

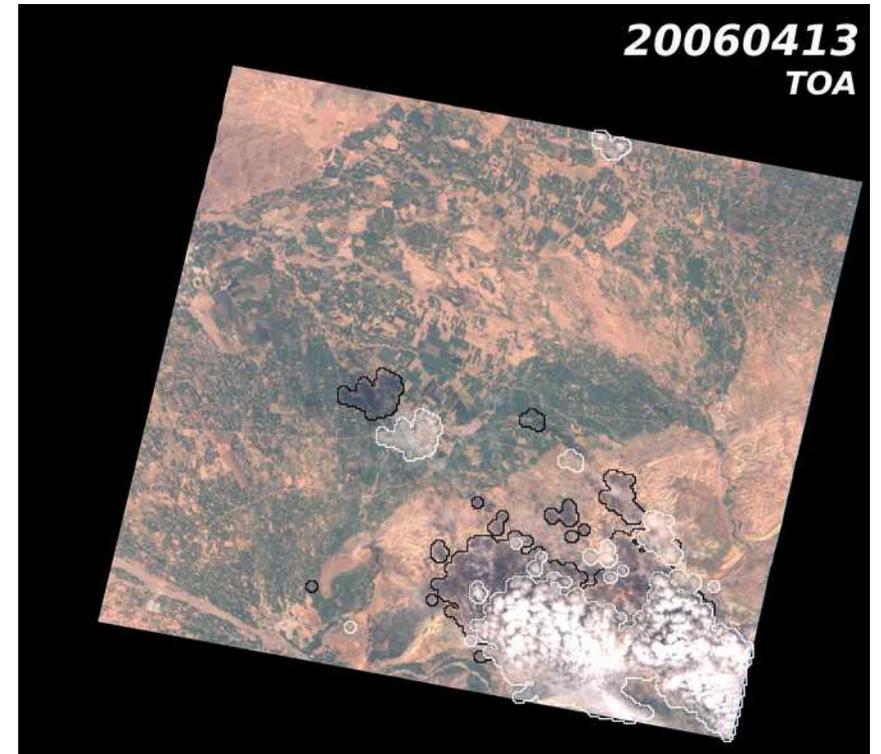
Les produits passés et futurs de THEIA, sur les terres, basés sur Sentinel-2

***La puissance des séries temporelles***  
*avec acquisitions globales et systématiques, libres et gratuites*

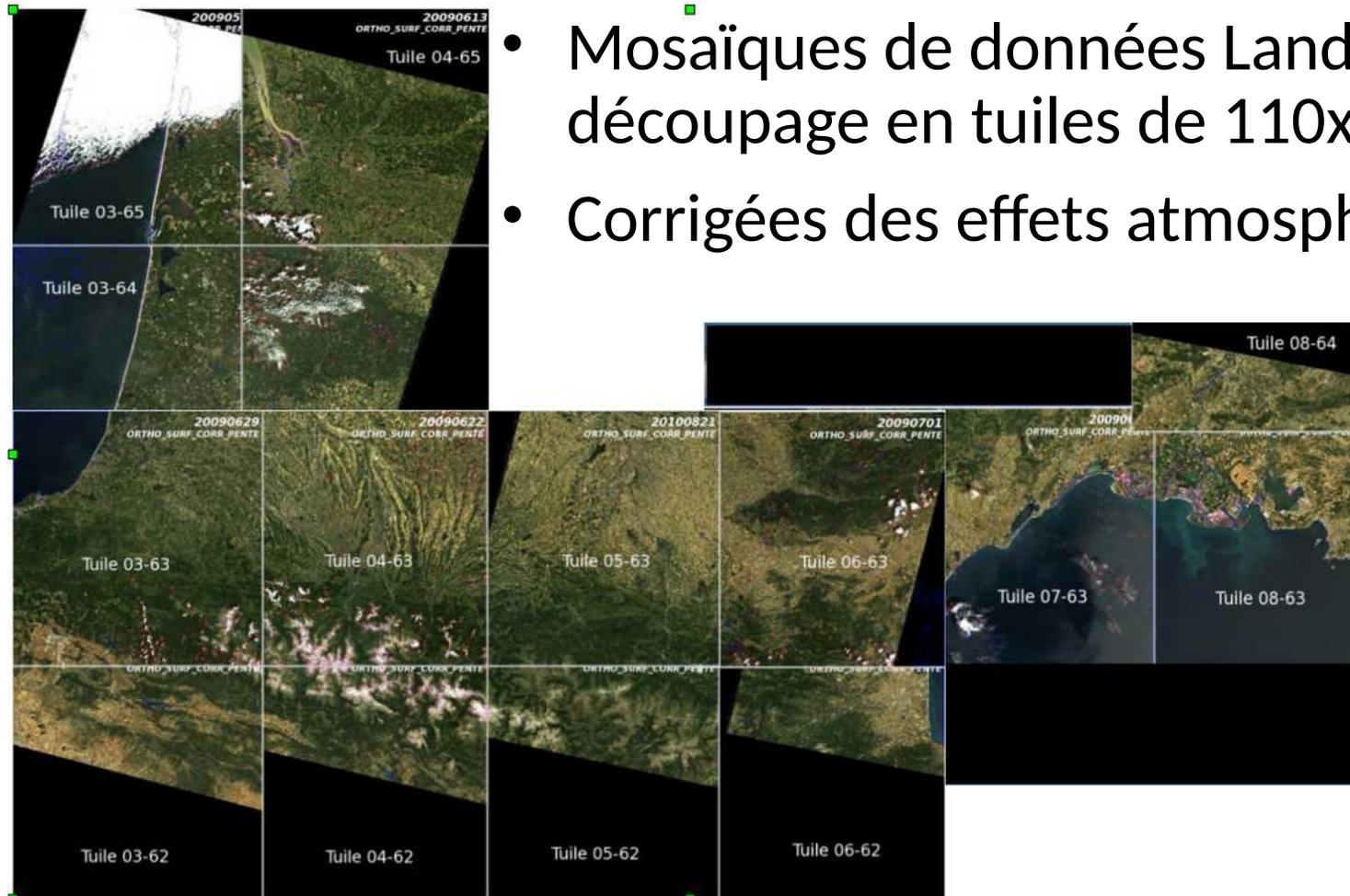
Olivier Hagolle et de nombreux collègues au CESBIO et  
au CNES

# 20 ans de données Sentinel-2(-like) !

Formosat-2 : 2004-2012



# 20 ans de données Sentinel-2 (-like) !

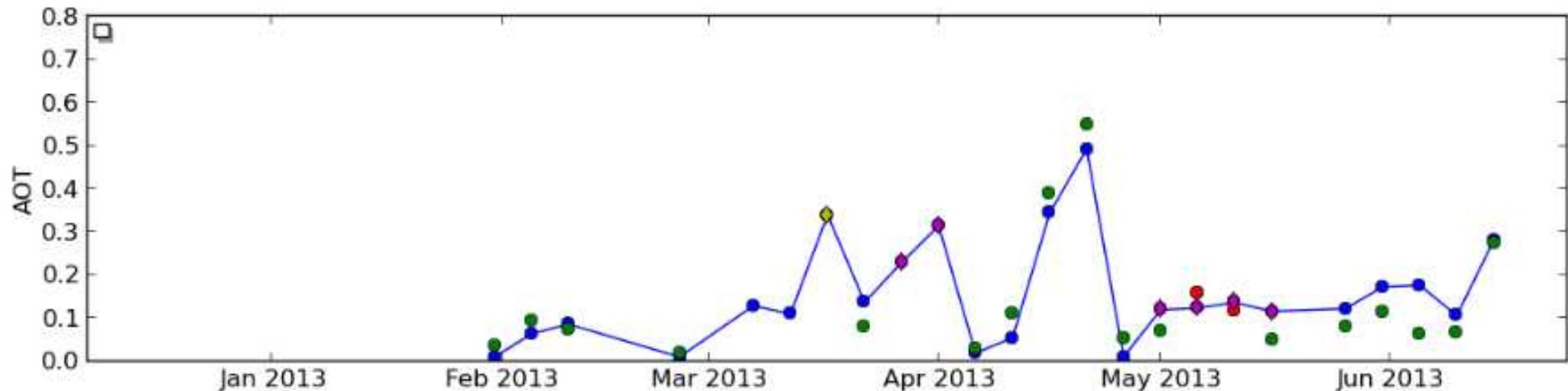
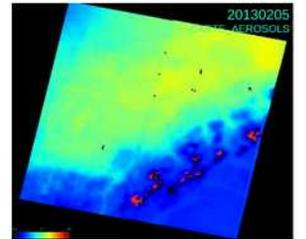
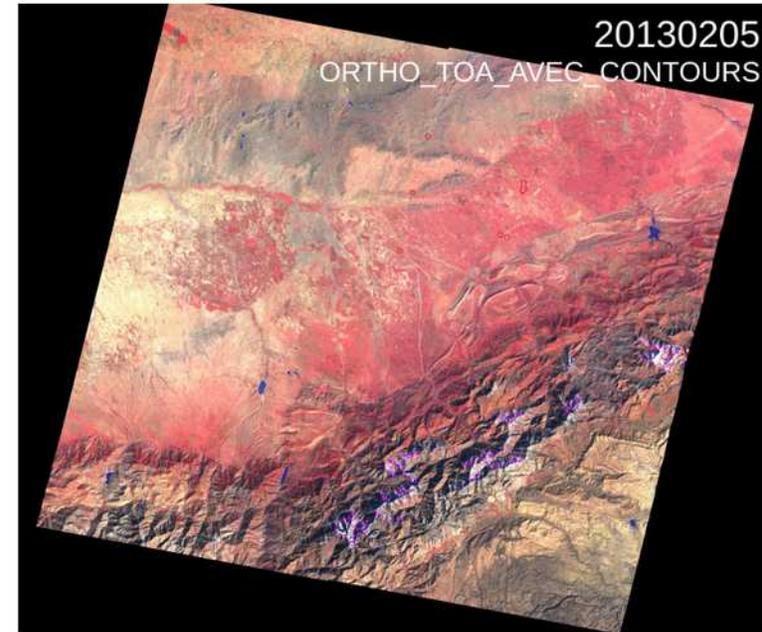


- Mosaiques de données Landsat 5, avec découpage en tuiles de 110x100 km, en 2011
- Corrigées des effets atmosphériques

