

Projet SentHyMED :

Bases de données multi-échelles et simulation de paysages de chênaies méditerranéennes par modélisation directe du transfert radiatif pour des images multi- et hyperspectrales

K. ADELINÉ, M. DEBUE, X. BRIOTTET, J.B. FERET, F. DE BOISSIEU, S. ALLEAUME, J. GIFFARD-CARLET, J.M. LIMOUSIN, J.M. OURCIVAL, F. MOUILLOT, J. KEMPF, D. LONGEPIERRE, G. VINCENT, J.-P. GASTELLU-ETHEGORRY

Pourquoi les forêts Méditerranéennes ?

"Climate change, wildfires and water scarcity drive forest degradation"

"The Mediterranean region, which is currently experiencing unprecedented fires [...] will be a 'hot spot' for global warming".

"Mediterranean forest area on the rise but increasingly in jeopardy"

"In the Mediterranean, climate change will be one of the most radical in the world"

"EXTREME HEAT IS THE GREATEST THREAT"



Menace de la biodiversité par l'impact anthropique (agriculture, urbanisation)



Effets prolongés des sécheresses: des forêts aux prairies, puis à la désertification...



Des feux de forêts battant des records sans précédents...

Besoin d'évaluer et suivre l'état de ces écosystèmes (faisant parti du biome « forêts bois et maquis méditerranéens ») à des fins de prévention, de gestion et de planification

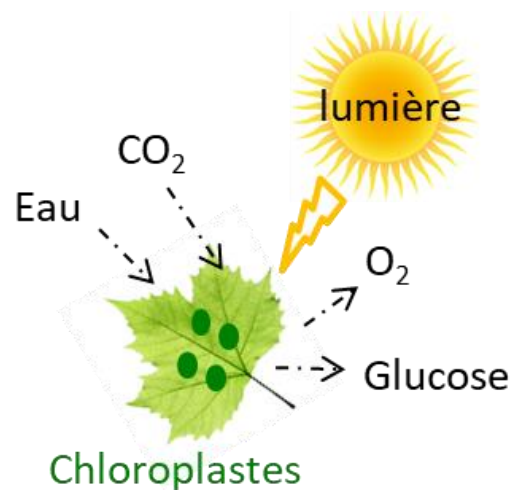
Apport de la télédétection optique

Accès à des variables biophysiques et biochimiques liées au fonctionnement et à la structure du végétal, certaines identifiées comme variables essentielles de biodiversité [GEO-BON].

À l'échelle feuille:

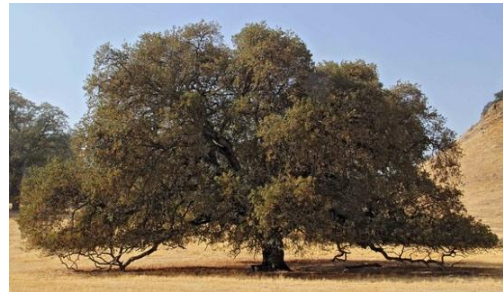
Contenus pigmentaires chlorophylliens et en caroténoïdes

Contenu en eau et matière sèche



À l'échelle canopée:

Leaf Area Index (LAI)



Apport de la télédétection optique

Accès à des variables biophysiques et biochimiques liées au fonctionnement et à la structure du végétal, certaines identifiées comme variables essentielles de biodiversité [GEO-BON].

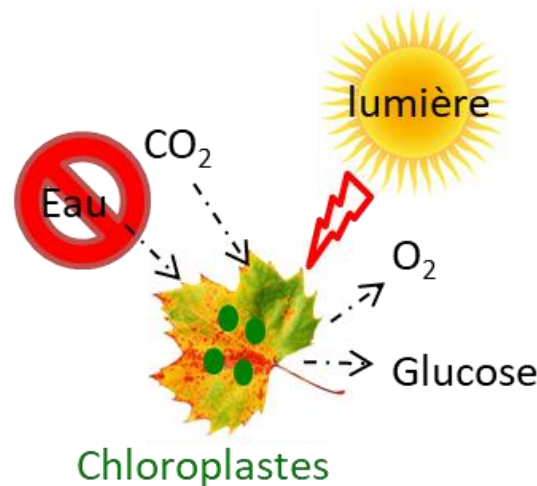
À l'échelle feuille:

Contenus pigmentaires chlorophylliens et en caroténoïdes

Contenu en eau et matière sèche

À l'échelle canopée:

Leaf Area Index (LAI)



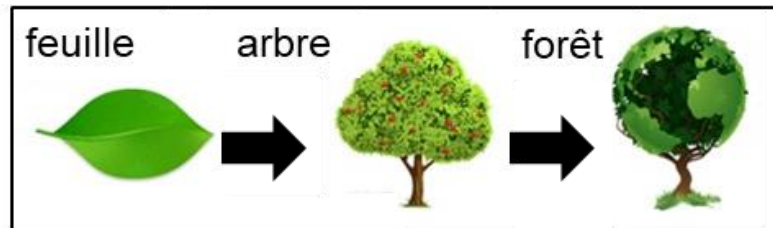
Signes potentiels de stress:

- Photoinhibition,
- Perturbations de l'activité photosynthétique (décoloration & sénescence précoces),
- Perte en eau, diminution de la teneur en eau du combustible vivant,
- Défoliation précoce,
- Altération du développement de la plante

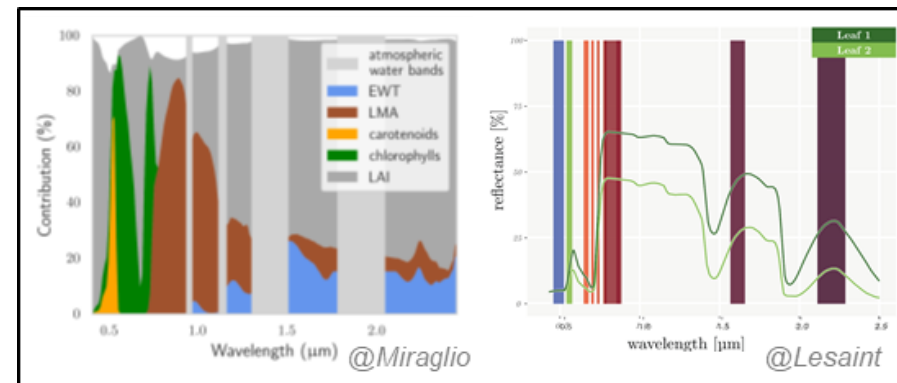
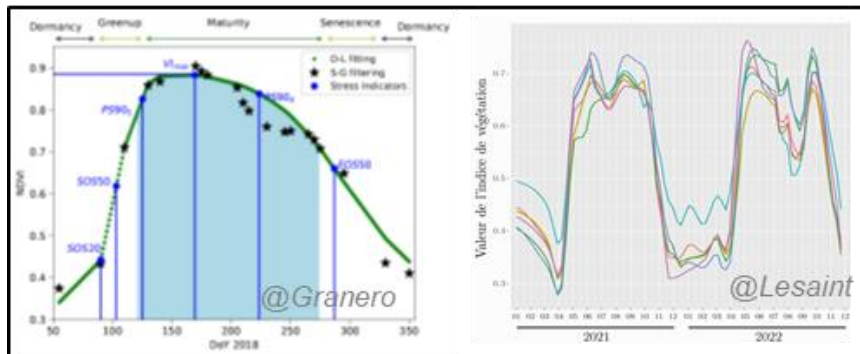
Enjeux

La précision d'estimation de ces variables dépend fortement de l'échelle d'observation, de la richesse spectrale des capteurs de télédétection et du temps de revisite.

