

**VULNÉRABILITÉ DES FORÊTS FACE AUX PERTURBATIONS CLIMATIQUES,
UNE APPROCHE PAR SIMULATION DÉMO-GÉNÉTIQUE POUR RAISONNER DES
STRATÉGIES DE GESTION ADAPTATIVE DU CÈDRE ET DU SAPIN DOUGLAS**

Thèse de Victor **FRIRION**¹

Thèse analysée par Antoine **KREMER**²

Directeur de thèse : François **LEFÈVRE**, Directeur de recherche, INRAE Avignon

Co-directeur de thèse : Hendrik **DAVI**, Directeur de recherche, INRAE Avignon

Unité de recherche des forêts méditerranéennes, INRAE Avignon

Le travail de thèse de Victor Fririon affiche un double objectif : (1) évaluer les capacités évolutives et de résilience des forêts au changement climatique en cours, ou à défaut les risques d'effondrement des écosystèmes forestiers, et (2) évaluer notre maîtrise de ces trajectoires au travers de pratiques sylvicoles adaptées. Ces objectifs sont poursuivis à l'aide d'un outil de simulation, reproduisant *in silico* les processus écologiques, démographiques et génétiques contribuant à l'évolution à court terme des populations d'arbres, avec le souci d'identifier les mécanismes éco-évolutifs façonnant de manière significative cette évolution. Cette démarche aboutit ultimement à définir des stratégies de sylviculture adaptative permettant d'atténuer la vulnérabilité des forêts au changement climatique. Au plan de la mise en œuvre de cette approche, les recherches menées par Victor Fririon portent sur des aspects méthodologiques de mise au point et de paramétrisation des modèles utilisés, de leur application, au besoin de validation dans le cas d'exemples concrets (Cèdre, Douglas) et, finalement, d'inférences sur le fonctionnement et la gestion des populations d'arbres confrontés aux défis climatiques.

L'ensemble est structuré sous la forme de quatre articles intégrant ces différents aspects (**méthodologiques, applicatifs et inférentiels**) à des stades plus ou moins achevés avant soumission pour publication. Une partie introductive organisée en trois chapitres situe le contexte sociétal et scientifique de ces recherches, argumente le bien fondé des objectifs et de la démarche et annonce le plan poursuivi. Une partie conclusive résume les principaux résultats obtenus, en fait une analyse critique et élabore des perspectives d'application plus larges. Dans cette analyse, les trois aspects principaux de la thèse seront abordés afin d'en dégager les principaux apports, ainsi que l'intérêt de ce sujet pour l'Académie.

Les **aspects méthodologiques** sont traités dans les articles 1 et 2. L'article 1 donne le cadre conceptuel général des modélisations démo-génétiques et individus centrés, et de leur intérêt pour appréhender l'évolution des populations à court terme. C'est une présentation très

¹ Thèse préparée au sein de l'École doctorale n°584 GAIA de l'Université de Montpellier pour les Sciences du vivant et de l'Environnement et les Sciences et Technologies, spécialité « Sciences de l'évolution et de la biodiversité », soutenue le 7 décembre 2022.

² Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 2 « Forêts et filière-bois ».

générique, applicable à toute espèce et mettant l'accent sur les interactions entre individus dans les mécanismes contribuant à la croissance, la reproduction, la survie et la mortalité des individus. C'est une excellente introduction « conceptuelle » aux méthodes déployées dans la suite du travail. La description du modèle appliqué (Luberon 2) dans le cas des arbres par Victor Fririon est faite dans l'article 2. Luberon 2 résulte d'un couplage d'un modèle de dynamique forestière avec un modèle de génétique quantitative des populations développé sur la plateforme Capsis. L'organigramme situe de manière pertinente l'implication des processus « naturels » et « anthropiques » dans les cycles de vie et de génération des populations d'arbres. Luberon 2 est calibré empiriquement sur des données expérimentales génétiques et écologiques obtenues dans des expérimentations ou observations antérieures sur le cèdre dans le massif du Luberon. Sur ces aspects méthodologiques, la contribution et l'apport de Victor Fririon à Luberon 2 se situent dans le développement d'un environnement graphique interactif pour visualiser le peuplement initial, les interventions et les différentes sorties.

