de ce microdomaine lors du développement cellulaire, (ii) la rupture polarisée de cette zone fragilisée, lors de l'imbibition de la graine sèche, et (iii) le relargage du mucilage favorisant la germination. Nous transposerons ce modèle PME16/HG/PRX36 au développement de la graine de lin, en recherchant d'autres microdomaines impliquant d'autres combinaisons de pectines, et de PRX, PME, PMEI co-exprimées lors du développement des cellules sécrétrices du mucilage chez Arabidopsis. L'objectif est de démontrer que des membres individuels d'une famille multigénique donnée, co-exprimés dans une même cellule, possèdent des fonctions non redondantes grâce à leur positionnement dans des microdomaines spécifiques. Au-delà de ces exemples centrés sur la dynamique pariétale des cellules sécrétrices du mucilage des graines, et puisque les acteurs moléculaires de ces assemblages sont universels chez les plantes, les connaissances fondamentales acquises lors de ce projet proposant des fonctions putatives pour des centaines de composants protéiques et polysaccharidiques pariétaux, seront cruciales pour la valorisation pariétale dans de nombreux autres contextes.



La couverture de l'issue de *Developmental Cell* associée à cet article illustre la surface d'une graine d'Arabidopsis observée en microscopie électronique à balayage. Trois domaines pariétaux différents sont présentés en fausses couleurs. Le premier échafaudage moléculaire étudié est positionné dans le domaine bleu permettant le relâchement de ce domaine par l'enzyme de remodelage lors du développement de la graine. Lors de l'imbibition de la graine mature, le contact de l'eau déclenche la rupture du domaine bleu (paroi primaire périlinéale) pré-fragilisé en amont lors du développement, conduisant à la libération du domaine rose (mucilage), lui-même préalablement comprimé par le domaine vert (columelle). Le domaine rose entoure alors la graine créant un hydrogel favorable pour sa germination.

### — Résultats majeurs

- Communication sur le site INSB-CNRS : [www.insb.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/des-codes-barres-pectiques-dans-le-remodelage-des-parois-des-cellules-vegetales](http://www.insb.cnrs.fr/fr/cnrsinfo/des-codes-barres-pectiques-dans-le-remodelage-des-parois-des-cellules-vegetales)
- Communication sur le site de l'université Toulouse 3 : [www.univ-tlse3.fr/la-recherche/des-codes-barres-pectiques-dans-le-remodelage-des-parois-des-cellules-vegetales-760867.kjsp](http://www.univ-tlse3.fr/la-recherche/des-codes-barres-pectiques-dans-le-remodelage-des-parois-des-cellules-vegetales-760867.kjsp)

### — Production scientifique et valorisation

Francoz E\*, Ranocha P\*, Le Ru A, Martinez Y, Fourquaux I, Jauneau A, Dunand C, Burlat V (2019)

Pectin demethylesterification generates platforms that anchor peroxidases to remodel plant cell wall domains. *Developmental Cell* 48: 261-276.

#### Le projet MicroWall

**Partenaires :** UMR 5546 Laboratoire de recherche en sciences Végétales (Université Toulouse 3), EA 3900 Biologie des Plantes et innovations (Université de Picardie), UR 1268 Biopolymères, Interactions Assemblages (INRA).

#### COORDINATEUR

**Vincent Burlat :** [burlat@lrsv.ups-tlse.fr](mailto:burlat@lrsv.ups-tlse.fr)

## MOQAPRO

## Méthodes et Outils pour le suivi quantitatif et qualitatif de la production de plaquettes forestières dans une chaîne d'approvisionnement

## — Rappel des objectifs

Le projet MOQAPRO a visé à développer une approche intégrée à grande échelle, depuis la parcelle jusqu'à l'usine de transformation, du suivi qualitatif et quantitatif de la production de plaquettes forestières grâce au développement ad-hoc de méthodes et de nouveaux outils de mesure, de gestion et de suivi du produit.

Le suivi qualitatif s'appuie en priorité sur le suivi de l'humidité de la plaquette forestière à différentes étapes de la production. Le suivi quantitatif est défini par le suivi du volume apparent et de la masse de la production. Le suivi des flux de matière sèche repose sur le suivi de l'humidité et de la masse. Dans le projet MOQAPRO, l'IDSET est principalement intervenu pour la mesure de l'humidité des plaquettes forestières.

Deux outils de mesure de l'humidité ont été développés. Le premier outil expérimental étudié est utilisable sur flux dynamique lors de l'éjection des plaquettes forestières de la tuyère des broyeurs. Le deuxième outil expérimental étudié est utilisable pour des volumes importants de biomasse stockée en milieu confiné (plusieurs mètres-cube).

## — Résultats majeurs

Le dispositif de mesure sur flux proposé dans le cadre du projet OMICAGE et développé dans le cadre du projet MOQAPRO a permis de mettre en évidence le caractère complexe de la mesure, notamment de la quantité de matière passant dans la tuyère du broyeur. De nombreux algorithmes d'apprentissage statistique ont montré une fiabilité limitée du dispositif dans des conditions de laboratoire. Parallèlement, il est apparu que dans la chaîne de production, une mesure de l'humidité des plaquettes forestières au moment du broyage n'apportait pas d'informations complémentaires par rapport à une mesure de l'humidité des plaquettes forestières en milieu confiné. En effet, les plaquettes forestières produites sont stockées dans des camions ou sur place et donc une mesure sur les plaquettes déjà produites est tout aussi informative.

Ainsi le travail s'est concentré sur un dispositif de mesure à grande échelle. Celui-ci est basé sur des antennes micro-ondes enfouies dans les plaquettes forestières stockées ou en cours de production. Comme la fréquence caractéristique des antennes dépend de leur environnement et que l'humidité est un paramètre prépondérant en électromagnétisme, il s'est avéré que la fréquence de résonance des antennes dépendait directement de la teneur en eau des plaquettes forestières disposées autour de l'antenne dans un volume typique de l'ordre du mètre-cube. Le dispositif a été étudié et dimensionné en laboratoire. Il fonctionne à une fréquence de l'ordre de 200 MHz. Il a été adapté spécifiquement pour faire des mesures sur des échantillons de 90 m³ de plaquettes forestières sur une plateforme de stockage et dans une benne de camion. Une première adaptation concerne son installation dans une benne de camion afin qu'il puisse résister à son chargement et à son déchargement. Les modifications apportées ont été multiples, d'une part les antennes demi-ondes ont été rendues souples afin qu'elles soient entraînées le moins possible lors du déchargement des plaquettes. Ensuite les antennes ont été installées sur des *guirlandes* suspendues dans la benne du camion pour faciliter l'installation du dispositif dans toute sorte de bennes en quelques instants sans nécessiter de matériel spécifique.



a) Tas statique de plaquettes forestières instrumenté. b) Benne de camion équipée de 12 antennes prototypes. c) Remplissage de la benne du camion pour une mesure.

Les tests réalisés en gradeur nature ont permis de valider la procédure de mesure qui peut être faite à chacun instant, du moment de la production jusqu'au moment de la livraison. La précision est de l'ordre de 3 à 4 % RH, il faut donc disposer de 20 points de mesure pour descendre sous le pourcent de précision.

## — Production scientifique et valorisation

- Daassi-Gnaba, H., Oussar, Y., Merlan, M., Ditchi, T., Géron, E., Holé, S., Moisture content recognition for wood chips in pile using supervised classification, *Wood Science and Technology*, Volume 52, 2018, Pages 1195-1211.
- Daassi-Gnaba, H., Oussar, Y., Merlan, M., Ditchi, T., Géron, E., Holé, S., Wood moisture content prediction using feature selection techniques and a kernel method, *Neurocomputing*, Volume 237, 2017, Pages 79-91.
- Merlan, M., Ditchi, T., Oussar, Y., Holé, S., Géron, E., Lucas, J., Resonant half-wave antenna for moisture content assessment in wood chips, *Measurement Science and Technology* (ACCEPTED MANUSCRIPT) 2019.

## Le projet MOQAPRO

**Partenaires :** Union de la Coopération Forestière Française, Office National des Forêts, Institut pour le Développement de la Science, l'Éducation et la Technologie, Institut Technologique Forêt Cellulose Bois-construction Ameublement (FCBA).

## COORDINATRICE

**Caroline Vivancos :** caroline.vivancos@ucff.asso.fr

## MULTIFOREVER

## Towards intensification of conifer production through multi-varietal forestry based on somatic embryogenesis

## — Rappel des objectifs

La sylviculture multi-variétale permet de produire des variétés améliorées en s'appuyant sur la multiplication végétative. Dans le contexte du changement climatique et de la bioéconomie, c'est une stratégie complémentaire à la reproduction sexuée (multiplication par les graines) pour intensifier la production en plantation forestière. Il n'est plus nécessaire d'attendre la maturité sexuelle pour produire les variétés. Les gains génétiques par unité de temps sont donc plus élevés. Par ailleurs, la multiplication végétative offre une plus grande souplesse pour renouveler l'offre variétale selon les contraintes environnementales et les attentes socio-économiques.

Ce sont surtout des conifères qui sont cultivés dans les plantations. Les variétés sont exclusivement produites en vergers à graines car ces essences restent difficiles à multiplier par simple bouturage. Le développement de l'embryogenèse somatique, une technologie prometteuse de multiplication végétative des graines, offre des perspectives inédites pour la sylviculture multi-variétale chez les conifères. Équivalente techniquement au microbouturage de l'embryon qui se trouve dans chaque graine, elle présente toutes les caractéristiques d'un procédé industrialisable pour la production de plants.

Ce projet s'appuie sur les avancées majeures de 7 équipes expertes en embryogenèse somatique des conifères d'intérêt dans 5 pays européens et en Argentine (pins, épicéa, mélèze, Douglas). Son ambition est de contribuer au développement d'une chaîne de valeur pour produire à coût maîtrisé des plants somatiques destinés à la mise en œuvre de la sylviculture multi-variétale. Un premier défi stratégique est d'initier l'embryogenèse somatique à partir d'arbres sélectionnés (WP1). Une telle possibilité, récemment démontrée par certains partenaires, constituerait une innovation de rupture pour la diffusion variétale. Actuellement, c'est l'embryogenèse somatique à partir de graines couplée à la cryoconservation qui est la méthode la plus avancée. MULTIFOREVER vise à simplifier le procédé et à optimiser le rendement aux différentes étapes pour réduire les coûts de production (WP2). Un réseau d'essais est envisagé par 5 partenaires pour démontrer la faisabilité de la sylviculture multi-variétale et notamment l'intérêt des mélanges variétaux (WP3). Des développements préparatoires à la mise à l'échelle industrielle seront complétés par l'établissement d'un concept d'unité pilote de production commerciale de plants somatiques (WP4).

Le projet prévoit également un important volet d'information du grand public et de sensibilisation des professionnels aux performances environnementale et socio-économique de cette technologie innovante (WP5).

## — Résultats majeurs

La réunion de lancement a eu lieu à Berlin du 3 au 5 juillet 2019.

## — Production scientifique et valorisation

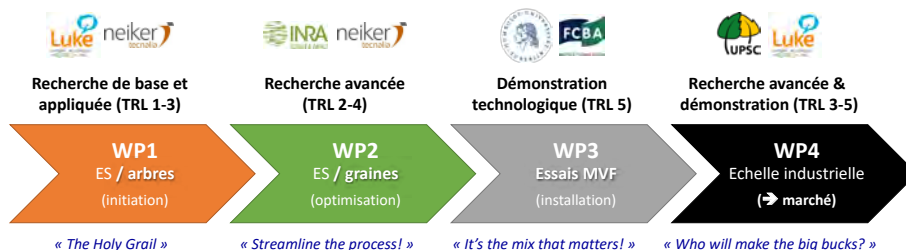
- Présentation lors du séminaire public de lancement ForestValue les 23-24 mai 2019 à Helsinki, Finlande.
- Trontin JF, Rupps A. « Pitch Talk » disponible sur le site ForestValue : <https://forestvalue.org/seminar-2019/>.
- Trontin JF, Rupps A, Raschke J, Lelu-Walter MA, Teyssier C, Gauchat ME, Vera Bravo C, Aronen T, Varis S, Tikkinen M, Montcalán P, Montalbán I, Egertsdotter U, Dobrowolska I, Street N. Poster + exposition.
- Voir également la Newsletter #3 de juin 2019 : [https://forestvalue.org/wp-content/uploads/2019/06/2019-06\\_newsletter3\\_final.pdf](https://forestvalue.org/wp-content/uploads/2019/06/2019-06_newsletter3_final.pdf)

## Le projet MULTIFOREVER

**Partenaires :** Institut Technologique (FCBA), Humboldt-Universität zu Berlin (Allemagne), INRA, National Institute of Agricultural Technology (Argentine), Natural Resources Institute Finland (Finlande), Basque Institute for Agricultural Research & Development (Espagne), Umeå Plant Science Centre (UPSC) (Suède). Projet soutenu par Alliance Forêts Bois et Pépinières Naudet (France), Sachsenforst, Baumschulen Oberdorla (Allemagne), BaskEgur (Espagne), Finlande (Finnish Forest Industries) et Argentine (AFOA, PINDO).

## COORDINATEUR

Jean-François Trontin : [jean-francois.trontin@fcba.fr](mailto:jean-francois.trontin@fcba.fr)



Les 4 défis technologiques (et Work Packages associés) pour produire à coût maîtrisé des plants somatiques destinés à la mise en œuvre de la sylviculture multi-variétale (MVF) basée sur l'embryogenèse somatique (ES) chez les conifères. Crédit : MULTIFOREVER. Crédit photos (de gauche à droite) : HUB, INTA, NEIKER, INRA, FCBA, LUKE, UPSC.



Initiation  
Multiplication



Cryoconservation  
Maturation



Germination  
Acclimatation



Essais au champ  
Démonstration MVF



Bioréacteurs  
Automatisation  
Coût maîtrisé



# NanoSoilC

## Interactions organo-minérales : mécanismes à nano-échelle pour le stockage du carbone dans les sols

### — Rappel des objectifs

Les stratégies agro-écologiques mises en oeuvre pour restaurer le fonctionnement naturel des sols visent principalement à améliorer le réservoir de matière organique des sols (initiative « 4 pour 1 000 », COP 21 et IPPC 2019) en augmentant les flux d'entrée. Nous proposons d'explorer une alternative qui viserait à augmenter le temps de résidence de la matière organique dans les sols.

NanoSoilC vise à mieux comprendre les mécanismes qui contrôlent la stabilisation des matières organiques dans les sols. Nous nous intéressons aux interactions organo-minérales aux échelles nanométriques (nanoCLICs pour « Nanosized Coprecipitates of inorganic oLligomers with organiCs »). Les différents mécanismes sont abordés par des approches complémentaires structurées autour de 4 objectifs :

- WP1 : décrire la structure locale des nanoCLICs et comprendre les mécanismes physico-chimiques de leur formation et les facteurs contrôlant leur déstabilisation ;
- WP2 : simuler le comportement des nanoCLICs dans les sols en intégrant les nanoCLICs dans les modèles de dynamique MO de la nano à la macro-échelle ;
- WP3 : quantifier le stock et la dynamique des MO des nanoCLICs au cours des transitions entre sol de forêt et sol cultivé ;
- WP4 : tester le potentiel de remédiation de sols appauvris en C par formation de nanoCLICs.

### — Résultats majeurs

Un modèle de structure d'associations organo-minérales à nano-échelle est proposé (« nanoCLICs »). Ce modèle moléculaire dépasse le concept classique d'adsorption des molécules organiques sur des surfaces minérales. Dans les sols à pH légèrement acide (pH~5), nous suggérons que les composés organiques coprécipitent avec principalement le fer, l'aluminium et le silicium en un réseau 3D irrégulier. Dans cette structure, de petits oligomères de Fe (25 à 75 %), de Si (15 à 50 %) et d'Al (10 à 35 %), forment un squelette minéral amorphe à structure ouverte. Les composés organiques y sont liés soit par des liaisons avec le Fe et l'Al ou par

des liaisons avec d'autres composés organiques. L'observation directe (MET-EDX et MET-EELS) des nanoCLICs de synthèse et des nanoCLICs naturels extraits d'andosols semble confirmer à l'échelle nanométrique le modèle structural proposé.

### — Production scientifique et valorisation

- Tamrat Wuhib Zewde, Jérôme Rose, Olivier Grauby, Emmanuel Doelsch, Clément Levard, Perrine Chaurand, Isabelle Basile-Doelsch, Soil organo-mineral associations formed by co-precipitation of Fe, Si and Al in presence of organic ligands. GCA 260, 15–28, 2019.
- Tamrat Wuhib Zewde, Jérôme Rose, Olivier Grauby, Emmanuel Doelsch, Perrine Chaurand, Clément Levard, Isabelle Basile-Doelsch, Chemical composition and molecular scale structure of nanominerals formed by precipitation of biotite weathering products, GCA, 229, 53–64, 2018.
- Basile-Doelsch I, Organomineral interactions: Zoom at nanoscale using EXAFS and MET-EELS, Soil Organic Matter in a stressed world, 7th International Symposium on Soil Organic Matter, SOM2019, Adelaide, Australia, 6-11 octobre 2019. (Key-note talk, plenary Session)
- Nithavong CAM, Clément LEVARD, Jérôme ROSE, Emmanuel DOELSCH, Bertrand DEVOUARD, Isabelle BASILE-DOELSCH., Soil organo-mineral associations fine structure : nanoscale MET-EELS imaging of Fe Si Al-organic matter coprecipitates, EGU General Assembly, April 2019. (talk)

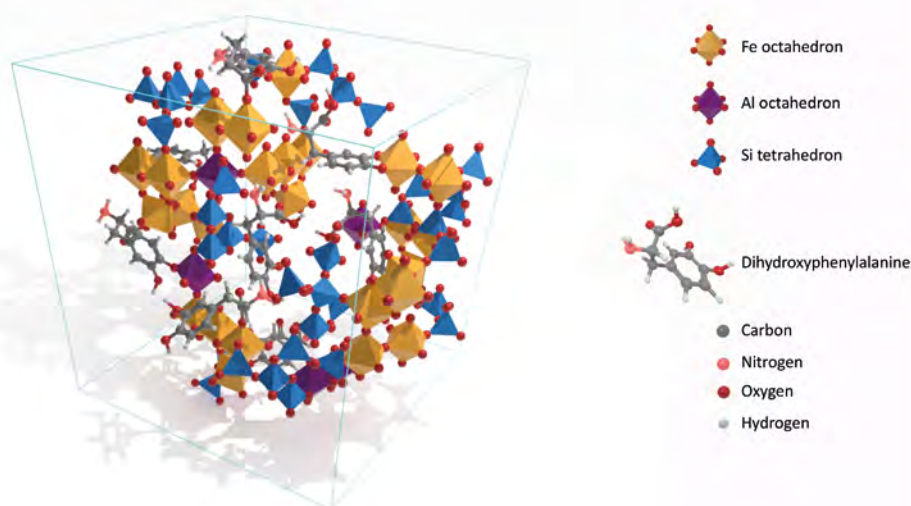
### Le projet NanoSoilC

**Partenaires :** UMR 7330 CEREGE (CNRS), UMR 1402 ECOSYS (INRA), UMR 1138 BEF (INRA), UR Recyclage & Risques (CIRAD).

### COORDINATRICE

**Isabelle Basile-Doelsch :** [basile@cerege.fr](mailto:basile@cerege.fr)

Modèle moléculaire conceptuel en 3D des coprécipités de fer, silicium et aluminium avec une molécule organique modèle (acide aminé). Les nanoCLICs peuvent stabiliser aux échelles nanométriques de grandes quantités de matières organiques. (Fig 6, Tamrat *et al.*, 2019).



## NAUTRAM

# Caractérisation de la production des composés thérapeutiques et du tramadol naturel par les arbustes *Nauclea latifolia* : voies de biosynthèse, impacts génétiques et environnementaux, et recherche de composés bioactifs analogues

## — Rappel des objectifs

L'objectif du projet NAUTRAM est de caractériser la production naturelle de tramadol et d'autres composés thérapeutiques chez les arbres de *Nauclea latifolia*, notamment de dévoiler la voie de biosynthèse, les influences génétiques et environnementales sur l'accumulation, la gamme de bioactivités présentes. Le projet visera à répondre aux questions suivantes :

1. Comment et où se déroule la biosynthèse du tramadol dans la plante et quels sont les principaux précurseurs et intermédiaires ?
2. Quelle est la variation entre la teneur en tramadol des arbres de *N. latifolia* et existe-t-il des traces de tramadol et / ou de composés étroitement apparentés chez d'autres espèces de *Nauclea* ?
3. L'accumulation de tramadol montre-t-elle la saisonnalité, la variabilité géographique ou une inductibilité liée à un agent pathogène ou à une blessure ?
4. Quelles autres bioactivités sont présentes dans les racines et les tissus d'autres espèces de *Nauclea* ?

## — Résultats majeurs

- Objectif 1 : Démêler la biosynthèse du tramadol.

Plantules et racines transformées de *N. latifolia* (Amiens) et régulièrement sous-cultivées pendant plus d'un an, indiquant une culture stable. Celles-ci ont été utilisées pour des expériences dans lesquelles le tramadol était utilisé pour nourrir les cultures et les tissus de différents types (pousses, feuilles, racines, racines transformées) et de différents âges (entre 4 et 32 jours après le traitement) dans le but de déterminer si ce matériel axénique peut prendre et métaboliser le tramadol. Les analyses effectuées par Orbitrap-MS à Genève ont confirmé la présence de tramadol dans toutes les cultures traitées, mais une absence complète dans les cultures non traitées. En outre, quatre composés analogues au tramadol (évalués par les caractéristiques spectrales de la SM) ont été identifiés. Ceux-ci restent à caractériser complètement mais semblent être un isomère, deux produits de déshydratation et un produit de déméthylation.

Pour suivre cette étude, le tramadol marqué avec des isotopes lourds dans les groupes méthyle a été synthétisé (CEISAM, Nantes) et nourri pour tirer des cultures et des cultures transformées. Ce matériel attend l'analyse pour suivre la métabolisation du tramadol.

- Objectif 2 : Accumulation de tramadol dans les plantes et impact de l'environnement, de la physiologie et du génotype.

Des échantillons de racines de *N. latifolia* largement collectés au Cameroun par le Dr Sotoing TAIWE (Cameroun) ont été extraits et analysés par UHPLC-TOF-MS (Grenoble, Genève). Tous les échantillons contiennent du tramadol, mais en quantités très variables. Une plage de concentration de 5000 fois a été trouvée. La source la plus riche a été utilisée pour l'extraction du tramadol (Grenoble). Environ 14 mg de composé purifié identifié par MS et RMN ont été obtenus et sont utilisés pour diverses analyses.

- Objectifs 3 et 4 : Étude pharmacologique et chimique de différentes espèces de *Nauclea*.

La purification des principes actifs à partir de matériel végétal s'avère plus difficile que prévu. Ce travail est en cours.

## — Production scientifique et valorisation

- Présentation orale (invitation) :

R J Robins (représentatif de toute l'équipe) NATURAL TRAMADOL - FACT OR FICTION? Conférence invitée au « 4<sup>th</sup> International Conference on Natural Product Utilisation », Albena, Bulgarie, du 28 mai au 1 juin 2019.

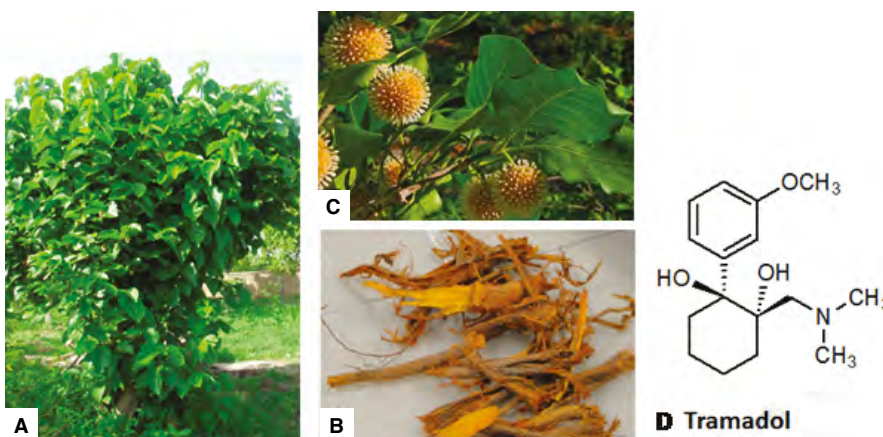
### Le projet NAUTRAM

**Partenaires :** UMR 6230 Chimie et Interdisciplinarité, Synthèse, Analyse, Modélisation (CNRS - Université de Nantes), UMR 5063 Département de Pharmacochimie Moléculaire (CNRS-Université Grenoble Alpes), UMR 1087-UMR 6291 Institut du thorax (Inserm-CNRS), IRS (Université de Nantes), EA 3900 Biologie des Plantes et Innovation (Université de Picardie Jules Verne), département de Zoologie et de Physiologie Animale-Université de Buea (Cameroun), Faculté de Pharmacie-Université de Genève (Suisse).

### COORDINATEUR

**Richard Robins** : richard.robins@univ-nantes.fr

*Nauclea latifolia* : A) Arbre ; B) Racines ; C) Fleurs ; D) Tramadol.



## NOBEL

# Novel business models and mechanisms for the sustainable supply of and payment for forest ecosystem services

## — Rappel des objectifs

Les forêts européennes fournissent une gamme de biens et de services. Certains sont valorisés sur les marchés existants (bois et produits non ligneux), d'autres comme les « biens publics » (c.-à-d. non exclusifs - tout le monde en bénéficie comme la séquestration du carbone - et non soumis à conflit d'usage) ou les « ressources communes » (c.-à-d. qu'il s'agit de biens non exclusifs comme les loisirs ou l'approvisionnement en eau, mais qui sont assujettis à la concurrence d'usage) ne le sont pas. Le cadre réglementaire des politiques forestières européennes et des politiques liées aux forêts (par exemple, la stratégie de l'UE pour la biodiversité 2020, le Cadre de politique climatique et énergétique de l'UE 2030) influence la fourniture de biens et de services forestiers. Toutefois, les services écosystémiques forestiers en Europe sont souvent des biens publics ou des ressources communes et les propriétaires fonciers qui en produisent ne sont pas récompensés par les marchés. Ces dernières années, plusieurs initiatives ont visé à sensibiliser la société aux services écosystémiques et à discuter des mécanismes de paiement pour les soutenir. Le paiement pour services écosystémiques (PSE) est identifié comme un mécanisme important pour combler l'écart entre les demandes de la société et les fournisseurs de services. Le nombre de mécanismes de PSE augmente tandis que deux approches principales sont envisagées : (i) Payer pour maintenir ou améliorer les services fournis par un écosystème, (ii) Payer pour sauvegarder ces services à risque ou pour empêcher un changement d'usage des terres avec des impacts négatifs potentiels. Quel que soit le mécanisme ou le modèle économique adopté, un élément important pour une approche PSE fonctionnelle est que ceux qui paient doivent savoir qu'ils paient pour un service écosystémique qui est précieux pour eux et ceux qui reçoivent les paiements s'engagent dans des activités de gestion qui assurent la fourniture de services écosystémiques.

Les objectifs généraux de NOBEL sont d'évaluer le rôle actuel et futur des fonctions, des biens et des services forestiers commercialisables et non commercialisables et d'élaborer des stratégies et des mécanismes pour leur fourniture durable. À cette fin, NOBEL appliquera des méthodes d'évaluation économique (par exemple basées sur les coûts et les préférences) pour évaluer les coûts et les avantages d'importants services d'écosystèmes

forestiers (FES) en Europe. Les coûts de la fourniture et les avantages sociétaux seront évalués en fonction des conditions actuelles et futures en utilisant des études de cas (essais pilotes) dans cinq régions européennes différentes. NOBEL analysera les mécanismes de financement publics et privés pour améliorer l'offre de ces externalités forestières en Europe, proposera des options pour des mécanismes fondés sur les marchés, présentera des exemples de bonnes pratiques et préparera des stratégies et des guides pour les politiques publiques afin de mettre en œuvre de nouveaux mécanismes et de favoriser l'approvisionnement en ces FES.

