



PROPOSITION DE STAGE 2026-2027

Le GIS Fruits souhaite soutenir des stages étudiants de 6 mois, niveau Master 2 sur le thème des fruits et offre pour cela de financer des bourses de stages réalisés dans des labos INRAE. Le sujet proposé doit :

- i) s'inscrire dans les axes thématiques du GIS,
- ii) être construit en partenariat entre au moins 3 membres du GIS*,
- iii) le stagiaire doit être encadré par un maître de stage INRAE.

* Les trois partenaires proposant le stage ne doivent pas appartenir à la même unité.

>Axes thématiques du GIS : <http://www.gis-fruits.org/Le-GIS-Fruits/Axes-thematiques>

>Partenaires du GIS : <http://www.gis-fruits.org/Le-GIS-Fruits/Membres-fondateurs>

Organismes partenaires : (1) INRAE (2) CIRAD (3) CTIFL

Lieux du stage : UMR PHIM, Campus de Baillarguet, 34398 Montpellier — déplacements possibles à GAFL, Montfavet (Avignon), pour le suivi terrain et les échanges avec l'équipe GAFL

Durée : 6 mois

Dates : flexible, entre janvier et septembre 2027

Niveau : Stage de fin d'études BAC + 5 (Option Ingénieur, ou Master 2)

Profil du stage : Recherche appliquée, à dominante statistique

INTITULE DU STAGE : Analyse fonctionnelle de données dendrométriques chez le pêcher : biomarqueurs de résilience et modélisation des liens croissance-bioagresseurs-climat

Contexte et problématique :

L'arboriculture fruitière est une filière importante pour l'économie française (3,2 M€ en 2020, INSEE), mais elle reste fragile face à de nombreuses contraintes économiques (compétition internationale, difficultés de recrutement), environnementales (réduction des pesticides, changement climatique) et sanitaires (arrachage obligatoire pour certaines maladies de quarantaine). Le choix variétal, toujours crucial à la plantation d'un verger, est aujourd'hui une véritable prise de risque : l'objectif est de produire des fruits en quantité et qualité suffisantes, de manière stable pendant 10 à 20 ans, si possible avec peu d'intrants (fertilisants, pesticides) et d'entretien (ex. taille, éclaircissage) et dans le contexte général de changement climatique. **Pendant la vie du verger, la gestion de la santé de l'arbre est au centre de l'attention des arboriculteurs** qui sont par ailleurs confrontés à d'importantes restrictions sur l'usage des pesticides.

Contrairement aux plantes annuelles, chez les arbres fruitiers les impacts d'une maladie une année donnée peuvent se répercuter sur la survie et la production les années suivantes. **Pour répondre aux enjeux de réduction de l'usage des produits phytosanitaires**, les équipes INRAE d'Avignon travaillant sur l'abricotier et le pêcher (UR GAFL, INRAE) s'intéressent, avec le Cirad (UMR PHIM, équipe FORISK), à la capacité des arbres à se remettre des attaques successives de bioagresseurs au verger, année après année. L'objectif est d'identifier des individus qu'on qualifierait de « **résilients** », c'est-à-dire **capables de maintenir leur croissance et leur production face aux attaques des bioagresseurs** (Serrie et al. 2024).

Comment identifier ces arbres résilients ? Avec quelles mesures et avec quels indicateurs ? Nous nous sommes inspirés de recherches récentes sur la sélection d'individus résilients dans le domaine de l'élevage, où des 'biomarqueurs' quantifiés au cours du temps servent à calculer des indicateurs de résilience (ex. courbes de lactation, évolution du poids, Elgersma et al. 2018, Bai and Plastow 2022). Notre défi est d'identifier des **biomarqueurs pertinents pour l'étude de la résilience chez les arbres fruitiers**,

c'est-à-dire des mesures qui reflètent un potentiel retour à un équilibre de l'arbre après des attaques de bioagresseurs. Aujourd'hui des capteurs de déplacement appelés **dendromètres** permettent de mesurer très finement et de façon continue la cinétique de croissance radiale des rameaux, troncs, ou charpentières des arbres. De ces cinétiques peuvent être extraits de nombreux **indicateurs de fonctionnement de l'arbre** comme l'**amplitude de contraction** et la **croissance journalière**. Par exemple, lorsqu'un arbre est impacté par une maladie et perd des feuilles, son flux transpiratoire va diminuer, ce qui se traduit par des contractions plus faibles, et la diminution de la photosynthèse à l'échelle de l'arbre peut se traduire également par une réduction de la croissance. Ainsi, les dendromètres vont nous **permettre de prendre le « pouls » de l'arbre en parallèle d'évaluations visuelles des dégâts dus aux maladies et ravageurs** au cours de l'année. Ces capteurs sont classiquement utilisés pour piloter l'irrigation en verger (Fernandez et al., 2011). Il existe beaucoup d'études sur la dendrométrie : l'amplitude de contraction est un bon indicateur du statut hydrique de la plante (Génard et al., 2001), et la dynamique de croissance permet de rendre compte du fonctionnement global de l'arbre, et de l'équilibre source-puits (Silber et al., 2013). Toutefois il existe **une seule étude ayant exploré les dynamiques de croissance ou contraction radiale sur un large diversité** à des fins de génétique (Bartholome et al. 2020). La question traitée dans ce stage est tout à fait nouvelle et originale puisqu'elle met en regard, pour la première fois, croissance radiale et stress biotiques chez les arbres fruitiers, dans une perspective de sélection variétale.

