

**ASSESSING THE IMPACT OF THE POTASSIUM CYCLE ON STAND GROWTH
AND RESOURCE-USE IN TROPICAL EUCALYPT PLANTATIONS:
A PROCESS-BASED MODELING APPROACH**

***Modélisation mécaniste de l'influence du cycle du Potassium sur la croissance
et l'utilisation des ressources des plantations d'Eucalyptus en zone tropicale***

Thèse de Ivan **CORNUT**¹

Analysée par Claude **PLASSARD** et Alain **GOJON**²

Directeur de thèse : Nicolas **DELPIERRE**, Maître de conférences, Université Paris Saclay
Co-directeur de thèse : Guerric **LE MAIRE**, Directeur de recherche, CIRAD

Contexte général de l'ouvrage

Le document de thèse aborde le couplage des cycles du carbone, de l'eau et des éléments minéraux du sol, couplage qui est au cœur des modifications de la productivité végétale induites par le changement climatique. Pour les forêts tropicales, l'effet des contraintes minérales reste mal connu, en particulier en ce qui concerne le potassium (K^+). Compte-tenu de l'impact fort que peut avoir une carence en K^+ sur la croissance des arbres, une meilleure compréhension des mécanismes impliqués est nécessaire, à la fois pour garantir la productivité des plantations cultivées et pour améliorer les prédictions des réponses des forêts tropicales au changement climatique.

Au Brésil, dans la province de Sao Paulo, deux peuplements d'*Eucalyptus* établis avec des clones à croissance rapide sont suivis de façon intensive depuis de nombreuses années. Dans le premier peuplement, localisé à Itatinga, la fertilisation minérale en K^+ et en Na^+ est manipulée, ainsi que la disponibilité en eau grâce à un dispositif d'exclusion de pluies. Le second peuplement, situé à quelques kilomètres d'Itatinga, héberge une tour à flux et fait partie du projet EucFlux comprenant de nombreuses parcelles forestières réparties sur le globe terrestre. Ce projet vise à mesurer en continu les variables météorologiques ainsi que les flux de CO_2 et de vapeur d'eau entre les arbres et l'atmosphère. Le peuplement « EucFlux » brésilien permet donc de suivre en continu les flux d'eau et la photosynthèse des *Eucalyptus* dans des conditions de fertilisation non limitantes.

¹ Thèse de doctorat de l'Université Paris-Saclay, Ecole doctorale n° 657, Sciences du végétal : du gène à l'écosystème (SEVE), Spécialité de doctorat : Biologie des populations et écologie, Graduate School: BioSphERA, Référent : Faculté des sciences d'Orsay. Thèse préparée dans les unités de recherche Ecologie, Systématique et Evolution (ESE) et Eco&Sols, soutenue à Gif-sur-Yvette, le 24 mai 2022.

² Membres correspondants de l'Académie d'agriculture de France, section 5 « Interactions milieux-êtres vivants ».

Le travail de la thèse d'Ivan Cornut s'inscrit dans la suite des travaux menés de façon très intensive dans ces deux peuplements ces dix dernières années, et qui ont permis d'acquérir des données quantitatives sur la photosynthèse et la nutrition minérale de l'*Eucalyptus* en fonction de la disponibilité en eau et en nutriments. Son objectif était de développer un modèle mécaniste qui rende compte des effets d'une limitation de la nutrition K^+ sur la croissance, le bilan carbone et l'utilisation de l'eau dans les plantations tropicales d'*Eucalyptus*. La démarche choisie a été de combiner deux modèles préexistants des flux de carbone (C) et d'eau dans des plantations forestières (CASTANEA et MAESPA), et d'y adjoindre un nouveau module formalisant les différents éléments du cycle de K^+ au niveau du sol et dans la plante. Le nouveau modèle résultant de ce travail, dénommé CASTANEA-MAESPA-K, a ensuite été paramétré avec des données obtenues préalablement sur les plantations Eucflux et Itatinga.

Le manuscrit de thèse est composé de six chapitres : une introduction générale, une revue de la littérature sur l'impact de la disponibilité de K^+ sur les mécanismes physiologiques et développementaux des arbres, deux chapitres de résultats présentant le travail de modélisation et les résultats des simulations du modèle CASTANEA-MAESPA-K, un chapitre de discussion générale, et un chapitre de conclusion et perspectives. L'ensemble du manuscrit est rédigé en anglais. Sa forme est excellente, avec une structuration en chapitres et paragraphes très didactique, un style clair et précis et une iconographie de qualité.

