

Projet HyperMED :

Estimation des traits fonctionnels de forêts méditerranéennes à canopée ouverte par imagerie hyperspectrale en prévision des missions BIODIVERSITY et SBG

K. ADELINÉ, M. PORTERIE, R. DEMOULIN, L. CHAUVET, J.-V. SCHMITT, T. MIRAGLIO, S. LEFEBVRE, X. BRIOTTET, J.-P. GASTELLU-ETCHEGORRY, C. SCHAAF, S. USTIN, D. BALDOCCHI

Pourquoi les forêts Méditerranéennes ?

Le biome **Forêts, bois et maquis méditerranéens** couvre moins de 5% des surfaces émergées mais contient 20% des espèces de plantes vasculaires de la planète [Cowling et al., 1996].

“Biodiversity hotspots” from Myers et al. (2000)

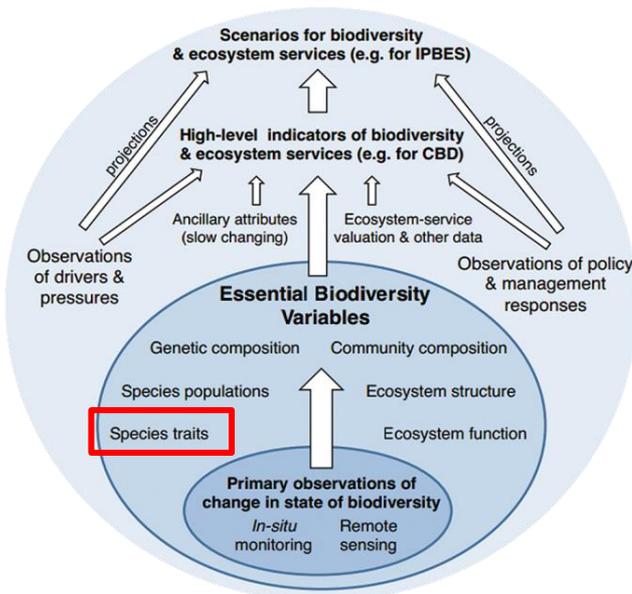


L'impact du changement climatique sera l'un des plus radical au monde [FAO, GIEC] et la biodiversité est menacée par des sécheresses et feux de forêts de plus en plus intenses et récurrents. Les pressions anthropiques vont également s'accroître au profit des milieux urbanisés et des productions agricoles.

Besoin de mieux connaître ces écosystèmes, d'évaluer et suivre leur état à des fins de prévention, de gestion et de planification

Quelles variables par télédétection ?

Par télédétection optique passive (0,4–2,5 μm), on a accès à des variables biophysico-chimiques reliées au fonctionnement et à la structure de la plante, certaines identifiées comme des variables essentielles de biodiversité [GEO-BON EBV]

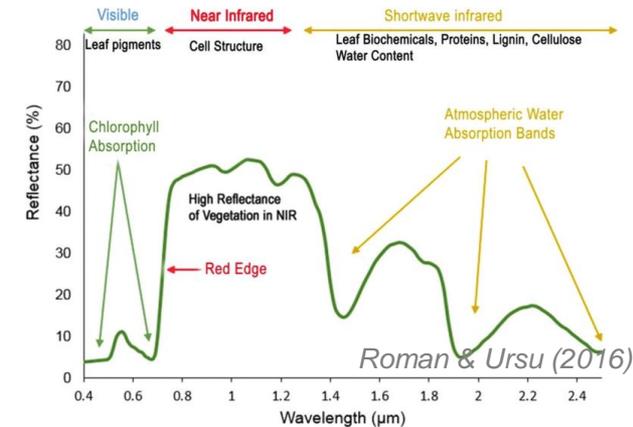


<https://geobon.org/ebvs/what-are-ebvs/>

A l'échelle feuille (activité photosynthétique, stress hydrique, biomasse):

Contenus pigmentaires chlorophylliens (CAB) et en caroténoïdes (CAR)

Contenu en eau (EWT) et matière sèche (LMA)

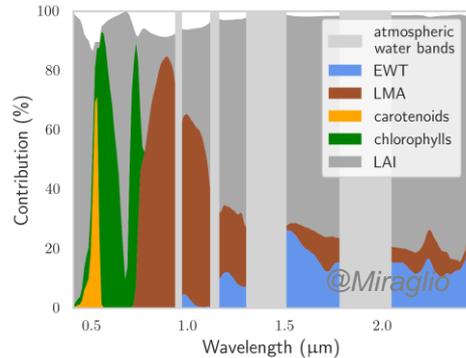


A l'échelle canopée (phénologie & morphologie):

Leaf Area Index (LAI)

Observation des forêts à canopée ouverte par télédétection

Enjeux spectraux



Seules des données hyperspectrales permettent **l'estimation de toutes les variables** (fort nombre de bandes spectrales et résolution spectrale fine)
Vers une sélection adaptée des intervalles spectraux

Enjeux spatiaux



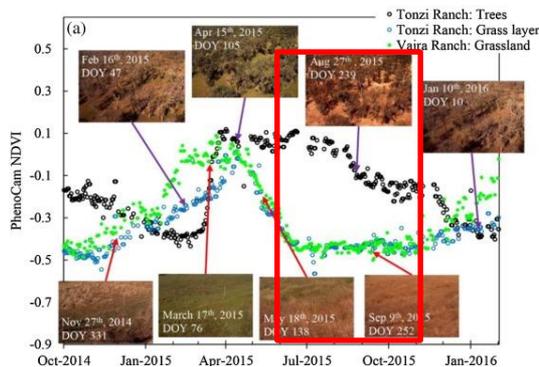
Deux catégories de missions hyperspectrales selon leur résolution spatiale:

→ 30m: PRISMA, EnMAP, CHIME, SBG

→ 8-10m: BIODIVERSITY, HYPXIM, HYSP

Pixels mixtes: problématique de l'hétérogénéité horizontale et verticale du couvert végétal

Enjeux temporels



Spécificité des « Tree-Grass Ecosystems » (TGE):
2 couches de végétation (arbres et herbe) ayant des variations phénologiques différentes

Suivi multi-temporel: besoin d'une haute revisite
premier cas d'étude: dates où l'herbe est sénescente