Les **aspects applicatifs** sont traités partiellement dans l'article 2 et dans l'article 4 et concernent deux espèces, le cèdre (Article 2) et le Douglas (Article 4). Ces deux études utilisent Luberon 2 et répondent à différentes questions. Le cas du cèdre représente un exemple d'école et un modèle « neutre » (en quelque sorte correspondant à une hypothèse nulle). Il se concentre sur l'évolution d'un trait phénotypique corrélé à la *fitness*, dont l'architecture génétique est bien connue, et sans intervention sylvicole de nature sélective. Il permet de la sorte d'obtenir des indicateurs du potentiel adaptatif révélés par l'action de la seule sélection naturelle. Il fait notamment apparaître l'intérêt du renouvellement « rapide » des générations dans l'évolution adaptative. Dans le cas du Douglas, l'attention est tournée vers le rôle des mécanismes évolutifs et interventions anthropiques dans l'atténuation de la vulnérabilité face à la sécheresse et s'inspire pour paramétrer le modèle des connaissances écophysiologiques obtenues sur cette espèce. Il apparaît que l'évolution adaptative peut être rapide face au stress hydrique mais préjudiciable à la croissance, et que l'évolution est stimulée au stade juvénile grâce notamment aux intensités de sélection élevées dans les semis issus de régénération naturelle. A l'inverse, une sylviculture intensive (faible densité, éclaircies fréquentes et systématiques) a tendance à réduire ce potentiel adaptatif. Ces deux exemples illustrent l'intérêt d'utiliser les modèles démo-génétiques pour comprendre les processus en cours actuellement dans les peuplements forestiers.

Les **aspects inférentiels** sont traités dans la partie conclusive. Globalement, il ressort de ces travaux de simulation qu'une évolution de nature adaptative rapide pourrait être à l'œuvre dans les peuplements contemporains. En effet l'espace des paramètres testés dans les deux modèles (cèdre et douglas), couvre l'amplitude des variations attendues dans le contexte du futur proche (notamment de sécheresse) et ne s'est pas heurté à des scénarios d'effondrement des populations. Il ressort également de ces modélisations l'intérêt de prolonger la période juvénile de peuplement propice à un effet plus prononcé de la sélection naturelle - via l'intensité de sélection - pour promouvoir une adaptation plus rapide. Implicitement ce résultat tempère l'application d'une sylviculture plus précoce et intensive comme mesure de gestion adaptative. L'action efficace de la sylviculture pourrait se situer, par contre, dans le raccourcissement des rotations, contribuant de la sorte à augmenter les taux d'évolution adaptative par unité de temps. En résumé, en citant Victor Fririon « raccourcir le cycle sans intensifier la sylviculture », telle pourrait être la phrase conclusive de cette thèse.

En résumé, la thèse est bien construite autour de ces trois points, même s'ils ne sont pas explicitement cités, et que l'écriture un peu touffue (notamment au début) en masque la dialectique. L'enchaînement des articles suit en tous les cas cette structure. Il reste que l'article 3, dévolu à l'analyse de la variation phénotypique de la croissance et de la sensibilité à la sécheresse chez quatre espèces (Hêtre, Douglas, Pin maritime, Chêne sessile) et basé sur des données dendroécologiques s'écarte de cette structure. Il apparaît « célibataire » et sa contribution au reste du travail n'est pas immédiate.

Cette thèse vient à point nommé. Elle répond aux questionnements récurrents de la vitesse de l'évolution biologique au regard de la vitesse de l'évolution climatique. Elle alimente avec des arguments solides le débat entre gestion adaptative et libre évolution en réponse aux défis climatiques. Enfin, elle offre un outil permettant de confronter observations contemporaines et prédictions théoriques. Ces trois enjeux apparaissent à différents endroits dans la thèse et reçoivent une attention soutenue dans la partie conclusive, qui me semble être la partie la mieux organisée et rédigée de la thèse.

La qualité et la quantité impressionnante des résultats de ce travail de thèse méritent d'être valorisés par la mise de cette analyse sur le site et de figurer dans le Mensuel de l'Académie.