## — Points clés

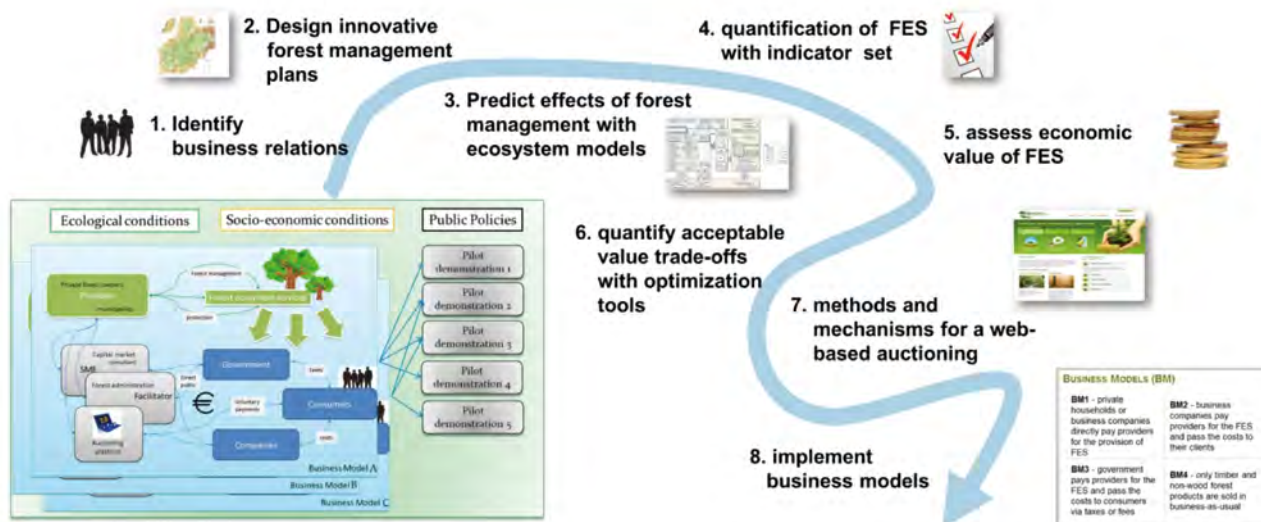
- Explorer l'information spatiale pour le développement de modèles économiques avec les données de programmes paneuropéens tels que COPERNICUS.
- Identifier des modèles économiques appropriés à des situations socio-économiques, écologiques et politiques données.
- Impliquer les parties prenantes au niveau européen et régional.
- Rendre fonctionnel le paiement des services d'écosystèmes forestiers avec une plate-forme d'enchères sur le Web.
- Améliorer les modèles disponibles d'écosystèmes forestiers pour mieux prédire les résultats produits par les FES.
- Produire des indicateurs de quantification des FES et optimiser les outils disponibles pour la définition de plans forestiers.

### Le projet NOBEL

**Partenaires :** UMR 7522 BETA (INRA), University of Natural Resources and Life Sciences (Autriche), Forest Sciences and Technology Centre of Catalonia (Espagne), Norwegian University of Life Sciences (Norvège), School of Agriculture - Instituto Superior de Agronomia (Portugal), Swedish University of Agricultural Sciences (Suède), Technical University of Munich (Allemagne).

### COORDINATEUR-RICE

**Anne Stenger-Letheux :** anne.stenger-letheux@inra.fr  
**Harald Vacik :** harald.vacik@boku.ac.at





## ODORSCAPE

## Effets du changement climatique sur les émissions de composés organiques volatils par les plantes et leurs impacts sur l'olfaction de l'insecte

## — Rappel des objectifs

La végétation terrestre émet une grande diversité de composés organiques volatils (COVs) qui forment des environnements odorants complexes qualifiés d'odorscapes. De ces odorscapes, les insectes extraient des signaux essentiels à leur reproduction et leur alimentation. Les futurs paysages odorants des agro-écosystèmes vont dépendre très largement des variations qualitatives et quantitatives des émissions de COVs végétaux, qui sont sensibles au changement climatique. Toutefois, les effets du changement climatique sur les odorscapes et par conséquent sur le comportement des insectes, n'ont jamais été évalués en détail. Dans ce contexte, le projet ODORSCAPE vise à :

- 1) reconstituer des agro-écosystèmes tempérés incluant des peupliers, en conditions contrôlées notamment pour le CO<sub>2</sub> et l'ozone ;
- 2) déterminer les effets de facteurs du changement global (CO<sub>2</sub> et ozone) sur les émissions de COVs et sur la régulation des voies métaboliques correspondantes, chez les peupliers ;
- 3) étudier les effets des nouveaux environnements sensoriels sur la communication olfactive d'un insecte phytophage.

## — Résultats majeurs

En se dotant d'un système d'enrichissement de l'air en ozone (0-2000 ppb  $\pm$  3 ppb), dans trois chambres climatiques, l'UMS CEREEP Ecotron IdF, partenaire du projet ODORSCAPE, a élargi ses capacités de simulation environnementale (<http://www.cereep.ens.fr/spip.php?article9>). Associé au dispositif d'enrichissement en CO<sub>2</sub> déjà présent à l'Ecotron et aux appareils portables de mesure des échanges gazeux du partenaire IPE/iEES, ce système d'ozonation a permis d'exposer de jeunes peupliers (*Populus tremula x alba*, clone INRA 717-1B4) à des atmosphères finement contrôlées, enrichies en ozone (110 ppb) et/ou en CO<sub>2</sub> (800 ppm, selon certaines projections à 2080), sur une durée de six semaines. Ces arbres ont été comparés à des peupliers exposés à une atmosphère actuelle (400 ppm de CO<sub>2</sub> et 30 ppb d'ozone).

Le peuplier est un fort émetteur de COVs, essentiellement d'isoprène. Dans les conditions expérimentales décrites ci-dessus, l'enrichissement en CO<sub>2</sub> ou en ozone de l'atmosphère entraîne des diminutions de 75 % (ozone) et 66 % (CO<sub>2</sub>) de la production d'isoprène. Avec les données à venir sur les effets de la combinaison CO<sub>2</sub> x ozone sur les émissions d'isoprène et les voies de biosynthèse de COVs chez le peuplier, il s'agira de comprendre comment l'olfaction est affectée par ces variations des teneurs en isoprène et autres COVs, chez un insecte phytophage tel que la noctuelle *Agrotis ipsilon*. En effet, les peupliers plantés à proximité des champs cultivés où vit *A. ipsilon*, constituent une source majeure de COVs et déterminent fortement le paysage sensoriel olfactif de ce papillon. C'est ainsi que nous avons montré que certains COVs, introduits dans l'arrière-plan olfactif, modifient les réponses des neurones responsables de la perception d'une phéromone sexuelle dans les antennes et le cerveau du papillon et qu'ils affectent le codage neuronal de ce signal. Ainsi, la baisse ou l'augmentation des émissions de COVs par les espèces accompagnatrices (comme le peuplier) des cultures, devraient respectivement faciliter ou limiter la perception des phéromones et des odeurs émises par les plantes cultivées. À terme, cela pourrait favoriser ou limiter la reproduction des insectes phytophages nuisibles. Au final, les données de physiologie sensorielle fourniront des éléments de prédiction sur la sensibilité de l'insecte aux changements de son environnement olfactif, tels qu'induits par le changement climatique, via les émissions de COVs par les arbres.



Jeune peuplier enfermé dans une chambre de piégeage des COVs lors des expérimentations du projet ODORSCAPE.  
Crédit et copyright : LSCE-EcoPhyS/iEES.

## — Production scientifique et valorisation

- Conférence internationale « Ozone and Plant Ecosystems », Florence, Italie, mai 2018, Merlier E, Bagard M, Puga-Freitas R, Boissard C, Leitao L, Repellin A, Hansart A, Chollet S, Staudt M, Leymarie J.
- Conférence internationale « European Symposium for Insect Taste and Olfaction », Villasimius, Italie, sept. 2017, Conchou L, Anderson P, Birgersson G, Lucas P & Renou M. Olfactory perception in complex and changing odour landscapes.
- Conférence internationale « International Symposium of Chemical Ecology », Budapest, août 2018, Conchou L, Demondion E, Gévar J, Monsempès C, Philippe L & Renou M.
- Conchou L, Lucas P, Meslin C, Proffit M, Staudt M & Renou M. 2019. Insect odorscapes: from plant volatiles to natural olfactory scenes. *Frontiers in « Invertebrate Physiology »* doi: 10.3389/fphys.2019.00972
- Projet sTREEt (ANR AAPG 2019 « Impact of sTress on uRban trEEs and on city air quality » accepté en juillet 2019), impliquant un partenaire du projet ODORSCAPE et mettant en œuvre des compétences développées dans le cadre du projet ODORSCAPE (coordinatrice : juliette.leymarie@u-pec.fr).

## Le projet ODORSCAPE

**Partenaires :** UMR 1392 iEES Ecosens (INRA), Sorbonne université, UMR 5175 CEFE (CNRS), UMR 7618 iEES IPE (Université Paris Est Créteil), UMS 3194 CEREEP Ecotron Île-de-France (CNRS).

## COORDINATEUR

**Michel Renou :** michel.renou@inra.fr

## OPTIFIN

# Développement d'un procédé de classification et d'analyse permettant de prédire le rendu des finitions sur bois et d'un prototype industriel démonstrateur

## — Rappel des objectifs

Le bois est un matériau dont le rendu naturel est apprécié dans de nombreuses applications (parquets, ameublement, agencement intérieur ou extérieur, etc.). Cependant son hétérogénéité et sa variabilité de surface rendent souvent problématiques la maîtrise et l'harmonie des rendus après application d'un produit de finition de type vernis ou teinte, générant parfois des non-qualités.

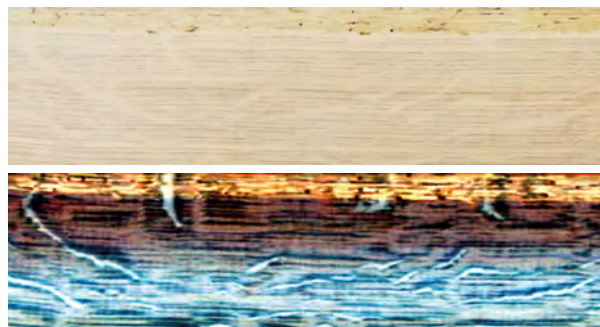
Le projet OPTIFIN a pour objet le développement d'une méthode d'analyse permettant de prédire et de classer la qualité des rendus en fonction d'une analyse de surface en temps réel du bois. Cette analyse de surface nécessite le couplage de plusieurs techniques d'acquisition utilisables en industrie (caméra couleur, caméra hyperspectrale, polarisation, télémétrie, etc.) ainsi que le couplage de plusieurs méthodes de traitement du signal et des images (méthodes de séparation de signaux, classification par logique floue adaptée au bois, etc.).

## — Résultats majeurs

Un banc d'imagerie multimodale a été mis en place. Il rassemble notamment un imageur hyperspectral proche infrarouge (PIR) pushbroom avec un système de polarisation de la lumière et une caméra linéaire couleur 3D avec fonction multiscan (image couleur, image en niveaux de gris, image de diffusion d'un profil LASER et image de profilométrie 3D). Cette plateforme de mesure a permis de constituer une base de données « images » servant de référence à l'étude à partir de lots d'échantillons de bois de chêne fournis par les partenaires industriels.

Différentes classes de bois avant et après finition ont été définies. Ces définitions exploitent la couleur, la texture, la présence de singularités et défauts du bois et sont basées sur leur appréciation par un expert « métier ». Cette partie du projet a été abordée selon une approche d'extraction et de modélisation des connaissances s'appuyant sur la méthode NIAM (Natural language Information Analysis Method) / ORM (Object Role Modelling), afin d'aboutir à l'expression d'une ontologie « métier » et d'une ontologie « rendu » définissant les critères de qualité et d'aspect du bois avant et après finition ainsi que les classements correspondants. Des modèles de connaissance des experts « traitement d'images » ont aussi été élaborés. Il s'agissait d'établir l'ensemble des paramètres à extraire des images pour qualifier et quantifier les singularités et défauts à identifier.

Afin d'exploiter les images hyperspectrales PIR, un algorithme de séparation de sources en ligne respectant le schéma d'acquisition de l'imageur pushbroom et inspiré de l'algorithme INMF (Incremental Non-Negative Matrix Factorization) a été proposé. La Factorisation Matricielle Non-Négative (NMF) consiste à décomposer une matrice de données non-négatives (dans notre cas une image hyperspectrale constituée de  $n_x$  échantillons de données enregistrées aux  $n_x$  longueurs d'onde) en produit de deux matrices de rang faible à valeurs non-négatives (une matrice contenant les sources spectrales normalisées et une matrice contenant les abondances). L'objectif des méthodes de NMF en ligne est d'estimer les sources et les abondances en ajoutant les effets des échantillons suivants sans nécessiter davantage de coût de calcul. Deux implémentations algorithmiques ont été comparées : une basée sur la distance euclidienne (bruit Gaussien) et une autre basée sur la divergence de Kullback-Leibler (bruit Poissonien). Ces algorithmes de traitement d'image ont montré leur pertinence et leur performance, notamment en



Distinction aubier / duramen du bois de chêne par imagerie couleur (haut) et par imagerie hyperspectrale PIR (bas). Crédit photos : Radouan Dahbi (CRITT Bois) et Thomas Aiguier (CRAN).

ce qui concerne la distinction aubier / duramen du bois de chêne lorsque celle-ci n'est pas visible à l'œil nu. L'intégration d'une diversité supplémentaire sur les images : la polarisation de la lumière, a été étudiée. Une interprétation physico-chimique des signatures spectrales obtenues a aussi été réalisée par analyse d'échantillons types par microscopie FTIR dans le moyen infrarouge et dans le proche infrarouge.

Des méthodes d'extraction (prétraitement par recalage, extraction du fond, segmentation, etc.) des critères représentatifs et pertinents permettant de caractériser l'aspect du bois et d'en distinguer les différentes classes sont encore en cours de développement pour les différents types d'images, tout comme les méthodes de classification des produits bois selon leur aspect en fonction des finitions voulues. Les algorithmes développés sont appliqués aux données expérimentales venant du banc de mesure de façon à tester et quantifier leur efficacité en matière de justesse, leur précision et leur rapidité dans l'optique d'une classification en temps réel.

## — Production scientifique et valorisation

- Plusieurs communications scientifiques orales et par posters aux niveaux international et national : IEEE Statistical Signal Processing Workshop (Freiburg 2018, Allemagne), 10th IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop (Sheffield 2018, Angleterre), Chimiométrie XIX (Paris 2018), 29<sup>e</sup> journées francophones d'Ingénierie des Connaissances (Nancy 2018).
- Thèse de doctorat de Ludvine NUS devant être soutenue fin 2019.

### Le projet OPTIFIN

**Partenaires :** CRITT Bois, UMR 7039 CRAN (Université de Lorraine-CNRS), UMR 7564 LCPME (Université de Lorraine-CNRS), BERRY WOOD, OGF INDUSTRIE.

### COORDINATEUR

**Eric Masson :** [eric.masson@cricbois.net](mailto:eric.masson@cricbois.net)

## PATCH

## Plasticité comportementale et Adaptation du Chevreuil aux modifications du paysage

## — Rappel des objectifs

Les modifications du paysage, notamment à travers l'anthropisation, la perte et la fragmentation des habitats naturels, constituent l'une des principales menaces pesant sur la biodiversité mondiale. Dans le contexte des changements globaux liés à l'empreinte croissante de l'Homme sur la biodiversité, il devient donc crucial de mieux comprendre comment les populations animales répondent à ces changements et persistent ou non dans les environnements modifiés par l'homme. L'impact des modifications du paysage peut être très différent d'une espèce à l'autre, en fonction de leurs exigences en termes d'habitat, leur régime alimentaire et leur mobilité. Certaines espèces natives, dites synanthropiques, peuvent même bénéficier des modifications anthropogéniques du paysage. Pourtant, bien que ces espèces soient souvent en expansion et fassent l'objet d'enjeux sociétaux importants, l'influence de la perte et de la fragmentation des habitats sur ces espèces synanthropiques n'a reçu que très peu d'attention jusqu'alors. L'impact des modifications du paysage sur les comportements reste également largement méconnu. Pourtant, la plasticité comportementale joue un rôle clé dans la réponse adaptative des espèces aux changements environnementaux rapides liés aux activités anthropiques, du fait de la grande réactivité et labilité des comportements. Le projet PATCH visait ainsi à expliquer comment la plasticité comportementale a permis à une espèce considérée essentiellement comme forestière, le chevreuil européen (*Capreolus capreolus*), de coloniser et prospérer dans les paysages transformés par l'homme. Il s'agissait plus spécifiquement d'étudier la réponse comportementale, génétique et démographique du chevreuil aux variations d'habitat et d'ouverture du paysage en utilisant une double approche inter-populationnelle et intra-populationnelle.

## — Résultats majeurs

Nous avons mis en évidence l'influence de la masse corporelle, de la diversité génétique et de la personnalité des chevreuils sur leur décision de disperser et leur distance de dispersion, au sein de différents habitats avec des degrés d'ouverture du paysage variés. Nous avons aussi montré que la survie des faons au sein des habitats forestiers ou agricoles dépendait de la personnalité de leur mère. Nous avons trouvé que le comportement de fuite des chevreuils face à un danger variait en fonction du degré d'ouverture du paysage, de la proximité des routes et de la qualité de l'habitat. Nous avons finalement constaté que le niveau de la variance génétique additive pour la masse corporelle était très sensible aux conditions environnementales et pouvait varier fortement au sein et entre les populations en fonction de la disponibilité des ressources. L'explosion démographique et l'expansion géographique du chevreuil en France au cours de ces dernières décennies a eu et a des répercussions socio-économiques importantes en termes de dommages aux cultures et à la forêt, zoonoses, transmission de maladies et de parasites au bétail, collisions avec les véhicules, revenus de chasse, etc. Ce projet a permis d'apporter les premiers éléments de réponse. Une perspective intéressante serait d'étudier les conséquences des réponses comportementales et démographiques du chevreuil aux modifications du paysage sur les interactions biotiques, le fonctionnement des écosystèmes et la fourniture de services et disservices écosystémiques, notamment au sein des agro-écosystèmes.



Crédit photo : Olivier VILLA.

En effet, les chevreuils sont de véritables ingénieurs des écosystèmes, qui par leurs abrouissements, défécations, frottis, piétinements, zoochorie, modifient la structure et la dynamique de la végétation, la qualité de la litière, les flux de nutriments et par effets cascade, l'ensemble des réseaux trophiques et de la biodiversité.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet PATCH a permis de produire au total 11 publications dans des revues scientifiques internationales majeures. Il a fait l'objet également de plusieurs rapports de stage de Master et DUT, ainsi que d'une thèse de doctorat. Les résultats du projet ont été diffusés à travers quatre communications orales ainsi qu'un poster réalisés dans le cadre de conférences scientifiques internationales. Nous avons informé les gestionnaires de la faune et les chasseurs de certaines de nos découvertes en participant à un article populaire dans un magazine à large audience spécialisé dans la chasse.

## Le projet PATCH

**Partenaires :** UMR 5558 Laboratoire de Biométrie et Biologie Evolutive (CNRS-Université Claude Bernard).

## COORDINATRICE

**Cécile Vanpe :** cecile\_vanpe@yahoo.fr



# PENSEE

## Évaluation de l'effet des paiements pour services environnementaux

### — Rappel des objectifs

L'objectif du projet PENSEE est de mesurer l'impact et l'efficacité de politiques agro-environnementales telles que les Paiements pour Services Environnementaux (PSE), les réglementations environnementales comme la directive Nitrates ou les nudges, outils nouveaux de politique publique basés sur des leviers psychologiques.

### — Résultats majeurs

Le projet PENSEE est encore en cours, mais les premiers résultats sont les suivants :

- Les subventions encourageant le maintien de prairies permanentes fonctionnent, et parviennent à empêcher la conversion de prairies en céréales, mais les bénéfices environnementaux qu'elles apportent ne semblent pas suffisants pour couvrir leurs coûts.
- Les PSE visant à subventionner le maintien de couvert forestier dans les pays en développement ont l'impact attendu, et leurs bénéfices semblent dépasser leurs coûts.
- La directive nitrates est parvenue à réduire la pollution des eaux, et a dans le même temps amélioré l'efficacité de l'utilisation de l'azote par les agriculteurs, augmentant par là leurs rendements et leurs marges.
- Les nudges sont des outils prometteurs mais aux effets difficiles à appréhender et à maîtriser dans le contexte agricole :
- L'envoi de SMS informant les agriculteurs sur leur consommation d'eau et celle de leurs voisins a permis la réduction des plus fortes consommations d'eau mais a déclenché des petites consommations.
- L'envoi de lettres d'information a permis d'augmenter le nombre d'agriculteurs contractant une Mesure Agro-Environnementale (MAE), mais l'ajout de témoignages, de coupon libre-réponse n'a pas eu d'effet détectable.

### — Production scientifique et valorisation

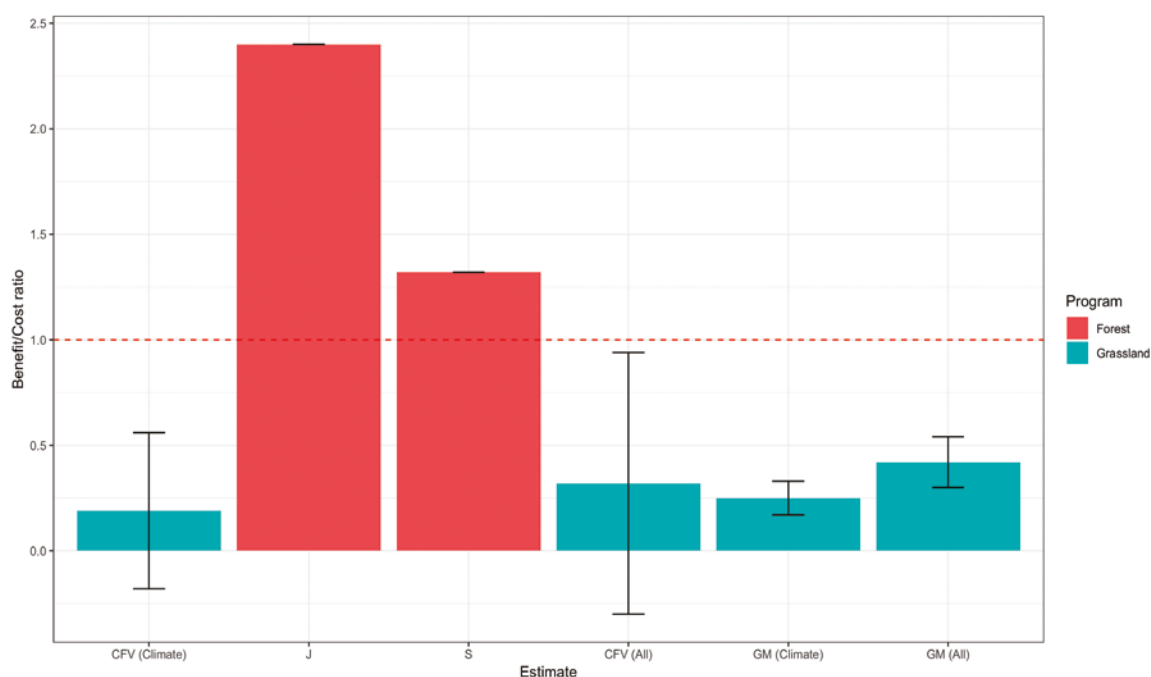
- S. Chabé-Ferret, P. Le Coent, A. Reynaud, J. Subervie (2019) Can We Nudge Farmers Into Saving Water? Evidence from a randomized experiment, *European Review of Agricultural Economics*, Volume 46, Issue 3, Pages 393-416.
- S. Chabé-Ferret and A. Voia (2018) "Are Conservation Programs Additional ? Evidence From the French Grassland Conservation Program," XX Annual Bioecon Conference on Land-use, Agriculture and Biodiversity: Spatial and Temporal Issues, Cambridge, 12 - 14 September.
- S. Chabé-Ferret, A. Reynaud and E. Tène (2019) "Water Quality, Policy Diffusion Effects and Farmers' Behavior", AERE Summer Conference, Lake Tahoe, 30-31 May.
- <https://sites.google.com/view/pensee/home> (en construction)

#### Le projet PENSEE

**Partenaires :** UMR 5314 Toulouse School of Economics - Recherche (INRA-Université Toulouse 1).

#### COORDINATEUR

**Sylvain Chabé-Ferret :** [sylvain.chabe-ferret@tse-fr.eu](mailto:sylvain.chabe-ferret@tse-fr.eu)



## PEROXIDIV

## Diversité phylogénétique et fonctionnelle des peroxydases fongiques à hemes

## — Rappel des objectifs

Pour la dégradation de micromolécules issues du métabolisme secondaire et de la lignine, les champignons produisent des peroxydases appartenant à plusieurs familles protéiques. La plus étudiée est celle des « classes II » pour son rôle avéré dans la dégradation de la lignine par certains champignons lignivores. L'objectif de PEROXIDIV est de révéler la diversité, les fonctions biochimiques potentielles et de promouvoir l'utilisation en biotechnologie de deux autres familles de peroxydases fongiques : celle des « DyP » connues pour décolorer des colorants industriels récalcitrants et celle des UPO (Unspecific Peroxygenases) qui présentent une double activité peroxydase/ peroxygénase et qui sont actives sur une vaste gamme de composés chimiques pour des applications dans différents secteurs industriels.

## — Résultats majeurs

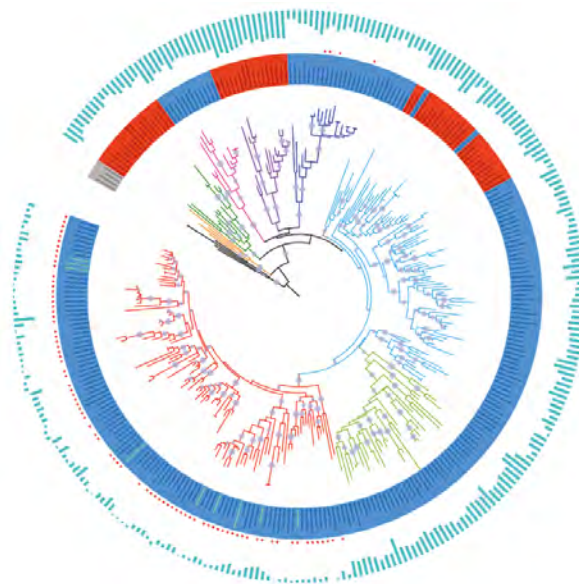
Dans un 1<sup>er</sup> axe, nous avons exploré la diversité phylogénétique de ces 2 familles de peroxydases et tenté d'associer leurs patrons de diversification à l'évolution des stratégies trophiques des champignons. Ces analyses font ressortir l'existence de clades aux origines anciennes qui suggèrent des spécialisations catalytiques (Illustration). Ainsi, pour les DyP seul un clade est caractérisé par des séquences signal permettant leur sécrétion. Celui-ci ne se retrouve qu'au sein des génomes d'espèces lignivores suggérant un rôle des enzymes de ce clade dans la lignolyse.

Dans un 2<sup>e</sup> axe, par une approche de génomique environnementale de capture de séquences nous avons isolé les séquences de peroxydases produites par les champignons présents au sein de plus de 20 échantillons de sols prairiaux et de forêts, de bois morts et de sédiments de mangroves. Aucune de ces séquences environnementales n'est identique aux séquences des bases de données, élargissant ainsi nos connaissances sur la diversité de ces enzymes.

Dans un 3<sup>e</sup> axe, nous mettons en place des systèmes de production hétérologue pour l'obtention de DyP et d'UPO recombinantes afin d'en étudier les propriétés biochimiques. Au travers de collaborations, des modèles bactériens, champignons filamenteux et levures ont été testés pour l'expression de gènes issus d'espèces connues ou d'échantillons environnementaux (axe 2). Le système levure a permis l'obtention d'enzymes actives dont les propriétés sont en cours d'étude.

## — Production scientifique et valorisation

- GASC C, *et al.* (2016) Sequence capture by hybridization to explore modern and ancient genomic diversity in model and non-model organisms. *Nucleic Acids Research*. 44:4504-18.
- ADAMO M, *et al.* (2017) RNA extraction from decaying wood for (meta)transcriptomic analyses. *Canadian Journal of Microbiology*. 63(10):841-850.
- MARMEISSE R, *et al.* (2017) Discovering protein-coding genes from the environment: time for the eukaryotes? *Trends in Biotechnology*. 35:824-835.
- BÜTTNER E, *et al.* (2017) Draft genome of the wood-degrading ascomycete *Kretzschmaria deusta* DSM104547. *Genome Announcements*. 5: e01076-17
- BÜTTNER E, *et al.* (2018) Draft Genome Sequence of *Scytalidium lignicola* DSM 105466, a Ubiquitous Saprotrophic Fungus. *Microbiol Resour Announc*. 7: e01208-18.