Observation des forêts à canopée ouverte par télédétection

Enjeux spatiaux

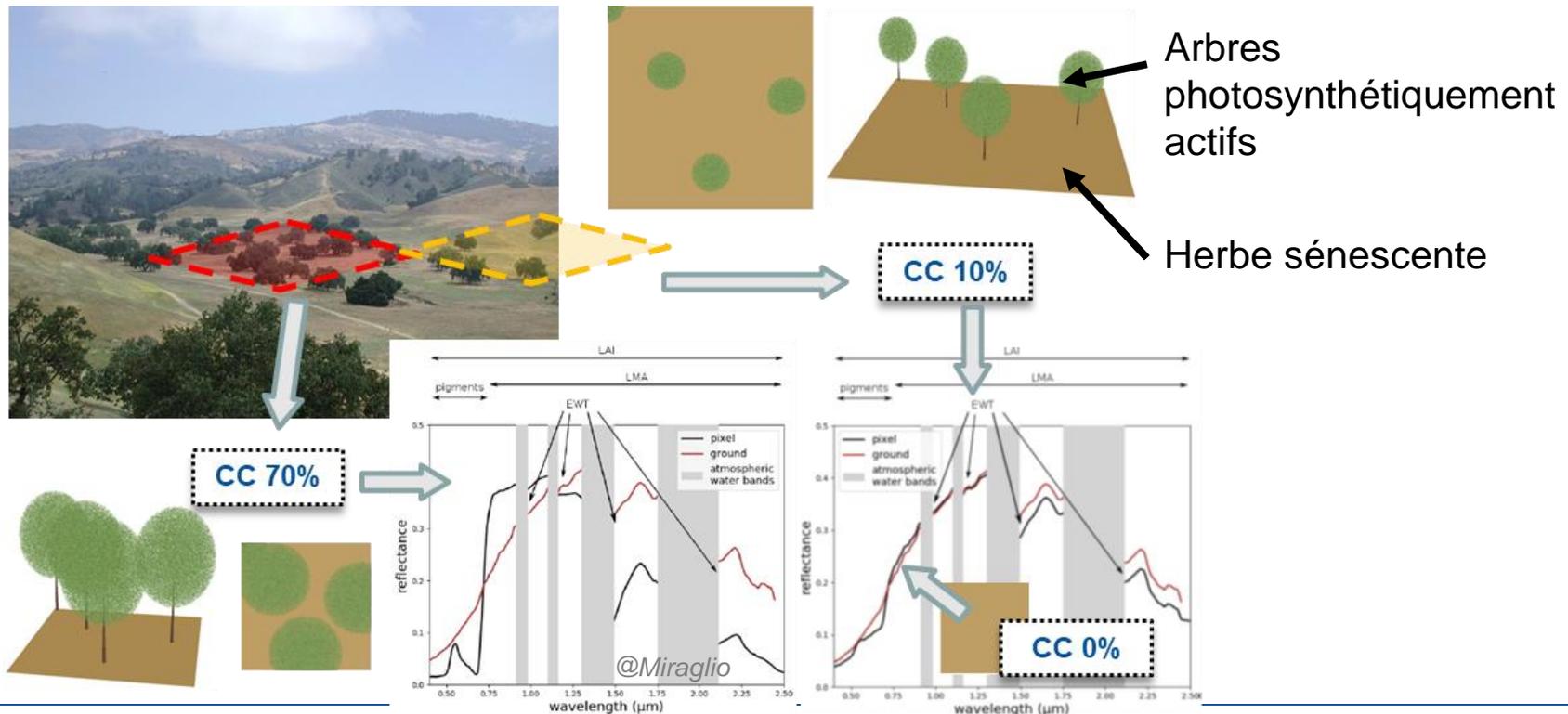
→ 30m: paysage mixte

1 pixel = {plusieurs arbres + ombre + fond (sol/sous-couvert)}

→ 8-10m: vers l'échelle de l'arbre

1 pixel = {arbre} ou {arbre + ombre + fond (sol/sous-couvert)}

En fonction du taux de couverture boisée ou Canopy Cover (CC):

