

Adaptation locale des espèces d'arbres européens le long de gradients altitudinaux, une approche par la modélisation mécaniste

Lieu : CEFÉ UMR5175, Montpellier

Niveau requis : Master 2

Montant de la gratification : 682.52 €/mois

Date de début du stage : à partir de janvier 2027, selon les périodes de stage et le calendrier du master

Durée : 6 mois

Contacts : louis.devresse@cefe.cnrs.fr, xavier.morin@cefe.cnrs.fr

Les espèces d'arbres les plus communes en Europe se caractérisent par trois aspects : une très grande longévité, de larges populations et d'importants flux de gènes entre les individus. La longévité, qui s'accompagne généralement d'une maturité tardive des individus, est une caractéristique qui va limiter l'adaptation par sélection naturelle des populations. En revanche, chez les arbres, la présence de grandes populations avec des flux de gènes importants entre les individus tend à maintenir la diversité génétique et donc le potentiel adaptatif populations (Danusevičius *et al.* 2024; Petit & Hampe 2006; Rosas *et al.* 2019).

Néanmoins, un flux de gènes important peut empêcher l'adaptation des populations à leurs conditions locales par des échanges de gènes avec des individus distants adaptés à des conditions différentes (Lenormand 2002). L'impact du flux de gènes sur l'adaptation locale se pose particulièrement dans le cas de l'adaptation le long d'un gradient altitudinal, car les pressions de sélection le long du gradient peuvent être fortement antagonistes.

Pourtant des travaux ont simulé l'émergence d'adaptations locales au niveau de la date de débourrement des feuilles chez le hêtre (*Fagus sylvatica*) le long d'un gradient altitudinal en cinq générations (350 ans) à l'aide du modèle mécaniste PDG (Oddou-Muratorio & Davi 2014). Plus tardivement, des observations de terrain ont montré l'existence de gradients d'adaptation locale chez le hêtre pour des traits liés à la croissance et à la phénologie, même à une très fine échelle (moins d'1 km de résolution) (Gauzere *et al.* 2020).

La présence d'adaptation locale à si fine échelle chez le hêtre s'explique sans doute par l'importante sélection qui s'opère à une étape clé du cycle de vie des arbres : la régénération. Entre le stade de la graine et celui de la maturité sexuelle chez les arbres, un très fort goulot d'étranglement a lieu (Kremer 2024). On suppose alors que la proportion infime des individus qui parviennent à l'âge adulte sont particulièrement adaptés à leur environnement local. Le flux de gènes garderait ainsi principalement un effet positif sur l'adaptation et la « pollution génétique » n'aurait qu'un effet marginal. Une question qui reste en suspens est :

dans quelle mesure la mise en place d'adaptation locale à fine échelle s'étend-elle à d'autres espèces que le hêtre cité précédemment ?

Dans un contexte de changement climatique, la question de la colonisation des hauteurs par les espèces d'arbres montagnardes devient aussi de plus en plus critique (Greenwood & Jump 2014; Lu *et al.* 2021 ; Körner et Hiltbrunner 2024). Or, le rôle que peut jouer l'adaptation locale sur ces dynamiques de colonisation est encore incertain (Bontrager & Angert 2019; Fréjaville *et al.* 2020). D'un côté, l'adaptation locale peut réduire la diversité génétique sur le front de colonisation et donc limiter la capacité des populations à coloniser les hauteurs en s'adaptant aux nouvelles conditions environnementales (Barton 2001; Moutouama & Gaoue 2026). D'un autre côté, l'adaptation locale couplée à des flux de gènes importants pourrait favoriser l'installation d'individus dans les hauteurs grâce à des flux de gènes provenant des individus du bas du gradient, plus adaptés à des conditions plus chaudes (Bontrager & Angert 2019). Également, le flux de gènes peut aider à maintenir la diversité génétique qui s'érode avec l'adaptation locale, et ce, d'autant plus fortement au niveau des fronts de colonisation (Lenormand 2002).

Ce travail s'inscrit dans les objectifs du projet REGE-ADAPT (PEPR ForesTT 2025-2029), qui vise à mieux comprendre l'étape de la régénération forestière et son rôle dans l'adaptabilité des forêts au changement climatique. Ce stage se concentrerait sur l'adaptation locale des populations d'arbres en Europe, en particulier dans le contexte de la colonisation des hauteurs des espèces d'arbres induite par le réchauffement climatique. La régénération constitue une étape démographique clé de ce processus. Une modélisation fidèle de la régénération est donc nécessaire pour capturer correctement son impact sur les dynamiques adaptatives ; réciproquement, ignorer l'adaptation locale dans les modèles de dynamique forestière risque de biaiser fortement les prédictions sur la capacité des forêts à répondre au changement climatique.

De récents développements du modèle ForCEEPS permettent l'exploration des questions développées ci-dessus. Premièrement, la mise en place d'un module évolutif permettant l'évolution de n'importe quel paramètre espèce-spécifique du modèle comme un trait quantitatif (Devresse *et al.* 2025). Deuxièmement, le développement (en cours) d'un module de spatialisation et les bases d'un sous-module de dispersion des arbres (Thiriet *et al.*).

La compatibilité de ces deux modules devrait être assurée en amont du stage mais pourrait être affiné au début de celui-ci si besoin, ou si volonté du ou de la stagiaire de s'impliquer dans le développement du modèle. Le ou la stagiaire sera amené·e à 1) identifier des traits d'intérêt pour traiter les questions scientifiques du stage, dont des traits liés à la régénération des arbres, 2) à mettre au point un plan de simulation, 3) à l'exécuter et à en analyser les sorties. Cela sera fait sous l'encadrement des personnes ayant développé le modèle ForCEEPS et ses modules complémentaires, à savoir Xavier Morin, Louis Devresse et Aurélien Thiriet. Des pipelines d'exécution et de récupération des sorties sont déjà disponibles et seront mises à disposition. Dans tous les cas, le travail pourra éventuellement être valorisé par un article scientifique dont le ou la stagiaire sera premier·ère auteur·e et dont les encadrants pourront poursuivre l'écriture à la suite du stage avec l'autorisation et/ou la participation du ou de la stagiaire.

