



# Soutenance Master 1 Automatique, Robotique Parcours Ingénierie des Systèmes Intelligents (ISI)

Comparaison de la mission spatiale EarthCARE-ATLID avec des observations au sol

Fait par : HADDOUCHE Arezki  
Date : 04 septembre 2025

Maître d'apprentissage : Artem FEOFILOV  
Tuteur pédagogique : Henri Boutin

Laboratoire d'accueil : Laboratoire de  
Météorologie Dynamique (LMD/IPSL) École  
Polytechnique - Palaiseau

# Présentation de la mission EarthCare

**EarthCare est une mission spatiale d'observation atmosphérique développée en collaboration entre l'ESA et la JAXA**

Orbit	Routine operations
Orbit Type	Sun-synchronous
Mean Solar Local Time	14:00 (descending node)
Mean Spherical Altitude	393.14 km
Inclination	97.05°
Repeat Cycle	25 days/389 orbits
Orbital Duration	5552.7 seconds

Source : ESA, 2025

## Objectifs scientifiques:

- Profils verticaux des nuages, aérosols et leur impact climatique
- Distributions verticales de l'eau atmosphérique et transport global
- Bilan radiatif et effet sur la température atmosphérique



**Le Broad-Band Radiometer (BBR)** mesure le rayonnement et les flux énergétiques au sommet de l'atmosphère.

**Multi-Spectral Imager (MSI)** observe les nuages et aérosols avec des canaux du visible à l'infrarouge thermique.

**Le radar CPR** mesure les profils verticaux des nuages et leurs vitesses par effet Doppler à 94 GHz.

**Le lidar ATLID** détecte les aérosols et nuages fins à 355 nm avec une haute résolution spectrale et un canal de dépolarisation.

# Le but de mon alternance

## Pourquoi valider les données ATLID/

### EarthCare ?

- **Environnement spatial hostile** : Conditions extrêmes modifient les performances des instruments
- **Dégradation temporelle** : Validation continue nécessaire
- **Algorithmes de traitement** : Vérification des traitements  
L0→L1→L2

### Stratégie de validation : pourquoi les lidars au sol ?

1. Opérationnels 24h/24 : Mesures continues vs vols ponctuels
2. Coûts maîtrisés pour les campagnes aéroportées
3. Accumulation sur de longues périodes

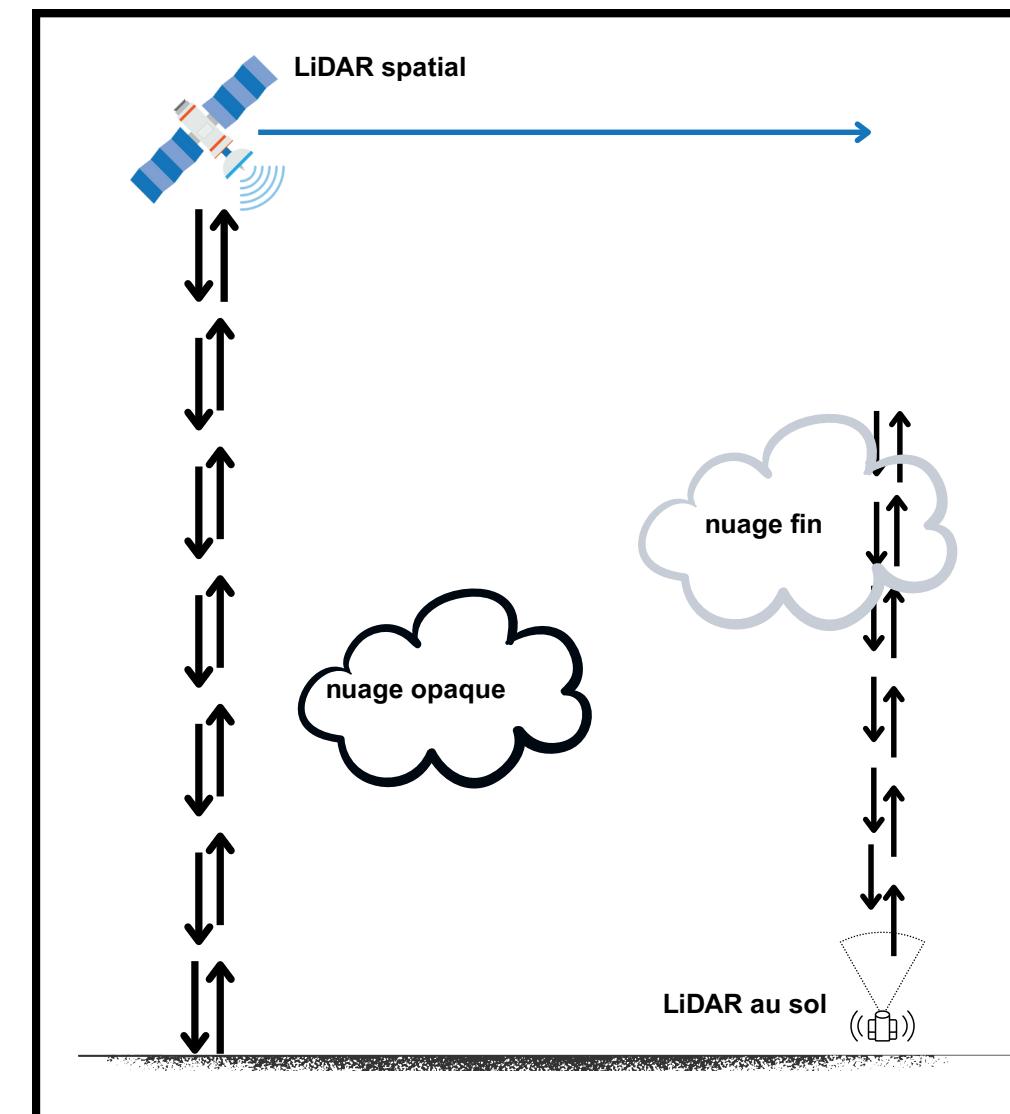
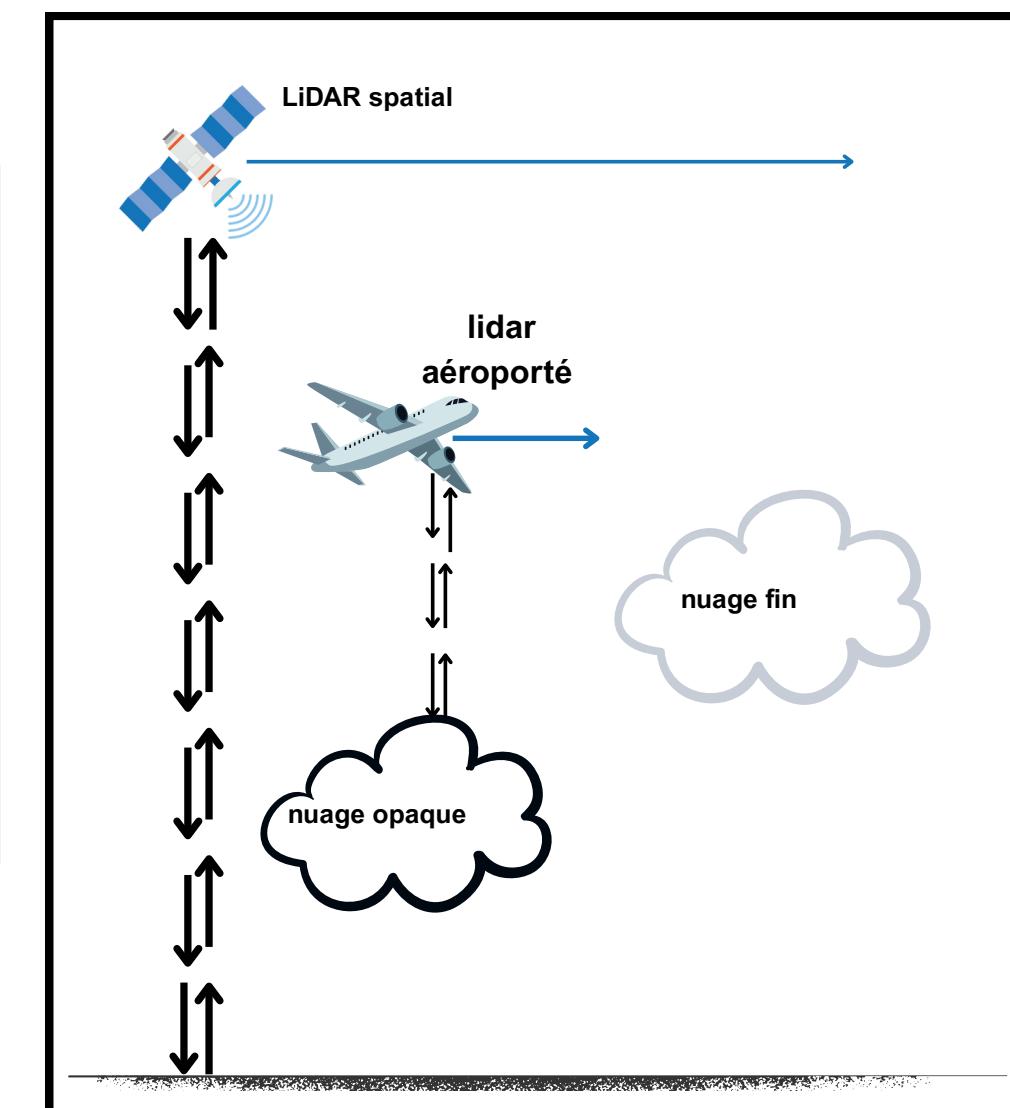