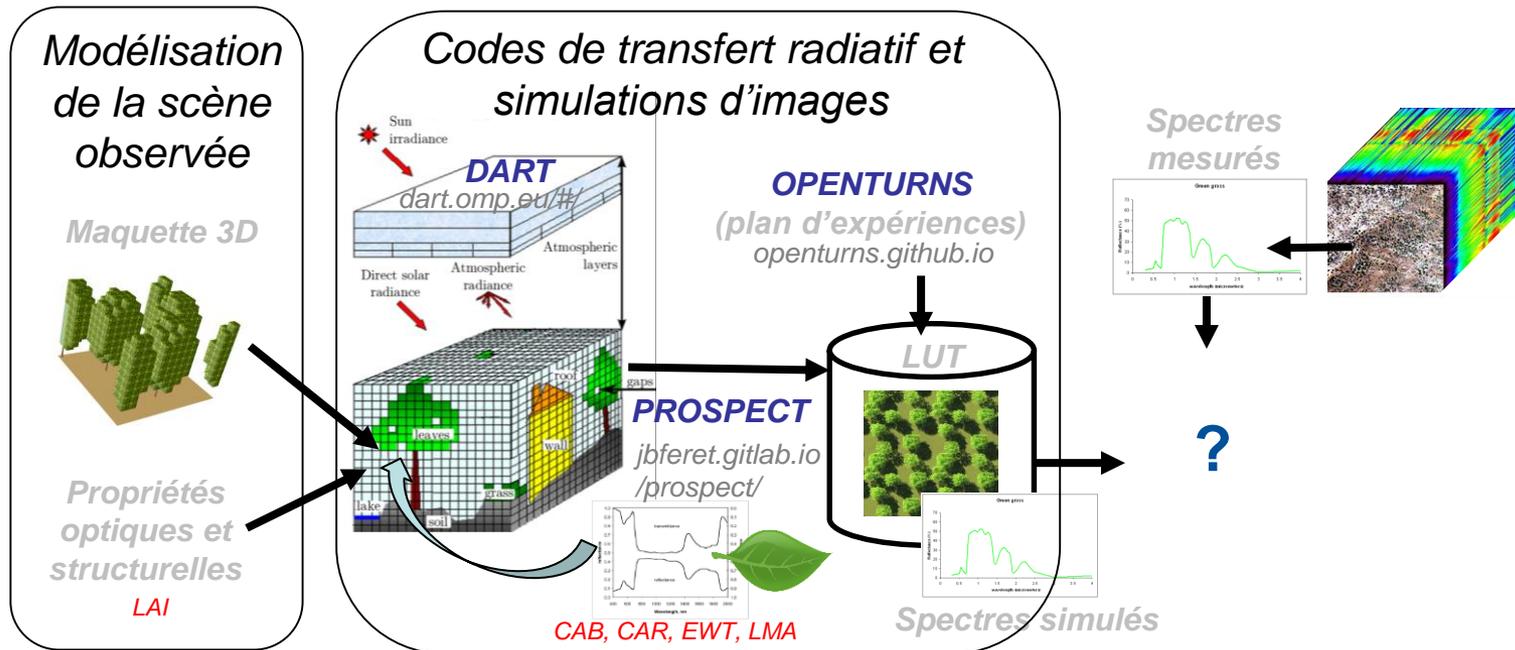


Objectif et méthodologie

Développer des méthodes adaptées pour les missions hyperspectrales et l'estimation des traits fonctionnels de ces forêts, à moindre coût et généralisables à l'écosystème

Besoin de gérer les pixels mixtes → limitations des approches empiriques du type indices spectraux → recours à de la modélisation physique 3D

Principe de l'inversion:

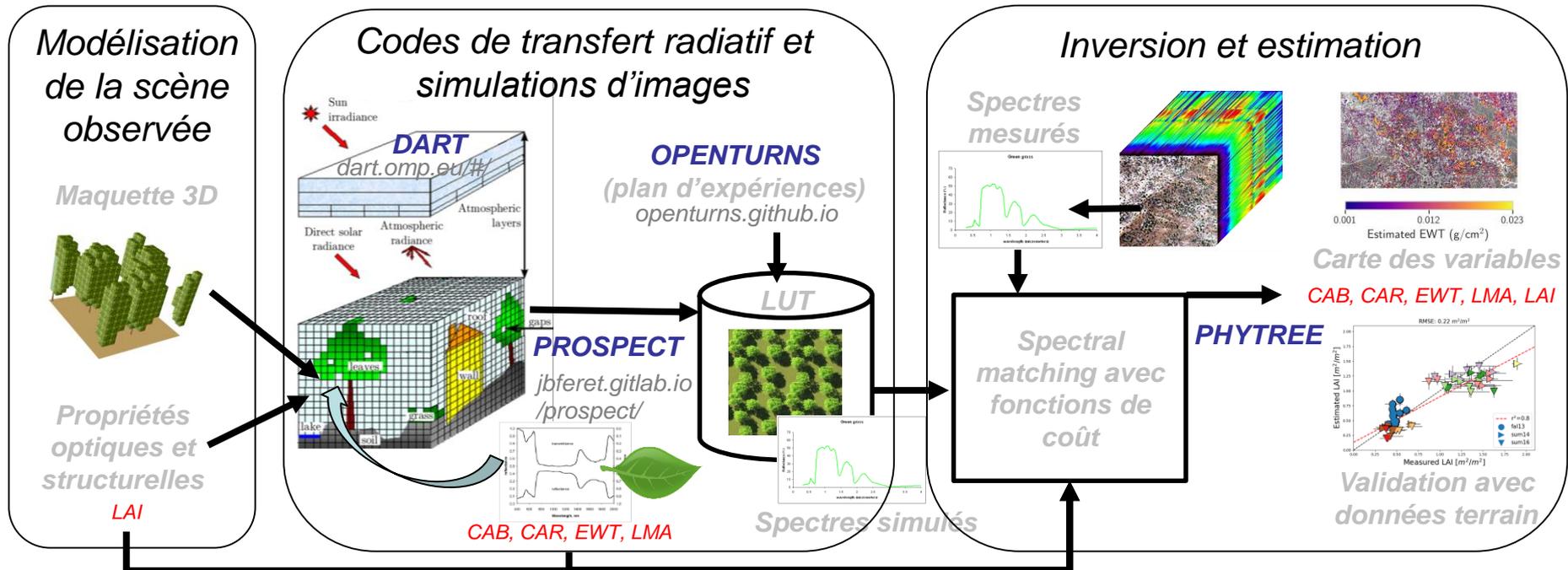


Objectif et méthodologie

Développer des méthodes adaptées pour les missions hyperspectrales et l'estimation des traits fonctionnels de ces forêts, à moindre coût et généralisables à l'écosystème

Besoin de gérer les pixels mixtes → limitations des approches empiriques du type indices spectraux → recours à de la modélisation physique 3D

Principe de l'inversion: méthode dite « LUT-based »

