

**PROPOSITION DE SUJET DE THESE**

**Intitulé : Suivi et prédiction de l'état des forêts méditerranéennes pour la prévention du risque incendie : approche multi-capteurs par télédétection**

Référence : **PHY-DOTA-2022-09**  
(à rappeler dans toute correspondance)

**Début de la thèse** : Octobre 2022

**Date limite de candidature** : mars 2022

**Mots clés :**

Modélisation/simulation physique, inversion, analyse de séries temporelles, hyperspectral, multispectral satellitaire, propriétés biophysiques et biochimiques de la végétation, forêts méditerranéennes

**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, écologie, bon niveau en anglais.

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

Ces dernières années, la fréquence et l'intensité des incendies de forêts ont augmenté dans le monde entier, à cause du réchauffement climatique et de l'action anthropique. Les régions méditerranéennes sont particulièrement très impactées. Les principales causes des incendies déclarées ne sont pour la plupart pas naturelles (foudre) mais le fait d'actions volontaires (cigarettes, pyromanes, etc.) ou d'accidents (étincelles de lignes électriques, voies ferrées et véhicules, travaux forestiers, etc.), essentiellement dues à l'extension urbaine [1]. Par exemple dans le sud-est de la France, le réseau Prométhée a enregistré jusqu'à 1305 incendies en 2020. Ainsi, il y a un réel besoin d'identifier les zones à haut risque afin de guider les pratiques de la gestion forestière et les politiques environnementales pour réduire l'impact de ces incendies.

Avant un feu de forêt, la caractérisation du risque incendie est la plupart du temps déterminée par le type et la teneur en eau des combustibles présents, qui évoluent en fonction des conditions météorologiques et de l'occupation des sols. Cette teneur en eau (FMC) est liée au stress hydrique et corrélée à l'état de santé du combustible, et selon si ce dernier est vivant (LFMC, biomasse foliaire) ou mort (bois : tronc, branches). L'évaluation quantitative du LFMC sur le terrain est fastidieuse, limitée dans l'espace et dans le temps. Une alternative repose sur l'utilisation de données de télédétection satellitaires avec une couverture globale et une haute revisite temporelle. Les données AVHRR et MODIS (~1km) ont été de loin les plus utilisées, mais récemment les efforts se concentrent sur des données de résolutions spatiales plus fines (10-30m), comme LANDSAT et Sentinel-2, bien qu'encore très peu d'études utilisent ce dernier. Les besoins sont d'avoir une meilleure distribution spatiale du LFMC à une haute revisite temporelle, une meilleure connaissance des incertitudes de son estimation, et la fiabilité de sa prédiction dans le temps [2]. Cela pose plusieurs défis au niveau spatial, spectral et temporel, qui sont à prendre en compte en télédétection.

D'un point de vue spatial et en travaillant avec des données à faibles résolutions, l'impact de la présence de pixels mixtes sur l'estimation du LFMC est non négligeable, surtout pour des forêts non homogènes, présentant parfois de faibles taux de couverture boisée et de faibles densités de feuilles. Les relations empiriques basées sur des indices spectraux calculés sur les images et des mesures terrain du LFMC posent ainsi leur limite d'application. La méthodologie la plus appropriée est l'emploi de méthodes d'inversion basées sur des simulations physiques à partir de modèles de transfert radiatif. Les modèles PROSPECT et SAIL (respectivement à l'échelle de la feuille et de la canopée) sont les plus utilisés pour leur simplicité en les couplant. Mais SAIL ne considère que des forêts denses homogènes. Une description plus précise de la scène en 3D avec notamment une bonne prise en compte du sous-bois nécessite des modèles plus complexes tels que DART (CESBIO)[3]. Le challenge actuel est lorsqu'on travaille à des dates d'acquisition où deux ou plusieurs couches de végétation (arbre, arbuste, herbe) sont photosynthétiquement actives, ce qui complexifie la discrimination du LFMC pour chacune des couches présentes.