# 20 ans de Sentinel-2 !

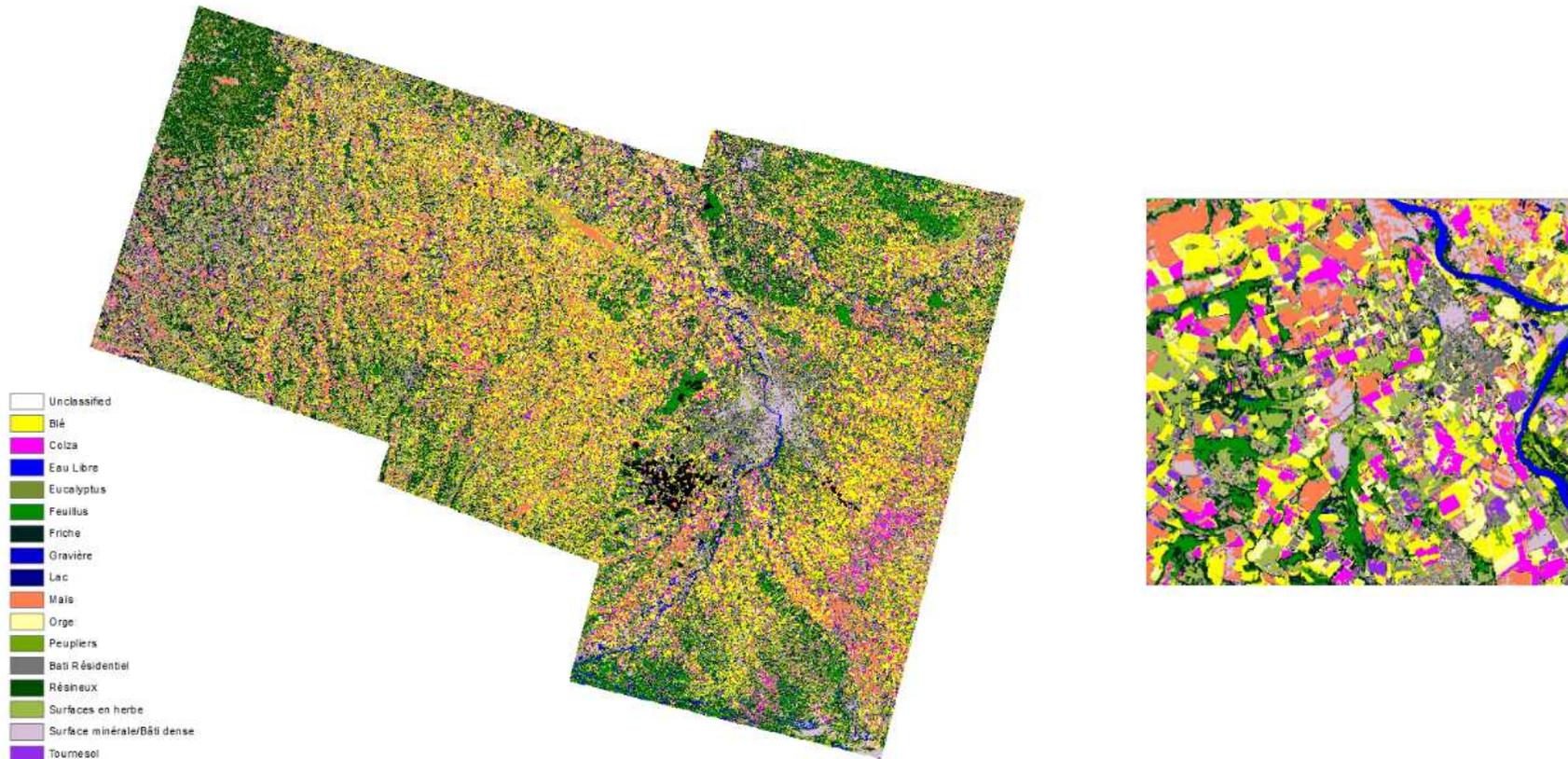
Estimation de l'épaisseur optique des aérosols

SPOT4 (Take5) 2013, SPOT5 (Take5) 2015



# 20 ans de données Sentinel-2(-like)

Premiers tests de production de cartes d'occupation des sols automatisées, par apprentissage automatique (J.Inglada et al, 2013).

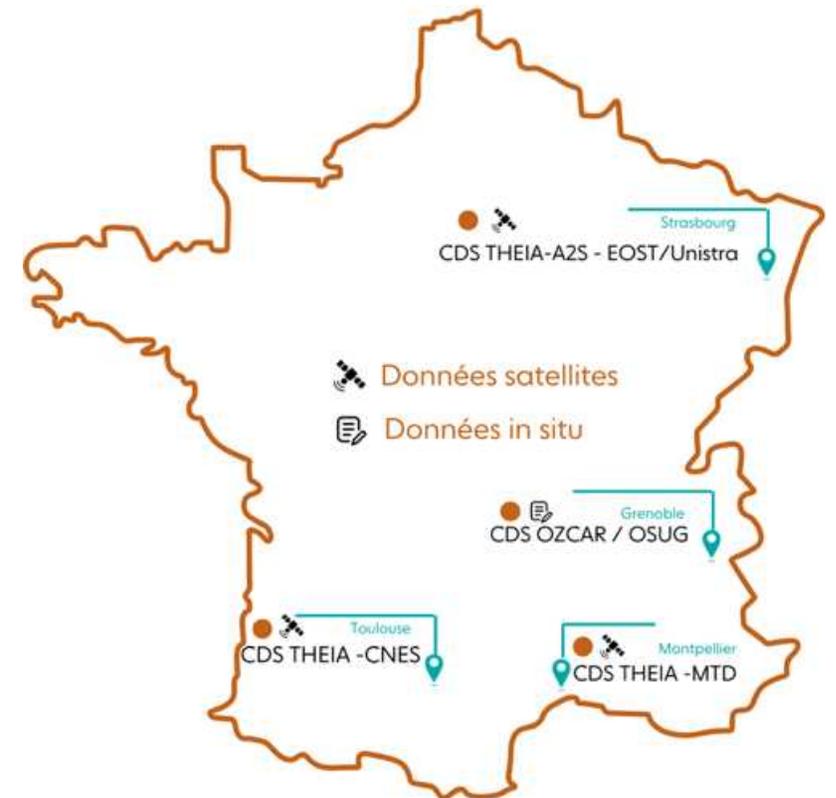
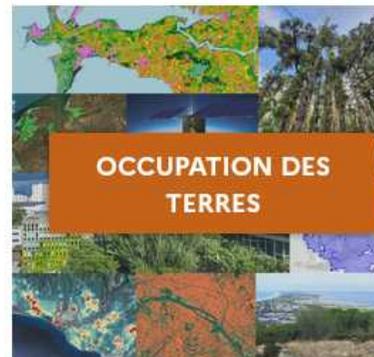
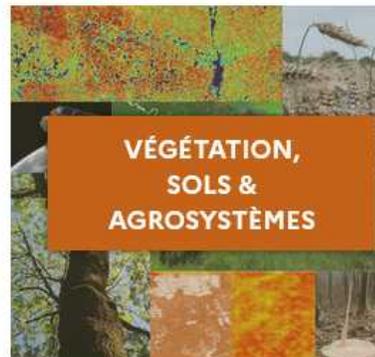
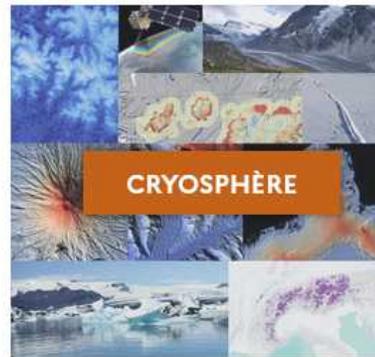
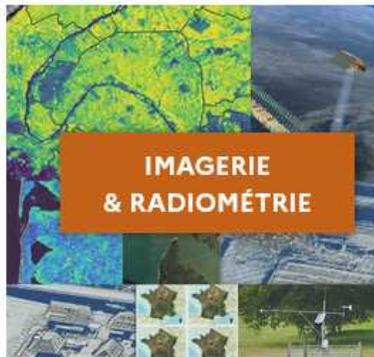




# THEIA



- Travaux réalisés dans le cadre du « pôle Thématique surface continentales » devenu THEIA
- 11 organismes publics



# Catalogue des produits THEIA

<https://catalogue.theia.data-terra.org/>

The screenshot displays the THEIA Data Terra Catalogue website. At the top, the logo 'Theia Data Terra' is visible on the left, and navigation links for 'PÔLE THEIA', 'DONNÉES & SERVICES', 'APPLICATIONS', 'RESSOURCES', and 'ACTUALITÉS' are on the right. The main content area is titled 'Catalogue' and shows '16 results' for 'Catalog Items'. A search filter is set to 'Relevance'. On the left, a sidebar lists 'Sources' (including CDOS THEIA-A2S, CDS THEIA-CNES, etc.) and 'Platforms' (including Land-based, Space-based, and Earth Observation Satellites like Sentinel-2, Landsat, and SPOT). The main grid contains 16 product cards, each with a satellite icon, a title, and a provider logo (cnes or cirad). The products include:

- Theia Sentinel-2 Surface Water Yearly Synthesis - Level-3B
- Theia Sentinel-2 Surface Water - Level-2B
- Global Coastal Bathymetry from Sentinel-2 and GEBCO
- Theia Sentinel-2 Snow Cover Yearly Synthesis - Level-3B
- Theia Sentinel-2 Surface Water Monthly Synthesis - Level-3B
- Sentinel-2 L1C tiles
- Snow SENTINEL2 L2B
- WaterQual SENTINEL2 L2B
- SENTINEL2 L3A
- Theia Sentinel-2 Snow Cover - Level-2B
- SENTINEL2 L2A
- Reunion island - 2018, Land cover map (Pleiades) - 0.5m
- Antananarivo - 2017 Land cover map
- Occupation du sol - Mayotte - Carte de 2023
- Reunion island - 2017, Land cover map (Pleiades)
- Antananarivo - 2022 Land cover map



