

Présentation des unités du Centre de Clermont-Ferrand - Theix

UMR 547 PHYSIQUE ET PHYSIOLOGIE INTÉGRATIVES DE L'ARBRE FRUITIER ET FORESTIER

Le PIAF est une Unité Mixte de Recherche (UMR 547) entre l'Inra et l'Université Blaise-Pascal (UBP Clermont-Ferrand 2) depuis le 1er Janvier 2000 après avoir été la première Unité Associée entre l'Inra et une Université, le 12 octobre 1990. L'UMR PIAF situe principalement ses activités dans le domaine des recherches génériques de l'Inra dans deux départements, le département Environnement et Agronomie (EA) qui est son département pilote et le département Écologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques (EFPA).

Le PIAF est également un des laboratoires de l'UFR Sciences et Technologies de l'UBP et est une des deux composantes, avec l'UMR 1095 GDEC, de l'identifiant 4 du schéma de Centre Inra de Clermont-Ferrand-Theix : « Biologie intégrative des céréales et des arbres : adaptation aux contraintes de la production et de l'environnement ».

Les locaux de l'UMR sont répartis sur deux sites géographiques : sur le Campus Universitaire des Cézeaux (Aubière) et sur le site Inra de Crouël (Clermont-Ferrand).

Les recherches de l'Unité portent sur les réponses des arbres aux facteurs de l'environnement (hydrique, lumineux, mécanique, minéral, thermique) déterminant leur acclimatation ou survie, en prenant en compte les aspects architecturaux et fonctionnels et en travaillant sur l'ensemble du cycle annuel. Nos objectifs sont principalement d'identifier des génotypes ou des écotypes d'arbres plus résistants aux événements climatiques extrêmes, de proposer des modes de conduite des vergers pour limiter le développement des bioagresseurs et donc le nombre de traitements phytosanitaires, de proposer des modes de gestion forestière améliorant la durabilité, de prévoir les modifications d'aires de répartitions des espèces naturelles ou cultivées en fonction du changement climatique.



Jean-Louis Julien
directeur



Thierry Améglio
directeur-adjoint

PROJET SCIENTIFIQUE DE L'UNITÉ

Le projet scientifique de l'UMR PIAF est porté par 3 équipes mixtes et pluridisciplinaires aux spécificités fortes qui abordent l'analyse et la modélisation du fonctionnement des arbres en réponse à des variations des facteurs de l'environnement :

- Le fonctionnement hydraulique pour comprendre s'il permet une résistance et/ou une adaptation à la sécheresse ;
- Le fonctionnement photosynthétique en interaction avec le microclimat de la couronne, la gestion des réserves carbonées et/ou azotées, pour comprendre les mécanismes d'endurcissement et de résistance au gel ou aux bioagresseurs ;
- La régulation mécanoperceptive de la croissance et du développement architectural pour comprendre l'acclimatation et la résilience au vent.

L'intégration des connaissances conduit à un modèle de fonctionnement spatial et temporel de l'arbre et la complémentarité des équipes se traduit par une thématique transversale (responsable : *Marc Bonhomme*) visant à faire progresser nos connaissances sur l'adaptation des arbres aux changements globaux (principalement climatiques) en termes de survie, de croissance ou de production (bois, fruits ou services écosystémiques). Ces projets sont mis en œuvre avec une démarche de physique et physiologie intégratives permise par la complémentarité des outils et des compétences entre les enseignants-chercheurs de l'Université Blaise-Pascal (Biologie moléculaire, physiologie aux échelles moléculaire et cellulaire) et les chercheurs de l'Inra (modélisation, physique et écophysiologie à des échelles plus macroscopiques, l'organe ou la plante entière).

Pour renforcer l'intégration entre les équipes nous avons aussi souhaité focaliser nos activités de transfert sur deux projets transversaux à vocation plus finalisée. L'un visera à coordonner nos travaux sur l'Hévéaculture (responsable : *Valérie Pujade-Renaud*) et le second à mettre en œuvre des recherches sur l'arbre en ville : Ville-Arbre-Environnement (responsable : *Thierry Améglio*).