Résolution spatiale



Suivi intra- et interannuel, prédiction



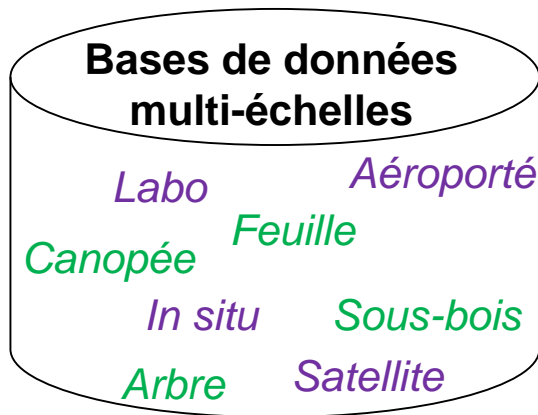
Nombre de bandes spectrales, échantillonnage et résolution spectrale

Objectifs

Le projet SENTHYMED vise à évaluer la complémentarité de données Sentinel-2 et hyperspectrales pour la cartographie et le suivi des variables biophysico-chimiques à des fins de détermination du stress hydrique et du risque incendie des forêts méditerranéennes

1) Besoin de données

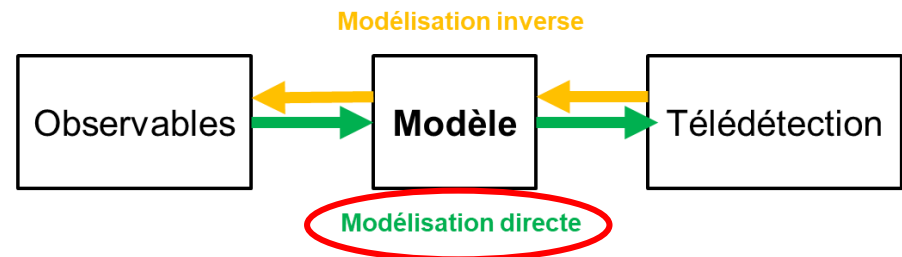
- pour la calibration des méthodes d'estimation
- pour la validation des produits satellitaires



Emploi de méthodes d'estimation hybrides (apprentissage sur données simulées par un modèle de transfert radiatif)

2) Besoin de vérifier l'adéquation du modèle

- pour une simulation du paysage réaliste mais à moindre coût (optimisation de la paramétrisation du modèle)
- Évaluation selon la diversité des caractéristiques des capteurs de télédétection



1) Sites d'étude

Puéchabon

Forêt très dense de chênes sempervirents (OSU-

OREME/ICOS/ FLUXNET)

Couverture arborée moyenne : 80%

LAI moyen: $2-3 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$

Traitement des parcelles pour étudier l'impact du changement climatique et des sécheresses (CEFE)

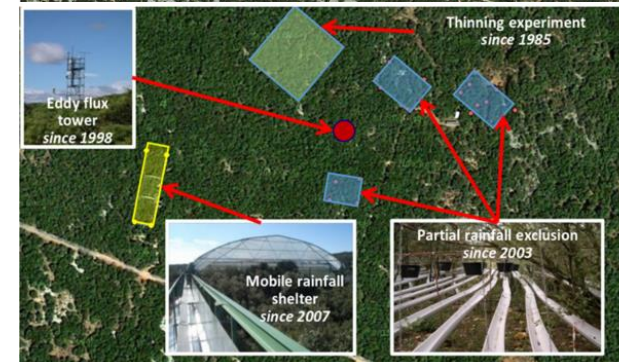
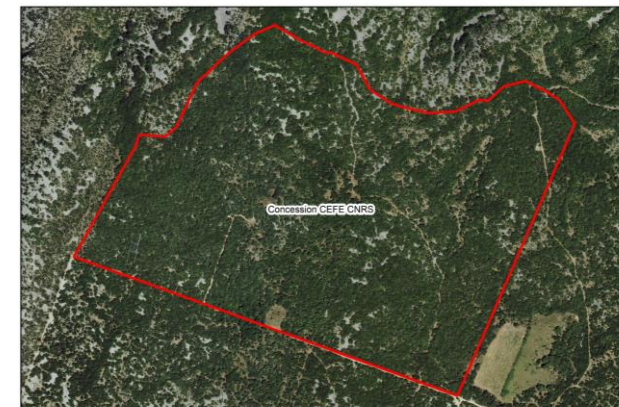
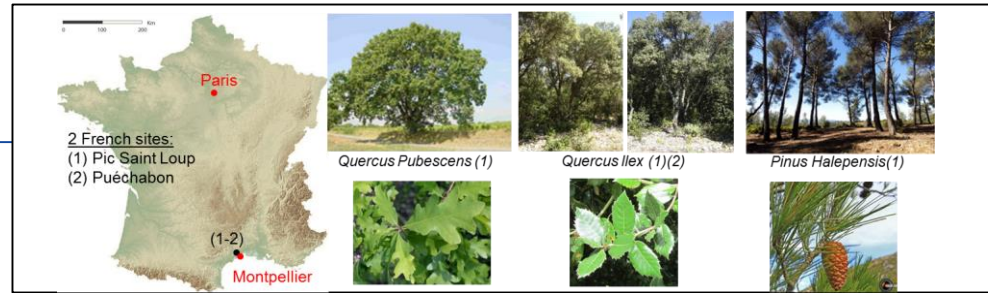
Pic Saint Loup

Forêt hétérogène de chênes sempervirents/décidus et de pins (Natura 2000/ZPS/ ZICO/ZNIEFF/SIC)