D'un point de vue spectral, les variations du LFMC ont à la fois un impact direct (via les absorptions spectrales de l'eau) et indirect (corrélation entre stress hydrique et état de santé étudiée via les changements des taux pigmentaires et de la structure de la feuille) sur la réflectance spectrale dans le domaine 0,4-2,5  $\mu\text{m}$ . Grâce à leur grande richesse spectrale, les données hyperspectrales permettent d'estimer de nombreuses

variables biophysiques et biochimiques de la végétation, telles que l'indice foliaire (LAI), les taux foliaires pigmentaires chlorophylliens et en caroténoïdes (Cab et Car), le contenu en eau (EWT) et en matière sèche (LMA) de l'échelle aéroportée à satellitaire. Ces variables permettent de connaître directement le LFMC (=EWT/LMA) ou sont des proxies pour l'évaluer. Par imagerie multispectrale Sentinel-2 et LANDSAT, l'accès à toutes ces variables et leur précision d'estimation sont limités. Cependant, l'arrivée d'une nouvelle génération de capteurs satellitaires hyperspectraux, certains lancés tels que PRISMA, d'autres en préparation tels que BIODIVERSITY, SBG et EnMAP, ouvrent la voie vers des synergies multi-capteurs.

D'un point de vue temporel, le suivi et la prédiction de ces variables nécessitent des acquisitions fréquentes et spatialement continues, ainsi que des outils pour analyser ces séries temporelles de manière quantitative. LANDSAT fournit la série chronologique la plus longue de données multispectrales sur 20 ans. Sentinel-2 améliore la résolution spatiale (de 30 à 10-20m), spectrale (de 6-7 à 10 bandes) et temporelle sur LANDSAT (de 16 à 5 jours de revisite). Cependant, les acquisitions Sentinel-2 n'ont pas assez d'historique pour un suivi approprié. Ainsi, il serait intéressant de combiner les données de ces deux capteurs pour créer une série à haute résolution spatio-temporelle. Pour la prédiction, les techniques d'analyse statistique des séries temporelles largement utilisées en économie, sont des outils à fort potentiel pour la télédétection, notamment l'emploi de modèles autorégressifs à moyennes mobiles intégrées (ARIMA, Box et Jenkins (1970)) et en prenant en compte la saisonnalité (SARIMA). La plupart des études actuelles sont basées sur un ou deux modèles génériques ARIMA appliqués à l'ensemble du site d'étude. Le défi actuel est son application à l'échelle du pixel, puisque chaque pixel est associé à une série temporelle différente, un modèle différent doit être ajusté pour comprendre la dynamique forestière et le risque potentiel d'incendie.

L'objectif de la thèse est d'estimer, suivre et prédire certaines variables de végétation utiles pour la prévention du risque incendie en caractérisant l'état de la forêt méditerranéenne par télédétection. L'originalité repose sur une approche multi-capteurs et une estimation basée sur des critères spatiaux-spectraux-temporels.

Le travail de thèse sera divisé en 3 parties.

La première partie sera consacrée à un bilan de performances d'estimation des variables d'intérêt (LFMC, LAI, Cab, Car, EWT, LMA) selon les capteurs satellitaires hyper/multispectraux ciblés (Biodiversity, SBG, PRISMA, Sentinel-2, LANDSAT) avec des données réelles ou simulées à partir de données aéroportées, et pour des acquisitions à plusieurs saisons. Pour l'estimation, des outils d'inversion à partir de simulations DART sont déjà disponibles à partir des travaux d'une thèse passée ayant travaillé sur des images hyperspectrales [4,5]. Le doctorant sera amené à les adapter pour des données Sentinel-2/LANDSAT et élaborer une stratégie pour aborder les cas complexes de plusieurs couches de végétation photosynthétiquement actives en se basant sur les travaux de [6]. Puis, il s'agira d'élaborer des méthodes de calibration inter-capteurs afin de rendre accessible certaines variables qui ne le sont pas pour Sentinel-2/LANDSAT, et également à des fins de validation pour des passages proches entre ces capteurs et ceux hyperspectraux tels que PRISMA. Suite à cette exploration multi-capteurs, une sélection des variables de végétation pertinentes et ayant de bons scores d'estimation sera effectuée.