Phylogénie globale des DyP fongiques illustrant l'existence de clades distincts (branches de différentes couleurs). Seules les protéines du clade en rouge présentent un peptide signal pour leur sécrétion ainsi qu'un degré d'hydrophatie élevé (cercle externe vert clair). Ces protéines proviennent d'espèces Basidiomycètes (cercle externe bleu) et Ascomycètes (cercle externe rouge).  
Crédit : Martino Adamo, thèse Université de Lyon/Université de Turin 2018.

- BÜTTNER E, *et al.* (2019) Draft Genome Sequence of *Xylaria longipes* DSM 107183, a Saprotrophic Ascomycete Colonizing Hardwood. *Microbiol Resour Announc*. 8: e00157-19.
- HOFRICHTER M, *et al.* (2019) Fungal Peroxygenases. In: Nevalainen H. (ed.) Grand Challenges in Fungal Biotechnology. In: Rapelotto H. (series ed.) Grand Challenges in Biology and Biotechnology. Springer International, Switzerland, ISSN 2367-1017, 50 pages, in press.

## Le projet PEROXIDIV

**Partenaires :** UMR 5557 LEM [Université Lyon 1-CNRS], UMR 454 MEDIS [INRA-Université Clermont Auvergne], Université Technique de Dresde - IHI Zittau (Allemagne).

## COORDINATEUR

**Roland Marmesse :** roland.marmesse@univ-lyon1.fr

## PHOENIX

# Parcimonie, observations non-stationnaires de grandes dimensions, modélisation des séries chronologiques d'images et télédétection

## — Rappel des objectifs

La surveillance de l'environnement par télédétection est cruciale pour l'évaluation et la compréhension des relations existant entre les changements climatiques globaux et l'évolution de grandes structures dynamiques terrestres que sont les glaciers et les forêts. Depuis 2007, le déploiement de satellites imageurs en constellation a contribué à augmenter de manière très significative, les résolutions spatiales (détails structuraux observables) et temporelles (fréquences d'observations d'un site) des acquisitions d'images satellitaires.

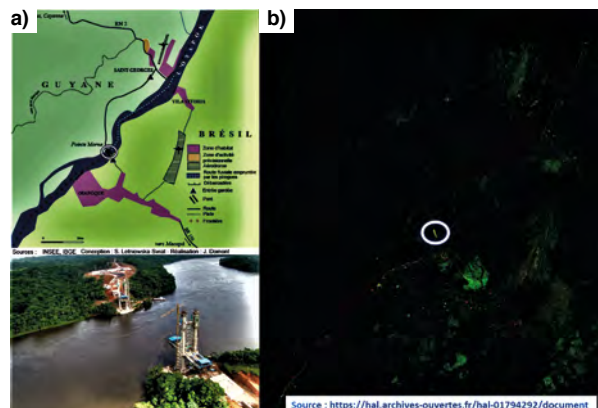
L'exploitation de ces données pour la surveillance de l'environnement et l'étude de la capacité d'un environnement à se renouveler (résilience) sera une des activités majeures de la communauté scientifique dans les prochaines décennies. En effet, au-delà des glaciers et forêts, l'avenir de la planète dépend de notre capacité à analyser son état actuel et prévoir son état futur à partir de l'analyse des séries chronologiques d'observations. Notre défi est alors le développement d'outils algorithmiques et de méthodes d'analyse des séries temporelles, lorsque ces dernières sont associées à des attributs de grandes dimensions, ainsi que la compréhension de l'évolution de structures terrestres à partir de contenus informatifs noyés dans ces séries. L'objectif scientifique du projet PHOENIX est de proposer un cadre d'analyse parcimonieuse de champs aléatoires chronologiques pour fournir des méthodes rapides, efficaces et robustes de traitement des données multidimensionnelles se présentant sous la forme de séries temporelles et multi-sources d'images. L'objectif technique du projet PHOENIX est d'étudier la résilience des structures de grandes échelles telles que les glaciers Alpins, la forêt Amazonienne : analyser leurs états passés et actuels pour caractériser les conséquences de différents types de changements, ainsi que prédire leurs états futurs à partir de modèles d'évolution appliqués sur des « masses de données ordonnées selon la chronologie de leurs observations ».

## — Résultats majeurs

Le projet PHOENIX a porté, entre autres, à l'analyse des changements survenant en forêt amazonienne, avec un intérêt particulier pour la zone située de part et d'autre de la frontière France/Brésil plongée dans le fleuve Oyapock. L'Oyapock (voir image) est un grand continuum de 400 kilomètres de long où circule des eaux tumultueuses dans une forêt tropicale humide. La construction récente d'un pont reliant la France au Brésil sur l'Oyapock est susceptible d'avoir des impacts locaux sur la dynamique forestière. Pour analyser ces impacts, PHOENIX a considéré une période d'observation incluant des dates situées avant et après l'ouverture en circulation du pont (20 mars 2017).

Dans un environnement tropical à très grande superficie et possédant une grande densité de végétaux, l'imagerie satellitaire Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) est l'un des rares moyens qui garantisse une observation à la fois régulière, à grande échelle et à fine résolution temporelle. PHOENIX a ainsi recueilli et conditionné des données RSO issues de la mission Sentinel-1 d'observation de la terre (données mises à disposition gratuitement par l'agence spatiale européenne) avant de procéder à une recherche d'informations dans ces données.

Une analyse de la dynamique spatio-temporelle du site de l'Oyapock a ainsi été menée à partir de décompositions en ondelettes adaptées à la capture des informations intrinsèques aux données RSO [1]. La carte des dynamiques déduite à partir de



a) Le pont sur l'Oyapock dans son environnement local.  
b) Carte de changements détectés sur 2015-2018 par variation totale en ondelettes géométriques à partir de Sentinel-1.

cette analyse est donnée ci-dessus. Cette carte a été calculée par cumul des variations dérivées de 87 images multivariées polarimétriques acquises entre 2015 et 2018. Dans cette carte, l'information sur le canal de couleur RVB est relative aux polarisations des ondes radar les plus sensibles au changement survenu. L'intensité de la couleur est proportionnelle au niveau de dynamique obtenu dans le temps sur la zone correspondante. Cette analyse a permis de détecter trois types de changements majeurs principalement au sud de l'Oyapock : déforestations anthropiques très localisées spatialement, évolutions saisonnières sur des zones relativement grandes et plutôt marécageuses et impacts des pratiques agricoles [1] [2]. Ces résultats ont été validés par des experts de l'office national des forêts (ONF) et sont disponibles dans le document de thèse de doctorat [2].

## — Références mentionnées dans ce document et associées au projet PHOENIX

- [1] Geometric Multi-Wavelet Total Variation for SAR Image Time Series Analysis, Abdourrahmane Atto, Anoumou Kemavo, Jean-Paul Rudant, Grégoire Mercier, *International Conference on Information Fusion (FUSION)*, Cambridge, United Kingdom, 2018. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01794292>)
- [2] Potentialités des données de télédétection optique et radar libres d'accès pour l'évaluation et le suivi des écosystèmes forestiers tropicaux, Anoumou Kemavo, *Office National des Forêts, Thèse de l'université Paris-Est* soutenue le 14 décembre 2018. (<http://www.theses.fr/s123187>)

### Le projet PHOENIX

**Partenaire :** UR LISTIC (Université Savoie Mont Blanc).

### COORDINATEUR

**Abdourrahmane Atto :** [abdourrahmane.atto@univ-smb.fr](mailto:abdourrahmane.atto@univ-smb.fr)



# PitBulles

## Déterminismes biophysiques et moléculaires de la vulnérabilité à l'embolie chez les arbres

### — Rappel des objectifs

La productivité et la durabilité des écosystèmes forestiers sont fortement influencées par la disponibilité en eau, cette contrainte risquant de s'exacerber dans le futur proche en lien avec le changement climatique global. Identifier des espèces ou des génotypes plus résistants à la sécheresse est donc un enjeu majeur pour la filière forestière. Dans ce contexte, l'objectif général du projet PitBulles était de faire progresser nos connaissances sur un mécanisme clé de la résistance à la sécheresse des arbres: la tolérance à la cavitation.

La circulation de la sève brute dans l'arbre s'opère sous tension, un état physiquement instable qui risque d'évoluer soudainement vers une phase gazeuse stable. Cette transition de phase est causée par un processus de cavitation. Les conséquences sont dramatiques pour l'arbre car le mécanisme d'ascension de la sève est alors interrompu et l'arbre peut dépérir par déshydratation.

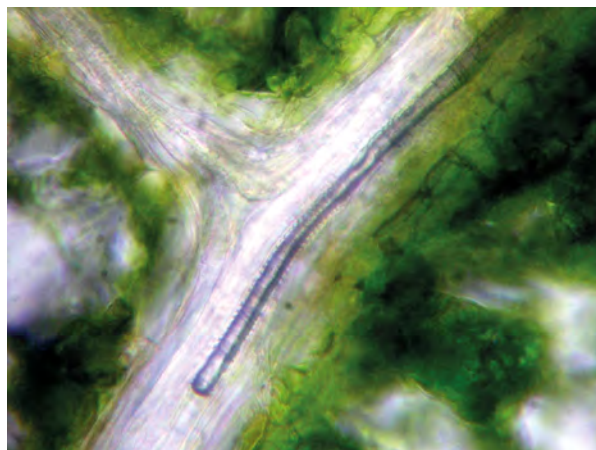
Dans ce projet nous avons mis en œuvre une démarche pluridisciplinaire afin de préciser les bases mécanistes, moléculaires et génétiques du processus de cavitation dans l'objectif de fournir des outils pour la sélection d'arbres plus résistants à la sécheresse.

Le processus de cavitation chez les arbres est un phénomène physique (rupture capillaire d'un ménisque air-eau) déterminé par le risque de passage d'une bulle d'air au travers de la paroi des vaisseaux conducteurs de sève brute au niveau des ponctuations. Nous avons mis en place une approche de type structure-fonction consistant à décrire précisément la structure physique et la composition chimique de ces ponctuations de manière à modéliser le mécanisme de cavitation et à en inférer les bases génétiques. Nous avons donc réuni pour cette ANR des physiciens de la mécanique du solide et du fluide (IMFT), des anatomistes experts de la structure des parois des végétaux (INRA-BIA) et des physiologistes de l'arbre spécialistes de l'étude du phénomène de cavitation (INRA-PIAF).

Des technologies innovantes ont été mises en œuvre pour atteindre nos objectifs. La structure des ponctuations hydratées a été révélée par microscopie à force atomique (AFM) et par microscopie électronique environnementale à effet de champ (ESEM-FEG). Des techniques d'immunomarquage et enzymatiques ont permis d'identifier la composition chimique des ponctuations. Enfin, l'utilisation de la Micro-Tomographie Rayon X a rendu beaucoup plus précises et fiables nos mesures de vulnérabilité des arbres à la cavitation.

### — Résultats majeurs

De nombreuses avancées scientifiques ont été obtenues grâce à ce projet. Une nouvelle conception de la structure de la paroi des ponctuations, et de nouvelles hypothèses sur sa composition chimique ont été proposées. Ceci nous a conduit à proposer un nouveau mécanisme pour l'induction de la cavitation faisant appel aux propriétés mécaniques de cette paroi. Les bases moléculaires de la cavitation étant précisées, nous avons proposé et validé de nouvelles hypothèses sur ses bases génétiques. Par ailleurs, nous avons proposé une méthode de référence pour la mesure de la vulnérabilité à la cavitation des plantes et validé celles-ci sur l'espèce modèle *Arabidopsis*, ouvrant ainsi de nouvelles portes pour l'identification des bases génétiques de ce processus clé.



Bulle d'air dans le système vasculaire d'un arbre. L'apparition de ces bulles d'air est causée par un processus de cavitation lors d'épisodes de sécheresse. Le projet PitBulles a permis d'identifier les bases physiques et moléculaires de ce processus clé de la résistance des arbres à la sécheresse. Crédit photo : Hervé Cochard.

### — Production scientifique et valorisation

- Wortemann R, et al 2011. Tree Physiology 31: 1175-1182.
- Ennajeh M, et al 2011. Physiologia Plantarum 142: 205-210
- Awad H, et al 2012. Environmental and Experimental Botany 77: 185-195.
- Tixier A, et al 2013. Journal of Experimental Botany 64: 2295-2305.
- Lens F, et al 2013. Current Opinion in Plant Biology 16: 287-292.
- Capron M, et al. 2014. Physical Review E. 89 : 033019
- Dusotoit-Coucaud A, et al. 2014. Physiologia Plantarum 150: 388-396.
- Dalla-Salda G, et al. 2014. Journal of Plant Hydraulics 1-e0005.
- Azzam F, et al. 2014. Langmuir 30: 8091-8100.
- Tixier A, et al. 2014. Annals of Botany 114: 325-334.
- Herbette S, et al. 2015. Annals of Botany 115:187-199.
- Torres-Ruiz JM, et al. 2015. Plant Physiology 167: 40-43.

#### Le projet PitBulles

**Partenaires :** UMR 547 PIAF (INRA), UMR 5502 IMFT (Institut National Polytechnique de Toulouse), UR 1268 Biopolymères, Interactions Assemblages (INRA).

#### COORDINATEUR

**Hervé Cochard :** herve.cochard@inra.fr

## PRI-MAL

# Caractérisation de *Plasmodium* chez les chimpanzés, gorilles et bonobos sauvages et les Hommes vivant en forêt tropicale afin d'évaluer si les grands singes sont le réservoir des espèces plasmodiales humaines

## — Rappel des objectifs

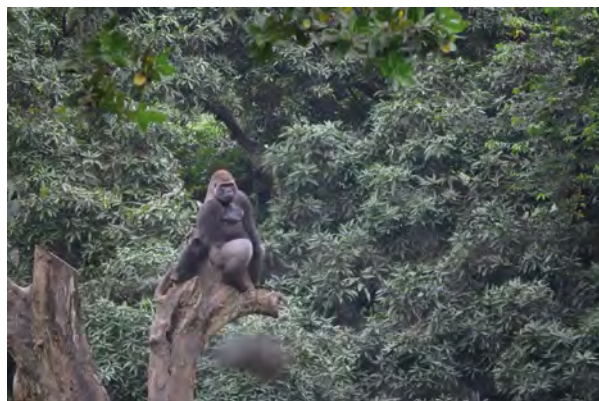
L'objectif principal était de déterminer si les singes représentent une source récurrente d'infections de paludisme chez l'homme en Afrique. Les grands singes en Afrique sont infectés avec plusieurs espèces de *Plasmodium* avec des prévalences allant de 32 % à 48 %. Toutes les souches de *P. falciparum* chez l'homme forment une lignée monophylétique dans un clade de *Plasmodium* infectant des gorilles (*P. praefalciparum*), indiquant que *P. falciparum* est le résultat d'une seule transmission inter-espèce du gorille à l'homme. Par la suite, une séquence proche de *P. falciparum* a été identifiée chez un seul Cercopithèque, captif, suggérant que d'autres singes peuvent aussi être un réservoir. Compte tenu de l'ampleur des infections à *Plasmodium* chez les grands singes en Afrique, il est aussi important d'étudier dans quelle mesure des transmissions zoonotiques surviennent dans les zones de forêts tropicales en Afrique. Enfin, il est aussi important de continuer à étudier la résistance aux médicaments.

## — Résultats majeurs

L'analyse d'un grand nombre d'échantillons de singes africains, a permis d'identifier les ancêtres de *P. falciparum* uniquement chez les gorilles, excluant donc la possibilité que d'autres singes africains représentent aussi un réservoir pour *Plasmodium*. L'ancêtre de *P. vivax* humain a une origine chez les grands singes d'Afrique. Les bonobos sauvages sont infectés avec une lignée de *Plasmodium* spécifique. Les hommes vivant en forêt tropicale à proximité de l'habitat des grands singes ne sont pas infectés par des *Plasmodium* simiens. La caractérisation génétique plus approfondie des différents espèces de *Plasmodium* circulants chez les grands singes a aussi permis de mieux comprendre leur évolution. Enfin, nous avons observé une augmentation de souches sensibles à la chloroquine au Cameroun, depuis l'arrêt de son utilisation comme traitement.

## — Production scientifique et valorisation

- Loy DE, Plenderleith LJ, Sundararaman SA, *et al.* Evolutionary history of human *Plasmodium vivax* revealed by genome-wide analyses of related ape parasites. PNAS 2018;115:E8450-E8459.
- Liu W, Sherrill-Mix S, Learn GH, *et al.* Wild bonobos host geographically restricted malaria parasites including a putative new *Laverania* species. Nat Commun 2017;8:1635.
- Ndam NT, Basco LK, Ngane VF, *et al.* Reemergence of chloroquine-sensitive pfcrt K76 *Plasmodium falciparum* genotype in southeastern Cameroon. Malar J 2017;16:130.
- Liu W, Sundararaman SA, Loy DE, *et al.* Multigenomic delineation of *Plasmodium* species of the *Laverania* subgenus infecting wild-living chimpanzees and gorillas. Genome Biol Evol 2016;8:1929-39.
- Sundararaman SA, Plenderleith LJ, Liu W, *et al.* Genomes of cryptic chimpanzee *Plasmodium* species reveal key evolutionary events leading to human malaria. Nat Commun 2016;7:11078.
- Liu W, Li Y, Shaw KS, Learn GH, *et al.* African origin of the malaria parasite *Plasmodium vivax*. Nat Commun 2014;5:3346.
- Sundararaman SA, Liu W, Keele BF, *et al.* *Plasmodium falciparum*-like parasites infecting wild apes in southern Cameroon do not represent a recurrent source of human malaria. PNAS 2013;110:7020-5.



Gorille. Crédit photo : Eric Delaporte.

- Ayoub A, Mouacha F, Learn GH, *et al.* Ubiquitous Hepatocystis infections, but no evidence of *Plasmodium falciparum*-like malaria parasites in wild greater spot-nosed monkeys (*Cercocebus nictitans*). Int J Parasitol. 2012;42:709-13.

### Le projet PRI-MAL

**Partenaire :** UMR 145 TRANSVIHMI (IRD), UPENN (USA), University of Edinburgh (UK), CREMER (Cameroun), INRB (République Démocratique du Congo).

### COORDINATRICE

**Martine Peeters :** martine.peeters@ird.fr



## RAINWEBS

Que se passera-t-il si les forêts tropicales s'assèchent ?  
Changement climatique et réseaux trophiques le long  
d'un gradient latitudinal

## — Rappel des objectifs

L'objectif de ce projet est de comprendre les interactions entre biogéographie et changement climatique afin de disséminer une théorie multi-régionale sur la façon dont le climat affecte les écosystèmes, et pouvoir ainsi extrapoler nos résultats à des portions non étudiées du gradient biogéographique. Nous avons manipulé les communautés aquatiques de petits systèmes écologiques (les réseaux trophiques microbiens et faunistiques contenus entre les feuilles des broméliacées à réservoir d'eau), pour tester la généralité de réponses écosystémiques au changement. Notre projet est organisé en trois tâches : (i) Déterminer si les réponses des interactions multipartites et fonctions écosystémiques aux altérations des précipitations diffèrent entre régions ; (ii) établir si les différences de réponse entre régions sont déterminées par le remplacement biogéographique des espèces ou par l'environnement ; (iii) séparer les effets directs des changements de précipitations liés à la physiologie des organismes des effets indirects liés aux interactions interspécifiques. Nous avons altéré la fréquence et l'intensité des précipitations qui alimentent les broméliacées à trois sites : en Guyane (le centre de radiation des broméliacées et un hotspot de diversité), au Costa-Rica (pool d'espèces modéré), et à Puerto-Rico (Caraïbes, faune appauvrie).

## — Résultats majeurs

Les fonctions écosystémiques sont à leur optimum à chaque site aux conditions actuelles, mais déclinent en cas de sécheresse. Il y a contingence géographique de la réponse des réseaux trophiques et fonctions écosystémiques aux précipitations, du fait de différences d'hydrologie des habitats, de qualité des détritux, mais surtout de composition des communautés en termes de richesse spécifique et de diversité des traits fonctionnels représentés. Des sécheresses plus intenses et fréquentes ont des effets plus significatifs lorsque la richesse spécifique locale et la redondance des traits fonctionnels sont faibles. Les sécheresses prolongées affectent essentiellement la réalisation de fonctions

écosystémiques par des effets sublétaux sur les organismes. De fait, la composition des réseaux trophiques détermine l'effet des changements de régime des précipitations sur le fonctionnement du système (Figure 1). Nous nous attendons donc à ce que les fonctions des écosystèmes soient plus sensibles aux changements de la répartition des espèces, plutôt qu'aux effets directs des précipitations.

## — Production scientifique et valorisation

Articles publiés (3 autres articles en cours d'évaluation) :

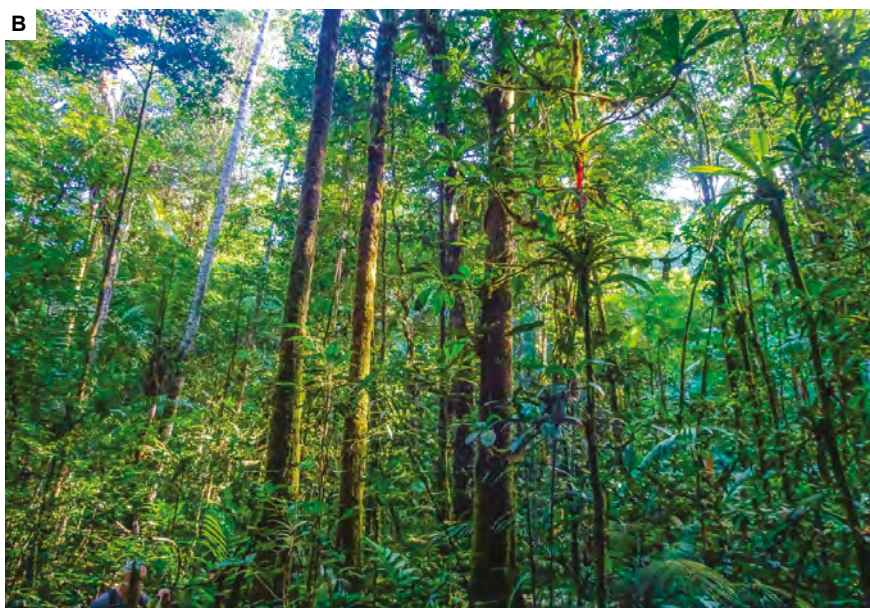
- Amundrud S.L. *et al.* Oecologia 189: 733-744.
- Dézerald O. *et al.* 2015. Freshwater Biology 60: 1917-1929.
- Dézerald O. *et al.* 2017. Freshwater Biology 62: 229-242.
- Leroy C. *et al.* 2017. Hydrobiologia 802: 85-95.
- Rodríguez Pérez H. *et al.* 2018. Oecologia 187: 267-279.
- Trzcinski M.K. *et al.* 2016. Journal of Animal Ecology 85: 1147-1160.
- 1 thèse Dézerald O. 2015. Université de Guyane.
- Organisation d'un symposium « The ecological importance of tank-forming plants in tropical rainforests. » et participations à cinq conférences et séminaires.

## Le projet RAINWEBS

**Partenaires :** UMR 5245 Laboratoire d'Ecologie Fonctionnelle et Environnement (Université Paul Sabatier Toulouse 3), UMR 8172 Ecologie des forêts de Guyane (INRA), UMR 6023 Laboratoire Micro-organismes : Génome et Environnement (Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand), Biodiversity Research Center-University of British Columbia (Canada).

## COORDINATEUR

**Régis Céréghino :** [regis.cereghino@univ-tlse3.fr](mailto:regis.cereghino@univ-tlse3.fr)



A) Broméliacée à réservoir d'eau. B) Site d'étude.  
Crédits photos : R.Cereghino.



# RAMSESII

## Rôles de l'agroforesterie dans l'intensification durable des petites exploitations et la sécurité alimentaire des sociétés en Afrique de l'ouest

### — Rappel des objectifs

RAMSESII a pour objectif de fournir des scénarios innovants de gestion pour l'intensification durable des parcs agroforestiers ouest-africains qui soient co-construits avec les parties prenantes pour maximiser et pérenniser leur adoption, et ce à deux échelles :

1) À l'échelle de l'exploitation, avec les exploitants, par une modélisation bio-économique participative basée sur un diagnostic scientifique économique, environnemental, agronomique et social, associé à une connaissance contextuelle. Le modèle bio-économique simule des scénarios d'intensification des parcs (densification, nouvelles techniques de gestion des arbres, introduction de nouvelles espèces, etc.) proposés par les exploitants. Il fournit leurs impacts sur les revenus agricoles et les performances environnementales.

2) À l'échelle du territoire villageois, avec les parties prenantes concernées (autorités étatiques et coutumières, groupements de producteurs et exploitants, entreprises des chaînes commerciales, ONG, etc.) dans le cadre d'une approche participative visant à co-construire des mesures (régime foncier, droits d'accès aux ressources) qui soient adaptées et réalistes pour soutenir les exploitants et producteurs(trices) qui souhaitent se lancer dans l'intensification.

### — Résultats majeurs

Peu de résultats encore car le projet a démarré le 1<sup>er</sup> septembre 2018 mais la plupart des financements n'étaient pas disponibles. De plus, du retard a été pris aussi à cause de l'insécurité croissante au Burkina, en particulier dans la région d'un des 4 sites du projet, Yilou, auquel nous ne pouvons plus accéder depuis février 2019.

### — Production scientifique et valorisation

Les 7 communications suivantes ont été faites dans des sessions parallèles variées au 4<sup>e</sup> Congrès Mondial sur l'Agroforesterie qui s'est tenu à Montpellier du 20 au 22 mai 2019 (<https://agroforestry2019.cirad.fr/news-press>) :

- Douzet J.M. *et al.* 2019. Long-term *Piliostigma reticulatum* intercropping in the Sahel: Impact of the density of shrub on sorghum yield. Poster, session 3 « *Agroforestry for combating land degradation and desertification in dry areas* ».
- Jourdan C *et al.* 2019. Effect of coppice management of shrubs associated with cereals on their root dynamics features in dry Western Africa. Communication orale (keynote talk), session 23 « *Roots issues in agroforestry* ».
- Leroux L. *et al.* 2019. Impacts of FMNR on the agricultural performance of smallholder farming systems at landscape scale in Senegal. Poster, session 10 « *Agroforestry in practice* ».
- Ndao Bet *et al.* 2019. A remote sensing based approach for optimizing sampling strategies in tree monitoring and agroforestry systems mapping. Communication orale, session 16 « *Agroforestry mapping* ».
- Rouspard O. *et al.* « *Faidherbia-Flux* »: adapting crops to climate changes in a semi-arid agro-sylvo-pastoral open observatory (Senegal). Communication orale, session 2 « *Agroforestry and adaptation to climate change* ».



Atelier de démarrage du projet RAMSESII à la Représentation IRD de Ouagadougou (Burkina Faso) 3-8 septembre 2018. Crédit Photo : D. Dumet.

- Rouspard O. *et al.* « *Faidherbia-Flux* », an open observatory for GHG balance and C stocks in a semi-arid agro-sylvo-pastoral system (Senegal). Poster, session 1 « *Mitigating climate change with agroforestry* ».
- Seghieri J. *et al.* 2019. Roles of Agroforestry in sustainable intensification of small farms and food SEcurity for Societies in West Africa. Communication orale, session 8 « *Scaling up of agroforestry innovations* ».

### Le projet RAMSESII

**Partenaires :** UMR 5569 HydroSciences Montpellier (IRD), UMR Eco&Sols (CIRAD), ISRA (Sénégal), INERA (Burkina Faso), WAS-CAL (Burkina Faso), 3 ONGs Internationales : APAF, Birdlife, GSA.

### COORDINATRICE

**Josiane Seghieri :** [josiane.seghieri@ird.fr](mailto:josiane.seghieri@ird.fr)

## RESIPATH

## Quelle réponse des forêts et de la société en Europe aux parasites d'origine exotique ?

## — Rappel des objectifs

Les introductions de champignons pathogènes en dehors de leur aire d'origine, favorisées par les échanges internationaux, sont une des causes principales d'émergence de maladies. Ces nouvelles maladies sont particulièrement problématiques en forêt en raison des impacts à long terme et de la difficulté d'application de méthodes de lutte. Le projet RESIPATH visait à mieux caractériser l'impact de ces invasions, à comprendre les processus d'adaptation chez les arbres et à proposer des outils pour l'épidémiologie-surveillance. Une enquête a d'autre part été réalisée pour estimer le niveau de perception du risque sanitaire pour les forêts et d'acceptabilité par le public européen de mesures de réduction de ce risque.

## — Résultats majeurs

**1. Estimation de l'impact des pathogènes invasifs :** Une estimation précise des taux de mortalité annuelle des frênes et des aulnes, causée respectivement par la chalarose et la maladie à *Phytophthora alni*, a été réalisée. Pour les deux maladies, la mortalité est extrêmement forte chez les plus jeunes arbres et décroît avec le diamètre des tiges. L'impact à long terme est très dépendant de l'âge auquel le peuplement a été atteint. La dynamique des dépérissements est également fortement influencée par le climat.

