

**MODÉLISATION DU MICROCLIMAT FORESTIER ET CONSÉQUENCES
SUR LA FLORE DU SOUS-BOIS EN CONTEXTE DE CHANGEMENT
CLIMATIQUE**

***MODELLING FOREST MICROCLIMATE AND ITS CONSEQUENCES
ON UNDERSTORY FLORA UNDER CLIMATE CHANGE***

Thèse de Eva **GRIL**¹

Analysée par Jean-Luc **PEYRON**²

Co-directeurs de thèse :

- Guillaume **DECOCQ**, Professeur de sciences végétales et fongiques (Université de Picardie Jules Verne), Directeur de l'unité de recherche « Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés » (Edysan) ;
- Jonathan **LENOIR**, Chargé de Recherche CNRS (Université de Picardie Jules Verne, unité de recherche Edysan) ;
- Ronan **MARREC**, Maître de conférences (Université de Picardie Jules Verne, unité de recherche Edysan).

Les forêts constituent des écosystèmes remarquables, notamment par la dimension de leurs arbres (hauteur, grosseur, étalement) et par leur fonctionnement (captation de la lumière, évapotranspiration...) qui créent des ambiances très particulières par rapport à l'extérieur. Ainsi, les conditions microclimatiques dans lesquelles baigne le sous-bois se distinguent radicalement du macroclimat constaté en milieu ouvert : les températures y sont généralement moins extrêmes du fait d'un rôle tampon de la canopée qui, en moyenne, réduit les températures maximales de l'ordre de 4°C et augmente les températures minimales de l'ordre de 1°C. Cet effet a été majeur dans le passé récent parce qu'il a déterminé le développement de la biodiversité actuelle sous couvert forestier et influé plus généralement sur l'ensemble du fonctionnement de l'écosystème. Il sera également déterminant à l'avenir dans le cadre du changement climatique qui induit aussi un décalage temporel entre l'évolution des températures hors et sous couvert. Or, il n'a pas été pris en compte jusque-là par les modèles de répartition des espèces qui surestiment ainsi, selon toute vraisemblance, le risque de disparition des espèces.

Le microclimat peut être défini de multiples manières selon l'objectif des analyses. Dans sa thèse, Eva GRIL se concentre sur les températures sous couvert forestier à un mètre au-dessus du sol, qu'elle estime heure par heure à partir de capteurs installés en forêt. Elle les compare aux données, éventuellement interpolées, issues de stations météorologiques proches, existantes ou installées, qui mesurent un macroclimat à 1,5 mètre au-dessus du sol et en milieu ouvert. Elle se concentre aussi sur deux groupes taxonomiques contrastés que

¹ La thèse d'Eva GRIL a été préparée au sein de l'unité de recherche Edysan (Ecologie et dynamique des systèmes anthropisés) de l'Université de Picardie Jules Verne dans le cadre de l'école doctorale en sciences, technologie et santé (ED 585) ; elle a été soutenue le 29 février 2024.

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

sont les plantes herbacées et les bryophytes. Ces dernières (mousses et hépatiques), n'ayant pas de racines, dépendent fortement de l'humidité de leur environnement, donc du microclimat. L'effet tampon du couvert varie avec les caractéristiques des peuplements et avec la saison pour les feuillus. Les peuplements peuvent être décrits à la faveur de mesures de terrain mais aussi par télémétrie, notamment *via* de la télédétection LIDAR aéroportée.

Dans sa thèse, Eva GRIL poursuit plusieurs objectifs : elle étudie d'abord les corrélations entre la température microclimatique et plusieurs autres caractéristiques : la communauté d'espèces en forêt (chapitre 1), la température macroclimatique (chapitre 2), la structure verticale du couvert appréciée par télédétection LIDAR (chapitre 3) ; elle caractérise ensuite la réponse du sous-bois à l'effet tampon du couvert sur cette température microclimatique (chapitre 4) pour discuter des enseignements qui en résultent pour la gestion des forêts sous changement climatique.

