

## PROPOSITION DE SUJET DE THESE

**Intitulé : Analyse de la physiologie des arbres en milieu urbain : modélisation et apprentissage machine par imagerie optique et radar**

Référence : **PHY-DOTA-2024-07**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : Octobre 2024

**Date limite de candidature** : Fin mai 2024

### Mots clés :

Imagerie par télédétection optique et radar, modélisation 3D, simulation électromagnétique, machine/deep learning, physiologie des arbres, milieux urbains

### Profil et compétences recherchées :

Formation : écoles d'ingénieur et/ou master 2 recherche en optique/radar, physique ou mathématiques appliquées

Compétences : traitement du signal/image, télédétection, transfert radiatif, machine learning ou apprentissage statistique, écologie/environnement, programmation en python

### Présentation du projet doctoral, contexte et objectif :

Dans un contexte de changement climatique mondial, les modifications en cours provoquent déjà des événements climatiques extrêmes tels que tempêtes, vagues de chaleur et sécheresses prolongées, qui posent des défis majeurs aux zones urbaines. Selon la Banque mondiale, 54 % de la population mondiale habite en milieu urbain, et ce chiffre devrait augmenter à 80 % d'ici 2050. Face à ces changements environnementaux inévitables et à leurs impacts potentiels, il devient de plus en plus crucial de développer des politiques et des outils visant à renforcer la résilience des villes et à les adapter à ces transformations profondes. Il est aujourd'hui bien établi que la végétation, en particulier les arbres, offre des solutions efficaces pour atténuer les impacts des changements climatiques. Les arbres peuvent contribuer à rafraîchir les villes, à améliorer la qualité de l'air et à favoriser la biodiversité. Cependant, pour jouer un rôle positif, les arbres doivent survivre et maintenir leur santé dans un environnement qui subit des transformations drastiques, notamment une augmentation du stress hydrique et thermique ainsi que des contraintes en ressources. Les étés 2022 et 2023 ont révélé les conséquences néfastes de longues périodes de stress hydrique et de températures élevées, ayant entraîné la mort de nombreux arbres. Néanmoins, certains d'entre eux ont réussi à survivre malgré ces conditions environnementales hostiles. Cette observation surprenante suscite des intérêts parmi les responsables municipaux, qui manquent d'outils permettant de surveiller la santé des arbres, d'identifier les signes de stress significatifs, et de mieux comprendre l'influence du milieu sur l'état l'arbre, dans le but d'orienter les futures stratégies de plantation dans la gestion du territoire.

Le projet MONI-TREE, financé par l'ANR, a pour objectif de mieux comprendre la réaction des arbres face aux contraintes extrêmes, de détecter précocement leur sénescence, et de créer des cartes du bien-être des arbres en milieu urbain, accompagnées de systèmes d'alerte. Pour ce faire, le projet vise à recueillir une multitude de données physiologiques sur les arbres (mesurées et simulées) dans des conditions réelles (en ville) et contrôlées (en serre expérimentale), ainsi que des données sur leur environnement (modèle 3D urbain, conditions climatiques, etc.). Ensuite, l'exploitation de techniques d'apprentissage automatique permettra d'identifier les différentes relations entre ces données et produire des cartes globales d'information sur l'état physiologique des arbres en ville.

La télédétection satellitaire est un instrument crucial pour surveiller la végétation à l'échelle mondiale, fournissant des données essentielles pour la gestion des ressources naturelles. Cependant, l'un des défis majeurs pour les chercheurs est de comprendre les paramètres physiologiques sensibles aux différentes technologies d'acquisition du capteur. D'un côté la télédétection optique, se basant sur la lumière visible et l'infrarouge proche, permet d'évaluer entre autres la couverture spatiale et les espèces végétales, la densité des feuilles, les pigments foliaires intervenant sur l'activité photosynthétique (ex: chlorophylles), les contenus