Objectifs du stage

- **Objectif principal** : Déterminer l'importance de l'adaptation locale d'espèces d'arbres européennes le long d'un gradient altitudinal simulée par le modèle ForCEEPS (Morin *et al.* 2021) et son module évolutif (Devresse *et al.* 2025).
- **Objectifs secondaires** :
 - Reproduire les simulations du modèle PDG (Oddou-Muratorio & Davi 2014) et comparer les résultats des deux approches.
 - Explorer l'effet que peut avoir l'adaptation locale sur l'adaptation au changement climatique et dans quelle mesure l'adaptation locale peut influencer sur les dynamiques de colonisation des hautes altitudes avec le changement climatique ?
 - Ouvrir le sujet à des questions d'évolution des capacités de dispersion comprenant de potentiels compromis évolutifs entre les traits de dispersions et d'autres traits majeurs ?

Compétences recherchées

- Fort intérêt pour l'écologie forestière et la biologie évolutive.
- Fort intérêt pour la modélisation et les simulations.
- Bonne maîtrise des outils d'analyses de données (R de préférence ou python) et des méthodes d'analyses statistiques.
- Capacités de rédaction et bonne maîtrise de l'anglais.
- Des notions de programmation orienté objet seront utiles si le ou la stagiaire veut s'impliquer dans le développement du modèle (le modèle est développé en Java mais toute éventuelle intervention se fera avec l'aide de François de Coligny, ingénieur de recherche à l'AMAP aucune connaissance préalable du langage Java n'est obligatoire).

Contexte d'encadrement du stage

- Le stage aura lieu au Centre d'Écologie Fonctionnelle et Évolutive (CEFE) de Montpellier.
- L'encadrement du stage se fera principalement par Louis Devresse avec l'aide de Xavier Morin.
- Financement : projet REGE-ADAPT.

Candidature

CV et lettre de motivation rédigée sans modèles de langage (LLM IA) à envoyer à :

louis.devresse@cefe.cnrs.fr et xavier.morin@cefe.cnrs.fr

Bibliographie

- Barton, N.H. (2001). Adaptation at the edge of a species' range. *Integrating ecology and evolution in a spatial context*.
- Bontrager, M. & Angert, A.L. (2019). Gene flow improves fitness at a range edge under climate change. *Evolution Letters*, 3, 55–68.
- Danusevičius, D., Rajora, O.P., Kavaliauskas, D., Baliuckas, V. & Augustaitis, A. (2024). Stronger genetic differentiation among within-population genetic groups than among populations in Scots pine provides new insights into within-population genetic structuring. *Sci Rep*, 14, 2713.
- Devresse, L., Way, F., Postic, T., de Coligny, F. & Morin, X. (2025). Evolutionary rescue in a mixed beech–fir forest: insights from a quantitative-genetics approach in a process-based model. *Oikos*, n/a, e11661.
- Fréjaville, T., Vizcaíno-Palomar, N., Fady, B., Kremer, A. & Benito Garzón, M. (2020). Range margin populations show high climate adaptation lags in European trees. *Global Change Biology*, 26, 484–495.
- Gauzere, J., Klein, E.K., Brendel, O., Davi, H. & Oddou-Muratorio, S. (2020). Microgeographic adaptation and the effect of pollen flow on the adaptive potential of a temperate tree species. *New Phytologist*, 227, 641–653.
- Greenwood, S. & Jump, A.S. (2014). Consequences of Treeline Shifts for the Diversity and Function of High Altitude Ecosystems. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 46, 829–840.
- Kremer, A. (2024). Évolution biologique des arbres et évolution climatique: *Futuribles*, N° 461, 23–40.
- Korner et Hiltbrunner 2024, Rapid advance of climatic tree limits in the Eastern Alps explained by on-site temperatures, Regional Environmental Change
- Lenormand, T. (2002). Gene flow and the limits to natural selection. *Trends in Ecology & Evolution*, 17, 183–189.
- Lu, X., Liang, E., Wang, Y., Babst, F. & Camarero, J.J. (2021). Mountain treelines climb slowly despite rapid climate warming. *Global Ecology and Biogeography*, 30, 305–315.
- Morin, X., Bugmann, H., Coligny, F., Martin-StPaul, N., Cailleret, M., Limousin, J., *et al.* (2021). Beyond forest succession: A gap model to study ecosystem functioning and tree community composition under climate change. *Funct Ecol*, 35, 955–975.
- Moutouama, J.K. & Gaoue, O.G. (2026). Genetic Diversity Declines Toward Species' Range Edges, While Population Abundance and Growth Rate Show no Clear Trend. *Journal of Biogeography*, 53, e70233.
- Oddou-Muratorio, S. & Davi, H. (2014). Simulating local adaptation to climate of forest trees with a Physio-Demo-Genetics model. *Evol Appl*, 7, 453–467.
- Petit, R.J. & Hampe, A. (2006). Some Evolutionary Consequences of Being a Tree. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.*, 37, 187–214.
- Rosas, T., Mencuccini, M., Barba, J., Cochard, H., Saura-Mas, S. & Martínez-Vilalta, J. (2019). Adjustments and coordination of hydraulic, leaf and stem traits along a water availability gradient. *New Phytologist*, 223, 632–646.