Le manuscrit de thèse s'organise autour d'une introduction générale et d'une présentation des méthodes utilisées, puis de quatre chapitres, correspondant chacun à un article scientifique, avant de tirer des conclusions et perspectives. Il est très bien rédigé, en anglais, et complété par un résumé détaillé en français (14 pages) qui suit le plan de la thèse. L'ensemble constitue un tout très cohérent et compréhensible.

Une mise en œuvre d'approches variées

Répondre aux objectifs qui viennent d'être présentés nécessite la mise en œuvre de multiples méthodes et compétences. En premier lieu, le travail repose au total sur treize forêts, contenant chacune un des sites du réseau national RENECOFOR de suivi à long terme des écosystèmes forestiers. Ces treize forêts balayent un large spectre de conditions climatiques (du nord au sud de la France) et de types de peuplements avec des essences et structures végétales contrastées. Les différents chapitres sont spatialement emboîtés dans l'ensemble de ces forêts. Le chapitre 2, qui établit des corrélations entre température hors et sous couvert, utilise les treize sites du réseau RENECOFOR. Les chapitres 1 et 4 se fondent quant à eux sur des relevés effectués dans 157 placettes feuillues localisées dans trois des treize forêts : les forêts domaniales de Mormal (Hauts-de-France, hêtre et chêne pédonculé), de Blois (Centre-Val-de-Loire, chêne sessile) et de l'Aigoual (Occitanie, hêtre). Enfin, le chapitre 3, qui utilise la télédétection LIDAR, porte exclusivement sur les 2.740 hectares de la forêt domaniale de Blois.

Pour mener cette recherche à bien, il a fallu installer près de 300 capteurs de température à raison de six par site RENECOFOR, d'un dans chacune des 157 placettes des forêts de Mormal, de Blois et de l'Aigoual et à raison encore d'une cinquantaine en forêt de Blois en liaison avec les enregistrements LIDAR. Mais les méthodes utilisées sont bien plus diversifiées que ces seules expérimentations. Elles vont du suivi météorologique, floristique et dendrométrique à l'analyse d'images de télédétection aéroportée en passant évidemment par les méthodes statistiques de traitement des données recueillies ou extraites de bases européennes de données floristiques (Euforplant, BryForTrait). Elles nécessitent un apprentissage important et des compétences variées qui n'ont pu s'exprimer qu'à la faveur d'un travail collectif et de dispositions particulières pour organiser et valoriser celui-ci.

Des enseignements riches pour les progrès de la connaissance

Un résultat majeur de la recherche est la mise en évidence d'une relation entre températures hors et sous couvert, qui peut se résumer à deux paramètres : la pente de la régression linéaire entre les deux variables synchronisées (elle était déjà identifiée dans la littérature) et, ce qui est plus nouveau, le point d'équilibre pour lequel les deux températures sont égales. La méthode de la pente et de l'équilibre qui en découle permet non seulement de comparer

microclimat et macroclimat mais également deux microclimats différents entre eux. Elle donne également le moyen de séparer l'effet, sur le microclimat, d'un changement de structure forestière de celui du changement climatique.

Le microclimat a peu été analysé jusque-là, du fait de sa nature très locale qui nécessite la réalisation de nombreuses mesures pour étudier sa variation d'un peuplement à l'autre. C'est là que la télédétection peut trouver sa place en automatisant la mesure des facteurs explicatifs de l'effet tampon de la canopée : la hauteur, la couverture végétale et sa structuration verticale. Avec un pouvoir explicatif de 91%, la relation trouvée en forêt de Blois est très bonne. Il est vrai que le terrain y est relativement plat et porte une seule essence principale. Il a donc été possible de cartographier la température de l'air sous couvert dans l'ensemble de la forêt à une résolution spatiale de 10 mètres et pour diverses échelles de temps (heure, jour, saison). Les résultats seraient vraisemblablement meilleurs, mais encore plus coûteux avec des mesures de terrain et du LIDAR terrestre. A l'inverse, des données de télédétection moins coûteuses que celles du LIDAR aéroporté sont également envisageables avec, cependant, un moindre pouvoir explicatif attendu (combinaison de données « gratuites » RADAR et multispectrales). Le champ est donc ouvert pour des investigations complémentaires.