Schéma explicatif de la validation des données LiDAR spatiales

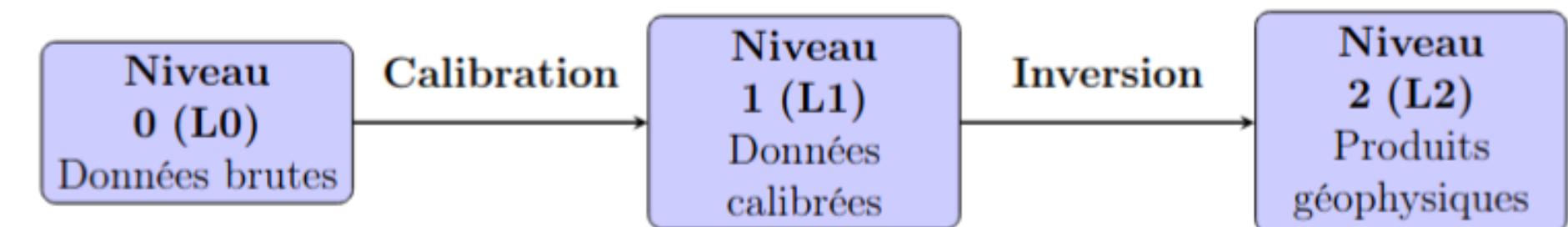


FIGURE 2.4 – Chaîne de traitement des données lidar

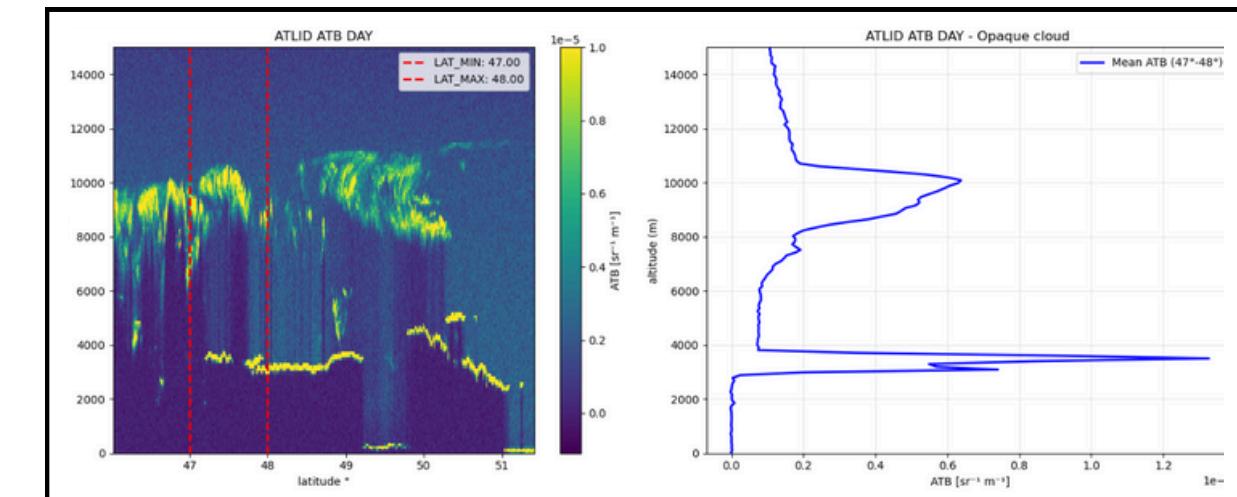
# Les caractéristiques des instruments de validation : spatial vs sol