---

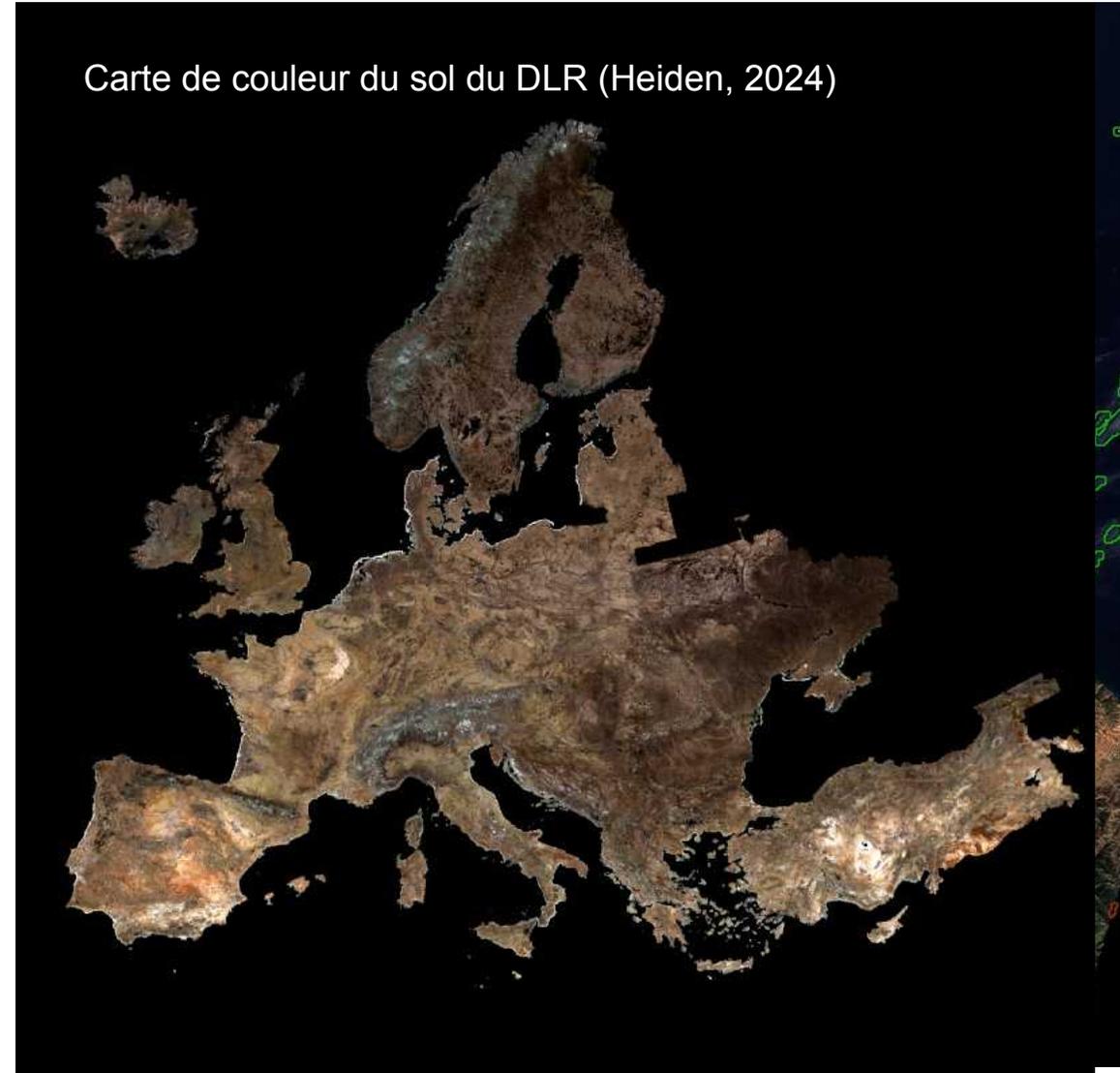
# Réfectances de surface

# Réflectances de surface

ARD : Analysis Ready Data

- Fourniture de données L2A après corrections atmosphériques et détection nuageuse
- Chaîne MAJA, développée depuis 2008
- Utilisée dans les centres suivants
  - THEIA (systématique) et GEODES (demande)
  - DLR
  - EEA (couverture de neige)
  - Norway Mapping Agency
  - Agence spatiale Roumaine
- MAJA est open source :
  - <https://www.cesbio.cnrs.fr/maja/>
- Données produites par le CNES pour THEIA :
  - <https://geodes-portal.cnes.fr>

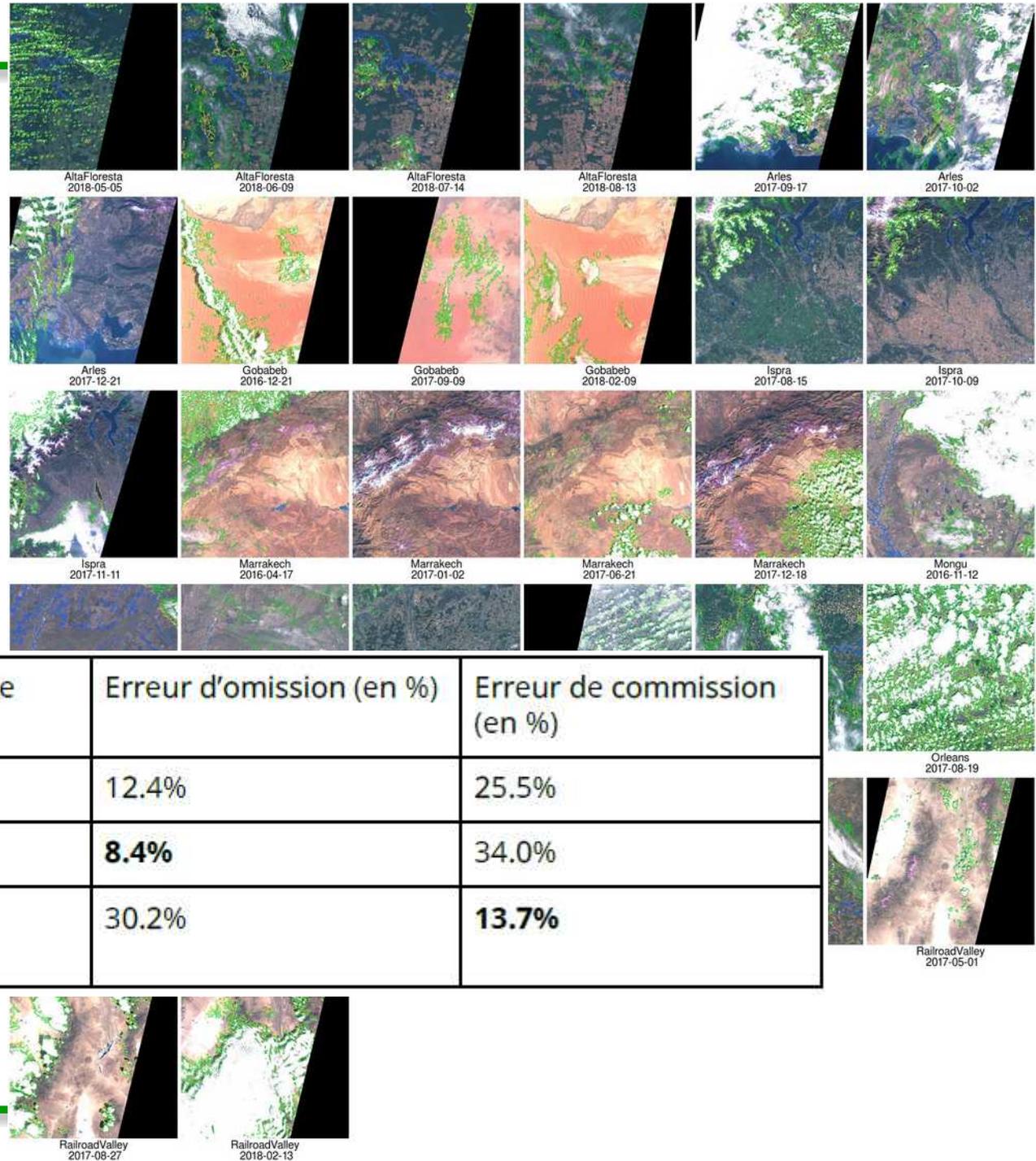
Carte de couleur du sol du DLR (Heiden, 2024)



# Produits L2A, validation des masques de nuages

Comparaison à des images classifiées par un expert (32 images entières, « CESBIO dataset »)

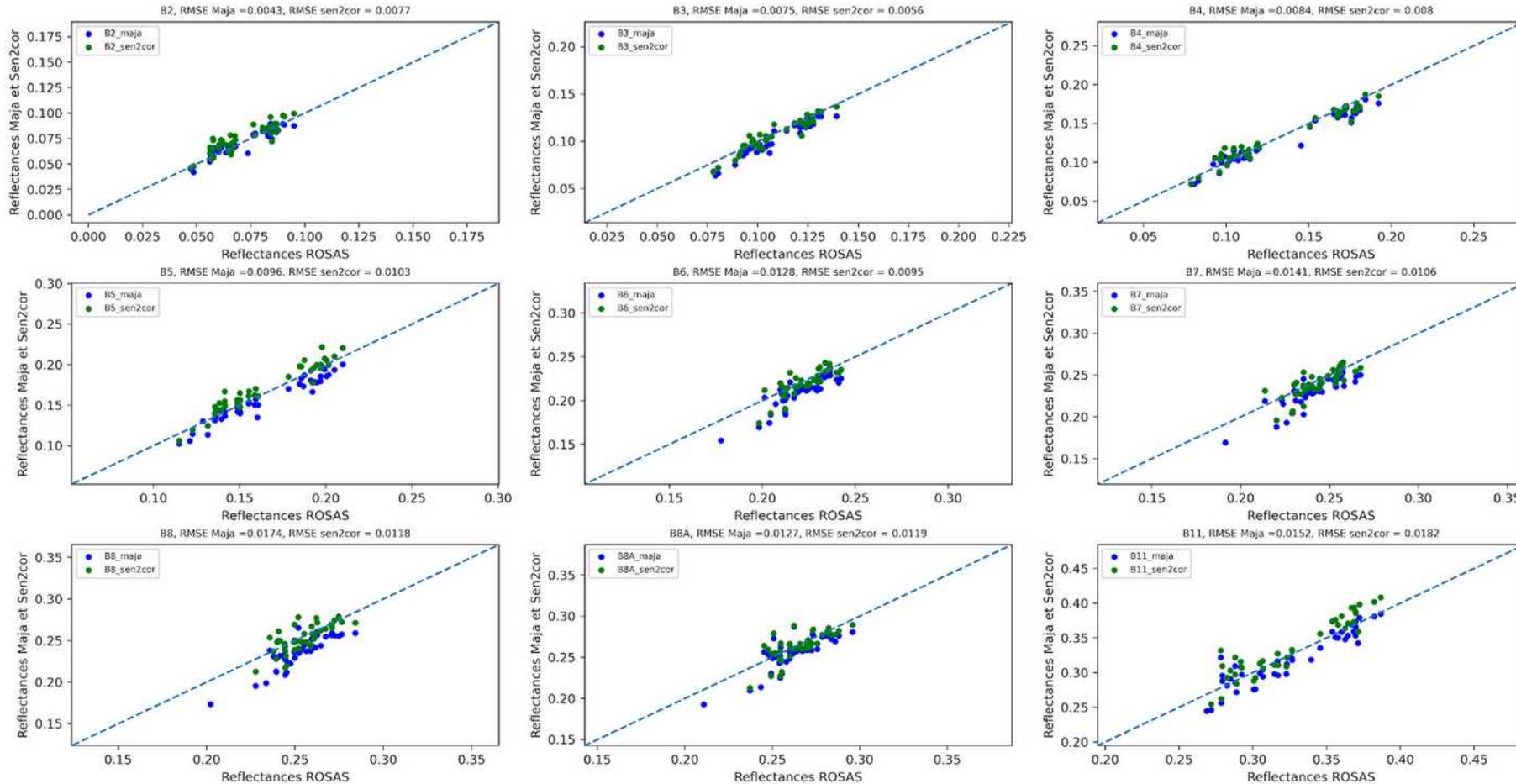
Desrutins, Coustance (In prep)



	Accuracy	F1-score	Erreur d'omission (en %)	Erreur de commission (en %)
Maja v4.9 (érodé)	<b>0.93</b>	<b>0.78</b>	12.4%	25.5%
Maja v4.9 (original)	<b>0.92</b>	<b>0.74</b>	<b>8.4%</b>	34.0%
Sen2cor v2.12 (original)	0.92	0.75	30.2%	<b>13.7%</b>