La deuxième partie sera centrée sur le suivi temporel et la prédiction des variables pré-sélectionnées à partir de séries temporelles LANDSAT/Sentinel-2. Les modèles ARIMA/SARIMA à l'échelle du pixel seront estimés et validés à l'aide d'outils statistiques. Les modèles seront développés en considérant l'ensemble de la série chronologique sauf la dernière année qui sera utilisée pour valider la prédiction. Certains outils sont déjà disponibles grâce aux travaux de [7]. L'objectif sera de cibler une approche plus opérationnelle et transférable. Ce travail donnera des perspectives pour la nouvelle génération de satellites hyperspectraux n'ayant actuellement pas assez d'historique d'acquisition pour la prédiction.

La troisième partie sera dédiée à l'application de la méthode globale validée sur un jeu initial de données sur d'autres sites d'étude présentant les mêmes similarités ou ayant des différences qui amèneraient à robustifier la méthode et évaluer ses limites. Des missions terrain courtes pourraient être éventuellement envisagées pour compléter les données de validation.

Le jeu de données initial est constitué d'images aéroportées hyperspectrales AVIRIS-Classic et de mesures terrain sur deux sites californiens situés sur les contreforts de la Sierra Nevada (décrit dans [4,5], collaborations John Muir Institute et NEON). Deux autres sites français situés au Nord de Montpellier et étudiés dans le cadre de l'APR CNES SentHyMED pourront servir de jeu de données test avec la disponibilité de mesures terrain et d'acquisitions aéroportées hyperspectrales AVIRIS-Next Generation. Ces sites sont des forêts méditerranéennes composées de chênes décidus et sempervirents, ainsi que de pins, avec différents taux de couverture boisée (de très dense à clairsemé). Le sous-étage est variable, entre de l'herbe presque homogène subissant des pâturages de bovins, et un mix avec des roches affleurantes, de l'herbe et des arbustes/jeunes arbres.

Il est prévu que le doctorant séjourne à l'ONERA en première et troisième année et passe sa deuxième année à l'ITC aux Pays-Bas.

**References :**

- [1] Alexandrian D., T. XXIX, n°4, 2008, pp. 377-384. - Les statistiques "feux de forêt" de ces trente dernières années, revue Forêt Méditerranéenne.
- [2] Yebra M. et al., A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products, Remote Sensing of Environment, Volume 136, 2013, Pages 455-468,
- [3] Gastellu-Etchegorry, J. P. et al., DART: A 3D model for simulating satellite images and studying surface radiation budget. Remote Sensing of Environment, Vol. 25, 2004, 73–96.
- [4] Miraglio, T. et al., Monitoring LAI, Chlorophylls, and Carotenoids Content of a Woodland Savanna Using Hyperspectral Imagery and 3D Radiative Transfer Modeling. Remote Sens. 2019, 12, 28.
- [5] Miraglio, T. et al., Impact of Modeling Abstractions When Estimating Leaf Mass per Area and Equivalent Water Thickness over Sparse Forests Using a Hybrid Method. Remote Sensing. 2021, 13, 3235.
- [6] Melendo-Vega et al., Improving the Performance of 3-D Radiative Transfer Model FLIGHT to Simulate Optical Properties of a Tree-Grass Ecosystem. Remote Sens. 2018, 10, 2061.
- [7] Huesca, M. et al., 2014, Modeling and forecasting MODIS-based Fire Potential Index on a pixel basis using time series models. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 26, 363-376.

**Collaborations envisagées :**

John Muir Institute et NEON (informations sur sites californiens), APR CNES SentHyMED (application sur sites français), CESBIO (DART)

**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](mailto:karine.adeline@onera.fr)

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

Nom : Karine Adeline et Margarita Huesca

Laboratoire : ONERA et ITC

Tél. : 0562252668, (+31) 613958145

Email : [karine.adeline@onera.fr](mailto:karine.adeline@onera.fr),  
[m.huescamartinez@utwente.nl](mailto:m.huescamartinez@utwente.nl)

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