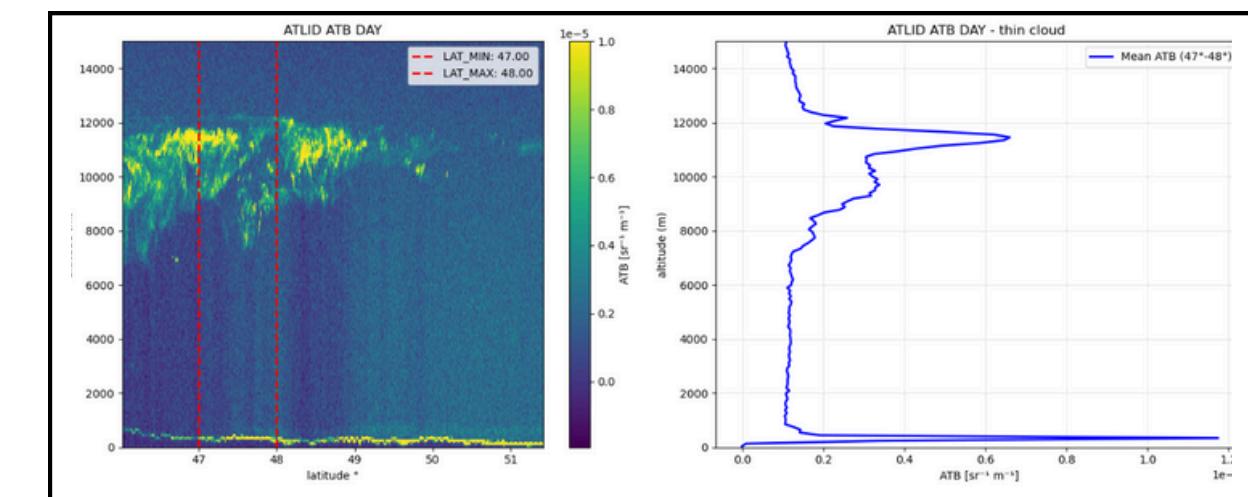
## Caractéristiques techniques des lidars utilisés:

Caractéristique	ATLID	IPRAL SIRTA	TMF (Californie)	AKY (Akureyri)
Coordonnées géographiques	Orbite héliosynchrone	48.713°N, 2.208°E	34.382°N, 117.676°W	65.682°N, 18.107°W
Longueur d'onde	354.8 nm  387 nm / 408 nm  / 532 nm / 355 nm	1064 nm / 607 nm  387 nm / 408 nm  / 532 nm / 355 nm	354.7 nm	355 nm
Plage d'altitude	-0.5 km à 40 km	15 m à 60 km	13 km à 44 km	100 m à 14 km
Résolution verticale	103 m (jusqu'à 20.2 km) et 500 m (de 20.2 km à 40 km)	15 m	300 m	60 m
Configuration	Orbite héliosynchrone à 393 km	2 télescopes : far range / near range	Lidar à rétrodiffusion	Lidar Raman
Durée d'accumulation temporelle	Instantané (51 Hz)	Continue, sauf pendant les tests ou conditions pluvieuses	Approximativement 2 à 4 heures (de 1 à 5 heures)	Continue, sauf pendant les tests ou conditions pluvieuses

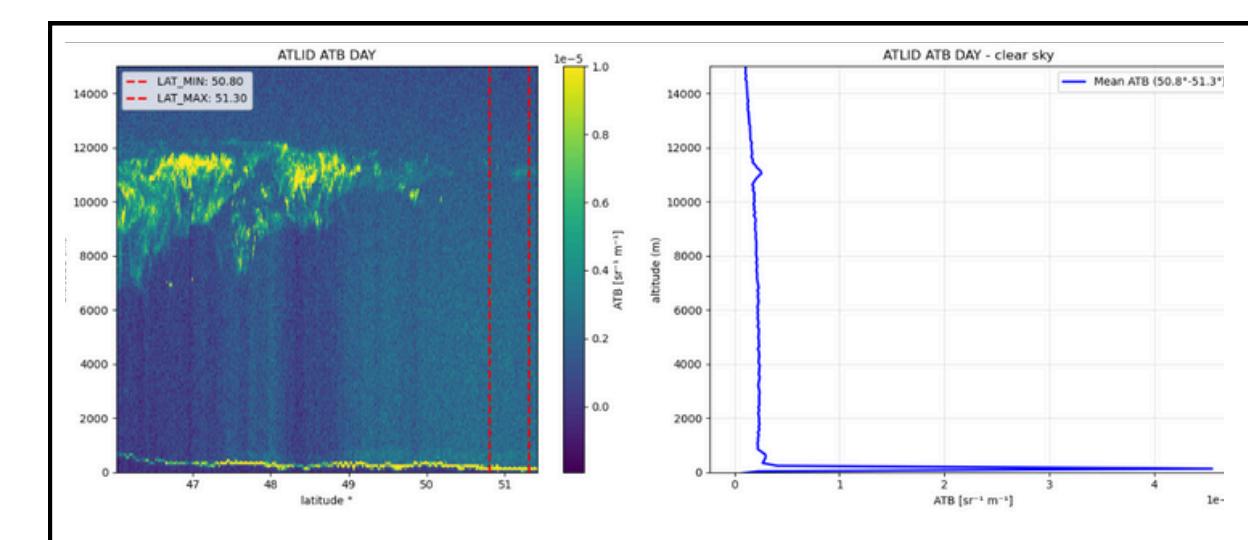
## Critères de sélection des cas de validation