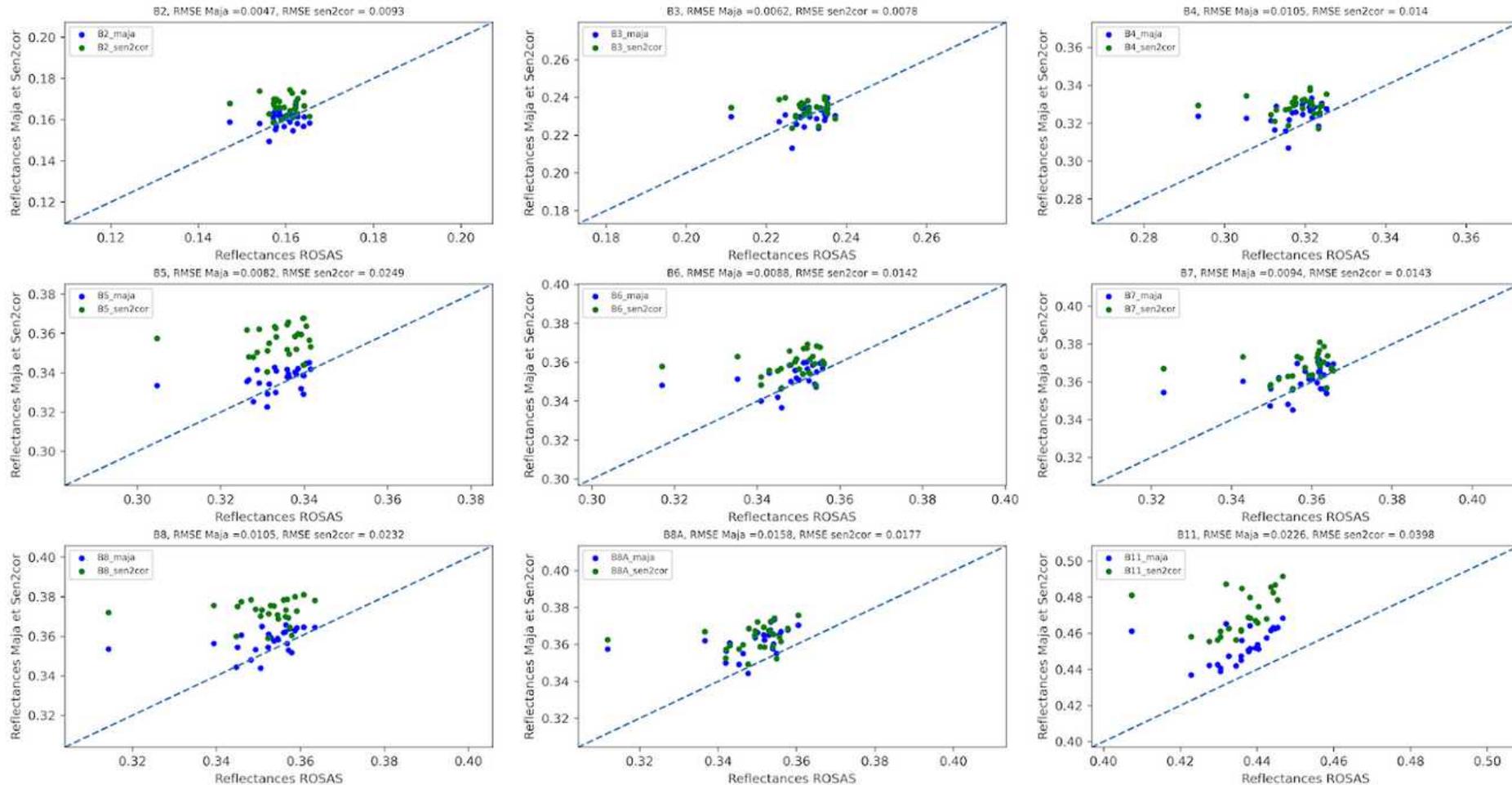
# Produits L2A, validation des réflectances de surface

La Crau, Station ROSAS du CNES (H. Desrutins, (Magellium), S. Coustance (CNES))

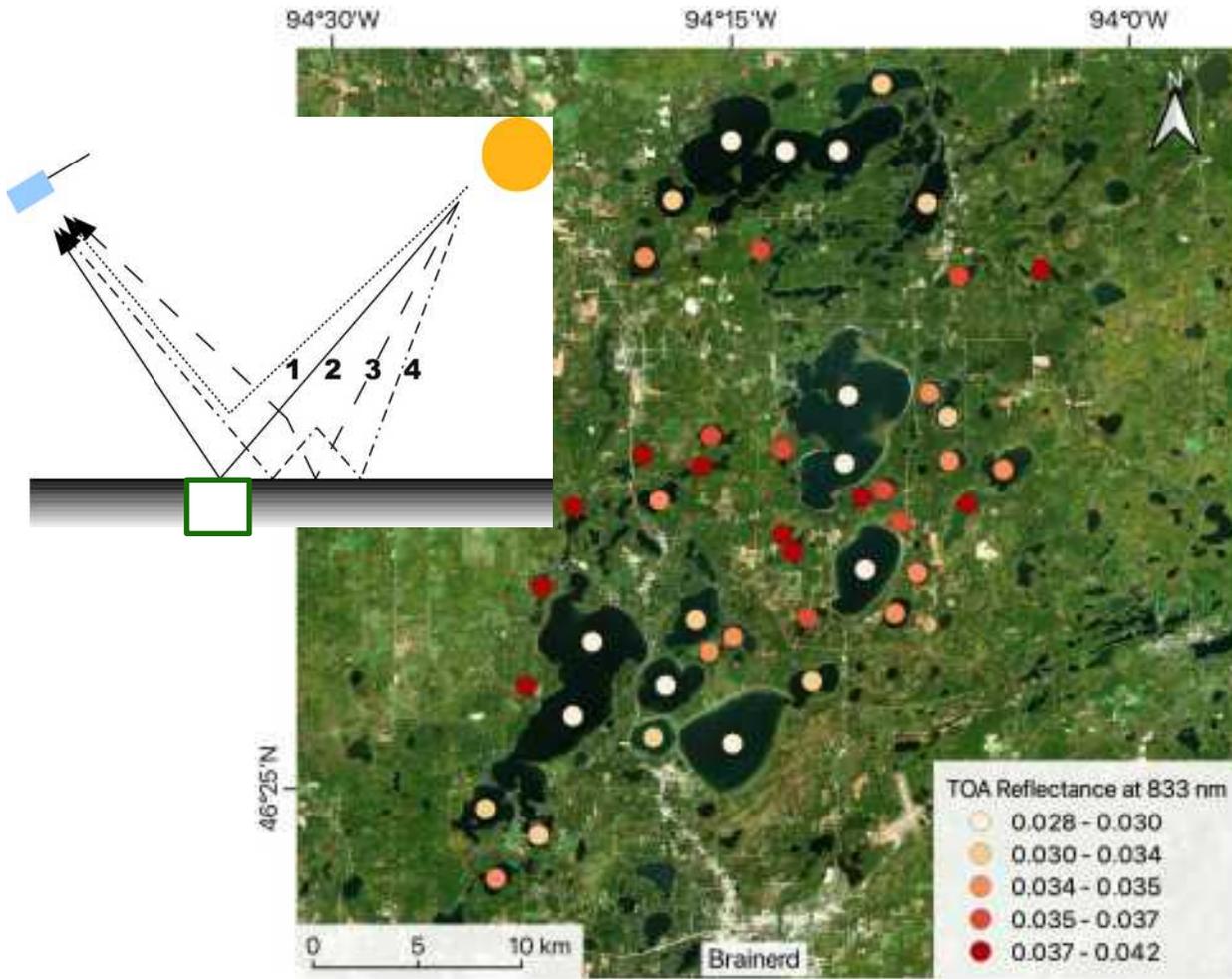


# Produits L2A, validation des réflectances de surface

Gobabeb, Station ROSAS du CNES (H. Desrutins, (Magellium), S. Coustance (CNES))