Objectifs généraux du stage / Résultats attendus :

Ce stage a pour objectif de développer des connaissances essentielles à la **construction d'indicateurs de résilience utiles pour la sélection**, à partir de données documentant la croissance des arbres sur plusieurs années chez le pêcher. En s'appuyant sur des mesures dendrométriques d'une charpentièrre, des données climatiques et des relevés de biostress (maladie ou ravageur), le·la stagiaire développera un modèle statistique permettant de caractériser la **dynamique de croissance en fonction de la présence ou non de biostress**, notamment la **capacité de récupération intra-annuelle de l'arbre**. Ce modèle sera utilisé pour identifier des métriques candidates, discriminant les profils de croissance résilients des non résilients, et potentiellement transmissibles à la descendance (*i.e.* héréditaires).

L'étudiant·e contribuera à répondre à **deux questions principales** : 1) Lorsqu'un arbre est malade, observe-t-on un changement dans sa trajectoire de croissance, et si oui, observe-on un retour à un fonctionnement initial dans l'année, qui pourrait refléter une récupération ? 2) Les dynamiques de croissance sont-elles différentes entre les sites d'étude ? Sont-elles directement influencées par des variables climatiques ?

D'importants jeux de données sont déjà disponibles, issus de mesures effectuées sur **8 à 28 pêcheurs** répartis sur deux sites traités et non-traités, **entre 2022 et 2026**. Les capteurs ont été posés pendant la période végétative et ont enregistré les variations de diamètre d'une charpentièrre par arbre toutes les 15 minutes. Ces arbres se répartissent sur **deux sites contrastés**, l'un avec forte pression de cloque et l'autre avec peu de maladies, et soumis à des climats différents — un dispositif qui permet d'aborder les deux questions structurant l'analyse. En parallèle, des **relevés visuels ont été réalisés sur un maximum de 9 bioagresseurs** présents dans le verger au cours de la saison végétative. La **phénologie** des arbres (date de débourrement des bourgeons végétatifs et floraux) et la **charge en fruit** ont également été notées. Sur certains arbres équipés, la croissance végétative a aussi pu être mesurée manuellement en parallèle, apportant un regard complémentaire (Serrie and Bonhomme, in prep).

Ce stage produira des résultats à la fois méthodologiques et exploratoires. Sur le plan méthodologique, il s'agira de développer et d'évaluer un **pipeline d'analyse pour caractériser les dynamiques de croissance à partir des données dendrométriques** : nettoyage des données, construction de métriques pertinentes, et mise en œuvre d'une **analyse fonctionnelle** (FPCA) permettant de disséquer et classifier les cinétiques de croissance. Sur le plan exploratoire, ce travail visera à relier les profils de croissance ainsi obtenus au génotype et à la pression des bioagresseurs, afin d'identifier des indicateurs de résilience héréditaires. Des **facteurs environnementaux** (données des stations météo à proximité) seront intégrés aux modèles pour affiner la caractérisation de ces dynamiques. Le lien entre profils de croissance, climat et biostress sera exploré à l'aide de méthodes de **machine learning** (type Random Forest ou Boosted Regression Trees), permettant d'identifier les variables les plus discriminantes et de hiérarchiser leur contribution.

Perspectives : s'il s'avère que les dynamiques de croissance radiale peuvent servir de biomarqueurs de résilience, notre objectif à l'issue du stage sera de **déployer les dendromètres à plus grande échelle** (sur des collections de plusieurs dizaines d'individus) pour étudier une vaste diversité génétique et progresser

sur la sélection de variétés résilientes. Les résultats seront discutés à intervalles réguliers avec les partenaires pour aider l'interprétation, discuter de leur pertinence par rapport à d'autres essais bas-intrants menés en parallèle, notamment dans la **gestion de l'irrigation**, et des implications pour de **futures expérimentations et pour l'évaluation variétale**.

Publications de l'équipe d'accueil et/ou relative au sujet (et/ou au projet dans lequel s'insère le stage) :

Pour en savoir plus sur les dendromètres employés, voici le modèle choisi : <https://ecomatik.de/en/products/growth-and-plant-water-status-dendrometer/large-diameter-dd-l/>

Bai, X., & Plastow, G. S. (2022). Breeding for disease resilience: opportunities to manage polymicrobial challenge and improve commercial performance in the pig industry. *CABI Agriculture and Bioscience*, 3(1), 1-17.

