

OCCUPATION DES TERRES ET CLIMAT RÉGIONAL : IMPACT DES SURFACES FORESTIÈRES SUR L'ENNUAGEMENT DANS LE SUD-OUEST DE LA FRANCE

Thèse de Gaëtan **NOUAL**¹

Analysée par Yves **BIROT**²

Directeur de thèse : Yves **BRUNET**, Directeur de recherche, INRAE Bordeaux

Codirectrice : Christine **LAC**, Ingénieur des Ponts, des Eaux et des Forêts, Centre national de recherche météorologique (CNRM) de Toulouse

Co-encadrant Patrick **LE MOIGNE**, Ingénieur de la Météorologie, Centre national de recherche météorologique (CNRM) de Toulouse

Contextes et objectifs

Les forêts mondiales qui occupent plus d'un tiers des terres émergées jouent **un rôle majeur dans le cycle du carbone** (stock et flux) au niveau planétaire. En effet, du fait de l'importance de leur biomasse, elles sont le siège d'échanges gazeux terre-atmosphère considérables à travers la photosynthèse et la respiration. Dans le contexte du changement climatique lié à l'accroissement des émissions anthropiques de gaz à effet de serre, elles ont fait l'objet de très nombreux travaux scientifiques relatifs à leur capacité d'atténuation mais aussi à leur vulnérabilité.

Les forêts jouent aussi **un rôle clé dans le cycle de l'eau** du fait que la photosynthèse s'accompagne d'un transfert d'eau massif depuis le sol vers l'atmosphère sous forme de vapeur (eau verte) : c'est la transpiration, flux auquel s'ajoute l'évaporation du sol et de l'eau de pluie interceptée par la canopée. Les forêts agissent ainsi comme de gigantesques « pompes à eau » influant ainsi sur la teneur en eau de l'atmosphère et la formation de nuages. On estime qu'une fraction importante des précipitations sur les continents est issue de ce processus d'évapotranspiration des couverts végétaux (principalement des forêts). Depuis longtemps, on suspecte que les changements de couverture terrestre, tels que la déforestation, peuvent avoir un impact sur l'ennuagement et aussi sur les précipitations. Toutefois des résultats contradictoires ont été observés selon la latitude et donc les écorégions (par exemple tropicales ou tempérées) et les échelles spatiales considérées, traduisant ainsi une compréhension encore limitée des processus physiques en jeu.

La thèse de Gaëtan Noual vise à approfondir la connaissance de ces mécanismes en s'intéressant à l'étude de la nébulosité estivale à méso-échelle. Son travail a porté sur l'étude du lien entre nuages de couche limite et surfaces forestières en région tempérée. Ce lien avait déjà été démontré par l'observation et certains mécanismes avaient été proposés. Cependant,

¹ Thèse présentée pour obtenir le grade de docteur de l'Université de bordeaux, Ecole doctorale n°304, Sciences et environnements - physique de l'environnement, (INRAE/ISPA & CNRM/GMME), soutenue le 14 mars 2023

² Membre émérite de l'Académie d'agriculture de France – section 2 « Forêts et filière bois »

l'utilisation de modèles à résolution hectométrique, configurés avec les paramétrisations de dernière génération pour représenter l'ensemble des processus physiques influencés par la forêt et conduisant à la formation de nuages de couche limite, restait rare.

Approches suivies et résultats majeurs

La zone d'étude choisie est celle du vaste massif forestier des Landes d'Aquitaine. Elle est bien délimitée par l'océan Atlantique à l'ouest et des cultures pour le reste de ses façades, et ne présente pas de reliefs marqués, ce qui évite d'éventuels effets potentiels d'une telle topographie sur la formation nuageuse. Par ailleurs le massif landais a fait l'objet dans le passé d'importants programmes de recherche tels que Hapex-Mobilhy, axé sur le bilan hydrique régional et le flux d'évaporation, et CarboEurope, consacrée au bilan de carbone régional. Enfin, l'intérêt du massif landais comme zone d'étude était aussi lié au fait que la forêt y a été considérablement altérée par la tempête Klaus en 2009, et que des études postérieures fondées sur la télédétection avaient montré que la déforestation provoquée avait eu un effet sur la formation des nuages. Tous ces travaux ont généré un vaste ensemble de données dans lequel Gaëtan Noual a sélectionné les éléments les plus pertinents et des cas d'études pour nourrir ses travaux de modélisation.

Le travail de thèse fait appel à un modèle à méso-échelle atmosphère-surface (Meso-NH couplé à SURFEX). Meso-NH est un modèle atmosphérique de recherches développé conjointement par le CNRM-GAME et le Laboratoire d'Aérodynamique de Toulouse, qui permet de simuler les mouvements atmosphériques allant de la méso-échelle (~1000 km) jusqu'à une fine échelle de l'ordre du mètre. SURFEX est une plateforme de modélisation de surface développée par Météo-France ; elle est composée de différents modèles physiques de surface terrestre naturelle, de zones urbanisées, de lacs et d'océans, et est capable également de simuler la chimie et les processus de surface des aérosols.