L'introduction générale est extrêmement utile car elle fournit un panorama succinct mais complet des grands enjeux et processus dans lesquels s'inscrit le travail de thèse, à savoir : les principaux facteurs limitants de la productivité végétale en relation avec le changement climatique, les cycles biogéochimiques d'azote (N), de Phosphore (P) et de potassium (K), l'intérêt de la modélisation écophysiologique pour comprendre l'impact des carences minérales sur la productivité végétale, le rôle spécifique de K^+ dans la croissance des forêts, et la présentation des plantations d'*Eucalyptus* comme modèle d'étude de ces aspects. On peut noter la qualité des analyses contenues dans cette introduction, basées sur une bibliographie pertinente et actualisée.

Le chapitre suivant correspond à un article de revue publié dans *Forest Ecology and Management*. Il fait le point sur l'ensemble des mécanismes physiologiques et développementaux impactés par une carence en K^+ chez les arbres, et qui peuvent expliquer le fort effet de la fertilisation potassique sur la croissance des plantations forestières. L'ensemble est très détaillé, avec plus de 150 articles cités. Il s'agit d'un travail essentiel à la démarche de la thèse, puisqu'il a eu pour objet d'identifier les principaux processus qui nécessitaient d'être formalisés dans le modèle mécaniste qui était le but du travail.

Les deux chapitres suivants sont présentés sous forme de manuscrits d'articles non encore soumis, et délivrent l'ensemble des résultats de la thèse.

Le premier décrit le nouveau modèle CASTANEA-MAESPA-K. Après une rapide présentation des deux modèles CASTANEA et MAESPA préexistants, le nouveau module destiné à modéliser les flux de K^+ dans le sol, entre le sol et la plante, et entre compartiments de la plante, est traité dans le détail. Les différents paramètres introduits, ainsi que les équations qui les décrivent, sont clairement exposés et justifiés. Les résultats des simulations utilisant les données préalablement acquises sur les projets Eucflux et Itatinga sont ensuite détaillés. Ils permettent de mettre en avant la qualité des prédictions issues du modèle en ce qui concerne la croissance de la canopée et sa réponse à la carence en K^+ , mais illustrent également une différence dans cette qualité quand les deux sites (Eucflux et Itating) sont

comparés. Une analyse de sensibilité est également conduite. En ce qui concerne K^+ , ce sont les processus alimentant la disponibilité de ce minéral dans le sol d'une part, et ceux participant à sa recirculation interne dans la plante d'autre part, qui apparaissent déterminants pour expliquer l'impact de la carence.

Le second chapitre de résultats présente une démarche dont le but était d'identifier quels aspects de la gestion du C par la plante expliquent l'impact négatif très fort de la carence en K^+ sur la croissance des *Eucalyptus*. La conclusion mise en avant est que l'inhibition de l'activité photosynthétique des organes-source suffit à expliquer cet impact, sans qu'il soit nécessaire de considérer d'autres effets, tels que l'inhibition de la croissance des organes-puits.

La discussion générale et la conclusion sont relatives courtes (respectivement six et quatre pages). Elles récapitulent bien les principales conclusions du travail de modélisation (importance des flux de K^+ dans le sol et dans la plante, rôle déterminant de l'activité photosynthétique pour expliquer l'effet de la carence en K^+). Elles mettent aussi en avant l'intérêt de l'écosystème plantation d'*Eucalyptus* comme modèle d'étude. Les perspectives concernent l'utilisation ultérieure du modèle mécaniste élaboré, à la fois vis-à-vis de sa validation pour d'autres dispositifs expérimentaux et sa pertinence comme outils de conduite de culture.

Conclusions

Au final, ce travail de thèse peut se prévaloir de plusieurs mérites : i) les chapitres d'introduction générale et de revue bibliographique attestent d'une excellente maîtrise scientifique du sujet, ii) le modèle CASTANEA-MAESPA-K élaboré se présente comme un exemple assez unique de travail de modélisation couplée des flux de C, d'eau et de K^+ à l'échelle d'une plantation forestière, iii) les prédictions issues du modèle permettent de proposer une hiérarchisation des processus responsables de l'effet de la carence en K^+ qui a un grand intérêt aussi bien du point de vue cognitif qu'appliqué. Les éléments de discussion et de perspectives illustrent bien le travail qui reste à accomplir pour faire aboutir la démarche, à savoir notamment la nécessité de valider la qualité du modèle sur d'autres jeux de données que ceux ayant servis à le construire.

Un article de revue a été publié à l'issue de ce travail : Cornut et al. (2021). *Potassium limitation of wood productivity: A review of elementary processes and ways forward to modelling illustrated by Eucalyptus plantations*. *Forest Ecology and Management* 494, 119275. Les deux chapitres de résultats méritent également d'être soumis pour publication.

De manière plus globale, ce travail constitue une étape importante de la valorisation scientifique des deux projets d'étude à long terme de plantations d'*Eucalyptus* du Brésil conduits par les unités d'accueil de cette thèse. La qualité de cette thèse, et la démarche générale associée à ces projets, justifient que cette analyse figure sur le site de l'Académie, à titre de valorisation des travaux.