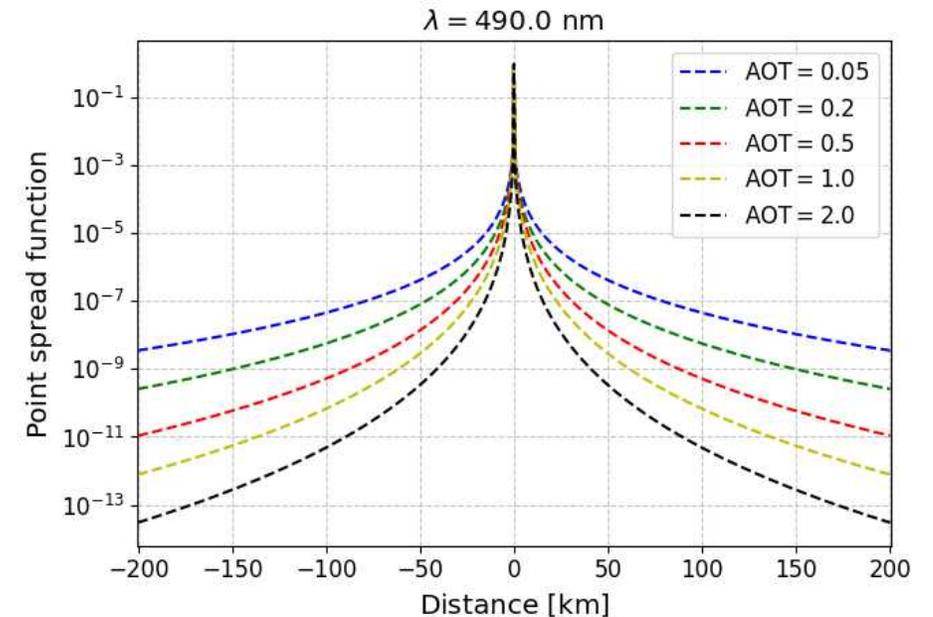


# Recherche en cours : effets d'environnement

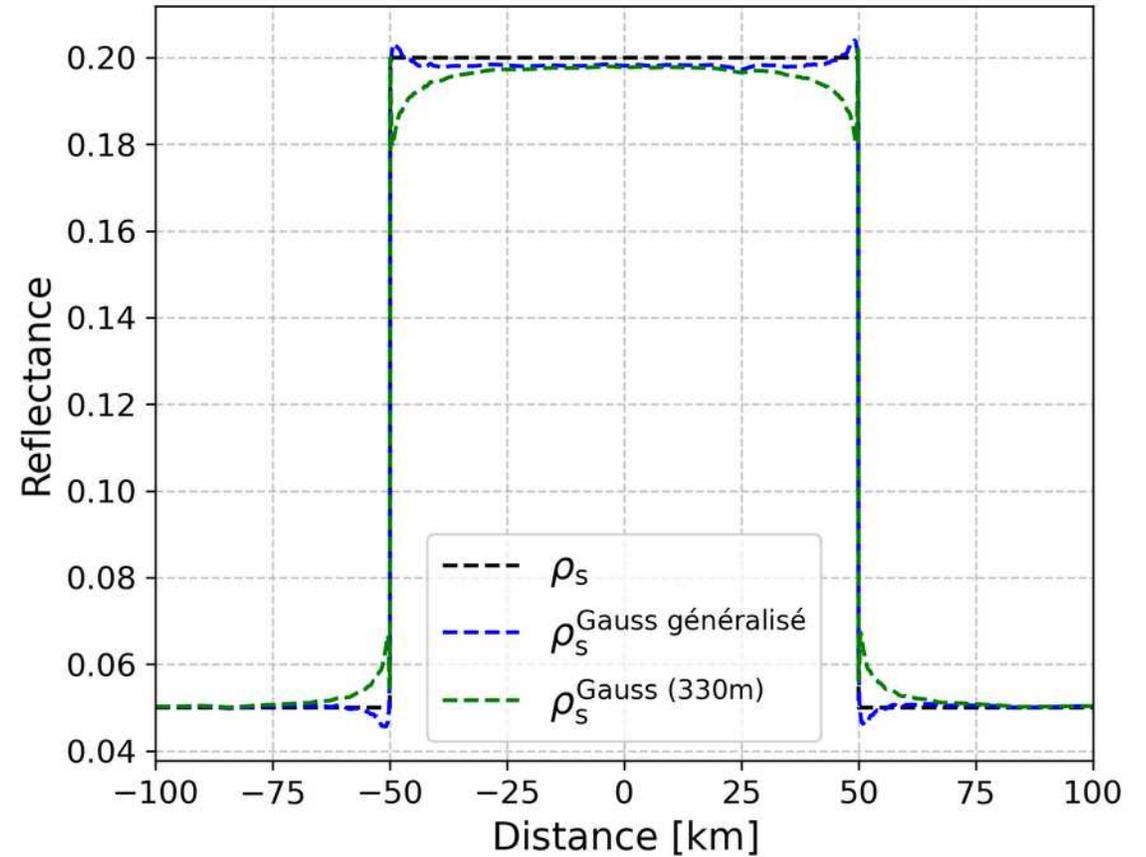
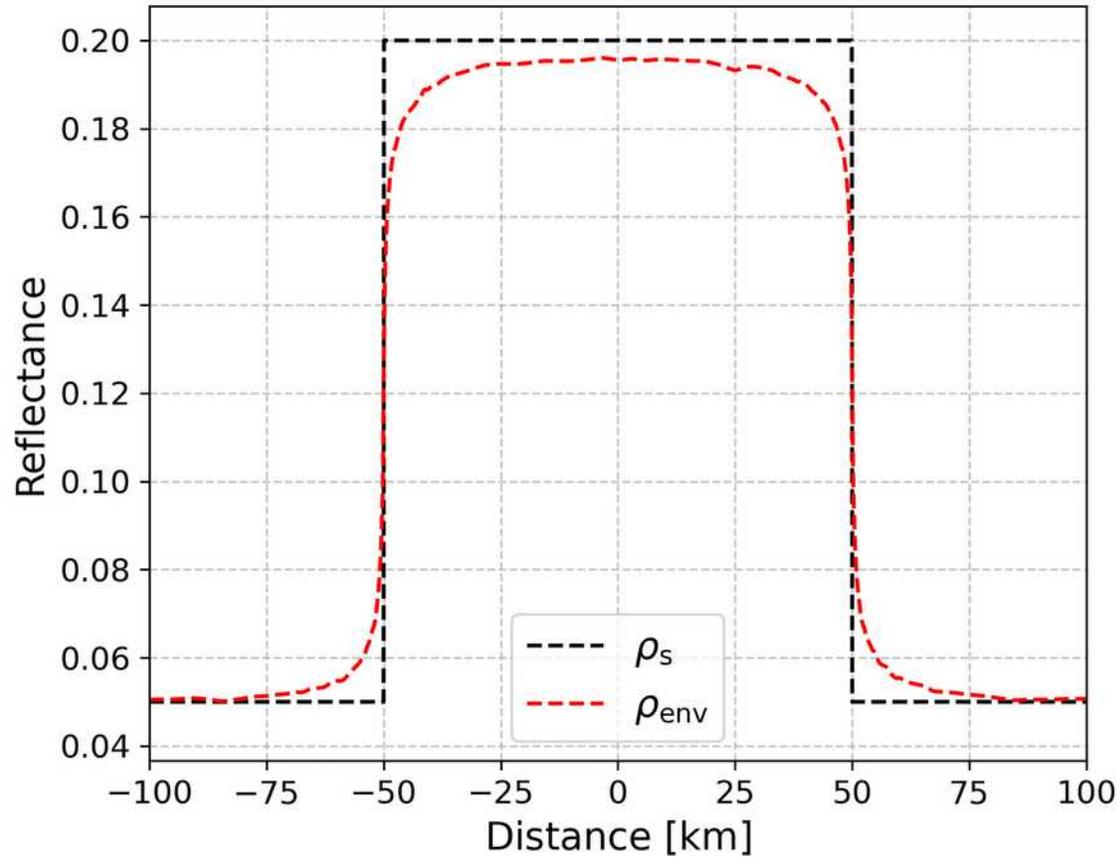


$$\rho_{TOA} = \underbrace{\rho_{atm}}_1 + \frac{T^\downarrow}{1 - \underbrace{\rho_{env} s}_4} (\underbrace{\rho_s T_{dir}^\uparrow}_2 + \underbrace{\rho_{env} T_{dif}^\uparrow}_3)$$

- Simulations avec le code SMART-G, et le support d'Hygeos
- Transfert radiatif sur GPU ; des milliards de photons par minute
  - Post doc de Kevin Walcarius (CESBIO/CNES)



# Résultats sur images artificielles



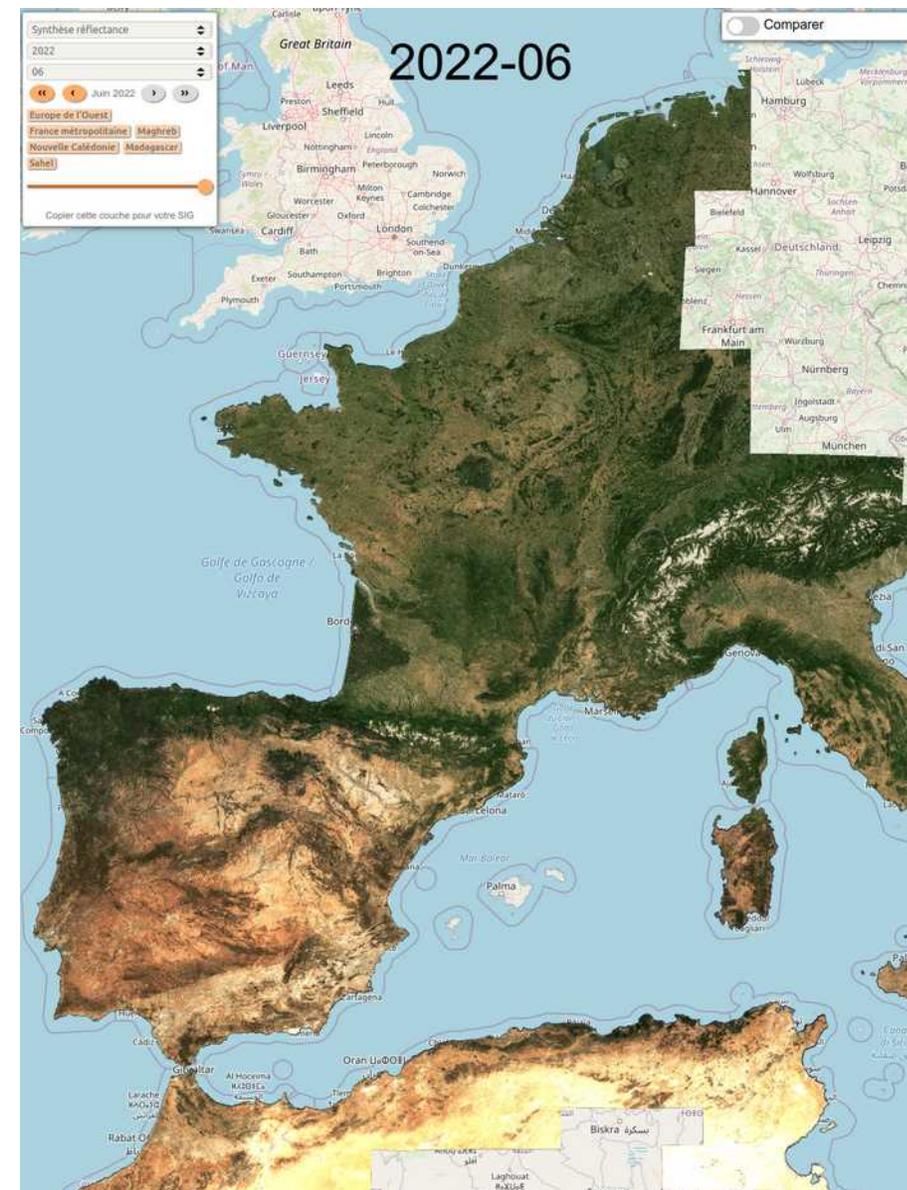
# Produits ARD

## Niveau 3 : synthèses mensuelles sans nuages

- Chaîne WASP
  - Moyenne pondérée des produits de niveau 2A sur un mois
  - Avec correction simple des effets directionnels
- Production interrompue depuis Septembre 2024
  - Nouveau système de production du CNES Hespérides
  - Reprise au cours de l'été 2025
  - Accès : <https://geodes-portal.cnes.fr>

GEODES

Theia  
Data Terra



---

# Super résolution et fusion de données

- Des méthodes d'apprentissage permettent :
  - D'améliorer la résolution apparente des images :
    - Super-résolution
      - On montre à un réseau profond de neurones des images à 10 et 20m (S2) et à 5m de résolution (VEN $\mu$ S) simultanées du même endroit, et il apprend à généraliser
      - Certains vont jusqu'à amener des données Sentinel-2 de 10 à 1m de résolution
      - Outil S2\_Superrésolution (Julien Michel)
        - [https://github.com/Evoland-Land-Monitoring-Evolution/sentinel2\\_superresolution](https://github.com/Evoland-Land-Monitoring-Evolution/sentinel2_superresolution)
    - Bientôt installé comme **traitement à la demande** dans 
- De fusionner des séries temporelles de plusieurs capteurs

Tuile 31TCG, 08.08.2020, bandes B5, B6, B7 zoomées à 5m par filtre bicubique



Tuile 31TCG, 08.08.2020, bandes B5, B6, B7 zoomées à 5m par super-résolution



# Super résolution (attention aux méthodes « génératives »)



S2



S2-1m



Image THR

Méthode S2DR3 : Yosef Akhtman, S2 à 1 m ! Les données sont réalistes, mais... fausses