Couverture arborée moyenne : variable

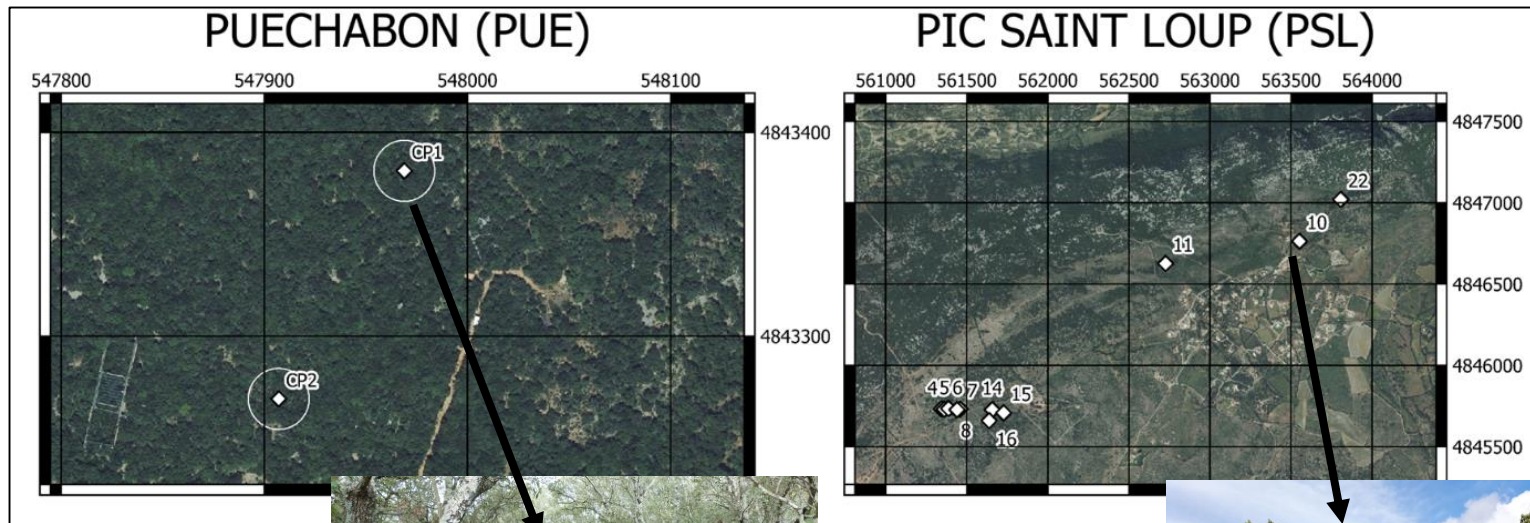
LAI moyen: $1-3.5 \text{ m}^2 \cdot \text{m}^{-2}$

Inventaires forestiers et de biodiversité (DYNAFOR)



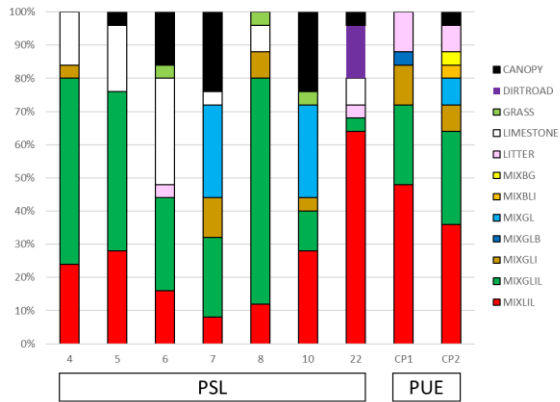
1) Organisation pour la collecte des données

- Sélection de 13 parcelles de diamètre 30m x 30m avec variabilité en composition entre deux espèces de chênes (*Quercus Ilex* et *Pubescens*) et en couverture arborée (71% - 100%)
- Sélection de 4 à 5 chênes dominants au sein de la parcelle pour les prélèvements foliaires
- 7 campagnes mensuelles entre avril et octobre 2021 fixées sur des passages du capteur Sentinel-2A + 1 supplémentaire en juin 2023

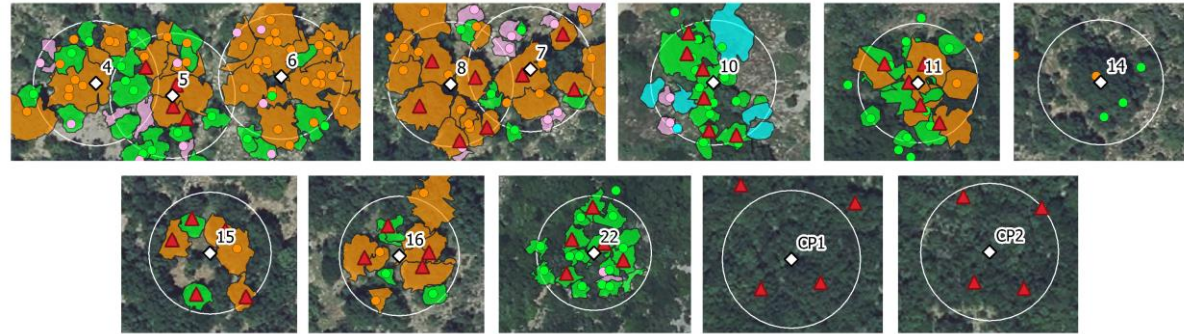


1) Données à l'échelle de la parcelle forestière

Inventaires des types de sous-bois



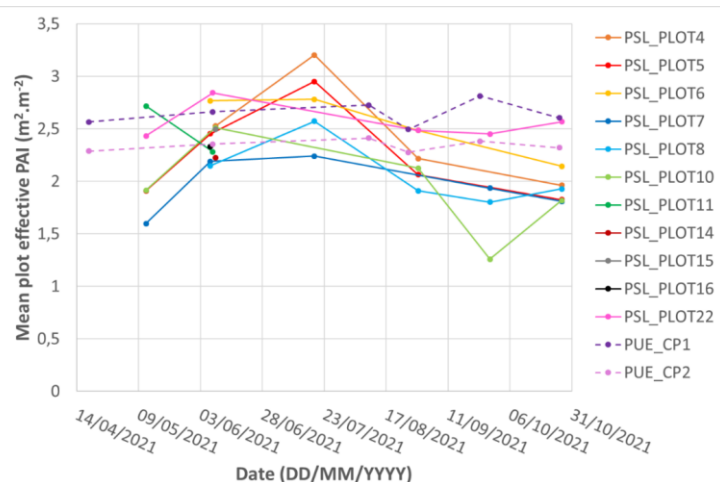
Inventaires des espèces dominantes au sein des parcelles



Caption:

◇ Plot center ▲ Sampled tree Overstorey inventory: JU QI
PI QP

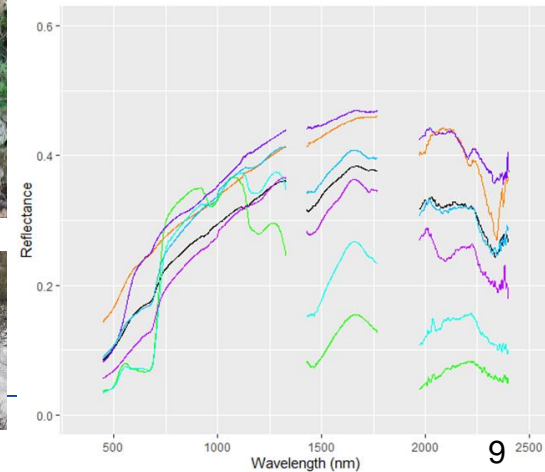
687 mesures de l'indice de densité de la canopée ou PAI (Li-Cor, LAI-2000/2200)



Humidité et température du sol (sonde, données ICOS)

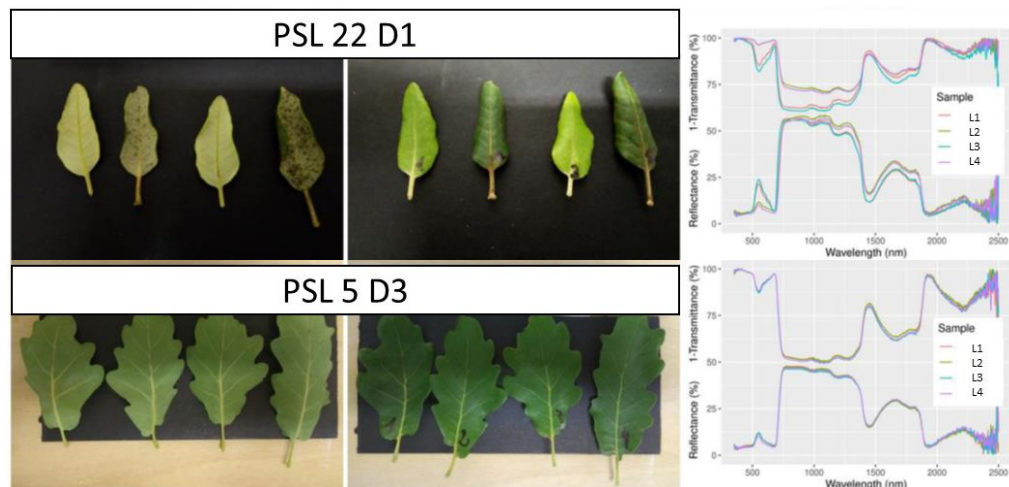


1475 mesures spectroscopiques *in situ*: réflectance du tronc et du sous-bois (ASD Fieldspec)



1) Données à l'échelle de la feuille

2594 mesures spectroscopiques en labo et *in situ*:
réflectances et transmittances directionnelle-hémisphériques
et réflectances bi-directionnelles (ASD Fieldspec)

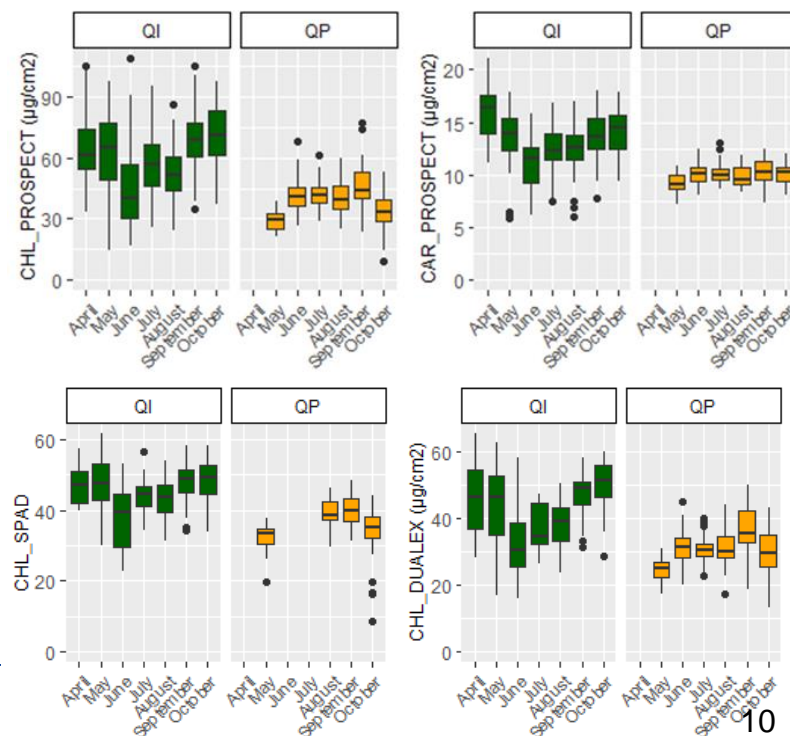


747 mesures *in situ* aux leaf-clip SPAD et
DUALEX (proxies pour le taux en chlorophylles,
anthocyanes, flavonoïdes et contenu azoté)



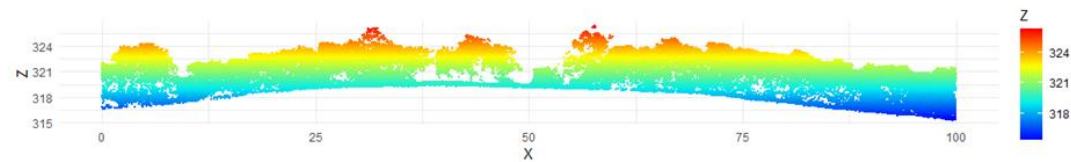
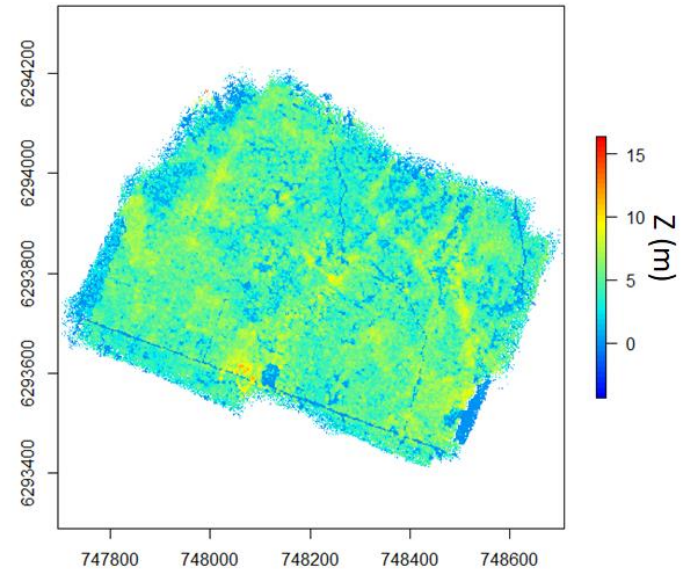
747 mesures en labo du contenu en eau
et matière sèche (desquels on déduit le
taux en humidité du combustible vivant)