**2. Adaptation des populations d'arbres forestiers aux nouveaux pathogènes :** L'hypothèse d'une sélection naturelle pour la résistance résultant de la pression de sélection exercée par les pathogènes introduits a été testée en comparant la sensibilité de populations d'arbres avant et après épidémie. Les résultats obtenus pour le *Phytophthora* des aulnes sont conformes à des effets de sélection naturelle, c'est-à-dire qu'on observe en moyenne une sensibilité moins élevée après épidémie. Pour l'oïdium des chênes, les différences de sensibilité observées chez les jeunes semis pourraient s'expliquer à la fois par des effets de sélection ayant opéré sur leur arbre-mère mais également des effets liés au poids et à la qualité des glands. Des différences significatives de sensibilité à l'oïdium sont montrées entre populations européennes de chênes, en cohérence avec la structuration en groupes génétiques distincts. La distribution des trois espèces cryptiques d'oïdium a pu être précisée à l'échelle de l'Europe.

**3. Détection précoce des champignons invasifs par captures de spores :** Différentes méthodes de captures de spores ont été combinées avec des méthodes moléculaires de détection pour proposer des outils d'épidémiologie-surveillance. Pour *H. fraxineus*, agent de la chalarose, des spores ont été détectées jusqu'à 100 km du front de maladie observée et la probabilité de signalements de maladie dans les 2 ans qui suivent dans un voisinage de 20 km d'une détection positive est environ 7 fois plus forte comparée à un piège ne détectant pas *H. fraxineus*. Cette méthode s'avère donc potentiellement très intéressante comme outil de détection précoce. Les résultats acquis ont d'autre part permis de modéliser la dispersion aérienne du champignon. Pour *F. circinatum*, agent du chancre poisseux des pins, des spores ont été détectées à la fois dans l'air et sur insectes, mais jamais à plus de 200 m du centre des parcelles infectées. Concernant la détection sans a priori de spores de parasites potentiels, basée sur un piégeage passif couplé au séquençage haut débit, nous avons mis en évidence des différences importantes sur la diversité observée induites par le type de piège et le type de marqueur utilisés.

**4. Perception par le public du risque lié aux invasions de pathogènes forestiers et acceptabilité de différentes mesures de gestion :** Une enquête menée dans 9 pays européens sur



Crédit : Carte mondiale : Wikipedia ([https://en.wikipedia.org/wiki/Civil\\_aviation#/media/File:World-airline-routemap-2009.png](https://en.wikipedia.org/wiki/Civil_aviation#/media/File:World-airline-routemap-2009.png)) - Photos : INRA.

3 500 personnes a montré un niveau de perception du risque et d'acceptabilité de différentes mesures relativement élevé. Toutefois la connaissance de maladies spécifiques est faible et les maladies (notamment d'origine exotique) ne viennent qu'en 2<sup>e</sup> ou 3<sup>e</sup> position comme cause citée de mauvaise santé des arbres, après la pollution et le climat. La perception du risque est positivement associée à l'exposition aux médias. Les mesures les plus acceptables concernent l'éducation et les standards de production des plants forestiers, en particulier l'étiquetage pour assurer la traçabilité. On observe peu de différences entre pays européens, la France se situant dans la moyenne. L'analyse plus approfondie des données au niveau français montre une meilleure connaissance des maladies dans le sous-échantillon de propriétaires forestiers. Toutefois, les niveaux de perception du risque et d'acceptabilité des mesures sont peu différents de ceux de la population générale.

## — Production scientifique et valorisation

- Chandelier A. *et al.* 2016. Plant Pathol, 65: 441–450.
- Marçais B. *et al.* 2017. Baltic Forestry 23: 159-167.
- Grosdidier M. *et al.* 2018. FEMS Microbiol. May 1;94(5).
- Aguayo J. *et al.* 2018. Appl. Envir. Microbiol. 84(11): AEM.02637-17
- Eriksson L. *et al.* 2018. Ambio Vol. 48, Issue 1, pp 1–12. <https://link.springer.com/journal/13280/48/1/page/1>
- Desprez-Loustau *et al.* 2018. Fungal Ecology. Vol. 36, pp 39-50.
- et al.* 2016. Plant Pathol, 65: 441–450.

## Le projet RESIPATH

**Partenaires :** UMR 1202 BIOGECO (INRA), UMR1136 Interactions arbres/micro-organismes (INRA), Laboratoire de la santé des Végétaux-unité de mycologie (ANSES), Julius Kühn Institut (Allemagne), Federal Research and Training Center for Forests Natural Hazards and Landscape (Autriche), Institute for Agricultural and Fisheries Research (Belgique), AgroBioInstitute (Bulgarie), Centre Tecnològic Forestal de Catalunya (Espagne), Norwegian forest and landscape institute (Norvège), Norwegian Institute for Agricultural and Environmental Research (Norvège), University of Algarve (Portugal), Swedish University of Agricultural Sciences (Suède), Plant Protection Central Research Institute (Turquie).

## COORDINATRICE

Marie-Laure Desprez-Loustau :  
marie-laure.desprez-loustau@inra.fr

## ReVeS

## REconnaissance de VEgétaux pour des interfaces Smartphones

## — Les Smartphones, également des outils pour apprendre la nature qui nous entoure !

L'urbanisation de ces dernières décennies et l'intérêt croissant pour les nouvelles technologies ont conduit les hommes à s'éloigner de la nature et à ne plus connaître leur environnement. Ainsi, par exemple, peu de personnes savent reconnaître les espèces d'arbres les plus communes en France. On constate par ailleurs que tout le monde, ou presque, possède désormais un Smartphone. Il ne s'agit pas de simples appareils permettant uniquement de téléphoner mais de véritables téléphones intelligents intégrant des fonctionnalités de prise de photos, de vidéos, de géolocalisation, de connexion à Internet, et autres capteurs etc. L'idée du projet ReVeS est d'utiliser de tels outils pour réapprendre aux individus à (re)connaître les végétaux qui les entourent à partir d'une photo de leurs feuilles.

Un tel outil, au-delà d'un usage personnel, pourrait ouvrir la voie à de nouvelles recherches dédiées aux espaces naturels. Il pourrait également être utilisé dans le cadre de parcs urbains ou être appliqué à la végétation sauvage dans la ville qui devient une question écologique importante. Enfin, il serait susceptible d'être utilisé dans le cadre de jeux sérieux, avec, par exemple, des objectifs pédagogiques.

## — Résultats majeurs

Les verrous scientifiques que nous avons dû lever pour mener à bien ce projet sont nombreux.

Ils concernent d'abord le traitement automatique des images. L'utilisateur est en effet guidé par l'application pour prendre en photo une feuille et effectuer une marque sur celle-ci avec son doigt. Ensuite, le traitement est complètement automatique et fait appel à des algorithmes dédiés qui permettent d'extraire l'objet d'intérêt, la feuille, et d'autre part, de calculer des descripteurs de forme visant à reconnaître l'espèce.

À cela s'ajoute le fait qu'un Smartphone possède un GPS, ce qui nous a naturellement conduit à exploiter les connaissances phytogéographiques et la répartition des espèces en France. Des études ont donc porté sur la cartographie des facteurs influents à l'échelle du territoire. D'autres se sont concentrées sur la recherche de méthodes écologiques permettant de caractériser les arbres par des paramètres écologiques.

Ensuite, la fusion de toutes ces données constitue un véritable défi. Il a fallu trouver non seulement un moyen de sélectionner les données pertinentes mais également de les combiner. Enfin, nous avons étudié les usages possibles d'un tel dispositif.

Dans le cadre du projet ReVeS, nous avons donc proposé des méthodes d'analyse d'images dédiées permettant la segmentation et la caractérisation des feuilles d'arbre en se basant sur une modélisation originale de leurs formes. Nous avons cartographié, à l'échelle du territoire, les facteurs déterminants, la présence des espèces et avons travaillé sur les méthodes permettant de caractériser les arbres par des paramètres écologiques. Enfin, nous avons proposé une méthode basée sur la théorie des fonctions de croyance permettant de combiner toutes ces données.

Nous avons intégré l'implémentation de notre système de reconnaissance dans l'application Folia afin de valider notre approche dans un cadre réel.



## — Production scientifique et valorisation

Les recherches menées dans le cadre du projet ReVeS ont donné lieu à une vingtaine d'articles dans des revues ou conférences internationales et à des présentations orales dans des conférences internationales, nationales ou dans des séminaires.

Outre les avancées scientifiques dans les domaines de l'analyse d'images, de la fusion de donnée et de la phytogéographie, le projet ReVeS a permis le développement de l'application Folia de reconnaissance d'arbres et arbustes, de plus de 1m20 natifs de France, à partir de photos de leurs feuilles. Cette application est gratuitement disponible sur l'AppStore et sur le Google Store. Elle permet non seulement à un utilisateur de reconnaître l'espèce mais également, elle tend à apprendre à l'utilisateur comment la reconnaître. Son site web et sa base de données associés ont pour vocation de récupérer les données acquises par les utilisateurs qui l'autorisent afin notamment d'améliorer les algorithmes développés et de recueillir des données géolocalisées.

## Le projet ReVeS

**Partenaires :** UMR 5205 LIRIS (CNRS-Université Louis Lumière Lyon III), UMR 5600 Environnement Ville Société (Université de Saint-Étienne Jean Monnet), UR LISTIC (Université Savoie Mont Blanc), Société Linéenne de Lyon.

## COORDINATRICE

**Laure Tougne :** laure.tougne@liris.cnrs.fr



## SecPriMe<sup>2</sup>

# Balance entre métabolisme primaire et secondaire dans une forêt méditerranéenne soumise au changement climatique

### — Rappel des objectifs

L'objectif du projet SecPriMe<sup>2</sup> est d'étudier la réponse des écosystèmes forestiers méditerranéens à l'aridification prévue par les modèles climatiques, en termes de fonctionnement, de biodiversité et de bilan de carbone. Le modèle choisi est la forêt de Chêne pubescent (*Quercus pubescens*) particulièrement sensible aux changements climatiques car se situant dans des zones de transitions bioclimatiques. L'utilisation de la plateforme AnaEE O<sub>3</sub>HP équipée d'un système d'exclusion de pluie nous permet de manipuler l'écosystème et de mettre en place les protocoles expérimentaux prévus.

Notre hypothèse est celle d'un impact en cascade de l'augmentation de la sécheresse, affectant le métabolisme primaire (photosynthèse, croissance), le métabolisme secondaire, par un accroissement de la production de molécules de défenses dans les feuilles et la litière. Ceci pourrait affecter le processus de décomposition et les interactions biotiques. De plus, la remise à disposition des ressources pourrait à son tour modifier la balance métabolisme primaire vs métabolisme secondaire et le bilan de carbone.

Le projet SecPriMe<sup>2</sup> a été mis en œuvre sur la plateforme AnaEE O<sub>3</sub>HP ce qui a permis d'exclure, tout au long du projet, entre 30 et 35 % des pluies durant la période de végétation simulant un stress hydrique aggravé tel que prévu par les scénarios climatiques. Durant 4 années, des arbres de la parcelle contrôle (sécheresse naturelle) et de la parcelle exclue (sécheresse aggravée) ont été suivis en termes de phénologie, croissance, paramètres photosynthétiques, nutriments, production de composés secondaires et d'antioxydants. Ces mesures ont bénéficié de matériel sophistiqué permettant une analyse très fine de l'ensemble des paramètres étudiés. En parallèle, des expérimentations permettant de mesurer l'impact de la sécheresse accrue sur des processus écosystémiques comme la décomposition des litières ou les processus allélopathiques ont été réalisées *in situ*, en pépinière et en laboratoire pour comprendre finement les processus. La biodiversité liée à ces processus a également été analysée afin de mettre en évidence les changements de communautés dans les forêts soumises au changement climatique.

### — Résultats majeurs

Les résultats montrent que la sécheresse aggravée imposée aux chênes a eu un effet limité sur leur métabolisme mais celui-ci a évolué avec la récurrence du stress. Contrairement aux hypothèses initiales, les chênes ont maintenu leur croissance au détriment des composés secondaires de défense. Les effets sur les processus sont plus accentués. La sécheresse aggravée diminue la biodiversité du sol et le processus de décomposition et accentue l'effet négatif des composés secondaires sur le développement des herbacées et du chêne pouvant ainsi modifier les communautés végétales et le fonctionnement de cet écosystème.

### — Production scientifique et valorisation

15 articles parus dans des revues internationales, 3 soumis ou en révision et 7 en préparation dont :

- Genard AC. *et al.* PLoS One 9 (11): e112418.
- Fernandez C. *et al.* 2016. Front Plant Sci. 7: 594.
- Santonja M. *et al.* 2017. J Ecol 105(3): 801-815.
- Hashoum H. *et al.* 2017. Eur J Forest Res 136 (4): 699-710.
- Genard AC. *et al.* 2018 Biogeosciences 15(15):4711-4730.
- Saunier A. *et al.* 2018. Plant Cell Environ 41(10):2299-2312.
- Gavinet J. *et al.* 2019. Forest Ecol Manag. Vol. 441 : 262-270.

12 présentations orales et 1 poster dans des congrès internationaux et participation à 11 réunions nationales.

Les résultats ont été présentés dans 10 congrès internationaux 5 doctorants, 6 M2, 11 M1 et 14 L3.

#### Le projet SecPriMe<sup>2</sup>

**Partenaires :** UMR 7263 IMBE (Université d'Aix-Marseille), UMR 7265 BIAM (ex-IBEB) (CEA), UMR 8212 LSCE (CEA), UMR 34 CEREGE (ex-GSE) (INRA), Université de Liège (Belgique).

#### COORDINATRICE

**Catherine Fernandez :** catherine.fernandez@imbe.fr

Vue de l'O<sub>3</sub>HP : Système d'exclusion de pluie déployé sur la forêt de chênes pubescents permettant de simuler l'aggravation de la sécheresse prévue par les scénarios de changement climatique (système ouvert – système fermé permettant l'exclusion).



## smallFOREST

## Biodiversité et services écosystémiques des petits fragments forestiers dans les paysages européens

## — Rappel des objectifs

L'objectif du projet smallFOREST était de caractériser et de quantifier la biodiversité et les services écosystémiques (SE) à différentes échelles dans le cas de petits bois clairsemés au sein de matrices paysagères agricoles contrastées le long d'un gradient sud-ouest – nord-est à travers le biome tempéré européen. En particulier, il s'agissait (i) de décrire la richesse et la composition spécifiques et la diversité structurelle et fonctionnelle des communautés de plantes vasculaires ; (ii) de relier ces communautés à un ensemble de facteurs environnementaux, paysagers et historiques ; (iii) de mettre en relation la biodiversité observée avec un ensemble de SE le long du gradient ; (iv) de déterminer l'importance fonctionnelle de la biodiversité pour les différentes catégories de SE ; (v) de caractériser les compromis et les synergies parmi les SE délivrés par les bois ; (vi) de caractériser la valorisation socio-économique des SE ; et (vii) de produire des éléments de décision en faveur de la valorisation des SE et du développement durable des territoires agricoles.

En Europe tempérée, la fragmentation a conduit à un émiettement du couvert forestier qui, dans les paysages agricoles, prend l'aspect de petits bois clairsemés d'une surface n'excédant pas quelques hectares. Nos résultats ont montré que la biodiversité végétale (plantes vasculaires) était principalement déterminée par des facteurs locaux, en particulier l'hétérogénéité structurelle du bois, bien que l'ancienneté forestière joue un rôle crucial pour les espèces spécialistes de l'habitat forestier. Les facteurs paysagers jouent un rôle important, mais secondaire ; en revanche, les facteurs macroclimatiques ont une influence mineure, ce qui suggère que, contrairement à ce qui est observé dans les grandes régions forestières du monde, les petits bois sont majoritairement des systèmes isolés qui échangent peu d'espèces les uns avec les autres. Une conséquence plausible est leur faible résilience en contexte de changements climatiques globaux. La tendance est confirmée, bien que moins marquée, pour les insectes étudiés (carabes). Préserver la biodiversité dans les petits bois suppose donc de conserver les bois les plus anciens, comme refuges pour les espèces spécialistes, et d'augmenter la perméabilité de la matrice paysagère dans lesquels ils se trouvent, par exemple en réduisant les intrants agricoles.

## — Résultats majeurs

Contre toute attente, malgré leur biodiversité moindre par rapport aux grands massifs forestiers, les petits bois sont capables de délivrer davantage de SE par unité de surface, toutes choses égales par ailleurs (notamment l'ancienneté forestière). Ceci peut s'expliquer par l'intense effet lisière, qui est associé à de multiples services. La biodiversité en elle-même a un effet positif pour de faibles intensités de SE, ainsi que sur certains SE en particulier, comme, par exemple, la prédation par les mollusques dans les cultures adjacentes aux bois. Pour d'autres SE, comme le stockage de carbone dans le sol, la biodiversité n'a pas d'effet significatif. La stratégie de gestion des petits bois en paysage agricole doit donc faire face à un compromis entre la conservation de la biodiversité et l'intensité des SE délivrés. Cela inclut les SE « négatifs », comme par exemple le risque de contracter la maladie de Lyme par morsure de tique, pour lequel un effet de dilution a pu être démontré, qui réduit le risque dans les bois à forte hétérogénéité.

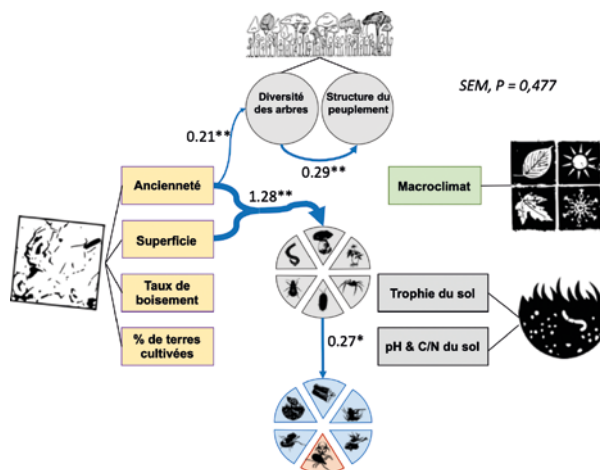


Schéma montrant la relation entre les facteurs environnementaux (caractéristique des fragments forestiers, contexte paysager, structure des peuplements, sol, climat), la biodiversité et les services écosystémiques délivrés, à l'aide d'un modèle d'équations structurales. L'ancienneté et la taille du fragment sont les principaux facteurs expliquant la biodiversité de ce fragment, elle-même influençant positivement la quantité de services écosystémiques potentiellement délivrés.

Malgré leur importante contribution à la multifonctionnalité des paysages agricoles, les petits bois sont ignorés des politiques publiques. Il est donc urgent de définir des outils politiques pertinents qui puissent, d'une part, informer les usagers des paysages agricoles européens sur les bénéfices qu'ils peuvent tirer des petits bois, et, d'autre part, permettre leur gestion adéquate et durable. Il existe une demande sociétale en ce sens, bien que celle-ci ne coïncide pas toujours avec les mesures écologiques qu'il faudrait mettre en œuvre pour favoriser la biodiversité et/ou les SE.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet smallFOREST a donné lieu à de nombreuses publications scientifiques, à plusieurs articles de vulgarisation ou à destination de décideurs (policy briefs), à des réunions publiques d'information des usagers et à de nombreuses communications à des colloques.

## Le projet smallFOREST

**Partenaires :** UMR 7058 EDYSAN (Université de Picardie Jules Verne), UMR 1201 DYNAFOR (INRA), Bremen University et Leibniz-ZALF Müncheberg et University of Freiburg (Allemagne), Swedish Environmental Research Institute et Swedish University of Agricultural Sciences – Alnarp, Stockholm University (Suède), Tartu University (Estonie), Forest Science Center of Catalonia (Espagne), University of Ghent et University of Leuven (Belgique).

## COORDINATEUR

**Guillaume Decocq :** guillaume.decocq@u-picardie.fr

## SOUDABOIS 2

## Développement d'un procédé de soudage du bois pour des usages en extérieur

## — Rappel des objectifs

Le soudage du bois est une technique d'assemblage sans adhésif de deux pièces de bois ; la soudure étant produite par friction mécanique sous pression. Les performances mécaniques des pièces assemblées par soudage par friction peuvent être aussi bonnes que celles obtenues par collage avec des adhésifs conventionnels, mais elles dépendent fortement des paramètres du procédé et de l'essence de bois. La principale faiblesse du soudage du bois est la mauvaise résistance à l'humidité du joint soudé. Le premier objectif du projet était de développer un procédé de soudage du bois permettant d'obtenir une soudure résistante à l'eau. Une autre incertitude concernait la durabilité au sens large de cette nouvelle technique d'assemblage. Enfin, il était important d'analyser l'impact qualitatif sur le soudage de certains paramètres liés à l'hétérogénéité du bois et de chercher à piloter en temps réel le cycle de soudage en fonction de paramètres mesurés.

## — Résultats majeurs

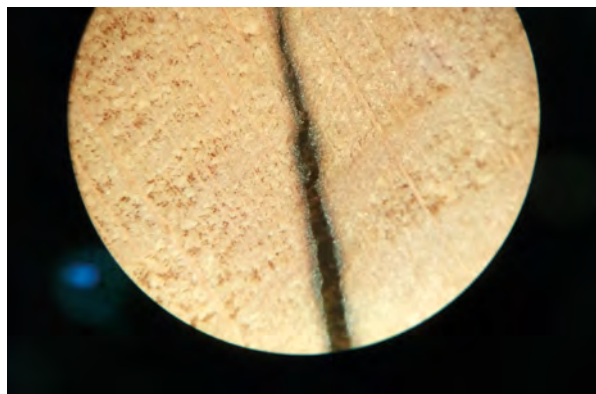
Le premier objectif du projet a été abordé selon deux axes de recherche. Le premier axe a consisté à identifier et tester différents additifs biosourcés susceptibles de rendre la soudure résistante à l'eau. Le deuxième axe a consisté à : 1) évaluer l'aptitude au soudage de différents bois traités ou modifiés qui sont utilisés en extérieur et 2) étudier la résistance à l'eau de la soudure obtenue et le comportement de l'assemblage lors de variations dimensionnelles du bois. Afin de comprendre le comportement du joint de soudage en présence d'eau, plusieurs techniques d'analyse telles que la résonance magnétique nucléaire et la microscopie de force atomique ont été utilisées.

Parmi les différents additifs étudiés, seul l'ajout de colophane ou d'acide citrique sur les surfaces à assembler a permis d'obtenir un effet hydrofuge et un joint de soudure performant. L'acide citrique exerce un effet catalytique sur la réaction de soudage en modifiant la structure chimique du bois. Avec ces deux additifs, on observe tout de même une rupture de la soudure quand le bois est soumis à des phénomènes importants de retrait / gonflement lorsque sa teneur en eau varie.

Des résultats originaux ont été obtenus lors de l'étude du soudage du bois d'épicéa en bois de bout. Il a été montré que, lors du soudage sous pression élevée, des entures « naturelles » se formaient en raison de la différence de densité entre le bois de printemps et le bois d'été. Les entures ainsi créées augmentent la surface de contact entre les pièces soudées et rendent la pénétration d'eau plus difficile.

Parmi les différents types de bois traités ou modifiés étudiés, seul le bois acétylé a permis d'obtenir une soudure performante mécaniquement, résistante à l'immersion dans l'eau (plusieurs semaines) et aux variations dimensionnelles. Des analyses par RMN indiquent une augmentation du rapport lignine/cellulose dans le joint de soudure qui pourrait jouer un rôle important sur les performances du soudage. Les très faibles coefficients de retrait / gonflement du bois acétylé pourraient aussi expliquer la résistance de la soudure lors de variations de température et d'humidité.

Parmi les différentes solutions explorées pour obtenir du bois soudé utilisable en extérieur, seul le bois acétylé soudé a résisté aux cycles de variation de température et d'humidité de l'air en enceinte climatique ainsi qu'au vieillissement naturel (3 ans d'exposition en extérieur) ou accéléré (équivalent à 10 ans de vieillissement naturel).



Observation au microscope optique de la rupture d'un joint de soudage due à la présence d'eau (bois de hêtre). Crédit photo : Elise Baldenberger (CRITT Bois).

Afin d'étudier l'incidence de la variabilité du bois (densité, largeur et orientation des cernes, singularités) sur les performances du soudage, différents plans d'expérience ont été conduits. L'étude a montré que l'effet des facteurs liés à la nature intrinsèque du bois était nettement moins important que la préparation des surfaces avant soudage (opérations d'usinage, rabotage et ponçage). Enfin, il a été montré que le dégagement de CO<sub>2</sub> lors du soudage pouvait être un bon indicateur de la qualité de la soudure. Les essais ont été réalisés avec un capteur de CO<sub>2</sub> sensible et rapide basé sur une technologie de mesure par infrarouge non dispersif. Le pilotage du procédé repose sur l'arrêt du soudage au début de l'apparition du CO<sub>2</sub>.

## — Production scientifique et valorisation

Publications internationales :

- Amirou S *et al.* 2017. Water resistance of natural joint of spruce produced by linear friction welding without any treatment. *Int Wood Prod J.* 8:201-207.
- Amirou S *et al.* 2017. Citric acid as waterproofing additive in butt joints linear wood welding. *Eur J Wood Prod.* 75:651-654.
- Belleville B *et al.* 2017. Optimization of wood welding parameters for Australian hardwood species. *BioRes.* 12:1007-1014.
- Amirou S *et al.* 2016. Variation of shear properties of welded spruce at different pressures and welding times. *Biotribology.* 5:61-66.

Article de vulgarisation :

- Amirou S, Pizzi A. 2018. Soudage du bois par friction - Amélioration des propriétés de soudage en milieu humide. Les Techniques de l'Ingénieur - Dossier n° N4230.

## Le projet SOUDABOIS 2

**Partenaires :** CRITT Bois, EA4370 LERMAB (Université de Lorraine), UMR 7361 IS2M (CNRS-Université de Haute-Alsace), BURGER SAS.

## COORDINATEUR

**Eric Masson :** [eric.masson@cricbois.net](mailto:eric.masson@cricbois.net)



## SPONFOREST

# Révéler le potentiel de l'établissement spontané des forêts pour améliorer les fonctions et services écosystémiques dans les paysages dynamiques

## — Rappel des objectifs

SPONFOREST vise à élucider le potentiel de l'établissement spontané des forêts comme un moyen crédible et rentable pour renforcer les réseaux de forêts autosuffisantes dans des paysages ruraux fragmentés. Concrètement, le projet abordera trois grandes questions :

1. Comment les nouveaux îlots forestiers s'établissent-ils ?
2. Quelles sont les conséquences du processus d'établissement pour les caractéristiques et le fonctionnement de ces îlots ?
3. Quels services écosystémiques fournissent-ces îlots, et comment sont-ils perçus et gérés par les acteurs locaux et les politiques locales ?

## — Résultats majeurs

Le projet est basé sur un total de cinq systèmes d'étude en France et en Espagne qui comprennent un large éventail de paysages, de contextes socio-écologiques et d'essences majeures en expansion. Des études écologiques approfondies des peuplements forestiers récemment établis (y compris, entre autres, la cartographie, le génotypage et l'étude dendrochronologique de 4 110 arbres individuels) sont complétées par des analyses paysagères basées sur la télédétection et des études sociologiques qui traitent de la perception et de la gouvernance du reboisement spontané à partir d'études et d'entretiens qualifiés. A ce jour, les premiers résultats sont encore largement préliminaires et fragmentaires ; les résultats consolidés seront bientôt disponibles dans les articles de recherche prévus (voir la section suivante).

Nous avons constaté que, globalement, l'Europe a connu un gain net de 55 341 km<sup>2</sup> (1,4 %) de surface forestière entre 1992 et 2015. Le gain forestier total de 237 131 km<sup>2</sup> est dû en grande partie au reboisement (actif ou passif) d'anciennes surfaces agricoles (Palmero *et al.*, données non publiées).

Les études sur le terrain ont révélé comme caractéristique saillante la grande hétérogénéité des cas étudiés ; ce qui représente un défi pour les comparaisons quantitatives directes mais fournit des informations précieuses sur les différents moteurs écologiques et sociaux du reboisement spontané. En général, nous concluons que ce phénomène peut être un processus assez dynamique, rendant efficaces et politiquement faisables les pratiques de gestion connexes pour la défragmentation du paysage. Les forêts nouvellement établies peuvent présenter un fonctionnement particulier, y compris un taux accru de croissance et de fixation du carbone, mais aussi une plus grande sensibilité à la sécheresse (Alfaro-Sánchez *et al.* 2019. *Agr. For. Meteorol.* 226-227: 107630.).

