

PROPOSITION DE SUJET DE THESE

Intitulé : Suivi des caractéristiques fonctionnelles des espèces de forêts denses tempérées pour de futures missions hyperspectrales satellitaires

Référence : **PHY-DOTA-2020-18**
(à rappeler dans toute correspondance)

Début de la thèse : Octobre 2020

Date limite de candidature : Juin 2020

Mots clés : hyperspectral, multi-temporel, caractéristiques fonctionnelles des espèces, forêts denses, transfert radiatif

Profil et compétences recherchées

Formation : Ecoles d'ingénieurs optique ou physique, Master Recherche en physique ou mathématiques appliquées

Spécificités souhaitées : traitement signal/image, transfert radiatif, programmation scientifique, bon niveau en anglais

Présentation du projet doctoral, contexte et objectif

Suite à la dégradation manifeste de la biodiversité végétale, la caractérisation et le suivi des écosystèmes forestiers sont des enjeux majeurs afin d'évaluer l'impact anthropique (pollution, déforestation, augmentation des terres agricoles, urbanisation) et du changement climatique (sécheresses et incendies) sur les nombreux services écosystémiques qu'ils offrent. Entre autres, les forêts denses tempérées, de part leur forte densité et diversité en espèces, jouent un rôle important dans la séquestration du carbone et participent à la préservation de niches écologiques tout en produisant des ressources variées (énergie, bois, nourriture). La mise à disposition de tels services dépend fortement de leur condition phytosanitaire ou état de santé, qui peut être évalué à travers l'estimation de variables essentielles de biodiversité (i.e. EBV [1]). La télédétection permet de remonter à certaines d'entre elles et de les cartographier sur de grandes surfaces. Parmi les caractéristiques fonctionnelles des espèces (EBV-species traits), cinq variables d'intérêt seront étudiées. Elles sont reliées à des caractéristiques morphologiques (la densité foliaire des arbres, le contenu foliaire en matière sèche) et physiologiques de la plante (les pigments foliaires chlorophylliens et caroténoïdes, le contenu foliaire en eau), et sont des acteurs clés intervenant notamment dans le cycle biogéochimique des forêts.

Par télédétection, l'estimation conjointe de ces variables bio-physico-chimiques requiert des données hyperspectrales dans le domaine optique 0,4-2,5µm [2]. De nombreuses études ont déjà évalué les performances de ces estimations à partir d'images aéroportées hyperspectrales à haute résolution spatiale avec des acquisitions très ponctuelles sur des forêts denses tropicales [3] et tempérées [4]. L'arrivée de nouveaux capteurs hyperspectraux satellitaires ouvre des perspectives pour suivre ces estimations dans le temps. Pour des caractéristiques spectrales et une revisite temporelle relativement proches, deux familles de capteurs sont distinguées selon la résolution spatiale et le rapport signal à bruit, dégradée à 30m et élevé d'une part (e.g. travaillant à l'échelle du peuplement d'arbres tels que PRISMA-Italie, EnMAP-Allemagne, SBG-USA, Gaofen-5-Chine et CHIME-UE), fine à 8m et dégradé d'autre part (e.g. travaillant à l'échelle peuplement/individu tels que HYPXIM/BIODIVERSITY-France). En outre pour un pixel de l'image, l'estimation des variables bio-physico-chimiques reste très sensible aux caractéristiques des forêts denses tempérées possédant une forte couverture arborée, un profil vertical multi-strates, différents stades de développement, une forte hétérogénéité du type de sol et la présence parfois de topographie. Pour des résolutions spatiales faibles, de nouvelles limitations s'ajoutent au sein du pixel: le nombre d'individus, la composition et le type des espèces (feuillus/conifères).

D'un point de vue méthodologique, plusieurs défis sont attendus car les performances pour estimer ces variables à l'échelle de la feuille sont bien en-deçà à l'échelle de la canopée. En outre, l'inconsistance des protocoles de mesures terrain et les incertitudes associées, la multiplicité des méthodes utilisées et la diversité des sites étudiés, ne permettent pas de conclure sur une méthode généralisable, tout du moins entre les feuillus et les conifères qui ont des caractéristiques structurales très différentes [5].

L'objectif de cette thèse est la cartographie et le suivi de caractéristiques fonctionnelles d'espèces d'arbres à partir de données hyperspectrales aéroportées dans le cadre de deux missions satellitaires hyperspectrales HYPXIM/BIODIVERSITY-France et SBG-USA. L'originalité de ce sujet est la prise en compte d'une part pour les données de télédétection, de l'échelle spatiale et temporelle, et d'une part pour les données terrain, de l'échelle multi-sites et multi-espèces, pour l'élaboration d'une méthode généralisable pour estimer conjointement les variables bio-physico-chimiques d'intérêt pour plusieurs écosystèmes forestiers.