---

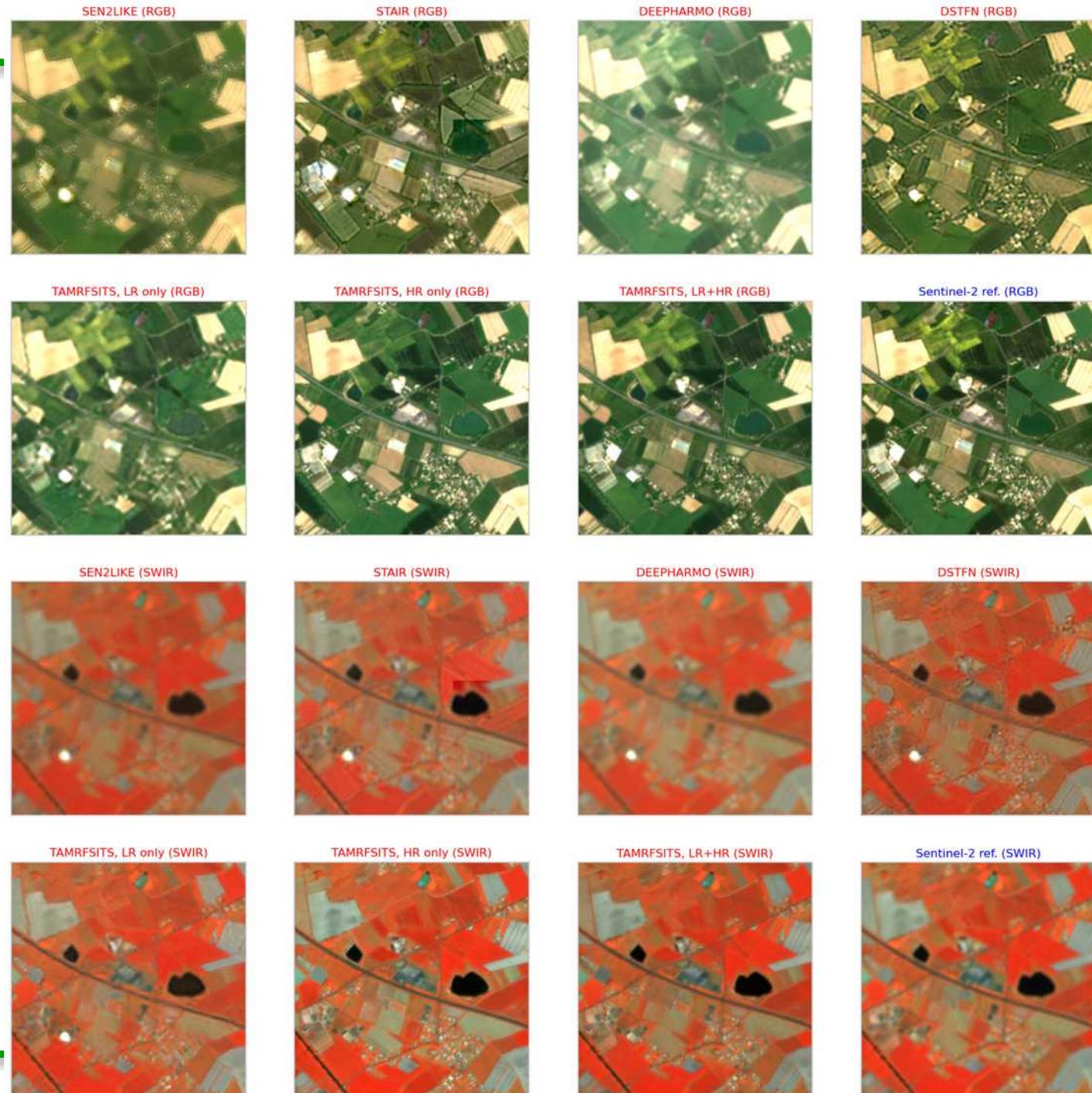
# Super résolution et fusion de données

- Des méthodes d'apprentissage permettent :
  - D'améliorer la résolution apparente des images :
  - De fusionner des séries temporelles de plusieurs capteurs
    - Par exemple : Landsat (30m, 8j) et Sentinel-2 (10-20m, 5j)
      - Ou bientôt Sentinel-2 et Sentinel-1, TRISHNA, MODIS...
      - Ou pour produire directement des variables biophysiques à partir de ces séries
        - Projet ANITI/RELEO au CESBIO

GEODES

# Fusion de données

- Thèse de Julien Michel
  - Landsat (30m, 8j)
  - Sentinel-2 (10-20m, 5j)
  - Objectif :
    - Générer les dates qu'on veut à 10m
  - Méthode
    - Transformers pour l'interpolation temporelle
  - Apprentissage une fois pour toute
    - Méthode auto-supervisée
- Ici, génération de la donnée S2 pour un jour où L8 est disponible



# Fusion de données

- Thèse de Julien Michel
  - Landsat (30m, 8j)
  - Sentinel-2 (10-20m, 5j)
  - Objectif :
    - Générer les dates qu'on veut à 10m
  - Méthode
    - Transformers pour l'interpolation temporelle
    - Super-résolution pour aller à 10 m
  - Apprentissage une fois pour toutes
    - Méthode auto-supervisée
- Ici, fourniture de données tous les 10j à 10m
- La production de la France pour un an demanderait 50h sur 1 carte GPU.

R, G, B



# Fusion de données

- Thèse de Julien Michel
  - Landsat (30m, 8j)
  - Sentinel-2 (10-20m, 5j)
  - Objectif :
    - Générer les dates qu'on veut à 10m
  - Méthode
    - Transformers pour l'interpolation temporelle
    - Super-résolution pour aller à 10 m
  - Apprentissage une fois pour toutes
    - Méthode auto-supervisée
- Ici, fourniture de données tous les 10j à 10m
- La production de la France pour un an demanderait 50h sur 1 carte GPU.



---

# Produits en aval

# Applications : occupation des sols

Produit OSO (THEIA/CNES), fourni chaque année (Thierion, Inglada et al (CESBIO))

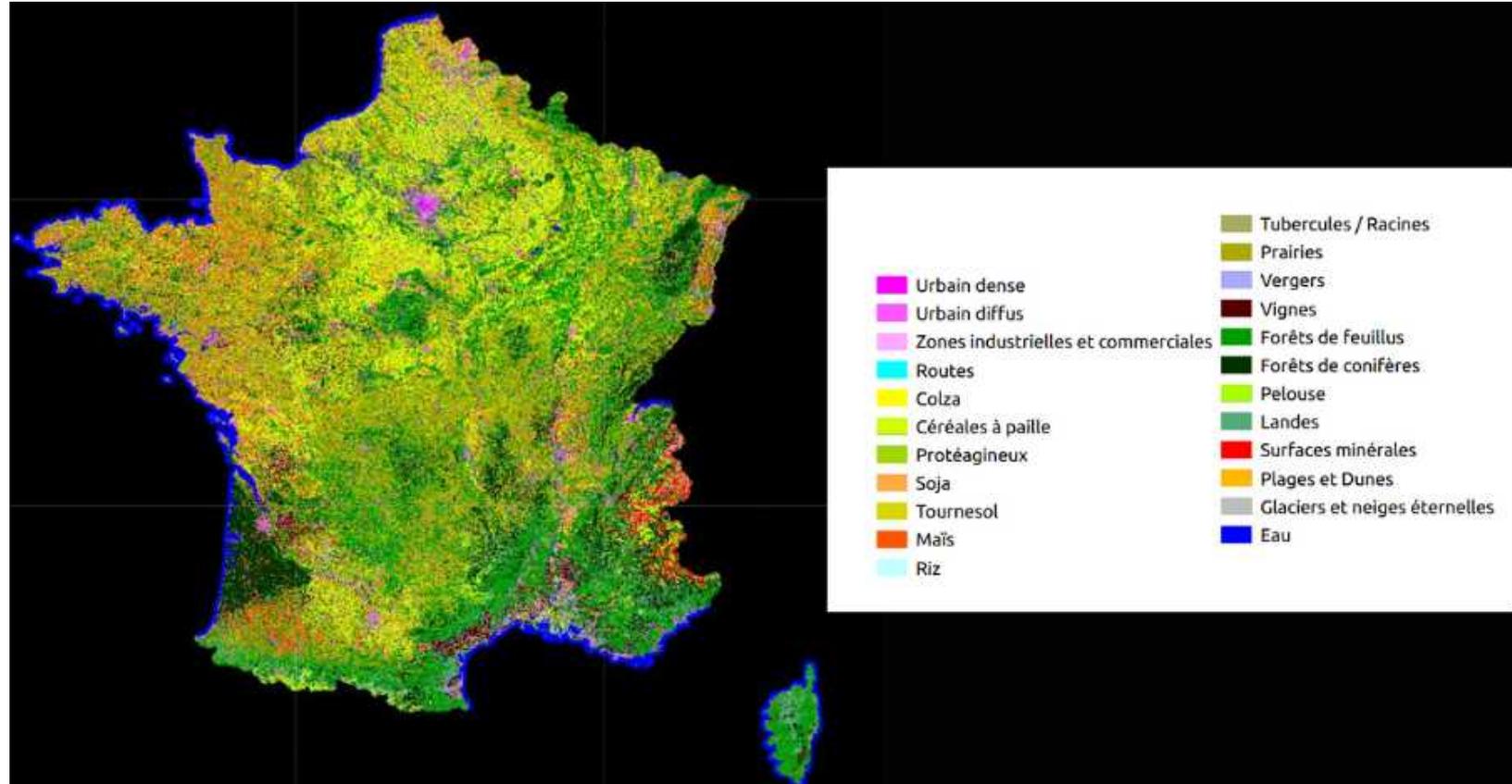
- Entrée : une année de données Sentinel-2 (synthèses bi-mensuelles avec interpolation)
- Sortie : carte annuelle d'occupation des sols à 20 m (23 classes), depuis 2017

Apprentissage (Random Forest)

