

FIABILITÉ DES PROJECTIONS DES MODÈLES D'AIRE DE RÉPARTITION DES ARBRES FORESTIERS

Thèse de Victor **VAN DER MEERSCH**¹

Analysée par Bernard **ROMAN-AMAT**²

Directrice de thèse : Isabelle **CHUINE**, Directrice de recherche, Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE), CNRS, MONTPELLIER.

~~~~~

### Contexte et présentation de la thèse

Depuis près de vingt ans, de nombreux travaux scientifiques sont consacrés à l'évolution de l'aire de distribution des espèces forestières du continent européen sous l'effet des modifications attendues du climat. Les simulations produites par ces travaux conduisent très souvent à envisager des déplacements de ces aires de distribution sur des distances considérables. Ces travaux revêtent une grande importance à la fois sur le plan théorique (notamment précision de la notion de « niche écologique ») et du point de vue pratique pour l'orientation des politiques de gestion des forêts.

Dans ce contexte, cette thèse apparaît tout à fait pertinente, puisqu'elle concerne la calibration et la validation de modèles d'aires de distribution de certaines essences d'arbres forestiers en Europe. Les échelles retenues sont celles du continent européen pour l'espace, du demi-siècle et du millénaire pour le temps.

Rédigé en anglais, le document de 164 pages comprend une introduction de 15 pages, quatre chapitres correspondant à des articles à différents stades de publication, une discussion de 11 pages, un résumé long en français, des annexes pour les chapitres 1 à 4 (46 pages) et une bibliographie. Au moment de la soutenance de thèse, le chapitre 1 était publié dans *Methods in Ecology and Evolution*, le chapitre 2 venait d'être accepté à *Ecology Letters*, et les chapitres 3 et 4 étaient en préparation en vue d'une soumission. L'ensemble du document est soigneusement présenté et agréable à lire.

### Contenu

*L'introduction* est riche en information et présente bien les enjeux de ce travail. Elle établit clairement la distinction entre les modèles phénoménologiques (empiriques, observationnels, corrélatifs) et les modèles mécanistes, fondés sur les processus. Ces derniers sont représentés dans cette thèse par deux modèles développés par des équipes françaises : *CASTANEA* (réserves carbonées résultant de la photosynthèse) et *PHENOFIT* (index de « fitness » fondé sur la phénologie et la reproduction). L'hypothèse qui sous-tend toute la thèse

---

<sup>1</sup> La thèse de Victor VAN DER MEERSCH a été préparée au Centre d'écologie fonctionnelle et évolutive (CEFE) CNRS Montpellier, dans le cadre de l'école doctorale GAIA « Biodiversité, agriculture, alimentation, environnement, terre, eau », et défendue le 17 octobre 2024 devant un jury présidé par Rachid CHEDDADI.

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

est que les modèles mécanistes auraient en général, car intrinsèquement, de meilleures capacités prédictives.

*Le chapitre 1* explore une méthode nouvelle de calibration de modèles dynamiques complexes. Le problème consiste à calibrer les modèles mécanistes de distribution d'espèces d'arbres forestiers sur la base d'une information préexistante. La correspondance entre données simulées et l'aire de distribution géographique actuelle est évaluée en utilisant l'aire sous la courbe ROC<sup>3</sup> comme métrique de performance. L'apport de cet article est de proposer l'utilisation d'une méthode d'optimisation pour réaliser cette calibration. La méthode proposée (algorithme CMA-ES<sup>4</sup>) tend à mieux reproduire les observations que la calibration dite « d'expert ». Tant pour le cas de *PHENOFIT* que de *CASTANEA*, le test de la méthode sur trois espèces d'arbres aux tempéraments très contrastés, Hêtre, Chêne vert et Sapin pectiné, démontre une performance fortement améliorée. Cet article introduit une méthode qui pourrait se révéler utile dans bien d'autres contextes pour les modèles complexes en écologie et évolution.