en eau et matière sèche pouvant être reliés au stress hydrique et à la biomasse vivante. Cependant, son utilisation peut être entravée par la couverture nuageuse ou des conditions de faible luminosité affectant le signal acquis au niveau du détecteur optique. À l'inverse, la télédétection radar, utilisant des micro-ondes, peut pénétrer les nuages et fonctionner de jour comme de nuit. Elle fournit des informations sur la morphologie tridimensionnelle de la végétation, notamment sa hauteur et sa densité, ainsi que l'humidité. Mais, l'interprétation de ces données radar n'a pas encore été validée pour l'estimation de ces paramètres de végétation. Explorer la complémentarité, voire la fusion de données optique/radar, ont été peu étudiés sur autant de paramètres physiologiques pour des végétaux arborés, notamment en milieux urbains du fait de la complexité du relief 3D et de la récurrence de pixels mixtes (mélangeant la contribution des arbres avec leur environnement) pour des observations de télédétection satellitaire possédant des résolutions spatiales généralement faibles (de l'ordre décamétrique).

L'objectif principal de la thèse consiste à établir des liens entre les observations recueillies par ces deux technologies d'acquisition en télédétection (optique et radar) et des paramètres physiologiques spécifiques aux arbres relatifs à leur biomasse, leur croissance, leurs propriétés structurelles et biochimiques. Pour atteindre cet objectif, nous envisageons de concevoir des modélisations et des algorithmes d'apprentissage profond avancés qui intégreront les images optiques et radar du programme Copernicus (Sentinel-1 et Sentinel-2), ainsi que des mesures in-situ, afin de réaliser des estimations précises de ces paramètres physiologiques.

Les travaux de thèse se diviseront en trois parties:

### **1) Analyse prospective de la sensibilité des signaux radar pour quantifier l'état fonctionnel des arbres**

Nous examinerons quels paramètres végétaux sont les plus sensibles aux variations du signal radar. Pour ce faire, nous utiliserons le code EMPRISE de l'ONERA [Lebarbu et al., 2021] pour créer des bases d'images simulées, incluant des maquettes 3D urbaines représentant des scènes avec différentes conditions physiologiques des arbres (humidité/stress hydrique, structure) et configurations instrumentales (angles de vue et résolutions), incluant celle correspondant à Sentinel-1. Une étude de sensibilité permettra d'identifier les paramètres les plus influents afin de les sélectionner pour plus tard les estimer au moyen de méthodes hybrides d'inversion (entraînement/test de méthodes de machine/deep learning sur des bases de données simulées et application sur l'image). Nous adapterons un code d'inversion déjà utilisé dans le domaine optique pour aller vers une approche commune optique/radar. Un bilan des performances d'estimation pour chaque paramètre sélectionné sera réalisé, ainsi que la meilleure méthode d'estimation.

### **2) Approfondissement de la caractérisation des arbres à partir de signaux optiques**

En utilisant les mêmes maquettes 3D modélisant la scène que les précédentes études radar et des paramètres électromagnétiques communs pour chaque élément présent dans la scène urbaine, nous générerons des bases d'images optiques simulées à l'aide du code DART [Zhen et al. 2023]. Comme pour le radar, une étude de sensibilité suivie d'une étape d'estimation par inversion seront réalisées. Elles s'appuieront largement sur des travaux en cours en collaboration avec le LETG et l'ONERA qui ont déjà obtenu des résultats préliminaires avec une hypothèse de modélisation urbaine basée sur la définition des Local Climate Zone (LCZ)[Stewart & Oke, 2012] pour des arbres isolées et d'alignement. Ces travaux ont montré notamment que seuls le LAI (indice foliaire) et le taux en chlorophylles foliaires sont accessibles avec des données Sentinel-2 à 10m de résolution spatiale pour certains indices spectraux de végétation et configurations géométriques [Le Saint et al., 2023]. Dans la suite, les premiers résultats d'inversion montrent des performances encourageantes et restent à être approfondis. Nous évaluerons si ces résultats se reproduisent dans d'autres contextes, entre autres de modélisation commune optique/radar et de méthodologie d'inversion.