747 estimations du taux en chlorophylles,
caroténoïdes et anthocyanes, contenu en
eau et matière sèche par inversion du
modèle PROSPECT sur les spectres



1) Acquisitions LiDAR-3D drone

- Acquisitions en juin 2021
- Drone DJI Matrice 600 Pro avec instrument Yellowscan Surveyor (Velodyne VLP16, bi-écho @905nm)
- Vols à 50m d'altitude sur certaines parcelles
- Nuages de points



Concession CEFE sur la forêt de Puéchabon

1) Images aéroportées et satellitaires

Données aéroportées hyperspectrales (NASA-ESA, cadre d'un appel à sites pilotes, proposition MEDOAK)

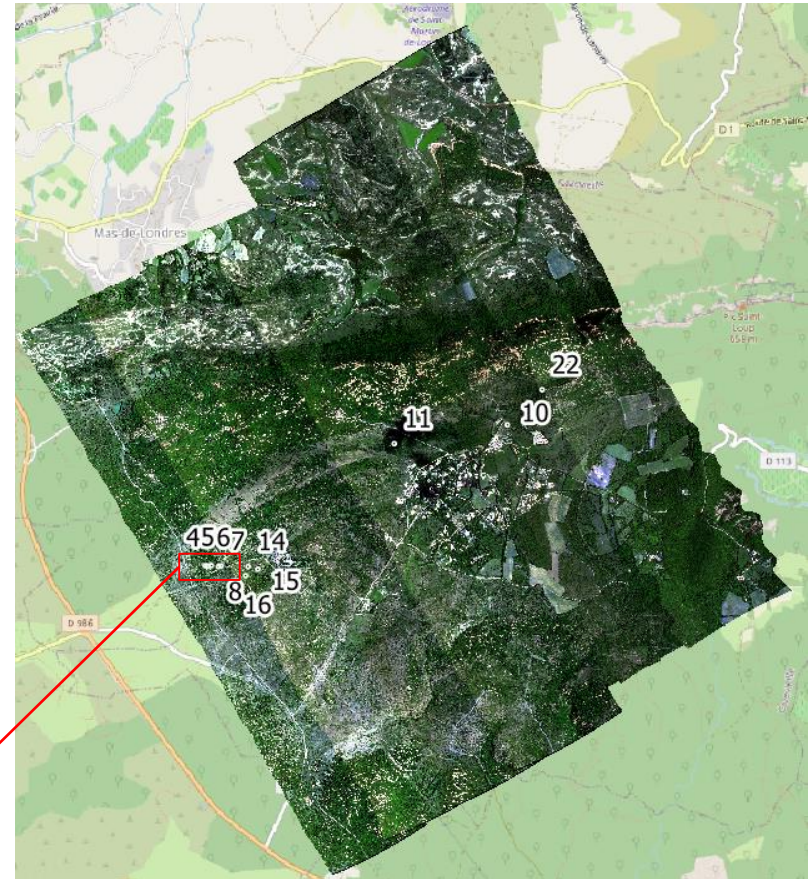
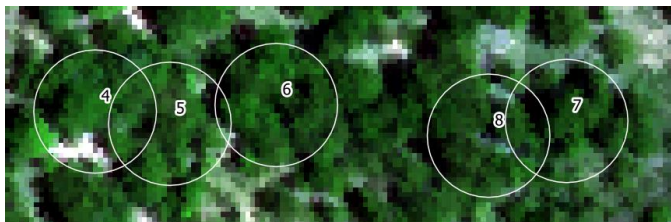
- AVIRIS-Next Generation, 425 bandes (0,4 – 2,5 μm), résolutions spatiales vers 1m et 3m, vols en juin 2021

Données satellitaires hyperspectrales

- PRISMA, 239 bandes (0,4 – 2,5 μm), 30m, 7 images dont 4 proches des données *in situ* (~ 10 jours)
- DESIS, 235 bandes (0,4 – 1 μm), 30m, 4 images dont 2 proches des données *in situ* (~ 3 jours)

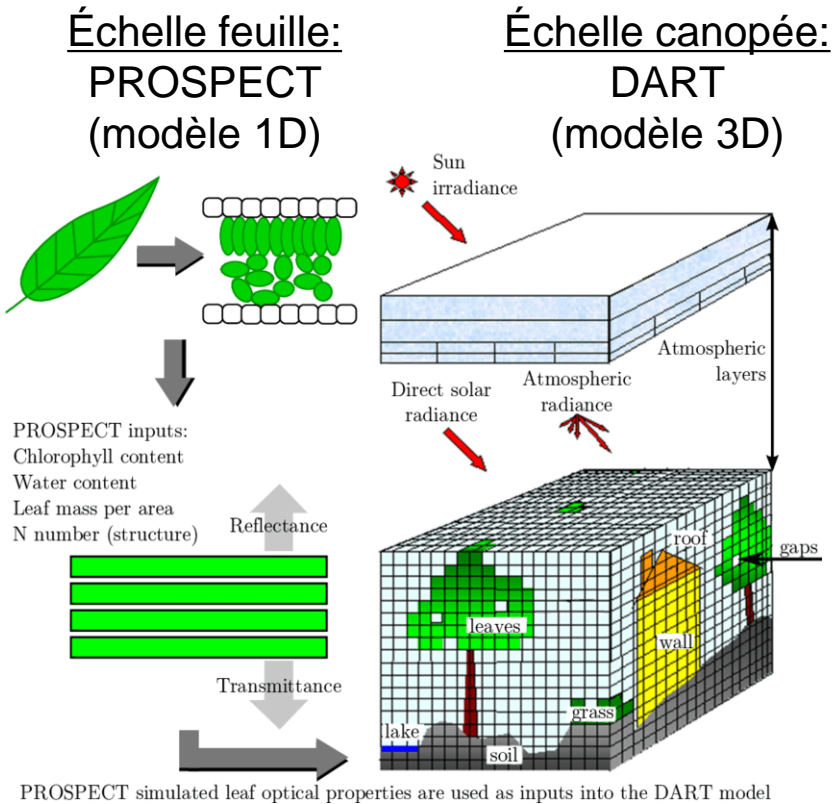
Données satellitaires multispectrales

- Sentinel-2, 12 bandes (0,4 – 2,5 μm), 10/20m, 48 images dont 8 proches des données *in situ* (~ 3 jours)



Composition colorée des lignes de vols aéroportées à 1m de résolution (Pic Saint Loup)

2) Modèles de transfert radiatif



Simuler avec précision une scène forestière
→ notamment la canopée des arbres

Paramétrisation:

géométrique

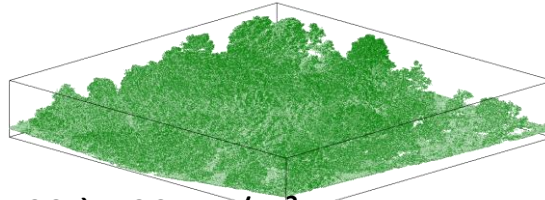
optique

Reconstruction fine de la structure de la forêt à partir des données LiDAR drone

Évaluer comment attribuer à moindre coût les propriétés optiques de chaque élément composant la scène