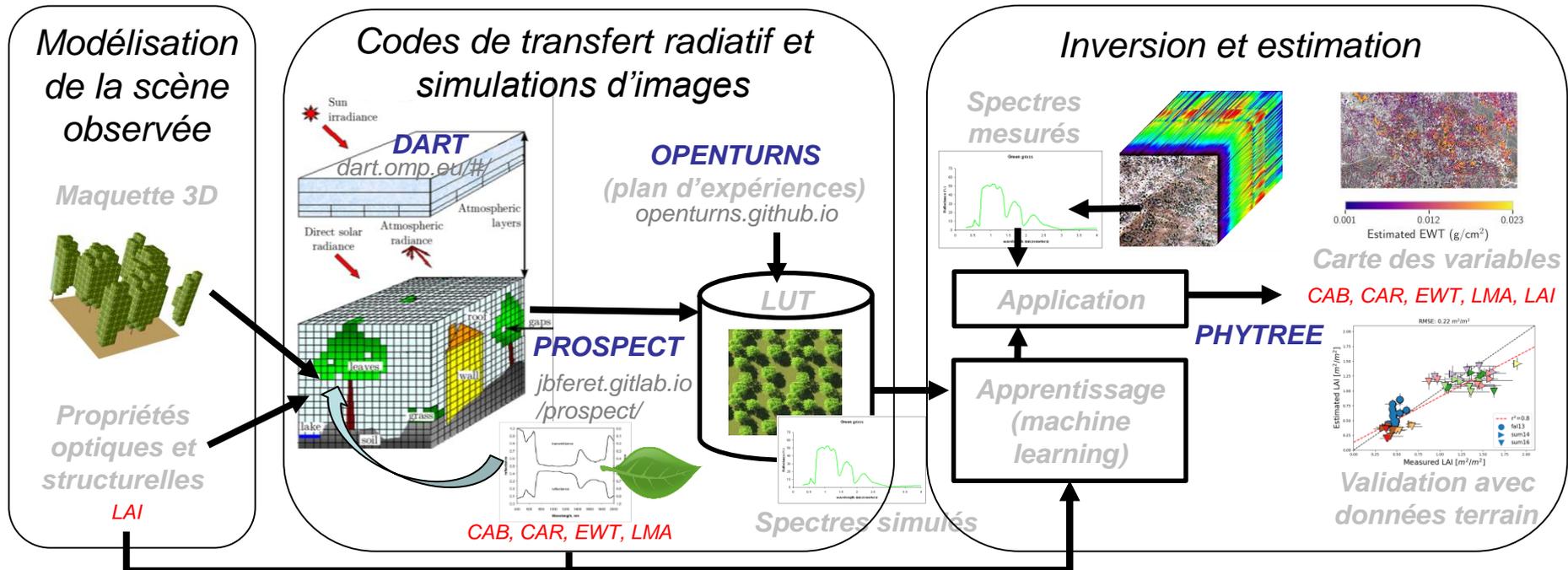


Objectif et méthodologie

Développer des méthodes adaptées pour les missions hyperspectrales et l'estimation des traits fonctionnels de ces forêts, à moindre coût et généralisables à l'écosystème

Besoin de gérer les pixels mixtes → limitations des approches empiriques du type indices spectraux → recours à de la modélisation physique 3D

Principe de l'inversion: méthode dite « hybride »



Sites d'étude et données

Deux sites de savanes boisées (TGE) en climat Méditerranéen présentant des caractéristiques communes, notamment en composition en espèces (chênes décidu et sempervirent)

Particularités: faibles LAI ($< 1 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$) et taux de couvertures boisées ($< 50\%$) en moyenne

Données terrain: Campagnes terrain opérées par CSTARS de 2013 à 2016: inventaires forestiers, calcul du LAI à partir de photos hémisphériques, mesures des variables foliaires en laboratoire (CAB, CAR, EWT et LMA) – **cadre du programme HYSPIRI, précurseur de SBG**

Données de télédétection:

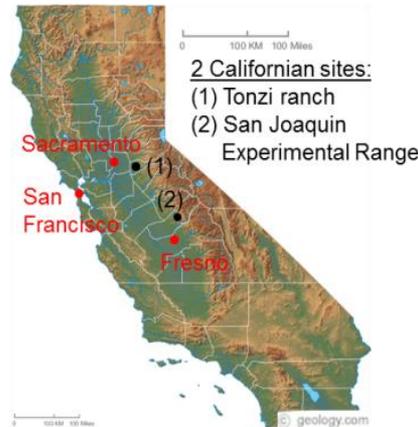
Images aéroportées AVIRIS-CLASSIC à 18m et AVIRIS-Next Generation à 2m opérées par la NASA JPL de 2013 à 2022

→ Co-registation avec Gefolki

github.com/aplyer/gefolki

→ *Données simulées BIODIVERSITY à 8m avec bruit instrumental*

→ *Données SBG fournies par la NASA*



Une représentation simpliste d'une scène forestière

« a Simple Forest Representation - SFR » (Gastellu-Etchegorry et al, 2003)

A des fins de généralisation avec un minimum d'information a priori



- **Arbres:** houppier ellipsoïde et dimensions issues d'inventaires forestiers
- **Feuilles:** voxels turbides (DART-FT) ou facettes (DART-LUX), réflectance et transmittance dir.-hémis. (PROSPECT)
- **Tronc:** cylindrique, réflectance lambertienne issue de mesures terrain
- **Fond (sol/sous-couvert):** surface plane, réflectance lambertienne extraite de l'image

Paramètres variables: CC, LAI, ALA (Average Leaf Angle), CAB/CAR/EWT/LMA, N (structure)

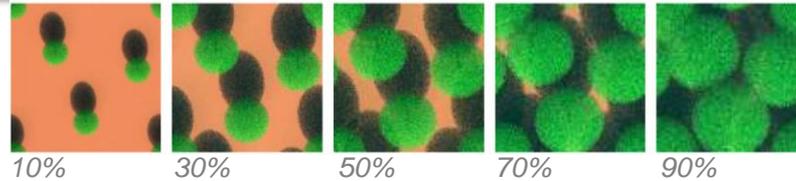
Plan d'expériences: plan hypercube latin avec ≤ 5000 simulations (OPENTURNS)

Évaluation des limitations de cette modélisation selon 3 critères:

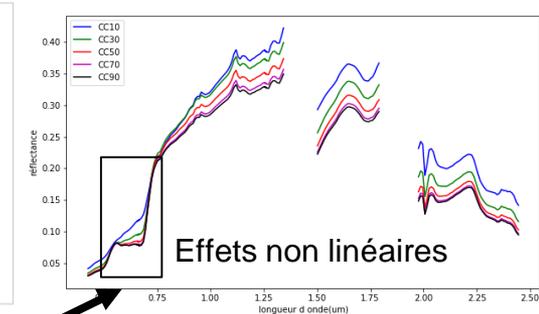
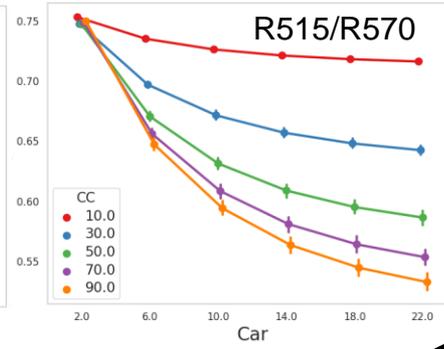
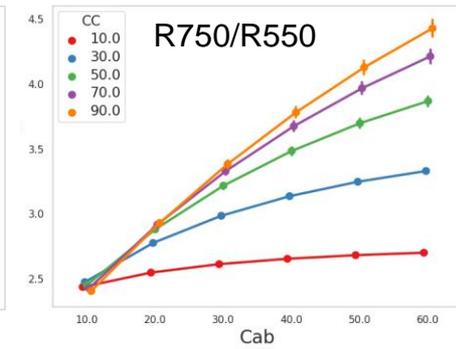
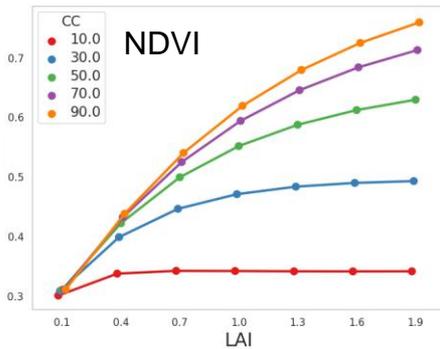
- (1) *le taux en couverture boisée ou CC*
- (2) *la proportion d'éléments ligneux*
- (3) *la variabilité spatio-temporelle de la réflectance du fond*