Nuage opaque



Nuage semi-transparent

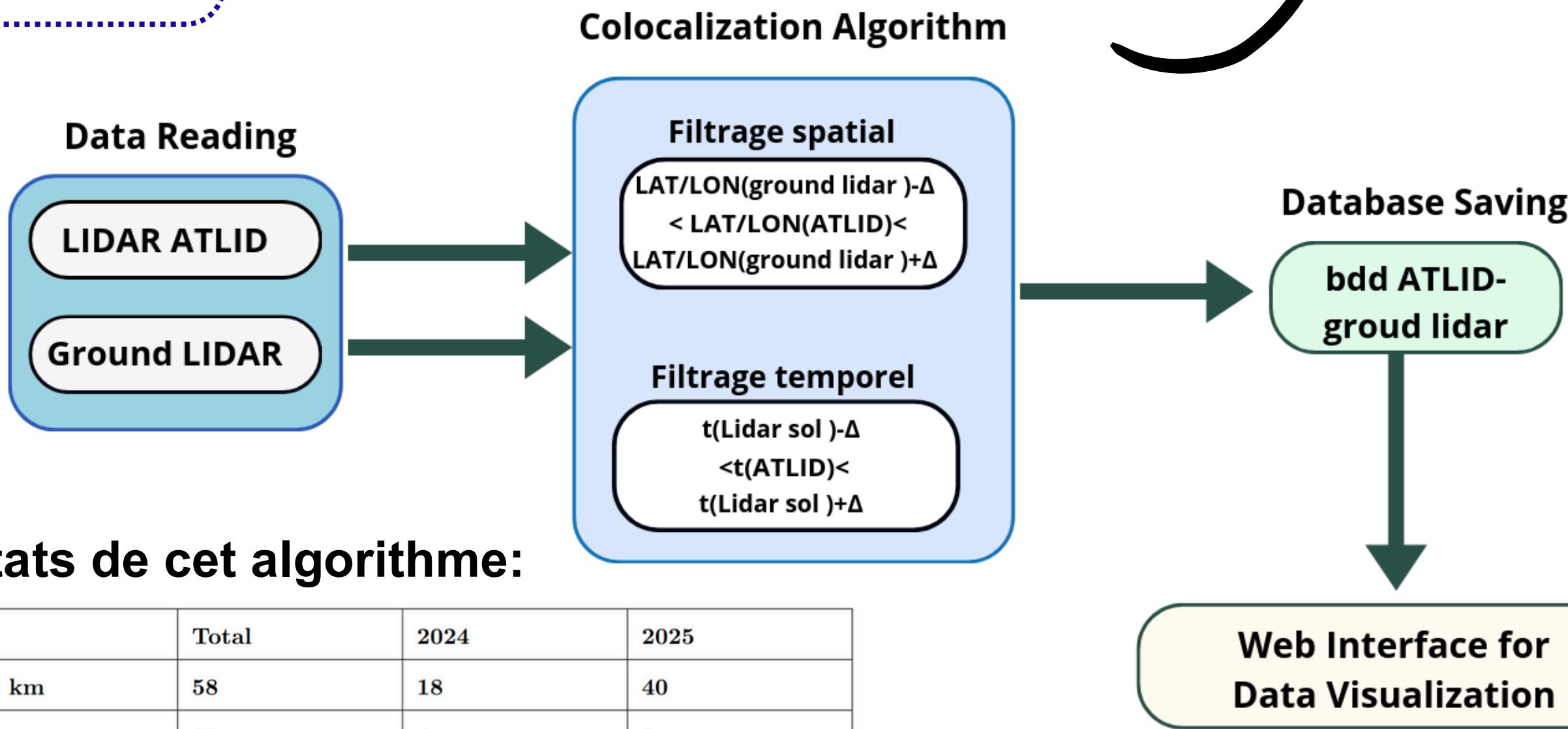


ciel clair

# Réaliser une chaîne de colocalisation

- Manipulation de fichiers volumineux (centaines de GB)
- Formats variés : HDF5, HDF4, NetCDF
- Gestion mémoire optimisée pour éviter les erreurs

- Optimisation sur longues périodes
- Algorithmes efficaces pour traitement de volumes massifs
- Critères adaptatifs selon disponibilité des stations



Quelques résultats de cet algorithme:

Station	Critères	Total	2024	2025
IPRAL	4h / 200 km	58	18	40
2*TMF	4h / 50 km	13	4	9
	12h / 150 km	43	23	20
AKY	4h / 200 km	16	8	8
Maido	3h / 100 km	4	4	-

- Visualisation interactive des colocalisations
- Navigation temporelle et export données
- Interface utilisateur intuitive
- Slide 7

# Variables de comparaison et sources de données

## Sources des données utilisées :

- **Données ATLID** : Produits officiels ESA (niveaux L1 et L2)

- **Données TMF** : Traitements laboratoire JPL - sources validées dans la littérature scientifique

- **Données AKY** : Réseau EARLINET - données de référence utilisées dans les publications

- **Données IPRAL** : Accès direct serveur SIRTA - données L0

### Données de niveau 1 L1(ATLID/ Lidar sol) :

$$SR(\lambda, z) = \frac{APB(\lambda, z) + AMB(\lambda, z)}{AMB(\lambda, z)} = 1 + \frac{\beta_{part}(\lambda, z)}{\beta_{mol}(\lambda, z)}$$

$$AMB(\lambda, z) = \beta_{mol}(\lambda, z) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z (\sigma_{mol}(\lambda, z') + \eta \sigma_{part}(\lambda, z')) dz'}$$

