

# DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE DE DYNAMIQUE FORESTIÈRE À GRANDE ÉCHELLE POUR SIMULER LES FORÊTS FRANÇAISES<sup>1</sup> DANS UN CONTEXTE NON-STATIONNAIRE

Thèse de Timothée AUDINOT<sup>2</sup>

Analysée par Sylvie ALEXANDRE<sup>3</sup>  
avec l'aide de Joseph BUONGIORNO<sup>4</sup>

Directeur de thèse : Jean-Daniel BONTEMPS, laboratoire de l'inventaire forestier  
Co-directeur : M. Holger WERNSDORFER, Unité de recherche "SILVA",  
Ecole doctorale «SIReNa - SCIENCE ET INGENIERIE DES RESSOURCES NATURELLES»  
Rapporteurs de thèse : Laura BOURIAUD, Universitatea "Ștefan cel Mare" din Suceava, Roumanie et  
Verena TRENKEL, Unité Ecologie et Modèles pour l'Halieutique, IFREMER, Nantes.

Ce travail visait à étudier la possibilité de simulation des ressources forestières futures et de leur pilotage par le modèle de dynamique forestière à grande échelle spatiale MARGOT<sup>5</sup>: celui-ci a été réanimé, amélioré, et croisé avec le modèle climatique CASTANEA, puis discuté et mis à disposition pour l'utilisation dans la recherche et la gestion forestières. Le style est clair et dans l'ensemble le travail est décrit avec précision.

**Le chapitre I** décrit le contexte et la finalité des travaux. Le constat de la non-stationnarité des forêts françaises à différentes échelles géographiques est appuyé sur les statistiques de l'IGN qui documentent dans le temps l'expansion des forêts : accroissement des surfaces et des stocks, augmentation du volume moyen à l'hectare. Puis il pose la question centrale de recherche : *"malgré le fait que le stock a augmenté plus vite que la surface, et que le taux de prélèvement n'est que 50%, une éventuelle utilisation plus intense de la ressource forestière doit tenir compte de la distribution spatiale de la croissance, mais aussi de l'incidence accrue prévue des perturbations et des sécheresses. Il est donc souhaitable de se doter des moyens de projeter cette ressource dans un avenir où la poursuite de l'expansion est douteuse."*<sup>6</sup> La recherche est centrée sur les modèles de dynamique à grande échelle, qui sont décrits et analysés, en concluant que la simulation de la dynamique forestière en France doit reposer sur le modèle MARGOT introduit en 1993 par l'IFN (Inventaire Forestier National). Aux besoins de recherche identifiés, ce modèle peut répondre, sous réserve d'une modification qui lui permette de tenir compte de paramètres qui vont devenir essentiels : la densité-dépendance et le climat. Des tests de sensibilité s'imposent, autant sur le modèle que sur sa capacité prédictive.

**Le chapitre II** décrit et analyse le modèle MARGOT, qui est une matrice distribuant les arbres en

---

<sup>1</sup> Métropolitaines décrites par l'inventaire forestier national.

<sup>2</sup> Thèse de doctorat présentée devant l'Université de Lorraine, spécialité Biologie et écologie des forêts et des agrosystèmes, soutenue le 13 octobre 2021.

<sup>3</sup> Membre de l'Académie d'agriculture de France, section 2 « Forêts et filière bois ».

<sup>4</sup> Membre associé de l'Académie d'agriculture de France section 2 « Forêts et filière bois ».

<sup>5</sup> MAtrix model of forest Resource Growth and dynamics On the Territory scale.

<sup>6</sup> L'approche stock-flux adoptée élimine des évolutions d'ordre qualitatif (succession temporelles ou spatiales des espèces) ; de même la gestion forestière et les scénarios d'intervention sont passés en deuxième plan.

## ANALYSE DE THÈSE

---

classes de diamètre ; l'entrée et la sortie sont le recrutement d'un côté, et la mortalité ou la récolte de l'autre, le passage entre classes étant régi par un modèle dit "de passage". Les hypothèses de fonctionnement du modèle sont présentées, notamment celle de la stationnarité (constance des paramètres dans le temps) qu'il s'agira de modifier par une hybridation avec un modèle fonctionnel pouvant rendre compte de l'impact du changement climatique dans la gestion des forêts. Selon l'auteur, "*l'absence d'une capacité de recherche en inventaire forestier en France a ... considérablement limité*" le développement de MARGOT. Le chapitre décrit l'IFN, créé en 1958, en estimant riches et incontournables ses données, cet inventaire étant le seul à permettre de calibrer et initialiser MARGOT pour les ressources forestières françaises. Il présente également la méthode utilisée pour surmonter les difficultés liées à l'hétérogénéité des données entre ancienne (1961-2004) et nouvelle méthode d'inventaire (depuis 2005).