Résultats: impact du taux de couverture boisée

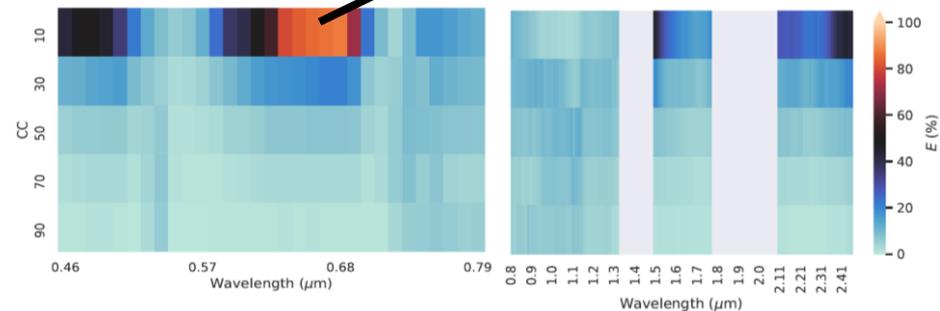
Le signal de végétation est trop faible au sein d'un pixel présentant un $CC \leq 10\%$



L'analyse d'indices spectraux calculés sur les spectres simulés montre une saturation du NDVI pour $LAI \geq 0,4 \text{ m}^2.\text{m}^{-2}$ et une moindre sensibilité pour CAB et CAR pour $CC 10\%$.



Mêmes conclusions pour le modèle PROSAIL2DART (approximation du modèle 3D DART par le modèle 1D 4SAIL avec des facteurs de calibration) avec les plus grandes erreurs dans le rouge, puis le bleu et le SWIR.



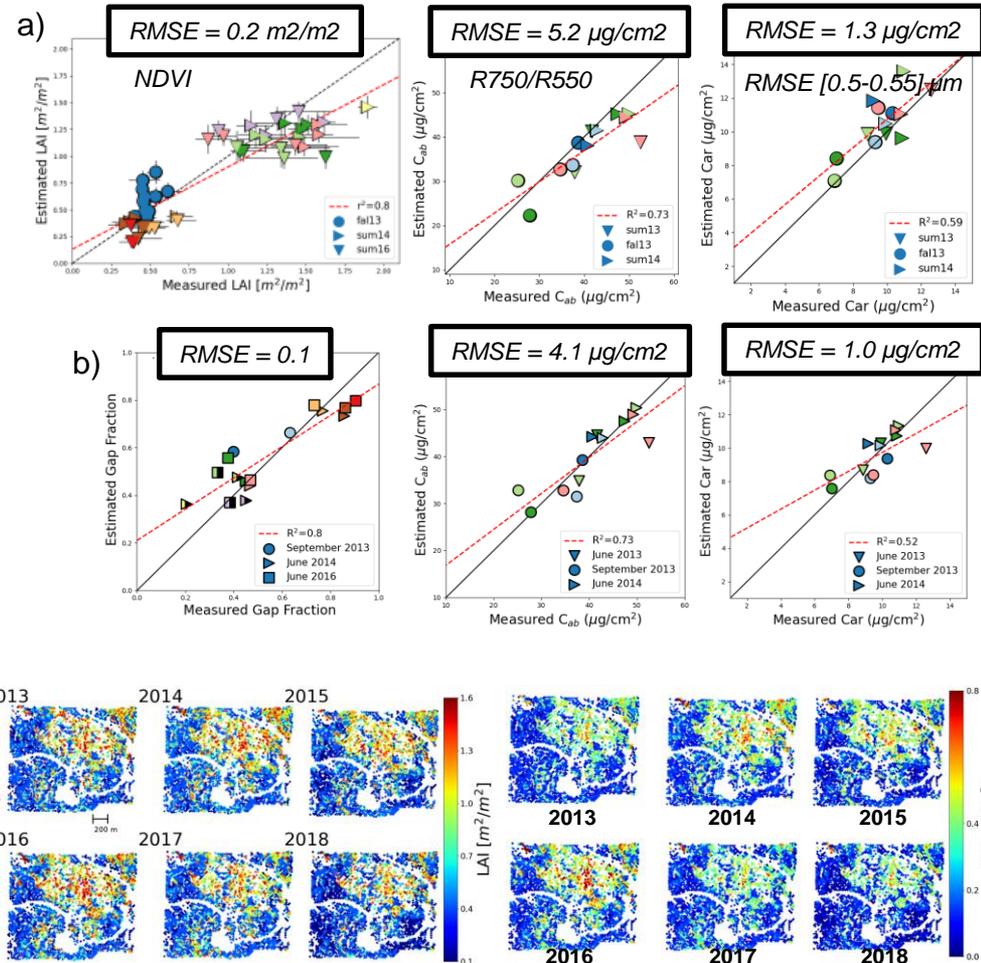
Résultats: impact du taux de couverture boisée

Travaux pionniers sur l'estimation du LAI et gap fraction (dérivé du LAI et CC), CAB et CAR à partir de la modélisation SFR avec une validation saisonnière et pluri-annuelle avec AVIRIS-CLASSIC à 18m

Méthode d'inversion LUT-based: soit en utilisant des indices spectraux soit en comparant spectres simulés et mesurés sur des intervalles spectraux spécifiques avec les métriques RMSE et SAM