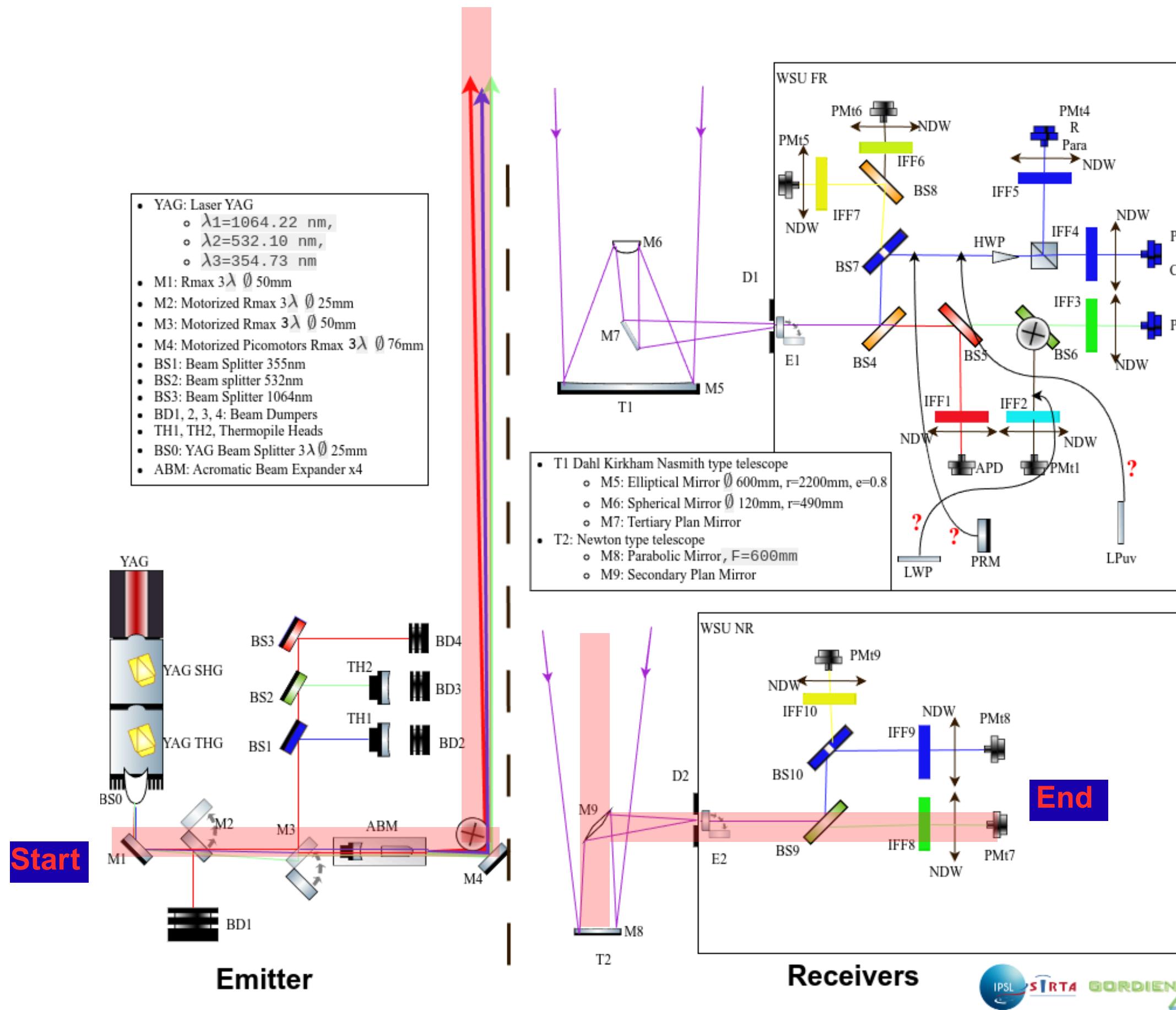
$$APB(\lambda, z) = \beta_{part}(\lambda z) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z (\sigma_{mol}(\lambda, z') + \eta \sigma_{part}(\lambda, z')) dz'}$$

### Données de niveau 2 L2(ATLID/ Lidar sol) :

particle\_backscatter\_coefficient  $\beta_{partt}$

Variable	Définition	Variable	Définition
$APB(\lambda, z)$	coefficient de rétrodiffusion particulaire atténue ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\beta_{part}(\lambda, z)$	coefficient de rétrodiffusion particulaire ( $m^{-1}sr^{-1}$ )
$AMB(\lambda, z)$	coefficient de rétrodiffusion moléculaire atténue ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$\alpha_{mol}(\lambda, z')$	coefficient d'extinction moléculaire ( $m^{-1}$ )
$SR(\lambda, z)$	rapport de rétrodiffusion (sans dimension)	$\alpha_{part}(\lambda, z')$	coefficient d'extinction particulaire ( $m^{-1}$ )
$\beta_{mol}(\lambda, z)$	coefficient de rétrodiffusion moléculaire ( $m^{-1}sr^{-1}$ )	$z_{sat}$	altitude du satellite (m)
$z$	altitude considérée (m)	$\lambda$	longueur d'onde laser (nm)

# Calibration d'IPRAL SIRTA



## Traitement L0 → L1

Calibration du signal :  $\text{mV} \rightarrow \text{sr}^{-1}\text{m}^{-1}$

Paramètres nécessaires :

- K (coefficient de calibration)
- $\Delta S$  (correction du biais)

$$\text{Signal\_calibré} = K \times \text{Signal\_brut} + \Delta S$$

## Traitement L1 → L2

Actuellement en cours de développement

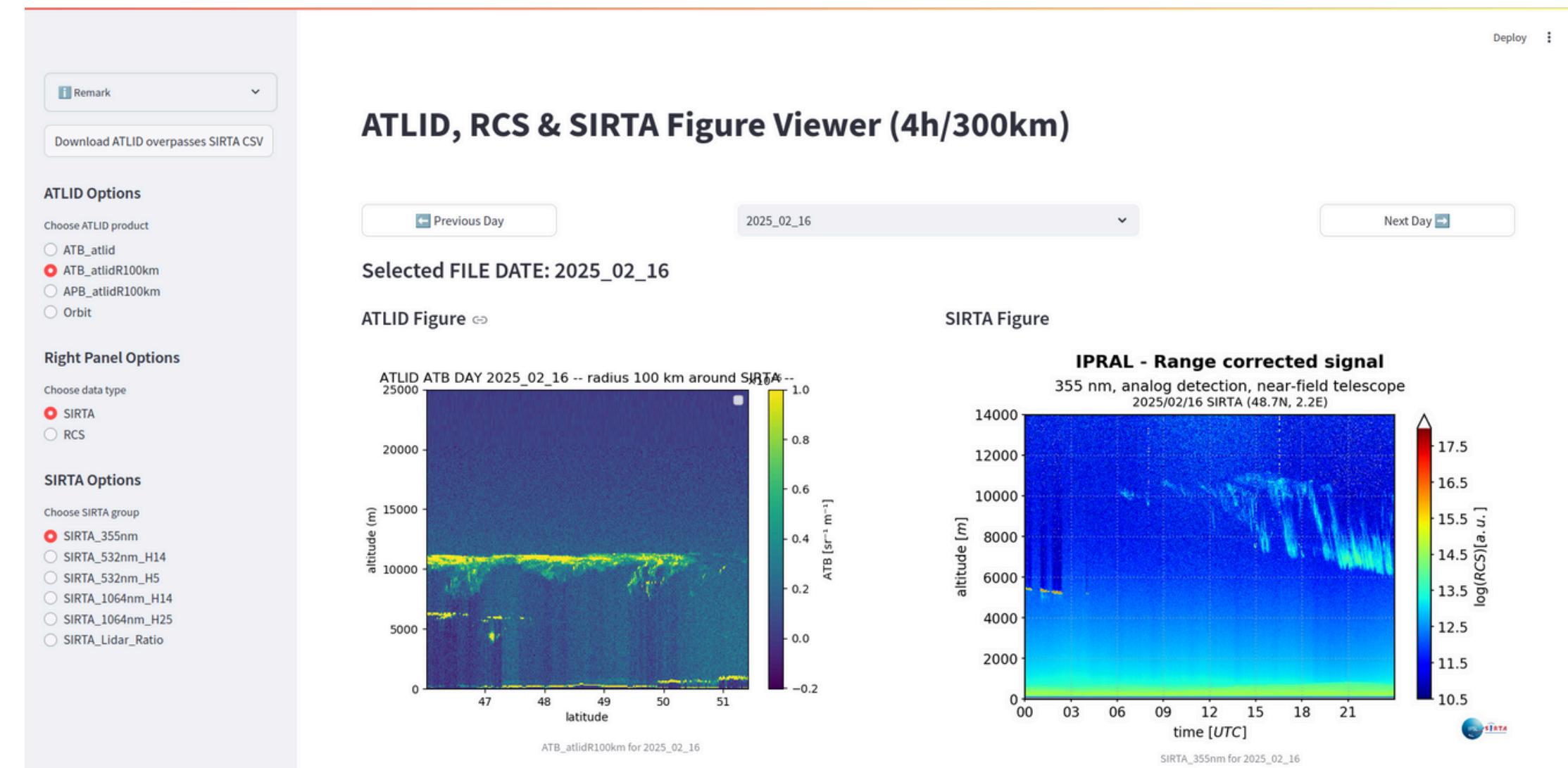
# Travail collaboratif : outils et diagnostic

