

Nathan SIKORA nathan.sikora@onera.fr

Directrice de thèse : Karine Adeline, ONERA – DOTA, Toulouse

Encadrant : Sylvain Jay, INRAE – EMMAH, Avignon



Objectif: évaluer la complémentarité de données spectroscopiques, polarisées et LiDAR pour mieux estimer les traits biochimiques foliaires à l'échelle centimétrique et capturer la variabilité de l'état fonctionnel de chaque arbre

ENJEUX SCIENTIFIQUES

- Comprendre les phénomènes diffusifs (notamment directionnels) à petite échelle du fait de l'anisotropie des propriétés optiques des feuilles et de leurs orientations au sein d'une canopée.
- Elaborer des méthodes d'estimation entre variables de végétation (traits biochimiques foliaires, scores sanitaires, taux de fertilisation et d'irrigation) et métriques issues des données de télédétection, en combinant des approches physiques de modélisation (codes de transfert radiatif) et des méthodes d'apprentissage.
- Cartographie de la variabilité intra-individuelle de l'état fonctionnel de chaque arbre, comparaison avec la variabilité inter-individuelle des arbres au sein du verger

SITES D'ÉTUDE

Site INRAE du domaine de l'Amarine (vers Nîmes), dispositif Core-Collection :
Verger d'abricotiers avec 158 variétés répétées en 5 blocs, type de traitement : bas intrants

Site INRAE du domaine Saint Paul (Avignon), dispositif Ecopêche :
2 vergers de pêchers (de même variété), type de traitement: conventionnel et essais de fertilisation

JEUX DE DONNEES

Suite aux campagnes terrains 2023 deux jeux de données ont été réalisés :

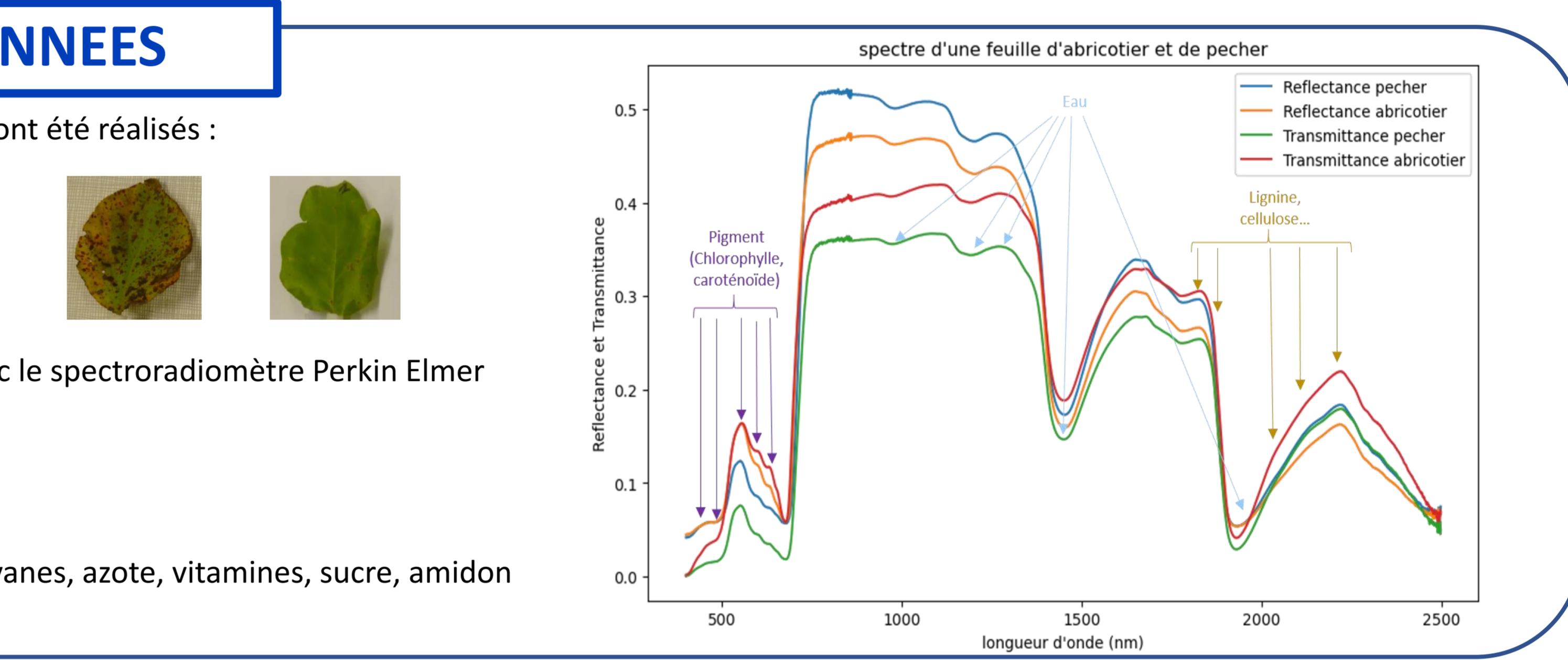
- Echelle rameau
- Echelle feuille

Le jeu de données feuille est constitué de :