### **3) Fusion de données optique/radar**

Les bases de données images optiques et radar seront fusionnées et des méthodes d'estimation seront recherchées conjointement pour tous les paramètres physiologiques accessibles en optique et radar. Des méthodes innovantes d'apprentissage profond pourront être investiguées et éventuellement de transfert. Les performances d'estimation des paramètres de végétation obtenus par le radar seul (étape 1), l'optique seul (étape 2), et la combinaison des deux dans cette étape seront évaluées. En particulier, deux variables accessibles tant d'un point de vue optique que radar, le taux d'humidité des feuilles et le LAI, seront examinées. Nous effectuerons une analyse pour déterminer comment l'usage de l'optique ou du radar contribue à affiner leur estimation.

Les jeux de données mis à la disposition du doctorant pour les simulations optiques et radar seront prétraités (entre autres la correction radiométrique et géométrique des images, les maquettes urbaines). Le candidat participera ponctuellement à des campagnes expérimentales pour acquérir des données nécessaires à sa thèse, ainsi qu'au projet MONI-TREE dans son ensemble. La première année de thèse se déroulera dans les locaux de l'ONERA sur le site de Palaiseau, suivie de deux années à Rennes dans les locaux du LETG, avec des déplacements occasionnels à l'ONERA sur le site de Toulouse.

Si le sujet vous intéresse, veuillez envoyer un CV et une lettre de motivation à [thomas.corpetti@cnr.fr](mailto:thomas.corpetti@cnr.fr).

**Références bibliographiques :**

Elise Colin et Laetitia Thirion-Lefevre (2023): Modéliser la rétrodiffusion radar par les forêts : une première étape pour inverser, dans Yajing Yan (dir.), Inversion et Assimilation de données de données de télédétection, Wiley,, 2023, p. 237-269. , DOI : 10.51926/ISTE.9142.ch7.

Di Martino, T., Guinvarc'h, R., Thirion-Lefevre, L., & Colin E. (2021, July). Convolutional Autoencoder for Unsupervised Representation Learning of PolSAR Time-Series. In 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS (pp. 3506-3509). IEEE.

Lebarbu, C., Ceotto, E., Cochlin, C., Jouade, A., Everaere, E., & Trouve, N. (2021, March). Complete radar simulation chain: Application to maritime patrol surveillance using SAR/ISAR modes. In EUSAR 2021; 13th European Conference on Synthetic Aperture Radar (pp. 1-6). VDE.

Zhen, Z., Benromdhane, N., Kallel, A., Wang, Y., Regaieg, O., Boitard, P., ... & Gastellu-Etchegorry, J. P. (2023, May). DART: a 3D radiative transfer model for urban studies. In *2023 Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE)* (pp. 1-4). IEEE.

I. D. Stewart et T. R. Oke, « Local Climate Zones for Urban Temperature Studies », Bulletin of the American Meteorological Society, vol. 93, no 12, p. 1879-1900, déc. 2012, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00019.1.

Le Saint T., Adeline K., Lefebvre S., Nabucet J. & Hubert-Moy L. (2023) Analyse de sensibilité du satellite Sentinel-2 pour la caractérisation des arbres en milieu urbain, TEMU (télédétection en milieu urbain), Montpellier, France (oral found on: <https://www.theia-land.fr/urbain/2023-urbain/>).

**Collaborations envisagées :**

Autres partenaires de l'ANR MONITREE: LETG (Jean Nabucet), SILVA (Didier Le Thiec), ECOBIO (Cécile Sumon).

**Laboratoire d'accueil à l'ONERA :**

Départements : DOTA, DEMR et DTIS

Lieux (centre ONERA) : Palaiseau et Toulouse

**Contacts et emails:**

Karine Adeline email : [karine.adeline@onera.fr](mailto:karine.adeline@onera.fr)

Etienne Everaere email : [etienne.everaere@onera.fr](mailto:etienne.everaere@onera.fr)

**Directeur et co-directrice de thèse :**

Nom : CORPETTI Thomas et COLIN Elise

Laboratoire : LETG et ONERA

Tél. : 02 99 14 18 77, 01 80 38 65 70

Email : [thomas.corpetti@cnrs.fr](mailto:thomas.corpetti@cnrs.fr),  
[elise.colin@onera.fr](mailto:elise.colin@onera.fr)

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