## Diagnostic qualité des données IPRAL

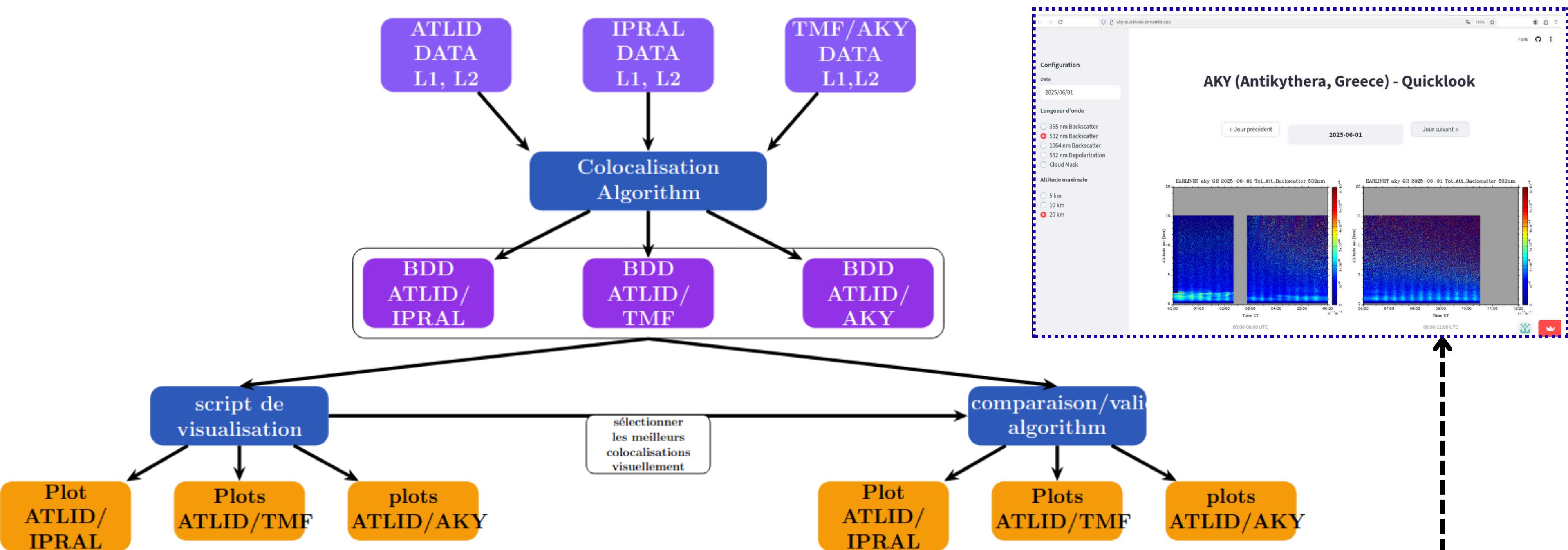
Date de Colocalisation (PASSAGE D'ATLID)	(signal SIRTA )	Commentaire
2025_05_29	la moyenne de (La moyenne de 22:30 à 23:00 ) Rcs_02 : le signal <0 a partir de 20km Rcs_03 : le signal est bon Rcs_04 : le signal est bon Rcs_05 : (saturation à 4,5 km) Rcs_12 : le signal est bon Rcs_13 : le signal est bon	
2025_05_14	la moyenne de (La moyenne de 6h à 9h30 ) Rcs_02 : le signal <0 a partir de 20km Rcs_03 : le signal est bon Rcs_04 : le signal est bon Rcs_05 : (saturation à 4,5 km) Rcs_12 : le signal est bon Rcs_13 : le signal est bon	
2025_05_13	la moyenne de (La moyenne de 6h à 6h30 ) Rcs_02 : le signal est bon Rcs_03 : le signal est bon Rcs_04 : le signal est bon Rcs_05 : le signal est bon Rcs_12 : le signal est bon Rcs_13 : le signal est bon	
2025_05_11	la moyenne de (La moyenne de 3h à 5h ) Rcs_02 : le signal est bon Rcs_03 : le signal est bon Rcs_04 : le signal est bon Rcs_05 : le signal est bon Rcs_12 : le signal est bon Rcs_13 : le signal est bon	
2025_04_29	(la moyenne de 18h à 21h 2025_04_28 ) Rcs_02 : (presque toutle signal < 0) Rcs_03 : (le signal = 0) Rcs_04 : (bout artificiel) Rcs_05 : (saturation à 13 km) Rcs_12 : le signal est bon Rcs_13 : le signal est bon	
2025_04_25	La moyenne de 20h à 20h:30 ) Rcs_02 : (presque toute signal < 0) Rcs_03 : (le signal = 0) Rcs_04 : (bout artificiel) Rcs_05 : (saturation à 8 km) Rcs_12 : le signal<0 a partir de 12km Rcs_13 : le signal est bon	

## Interface Streamlit de visualisation comparative

- Visualisation des colocalisations
- Interface de comparaison ATLID/IPRAL
- Sélection de dates et paramètres configurables/SIRTA