La perception locale de la reforestation spontanée dépend fortement du contexte socio-économique plus large : les habitants des régions marginales caractérisées par une situation économique difficile, l'exode rural, les changements démographiques et un manque général de perspectives sont plutôt frustrés par les changements de paysage liés à la croissance des forêts, alors que les habitants des régions économiquement saines avec des paysages très fragmentés sont beaucoup plus positifs quant à l'existence et à l'augmentation des surfaces forestières dans leur environnement. Les cinq systèmes d'étude ont en commun le fait que les systèmes de gouvernance ne reconnaissent pas encore le phénomène du reboisement spontané ou ne s'y sont pas préparés.



L'équipe du projet SPONFOREST à la réunion de lancement 2017 à Cestas.  
Crédit photo : Fabrice Vetillard.

## — Production scientifique et valorisation

Jusqu'à présent, six articles connexes ont été publiés dans des revues scientifiques internationales et divers rapports ont été édités. Dans l'ensemble, la principale production scientifique du projet consiste en deux numéros spéciaux connexes dans des revues scientifiques internationales en cours d'élaboration et qui seront publiés en 2020 :

- Garcia C, Espelta JM, Hampe A (eds.) Managing forest regeneration and expansion at a time of unprecedented global change. *Journal of Applied Ecology*.
- Hampe A, Alfaro-Sánchez R, Martin-Forés I (eds.) Establishment of second-growth forests in human landscapes: ecological mechanisms and genetic consequences. *Annals of Forest Science*.

Le principal événement de communication est un atelier international pour les décideurs politiques et les parties prenantes intitulé « *New Research Findings for Sustainable Use of Europe's Forests and Their Genetic Resources: Policy Implications* », organisé conjointement par cinq initiatives de recherche européennes différentes (SPONFOREST, le projet H2020 GenTree, le projet Interreg SUSTREE, le projet LIFE LIFEENMON et le programme EUFORGEN) et se tiendra à Bruxelles en décembre 2019. Cet atelier sera associé à une réunion du *Standing Forestry Committee*, l'organisme de l'UE le plus haut niveau en matière de gestion forestière.

Le projet comprend la production d'un policy brief, dont la forme précise fait actuellement l'objet de discussions avec le secrétariat de BiodivERsa. La publication est prévue pour fin 2019.

Enfin, une série d'activités mineures de diffusion et de communication des résultats ont été entreprises par les différents partenaires du projet, et un dépliant du projet existe en trois langues.

### Le projet SPONFOREST

**Partenaires :** UMR 1202 BIOGECO (INRA), UR Écologie des Forêts Méditerranéennes (INRA), European Forest Institute (Finlande), Unique Forestry and Landuse GmbH (Allemagne), Université d'Hohenheim (Allemagne), ICETA (Portugal), CREAF (Espagne), CSIC (Espagne).

### COORDINATEUR

**Arndt Hampe :** [arndt.hampe@inra.fr](mailto:arndt.hampe@inra.fr)

## SPOP

# Production durable d'huile de palme : stratégies pour améliorer la connaissance sur le système de culture

## — Rappel des objectifs

La filière de production de l'huile de palme doit faire face à une demande mondiale en pleine expansion, portée par l'élévation du niveau de vie des pays émergents et leur croissance démographique. Les enjeux d'une production durable sont à la fois économiques, sociaux et environnementaux. Afin de promouvoir et de faire reconnaître les efforts consentis par les acteurs de la filière pour mettre en place une production durable, divers schémas de certification existent.

Dans ce contexte, le projet SPOP a contribué à consolider et approfondir les bases scientifiques de ces schémas de certification. Le projet s'est intéressé en priorité au premier maillon de la chaîne de valeur – la plantation – car une multiplicité de systèmes de production s'y rencontre, qui vont de la parcelle familiale de moins d'un hectare au périmètre agroindustriel rassemblant blocs de plantation et usines d'extraction. SPOP a permis de décrire ces multiples systèmes de production et d'en comprendre les trajectoires, les pratiques et les principaux impacts en termes de durabilité.

Le Projet SPOP était destiné à mieux comprendre les impacts de la production d'huile de palme dans ses dimensions économique, écologique et sociale. Il a permis de combiner l'expertise d'équipes issues de plusieurs champs disciplinaires (agronomie, économie, sciences humaines et sociales, agro-écologie). Il s'est agi d'acquérir des connaissances scientifiques validées et de proposer des outils pour évaluer la durabilité des divers systèmes de production. Cette approche a impliqué les acteurs de la filière dans le processus d'innovation via des approches spécifiques menées à différents stades du projet : enquêtes, modélisation multi-agents ou ateliers... permettant notamment de mieux identifier les obstacles et d'analyser si ces derniers sont dus à une incapacité intrinsèque du système de culture à s'adapter ou plutôt à un accès limité des acteurs aux connaissances et aux outils nécessaires. Afin de mesurer les impacts de la culture du palmier à huile en Indonésie, nous avons principalement adopté le cadre de travail développé par la FAO pour l'Observatoire des Agricultures du Monde, en orientant nos recherches vers les petits planteurs – un groupe d'acteurs majeurs qui assure 40 % de la production mondiale d'huile de palme.

## — Résultats majeurs

- Les travaux de terrain SPOP entrepris en Indonésie et au Cameroun ont mis en évidence la très grande variabilité des pratiques et des impacts des systèmes de production d'huile de palme. Nos principaux résultats mettent en exergue que cette diversité est le fondement de nombreuses incertitudes quant aux impacts avérés de l'huile de palme et aux leviers adaptés pour améliorer chaque type de système. Le décryptage de la multiplicité des producteurs et de leurs trajectoires est indispensable pour identifier les possibilités d'amélioration et faire des recommandations adaptées aux divers contextes de production et stratégies.
- Le projet SPOP a clairement illustré que les visions de la durabilité et des défis mondiaux varient considérablement entre les producteurs de terrain, notamment les petits planteurs, et les autres acteurs de la filière huile de palme. Ces conceptions divergentes sont les plus susceptibles d'induire des goulots d'étranglement dans la définition et la mise en œuvre des bonnes pratiques et devraient être pris en compte dans le raffinement des critères de durabilité.



Plantation d'huile de palme. Crédit photo : C. Bessou.

► Dans le cadre du projet SPOP, nous avons étudié les futurs possibles du palmier à huile à l'aide d'analyses prospectives participatives et d'un travail de modélisation multi-agents. Nos travaux de recherche ont montré que le développement des capacités et de l'organisation des petits planteurs, notamment en coopérative, ainsi que des partenariats équitables et des formes combinées de gouvernance sont des facteurs clé pour garantir de bonnes pratiques et un développement durable à l'échelle du paysage.

## — Production scientifique et valorisation

Les nombreux résultats scientifiques générés par le projet SPOP sont de nature diverse. Au-delà de la publication d'articles scientifiques dans des revues à comité de lecture (11), ces résultats ont été partagés dans des conférences scientifiques (15) et interprofessionnelles ou lors d'ateliers de travail (12 articles de vulgarisation et 7 rapports techniques incluant un policy brief). Les activités de prospective collective initiées par le projet SPOP avec les acteurs de la filière ont été directement exploitées sur le terrain, avec un impact immédiat, en Indonésie sur la planification foncière au niveau du district d'étude et au Cameroun sur la mise en place d'une stratégie nationale de développement du palmier à huile.

### Le projet SPOP

**Partenaires :** UPR Performance des systèmes de culture des plantes pérennes (CIRAD), UMR MOISA (CIRAD), UMR 220 Gouvernance, Risque, Environnement, Développement (IRD), UPR 55 Agro-systèmes territoires et ressources (INRA), Cifor (Indonésie), PT SMART/SMARTRI (Chine).

### COORDINATRICE

**Cécile Bessou :** [cecile.bessou@cirad.fr](mailto:cecile.bessou@cirad.fr)

# StressInTrees

## Approche couplée physiologique et micro-mécanique de la génération des contraintes de maturation dans le bois de tension

— **Quels sont les mécanismes permettant aux arbres de maintenir leur posture et comment se mettent-ils en place pendant la croissance de l'arbre ? (Quel est le moteur et comment marche-il ?)**

La forme des arbres est liée à la mise en place de fortes contraintes mécaniques dans le bois en périphérie de leurs axes (branches, tronc) en croissance. Ces contraintes mécaniques sont générées au sein de la paroi des fibres de bois pendant leur genèse (dite maturation cellulaire). Ces contraintes deviennent très fortes dans le « bois de tension » chez les feuillus. L'objectif de ce projet était de suivre l'évolution biochimique des parois et les modifications physico-mécaniques associées au cours de leur maturation, afin de proposer un modèle réaliste de génération de ces contraintes de maturation dans les arbres.

L'étude a été menée sur deux espèces choisies pour leur stratégie différente de former leur bois de tension. Le peuplier, dont les fibres de bois de tension mettent en place dans leur paroi une couche particulière gélatineuse (la couche G), et le simarouba, avec des fibres de bois de tension sans couche G. La démarche était de i) caractériser les changements dans la composition des parois et de leurs propriétés pendant la maturation, ii) identifier les déclencheurs moléculaires associés à ces changements, iii) construire un modèle micro-biomécanique réaliste de la mise en contrainte du bois pendant la maturation.

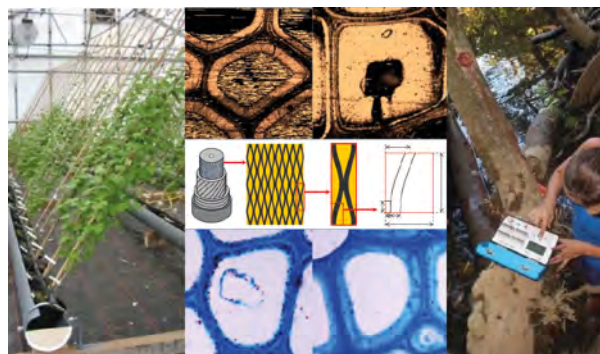
### — Résultats majeurs

Le projet a permis de proposer un modèle crédible de génération des contraintes du bois de tension, basé sur le gonflement d'une partie de la paroi, en phase avec son épaissement, sa rigidification et sa mise en tension pendant la maturation. Les xyloglucanes proposés par d'autres comme acteur majeur dans la création des contraintes n'ont jamais été détectés, tandis que RGI (rhamnogalacturonanes I) et AGP (protéines à arabino galactanes) semblent jouer un rôle majeur. Enfin, le projet a montré que le mécanisme à couche G est très répandu chez les feuillus, mais avec de nombreuses variantes incluant parfois une lignification tardive de la couche G. Enfin, le projet a permis un résultat inattendu sur le rôle de l'écorce dans les mécanismes moteurs des arbres. Chez de nombreuses espèces, l'écorce contribue de manière significative au redressement actif des tiges.

### — Production scientifique et valorisation

Le projet a donné lieu à deux chapitres d'ouvrage (Springer Series in Wood Science) et 17 publications dans des journaux s'adressant à des communautés très variées de la biologie végétale (Botanical Journal of the Linnean Society, Planta (x2), Frontiers in Plant Science, New Phytologist (x2)), à la foresterie (Tree Physiology, Trees - Structure and Functions, Annals of Forest Science, IAWA Journal (x2)) à la technologie (Wood Science and Technology (x2), Composites: Part A, Industrial Crops and Products, Fibers) ou délibérément à l'interface (Journal of the Royal Society Interface). Plus largement, les résultats ont donné lieu à 16 présentations dans des conférences internationales et 22 présentations en conférences nationales.

► Chang, Quignard, Alméras, Clair (2015) Mesoporosity changes from cambium to mature tension wood: a new step toward the understanding of maturation stress generation in trees. *New Phytol.* 205: 1277-1287.



Mesures en forêt tropicale (droite) ou en serre tempérée (gauche), observation des cellules en microscopie à force atomique (haut) ou après immuno-marquage (bas) et modélisation du comportement mécanique de la paroi (milieu). Crédits photos : Gauche et Bas : F. Laurans/INRA/AGPF ; Haut : O. Arnould/Univ. Montpellier/LMGC ; milieu : T. Alméras/CNRS-LMGC ; Droite : B. Clair/CNRS-LMGC.

- Arnould, Arinero (2015) Towards a better understanding of wood cell wall characterisation with contact resonance atomic force microscopy. *Composites: Part A*. 74: 69-76.
- Roussel, Clair (2015) Evidence of the late lignification of the G-layer in Simarouba tension wood, to assist understanding how non-G-layer species produce tensile stress. *Tree Physiol* 35: 1366-1377.
- Alméras, Clair (2016) Critical review on the mechanisms of maturation stress generation in trees. *JRS Interface*. 13: 20160550.
- Guedes, Laurans, [...] Déjardin A, Pilate G. (2017) Non-cellulosic polysaccharide distribution during G-layer formation in poplar tension wood fibers: abundance of rhamnogalacturonan I and arabinogalactan proteins but no evidence of xyloglucan. 246: 857-878.
- Ghislain, Clair (2017) Diversity in organisation and lignification of tension wood fibre walls – a review. *IAWA J*. 38: 245-265.
- Arnould, Siniscalco, Bourmauda, Le Duigou, Baley (2017) Better insight into the nano-mechanical properties of flax fibre cell walls. *Ind. Crops Prod.* 97 (2017) 224-228.
- Alméras, Ghislain, Clair, Pilate, Secerovic, Fournier (2018) Quantifying the motor power of trees. *Trees*. 32:689-702.
- Clair, Dejardin, Pilate, Alméras (2018) Is the G-layer a tertiary cell wall? (Opinion paper) *Front. Plant Sci.* 9: 623.
- Clair, Ghislain, Prunier, Lehnbach, Beauchêne, Alméras (2019) Mechanical contribution of secondary phloem to postural control in trees: the bark side of the force. *New Phytol.* 221: 209-217.

#### Le projet StressInTrees

**Partenaires :** UMR 8172 ECOF0G [CIRAD], UPR 588 AGPF [INRA], UMR 5508 LMGC [Université Montpellier 2].

#### COORDINATEUR

**Bruno Clair :** bruno.clair@cnrs.fr



# SUCROL

## Bioraffinerie lignocellulosique pour la production simultanée de cellulose et de pentoses pour la fabrication de tensio-actifs verts

### — Rappel des objectifs

À l'échelle mondiale l'industrie papetière produit près de 150 millions de tonnes par an de fibres de cellulose de pureté comprise entre 80 % et 98 % selon les fabrications, principalement à partir de bois. La cellulose, qui représente 40 % du bois, est le principal constituant de ce dernier qui est valorisé dans ces usines, les autres constituants étant brûlés. Une stratégie intéressante serait d'extraire au moins une partie des hémicelluloses, deuxième constituant majoritaire du bois, avant de réaliser l'extraction de la cellulose. Celles-ci sont des polymères de sucres, constituées principalement de xylanes (pentoses) et de glucomannanes (hexoses) selon les essences de bois.

L'objectif du projet est de développer une filière de production d'agents tensioactifs non ioniques bio-sourcés à partir de sucres extraits du bois dans une unité de production de cellulose. Cette filière doit être compatible avec la production d'une pâte cellulosique de qualité de sorte que l'industriel papetier produira à la fois des sucres pour la synthèse d'agents tensioactifs et de la cellulose, ce qui améliorera la rentabilité de son unité. Les sucres extraits devront être obtenus sous une forme convenant à la synthèse d'agents tensioactifs. Les agents tensioactifs produits se substitueront aux tensioactifs d'origine fossile et ne feront pas appel à des sucres issus de matière première alimentaire, contrairement aux récents développements dans ce domaine.

### — Résultats majeurs

Les résultats du projet SUCROL ont montré qu'il était possible d'extraire une quantité importante de sucres de bois feuillus tout en garantissant la production d'une cellulose de qualité. De plus il a été montré que l'extraction des sucres facilitait la cuisson du bois, ce qui est un avantage supplémentaire pour l'industriel. Les liqueurs extraites, constituées principalement d'un mélange de sucres sous forme monomères et oligomères, ont permis la production de tensio-actifs, moyennant une adaptation du procédé.

L'expérience acquise dans ce projet a permis aux partenaires de participer à deux projets de recherche de grande envergure, le projet FUI Polywood, monté par le pôle de compétitivité AXELERA et le projet FUI BIO3 coordonné par Fibre Excellence.

### — Production scientifique et valorisation

Les résultats de ces travaux ont été présentés à 4 conférences scientifiques internationales (European Workshop on Lignocellulosics and Pulp (Helsinki), Nordic Wood Biorefinery Conference (Helsinki), Wood Chem Conference (Nancy) et International Symposium on Lignocellulosics, Fibers and Pulp (Vancouver)), à une journée technique organisée par le pôle de compétitivité Axelera, à une publication scientifique dans une revue internationale à comité de lecture (Holzforschung) et à un article de vulgarisation dans l'Actualité Chimique.

#### Le projet SUCROL

**Partenaires :** UMR 5518 LPG2 (Grenoble INP-Pagora), Fibre Excellence R&D Kraft, Société Seppic.

#### COORDINATRICE

**Christine Chirat :** christine.chirat@grenoble-inp.fr

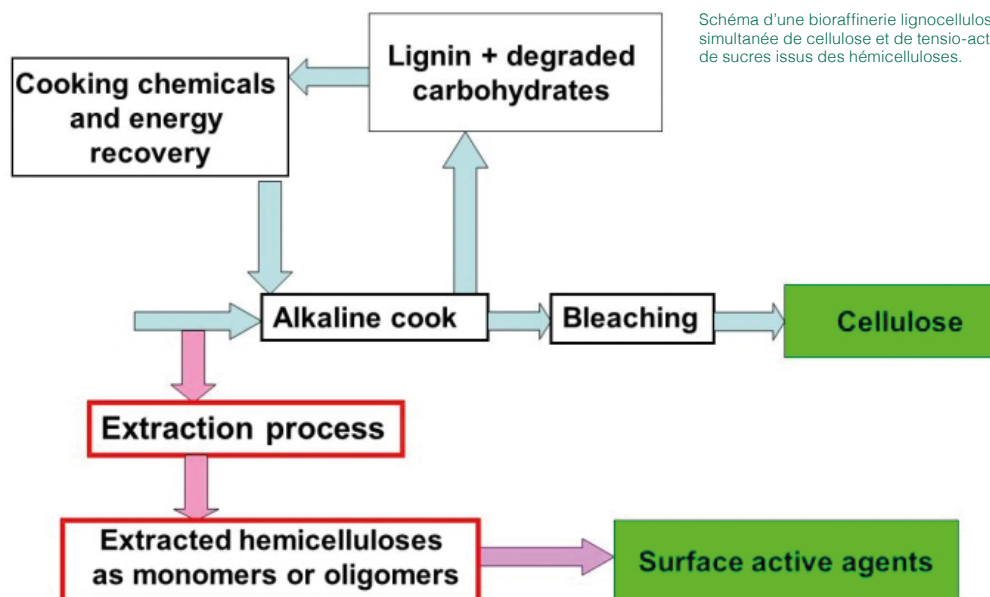


Schéma d'une bioraffinerie lignocellulosique pour la production simultanée de cellulose et de tensio-actifs biosourcés à base de sucres issus des hémicelluloses.

## SYBIOPOP

# Une approche de biologie intégrative pour améliorer le peuplier en vue de sa valorisation en bio-raffinerie grâce à une meilleure compréhension de l'architecture génétique de la production et de la qualité de la biomasse lignocellulosique

## — Rappel des objectifs

Le peuplier est une ressource d'intérêt pour la valorisation de la biomasse lignocellulosique en bio-raffinerie. Toutefois les variétés actuellement disponibles n'ont pas été améliorées dans cet objectif. Il est donc crucial d'étudier la variabilité et les déterminismes génétiques des caractères affectant le rendement et la qualité de la biomasse.

Les études précédentes chez différentes espèces de peuplier ont rapporté un faible nombre de facteurs génétiques à effet relativement faible comparativement à l'héritabilité moyenne à élevée des caractères cibles soulignant leur complexité. Le projet SYBIOPOP ambitionnait d'adresser au moins en partie cette limite d'une part en se focalisant sur les interactions épistatiques (entre gènes), les interactions entre gènes et environnement, et les variants alléliques rares ; et d'autre part en utilisant l'expression des gènes comme des phénotypes intermédiaires entre les phénotypes mesurés à l'échelle de l'organisme et les polymorphismes nucléotidiques.

## — Résultats majeurs

Une approche de biologie intégrative a été mise en œuvre afin de combiner des informations génomique, transcriptomique et phénotypique dans une large collection d'individus originaires de populations naturelles de peuplier noir couvrant l'aire de répartition de l'espèce en Europe de l'Ouest. La méthodologie mise en œuvre a permis d'aboutir aux résultats suivants :

- Une meilleure connaissance de la variabilité génétique des propriétés du bois chez le peuplier noir.
- L'identification et le génotypage de plus de 800 000 SNP chez 241 génotypes de peuplier noir utilisables pour identifier des régions du génome potentiellement impliquées dans l'adaptation locale et dans le déterminisme génétique des caractères d'intérêt.
- L'identification de gènes candidats pour la production et la qualité du bois par génétique d'association pan-génomique
- Une meilleure connaissance de la variabilité et du fonctionnement de l'expression des gènes, via leur mise en réseau et leur utilisation pour prédire les caractères cibles.
- La définition du concept de sélection phénotomique comme alternative et complément à la sélection génomique.

## — Production scientifique et valorisation

Articles scientifiques et chapitres d'ouvrage :

- Plomion C. *et al.* (2016) Forest tree genomics: 10 achievements from the past 10 years and future prospects. *Annals of Forest Science*, 73 (1), 77-103. DOI : <https://doi.org/10.1007/s13595-015-0488-3>
- Gebreselassie MN. *et al.* (2017) Near-infrared spectroscopy enables the genetic analysis of chemical properties in a large set of wood samples from *Populus nigra* (L.) natural populations. *Ind. Crops Prod.* 107, 159-171. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.05.013>
- Chaix G. *et al.* (2018) Near Infrared Spectroscopy, a new tool to characterize wood for use by the cooperage industry. In: *Chemistry of Lignocellulosics: Current Trends*. CRC Press.
- Rogier O. *et al.* (2018) Accuracy of RNAseq based SNP discovery and genotyping in *Populus nigra*. *BMC Genomics*, 19, 909. DOI : <https://doi.org/10.1186/s12864-018-5239-z>
- Rincint R. *et al.* (2018) Phenomic selection is a low-cost and high-throughput method based on indirect predictions: proof of concept on wheat and poplar. *G3: Genes, Genomes, Genetics*, 8 (12), 3961-3972. DOI : <https://doi.org/10.1534/g3.118.200760>
- Chateigner A., *et al.* (2019) The relationship between gene co-expression network connectivity and phenotypic prediction sheds light at the core of the omnigenic theory. *bioRxiv*. DOI : <https://doi.org/10.1101/523365>.

### Le projet SYBIOPOP

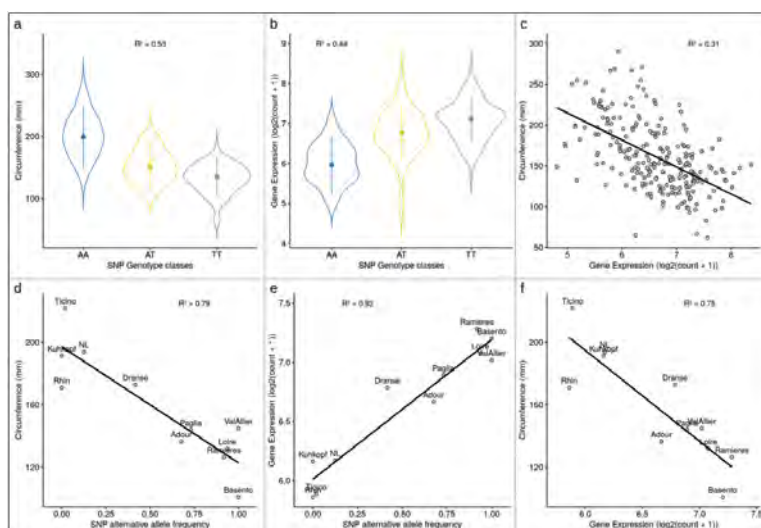
**Partenaires :** UR 588 Amélioration, Génétique et Physiologie Forestière (INRA).

### COORDINATEUR

**Vincent Segura :** [vincent.segura@inra.fr](mailto:vincent.segura@inra.fr)

Illustration de l'approche intégrative mise en œuvre dans le projet SYBIOPOP pour comprendre les déterminismes génétiques de la production de bois.

Niveau génotypique : effet de la substitution allélique du SNP le plus significatif sur la circonférence (a) et sur l'expression du gène dans lequel se trouve le SNP (b) et corrélation entre l'expression du gène dans lequel se trouve le SNP et la circonférence (c).  
Niveau population : corrélations de la fréquence de l'allèle alternatif du SNP le plus significatif avec la circonférence (d) et avec l'expression du gène dans lequel se trouve le SNP (e) et corrélation entre l'expression du gène dans lequel se trouve le SNP et la circonférence (f).



## SYMActino

Endosymbioses chez les plantes actinorhiziennes :  
signalisation et mécanismes cellulaires associés à la  
colonisation racinaire— Étudier les mécanismes clefs par lesquels les plantes  
actinorhiziennes initient et régulent la colonisation par  
des symbiontes bactériens et fongiques

Le projet SYMActino avait comme objectifs l'étude des réponses moléculaires et cellulaires au cours des étapes précoces des interactions symbiotiques entre 2 plantes hôtes actinorhiziennes (*Casuarina glauca* et *Discaria trinervis*) et 2 microsymbiontes du sol : la bactérie fixatrice d'azote *Frankia* et un champignon mycorrhizien à arbuscules (AMF). Un des objectifs majeurs était la comparaison de la signalisation et l'expression des gènes symbiotiques et de la réorganisation cellulaire chez ces 2 espèces dont le mode de colonisation par *Frankia* est soit intracellulaire (*C. glauca*) soit intercellulaire (*D. trinervis*).

L'approche principale a été d'analyser *in vivo* les réponses des 2 hôtes aux symbiotes bactérien et fongique en utilisant de l'imagerie cellulaire alliant la microscopie confocale et divers gènes rapporteurs fluorescents. Les réponses étudiées (activation des oscillations calciques et remodelage cellulaire) sont spécifiquement associées à la reconnaissance de l'endosymbiote et ensuite à la mise en place de la colonisation racinaire.

## — Résultats majeurs

Nous avons d'abord évalué la capacité des 2 hôtes actinorhiziens à percevoir des facteurs symbiotiques sécrétés d'origine bactérienne ou fongique. L'étude de cette communication précoce hôte-microsymbiote a été menée par le suivi de l'activation d'une voie de signalisation symbiotique hautement conservée (appelée CSSP=Common Symbiotic Signalling Pathway) dans l'épiderme racinaire de l'hôte en réponse à des exsudats microbiens. Pour cela, des rapporteurs fluorescents de la concentration calcique ont été introduits chez les plantes hôtes, ce qui a permis le suivi de réponses calciques typiques de la CSSP dans le noyau. De cette façon, nous avons pu identifier et partiellement caractériser des signaux symbiotiques générés par *Frankia* ou les AMFs.

Ensuite, pour l'imagerie cellulaire durant les stades précoces de la colonisation racinaire, nous avons utilisé des marqueurs fluorescents additionnels pour visualiser simultanément la réorganisation cellulaire, notamment du cytoplasme, la migration du noyau, et le remodelage pariétal. Afin de corrélérer ces observations avec la colonisation par *Frankia*, nous avons développé un marquage fluorescent permettant d'identifier les filaments de *Frankia* à l'intérieur des tissus de l'hôte et utilisé un gène de l'hôte spécifiquement activé durant la colonisation bactérienne.

Résultats majeurs :

1. Les exsudats de *Frankia* induisent des oscillations calciques typiques de la CSSP dans les poils absorbants de *C. glauca*. La nature chimique des facteurs symbiotiques de *Frankia* diffère de celle des lipochitooligosaccharides caractérisés dans la symbiose *Rhizobium*-légumineuse.
2. Nous avons pu montrer que le chitotetraose (CO4) peut mimer l'activation de la CSSP par des exsudats de AMF chez les 2 hôtes actinorhiziens, suggérant que les oligomères courts de chitine jouent un rôle central dans la signalisation symbiotique AM.
3. Au cours des étapes précoces de l'infection intercellulaire par *Frankia* chez *D. trinervis*, un remodelage majeur s'opère au niveau des cellules corticales directement adjacentes aux filaments de *Frankia*, indiquant que cette étape est activement orchestrée par la plante-hôte.