Performances similaires entre a) DART et b) PROSAIL2DART pour $CC \geq 30\%$

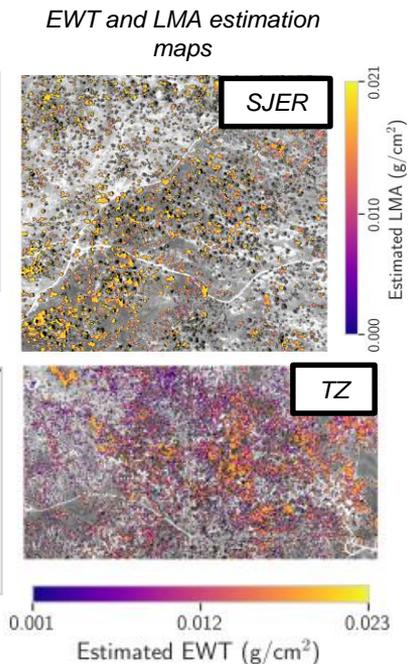
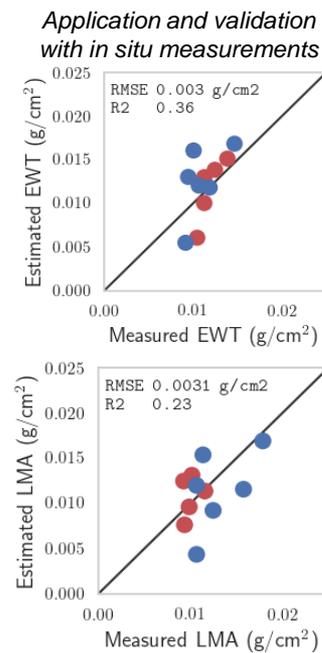
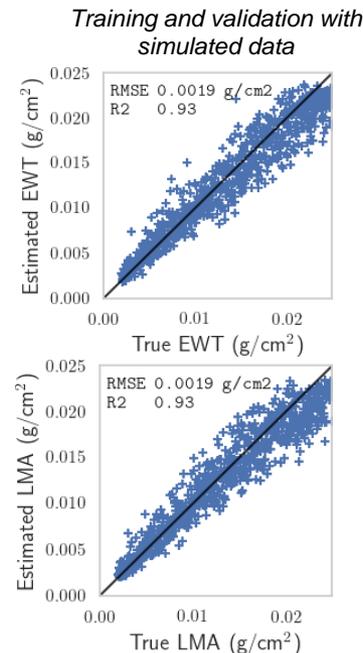
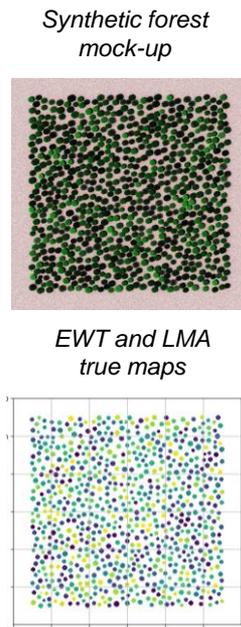
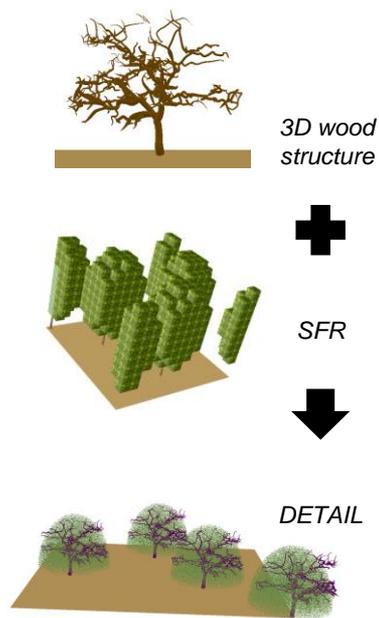
Impossibilité d'avoir une estimation correcte de EWT et LMA...



Résultats: impact de la proportion d'éléments ligneux

Nouvelle représentation DETAIL basée sur des données terrestres LiDAR post-traitées avec les outils CloudCompare et TreeQSM

La génération d'une scène forestière synthétique avec des valeurs EWT/LMA maîtrisées montre que SFR = DETAIL pour l'intervalle spectral 1,5-2,4 μm avec la méthode d'inversion hybride utilisant le Random Forest Regression (RFR) pour AVIRIS-Next Generation à 2m

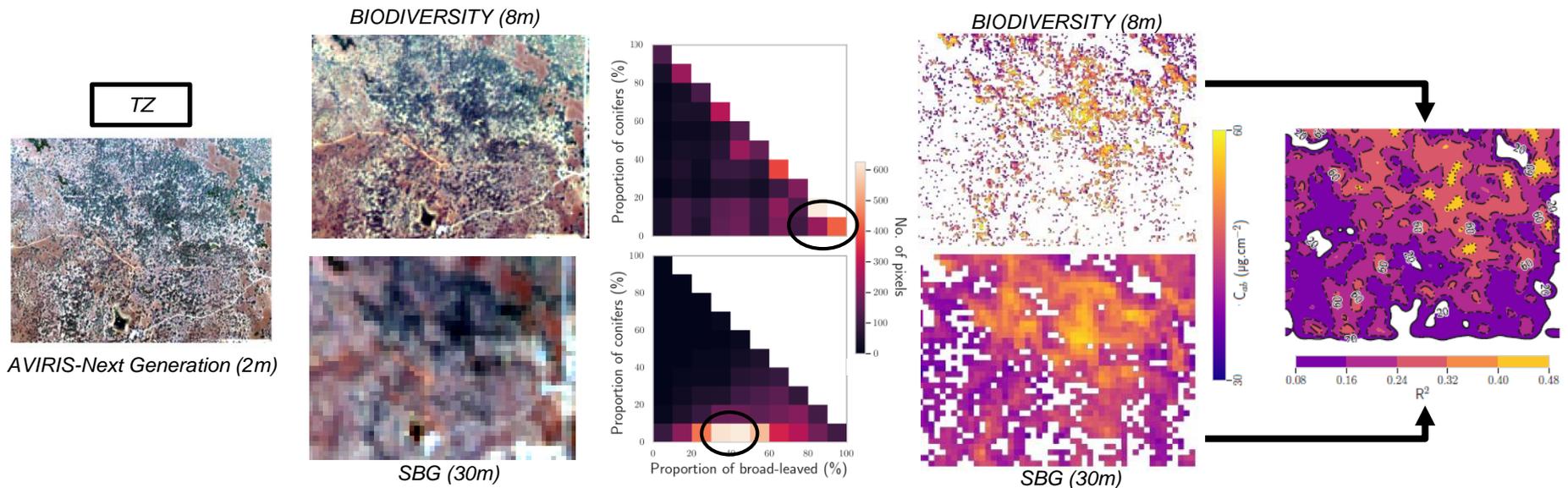


Résultats: impact de la proportion d'éléments ligneux

Représentation DETAIL avec la méthode d'inversion hybride utilisant le bagged Partial Least Square Regression (PLSR) et une corrélation CAB/CAR:

- performances similaires entre AVIRIS-CLASSIC, BIODIVERSITY et SBG pour le gap fraction (RMSE ~ 0,1)
- idem pour les pigments (CAB / CAR: RMSE [7,4-8,5] / [1,6-2,4] $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) seulement dans les zones à fort CC ($\geq 80\%$) pour SBG contrairement à BIODIVERSITY

→ Complémentarité attendue entre SBG et BIODIVERSITY

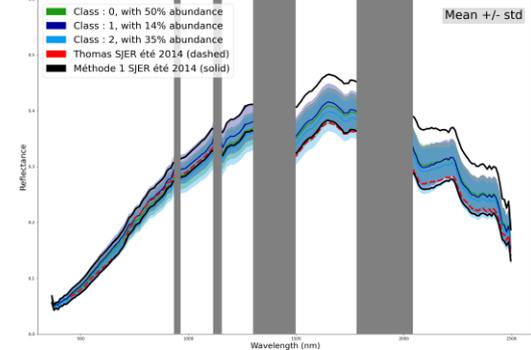
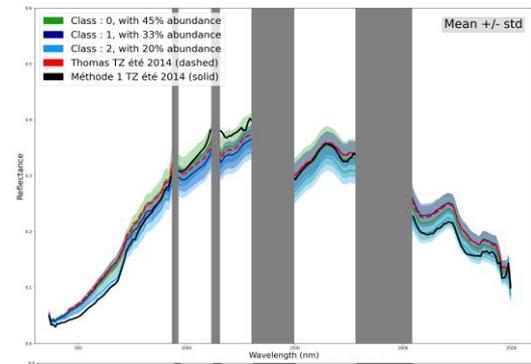
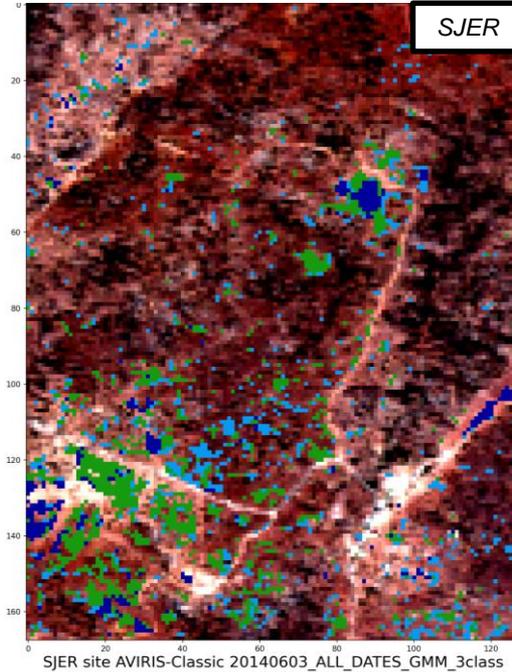
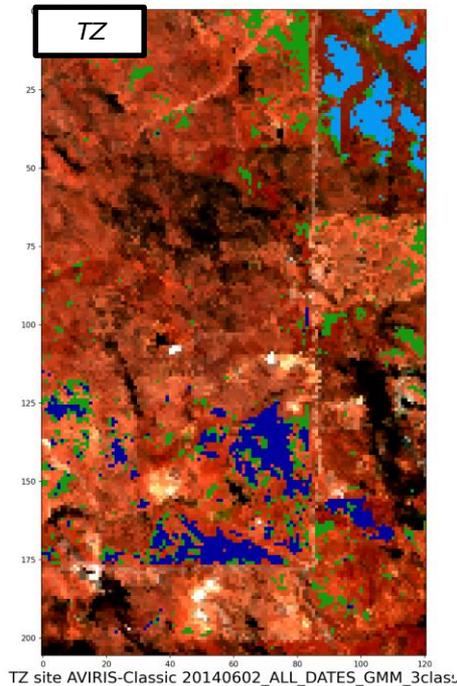


→ Besoin de revoir la méthode pour l'estimation de EWT et LMA pour des résolutions $> 2\text{m}$

Résultats: impact des propriétés optiques du fond

Vers une approche optimisée et spatio-temporelle de l'attribution de la réflectance du fond au lieu d'une sélection arbitraire dans l'image de pixels purs

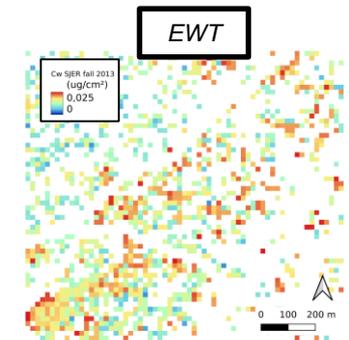
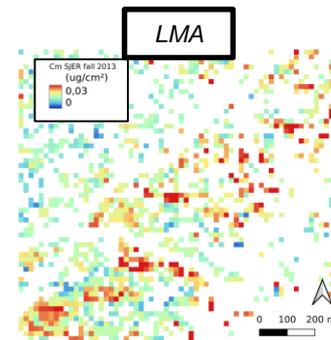
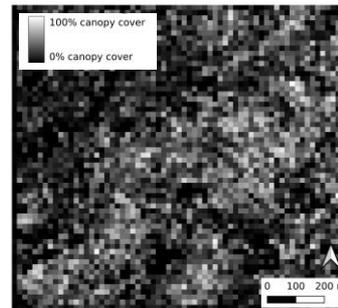
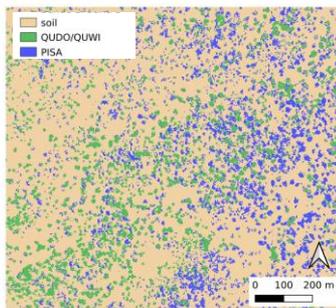
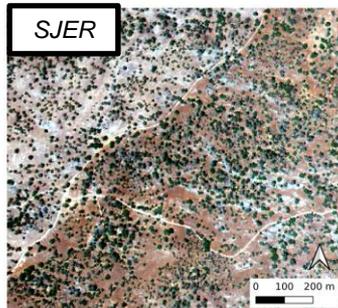
Application d'une Analyse en Composantes Principales (ACP) suivie d'un Modèle de Mélanges Gaussiens (GMM) pour sélectionner un nombre restreint de classes de fond sur une pile d'images pluri-dates AVIRIS-CLASSIC à 18m