2) Paramétrisation géométrique

LiDAR drone



Densité de points : 400 à 700 pts/m²

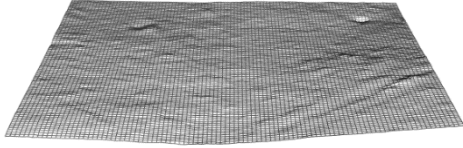
lidR

Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Multiscale Curvature Classification

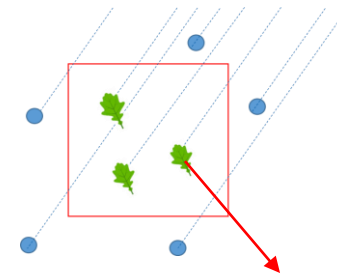
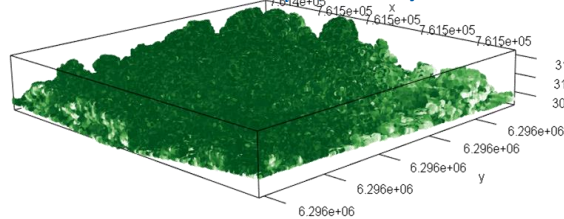


Inverse Distance Weighting



AMAPVox <https://amapvox.org/>

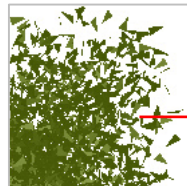
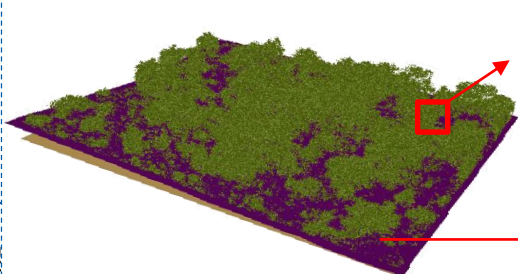
Matrice 3D de Plant Area Density (PAD)



- Extraction des pulses laser
- Calcul de la transmittance ou de l'atténuation du signal
- Conversion en PAD

Pas de différenciation entre feuilles et éléments ligneux (hypothèse: tout est considéré comme feuilles)

DART via *pytools4dart* <https://pytools4dart.gitlab.io/pytools4dart/>

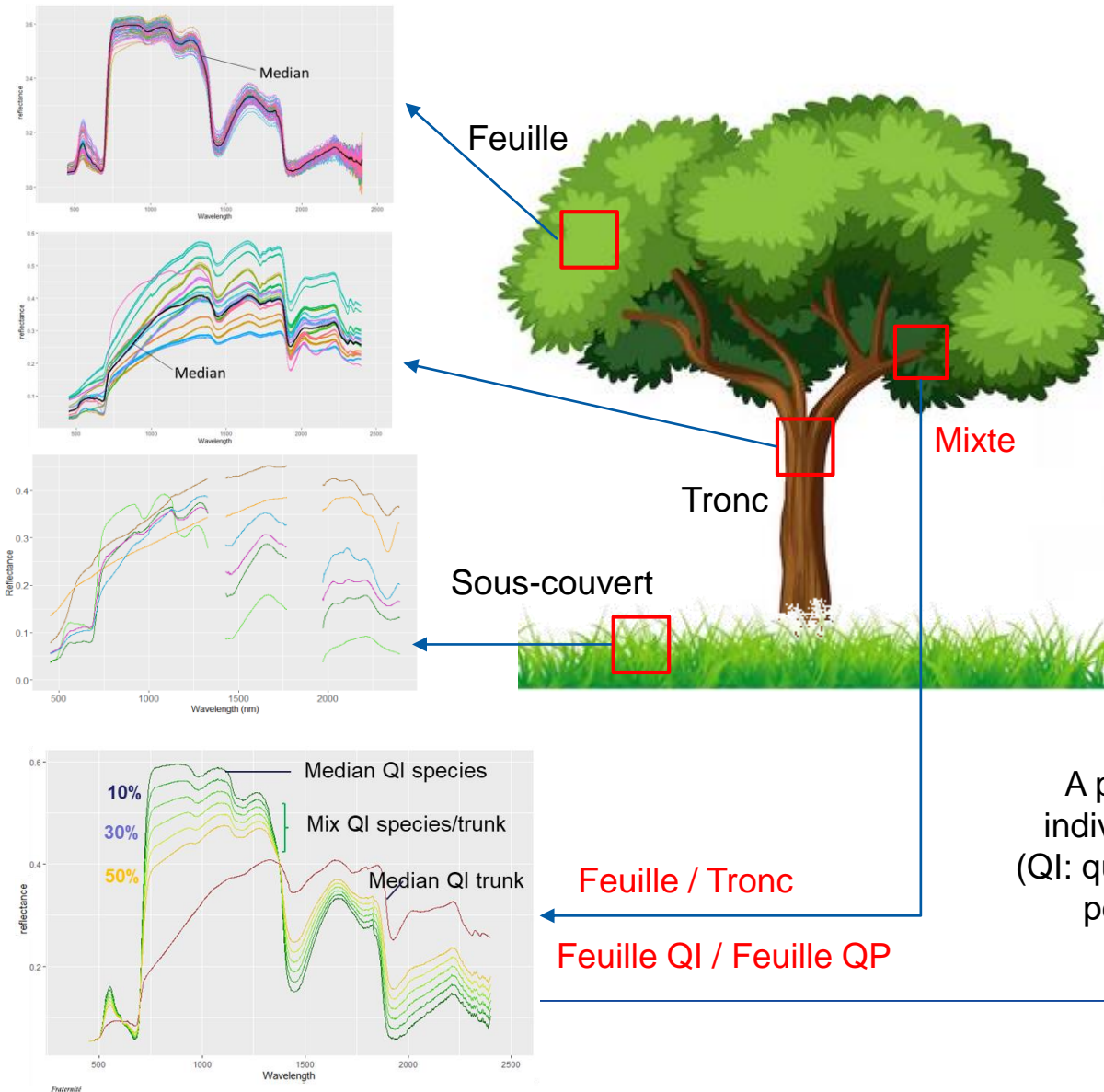


Construction de la maquette forestière 3D

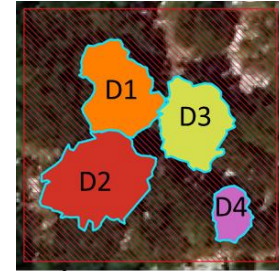
Feuilles représentées par des facettes (conversion turbide à surfacique)