**Le chapitre III** présente la construction d'un modèle dynamique à grande échelle, stratifié et paramétré à partir de MARGOT. Il décrit la méthode simplificatrice choisie pour le partitionnement des forêts françaises, les plus hétérogènes d'Europe, en strates homogènes et représentatives, disposant de suffisamment d'observations par strate. Les trois dimensions prises en compte sont le stock de bois sur pied par essence forestière<sup>7</sup>, la grande région écologique GRECO, et le type de propriété, soit un millier de strates. La réduction des strates aux essences dominantes couvrant 2/3 du stock de bois par GRECO, le regroupement des essences de bois à faible volume de bois en "divers feuillus" et "divers résineux", et la suppression des strates présentant un volume inférieur à 0,25% du volume total sur pied, conduisent à 142 strates, réparties en 1251 sous strates départementales. Pour réduire les erreurs de variabilité d'échantillonnage de l'inventaire, sont ensuite éliminées les sous-strates à volume inférieur à 1 Mm<sup>3</sup>, ce qui aboutit à 135 strates, représentant 92% du volume sur pied des forêts métropolitaines. Sont décrits ensuite les paramètres choisis (mortalité et prélèvement, recrutement, passage entre classes de diamètre), et les critères d'évaluation de la capacité prédictive du nouveau modèle (précision, justesse, fidélité).

**Le chapitre IV** (en anglais) est constitué d'un projet d'article portant sur l'estimation des effets des erreurs d'échantillonnage de l'inventaire sur la paramétrisation et les simulations du modèle. Des méthodes usuelles de rééchantillonnage (bootstrap) sont utilisées pour mesurer l'effet des erreurs d'échantillonnage, avec pour résultat la démonstration du fait que les erreurs de simulations sont d'un ordre de grandeur inférieur aux tendances observées sur les stocks, et aussi que l'erreur des simulations sur 40 ans semble être inférieure à l'erreur du modèle lui-même. Ces travaux permettent donc de montrer que les simulations réalisées dans le cadre de la thèse peuvent être pertinentes pour évaluer l'évolution des ressources dans un contexte non-stationnaire.

**Le chapitre V** s'intéresse aux variations temporelles des paramètres démographiques, à leur impact sur les projections du modèle, et à la sous-estimation des prélèvements de bois par l'ancienne méthode d'inventaire<sup>8</sup>, ignorée jusqu'ici dans l'application du modèle MARGOT. L'analyse de la variabilité temporelle historique des paramètres démographiques du modèle met en valeur l'influence sensible du cycle d'inventaire, mais aussi de la région GRECO et de l'essence forestière. Les résultats montrent des variations temporelles des paramètres convergentes pour la mortalité, qui augmente fortement pour toutes les essences, mais moins convergentes sur la croissance, qui augmente sauf sur certaines essences. L'analyse de sensibilité sur les taux de prélèvement confirme une sous-estimation forte des prélèvements en ancienne méthode d'inventaire (entre 30% et 60% selon les classes de diamètre retenues) et souligne la nécessité d'une utilisation raisonnée du modèle lors du traitement des données d'inventaire de l'ancienne méthode, pour de futures études prospectives.

**Le chapitre VI** concerne la prise en compte du changement climatique dans le modèle MARGOT :

---

<sup>7</sup> Seulement 10 essences forestières permettent de couvrir 75% du stock de bois (p.100).

<sup>8</sup> Liée à la sous-estimation des souches de plus de 5 ans

## ANALYSE DE THÈSE

---

une “hybridation” avec le modèle mécaniste CASTANEA<sup>9</sup> est utilisée pour introduire dans MARGOT les variations de la croissance des arbres dues aux changements environnementaux (CO<sub>2</sub>, lumière, température, eau). Le domaine d'études est restreint à 5 essences et 41 strates, soit 34,5% du volume sur pied total. La comparaison des coefficients issus du modèle CASTANEA avec les taux de croissance par période estimés avec les données IFN montre une bonne cohérence pour certaines essences (pin sylvestre), mais de fortes incohérences pour d'autres (chênes), ce qui ne permet malheureusement pas de conclure à la validité de l'approche d'hybridation, et appelle à de nouvelles analyses des incertitudes quelle engendre.

**Le chapitre VII** concerne l'introduction de la densité-dépendance dans le modèle MARGOT. Cet effet sur la croissance et la mortalité est démontré par l'analyse statistique des données IFN. Une nouvelle formulation du modèle MARGOT incluant comme strate la densité est étudiée, en ventilant les points d'inventaire par GRECO et selon trois classes de densité. L'introduction de ce paramètre, tout à fait fondamentale, permet d'éliminer certains biais et améliore la justesse, la précision et la fidélité du modèle sur le stock de bois simulé. Les simulations permettent de confirmer le taux de l'ordre de 30% (déjà publié en 1994) pour la sous-estimation des prélèvements dans les données de l'ancienne méthode IFN.