L'étude de la réponse de la flore aux conditions bioclimatiques montre clairement que les bryophytes et espèces vasculaires spécialistes de cœur de forêt préfèrent les ambiances fortement tamponnées, contrairement aux espèces généralistes ou de lisières (chapitre 4). Cependant, la valeur indicatrice de la flore est apparue peu reliée à la température sous couvert (chapitre 1). C'est donc qu'elle est trop calée sur les données météorologiques hors couvert, ce qui suggère de la réviser. Des prolongements sont par ailleurs à envisager vers d'autres groupes taxonomiques, ou pour séparer effets abiotiques (température, lumière, humidité, vent) et effets biotiques (interactions entre espèces), ou encore pour dépasser le raisonnement en termes de présence/absence, donc de survie, et prendre en compte aussi la phénologie, la croissance et la reproduction.

Des enseignements utiles pour la gestion forestière sous changement climatique

L'effet tampon du couvert forestier joue sur la biodiversité en forêt et permet notamment de préserver les espèces spécialistes des cœurs de forêt, dont les bryophytes. Les méthodes mises en œuvre lors de la conduite de la thèse et les résultats obtenus constituent une avancée considérable pour appréhender l'adaptation de la biodiversité aux pratiques sylvicoles et au changement climatique. Or, l'évolution de la biodiversité en forêt face au changement climatique reste encore largement méconnue en dépit des préconisations formulées (conservation, restauration, rétablissement des continuités...). Des pistes sont donc tracées pour progresser dans ce domaine.

Ce qui vaut pour la biodiversité joue aussi sur la régénération des arbres, la vitalité des semis et la maîtrise de la concurrence herbacée, comme les forestiers le savent bien. Mais la thèse permet d'appréhender à cet égard les modifications introduites par le réchauffement, en séparant effet climatique et effet de la structure forestière résultant des pratiques sylvicoles ou autres perturbations de l'écosystème.

Que l'on s'intéresse à la biodiversité ou à la régénération en forêt, l'effet tampon du couvert forestier varie avec la température : il est plus fort en période de canicule et dans les régions chaudes. Il est donc susceptible d'atténuer le réchauffement sous couvert. Cependant, le changement climatique crée aussi des perturbations qui viennent modifier la structure verticale des forêts et réduire cet effet. Par ailleurs, au-delà d'un certain seuil de sécheresse, les stomates se ferment, la transpiration décroît et, avec elle, son effet rafraichissant. S'il apparaît clairement que les changements brutaux de couvert forestier sont préjudiciables à la flore de sous-bois (coupes rases, fragmentation qui expose les forêts aux extrêmes climatiques), la

sylviculture se caractérise par un ensemble de compromis à adapter aux conditions locales et à trouver à divers niveaux : dosage de la lumière entre densité du couvert et économie des ressources en eau, entre étagement des strates de végétation et prévention des incendies, entre régénération et maintien d'une ambiance forestière.

En conclusion, Eva GRIL a développé une approche innovante du microclimat en forêt. Pour cela, elle a mis en œuvre de multiples méthodes, allant de relevés de terrain dans les domaines météorologique, floristique et dendrométrique à l'analyse d'images de télédétection et à l'inférence statistique, en passant par l'exploitation de grandes bases européennes de données écologiques. Les résultats obtenus valident les méthodes employées pour améliorer la connaissance du microclimat en forêt et pour appréhender la sensibilité des plantes de sous-bois aux pratiques forestières et au changement climatique. Ils ouvrent des pistes complémentaires pour affiner notre perception de la niche écologique des espèces et de son évolution avec le changement climatique. Ses enseignements portent également sur la sylviculture et la gestion de la biodiversité en forêt, ainsi que sur leur adaptation au changement climatique. Pour sa richesse méthodologique, l'intérêt scientifique et l'utilité pratique de ses enseignements pour la biodiversité en forêt et les pratiques sylvicoles sous changement climatique, la thèse d'Eva GRIL mérite amplement d'être reconnue par l'Académie d'agriculture de France et valorisée sur son site et dans le Journal Informatique le Mensuel.