LES ACTIVITÉS DE RECHERCHE

Hydraulique et résistance à la sécheresse des arbres (HYDRO)



Responsable : *Hervé Cochard*

Les recherches de l'équipe HYDRO portent sur les déterminants physiologiques et génétiques du fonctionnement hydraulique des arbres et des implications sur leur croissance et leur résistance à la sécheresse.

Le système conducteur de sève brute assure l'alimentation en eau des arbres et conditionne ainsi leur état hydrique. La modulation des caractéristiques fonctionnelles de ce système par les variables du milieu a des implications majeures sur la physiologie de l'arbre. L'objectif de l'équipe est de mettre en évidence les processus physiologiques et les bases génétiques qui gouvernent le fonctionnement hydraulique de l'arbre. Pour atteindre ces objectifs,

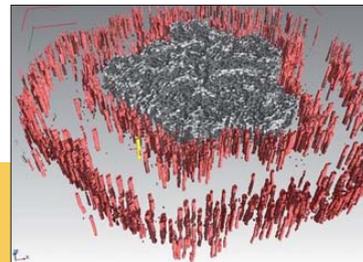
des méthodologies spécifiques sont développées par l'équipe (Xyl'em, Cavitron, Cryo-SEM, Micro-tomographie).

Deux axes de recherche sont développés :

Le premier concerne la modulation des résistances et des capacités hydrauliques par les variables du milieu et l'implication des aquaporines dans cette réponse.

Le second axe porte sur la vulnérabilité des tissus vasculaires à la cavitation et sur l'impact de la formation de l'embolie sur la physiologie de l'arbre. Les bases structurelles et génétiques de la résistance à la cavitation sont recherchées.

Les objectifs finalisés de ces recherches concernent l'amélioration de la résistance à la sécheresse des arbres, tant du point de vue de leur croissance que de leur survie (résilience) à des sécheresses extrêmes.



Visualisation par microtomographie à rayons X de l'embolie vasculaire au sein d'une tige de peuplier. Dans notre approche déterministe, l'observation *in situ* nous permet d'accéder à l'architecture hydraulique en 3D, d'identifier les vaisseaux du bois les plus sensibles à la cavitation (en rouge) et d'étudier ses modes de propagation.

Micro-Environnement et Arbre (MEA)



Responsable : *André Lacointe*

L'équipe MEA analyse les interactions entre l'arbre et son environnement thermique, lumineux ou minéral. Ces interactions sont abordées à l'échelle de l'organe, en relation avec la structure de l'arbre (architecture 3D), qui détermine la distribution du microclimat dans la couronne. Pour cela, l'équipe développe des outils méthodologiques et des logiciels. Les fonctions biologiques étudiées se rapportent principalement à la gestion des ressources carbonées et/ou azotées, appréhendée à travers la variabilité spatiale du fonctionnement photosynthétique de la couronne et la dynamique des réserves. L'expérimentation est complétée par une modélisation de type structure-fonction qui simule l'interaction des différents processus physiques et biologiques, et permet l'intégration spatiale et temporelle.

Cette thématique scientifique est appliquée à la vulnérabilité de l'arbre aux facteurs de l'environnement, déclinée en 3 thèmes finalisés, visant à anticiper et/ou limiter les conséquences des changements climatiques en cours : 1) vulnérabilité aux bio-agresseurs ; 2) vulnérabilité au gel, phénologie hiverno-printanière ; 3) vulnérabilité aux contraintes multiples et récurrentes.