Sur la base des données observées et des trois journées de référence retenues, la configuration du modèle a été d'abord optimisée grâce à des tests de sensibilité à l'initialisation et aux paramétrisations de l'atmosphère et de la surface, parmi les schémas les plus avancés actuellement disponibles.

Une étude de processus a ensuite été conduite pour mieux comprendre les différents comportements de la couche limite au-dessus des zones forestières et non forestières, et l'influence de la forêt sur les nuages de la couche limite. La résolution horizontale choisie de 500 m a permis de simuler avec succès la couverture nuageuse estivale observée au-dessus de la forêt, plus élevée que celle observée au-dessus des espaces non forestiers adjacents. Les processus physiques menant à la formation des nuages ont ensuite été caractérisés sur un cas représentatif. Une analyse comparative des diagnostics et des bilans sur les zones forestières et non forestières a montré que le flux de chaleur sensible et la longueur de rugosité, tous deux plus élevés sur la forêt, sont les principaux « *drivers* » de la convection nuageuse. Les résultats montrent clairement que la présence de la forêt intensifie les mécanismes de brise de mer à cause de l'assèchement et du réchauffement de l'atmosphère au-dessus de la forêt. La forêt est également responsable d'un gradient horizontal de température à sa lisière et les simulations à 500 m de résolution ont permis de mettre en évidence l'existence d'une brise qualifiée de brise de forêt.

L'impact de la tempête Klaus de 2009 a été considérable avec la perte d'environ un tiers des arbres de la forêt landaise et une destruction totale du couvert forestier sur des surfaces importantes. Sur quinze jours d'été convectifs représentatifs, le modèle élaboré par Gaëtan Noual reproduit très bien la diminution de nébulosité estivale rapportée dans une étude

antérieure basée sur des observations satellitaires post-tempête. Comme outil d'analyse complémentaire, les simulations à méso-échelle permettent ainsi de quantifier les impacts des déforestations résultant de la tempête sur l'ensemble du cycle diurne de la couche limite. Enfin, une étude de sensibilité à une évolution de la couverture forestière simulée, dans laquelle on a substitué en proportion variable une prairie à la forêt de pin maritime, a fait apparaître une corrélation non linéaire de la couverture nuageuse avec le taux de couvert forestier de la zone considérée.

De multiples perspectives ouvertes

Parmi les perspectives présentées par Gaëtan Noual, en sus des améliorations à apporter aux données d'entrée du modèle, trois retiennent l'attention.

La thèse a montré que la répartition de l'énergie de surface entre flux de chaleur sensible et flux de chaleur latente est un élément clé du cycle diurne des nuages de couche limite et que cette répartition est très liée au degré d'ouverture des stomates appelé communément résistance stomatique. Celle-ci dépend notamment de paramètres tels que la température et l'humidité de l'air, la teneur en eau des sols ou encore la teneur en dioxyde de carbone de l'atmosphère. De tels paramètres peuvent être modifiés sous l'effet du changement climatique. La configuration du modèle, telle qu'élaborée dans la thèse, pourrait alors probablement permettre de simuler l'évolution future de l'ennuage de couche limite, généré par la forêt dans ce nouveau contexte.

Les forêts émettent des composés organiques volatils biologiques pouvant servir de précurseurs à la formation d'aérosols dont on sait qu'ils peuvent être à l'origine de noyaux de condensation déterminants pour la formation des nuages. Des travaux de modélisation de chimie-transport des aérosols ont permis de mieux caractériser la distribution de ces composés biogéniques dans l'atmosphère. À terme, il pourrait être judicieux de rapprocher ces modèles « chimie » de modèles « physique » comme celui de la thèse pour améliorer la compréhension de la formation des nuages au-dessus des forêts.

Enfin on pourrait, de manière prospective, imaginer d'utiliser le modèle configuré de la thèse comme instrument d'évaluation de la réponse du climat régional à des scénarii d'aménagement du territoire ou encore à des déforestations résultant de projets de d'installation de grandes fermes photovoltaïques ou de catastrophes naturelles, comme les feux de forêts fréquents en Aquitaine.

En conclusion, les travaux présentés par Gaëtan Noual constituent un ensemble très riche et contribuent de manière substantielle et novatrice à la compréhension des processus conduisant à la formation des nuages au-dessus des forêts, et plus largement du rôle joué par les forêts sur le cycle de l'eau. Ils révèlent la capacité de l'auteur et son intérêt à maîtriser un large éventail de données et d'observations, ainsi que d'outils numériques de modélisation. Pour ces raisons, cet excellent travail justifie d'être valorisé par la mise de cette analyse sur le site de l'Académie d'agriculture de France.