- RPG (déclarations agriculteurs)
- BD IGN

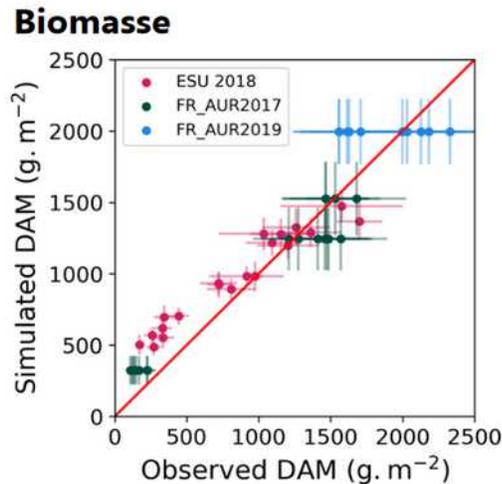
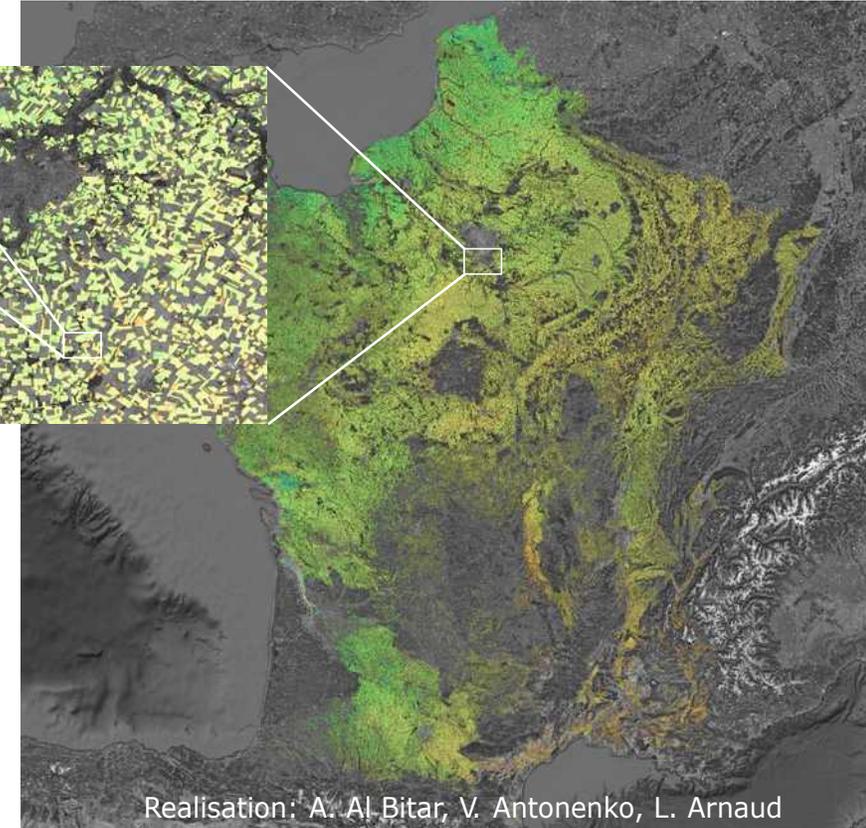
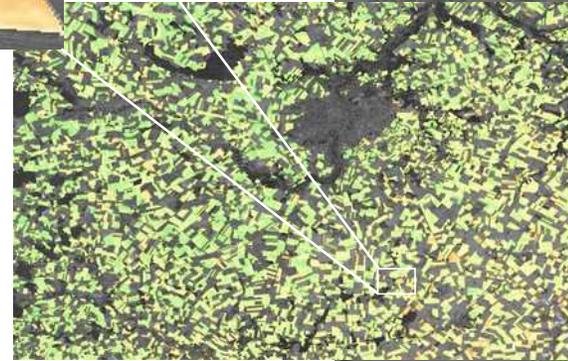
Données disponibles sur

GEODES



# Applications : biomasse végétale

- Sentinel-2 sur la saison culturale
- Comparaison d'estimation de biomasse aérienne sèche par rapport à des mesures in-situ.
- Inversion de la biomasse par modélisation (SAIL puis SAFY-CO2)
- Besoin d'une carte d'occupation des sols en entrée
- Données proposées à 



Dry above ground biomass at harvest for winter wheat fields in 2019

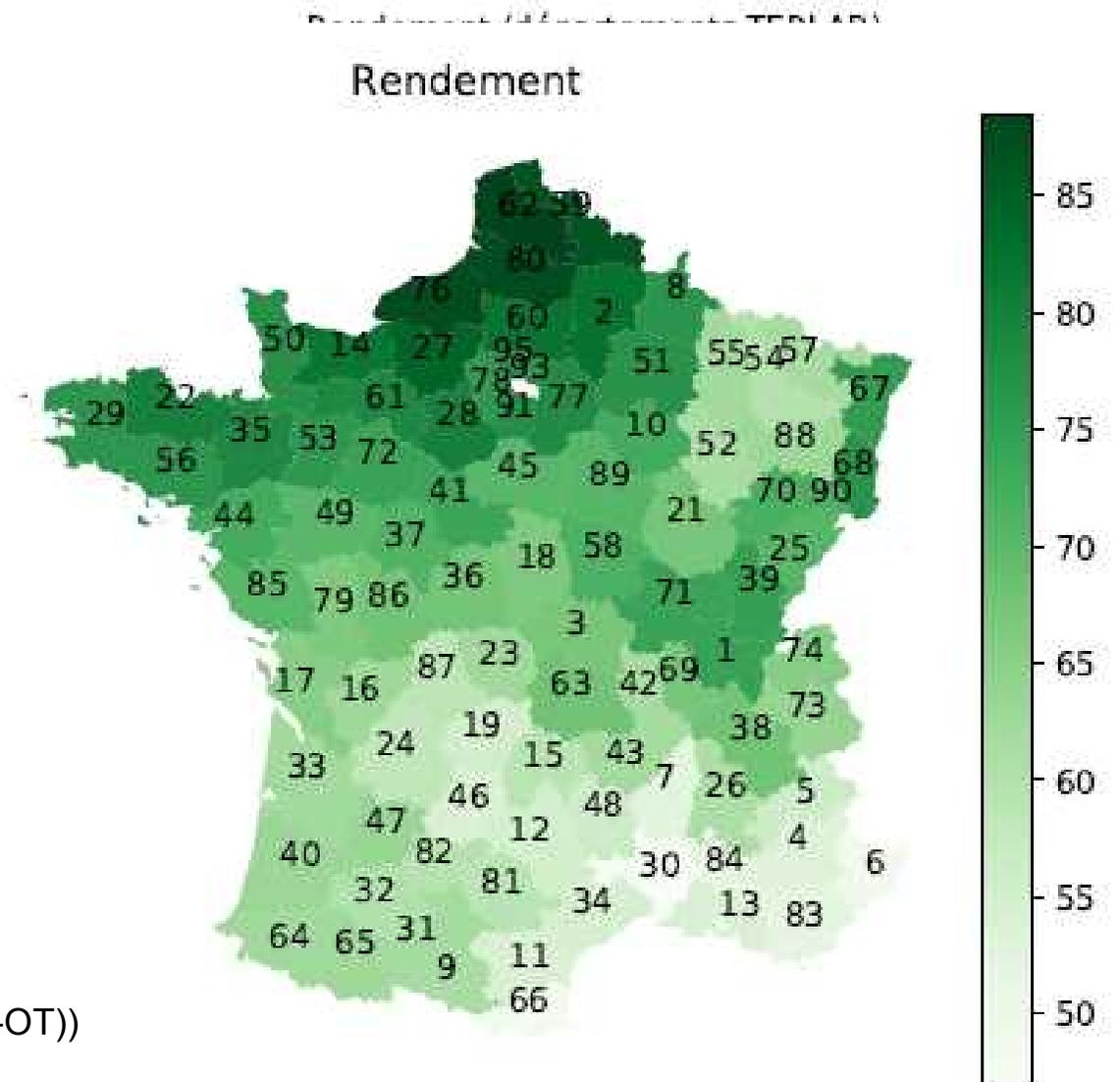
10m resolution  
0.6 billion pixels  
Daily estimates

In less than 1 day on the  supercomputer

Realisation: A. Al Bitar, V. Antonenko, L. Arnaud

# Applications : Rendement du blé

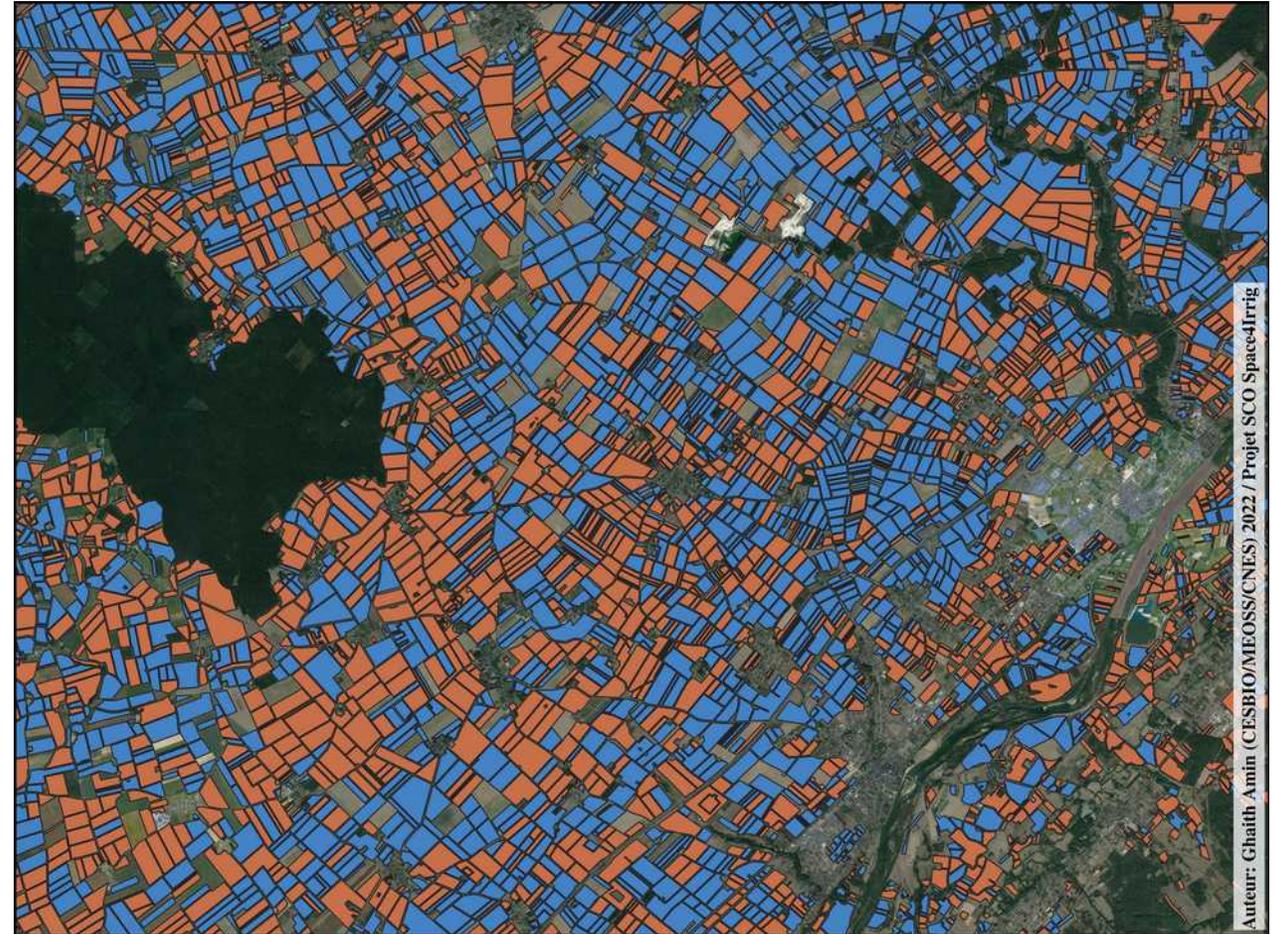
- Sentinel-2 : synthèses mensuelles
- Calcul par apprentissage en utilisant les données de l'enquête Terres-Labourables (TerLab) pour l'apprentissage (ici 2017)
- Validation avec une partie de TerLab, ou avec les statistiques agricoles au niveau du département (Agreste)
- Transféré au ministère de l'agriculture via le labo-OT au CNES