1 - Vulnérabilité aux bio-agresseurs

L'hypothèse de base est que l'architecture de l'arbre fruitier, très variable et modifiable par le producteur, influence fortement le microclimat (lumière, température, durée d'humectation) et donc le développement de ses différents bioagresseurs. Sur pommier, les bioagresseurs visés sont *Venturia inaequalis*, responsable de la tavelure qui est la principale maladie fongique du pommier, et *Tetranychus urticae*, un acarien qui sert de modèle à l'étude des relations entre microclimat foliaire et performance des ravageurs foliaires. Sont abordés : (a) la germination des spores de *Venturia* via la modélisation de la durée d'humectation des organes en prenant en compte les interactions eau/feuille ; (b) la dynamique des populations d'acariens *via* la modélisation de la variabilité spatiale et temporelle de la température foliaire à l'échelle de la feuille et à l'échelle de la couronne. Associés à des scénaris d'évolution du climat, ces modélisations mécanistes permettent de connecter plusieurs échelles, de la feuille au couvert, et d'analyser l'impact des changements climatiques sur le développement des ravageurs et les alternatives aux traitements phytosanitaires *via* la manipulation du microclimat. L'équipe aborde aussi la lutte génétique et biologique contre les maladies de l'hévéa ainsi que les substances de défense naturelle des plantes, afin de réduire l'usage des pesticides.

2 - Vulnérabilité au gel, phénologie hiverno-printanière

L'équipe a déjà établi un lien entre la capacité des cellules vivantes à résister aux températures gélives et le statut carboné et hydrique des tissus. Elle s'attache aujourd'hui à préciser l'effet des conditions de croissance durant la saison de végétation et des températures de l'automne sur ce statut carboné (réserves principalement) et hydrique (absorption racinaire vs. transpiration aérienne) sur une large gamme d'espèces, en combinant approche expérimentale et modélisation du fonctionnement intégré. La sensibilité à l'embolie hivernale, autre effet notable du gel, est également étudiée sur plusieurs espèces à feuilles caduques ou semperviren-



Dans le cadre de la vulnérabilité au gel, nous étudions les liens entre facteurs environnementaux et réponses au froid des arbres *via* la caractérisation des dynamiques thermiques et de la prise en glace (gel/dégel) des parties ligneuses. La figure ci-contre montre une expérimentation menée à l'UMR PIAF qui consiste à spatialiser la dynamique thermique du tronc d'un noyer et les cycles de gel/dégel en réponse aux fluctuations de la température de l'air ambiant et du réchauffement de la périphérie du tronc *via* le rayonnement solaire reçu.

tes, en relation notamment avec l'anatomie du xylème (diamètre des vaisseaux ou des ponctuations). Concernant la vulnérabilité aux gels printaniers, l'équipe étudie les mécanismes influençant fortement la phénologie printanière (débourrement - floraison...). Elle cherche à développer des modélisations mécanistes permettant d'aborder de façon pertinente les évolutions phénologiques dues aux changements climatiques, notamment à l'accroissement des températures hiverno-printanières, à moyen et plus long terme.

3 - Vulnérabilité aux contraintes multiples et récurrentes

La longévité des arbres et les spécificités de leurs réponses aux contraintes, souvent différées et pluriannuelles, rendent nécessaire d'anticiper les risques liés aux changements climatiques. En effet, les modifications annoncées du climat global (réchauffement, aléas gélifs sur des arbres non acclimatés, augmentation des sécheresses estivales, excès de précipitations hivernales, modification de la fréquence des tempêtes) pourraient menacer la pérennité de certains systèmes sylvicoles. Le plus souvent, les interactions entre stress (succession dans le temps ou combinaisons, interactions avec la phénologie des arbres) ne sont pas étudiées en tant que telles. Nous avons commencé à étudier dans nos modèles la « succession » des événements climatiques afin de pouvoir estimer, par exemple, l'évolution des risques de mortalité liés aux gels hivernaux suite à des stress agissant sur le bilan de carbone à l'issue de la saison de croissance. Nous chercherons à compléter cette approche en étudiant à l'échelle de l'individu, pris dans un contexte sylvicole particulier (les chênaies de l'Allier sur sol à hydromorphie temporaire), les facteurs de vulnérabilité (principalement contraintes hydriques et résistance au gel) de deux essences forestières majeures (chênes sessile et pédonculé), connus pour leurs sensibilités opposées aux stress « hydriques » (ennoyage printanier *vs.* sécheresse estivale).