MNT

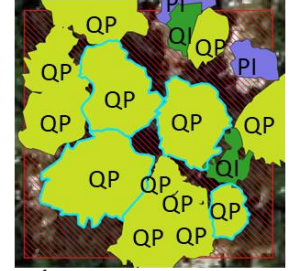
2) Paramétrisation optique



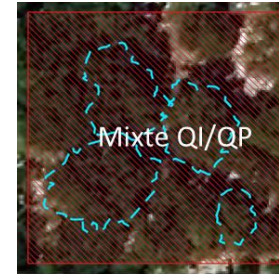
Construction de bases de données optiques composées de spectres « purs » ou « mixtes »



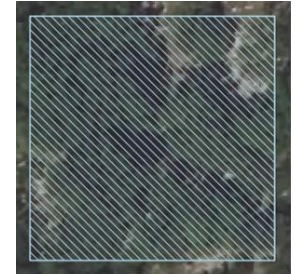
Échelle individu



Échelle espèce



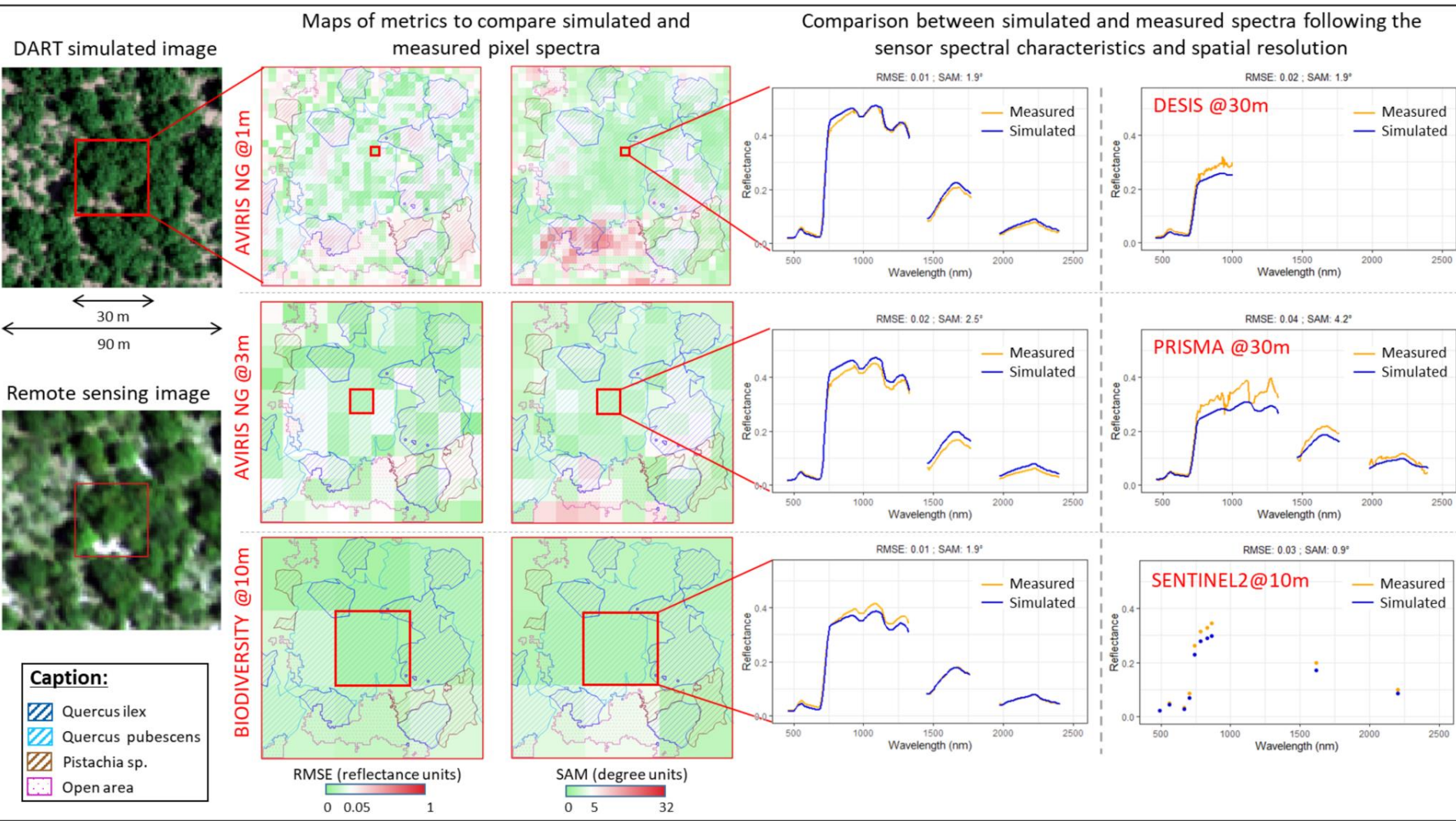
Canopée Mixte



Sous-couvert

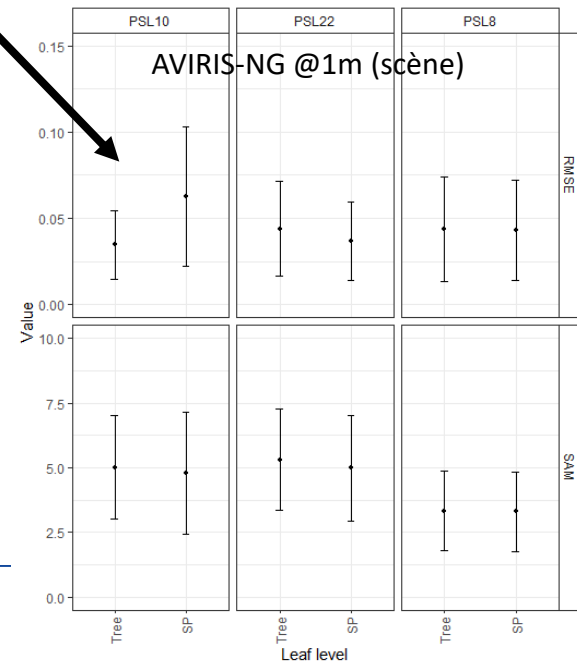
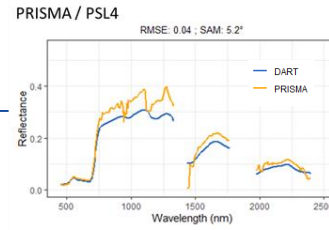
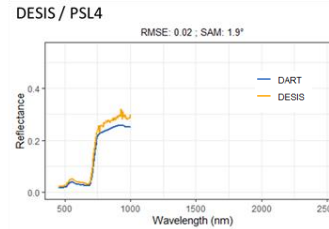
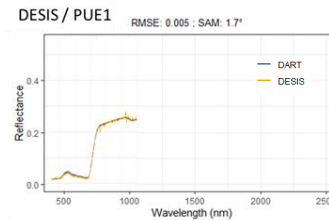
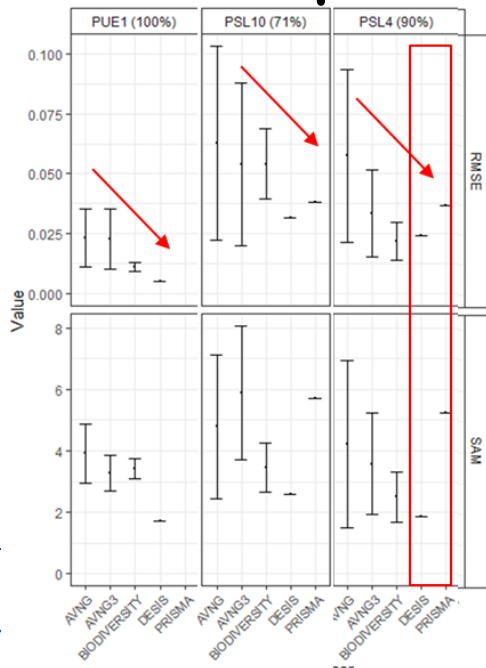
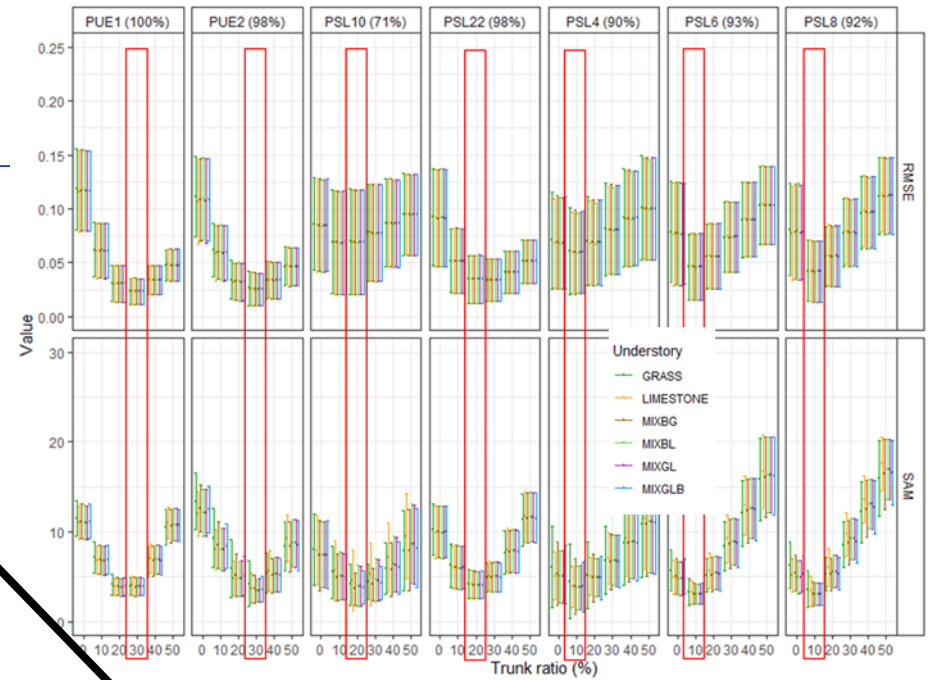
A partir de mesures prises sur certains individus (i.e. arbres), pour deux espèces (QI: quercus ilex, QP: quercus pubescens) et pour les 2 sites d'étude en juin 2021

2) Comparaison entre simulations et mesures



2) Synthèse

- **Influence du sous-couvert:** faible (taux de couverture arborée plutôt élevés)
- **Prise en compte des éléments ligneux:** mieux spectres mixtes {feuille/tronc} avec proportion de tronc entre 10 et 30%
- **Propriétés optiques foliaires:** échelle espèce suffisante (contre échelle individu)
- **Meilleurs résultats pour résolutions spatiales et spectrales moins fines, et des parcelles homogènes et denses**



Conclusions et perspectives

1) Besoin de données

- Collecte de données multi-échelles, multi-sources et multi-temporelles
- Données post-traitées et ouvertes à la communauté (cf. slide suivant)

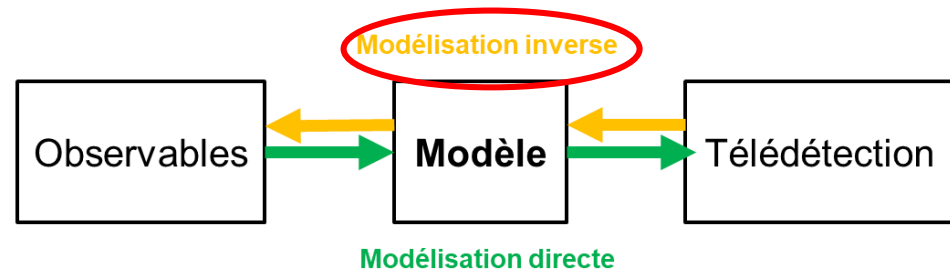
2) Besoin de vérifier l'adéquation du modèle:

- Paramétrisation géométrique: utiliser données LiDAR HD IGN (aéroporté) pour une couverture complète ?
- Paramétrisation optique: évaluer comment les résultats présentés pour une date (juin 2021) peuvent se généraliser ? Comment minimiser l'erreur pour des parcelles forestières plus hétérogènes et ouvertes ?

→ Suite...

3) Besoin de précision dans l'estimation des variables biophysiques et biochimiques

- Comparaison des modèles DART (3D) et SAIL (2D) couplé avec PROSPECT
- Influence du niveau de détail de représentation de la maquette forestière
- Bilan des performances en fonction des capteurs



Merci, des questions ?

- Projet APR TOSCA SentHyMED “ Complémentarité entre de l'imagerie multi-temporelle Sentinel-2 et des imageurs Hyperspectraux pour un meilleur suivi des traits fonctionnels de forêts MEDiterranéennes” (2021-2025)
- Site web du projet et d'accès aux données: <https://remotetree.sedoo.fr/senthymed>

Adeline et al. (2024). Multi-scale datasets for monitoring Mediterranean oak forests from optical remote sensing during the SENTHYMED/MEDOAK experiment in the north of Montpellier (France). Data in Brief, 110185.

Yebra et al. (2024) Globe-LFMC 2.0, an enhanced and updated dataset for live fuel moisture content research. Sci Data 11, 332.

Debue M. et al. (2023) Adequacy of Mediterranean forest simulations from DART radiative transfer model and UAV laser scanning data to multi- and hyperspectral images, SPIE, 3-6th September 2023, Amsterdam, Netherlands, oral and proceeding

