



Titre du projet de thèse

Mécanismes de renforcement de l'ancrage du Pin maritime face aux vents

Contexte du projet ► Dans le contexte du changement climatique, le maintien et le développement des écosystèmes forestiers dépend de leur capacité à survivre et à s'adapter aux risques multiples auxquels ils sont soumis (incendies, sécheresses, pathogènes, ravageurs, tempêtes). En Europe, les tempêtes qui sont responsables de plus de 50% des pertes en volume de bois depuis 1850, restent la cause principale des dommages en forêts devant les incendies et les ravageurs avec des répercussions écologiques et économiques importantes¹. Ce projet apportera des connaissances sur l'ancrage des arbres et leur acclimatation aux conditions de vent du milieu. D'une manière générale, cette problématique est particulièrement importante non seulement pour la survie des peuplements forestiers et le maintien des fonctions importantes assurées par les forêts (cycle de l'eau, stockage carbone, production de bois...) mais l'ancrage et la présence d'arbres sont également maintenant réfléchis en éco-engineering comme une solution alternative fondée sur la nature pour minimiser des risques naturels comme les éboulements et les coulées de boue et de neige en montagne, la protection des berges et la protection des littoraux².

Thématique et objectifs du projet ► Depuis une quinzaine d'année, on assiste à l'émergence des connaissances sur la capacité des arbres à modifier leur développement en fonction des conditions de vents chroniques³ (*thigmomorphogénèse*). Cette acclimatation leur permet de renforcer leur résistance à des vents violents. Le terme « acclimatation » fait référence, ici, à un ajustement au cours de la vie de l'individu ou plasticité phénotypique. Les travaux sur la thigmomorphogénèse ont principalement porté sur les parties aériennes de très jeunes arbres (moins de 12 mois), et souvent en conditions de serre. Les travaux sur les parties aériennes des arbres ont ainsi montré que les arbres peuvent percevoir les stimuli mécaniques induits par le vent et modifier leur développement en conséquence en modulant leur architecture et les propriétés de leurs tissus. Pour les racines de structure assurant l'ancrage de l'arbre dans le sol, il est maintenant bien établi qu'il existe des phénomènes d'acclimatation au vent similaires^{4,5}. Cette acclimatation au vent se traduit par une plasticité phénotypique des architectures racinaires en réponse aux conditions de vent (augmentation de la section des racines, de la biomasse, ovalisation des sections des racines dans la direction des vents dominants). Mais les mécanismes en jeu sont bien moins connus que pour les parties aériennes en raison de la complexité des phénomènes dépendant ici de l'architecture du système racinaire et du sol.

Ce projet vise à mieux comprendre les mécanismes d'acclimatation du système racinaire aux vents, à caractériser les stimuli perçus par les racines et la réponse des tissus selon le type de stimuli pour en déduire un premier modèle de l'acclimatation au vent à l'échelle du système racinaire.

raison de sa sensibilité au risque tempête, de son importance dans la production de bois en France et des connaissances disponibles sur son développement racinaire, uniques pour une essence d'arbre dans le monde.

Le programme envisagé comporte deux parties. La première vise une connaissance fine (i) des stimuli perçus par les racines lorsque l'arbre se balance sous l'effet des vents et (ii) de la réponse en croissance des racines induites par ces stimuli (croissance radiale et nature des tissus formés). Cette caractérisation repose sur la mise en place d'un dispositif expérimental de suivi des déformations et de la croissance radiales des racines sur des arbres in situ sur lesquels on simule l'effet du vent par des tractions contrôlées. Cette expérimentation sera réalisée sur 10 pins maritimes de 6/7 m de haut car les processus d'acclimatation racinaire sont déjà actifs à ce stade de développement. A l'issue de l'expérimentation, des analyses anatomiques seront réalisées pour analyser la nature du bois formé dans les zones renforcées (présence ou non de bois de flexion). Cette partie doit permettre d'établir des lois de réponse pour l'acclimatation au vent. Cette expérimentation devra être démarrée dès le début du projet en raison du temps nécessaire (i) à la mise au point d'un dispositif opérationnel et (ii) au suivi de la croissance des racines en intégrant les aléas/contraintes d'une expérimentation de terrain (conditions météo, saisonnalité).