Contraintes MECANiques et activité des zones en croissance (MECA)



Responsable : *Bruno Moulia*

L'équipe MECA est une équipe interdisciplinaire de Bio-Mécanique Intégrative associant des biomécaniciens, des écophysiologistes et des physiologistes moléculaires. Elle analyse les réponses des arbres au vent et à la gravité autour d'une question générique : « **Comment les arbres font-ils pour tenir debout longtemps alors qu'ils déploient leur architecture dans un environnement mécanique fluctuant ?** ».

Dans un contexte de changements climatiques où la fréquence des tempêtes pourrait augmenter à vents courants plus faibles, cette question des mécanismes permettant l'acclimatation et la résilience au vent est devenue cruciale. Nos acquis montrent que la fonction de soutien est active et couplée à la croissance, permettant 1) un dimensionnement de la structure mécanique des plantes (hauteur et diamètre, enracinement) fonction des vents courants pendant la période de croissance (thigmomorphogénèse) et 2) le contrôle postural (port) *via* des processus de redressement actifs tropiques permettant de rattraper d'éventuels accidents mécaniques non létaux. C'est la combinaison de ces deux processus qui assure la plasticité du couplage entre croissance et soutien et permet un port durable et acclimaté à l'environnement mécanique.

Un point clé de ces deux processus est le phénomène de mécanoperception des déformations et des inclinaisons induites par la gravité, le vent ou les manipulations.

Les mécanismes physiques et biologiques impliqués sont analysés de l'échelle de la cellule à celle de l'architecture 3D complète de l'arbre, avec un fort souci d'intégration multiéchelle et un aller-retour constant entre expérimentation et modélisation.

A l'échelle macroscopique des arbres en conditions naturelles nous construisons des modèles biomécaniques de perception-réponse permettant d'identifier, de hiérarchiser et de formaliser les mécanismes physiques et biologiques impliqués dans la mécano-perception et les réponses morphogénétiques. Un effort particulier porte sur l'identification des variables internes mécanoperçues et sur les variations spatio-temporelles de sensibilité mécanique de la plante en fonction de son histoire mécanique. Les travaux à l'échelle moléculaire se focalisent sur les événements moléculaires précoces, et en particulier sur l'identification du réseau de gènes déterminant la sensibilité mécanoperceptive et ses régulations. Dans cette démarche, nous utilisons souvent conjointement des méthodes de morphométrie (suivis continus de vitesse de croissance avec ou sans contact, mesures 3D de forme), de mécanique des structures et des fluides (mise au point d'essais, modélisation) et de biologie moléculaire.



Pour nos études de génomique fonctionnelle intégrative, nous réalisons la transgénèse sur peuplier, et produisons des plantes clonales. Des caractères mécanoperceptifs indépendants du milieu et de la taille de la plante sont estimés grâce à un banc de phénotypage automatisé associé à un modèle mécano-biologique intégratif (phénotypage quantitatif assisté par modèle). Enfin les réseaux d'interaction des transgènes avec le reste du génome sont étudiés.

MOYENS ET PARTENAIRES

L'UMR PIAF compte à ce jour 53 agents permanents dont 14 enseignants-chercheurs (12 UBP et 2 UdA), 10 chercheurs (9 INRA et 1 CIRAD), 10 BIATOS et 19 ITA. Dix scientifiques sont habilités à diriger des recherches. L'unité accueille actuellement 2 ATER, 10 doctorants et 4 post-doctorants et en moyenne 2 à 4 stagiaires en Master 2 recherche par an. Les travaux menés au sein des 3 équipes de recherche bénéficient de l'appui de services communs (secrétariat, gestion, documentation ; informatique, traitement d'image, site web) et d'une infrastructure expérimentale (chambres climatiques, serres conventionnelles et S2, plate-forme de phénotypage de la sécheresse, parcelle expérimentale).