*Le chapitre 2* examine la capacité des modèles à représenter l'évolution des aires naturelles de cinq espèces forestières (chênes sessile, pédonculé et vert, hêtre et sapin pectiné) pendant les 12 000 dernières années, c'est-à-dire depuis la fin du dernier maximum glaciaire. Les modèles comparés sont *PHENOFIT* et *CASTANEA* en deux versions, « de base » et calibrée selon la méthode présentée au chapitre 1, qui viennent s'ajouter à cinq modèles corrélatifs. Les données relatives à la présence des espèces proviennent des travaux sur les pollens fossiles, celles concernant les paléoclimats sont issues de simulations réalisées avec le modèle HadCM3B-M2.1<sup>5</sup>. Le résultat principal est que les modèles mécanistes (calibrés) conservent un meilleur pouvoir explicatif que les modèles corrélatifs lorsque la dissimilarité climatique augmente. Cette supériorité des modèles mécanistes est aussi constatée lors de simulations prédictives concernant la période 2050/2060. Les résultats montrent également certaines limites fortes des modèles : aucun modèle n'est satisfaisant pour le chêne vert, la présence des espèces en Angleterre est mal représentée (peut-être en raison des perturbations liées au niveau de la mer dans la Manche). Globalement, ce chapitre très original par sa démarche, et important par ses résultats, constitue l'une des parties les plus intéressantes de cette thèse.

*Le chapitre 3* revisite plus en profondeur le problème de la calibration des modèles mécanistes à l'aide de données de distribution, déjà abordé au chapitre 1, en s'intéressant à *PHENOFIT* mis en œuvre sur sept espèces différentes (sapin pectiné, bouleau pendula, hêtre, frêne commun, mélèze d'Europe, épicéa commun, chênes pubescent et pédonculé). Les résultats sont mitigés : d'un côté la calibration inverse peut être très utile pour estimer les paramètres de certaines parties d'un modèle lorsque des données spécifiques font défaut (exemple de la maturation des fruits), de l'autre les paramètres estimés ne sont pas nécessairement réalistes (par exemple erreurs importantes pour la phénologie du hêtre). Victor VAN DER MEERSCH souligne la nécessaire vigilance par rapport aux équations des modèles mécanistes.

*Le chapitre 4* vise à produire avec le minimum d'incertitudes des projections des changements d'aire de répartition des espèces d'arbres forestiers en Europe, selon deux scénarios climatiques (SSP2 et SSP5), en utilisant les modèles mobilisés dans les chapitres précédents

<sup>3</sup> La courbe ROC, de l'anglais « receiver operating characteristic », mais également dénommée en français par ce sigle, est la mesure de performance d'un système de classement en deux groupes, typiquement un groupe de signaux bien détectés (vrais positifs) et un groupe de signaux mal détectés (faux positifs).

<sup>4</sup> La stratégie d'évolution par adaptation de matrice de covariance (CMA-ES) est un algorithme d'optimisation numérique de problèmes non linéaires ou non convexes, reposant sur le principe de l'évolution biologique soumise à l'interaction répétée entre variation et sélection.

<sup>5</sup> Les modèles de la famille HadCM3 sont des modèles climatiques, dits de circulation générale, couplant océan et atmosphère, élaborés par le centre Hadley pour la recherche et la prédiction climatique du Met Office, service météorologique du Royaume-Uni.

(corrélatifs, mécanistes ajustés ou non). Six espèces ont été considérées : sapin pectiné, hêtre, chênes sessile, pédonculé, pubescent et vert. Les prévisions varient fortement selon les espèces. Espèce par espèce, les projections divergent selon les modèles, notamment aux marges des aires de distribution (extinctions au sud, expansions au nord). Avec bon sens et modestie, Victor VAN DER MEERSCH conclut en recommandant de tenir compte de la diversité des approches de modélisation « pour éviter un excès de confiance dans les projections des modèles ».

### **Conclusion**

En cherchant à évaluer les modèles de distribution spatiale des espèces forestières, Victor VAN DER MEERSCH aborde un domaine peu exploré jusqu'à présent en France. Le travail impressionnant qu'il a réalisé illustre le potentiel considérable qu'offre l'exploitation, avec des ordinateurs très puissants des riches bases de données qui sont désormais exploitables au niveau européen. Il explore en profondeur et avec une grande rigueur les modèles de distribution spatiale disponibles, corrélatifs et mécanistes. Il s'efforce aussi, en partie avec succès, de bien tenir compte des réalités biologiques. S'il conclut avec de bons arguments en faveur des modèles mécanistes, il met en lumière les importantes limites des versions actuelles de ces modèles, même après calibration, et ouvre ainsi largement la voie à d'autres travaux.

Pour ces raisons, l'analyse de cette thèse mérite d'être valorisée par sa publication sur le site de l'Académie d'agriculture de France et de figurer dans le Mensuel de l'Académie.