Nodules de *Discaria trinervis*. Crédit photo : Alice Vayssières, IRD Montpellier.

## — Production scientifique et valorisation

- Imanishi *et al.* (2015). Molecular biology of infection and nodule development in *Discaria trinervis* – *Frankia* actinorhizal symbiosis. In Biological Nitrogen fixation ; Frans de Bruijn (Ed.). John Wiley & Sons, pp. 433–440.
- Chabaud *et al.* (2016). Chitinase-resistant hydrophilic symbiotic factors secreted by *Frankia* activate both Ca<sup>2+</sup> spiking and *NIN* gene expression in the actinorhizal plant *Casuarina glauca*. New Phytol. 209:86-93.
- Fournier *et al.* (2018). Cell remodeling and subtilase gene expression in the actinorhizal plant *Discaria trinervis* highlight host orchestration of intercellular *Frankia* colonization. New Phytol. 219:1018-1030.
- Gherbi *et al.* (2019). Molecular methods for research on actinorhiza. In: Reinhardt D., Sharma A. (eds) Methods in Rhizosphere Biology Research. Springer, Singapore.
- Hoher *et al.* (2019). Signalling in actinorhizal root nodule symbioses. Antonie Van Leeuwenhoek 112:23–29.
- Chabaud *et al.* (2019). Chitotetraose activates the fungal-dependent endosymbiotic signaling pathway in actinorhizal plant species. PLoS One, soumis.

## Le projet SYMActino

Partenaires : UMR 232 DIADE (IRD), UMR 441-2594 LIPM (INRA-CNRS).

## COORDINATEUR

Hassen Gherbi : hassen.gherbi@ird.fr



# Tiptree

## Scenarios de la biodiversité des forêts en Europe face au changement global : identifier les points de basculement micro-évolutifs

### — Rappel des objectifs

Le projet Tiptree visait à étudier le potentiel des arbres à s'adapter aux changements climatiques en cours, et comment les actions humaines interfèrent dans cette adaptation.

Les forêts couvrent environ 23 % des terres émergées dans le monde et fournissent un ensemble de services écosystémiques, notamment la séquestration du carbone, la disponibilité en eau douce et le support de la biodiversité. Toutefois, des effets majeurs des changements climatiques et de l'utilisation des terres sur les forêts sont attendus et des points de basculement pourraient être atteints, avec un effondrement soudain des populations d'arbres, entraînant des effets irréversibles sur le fonctionnement des écosystèmes.

Le potentiel d'adaptation des populations d'arbres pourrait néanmoins être élevé : en plus de la poursuite dans l'espace de leur niche écologique par migration, les populations d'arbres pourraient s'adapter à court terme grâce à la tolérance physiologique individuelle (plasticité) et / ou à long terme par la réponse évolutive à la sélection induite par les variations climatiques. Cependant, les taux de changements environnementaux observés et prévus, bien au-delà des oscillations naturelles passées, soulèvent la question de la rapidité avec laquelle les espèces d'arbres peuvent s'adapter.

Nous avons abordé cette question par une approche d'écologie prédictive combinant des estimations génomiques et génétiques du potentiel d'adaptation des populations pour six essences alpines, tempérées, méditerranéennes et tropicales, la modélisation des dynamiques éco-évolutives des populations d'arbres et un dialogue entre chercheurs et parties prenantes pour identifier les défis et les solutions d'adaptation pour les forêts soumises au changement climatique.

### — Résultats majeurs

La combinaison d'approches de modélisation, de génétique et de génomique permet de prédire si l'adaptation génétique dans un environnement changeant peut éviter le déclin de la population d'arbres.

Lorsque les conditions environnementales se détériorent au-delà du point où elles provoquent un déclin démographique, l'adaptation consiste alors en une course entre le déclin et le changement évolutif. Ce n'est que lorsque les changements environnementaux ne sont pas trop rapides et marqués, que la population est grande, et que le potentiel d'évolution est élevé, qu'une population peut être sauvée par adaptation génétique.

Nous avons utilisé des modèles pour intégrer les principaux caractères phénologiques, physiologiques ou morphologiques déterminant la dynamique forestière dans un environnement changeant, et pour estimer les valeurs seuils des paramètres clés (par exemple, la concentration en réserves carbonées, le potentiel hydrique des feuilles) conduisant à la mortalité ou à l'échec de la reproduction des arbres.

Les approches génomiques ont permis d'identifier des gènes soumis à une sélection divergente chez les populations proches le long de gradients environnementaux, confirmant ainsi l'existence d'adaptation locale à l'échelle du paysage dans les forêts de montagne et les forêts tropicales. Les approches génétiques quantitatives ont fourni des estimations de la variabilité génétique des principaux caractères adaptatifs, confirmant ainsi le potentiel adaptatif non négligeable des populations d'arbres.



Le consortium Tiptree en janvier 2015. Crédit photo : INRA.

Enfin, l'intégration de la variabilité génétique de ces traits adaptatifs clés dans un modèle basé sur les processus a montré qu'ils peuvent évoluer sur quelques générations et que les changements phénotypiques contribuent à atténuer le déclin de la population.

### — Production scientifique et valorisation

Notre projet a produit plus de 30 publications scientifiques et a contribué à soutenir 7 thèses de doctorat. Plusieurs membres du consortium ont participé à des actions de sensibilisation des parties prenantes et du public sur le changement climatique et l'adaptation des forêts (entrevues avec la presse, émissions radiodiffusées, documentaires télévisés, événements publics). Le projet Tiptree a notamment organisé l'atelier « De la science à la pratique : la contribution des projets Tiptree et AMTools à l'amélioration de la survie et de la régénération des forêts dans le cadre de scénarios de changement global ».

#### Le projet Tiptree

**Partenaires :** UR Écologie des Forêts Méditerranéennes (INRA), UMR 1202 BIOGECO (INRA), UMR 745 ECOF0G (Unité Écologie des Forêts de Guyane), UMR 5554 ISEM (CNRS-Université Montpellier 2), Université Philipps à Marburg (Allemagne), Université d'Uppsala (Suède), CNR-Firenze (Italie), INIA-CIFOR (Espagne), ONF (France), LRF (Suède), EFIMED (Europe).

#### COORDINATRICE

**Sylvie Oddou-Muratorio :** [sylvie.muratorio@inra.fr](mailto:sylvie.muratorio@inra.fr)

## TIT-OAK

## Les oiseaux devraient-ils utiliser les plantes comme remède contre le changement climatique ?

## — Rappel des objectifs

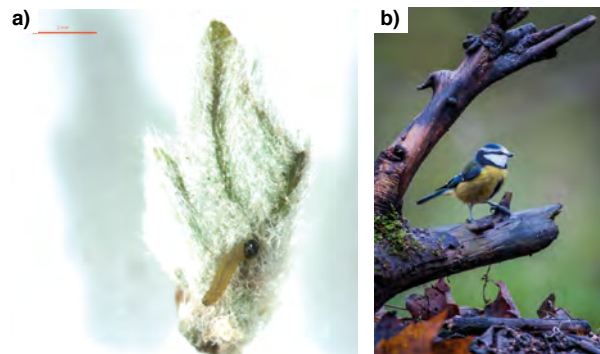
Le projet de recherche vise à étudier la réponse de populations aux changements environnementaux au travers des relations trophiques entre oiseaux, végétation et insectes. En particulier, nous étudions comment des mésanges bleues (*Cyanistes caeruleus*) utilisent le développement printanier des bourgeons de chênes pour prédire le pic d'abondance de chenilles (i.e. la source de nourriture principale pour élever les poussins des mésanges, et le facteur de sélection principal de la période de ponte des oiseaux), une nouvelle approche de la biologie des changements globaux. Dans ce cadre, un premier objectif du projet consiste à mettre en parallèle la reproduction des mésanges avec le développement local de la végétation, estimé à partir d'images satellites à très haute résolution. Nous évaluons ensuite les conséquences en terme de succès reproducteur de l'adéquation de la période de reproduction des oiseaux avec le développement de la végétation locale. Les autres objectifs du projet font appel à des approches expérimentales. Elles visent d'abord à identifier et caractériser les substances volatiles et non-volatiles produites par les chênes lors du développement de leurs bourgeons au printemps. En parallèle, nous étudions si ces substances sont modifiées par l'action des chenilles lorsqu'elles consomment les bourgeons en croissance. Enfin, nous exposons des mésanges à ces substances et nous mesurons leurs réponses au travers de leur physiologie reproductrice et de leurs dates de ponte.

## — Résultats majeurs

Le projet étant toujours en cours, nombre de résultats sont encore partiels et en phase d'analyse. L'analyse des premières images satellites suggère qu'il existe une relation entre le développement de la végétation, quantifié par images satellites, et la date d'entrée en reproduction des mésanges : les oiseaux pondent plus tôt dans les zones de la forêt où les arbres débourrent tôt. Cependant, il nous manque encore de la puissance statistique pour pouvoir utiliser notre méthode d'analyse la plus aboutie et la plus intégrative. Les premiers résultats suggèrent par ailleurs qu'il existe une relation entre la période de reproduction des oiseaux par rapport aux arbres et le succès reproducteur de ces oiseaux : ceux qui arrivent à se reproduire autour de la période de débourrement des arbres sont ceux qui arrivent à élever le plus de jeunes. Ce résultat devra être confirmé dans les analyses encore à venir.

Nous avons également réussi à caractériser un ensemble de substances volatiles émises par les bourgeons de chênes lors de leur croissance et nous en avons identifié une dizaine qui était modifiée par l'action des chenilles à l'intérieur des bourgeons. Nous avons commencé à tester les effets de ces substances sur les mésanges au travers de différentes expériences.

Au cours d'une première expérience, nous avons montré que les mésanges étaient capables de discriminer uniquement à l'odeur un chêne infesté par des chenilles d'un chêne non infesté. Par la suite, nous avons testé si la diffusion d'odeurs de chênes infestés par des chenilles accélérail le développement sexuel saisonnier des mésanges. Ces résultats sont en cours d'analyse, et l'expérience sera répétée l'an prochain afin d'augmenter la taille d'échantillon. Par ailleurs, nous avons également assemblé un cocktail d'odeurs artificielles à partir des composés induits par



a) Jeune chenille de tordeuse verte du chêne (*Tortrix viridana*) sur un bourgeon de chêne pubescent (*Quercus pubescens*). Crédit photo : S. Caro.  
b) Mésange bleue (*Cyanistes caeruleus*). Crédit photo : S. Caro.

la présence des chenilles dans les bourgeons et nous avons exposé des oiseaux sauvages à ces odeurs afin de tester si leur présence avançait la date de ponte des oiseaux. Là également cette expérience qui a été menée en 2019 et qui est en cours d'analyse, sera répétée en 2020.

## — Production scientifique et valorisation

- Caro, S. 2016. Should birds use plants as a remedy for climate change? Parid meeting, Montpellier, France (communication orale).
- Froud L. 2017. Linking spring development of vegetation with timing of breeding and reproductive success of blue and great tits in three Mediterranean landscapes using high-resolution satellite imagery (stage de Master 2).
- Graham, J (postdoc ANR Tit-Oak); Bonadonna, F.; Caro, S. 2019. Olfactory detection of caterpillar infestation in oak trees by an insectivorous songbird. European Ornithologists' Union conference, Cluj-Napoca, Roumanie (communication orale).

## Le projet TIT-OAK

Partenaire : UMR 5175 CEFE (CNRS).

## COORDINATEUR

Samuel Caro : samuel.caro@cefe.cnrs.fr

## TRANSMUT

## Rôle du transportome aux interfaces biotrophes des interactions mutualistes plantes-champignons

## — Des champignons au service des hommes ?

Vers une meilleure utilisation des mycorhizes en production végétale à travers la compréhension des échanges de nutriments entre les deux partenaires

Les mycorhizes sont le résultat d'associations bénéfiques entre la plupart des plantes terrestres et des champignons du sol. Dans cette association symbiotique mutualiste, le champignon permet à la plante un meilleur accès à l'eau et aux nutriments du sol (notamment phosphore (P), azote (N) et potassium (K)), ainsi qu'une résistance accrue à certains stress biotiques et abiotiques. En échange la plante fournit au champignon des sucres issus de la photosynthèse. La compréhension des mécanismes permettant un échange efficace des nutriments est crucial pour un management raisonné de la forêt et des cultures. Le transport des nutriments se fait aux travers de membranes cellulaires fongiques et végétales. L'objectif principal du projet était de contribuer à l'élucidation des mécanismes à la base des échanges d'éléments nutritifs à l'interface biotrophe, notamment par l'identification des transporteurs clés ainsi que leur caractérisation fonctionnelle et l'analyse de leur régulation spatiale et dynamique.

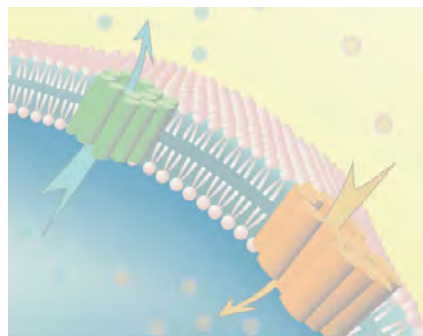
L'approche combinée d'outils bioinformatiques, moléculaires et cellulaires pour analyser les mécanismes de transport dans les échanges mycorhiziens.

Pour analyser les mécanismes de transport dans les échanges mycorhiziens nous avons utilisé quatre approches complémentaires :

- i) l'analyse des interfaces plante-champignon en associant la bioinformatique, l'étude de l'expression des gènes sélectionnés (transcriptomique) et des analyses innovantes à l'échelle cellulaire grâce à la microscopie à dissection-laser ;
- ii) la caractérisation fonctionnelle des transporteurs d'intérêt, par expression hétérologue en levure de bière (*Saccharomyces cerevisiae*) et ovocytes de grenouille (*Xenopus laevis*) ;
- iii) la détermination du profil spatio-temporel de l'expression des gènes candidats et des protéines en utilisant des techniques d'imagerie cellulaire ;
- iv) l'étude du rôle des gènes cibles par la transformation génétique de champignons mycorhiziens avec des constructions d'ARN interférence et de surexpression.

## — Résultats majeurs

Le projet TRANSMUT a permis d'identifier les transporteurs majeurs de C, N, P et K chez des plantes et champignons modèles de la mycorhize. La caractérisation fine de certains d'entre eux a permis de franchir un pas décisif vers la cartographie des échanges et de leur régulation au sein de la mycorhize. Certains de ces gènes codant des transporteurs pourront être utilisés dans le futur, comme marqueurs du bon fonctionnement de la mycorhize en production végétale. Ce projet a permis de renforcer les recherches des équipes impliquées via l'obtention de fonds compétitifs et le développement de nouveaux partenariats internationaux tel que celui avec l'Université de Bâle (Suisse).



TRANSMUT

Logo de l'ANR TRANSMUT représentant un transporteur membranaire.

## — Production scientifique et valorisation

Le projet TRANSMUT a permis aux équipes impliquées la diffusion des résultats majeurs obtenus sous la forme de onze publications dans des revues internationales à comités de lectures et également de neuf conférences/posters lors de congrès internationaux ou nationaux. On peut notamment citer l'article de synthèse\*, rédigé par la totalité du consortium, paru dans la revue Mycorrhiza en 2013. Cet article fait un état de l'art exhaustif (littérature et résultats du projet) sur les transports de nutriments au sein de la mycorhize.

► \*Casieri L., N. Ait Lahmidi, J. Doidy, C. Fourrey, A. Migeon, L. Bonneau, P.E. Courty, K. Garcia, M. Charbonnier, A. Delteil, A. Brun, S. Zimmermann, C. Plassard and D. Wipf (2013) Biotrophic transportome in mutualistic plant-fungal interactions. Mycorrhiza, 23 : 597-625.

## Le projet TRANSMUT

**Partenaires :** UMR 1088 Plante-Microbe-Environnement (INRA), UMR Eco&Sols (INRA), UMR Interactions Arbres - Micro-organismes (INRA), UMR 5004 Biochimie et Physiologie Moléculaire des Plantes (CNRS).

## COORDINATEUR

**Daniel Wipf :** daniel.wipf@inra.fr



# TreeTrace

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

### — Rappel des objectifs

Le projet vise principalement deux objectifs. Le premier est la traçabilité des bois ronds de la forêt à la scierie sur la base de l'analyse biométrique des sections de bois visibles aux extrémités avec des méthodes similaires à celles utilisées pour les empreintes digitales. Le second objectif est celui de l'évaluation de la qualité le plus tôt possible dans la chaîne de traitement à partir de l'analyse d'images de sections, que ce soit en forêt ou en scierie, avec un appareil mobile ou une caméra fixe. Il s'agit dans le même temps d'évaluer ce que peut apporter l'analyse de ces images, obtenues avec des capteurs relativement peu chers qui seraient facilement accessibles à tous et partout (exploitants forestiers, plateformes de tri, scieries), par rapport à ce qui est fait traditionnellement en forêt ou en scierie. Les deux objectifs pourraient être atteints conjointement car ils reposent sur l'analyse des mêmes sections, au même moment dans la chaîne de traitement, ce qui rend parfaitement cohérent de vouloir les traiter en parallèle. Les méthodes de traitement des images seraient potentiellement différentes car spécifiques à l'objectif visé (traçabilité ou évaluation de la qualité) mais pourraient s'enrichir mutuellement en apportant chacune à l'autre des éléments complémentaires.

### — Résultats majeurs

Le projet est dans sa première année et les résultats commencent à arriver. Un système d'acquisition d'images a été installé dans une scierie et la base de données est déjà alimentée de façon automatique. Un échantillonnage de billons et de rondelles sera réalisé à l'automne 2019 pour confronter les résultats des traitements des images à des mesures physiques. Des algorithmes ont été développés pour les phases de prétraitement avec

des algorithmes développés conjointement entre la France et l'Autriche. Une méthode originale pour détecter la moelle sur des billons bruts de sciage a été mise au point et fera l'objet d'une présentation à un colloque international. Les premières évaluations de la qualité du bois à partir des images sont attendues courant 2020 (= année 2 du doctorant français).

### — Production scientifique et valorisation

- Decelle R., Ngo P., Debled-Rennesson I., Mothe F., Longuetaud F. 2019. Pith location on untreated wood cross-section images. Article scientifique prêt à être soumis à ICPR.
- Decelle R., Ngo P., Debled-Rennesson I., Mothe F., Longuetaud F. 2019. A new algorithm to automatically detect the pith on rough log-end images. Accepté pour présentation orale à 21st International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, September 24-27, 2019, Freiburg, Germany.

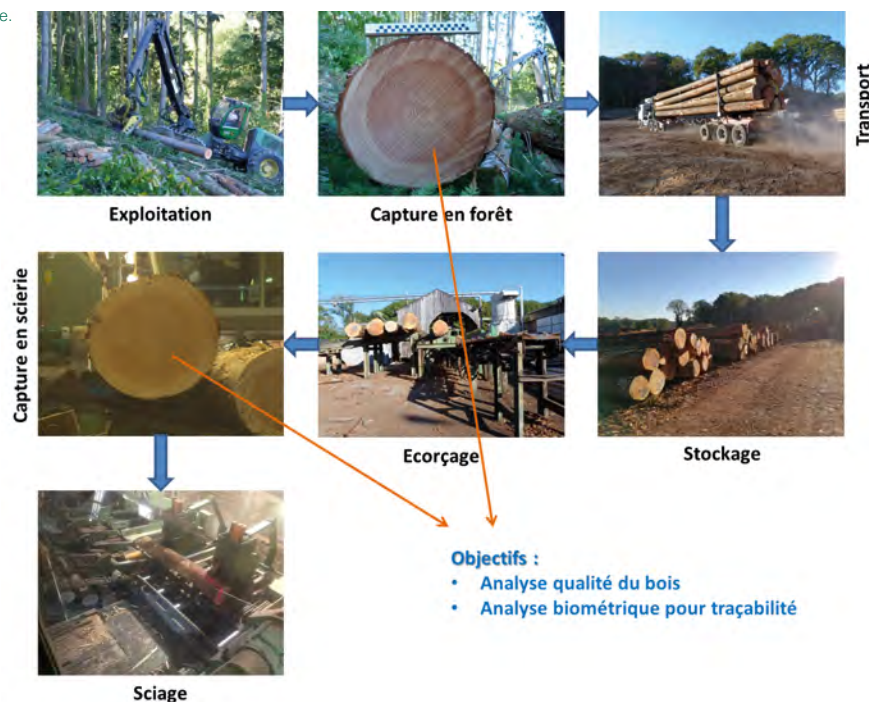
#### Le projet TreeTrace

**Partenaires :** UMR 1092 LERFoB (INRA), E3 3633 AMPT-Labomap (Ecole Nationale des Arts et Métiers), UMR 7503 Loria (Université de Lorraine), Salzburg University of Applied Sciences (Autriche), Paris Lodron University of Salzburg (Autriche), École sur les techniques du bois de Kuchl (Autriche).

#### COORDINATRICE

**Fleur Longuetaud :** fleur.longuetaud@inra.fr

Schéma descriptif du projet TreeTrace.  
Crédit photos : scierie BBF.



## TROPIC

## Analyse et modélisation des réactions gravi- et phototropiques chez les arbres

## — Rappel des objectifs

Dans le contexte des changements climatiques, les forêts mixtes et hétérogènes sont préconisées pour produire du bois car elles sont plus résistantes aux tempêtes. Leurs arbres ont un environnement lumineux complexe, à l'origine de réactions tropiques productrices de bois de réaction, néfaste à la qualité du bois. Ce projet avait pour but d'étudier et de décorréler les réactions des arbres à la gravité et à la lumière en conditions contrôlées pour établir des relations entre réponse et signaux tropiques, intégrer ces connaissances dans des modèles de prédiction de la forme des arbres, et comparer les résultats des modèles aux réactions mesurées en conditions naturelles pour mieux prédire le développement des arbres en fonction de la pente et des conditions d'éclairement.

## — Résultats majeurs

Des dispositifs expérimentaux pour décorréler les réponses gravi et phototropiques ont été construits, dont un dispositif très original (5 exemplaires) de lumière isotrope permettant d'isoler la réponse gravitropique.

Ils ont permis de caractériser la cinématique des mouvements tropiques des jeunes arbres (peupliers, chênes, hêtres) et aussi permis d'étudier les réponses en termes de transcriptome, de dégradome et de protéome et phosphoprotéome à court terme et long terme. Ces réponses montrent des différences dans les différents bois (normal, opposé, tension) et des variations en réponse au signal gravitropique.

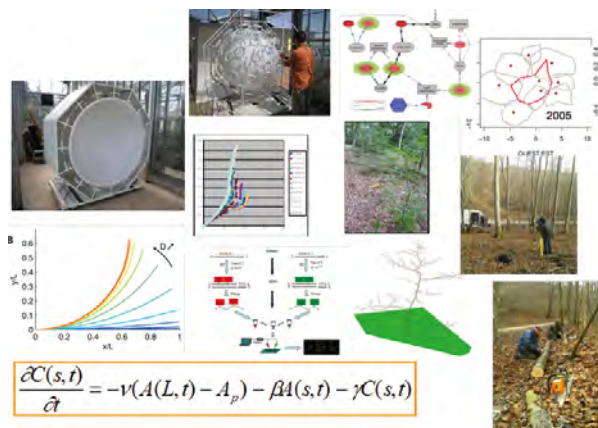
Un modèle minimal de perception du gravitropisme et du phototropisme a été développé (modèle ARc) et intègre une perception de l'inclinaison/ champ de gravité, une perception/lumière incidente (angle et intensité) mais aussi une perception de la courbure. Ce modèle a été validé sur peuplier, et a servi au phénotypage des formes finales de hêtre et de chênes pour quantifier les rapports de sensibilités aux signaux tropiques : le peuplier et le hêtre sont plus sensibles au gravitropisme qu'au phototropisme, à l'opposé du chêne, et le hêtre possède un seuil de perception gravitropique.

En conditions naturelles de sous-bois, plus ou moins hétérogène les résultats sur chêne et hêtre ont été confirmés. D'autre part, une reconstruction a posteriori des mouvements tropiques pendant 10 ans de deux hêtres adultes a été initiée.

## — Production scientifique et valorisation

Communications et poster dans des congrès nationaux ou internationaux :

- Richet N, Lesage-Descauses M-C, Millet N, Déjardin A, Pilate G, Coutand C, Leplé J-C. XIIIth Cell Wall Meeting, Nantes, France 7-12 July 2013.
- Coutand C, Pot G, Bastien R, Badel E, Moulia B Conférence invitée, 40th COSPAR Assembly, Moscou 1-4 Août 2014.
- Coutand C, Adam B, Ploquin S, Lopez D, Moulia B. Plant Biomechanics conference, Nagoya, Novembre 2015 (poster).
- Constant, T., Morisset J.B., (2015). 8th Plant Biomechanics International Conference, Nagoya, JPN (2015-11-30 - 2015-12-04). Nagoya, JPN : Nagoya University.  
<http://prodinra.inra.fr/record/343730>
- Richet, N., Mauriat, M., Lesage Descauses, M.-C., Rogier, O., Laurans, F., Huguet, S., Aubourg-Balergue, S., Lapalu, N., Pilate, G., Coutand, C., Plomion, C., Leplé, J.-C. (2015). 8. Plant



Biomechanics International Conference PBM8, Nagoya, JPN (2015-11-30 - 2015-12-04). Nagoya, JPN : Nagoya University.  
<http://prodinra.inra.fr/record/343735> (poster).

Articles dans des revues internationales à comité de lecture :

- Lopez D, Tocquard K, Vénisse J-S, Legué V, Roedel-Drevet P. (2014) « Gravity sensing, a largely misunderstood trigger of plant orientated growth » *Frontier in Plant Science*.
- Bastien, R, Douady, S, Moulia, B. (2015). A Unified Model of Shoot Tropism in Plants: Photo-, Gravi- and Propio-ception. *Plos Computational Biology*, 11 (2), 30 p.
- Mauriat M, Leplé J-C, Claverol S, Bartholome J, Negroni L, Richet N, Lalanne C, Bonneau M, Coutand C, Plomion C. (2015) Quantitative proteomic and phosphoproteomic approaches for deciphering the signaling pathway for tension wood formation in poplar, *Journal of Proteome Research*.
- Coutand C, Ploquin S, Adam B, Moulia B (2018) A method for the quantification of phototropic and gravitropic sensitivities of plants combining an original experimental device with model-assisted phenotyping: Exploratory test of the method on three hardwood tree species. *PIOs one*.

Un chapitre d'ouvrage :

- « The molecular mechanisms of reaction wood induction », In « The Biology of reaction Wood » Springer-verlag.

## Le projet TROPIC

**Partenaires** : UMR 547 PIAF (INRA-Université Blaise Pascal Clermont Ferrand), UR 0588 Amélioration, Génétique et Physiologie Forestières (INRA), UMR 1202 BIOGECO (INRA), UMR 1092 LERFoB (INRA).

## COORDINATRICE

**Catherine Coutand** : [catherine.coutand@inra.fr](mailto:catherine.coutand@inra.fr)

## TWIST

## Réponse de l'arbre aux vents forts

## — Dégradations en forêts liées aux tempêtes et à l'ancrage des arbres

Les dégradations liées au vent s'élèvent actuellement à 50% du volume des dégâts dans les forêts européennes et vont doubler voir même quadrupler avant la fin du siècle en raison de l'augmentation de la surface boisée, de la hauteur des arbres et du changement climatique. Ces dommages ont un impact considérable sur la filière bois et le fonctionnement écologique et la survie des forêts en Europe. La majorité des arbres sont détruit par renversement et arrachement du système racinaire (chablis) lors des tempêtes. D'importants efforts ont été consentis ces dernières décennies pour modéliser la réponse des parties aériennes à des sollicitations turbulentes liées aux vents. En revanche, l'interaction mécanique racines-sol et le rôle de l'humidité et de la fatigue du sol sont encore mal connus. L'objectif de TWIST était de mieux comprendre l'ancrage des arbres et son influence sur les dégâts lors de tempête. Le projet est basé sur le développement de modèles et de techniques expérimentales pour mesurer et simuler les déformations d'un arbre sous vent fort. Ces méthodes ont été appliquées au cas du pin maritime cultivé en sol sableux, représentatif de la Forêt des Landes en région Nouvelle Aquitaine. Ce massif forestier joue un rôle économique, social et écologique majeur et il a été fortement endommagé par les tempêtes ces 15 dernières années. Mais ces méthodes ont vocation à être appliquées à d'autres espèces sensibles aux risques tempêtes (peuplier, épicéa, hêtre...).