La seconde partie consiste à étendre ces lois de réponses pour une plus large gamme d'individus. Pour cela on s'appuiera sur l'analyse d'une base de données déjà existante d'environ 1000 architectures racinaires de pins maritimes obtenues par numérisation 3D. On analysera l'acclimatation au vent dominant de ces systèmes racinaires (répartition de la biomasse, renforcement du diamètre, ovalisation des sections de racines...), en fonction de la taille de l'arbre, de la conformation du système racinaire, du sol, de la provenance et des modes d'installation. Cette analyse sera combinée avec une approche numérique utilisant un code de calcul pour simuler les déformations des racines en modélisant l'ensemble du système (vent/partie aérienne/ partie racinaire)⁶. Les simulations numériques permettront d'établir les distributions de déformations ressenties par l'arbre selon les conditions de vent et de comprendre les réponses observées dans la base de données sur les 1000 individus. Cette confrontation entre observations et simulations devrait permettre d'établir un premier modèle d'acclimatation des racines du fait du vent décrivant des lois de réponse établies sur une large gamme d'individus. Cette seconde partie du projet pourra être menée plus ou moins en parallèle de la première partie selon les contraintes imposées par la partie expérimentale.

Collaborations envisagées et ouverture internationale ► L'acclimatation au vent observées sur les systèmes racinaires sera analysée en étroite collaboration avec C. Meredieu (UMR Biogeco) spécialiste des mécanismes de croissance et de l'architecture racinaire. L'analyse des mécanismes biologique d'acclimatation se fera en collaboration avec des collègues de l'UMR PIAF, INRAE) spécialistes de la mécanoperception chez les plantes. L'analyse anatomique des racines pourra être réalisée dans les laboratoires des Pr A. Desrochers et Pr C. Krause, deux chercheuses renommées sur les racines de l'Université du Québec basées à Amos et à Chicoutimi. Cette collaboration s'inscrit dans le cadre du réseau 2RI (Réseau de recherche internationale) FORWARD (Forêt-Bois-Marché-Société entre la France et le Canada) et du partenariat privilégié de l'Université de Bordeaux avec le Québec.

Lieu ► Le projet sera réalisé entre les UMR ISPA (Villenave d'Ornon) et les UMR Biogeco (Cestas-Pierroton). L'expérimentation sera réalisée sur le domaine de l'UE Forêt-Pierroton. La partie numérique sera réalisée à l'UMR ISPA. Un séjour dans les laboratoires des Pr A. Desrochers et Pr C. Krause (Québec) est envisagé pour l'analyse anatomique des racines.

Compétences recherchées ► Le projet requiert des capacités de conceptualisation des mécanismes d'acclimatation, qui sont des mécanismes combinant processus mécaniques et processus biologiques au sein des tissus. Le projet nécessite un goût pour l'expérimentation de terrain, la mise en place de capteurs, de suivi et d'analyse des signaux mesurés. Il repose sur des compétences en analyse statistique de données. Le projet utilise, pour la partie numérique, des outils informatiques de mécanique des structures (scripts R, code de calcul, serveur

en forêt-bois serait bien adaptée.

Encadrements ► L'encadrement sera assuré par P. Défossez (UMR ISPA) physicienne, spécialiste en mécanique de l'ancrage des arbres et F. Danjon (UMR Biogeco) biologiste, spécialiste de l'architecture des systèmes racinaires des arbres. L'étudiant(e) bénéficiera de l'appui technique et des compétences d'ingénieurs et de techniciens des équipes ISPA et Biogeco pour l'installation du dispositif expérimental, le contrôle du dispositif, le suivi de la croissance et l'analyse des signaux. Pour la partie numérique, il(elle) pourra s'appuyer sur des informaticiens spécialistes en administration de serveurs et en calculs scientifiques (UMR ISPA).

Contacts ►

P. Défossez (UMR ISPA) : pauline.defossez@inrae.fr

F. Danjon (UMR Biogeco) : frederic.danjon@inrae.fr

Bibliographie ►

1. Seidl, R., Schelhaas, M.-J., Rammer, W. & Verkerk, P. J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nature Climate Change* **4**, 806–810 (2014).
2. Rey, F. *et al.* Soil and water bioengineering: Practice and research needs for reconciling natural hazard control and ecological restoration. *Science of The Total Environment* **648**, 1210–1218 (2019).
3. Gardiner, B., Berry, P. & Moulia, B. Review: Wind impacts on plant growth, mechanics and damage. *Plant Science* **245**, 94–118 (2016).
4. Danquechin Dorval, A., Meredieu, C. & Danjon, F. Anchorage failure of young trees in sandy soils is prevented by a rigid central part of the root system with various designs. *Ann Bot* **118**, 747–762 (2016).
5. Danjon, F., Fourcaud, T. & Bert, D. Root architecture and wind-firmness of mature *Pinus pinaster*. *New Phytologist* **168**, 387–400 (2005).
6. Yang, M., Défossez, P. & Dupont, S. A root-to-foilage tree dynamic model for gusty winds during windstorm conditions. *Agricultural and Forest Meteorology* **287**, 107949 (2020).