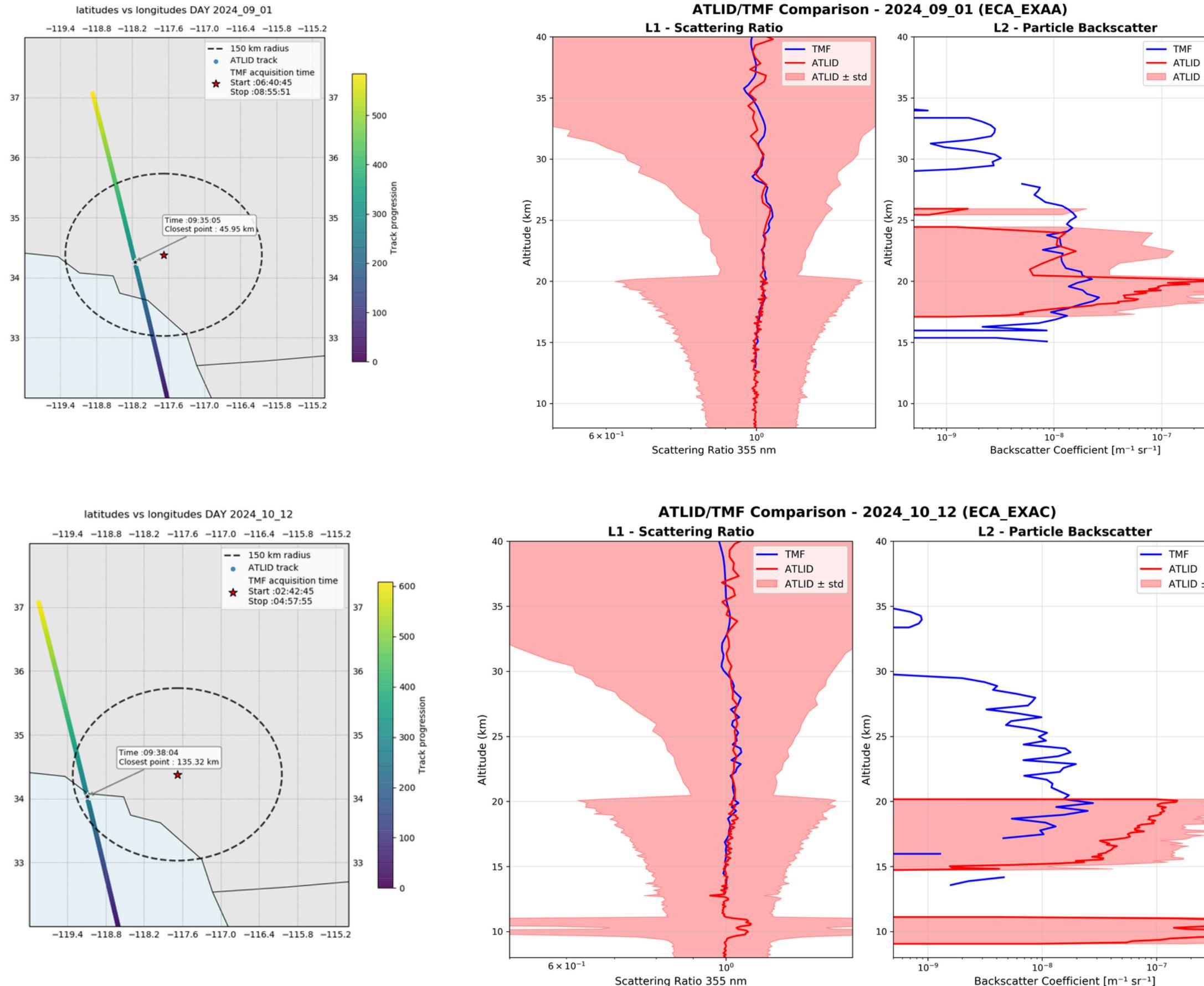
# Le workflow de validation de la mission EarthCARE ATLID



## Outils web développés

Interface AKY Quicklook : Pour faciliter l'accès aux données du lidar d'Antikythera (Grèce), j'ai créé une interface web dédiée accessible à l'adresse : <https://aky-quicklook.streamlit.app/>

# Comparaison ATLID/TMF



la co-localisation entre ATLID et TMF basée sur les critères de 12h et 150 km a permis d'identifier **43 cas de validation**

## Conclusions préliminaires :

### Validation niveau L1 :

- Scattering Ratio : bon accord ATLID/TMF
- Validation de la calibration instrumentale d'ATLID

### Validation niveau L2 :

- Coefficient de rétrodiffusion particulaire : surestimation systématique d'ATLID
- Problèmes identifiés dans les algorithmes de traitement L2