**Le chapitre VIII** offre une synthèse des apports méthodologiques et des résultats majeurs de la thèse, ainsi que des perspectives pour l'évolution future du modèle MARGOT et son utilisation pour simuler des scénarios de gestion future, ou encore la dynamique du carbone des forêts à l'horizon 2100.

**En conclusion**, Il convient de souligner l'importance capitale du sujet abordé par Timothée AUDINOT. Il existe en effet un très fort besoin à court terme de simulations de scénarios d'évolution de la ressource forestière française à horizon de 100 ans face au changement climatique. Les chercheurs s'intéressant à ces questions en France sont très (trop) peu nombreux.

Il faut saluer la somme considérable de travail accompli pour cette première vraie recherche sur la question identifiée, mise en évidence lors de travaux précédents, mais qui n'avait pas été approfondie. La grande rigueur méthodologique mise en œuvre pour les analyses de la thèse a permis de bien mettre en lumière l'importance de la non-stationnarité de la croissance des forêts et l'importance des effets de densité dépendance. Elle a aussi mis en évidence les précautions à prendre lors de l'utilisation du modèle MARGOT de l'Inventaire forestier national (croissance des arbres) sur des séries temporelles recouvrant la période de l'ancienne méthode de l'IFN. Si l'objectif ultime d'un couplage entre les modèles MARGOT et CASTANEA (effets du climat et du CO<sub>2</sub>) n'a pu être atteint, c'est qu'il est très ambitieux en raison de l'extrême complexité des forêts françaises (essences-structures des peuplements-micro-climats notamment). Il nécessitera encore de nombreux efforts, et probablement plusieurs thèses ; l'honnêteté dont fait preuve Timothée AUDINOT en exposant les difficultés qu'il a rencontrées aidera grandement ses successeurs.

L'importance et la qualité de ces travaux en font donc une étape décisive sur la voie d'une stratégie fondée sur le modèle MARGOT, amélioré par l'introduction de l'effet densité, comme plate-forme de projection des scénarios futurs. Ils justifient pleinement que ce document soit mis à disposition sur le site de l'Académie d'agriculture de France.

### Publications :

#### Articles

---

<sup>9</sup> CASTANEA analyse les flux en CO<sub>2</sub> et en eau ainsi que les effets de la lumière et de la température sur la biomasse peuplements purs et équiennes.  
Copyright Académie d'agriculture de France, 2022.

## ANALYSE DE THÈSE

---

Audinot, T., Wernsdörfer, H., Bontemps, JD. Ancient forest statistics provide centennial perspective over the status and dynamics of forest area in France. *Annals of Forest Science* 77, 77 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00987-5>

Denardou, A., Hervé, JC., Dupouey, JL., Bir, J, Audinot, T., Bontemps, JD. L'expansion séculaire des forêts françaises est dominée par l'accroissement du stock sur pied et ne sature pas dans le temps. *Revue Forestière Française*, 2017, vol. 69, no 4-5, p.319-339.

### Colloques

Audinot, T., Wernsdörfer, H., Colin, A., Bontemps, JD. Large scale forest growth model development to estimate France's forests resources. 19 au 23 mai 2019, colloque NIBIO (North Institutt for bioøkonomi) - A century of national forest inventories – informing past, present and future decisions (Oslo, Norvège), session « Lightning talks 2 ». Poster et présentation orale.

Audinot T. Critères de décisions statistiques pour une partition des forêts françaises et la stratification d'un modèle démographique à grande échelle. 9 et 10 mars 2020, colloque GdR Ecostat 2020 - Réunion annuelle du GDR Ecologie Statistique (Rennes, France), session « Démographie et dynamique des populations ». Présentation orale

Audinot T., Wernsdörfer, H., Colin, A., Bontemps, JD. Développement d'un modèle de macro-dynamique forestière pour simuler la dynamique de la forêt française dans un contexte non-stationnaire. 22 et 23 mars 2018, colloque IGN – 27ème journée de la Recherche (Marne la Vallée, France), session « Laboratoire d'inventaire forestier : avancées récentes ». Présentation orale

Audinot T. Développement d'un modèle de macro-dynamique forestière pour simuler la dynamique des forêts françaises dans un contexte non-stationnaire. 28 mars 2019, finale régionale de l'édition lorraine du concours "Ma thèse en 180 secondes (MT180)". Présentation orale, disponible sur <https://www.youtube.com/watch?v=QlaKzBhflt0>