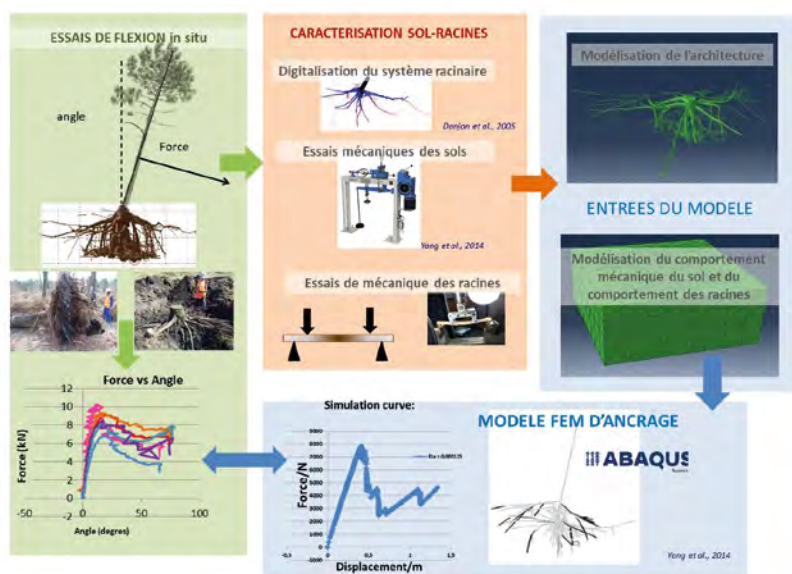
## — Résultats majeurs

Le projet TWIST a permis des avancées notables sur la compréhension des interactions entre le sol et les racines qui sont un élément clé de la modélisation du risque au vent. Le premier résultat majeur du projet est une méthode d'estimation des effets des conditions de sol sur la stabilité des arbres, notamment le niveau de saturation en eau du sol lors des épisodes de tempêtes. Cette méthode repose des simulations d'arrachement du système racinaire de l'arbre induit par le vent, simulations qui

ont été confirmées par des observations de terrain. Dans le cas des sols sableux, le risque accru de renversement lié à la pluviométrie est restreint aux épisodes de saturation complète du sol en eau. Le second résultat important est une méthode de prévisions de la ruine de l'arbre par arrachage (chablis) à l'échelle de l'arbre en fonction des conditions microclimatiques (conditions de turbulence, humidités du sol contrastées). Les simulations ont montré l'importance de la dynamique du processus : la succession de rafales de vent lors de tempêtes sont importantes à considérer dans le risque de renversement car elles induisent des ruptures successives au niveau du sol qui peuvent induire in fine la rupture complète et le renversement. Ce résultat a des implications pour les modèles de risque au vent à larges échelles spatiales qui pour le moment considèrent un seuil d'arrachement uniquement statique.

## — Production scientifique et valorisation

- Yang, M. ; Defossez, P. ; Danjon, F. ; Fourcaud, T. (2018) Analyzing key factors of roots and soil contributing to tree anchorage of Pinus species. *Trees*, 32 (3) : 703-712. DOI: 10.1007/s00468-018-1665-4.
- Dupont, S. ; Defossez, P. ; Bonnefond, J.-M. ; Irvine, M. R. ; Garrigou, D. (2018) How stand tree motion impacts wind dynamics during windstorms. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262 : 42-58. DOI: 10.1016/j.agrformet.2018.06.022
- Dupont, S. (2016) A simple wind-tree interaction model predicting the probability of wind damage at stand level *AGRICULTURAL AND FOREST METEOROLOGY* Volume: 224 Pages: 49-63
- Yang, M., Defossez, P., Danjon, F., Dupont, S., Fourcaud, T., (2015) Which root architectural elements contribute the best to anchorage of Pinus species? Insights from in silico experiments *PLANT AND SOIL* Volume: 411 Issue: 1-2 Pages: 275-291.
- Yang, M., Defossez, P., Danjon, F., Fourcaud, T., 2014. Tree stability under wind: simulating uprooting with root breakage using a finite element method. *Annals of Botany* 114, 695-709.



## Le projet TWIST

Partenaire : UR 126 Ephyse (INRA).

## COORDINATRICE

Pauline Defossez : pauline.defossez@inra.fr

Méthode utilisée pour estimer le renversement d'un arbre sous chargement statique. Le vent est mimé par une force de traction, les paramètres mécaniques du sol et des racines sont mesurés ainsi que l'architecture racinaire. L'ensemble de ces données permet de paramétrer un modèle de simulation du renversement de l'arbre. Les simulations de la force nécessaire au renversement correspondent au maximum de la courbe force/déplacement. Ce seuil est alors comparé aux mesures réalisées sur le terrain.



# URBANMYCOSERVE

## Comprendre et gérer les communautés urbaines de champignons ectomycorhiziens afin d'améliorer la santé et les services écosystémiques des arbres urbains

### — Rappel des objectifs

- Le premier objectif du projet est de comprendre les facteurs environnementaux responsables de la composition et de la diversité fonctionnelle de la communauté d'ectomycorhizes (EcM) d'un arbre urbain (*Tilia tomentosa*) et leur rôle dans la physiologie et la santé de ces arbres et leur capacité à produire des services écosystémiques.
- Le deuxième objectif est d'obtenir des méthodes (mesure en continu du diamètre de branche, mesures hyperspectrales...) permettant de caractériser la santé des arbres et leur capacité à produire des services écosystémiques (rafraîchissement urbain, qualité de l'air...) dans différents types de plantation (fosse scellée vs. non limitée).
- Le dernier objectif cherchera à explorer la possibilité de la gestion active des communautés d'EcM par inoculations de mélanges dédiés afin d'agir sur la santé et les services produits par les arbres.

### — Résultats majeurs

Des prélèvements de sol et de racines de *Tilia tomentosa* (175 arbres) ont été sélectionnés au hasard dans les trois villes du projet (Louvain, Strasbourg et Porto). Les communautés d'EcM ont été caractérisées en identifiant les facteurs environnementaux associés. De fortes différences dans la composition la richesse des communautés d'EcM ont été observées entre les villes. L'acidité du sol, la matière organique et la teneur en eau ont été les principaux moteurs de différence entre communauté d'EcM, alors que très peu de variation a été expliquée par la ville et les pollutions par les métaux.

Différentes conditions de plantation (fosse scellée, fosse linéaire et conditions non limitées pour le développement des racines) ont été étudiées en mesurant la réflectance et la fluorescence des feuilles. Les traits optiques ont été comparés aux traits foliaires classiques comme la surface foliaire spécifique (SLA) et le contenu en eau des feuilles (LWC). Les signatures spectrales observées peuvent être utilisées pour déduire la pollution par les métaux lourds des différents sols urbains et les caractéristiques optiques des feuilles diffèrent selon les conditions de plantation. Ainsi, chez les arbres en sol scellé, on observe une accélération de la sénescence foliaire bien identifiable par les traits optiques. Ces conditions ont également une incidence négative sur l'état de santé et la phénologie des arbres en milieu urbain.

Enfin les mesures continues de la variation du diamètre (système PépiPIAF) mesurés sur un échantillon de ces arbres (60) dans ces trois systèmes de plantation paraissent suffisamment robustes pour établir des différences de croissance en fonction de la contrainte de plantation des arbres, qui se traduisent principalement par le stress hydrique différents de ces 3 conditions. Nos résultats fournissent ainsi des informations précieuses sur l'utilisation des traits optiques et des données de croissance en diamètre en continu pour faciliter la gestion durable de la santé des arbres et des zones vertes urbaines. Nos analyses en cours essayent de relier la santé des arbres et les communautés d'EcM en présence.

FOSSE SCÉLÉE



LINÉAIRE



NON LIMITÉE



Mesure de croissance des arbres.



Prélèvement de sol.

### — Production scientifique et valorisation

- BENSOUAD A. *et al.*, 2018 - Irrigazette, 165, 25-31.  
<https://prodinra.inra.fr/record/436400>
- YU K. *et al.*, 2018 a- Ecological Indicators (95), 895-906.  
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.047>
- YU K. *et al.*, 2018b Environmental Pollution (in Press). doi:  
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.09.053>
- VAN GEEL M. *et al.*, 2018 - FEMS Microbiology Ecology, 94, 12.  
<https://doi.org/10.1093/femsec/fiy207>

#### Le projet URBANMYCOSERVE

**Partenaires** : UMR 547 PIAF (INRA-Université de Strasbourg), Division of Ecology, Evolution and Biodiversity Conservation - KU Leuven (Belgique), Division of Forest, Nature and Landscape - Universidade Católica Portuguesa (Portugal).

#### COORDINATEUR

**Thierry Ameglio** : [thierry.ameglio@inra.fr](mailto:thierry.ameglio@inra.fr)

# LISTE DE 48 AUTRES PROJETS FINANCÉS SUR LE THÈME

| ACRONYME         | TITRE                                                                                                                                                                                   | TYPE D'APPEL          | ANNÉE | CONTACT                                                                                     |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>ADASPIR</b>   | Mécanismes symbiotiques d'adaptations d' <i>Acacia spirorbis</i> aux stress abiotiques et aux perturbations environnementales en Nouvelle-Calédonie                                     | Thématique            | 2012  | <b>DUCOUSSO Marc</b><br>Marc.Ducouso@cirad.fr                                               |
| <b>AMAZYME</b>   | Diversité et évolution des oxydosqualène cyclases et des prényltransférases dans le latex des arbres d'Amazonie                                                                         | AAPG                  | 2018  | <b>DUPLAIS Christophe</b><br>christophe.duplais@ecofog.gf                                   |
| <b>APPATS</b>    | Potentiel adaptatif des espèces d'arbres alpins au réchauffement climatique                                                                                                             | AAPG                  | 2015  | <b>LOBREAUX Stéphane</b><br>stephane.lobreaux@univ-grenoble-alpes.fr                        |
| <b>ASTERIX</b>   | Analyse Spatio-temporelle pour la Télédétection de l'Environnement par Reconnaissance dans les Images complexes                                                                         | Thématique            | 2013  | <b>LEFEVRE Sébastien</b><br>sebastien.lefevre@univ-ubs.fr                                   |
| <b>BAMBI</b>     | Bases comportementales de l'Ajustement à Moins de Biodiversité : oublier la peur, un mécanisme pour s'adapter à la surexploitation de son milieu ?                                      | Non thématique        | 2010  | <b>BRAUMAN Alain</b><br>Alain.Brauman@ird.fr<br><br>Coordinateur : <b>MARTIN Jean-Louis</b> |
| <b>CATBIOSE</b>  | Nouveaux biopolymères basés sur des synthons renouvelables à partir de la désoxygénation catalytique d'hémicelluloses                                                                   | AAPG                  | 2015  | <b>DA SILVA PEREZ Denilson</b><br>denilson.dasilvaperez@fcba.fr                             |
| <b>CLAMEB</b>    | Classement mécanique non destructif du bois                                                                                                                                             | Thématique            | 2011  | <b>KREBS Michaël</b><br>michael.krebs@ensam.eu                                              |
| <b>CLASSIQUE</b> | CLimat, Agriculture et Société Sibérienne - QUElle Evolution ?                                                                                                                          | Thématique            | 2010  | <b>SOURDEVAL Matthieu</b><br>matthieu.sourdeval@uvsq.fr                                     |
| <b>CLIMBOIS</b>  | Impact des variations climatiques et mécaniques sur la durabilité des constructions bois                                                                                                | Thématique            | 2013  | <b>MOUTOU PITTI Rostand</b><br>rostand.moutou_pitti@uca.fr                                  |
| <b>CoForTips</b> | Forêts du Bassin du Congo : Biodiversité, Points de Basculement et Résilience des Systèmes Écologiques et Sociaux Forestiers                                                            | Appels internationaux | 2012  | <b>GARCIA Claude</b><br>claud.garcia@cirad.fr                                               |
| <b>DBDBD</b>     | Dépôt sur bois de revêtements fonctionnels nanostructurés par plasmas froids à la pression atmosphérique                                                                                | Non thématique        | 2011  | <b>GHERARDI Nicolas</b><br>nicolas.gherardi@laplace.univ-tlse.fr                            |
| <b>DiPTiCC</b>   | Diversité et Productivité des forêts impactées par le Changement Climatique                                                                                                             | AAPG                  | 2016  | <b>JACTEL Hervé</b><br>herve.jactel@pierreton.inra.fr                                       |
| <b>DURAMAZ2</b>  | Vers un observatoire de la durabilité en Amazonie                                                                                                                                       | Non thématique        | 2011  | <b>THERY Hervé</b><br>hthery@aol.com                                                        |
| <b>DynaTTB</b>   | Dynamic Response of Tall Timber Buildings under Service Load                                                                                                                            | Appels internationaux | 2018  | <b>HAMEURY Stephane</b><br>Stephane.HAMEURY@cstb.fr                                         |
| <b>ERS</b>       | L'évolution de la saisonnalité reproductive chez les mammifères                                                                                                                         | AAPG                  | 2017  | <b>HUCHARD Elise</b><br>ehuchard@gmail.com                                                  |
| <b>FLAG</b>      | Génétique écologique des arbres forestiers : interactions entre flux de gènes et variabilité environnementale dans la détermination de l'adaptation locale et du potentiel d'adaptation | Thématique            | 2012  | <b>SCOTTI Ivan</b><br>ivan.scotti@inra.fr                                                   |

| ACRONYME            | TITRE                                                                                                                                                                        | TYPE D'APPEL          | ANNÉE | CONTACT                                                                         |
|---------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>FLEXIBI</b>      | Small-scale flexi-feed biorefineries : experimental evaluation and development of a decision support tool devoted to agricultural and industrial urban and peri-urban wastes | Appels internationaux | 2017  | <b>CATHALA Bernard</b><br>bernard.cathala@inra.fr                               |
| <b>FORESEE</b>      | Caractérisation de la ressource forestière pour les bioénergies                                                                                                              | Thématique            | 2010  | <b>BIGOT DE MOROGUES Francis</b><br>Francis.de.Morogues@fcba.fr                 |
| <b>ForRISK</b>      | Forest density reduction to minimize the vulnerability of Norway spruce and silver fir to extreme drought – a risk assessment                                                | Appels internationaux | 2016  | <b>CUNTZ Matthias</b><br>matthias.cuntz@inra.fr                                 |
| <b>GENOAK</b>       | Séquençage du génome du chêne et identification de gènes d'intérêt adaptatifs chez les arbres forestiers                                                                     | Non thématique        | 2011  | <b>PLOMION Christophe</b><br>plomion.christophe@inra.fr                         |
| <b>GenoPheno</b>    | Génomique de la phénologie chez la processionnaire du pin, <i>Thaumetopoea pityocampa</i>                                                                                    | Non thématique        | 2010  | <b>KERDELHUE Carole</b><br>Carole.Kerdelhue@inra.fr                             |
| <b>GlobNets</b>     | Biogéographie globale des réseaux écologiques des forêts du monde                                                                                                            | AAPG                  | 2016  | <b>THUILLER Wilfried</b><br>wilfried.thuiller@univ-grenoble-alpes.fr            |
| <b>GoLFor-DEEPN</b> | Gouvernance Locale des Forêts : Développement, Environnement et Économie Politique au Népal                                                                                  | AAPG                  | 2018  | <b>LIBOIS François</b><br>francois.libois@psemail.eu                            |
| <b>HADoC</b>        | Rôle du Climat dans la dispersion des ancêtres de l'Homme                                                                                                                    | AAPG                  | 2017  | <b>RAMSTEIN Gilles</b><br>Gilles.Ramstein@lsce.ipsl.fr                          |
| <b>HYGRO-BAT</b>    | Vers une méthode de conception HYGRO-thermique des BATiments performants                                                                                                     | Thématique            | 2010  | <b>VIRGONE Joseph</b><br>joseph.virgone@univ-lyon1.fr                           |
| <b>INNOMED</b>      | Options innovantes pour la gestion intégrée des ressources en eau en Méditerranée                                                                                            | Appels internationaux | 2016  | <b>BEGUERIA Santiago</b><br>santiago.begueria@csic.es                           |
| <b>MACBI</b>        | Megastigmus et conifères : Biologie de l'invasion                                                                                                                            | Appels internationaux | 2010  | <b>AUGER ROZENBERG Marie Anne</b><br>Marie-Anne.Auger-Rozenberg@orleans.inra.fr |
| <b>MICADO</b>       | Communautés microbiennes associées à la dégradation du bois en milieu marin                                                                                                  | Non thématique        | 2011  | <b>GALAND Pierre</b><br>pierre.galand@obs-banyuls.fr                            |
| <b>MOB-AIR</b>      | Maîtriser les transferts d'AIR et leur impact sur le comportement hygrothermique des Maisons à Ossature Bois                                                                 | Thématique            | 2012  | <b>RUSAOUEN Gilles</b><br>gilles.rusaouen@univ-lyon1.fr                         |
| <b>ModULand</b>     | Usage des sols : modèles, dynamique et décisions                                                                                                                             | Non thématique        | 2011  | <b>THOMAS AGNAN Christine</b><br>christine.thomas@tse-fr.eu                     |
| <b>MULTIVIR</b>     | Infections multiples et virulence                                                                                                                                            | Non thématique        | 2013  | <b>SHYKOFF Jacqui</b><br>jacqui.shykoff@u-psud.fr                               |
| <b>NEBEDIV</b>      | Le rôle des ennemis naturels dans la diversité bêta des arbres tropicaux                                                                                                     | Non thématique        | 2013  | <b>BARALOTO Christopher</b><br>Chris.Baraloto@ecofog.gf                         |
| <b>ORACLE</b>       | Opportunités et Risques pour les Agro-écosystèmes et les forêts en réponse aux changements CLimatiqueE, socio-économiques et politiques en France [et en Europe]             | Thématique            | 2010  | <b>DE-NOBLET Nathalie</b><br>nathalie.de-noblet@lsce.ipsl.fr                    |
| <b>PhenoLiq</b>     | Production de composés Phénoliques par Liquéfaction de la lignine                                                                                                            | AAPG                  | 2016  | <b>MAUVIEL Guillaïn</b><br>guillaïn.mauviel@univ-lorraine.fr                    |
| <b>POPRUST</b>      | Bases moléculaires de l'interaction R-Avr entre le peuplier et <i>Melampsora larici-populina</i> , l'agent de la rouille foliaire                                            | Non thématique        | 2010  | <b>DUPLESSIS Sébastien</b><br>duplessi@nancy.inra.fr                            |
| <b>PREREAL</b>      | Improving PREdictability of circumboREAL forest fire activity and its ecological and socio-economic impacts through multi-proxy data comparisons                             | Appels internationaux | 2015  | <b>ALI Ahmed Adam</b><br>ali@univ-montp2.fr                                     |



| ACRONYME             | TITRE                                                                                                                                                | TYPE D'APPEL          | ANNÉE | CONTACT                                                              |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------|----------------------------------------------------------------------|
| <b>REFORM</b>        | Mixed species forest management. Lowering risk, increasing resilience                                                                                | Appels internationaux | 2016  | <b>JACTEL Hervé</b><br>herve.jactel@inra.fr                          |
| <b>ReVeRIES</b>      | Reconnaissance de Végétaux Récréative, Interactive et Educative sur Smartphone                                                                       | AAPG                  | 2015  | <b>GEORGE Sébastien</b><br>Sebastien.George@univ-le Mans.fr          |
| <b>SECIL</b>         | Étude de champignons endophytes foliaires : exploration et valorisation de métabolites antibactériens innovants biosourcés                           | AAPG                  | 2015  | <b>STIEN Didier</b><br>didier.stien@cnrs.fr                          |
| <b>SELINA</b>        | Parc National Nevado de Toluca : un laboratoire socio-environnemental pour des innovations politiques dans la gestion de parcs nationaux             | Non thématique        | 2011  | <b>IMBERNON Jacques</b><br>jacques.imbernon@cirad.fr                 |
| <b>SoilForEUROPE</b> | Predicting European forest soil biodiversity and its functioning under climate change                                                                | Appels internationaux | 2016  | <b>HATTENSCHWILER Stephan</b><br>stephan.hattenschwiler@cefe.cnrs.fr |
| <b>TOLTECA</b>       | Un système de communication satellite reconfigurable pour la surveillance climatique et la prévention des désastres                                  | AAPG                  | 2016  | <b>ABOUSHADY Hassan</b><br>Hassan.Aboushady@lip6.fr                  |
| <b>TRANSfer</b>      | Effets transgénérationnels et réponses physiologiques à la sécheresse à répétition dans les chêne ( <i>Quercus ilex</i> )                            | AAPG                  | 2016  | <b>MILCU Alexandru</b><br>alex.milcu@cnrs.fr                         |
| <b>TreeForJoules</b> | Amélioration des propriétés du bois chez l'Eucalyptus et le peuplier pour les bioénergies                                                            | Thématique            | 2010  | <b>GRIMA PETTENATI Jacqueline</b><br>grima@scsv.ups-tlse.fr          |
| <b>VITAPALM</b>      | Improving nutritional quality and stability of palm oil produced by African smallholders to fulfil African consumers' needs                          | Appels internationaux | 2018  | <b>BESSOULE Jean-Jacques</b><br>jean-jacques.bessoule@u-bordeaux.fr  |
| <b>WoodWaste</b>     | Biocatalyseurs microbiens pour la décontamination des bois traités                                                                                   | AAPG                  | 2018  | <b>MOREL Mélanie</b><br>melanie.morel@univ-lorraine.fr               |
| <b>WUEtree</b>       | Analyse du déterminisme génétique et environnemental de l'efficacité d'utilisation de l'eau pour améliorer la durabilité des plantations forestières | Thématique            | 2013  | <b>BOUVET Jean-Marc</b><br>jean-marc.bouvet@cirad.fr                 |
| <b>ZFM</b>           | Les zones franches comme stratégie de développement. Le cas de la Zone Franche de Manaus                                                             | Thématique            | 2010  | <b>SIROEN Jean-Marc</b><br>siroen@dauphine.fr                        |

## ARBRE

Recherches Avancées sur la Biologie  
de l'Arbre et les Ecosystèmes Forestiers

## — Rappel des objectifs

Le Laboratoire d'Excellence ARBRE a pour objectifs d'étudier le fonctionnement des forêts dans un contexte de changements globaux, de proposer de nouvelles pistes pour la préservation des forêts et d'élaborer de nouveaux usages pour une valorisation optimale du bois.

Le LabEx ARBRE regroupe une communauté de 260 scientifiques et techniciens, qu'il a contribué à structurer autour d'enjeux scientifiques majeurs, en faisant appel à un large éventail de compétences disciplinaires. Sa force réside dans la complémentarité entre recherche, innovation et formation.

Les recherches menées visent à mieux comprendre le rôle du microbiome forestier dans le cycle du carbone, le fonctionnement, l'évolution et la valeur économique des écosystèmes forestiers sous contraintes, ainsi que le contrôle biologique, technologique ou économique des performances du bois. Le LabEx ARBRE aborde également les problématiques à forts enjeux sociétaux de la filière forêt-bois et de la gestion de la ressource forestière dans les territoires, incluant les services écosystémiques.

Le LabEx ARBRE participe activement à la valorisation sociale et économique des résultats de recherche, au travers d'un lien renforcé avec les professionnels (ONF, CNPF, CRITT-Bois) en favorisant le tissu économique dans les territoires. En plus de son soutien aux projets de recherche et d'innovation, Le LabEx ARBRE accompagne des projets de formation au niveau Master et Doctorat. Il déploie également un programme ambitieux de formation à la démarche de recherche auprès de publics non-spécialistes, dont le public scolaire, en s'appuyant sur les laboratoires Tous Chercheurs et le futur Territoire d'Innovation (TI) « Des Hommes et des Arbres », auxquels il contribue fortement.

## — Résultats majeurs

► Une meilleure compréhension des interfaces  
arbre - micro-organismes

Les génomes de différents champignons saprophytes, symbiotiques et pathogènes associés aux arbres ont été analysés et ont mis en évidence des adaptations moléculaires fondamentales à l'évolution convergente des champignons symbiotiques, y compris la perte de certaines fonctions métaboliques et l'acquisition d'effecteurs qui facilitent les interactions mutualistes. Ces résultats ont été intégrés dans un modèle de développement des interactions arbre-microbe, prenant en compte l'impact des champignons colonisateurs sur l'immunité, le développement et la nutrition des arbres.

De nouveaux outils d'imagerie à hautes fréquence et résolution spatiale du développement des racines fines, combinés aux outils de séquençage de l'ARN, ont permis de montrer que le stress osmotique interfère avec la croissance par un changement massif du statut hormonal et l'activation des protéines régulatrices plutôt que par la suppression des composants sous-jacents de la croissance.

Les modifications post-traductionnelles des protéines régulatrices et des enzymes, appelées signalisation redox, constituent un mécanisme important pour relayer ou intégrer les changements locaux de statut redox cellulaire, notamment en réponse à des contraintes environnementales spécifiques. Des analyses structure-fonction de nombreuses glutarédoxines, enzymes dépendantes du glutathion contrôlant ces modifications, ont démontré leur importance pour l'homéostasie redox cellulaire, l'une d'elles interprétant et relayant les changements redox du noyau par interaction avec des facteurs de transcription.



Trametes versicolor - Polypore.  
Crédit photo : LabEx ARBRE.

► Fonctionnement et dysfonctionnement des écosystèmes  
forestiers dans un environnement changeant

Indicateurs du sol et des arbres ont été combinés pour quantifier et qualifier la fertilité chimique des sols des forêts. Plusieurs facteurs clés contrôlant la biodisponibilité des nutriments ont été caractérisés (par exemple, les bactéries altérant les conditions climatiques).

Par une série de méta-analyses, d'expériences in situ et ex situ et d'approches de modélisation, le LabEx ARBRE a montré que les pratiques de gestion, comme l'intensité accrue de la récolte de biomasse ou le chaulage du sol, modifient considérablement les communautés microbiennes et les propriétés du sol comme la biodisponibilité des éléments minéraux.

Le LabEx ARBRE a mené un travail pionnier sur l'influence des interactions des espèces d'arbres dans les forêts mixtes sur les fonctions eau et carbone et sur leur capacité à résister aux périodes de sécheresse et a démontré que les forêts mixtes en Europe ne sont pas toujours plus résistantes à la sécheresse que les forêts pures. Les mécanismes à l'origine de ces effets sont complexes et se produisent tant en surface (gradients lumineux) qu'en profondeur (distribution verticale des racines, profondeur de l'extraction de l'eau).

L'incertitude découlant des différences dans les formulations des modèles de réponse des arbres au changement climatique a été évaluée à partir de la comparaison des projections des distributions des arbres en France. Les modèles projettent des contractions à grande échelle des essences d'arbres tempérées dans les basses terres en raison des changements climatiques. Les désaccords importants observés entre les modèles pour les espèces de feuillus tempérés ont été expliqués en grande partie par les différences dans la modélisation des impacts de l'élévation du CO<sub>2</sub>.

L'analyse de l'impact du réchauffement climatique sur la végétation a révélé un retard considérable dans la réponse des communautés de plaine au réchauffement climatique récent par rapport aux communautés de montagne. Les modèles prédictifs et les analyses des phénomènes d'extinction ont montré une tendance à une fragmentation plus importante que prévue des aires de répartition d'un grand nombre d'espèces, tant au niveau régional que continental.

Le vent est l'un des signaux environnementaux les plus importants qui influencent la croissance des arbres. Une adaptation remarquable de la croissance cambiale à la contrainte du vent a été observée, avec des relations étonnamment stables entre la vitesse du vent et les déformations naturelles des cellules cambiales causées par le vent. La thigmo-morphogenèse filtre ensuite la perception par les arbres des vents les plus forts et cette acclimatation est une prévention efficace du risque de rupture.

Le LabEx ARBRE a suivi l'évolution récente de la productivité forestière en France en exploitant les relevés d'inventaire des parcelles collectés par l'Inventaire forestier national. Ces données détaillées sur la répartition des essences d'arbres à grande échelle ont permis une meilleure compréhension de la façon dont les forêts réagissent au changement climatique. Elles ont révélé des changements contrastés selon les espèces et les régions : la productivité a augmenté dans les zones climatiques plus fraîches, est restée stable dans les climats intermédiaires et a diminué dans les climats plus chauds.

Sur la base d'une typologie fonctionnelle des écosystèmes forestiers, basée sur l'importance des différentes composantes des cycles biogéochimiques, géologiques et biologiques, des indicateurs de bon fonctionnement ou de dysfonctionnement ont été mis au point pour différents écosystèmes et leur réponse aux pratiques forestières étudiées.

#### ► Développement de nouveaux produits et usages pour le bois

Les champignons de pourriture blanche sécrètent de petites protéines impliquées dans les processus de détoxification des matières extractibles responsables de la durabilité naturelle du bois. Les éléments traces métalliques affectent directement la dégradation du bois par les champignons. Le LabEx ARBRE a breveté des biocapteurs pour la détection des premiers stades de la dégradation du bois.