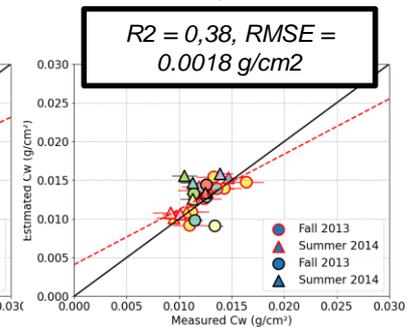
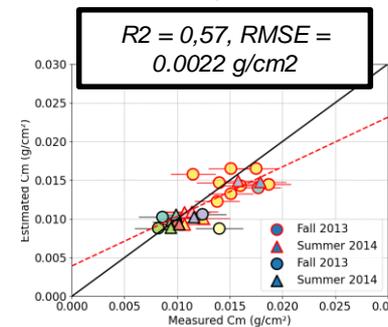
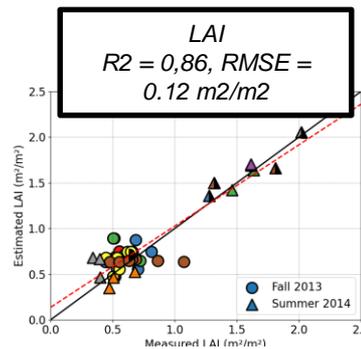
Résultats: impact des propriétés optiques du fond

Vers une approche optimisée et spatio-temporelle de l'attribution de la réflectance du fond au lieu d'une sélection arbitraire dans l'image de pixels purs

Représentation SFR avec comparaison de différentes méthodes d'inversion hybrides: PLSR, Gradient Boosting Regression Tree (GBRT) and Multi-Layer Perceptron (MLP)



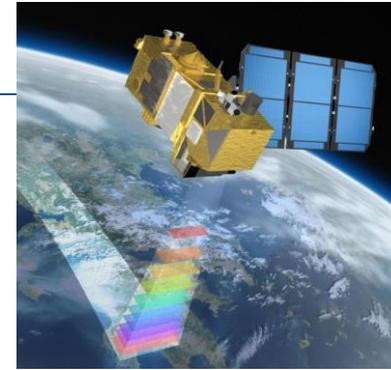
Premières estimations correctes de EWT et LMA ! Ainsi que toujours le LAI !
Mais au détriment de CAB et CAR...



Conclusions et perspectives

Forts challenges de modélisation structurelle et spatio-temporelle nécessaires à prendre en compte: LAI peu affecté, pigments et EWT/LMA sensibles au type optique du fond et EWT/LMA sensibles aux éléments ligneux... prochaine étape: estimer toutes les variables !

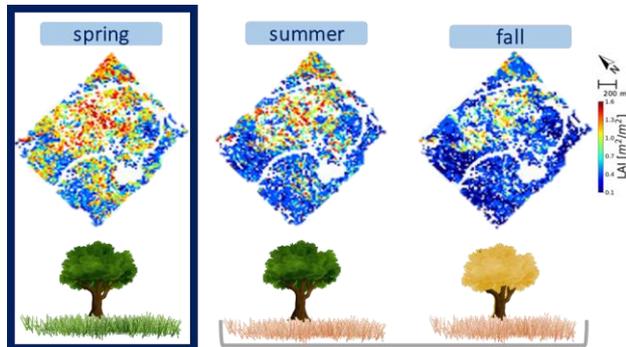
Les missions BIODIVERSITY et SBG devraient se compléter et le premier apporter plus d'informations dans les zones ouvertes ($CC \geq 10\%$)



**Données réelles
PRISMA et EnMAP
à 30m**

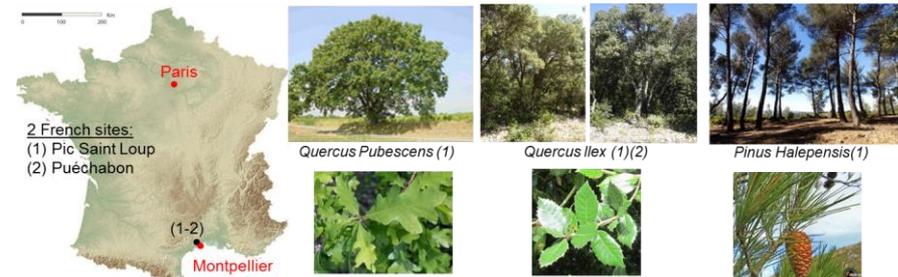
Perspectives:

Traitement d'un cycle phénologique complet: thèse M. Porterie (2022-2025)



Poster: Porterie et al., *Développements méthodologiques pour le suivi d'estimation d'indicateurs d'inflammabilité à l'aide d'images hyperspectrales aéroportées en contexte forestier méditerranéen*

**Transfert à d'autres sites forestiers
Méditerranéen:** projet APR TOSCA CNES
SentHyMED (2021-2024)



Poster: Debue et al., *Simulations d'images hyperspectrales de forêts méditerranéennes à partir du modèle de transfert radiatif DART, de données terrain et drone LiDAR : adéquation à des images aéroportées et satellitaires*

Merci, des questions ?



Travaux effectués par:

- Projet APR TOSCA CNES HyperMED “Evaluation des caractéristiques fonctionnelles des essences d'arbres pour le suivi de leur état de santé pour des écosystèmes de forêts MEDiterranéennes pour un imageur Hyperspectral” (2019-2022)
- T. Miraglio (2021) “Estimation de traits de végétation de canopées ouvertes méditerranéennes par télédétection hyperspectrale” (diplôme de doctorat, ISAE, Toulouse), financement ONERA et Région Occitanie