Bartholomé, J., Mabiala, A., Burlett, R., Bert, D., Leplé, J. C., Plomion, C., & Gion, J. M. (2020). The pulse of the tree is under genetic control: eucalyptus as a case study. *Plant Journal*, 103(1), 338–356. <https://doi.org/10.1111/tpj.14734>

Della Sala, P., Cilas, C., Gimeno, T. E., Wohl, S., Opoku, S. Y., Găinușă-Bogdan, A., & Ribeyre, F. (2021). Assessment of atmospheric and soil water stress impact on a tropical crop: the case of Theobroma cacao under Harmattan conditions in eastern Ghana. *Agricultural and Forest Meteorology*, 311. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108670>.

Elgersma, G. G., de Jong, G., van der Linde, R., & Mulder, H. A. (2018). Fluctuations in milk yield are heritable and can be used as a resilience indicator to breed healthy cows. *Journal of Dairy Science*, 101(2), 1240-1250.

Fernández, J. E., Torres-Ruiz, J. M., Diaz-Espejo, A., Montero, A., Álvarez, R., Jiménez, M. D., ... & Cuevas, M. V. (2011). Use of maximum trunk diameter measurements to detect water stress in mature 'Arbequina' olive trees under deficit irrigation. *Agricultural Water Management*, 98(12), 1813-1821. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2011.06.011>

Genard, M., Fishman, S., Vercambre, G., Huguet, J. G., Bussi, C., Besset, J., & Habib, R. (2001). A biophysical analysis of stem and root diameter variations in woody plants. *Plant Physiology*, 126(1), 188-202. <https://doi.org/10.1104/pp.126.1.188>

Seidel, M., Chen, M., Avelino, J., Ribeyre, F., Landry, C., & Abadie, C. (2026). Heterogeneous disease progress of black leaf streak disease of banana at the within-leaf scale. *European Journal of Plant Pathology*, 174(3), 487-504. <https://doi.org/10.1007/s10658-025-03144-8>

Serrie, M., Ribeyre, F., Brun, L., Audergon, J. M., Quilot, B., & Roth, M. (2024). Dare to be resilient: the key to future pesticide-free orchards? *Journal of Experimental Botany*, 75(13), 3835–3848. <https://doi.org/10.1093/jxb/erae150>

Silber, A., Naor, A., Israeli, Y., & Assouline, S. (2013). Combined effect of irrigation regime and fruit load on the patterns of trunk-diameter variation of 'Hass' avocado at different phenological periods. *Agricultural water management*, 129, 87-94. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.07.015>

ACTIVITES DOMINANTES CONFIEES AU STAGIAIRE :

- Revue bibliographique
- Une à deux visites en verger pour s'imprégner du dispositif expérimental et comprendre le fonctionnement des dendromètres
- Nettoyage et analyse exploratoire des données et extraction d'indicateurs de fonctionnement à l'aide de R-packages existants (ex. 'Treenetproc')
- Modélisation statistique des dynamiques en faisant appel aux statistiques fonctionnelles (FPCA)

- Identification de profils résilients (ex. Random Forest ou Boosted Regression Trees)
- Proposition d'indicateurs de résilience basés sur la modélisation et la littérature
- Possibilité de valorisation scientifique des résultats : communication (colloque, séminaire) et, selon les résultats obtenus, participation à une publication scientifique

PROFIL REQUIS :

- Dernière année de Formation Supérieure BAC + 5
- Connaissances : Un bon niveau en statistiques (modélisation statistique, analyses de données temporelles) est indispensable. Des connaissances parmi les disciplines écophysiologie/génétique/santé des plantes/agronomie sont un plus.
- Compétences opérationnelles : maîtrise du logiciel R, RStudio. Gestion de données de grandes dimensions
- Travail en autonomie, force de proposition, esprit de synthèse
- Langues : français, anglais lu pour réaliser une bibliographie approfondie et pertinente

INDEMNISATION (SUR BUDGET INRAE-GIS FRUITS) :

Selon la réglementation en vigueur pour 2027 (environ 680 €/mois)

AVANTAGES PROPOSES (le cas échéant) :

- déplacements pris en charge par INRAE : des déplacements sur Avignon et un déplacement sur le terrain (Étoile sur Rhone (Drôme) ou Bellegarde (Gard)) seront à prévoir.

CONTACT MAITRE DE STAGE INRAE :

(1) Maître de stage INRAE (obligatoire)

Nom et fonction du responsable à contacter : Morgane ROTH

Adresse : INRAE GAFL 67 allée de Chênes 84140 Montfavet

Tél. : +33 (0) 4 32 72 27 19

Site web (équipe et/ou projet) :

<https://gafl.paca.hub.inrae.fr/partenariats-et-projets/projets-nationaux/resiphen>

<https://gafl.paca.hub.inrae.fr/partenariats-et-projets/projets-nationaux/treed-resist>

Mail : morgane.roth@inrae.fr