(Inglada et al (CESBIO), O. Queyrut (CNES Labo-OT))

# Applications : Détection des cultures irriguées

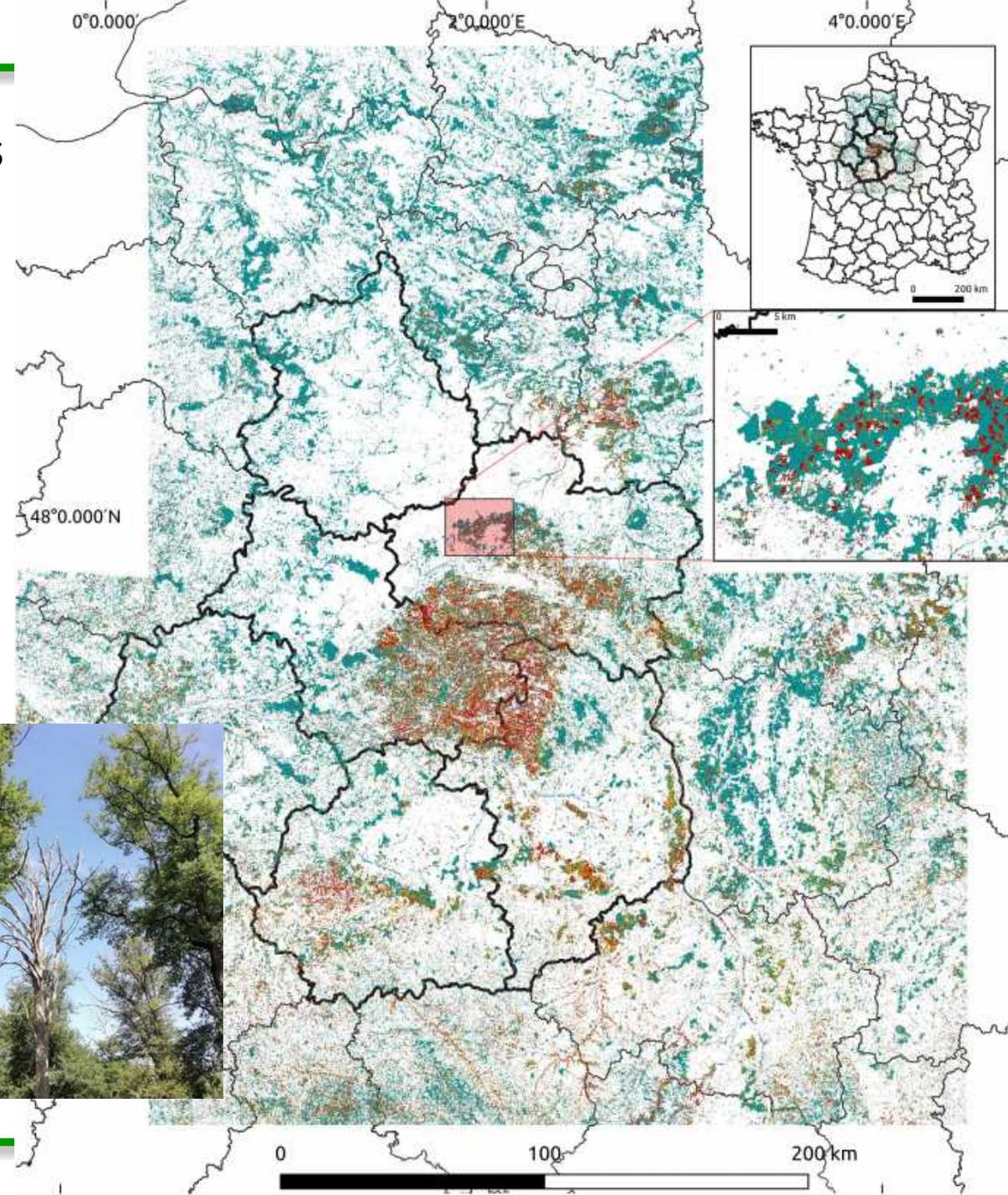
- En attendant l'arrivée de TRISHNA et LSTM
- Utilisation d'une méthode par apprentissage
  - Avec apprentissage local pour l'instant avec Sentinel-2
  - Travaux en cours pour intégrer Sentinel-1 avec un apprentissage national
- Pour un meilleur rapport signal sur bruit
  - Combiné avec une méthode de détection des bords de parcelles agricoles (méthode par apprentissage)



Auteur: Ghaith Amin (CESBIO/MEOSS/CNES) 2022 / Projet SCO Space-Irrig

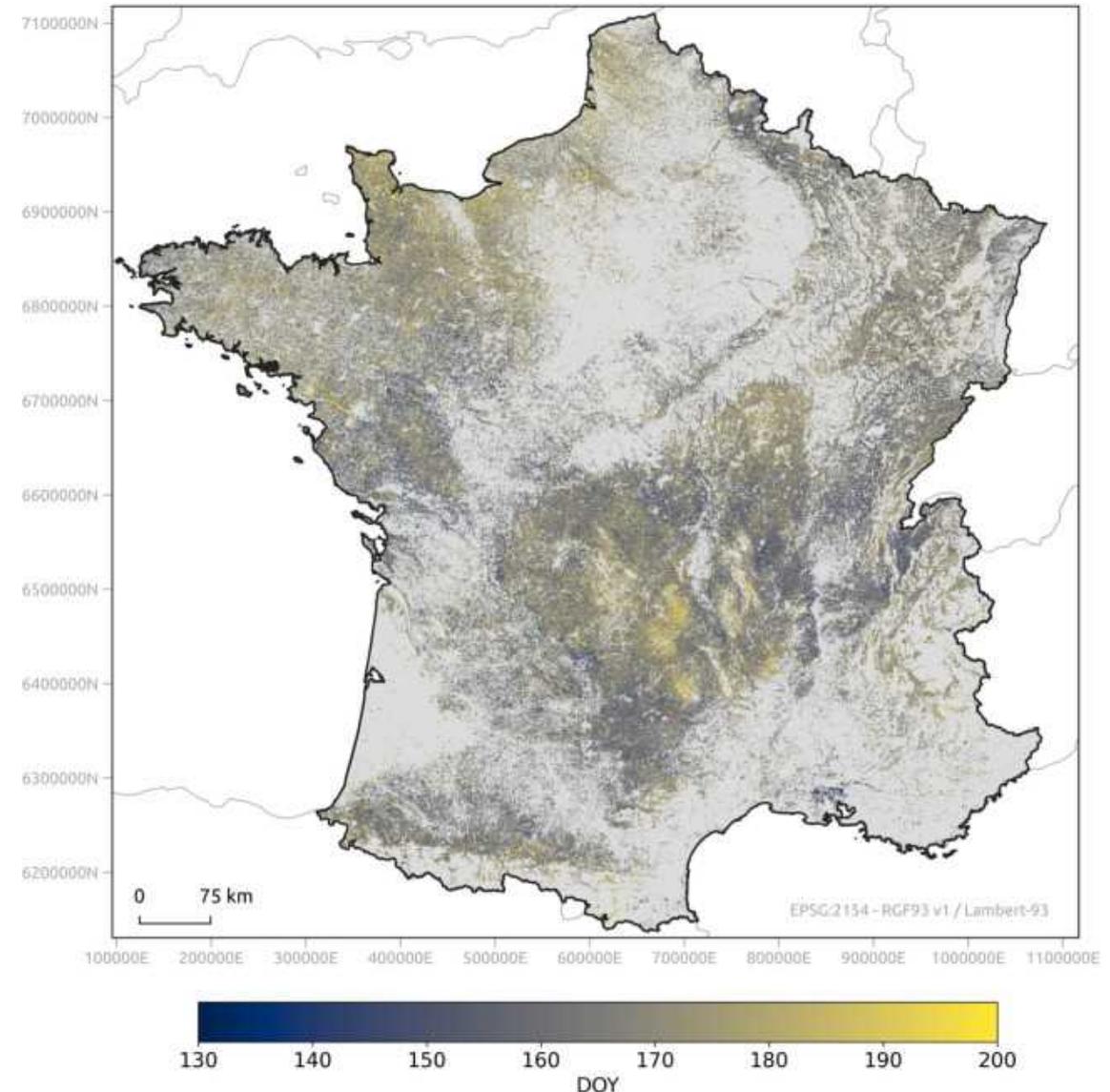
## Applications : détection dépérissement des forêts

- Fort dépérissement des forêts françaises après les sécheresses de 2018, 2022, 2023
- Utilisation de Sentinel-2 sur deux ans
- Méthode par apprentissage avec données de terrain (partie délicate à obtenir)
- Application au chêne et chataigner
  - Besoin de différencier des éclaircies de forêt
    - Détectables avec Sentinel-1
- Avec la chaîne Iota2
- Bientôt disponible sur



## Applications : fauche des prairies

- Données Sentinel-2 (comme OSO)
- Une fauche tardive favorise la biodiversité
- Utilisation des séries temporelles de Sentinel-2
- Méthode par apprentissage avec données de terrain (partie délicate à obtenir, ici OFB)
  - Chaîne Iota2
- Précision de la date de 6 jours
- Données proposées à



---

# Conclusions sur Sentinel-2

- SPOT :
  - démonstrations de potentialités d'applications, si on avait des données fréquentes et partout
- La revisite systématique fréquente de S2 a révolutionné la télédétection
  - On peut compter sur la disponibilité des données (aux nuages près)
  - On peut suivre le cycle végétal et détecter les événements (pas trop fugitifs)
  - Fort développement des applications pour le suivi des surfaces continentales
  - La fusion de données par IA commence à bien marcher, à condition d'avoir des séries temporelles
  - Les données acquises à la demande sur les satellites commerciaux ne nous servent quasiment pas
- Tendances :
  - Besoin d'un peu plus de revisite
    - Campagne pour Sentinel-2A, demande de 3 jours de revisite au MAG S2NG
  - Besoin d'un peu plus de résolution
    - Sentinel2-NG (5m), malheureusement au prix de la revisite (décision ESA/Copernicus)
    - Sentinel-HR/ 4D-earth, le monde à 2m, en 3D, tous les 20 jours (phase 0)
  - Besoin d'IRT
    - TRISHNA/LSTM

---

# Conclusions sur les produits avancés

- Les résultats présentés ici sont utiles au suivi de l'environnement
  - Mais ne feront jamais l'objet de commerce B2B
  - Les systèmes de financement en France permettent d'alimenter la recherche mais pas la production (et la maintenance des chaînes)
  - THEIA a du mal à mettre en place de nouveaux traitements
- Les budgets que l'on trouve en France sont presque toujours destinés à des applications commerciales (FR2030, ESA BIC)
- Difficile de remporter un appel d'offres Copernicus sans avoir fait les preuves du produit par une production conséquente.
- Il manque un système de financement en France pour l'exploitation de données liées à l'environnement.