Partenariat scientifique

L'UMR PIAF est partenaire de la **Fédération des recherches en Environnement**, labellisée par le ministère et le CNRS pour le contrat quinquennal 2012-2016. Dans cette fédération, nous sommes co-porteurs d'une action de recherche « Adaptation des agro-écosystèmes au changement climatique » en collaboration avec le Laboratoire de météorologie physique (LaMP), l'Observatoire de physique du globe de Clermont-Ferrand (OPGC), l'UREP et l'UMR GDEC.

En accord avec nos objectifs scientifiques, nous avons développé, principalement au niveau national, des collaborations autour de trois domaines scientifiques principaux :

- **dans le domaine de la génétique** nous collaborons avec de nombreuses unités en métropole (Bordeaux, Montpellier, Orléans, Paris) et Outre-Mer (Kourou, Cayenne, Guyanne) ;
- **dans le domaine de la mécanique et de la physique non linéaire**, nos partenaires sont : Laboratoire de mécanique et ingénieries (Clermont-Ferrand), Laboratoire d'hydrodynamique de l'Ecole Polytechnique (Paris), UMR Matière et systèmes complexes (Paris), Institut de Mécanique des fluides (Toulouse) ;
- **dans le domaine de l'écologie**, au-delà des collaborations régulières avec des laboratoires d'Avignon, Bordeaux, Guyanne, Kourou et Cayenne, l'UMR PIAF participe au groupement de recherche SIPGECC (Système d'information phénologique pour l'étude et la gestion des changements climatiques), et au projet PerPheClim du Métaprogramme Inra « Adaptation au changement climatique de l'agriculture et de la forêt » (ACCAF).

Au niveau international, l'UMR PIAF a un partenariat privilégié avec l'Université d'Innsbruck sur le suivi du stress lié au gel chez les arbres. L'unité est également membre de la plate-forme HRPP (Hevea Research Platform in Partnership) qui coordonne la recherche franco-thaïlandaise sur l'hévéa. Elle a également un partenariat fort avec le Brésil *via* un programme CAPES COFECUB (programme de recherche conjoint de recherche entre équipes françaises et brésiliennes qui encourage la formation par la recherche).

Partenariat économique

Une des originalités de notre UMR est la production de nos propres outils de recherches dans le domaine de l'écophysiologie, outils qui structurent en partie notre partenariat économique et/ou scientifique. Citons pour exemple le « Xyl'em » (Xylem Embolism Meter), appareil portable de mesure de l'embolie des vaisseaux du bois, commercialisé sous Licence Inra par Bronkhorst France depuis 10 ans, dans les Laboratoires d'Hydrauliciens du monde entier (70 appareils dans 14 pays), la plate-forme de phénotypage de la vulnérabilité à l'embolie et la sécheresse : le Cavitron, qui a permis d'asseoir le leadership sur cette thématique de recherche en plein développement ou encore le PépiPIAF (mesure continue de la croissance en diamètre des arbres) utilisé sur l'hévéa par Michelin au Brésil, l'Institut Français du Caoutchouc et les principaux planteurs d'hévéas (SIPH, Socfinco) en Côte-d'Ivoire ou plus près de chez nous sur des arbres d'alignement par la ville de Paris ou les chênes de l'Allier par le CRPF (Centre Régional de la Propriété Forestière).

UMR 547 Physique et physiologie Intégratives de l'Arbre fruitier et Forestier

Pour en savoir plus : <http://www1.clermont.inra.fr/piaf/>

crédits photos Inra/UBP : *Eric Badel, Marc Saudreau, Dominique Marcon*