Pour estimer ces variables, trois catégories de méthodes vont être évaluées [5] dont les performances sont mal connues lorsque les variables bio-physico-chimiques sont évaluées simultanément par imagerie

hyperspectrale multi-temporelle. La première est empirique et se base sur des méthodes statistiques de régression à partir de données terrain. Ses performances sont limitées en termes de transférabilité et de robustesse car elles dépendent des conditions d'acquisition (e.g. protocoles de collecte/mesure, caractéristiques instrumentales, conditions de visée et d'illumination) et du type de végétation étudiée (e.g. espèce, stade phénologique et de développement). La seconde catégorie se base sur une approche physique à partir de maquettes modélisant la scène en utilisant des outils de transfert radiatif pour simuler des bases de données de réflectances spectrales au-dessus de la canopée stockées dans des LUT (Look-Up-Table), qui sont ensuite comparées aux images hyperspectrales afin de remonter à l'estimation des variables (méthode d'inversion par LUT). Elle a l'avantage d'être moins dépendante aux conditions d'acquisition, mais elle gagne en complexité de part la stratégie à adopter pour modéliser la scène (1D, 2D ou 3D) et les temps de calcul qui peuvent être relativement longs. La troisième catégorie est une approche hybride combinant les deux premières, dont le potentiel est de pouvoir s'affranchir de leurs limitations respectives. Des outils développés à l'ONERA existent déjà pour la deuxième catégorie de méthodes et pourront être adaptés. L'accent sera mis sur le développement et la validation de la première et troisième catégorie. Notamment, on évaluera les performances de chacune d'entre elles et le gain des méthodes hybrides pour élaborer une méthode généralisable.

Le travail de thèse est organisé en trois étapes. Premièrement, les méthodes seront développées et des cartes de référence d'estimation des variables seront produites aux échelles spatiales les plus fines pour les données de télédétection aéroportée, aux dates des mesures terrain, et pour chaque espèce par site forestier. A cet effet, les performances de deux codes de transfert radiatif, DART [6] et PROSAIL [7], seront comparés, notamment pour des parcelles mono-espèce avec un taux de couverture boisée proche de 100%. Deuxièmement, l'étude se portera à l'échelle satellitaire, soit par simulation à partir de données aéroportées selon les configurations des différents instruments, soit en utilisant des données existantes. La précision d'estimation des variables sera évaluée aux dates des mesures terrain et pour chaque espèce par site forestier, puis un suivi temporel sera mené en les cartographiant aux autres dates disponibles. Des outils existent à l'ONERA pour la simulation de capteurs satellitaires à partir d'images aéroportées et seront repris. Troisièmement, des pistes pour développer une méthode d'inversion généralisable selon les différentes configurations capteurs seront investiguées par espèce, par type fonctionnel, et par site forestier.

Les cas d'étude sont localisés le long d'un gradient altimétrique dans la Sierra Nevada en Californie avec 3 sites de forêts denses, mélangeant feuillus et conifères, et conifères de haute altitude (6-7 espèces). A chaque étape de travail, les données utilisées proviendront de mesures terrain pour la validation et d'images aéroportées hyperspectrales Aviris-Next generation (2m) et Aviris (18m) réalisées sur les sites d'étude entre 2013 et 2018 par l'université de Davis, Californie (CSTARS) et la NASA [8,9,10,11], pour préparer la mission HypSIIRI (ex-SBG) et évaluer l'impact de la sécheresse en Californie.

Des travaux sont en cours à l'ONERA sur l'étude de forêts éparses méditerranéennes (3 espèces, 2 sites) avec une thèse ONERA/Région Occitanie et l'APR CNES HyperMED. Cette thèse s'inscrit dans la suite de ces travaux pour les étendre à des forêts denses tempérées.

[1] <https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>.

[2] Transon et al., Survey of current hyperspectral Earth observation applications from space and synergies with Sentinel-2, *Remote Sensing* 10:157, 2017.

[3] Asner et al., Quantifying forest canopy traits: Imaging spectroscopy versus field survey, *Remote sensing of environment* 158, 15-27, 2015.

[4] Schneider et al., Mapping functional diversity from remotely sensed morphological and physiological forest traits, *Nature Communications* vol.8 (1441), 2017.

[5] Hill et al., Imaging Spectroscopy of Forest Ecosystems: Perspectives for the Use of Space-borne Hyperspectral Earth Observation Systems, *Surveys in Geophysics* 40:553-588, 2019.

[6] Gastellu-Etchegorry et al., Modeling radiative transfer in heterogeneous 3-D vegetation canopies. *Remote sensing of environment*, 58(2), 131-156, 1996.

[7] Jacquemoud et al., PROSPECT + SAIL models: A review of use for vegetation characterization, *Remote sensing of environment* 113(1), 56-66, 2009.

[8] Ustin et al., Multiyear Multiseasonal Changes in Leaf and Canopy Traits Measured by AVIRIS over Ecosystems with Different Functional Type Characteristics Through the Progressive California Drought 2013-2015, AGU Fall meeting, 2015.

[9] Roth et al, Leaf spectral clusters as potential optical leaf functional types within California ecosystems, *Remote sensing of environment*, 184, 229-246, 2016.

[10] Huesca et al, Discrimination of Canopy Structural Types in the Sierra Nevada Mountains in Central California, *Remote sensing*, 11(9), 2019.

[11] Adeline et al., Spectral sensitivity of radiative transfer inversion for seasonal canopy pigments estimation from AVIRIS data in a woodland savanna ecosystem, 8th Whispers conference, abstract paper, 2016 (best paper award).

Collaborations envisagées

Université de Californie, Davis, CSTARS (Susan Ustin et Margarita Huesca en tant que co-directrice et co-encadrante respectivement) ; CESBIO (Jean-Philippe Gastellu-Étchegorry)

Laboratoire d'accueil à l'ONERA

Département : Optique et Techniques Associées

Lieu (centre ONERA) : Toulouse

Contact : Karine Adeline

Tél. : 0562252668 Email : karine.adeline@onera.fr

Directeur et co-directrice de thèse

Nom : Xavier Briottet et Susan Ustin

Laboratoire : ONERA et CSTARS

Tél. : 0562252605 / (+1) 530-752-0621

Email : xavier.briottet@onera.fr, slustin@ucdavis.edu

Pour plus d'informations : <https://www.onera.fr/rejoindre-onera/la-formation-par-la-recherche>