

## Soutenance de thèse

**Thierry GAUBERT** soutiendra sa thèse de doctorat, préparée au sein de l'équipe d'accueil doctoral ISAE-ONERA PSI et intitulée « *Téledétection quantitative des traits foliaires des forêts tempérées à partir de mesures spectroscopiques* »

**Le 11 juin 2024 à 14h00, salle des thèses ISAE-SUPAERO**

devant le jury composé de

M. Xavier BRIOTTET	ONERA	Directeur de thèse
Mme Susan USTIN	University of California Davis	Co-directrice de thèse
M. Thomas CORPETTI	CNRS	Rapporteur
M. Raul LOPEZ-LOZANO	INRAE	Rapporteur
Mme Maria PILAR MARTIN	SpecLab - CCHS	Examinatrice
M. David SHEEREN	Toulouse INP	Examineur

### Résumé :

Les écosystèmes forestiers couvrent environ 10% de la surface terrestre. Ils offrent de nombreuses fonctions écologiques et services écosystémiques de par leur importante biodiversité et leur rôle dans la régulation du climat et dans les cycles biogéochimiques. Cependant, les changements climatiques, liés au réchauffement climatique global, mettent en péril le maintien de ces écosystèmes en plongeant les espèces végétales présentes dans des conditions pour lesquelles elles ne sont pas adaptées. Le suivi de la végétation des écosystèmes forestiers peut être réalisé par télédétection quantitative grâce à l'estimation de traits fonctionnels définis en écologie comme caractéristiques indicatrices des capacités de croissance, reproduction ou survie. Plus spécifiquement, pour les espèces végétales, certains traits fonctionnels, appelés traits foliaires, sont liés à la composition biochimique du feuillage et affectent les propriétés optiques de la végétation par des processus physiques. Au moyen de la résolution d'un problème inverse, les traits foliaires sont donc accessibles par des méthodes de télédétection aéroportée et spatiale utilisant des données hyperspectrales dans le domaine optique 0,4-2,5  $\mu\text{m}$ . Des capteurs hyperspectraux, déjà lancés ou prévus dans la prochaine décennie, vont fournir des flux massifs de données, rendant possible le suivi des écosystèmes forestiers mais nécessitant des méthodes de traitement automatique. Dans ce contexte, cette thèse vise le développement d'une méthode généralisable capable de traiter l'ensemble des images d'un capteur spatial pour les forêts tempérées pour l'estimation de quatre traits foliaires : concentrations foliaires en chlorophylles (Cab), caroténoïdes (Cxc), eau (EWT) et matière sèche (LMA). Pour répondre à cet objectif, cette thèse propose de tester des méthodes d'estimation à l'échelle de la feuille puis à l'échelle de la canopée, en s'appuyant sur des données collectées sur cinq sites forestiers de Californie, couvrant plusieurs écosystèmes et différentes saisons. A l'échelle de la feuille, plusieurs méthodes d'estimation des traits sont comparées, incluant des approches physiques et statistiques, et en s'appuyant sur des échantillons de feuilles collectées sur les cinq sites. Les principaux résultats montrent que la méthode statistique basée sur la régression à partir de processus gaussien obtient les

meilleures performances quel que soit le trait estimé. À l'échelle de la canopée, l'estimation des traits foliaires est réalisée par une approche statistique et une approche hybride, en s'appuyant sur des acquisitions AVIRIS réalisées sur les cinq sites. L'approche statistique consiste à entraîner des modèles de régression à partir de données hyperspectrales AVIRIS. L'approche hybride consiste à entraîner un réseau de neurones à convolution (CNN) sur une base de données synthétique générée à partir du modèle DART. Cette étape montre que les approches statistiques obtiennent de meilleures performances que l'approche hybride. Néanmoins toutes les méthodes testées se révèlent peu adaptées pour extraire les effets des traits foliaires à partir de la réflectance à l'échelle de la canopée, et les erreurs d'estimation restent trop importantes pour analyser des variations saisonnières et intra-spécifiques des traits foliaires. Afin d'améliorer les performances d'estimation, une étude plus approfondie des effets de la géométrie de la canopée et du sous-bois serait nécessaire. De plus, il serait nécessaire de tester la prédictibilité de l'état de santé des forêts à partir de la cartographie des traits foliaires pour réaliser un suivi complet.

**Mots-clés :** hyperspectral, apprentissage statistique, transfert radiatif, traits fonctionnels, écosystèmes forestiers

#### **Summary:**

Forest ecosystems cover around 10 percent of the earth's surface. They provide numerous ecological functions and ecosystem services, thanks to their high biodiversity and their role in climate regulation and biogeochemical cycles. However, climate change, linked to global warming, jeopardizes the conservation of these ecosystems by plunging the plant species present into conditions for which they are not adapted. Vegetation in forest ecosystems can be monitored using quantitative remote sensing, by estimating functional traits defined in ecology as indicators of growth, reproduction or survival capacities. More specifically, for plant species, certain functional traits, known as foliar traits, are linked to the biochemical composition of foliage and affect the optical properties of vegetation through physical processes. By solving an inverse problem, leaf traits can be retrieved from airborne and space-based remote sensing methods using hyperspectral data in the 0.4-2.5  $\mu\text{m}$  optical range. Hyperspectral sensors, already launched or planned for the next decade, will provide massive data flows, making it possible to monitor forest ecosystems, but requiring automatic processing methods. In this context, this thesis targets the development of a generalizable method capable of processing all images of a temperate forest from a spatial sensor for the estimation of four leaf traits: leaf concentrations of chlorophylls (Cab), carotenoids (Cxc), water (EWT) and dry matter (LMA). To meet this objective, this thesis proposes to test estimation methods at the leaf scale and then at the canopy scale, based on data collected on five forest sites in California, covering several ecosystems and different seasons. At the leaf scale, several trait estimation methods are compared, including physical and statistical approaches, and based on leaf samples collected from the five sites. The main results show that the statistical method based on Gaussian processes regression yields the most accurate estimates whatever the trait. At canopy level, leaf traits are estimated using both a statistical and a hybrid approach, based on AVIRIS acquisitions over the five sites. The statistical approach involves training regression models on AVIRIS hyperspectral data. The hybrid approach consists of training a convolution neural network (CNN) on a synthetic database generated from the DART model. This step shows that statistical approaches perform better than the hybrid approach. Nevertheless, all the methods tested

prove ill-suited to extract the effects of leaf traits from canopy-scale reflectance, and estimation errors remain too large to analyze seasonal and intra-specific variation in leaf traits. In order to improve estimation performance, a more in-depth study of the effects of canopy and understory geometry would be required. In addition, it would be necessary to test the predictability of forest health based on leaf trait mapping in order to achieve a comprehensive monitoring of these ecosystems.

**Keywords:** hyperspectral, machine learning, radiative transfer, plant functional traits, forest ecosystems