- Mesure avec un leaf-clip SPAD
- Mesures spectrales directionnelles hémisphériques avec le spectroradiomètre Perkin Elmer
- Scores sanitaires
- Contenu en eau et matière sèche

Le jeu de données rameau est constitué de :

- Mesure laboratoire : chlorophylle, caroténoïde, anthocyanes, azote, vitamines, sucre, amidon
- Scores sanitaires



METHODOLOGIE GLOBALE

Étape 1 : Estimation des traits foliaires en conditions contrôlées

- Échelle de la feuille isolée en laboratoire
- Participation à la constitution d'un jeu de données (juin-octobre 2023, mesures sur 39 rameaux et 155 feuilles) sur des feuilles de pêchers et d'abricotiers
- Utilisation de méthodes d'inversion d'après les travaux de thèse de T. Gaubert [1]

Étape 2 : Passage à l'échelle drone en conditions réelles

- Prise en compte de l'environnement de la feuille dans une canopée d'arbre
- Application/adaptation des méthodes d'inversion

Étape 3 : Évaluation de l'apport de données multimodales

- Données LiDAR 3D :** prise en compte de métriques angulaires pour une première approche de correction des effets directionnels
- Données polarisées :** s'affranchir des diffusions surfaciques (notamment celle spéculaire) pour une meilleure estimation des traits biochimiques à partir des diffusions volumiques

ESTIMATION DES TRAITS

D'après les travaux de thèse de T. Gaubert [1] :

- Inversions empiriques : échelle rameau et feuille
- Inversion avec Prospect-D [2] à l'aide d'optimisations itératives
- Simulation de données spectroscopiques (Génération de LUT)
- Passage à Prospect Pro [3]

Méthode Statistique :

Partial Least Square Regression avec sélection du nombre optimal de variables latentes par 5 validations croisées

- Apprentissage : 70%
- Test : 30%

Résultats :

REGRESSION SPAD

Étape 1.1 : Régression SPAD – Cab (rameau)

- Régression linéaire, homographique et exponentielle
- Régression par espèce, par mois et par hauteur de rameau

Choix :

- Régression homographique par espèce

Étape 1.2 : Régression SPAD – N (rameau)

- Régression linéaire, homographique et exponentielle
- Régression par espèce, par mois et par hauteur de rameau

Choix :

- Régression linéaire par mois

Résultats :

Variable	PC's number feuille	R2 feuille	NRMSE feuille	PC's number rameau	R2 Rameau	NRMSE Rameau
EWT	4	0.85	10 %	5	0.85	13 %
LMA	5	0.88	9 %	4	0.65	19 %
Cab	11	0.81	12 %	3	0.80	21 %
Cxc	-	-	-	3	0.66	22 %
N	17	0.91	11 %	7	0.75	18 %

Méthode Physiques :

L'utilisation de sous-domaines spectraux permet d'optimiser l'estimation des paramètres biochimiques avec Prospect.

On obtient alors les scores suivant sur les différentes inversions :

Résultats :

Variable	Spectral Range (Canop)	R2 feuille	NRMSE feuille	R2 Rameau	NRMSE rameau	Spectral Range (Spafford [4])
EWT	1100 – 1800 (T)	0.85	10%	0.82	9%	
LMA	1800 – 2400 (R + T)	0.71	17 %	0.30	34 %	
Cab	580 – 720 (R)	0.75	15%	0.70	16%	700 – 720
Cxc	-	-	-	-	-	520 – 560

BIBLIOGRAPHIE

[1] GAUBERT, Thierry, ADELIN, Karine, HUESCA, Margarita, et al. Estimation of Oak Leaf Functional Traits for California Woodland Savannas and Mixed Forests: Comparison between Statistical, Physical, and Hybrid Methods Using Spectroscopy. *Remote Sensing*, 2023, vol. 16, no 1, p. 29.
 [2] FÉRET, J.-B., GITELSON, A. A., NOBLE, S. D., et al. PROSPECT-D: Towards modeling leaf optical properties through a complete lifecycle. *Remote Sensing of Environment*, 2017, vol. 193, p. 204-215.
 [3] FÉRET, Jean-Baptiste, BERGER, Katja, DE BOISSIEU, Florian, et al. PROSPECT-PRO for estimating content of nitrogen-containing leaf proteins and other carbon-based constituents. *Remote Sensing of Environment*, 2021, vol. 252, p. 112173.
 [4] SPAFFORD, Lynsay, LE MAIRE, Gueric, MACDOUGALL, Andrew, et al. Spectral subdomains and prior estimation of leaf structure improves PROSPECT inversion on reflectance or transmittance alone. *Remote Sensing of Environment*, 2021, vol. 252, p. 112176.
 [5] PAULUS, Stefan, EICHERT, Thomas, GOLDBACH, Heiner E., et al. Limits of active laser triangulation as an instrument for high precision plant imaging. *Sensors*, 2014, vol. 14, no 2, p. 2489-2509.