Les principales propriétés du bois, telles que le rapport aubier/bois de cœur, le rapport bois précoce/bois tardif, influencent considérablement les pertes de poids dues aux dégradations thermiques et, par conséquent, les propriétés du matériau final en bois. Le LabEx ARBRE a évalué l'impact de la variabilité interspécifique et intraspécifique du contenu du bois en relation avec sa durabilité naturelle et la valorisation de ses biomolécules pour des applications cosmétiques, nutraceutiques ou pharmaceutiques. Des méthodes de préservation sans biocides, basées sur des modifications thermiques ou chimiques, ont été développées comme alternatives aux méthodes classiques de préservation du bois, afin de promouvoir l'utilisation d'essences feuillues ayant une faible durabilité naturelle. Une meilleure connaissance des procédés de thermodégradation du bois a permis de développer des

modèles permettant de contrôler les procédés industriels de traitement thermique et de prédire la qualité finale des produits traités. De nouveaux matériaux ont été conçus tels que des mousses et des résines thermodurcissables pour les matériaux abrasifs.

Le LabEx ARBRE a mis au point de nouvelles méthodes, comme le LiDAR terrestre, pour l'évaluation des arbres et des forêts et étudier l'effet des perturbations environnementales sur la qualité des ressources forestières. Des modèles de simulation du carbone, des gaz à effet de serre, des flux énergétiques et du devenir des éléments nutritifs dans toute la chaîne forêt-bois ont été mis en œuvre et reliés aux modèles de croissance forestière avec une évaluation précise des incertitudes. Ces modèles et études ont fourni des outils d'aide à la décision innovants pour des projets territoriaux de bio-économie et d'économie circulaire.

#### ► Valorisation économique des services écosystémiques forestiers

En combinant les sorties écologiques (probabilités de présence des essences) et un outil financier (théorie de la sélection du portefeuille) pour optimiser la répartition des essences en France, les combinaisons optimales de rendement et de risque des différentes essences d'arbres ont été déterminées et cartographiées par département administratif.

#### — Production scientifique et valorisation

► Les résultats du LabEx ARBRE ont fait l'objet de plus de 440 publications dans des revues internationales (plus de 4 000 citations), notamment dans des revues à forte visibilité (Science, Nature et ses revues associées, PNAS, Global Change Biology, Ecology Letters, etc).

► Le LabEx ARBRE a financé plus de 19 bourses de thèse, 33 postdocs, ainsi que des soutiens à la mobilité internationale des jeunes chercheurs. Il collabore à plusieurs écoles d'été internationales (avec le réseau des Instituts Max Planck, l'Institut Européen de la Forêt, le NZF) et est à l'origine de deux nouveaux parcours du Master FAGE, à Nancy : un parcours Erasmus mundus « Les forêts et leur environnement » et un parcours professionnalisant « Bois, Forêt, Développement durable », ainsi que du MOOC « Anatomie du bois » (plus de 12 000 inscrits).

► Le LabEx ARBRE a réalisé plusieurs projets de recherche-développement et innovation avec des partenaires nationaux (ONF, CNPF), des PME (Alcina) ou des start-up (ECOSUSTAIN, WOOD'UP), ainsi que des actions de formation à destination de ses partenaires.

► Le LabEx ARBRE a aussi réalisé de nombreuses actions à destination des citoyens et de la société. Il a contribué au rapport du gouvernement sur l'état des Sciences participatives en France et a coordonné un projet scolaire intitulé « Pourquoi les hêtres meurent-ils de sécheresse ? », qui a reçu le prix « Science et Société » de la région Lorraine (aujourd'hui Grand Est) et le prix de l'Innovation de l'Académie.

► Le LabEx ARBRE a aussi un rôle structurant dans l'émergence de l'I-SITE LUE et dans le projet d'Institut Européen de la Forêt et du Bois.



Forêt domaniale de Lutzelhouse à l'automne.  
Crédit photo : LabEx ARBRE.

#### Le projet ARBRE

##### PIA 1.

**Partenaires :** INRA, Université de Lorraine, AgroParisTech, ONF, IGN, CNPF, CRITT-Bois, ANSES.

##### COORDINATEUR

**Francis Martin :** [francis.martin@inra.fr](mailto:francis.martin@inra.fr),  
<http://mycor.nancy.inra.fr/ARBRE/>



# Arbre, forêt, bois et société en Guyane française



## — Rappel des objectifs

La Guyane française est le premier massif forestier français. Il couvre plus de huit millions d'hectares de forêt tropicale, en comparaison des 17 millions d'hectares de la France métropolitaine. La forêt tropicale de Guyane représente un enjeu majeur de protection de la nature et de séquestration du carbone. Le Laboratoire d'Excellence CEBA (Centre d'Etude de la Biodiversité Amazonienne) a focalisé son programme de recherche sur la compréhension des origines et des processus de maintien de la biodiversité en Amazonie. Avec une direction exécutive à Cayenne, le CEBA met l'accent particulièrement sur la Guyane française mais développe également des collaborations avec les partenaires régionaux, en particulier au Brésil et en Colombie.

Les enjeux de recherche liés aux connaissances sur les forêts Amazoniennes sont variés, incluant la connaissance botanique des arbres, la diversité intra- et inter-spécifique, l'écologie des forêts, mais aussi l'évaluation des propriétés biomécaniques et chimiques des bois. Le CEBA regroupe treize équipes de recherche comptant au total plus d'une centaine de chercheurs travaillant principalement sur des sites de recherche établis par plusieurs organismes de recherche (CIRAD, IRD, CNRS, ONF, INRA) souvent depuis le début des années 1980. Cette perspective de long terme est un atout énorme pour envisager la protection et la gestion raisonnée des ressources forestières. Ces dispositifs de long terme sont complétés par des explorations de zones mal connues du territoire pour y échantillonner la diversité, et pour recenser et caractériser les espèces et leurs associations. Cette mission d'exploration de la biodiversité des arbres reste essentielle car les quelques 1 700 espèces d'arbres recensées en Guyane restent mal connues : pour mieux évaluer la diversité et les ressources en essences d'arbres, il faut savoir où les espèces poussent. Documenter leur diversité génétique inter-spécifique et intra-spécifique permet de comprendre les patterns de diversité et comment les populations s'adaptent à leur environnement local. Des équipements analytiques en Guyane et en métropole permettent d'analyser les propriétés des bois tant au plan biomécanique que chimique.

La forêt Amazonienne représente un stock de carbone énorme et la gestion forestière intègre la capacité des massifs forestiers à agir comme des puits de carbone. Le Labex CEBA développe des programmes de recherche pour comprendre la dynamique des communautés forestières, en combinant des suivis de long terme des parcelles forestières et des modèles prédictifs. Le CEBA cherche aussi à comprendre la vulnérabilité des forêts tropicales face aux changements environnementaux, qu'il s'agisse de la déforestation ou de la dégradation (liée en Guyane à l'activité minière), ou des changements climatiques. Combinant des approches d'observation et d'expérimentation, on peut évaluer les stratégies des arbres face à la sécheresse et identifier le rôle des facteurs biotiques (en particulier les associations microbiennes), impliqués dans les stratégies de prévention / tolérance à la sécheresse.

## — Résultats majeurs

Grâce au labex CEBA, 23 300 arbres ont été inventoriés sur 109 nouveaux relevés dans le Sud (Mts Tumuc-Humac, Mt Itoupé, Mt Galbao), et le Nord (Mt Kaw) de la Guyane, et identifiés grâce à l'Herbier IRD de Guyane. Les équipes du CEBA ont révélé des patrons de diversité spécifique aux échelles locale, régionale et continentale et ont étudié différentes hypothèses explicatives de ces patrons : facteurs environnementaux, écologie des espèces, perturbations humaines récentes ou anciennes, histoire et évolution des flores. Pour la première fois, un lien fort entre diversité



Vue aérienne d'une forêt du Sud de la Guyane, montrant la très grande diversité des espèces d'arbres qui cohabitent dans ces écosystèmes.  
Crédit photo : D. Sabatier, IRD.

spécifique et diversité génétique a été démontré à l'échelle du peuplement, suggérant des échanges de gènes fréquents entre espèces phylogénétiquement proches. Plusieurs études ont été consacrées au développement d'outils d'identification de la diversité des arbres notamment par télédétection et aux méthodes de mesure ou d'estimation. De nouvelles espèces d'arbres ont été décrites. L'un des résultats majeurs de cette approche est de pouvoir quantifier les risques pesant sur la diversité des arbres amazoniens et d'évaluer leur rareté naturelle, aidant ainsi à quantifier plus précisément les ressources biologiques des forêts de l'Est Amazonien et du plateau des Guyanes. Le projet a également permis de développer des outils pour caractériser finement la diversité génétique d'espèces dites orphelines (pour lesquelles il n'existe pas de génome de référence), afin d'aborder les études sur l'adaptation, ainsi que mettre en évidence des gènes candidats exprimés différemment selon les populations ou les environnements.

Le Labex CEBA a également cherché à améliorer les connaissances sur les ressources en bois et plus généralement contribué à évaluer les potentiels et les limites de la filière bois en Guyane. Ces études ont ainsi permis de donner des perspectives d'avenir à des plantations patrimoniales comme le bois de rose, ou certaines plantations de bois d'œuvre à forte valeur ajoutée comme le cèdre Sam et la Bagasse. Nous avons aussi cherché à optimiser la création de valeur dans une filière d'extraction à partir de déchets de scierie, ainsi que la valorisation des essences secondaires et des petits bois dans des marchés de niche.

Une approche de modélisation de dispositifs forestiers nous a permis de mieux prévoir le renouvellement des ressources forestières et de prédire l'impact du changement climatique sur ces ressources. Par ailleurs, la modélisation a aussi permis de prédire les stocks de biomasse ligneuse et ainsi de prévoir l'approvisionnement des centrales de biomasse-énergie alimentées à partir des connexes d'exploitation de la filière bois d'œuvre. Via ses équipes, le Labex CEBA est membre fondateur et actif du Centre Technique des Bois et Forêts de Guyane, association qui accompagne l'inter-profession Bois de Guyane et apporte un soutien technique et scientifique à la filière bois. Globalement, nous participons collectivement à différentes instances liées à la filière bois comme la construction de la programmation du Programme Régional Forêt Bois de Guyane ou encore aux réflexions sur « le

Contrat de Transition Ecologique pour le territoire de la Guyane ». Les travaux menés par les équipes du CEBA montrent une très forte diversité de la résistance à la sécheresse des plantes tropicales, avec des conséquences directes pour le fonctionnement de l'écosystème forestier tropical humide sous contrainte hydrique. Parmi les résultats notables, nous avons montré une forte diversité interspécifique des traits hydrauliques (càd en lien avec la circulation de l'eau) des arbres de la canopée associée à la résistance à la sécheresse, et démontré clairement que ces arbres possèdent encore une marge de sécurité hydraulique importante au regard des niveaux de contrainte hydrique du sol rencontrés actuellement. Ainsi, même si des événements majeurs de sécheresse engendrent une forte mortalité à l'échelle de l'Amazonie, la faible vulnérabilité à la sécheresse des arbres en Guyane pourrait expliquer leur plus faible mortalité qu'ailleurs en Amazonie, lors de tels événements.

D'autres études sur la physiologie d'autres types végétaux illustrent la résilience de l'écosystème forestier tropical à des épisodes de sécheresse. Il a été démontré que la croissance et la survie de deux espèces de broméliacées épiphytes (des sites de ponte pour les moustiques) diminuent avec l'augmentation du stress dû à la sécheresse ; cependant, elles présentent des réponses physiologiques contrastées suite au stress hydrique, en raison de leur différence de métabolisme du carbone et de leur capacité à conserver l'eau ou non au cours de la sécheresse. Par ailleurs, pour les lianes, l'augmentation de leur abondance en forêt tropicale humide est observée depuis plusieurs décennies. À l'aide d'une approche isotopique, nous avons montré qu'en période de sécheresse, les lianes de la canopée prélèvent l'eau pour leur transpiration essentiellement en surface, et en général de façon moins profonde que les arbres. Cela permet aux lianes de capturer efficacement les quelques précipitations qui tombent en saison sèche, mais engendre aussi pour elles le risque de subir un fort stress hydrique et dépérir. Notre étude suggère que la concurrence pour l'eau en saison sèche entre lianes et arbres est faible, ces derniers ayant des systèmes racinaires profonds.

À partir des dispositifs de suivi micrométéorologiques, en particulier le dispositif « Guyaflux » à la station de recherche de Paracou, nous avons montré que les flux bruts et nets de carbone et d'eau entre l'écosystème et l'atmosphère varient fortement au cours de la journée et entre les saisons. Ces flux sont limités fortement par le rayonnement solaire pendant la saison des pluies et modérément par le manque d'eau pendant les mois secs. Il en résulte que le bilan de carbone dans l'écosystème est globalement positif en saison des pluies (stockage de carbone pour l'atmosphère) mais plus faiblement en saison sèche.

Notre objectif est maintenant de contribuer à améliorer la manière dont les modèles simulent les flux de carbone dans les écosystèmes forestiers tropicaux et leur réponse à la sécheresse à l'échelle des individus ou à celle de l'écosystème. Les projets soutenus par le Labex CEBA impliquent une collaboration à l'amélioration du modèle français ORCHIDEE-CAN. Nous avons aussi développé un modèle de dynamique de croissance forestière adapté à l'Amazonie, qui permet d'assimiler des données écologiques (parcelles forestières), physiologiques et de télédétection.

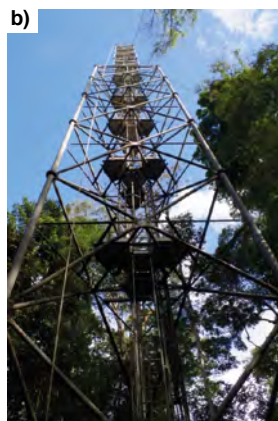
Plus généralement, le lien avec la télédétection des écosystèmes forestiers de Guyane est essentiel pour quantifier la vulnérabilité de ces écosystèmes à large échelle. Des instruments radar (SAR bande C) permettent de suivre l'état hydrique de la canopée superficielle, d'autres embarqués sur la constellation de satellites Sentinel (Agence Spatiale Européenne) permettent de détecter des ouvertures de la canopée de l'ordre de la dizaine de mètres, et offrent donc des outils efficaces pour le suivi de la déforestation. L'ensemble de ces informations, en cours d'acquisition, devrait permettre de précisément évaluer le potentiel des forêts de l'Est Amazonien de persister dans des climats changeants.

Finalement, le Labex CEBA développe des recherches sur la représentation de la biodiversité par les acteurs économiques, sociaux et institutionnels. Dans le cadre des dispositifs légaux qui ont émergé avec la Loi Biodiversité, les enjeux territoriaux de la Guyane ont beaucoup évolué en matière de gestion des ressources biologiques. Le Parc Amazonien de Guyane, qui gère plus du tiers Sud de la Guyane, a été l'un des acteurs majeurs de cette transition. L'ONF est aussi fortement impliqué dans cette évolution, assurant la gestion de près de 6 millions d'hectares, dont 2,4 Mha du Domaine Forestier Permanent. Le Labex CEBA maintient des liens forts avec ces acteurs institutionnels. Par exemple, des études sur l'histoire de l'occupation Amérindienne des forêts de Guyane sont financées par le CEBA, avec l'appui logistique de nombreux acteurs de Guyane.

### — Production scientifique et valorisation

- ter Steege H. *et al.* 2013. Hyperdominance in the Amazonian tree flora. *Science* 342(6156): 1243092.
- Gomes V.H.F. *et al.* 2018. Species distribution modelling: contrasting presence-only models with plot abundance data. *Sci. Reports* 8(1): 1003.
- Barthe, S., Binelli, G., Herault, B. Scotti-SaintAgne, C., Sabatier, D. and Scotti, I. (2017) Tropical Rainforest that persisted: inference from the Quaternary demographic history of eight tree species in the Guiana shield. *Molecular Ecology*, 26 (4): 1161-1174.
- Baker T.R. *et al.* 2014. Fast demographic traits promote high diversification rates of Amazonian trees. *Ecology Letters* 17:527-536
- Bourreau D., Y. Aimene, J. Beauchêne, B. Thibaut. (2013). Feasibility of glued laminated timber beams with tropical hardwoods. *European journal of wood and wood products*, 71 (5) : 653-662.
- Aguilos M., Héroult B., Burban B., Wagner F., Bonal D. 2018. What drives long-term variations in carbon flux and balance in a tropical rainforest in French Guiana? *Agricultural and Forest Meteorology* 253–254:114-123.
- Fauset S. *et al.* 2015. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communication* 6:6857
- Brien R.J.W. *et al.* 2015. Long-term decline of the Amazon carbon sink. *Nature* 519: 344–348.
- Levis C. *et al.* 2017. Persistent effects of pre-Columbian plant domestication on Amazonian forest composition. *Science* 355:925-931.
- Odonne G. *et al.* 2019. Long-term influence of early human occupations on current forests of the Guiana Shield. *Ecology* e02806.

a) Expérimentation en serre pour tester l'influence de la sécheresse sur la résistance à la sécheresse des jeunes arbres en forêt tropicale humide. Crédit photo : Camille Ziegler. b) Tour à flux de 55 m de haut en Guyane destinée à mesurer les échanges de gaz entre l'écosystème et l'atmosphère. Crédit photo : Damien Bonal.



#### Le projet CEBA

##### PIA 1.

**Partenaires** : CNRS, Université de Toulouse III, Université de la Guyane, Institut Pasteur, INRA, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Université des Antilles, Université de Montpellier.

##### COORDINATEUR

**Jérôme Chave** :  
jerome.chave@univ-tlse3.fr,  
www.labex-ceba.fr

## COTE

Évolution, adaptation et gouvernance  
des écosystèmes continentaux et côtiers

## — Rappel des objectifs

L'évolution des sociétés humaines est étroitement liée à la disponibilité des ressources et des services issus des écosystèmes naturels et domestiqués. Durant les dernières décennies, l'équilibre entre sociétés et écosystèmes a été fragilisé par les changements environnementaux, en particulier ceux générés par l'activité humaine (augmentation des terres cultivées, surexploitation des ressources naturelles, pollution chimique et émergence de nouveaux besoins des consommateurs).

Le LabEx COTE réunit des chercheurs en biologie, physique, chimie et sciences socio-économiques, pour comprendre et prévoir les réponses des écosystèmes aux changements induits par l'homme et pour fournir des outils et des méthodes de régulation ou de conduite de leur évolution. Il regroupe 9 laboratoires de l'université de Bordeaux et des principaux instituts nationaux de recherche impliqués dans les recherches sur les écosystèmes terrestres et aquatiques (INRA, CNRS, Irstea et IFREMER). Il réunit plus de 300 scientifiques (chercheurs, enseignants-chercheurs et ingénieurs de recherche), 60 post-doctorants, 130 doctorants, et environ 250 personnels de soutien.

Le projet vise à générer des outils et méthodes de prévision pour réguler ou conduire l'évolution des écosystèmes. Il s'agit d'obtenir différents indicateurs, critères et niveaux de référence de l'état des écosystèmes et de mettre au point des méthodes de gestion adaptative et de gouvernance permettant d'assurer leur durabilité ou de faciliter leur mutation.

L'ambition du LabEx COTE est de développer des recherches couplant l'ensemble des facteurs responsables de l'évolution des écosystèmes, quel que soit l'impact de l'homme sur leur fonctionnement. Il vise à développer une approche générique, s'appliquant autant aux écosystèmes naturels qu'artificialisés et prenant en compte les interactions entre écosystèmes. Cet objectif nécessite le concours de communautés scientifiques diverses et complémentaires, le développement d'approches intégratives innovantes, ainsi qu'un dialogue renforcé entre les chercheurs et la société.

COTE s'appuie sur un réseau expérimental de suivi et de monitoring des écosystèmes concernés (littoral, estuaire, forêts de plaine et de montagne, milieux naturels, vignes, grandes cultures). Ces observations longitudinales portent sur des données climatiques, atmosphériques, chimiques, biologiques et sociales. L'EquipEx XYLOFOREST (Forêt, Bois, Fibre et Biomasse pour le futur), s'intègre dans ce dispositif.

## Le projet COTE

## PIA 1.

**Partenaires :** Université de Bordeaux, INRA, CNRS, Irstea, IFREMER, Bordeaux Sciences Agro.

## COORDINATEUR

**Antoine Kremer :** [antoine.kremer@inra.fr](mailto:antoine.kremer@inra.fr),  
<https://cote.labex.u-bordeaux.fr/>

## Nombre de projets de Recherche financés par le LabEx COTE par écosystèmes étudiés

(n total = 39 sur la période 2011 - 2018)



Photos : Agrosystèmes et forêts : © LabEx COTE | Hydrosystèmes : © SMEAG / Didier Taillefer



# XYLOFOREST

## Plateforme d'Innovation

### « Forêt-Bois-Fibre-Biomasse du Futur »

#### — Rappel des objectifs

XYLOFOREST a pour objectif de mettre en œuvre une plateforme d'innovation « Forêt-Bois-Biomasse du Futur » en dotant les laboratoires de recherche d'équipements et d'infrastructures scientifiques de haut niveau dans les domaines de l'environnement, des biotechnologies et des matériaux appliqués au secteur de la forêt cultivée et du bois. Ces équipements permettent d'accroître les connaissances des systèmes forêt-bois et de développer des solutions innovantes et durables capables d'ajouter de la valeur aux forêts.

#### Objectifs généraux :

Contribuer à l'adaptation et la valorisation des systèmes forêts-bois en développant une plateforme mutualisée de recherche et innovation pour les forêts de plantation et les produits bois, du gène au matériau.

#### Objectifs scientifiques :

- ▶ Évaluer le bilan environnemental de systèmes intensifs de production de bois ;
- ▶ Étudier la genèse et la variabilité génétique du bois, de l'ADN au phénotype ;
- ▶ Caractériser les propriétés et les performances des matériaux et produits bois ;
- ▶ Optimiser les chaînes de valorisation combinées matériau, fibre, molécule, énergie.

#### Objectifs opérationnels :

- ▶ Doter les laboratoires d'équipements structurants ;
- ▶ Renforcer l'écosystème de recherche et développement du pôle de compétitivité XYLOFUTUR ;
- ▶ Mise en réseau national

#### — Résultats majeurs

Le projet d'Équipement d'Excellence XYLOFOREST « Forêt-Bois-Fibres-Biomasse du Futur » a pour objectif de doter des laboratoires de recherche (INRA, Université de Bordeaux, UPPA, ESB, AMPT Cluny, FCBA) dans les domaines des sciences de l'environnement, des biotechnologies et des matériaux appliqués au secteur de la production forestière et de la valorisation du bois avec des équipements de haut-niveau structurés au sein de six plateformes techniques mutualisées et en réseau national. La phase 1 du projet (investissement) a débuté le 22/02/2011 et s'est terminée le 28/02/2014. Les six plateformes XYLOFOREST disposent de 104 équipements fonctionnels depuis cette date. Les instances de gouvernance et de coordination de XYLOFOREST (comité de pilotage, comité scientifique, équipe de gestion) ont été mises en place et sont opérationnelles. De nombreuses activités et projets de recherche régionaux, nationaux et européens ont été initiés et développés en phase 2 (fonctionnement) s'appuyant directement sur les équipements XYLOFOREST et les ressources humaines qui y sont liées, et générant un flux croissant de publications scientifiques et d'activités de valorisation.

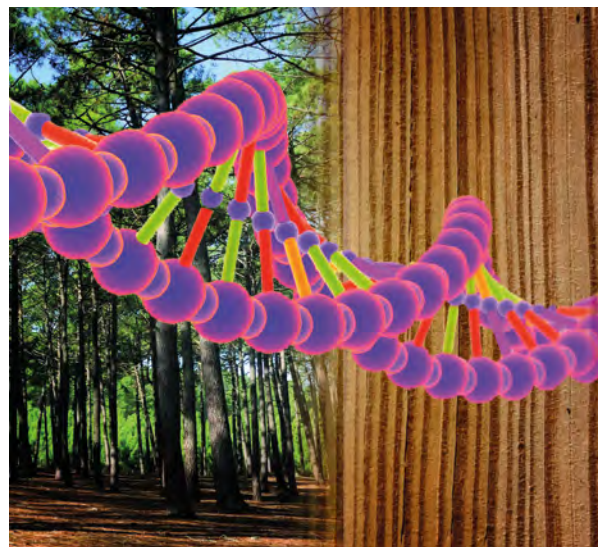


Illustration du projet.  
Copyright : XYLOFOREST.



#### — Production scientifique et valorisation

Depuis 2011, nous avons recensé 148 publications scientifiques dans des revues internationales et 15 dépôts de brevets. En 2018, le taux d'utilisation global des équipements est de 86 % dont 25 % par des utilisateurs hors consortium XYLOFOREST. Les activités pédagogiques s'appuyant sur XYLOFOREST occupent une place importante en lien notamment avec l'IdEx de Bordeaux et les formations de masters et de doctorants (depuis 2011, 517 étudiants formés dont 99 thèses bénéficiant du soutien de l'EquipEx). XYLOFOREST est également inséré dans des infrastructures de recherche européennes, ce qui a permis d'accueillir entre 2014 et 2016 des collègues européens en mobilité transnationale. Des actions de dissémination et de communication ont été menées, dont certaines en partenariat avec le pôle de compétitivité XYLOFUTUR.



#### Le projet XYLOFOREST

##### PIA 1.

**Partenaires :** INRA, Université de Bordeaux, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Arts-et-Métiers ParisTech Cluny, ESB, FCBA.

##### COORDINATEUR

**Rémy Petit :** [remy.petit@inra.fr](mailto:remy.petit@inra.fr), <http://www.xyloforest.org/>



## N°1 - JUIN 2009

**Mobilité et ubiquité :**  
vers le nomadisme  
numérique



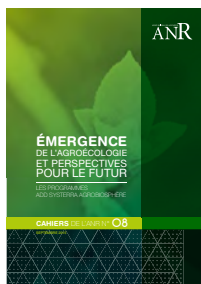
## N°7 - AVRIL 2013

**Environnement et  
changements globaux :**  
des aléas à la vulnérabilité  
des sociétés



## N°2 - JUILLET 2010

**L'énergie partagée :**  
une vision nouvelle  
de l'habitat, de la voiture  
et du territoire



## N°8 - SEPTEMBRE 2015

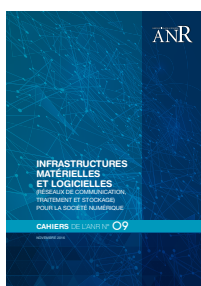
**Émergence de l'agroécologie  
et perspectives pour le futur**

Les programmes ADD-  
SYSTERRA-AGROBIOSPHERE



## N°3 - JANVIER 2010

**Le calcul intensif :**  
technologie clé pour le futur



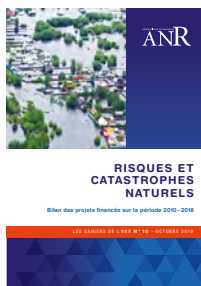
## N°9 - NOVEMBRE 2016

**Infrastructures matérielles  
et logicielles (réseaux de  
communication, traitement  
et stockage) pour la société  
numérique**



## N°4 - MARS 2012

**Intelligence artificielle  
et robotique : « Confluences  
de l'Homme et des STIC »**



## N°10 - OCTOBRE 2019

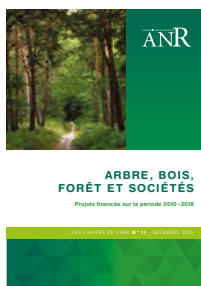
**Risques et catastrophes  
naturels**

Bilan des projets financés  
sur la période 2010-2018



## N°5 - JUILLET 2012

**Les nanotechnologies :**  
un nouveau paradigme



## N°11 - DÉCEMBRE 2019

**Arbre, bois, forêt et sociétés**

Projets financés sur la période  
2010-2018



## N°6 - DÉCEMBRE 2012

**Contaminants  
et environnements :**  
constater, diffuser,  
décider



La collection des Cahiers de l'ANR  
comporte onze numéros, tous disponibles  
sur le site de l'ANR :

[www.anr.fr](http://www.anr.fr)

**Conception et coordination éditoriale :**  
Isabelle Hippolyte et Antoine Morisot,  
en collaboration avec la Direction de l'Information et de la Communication

**Conception et réalisation graphique :**  
[www.ba-ba.fr](http://www.ba-ba.fr)

**Crédits photos :**  
Adobe Stock

« Gratuit ne peut être vendu »





Nous suivre sur :  @agencerecherche  ANR

**[www.anr.fr](http://www.anr.fr) - [www.anr.fr/en](http://www.anr.fr/en)**