# Comparaison ATLID/AKY

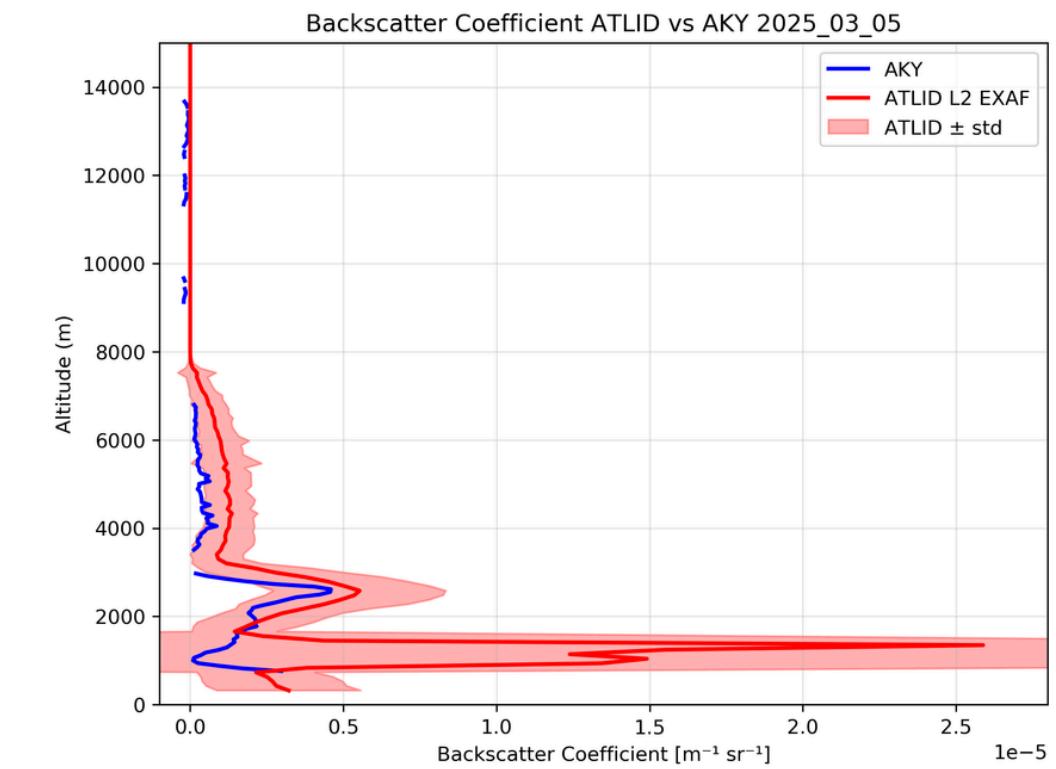
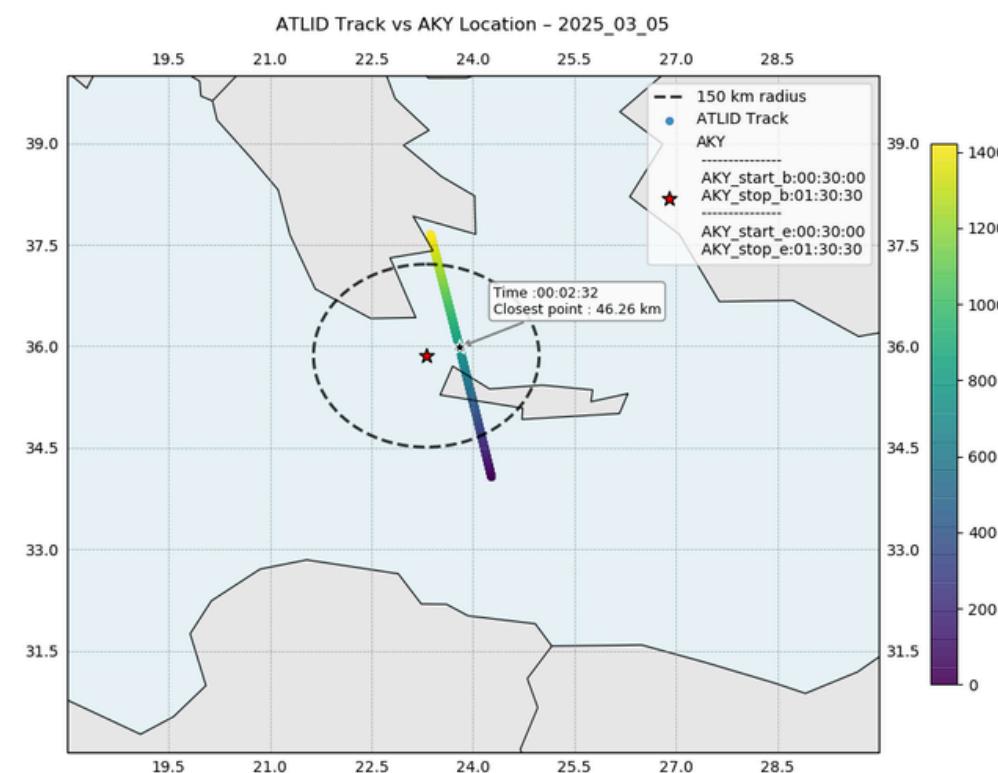
## Validation niveau L1 :

QUALITY CONTROL REPORT

Technical Quality Control	Executed	Execution Date	Passed
Check if file contains data	✓	19/05/2025 15:47:00	✓
Check Coordinates Consistency	✓	19/05/2025 15:47:00	✓
Check for Undefined Variables and Global Attributes	✓	19/05/2025 15:47:00	✓

Physical Quality Control	Executed	Execution Date	Passed		
Checks for Negative Errors	✓	19/05/2025 15:47:00	✓		
Negative peaks	✓	19/05/2025 15:47:00	✓		
Check on AOD	-	19/05/2025 15:47:00	-		
Check on IB	✓	19/05/2025 15:47:00	✓		
Check on LidarRatio	-	19/05/2025 15:47:00	-		

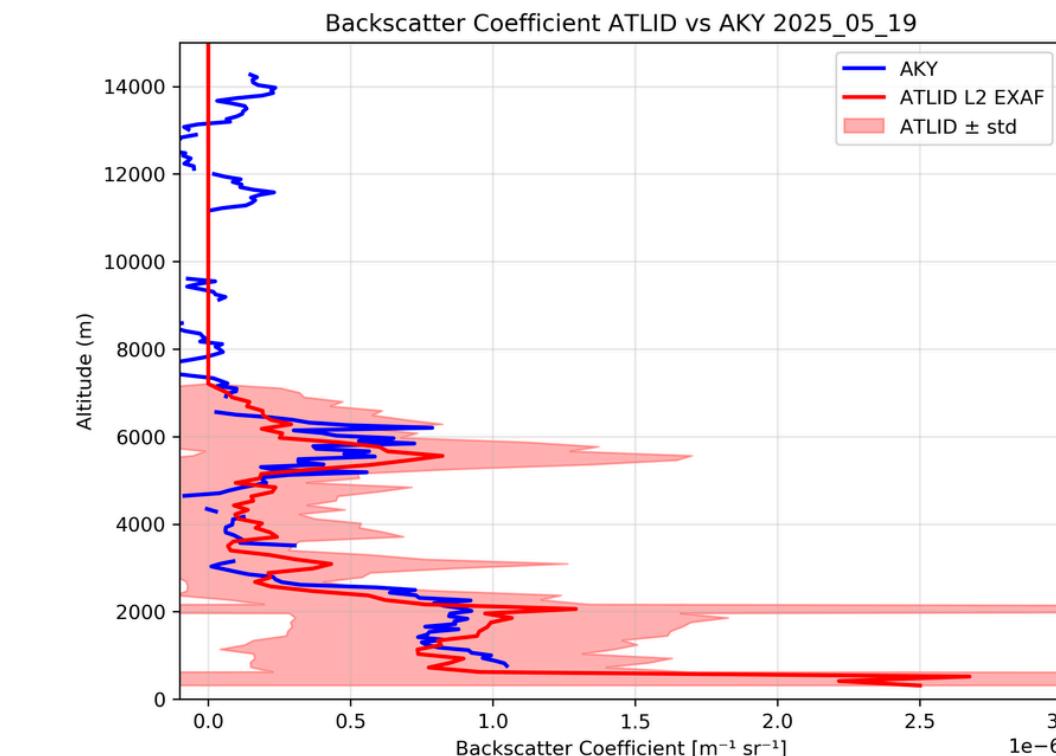
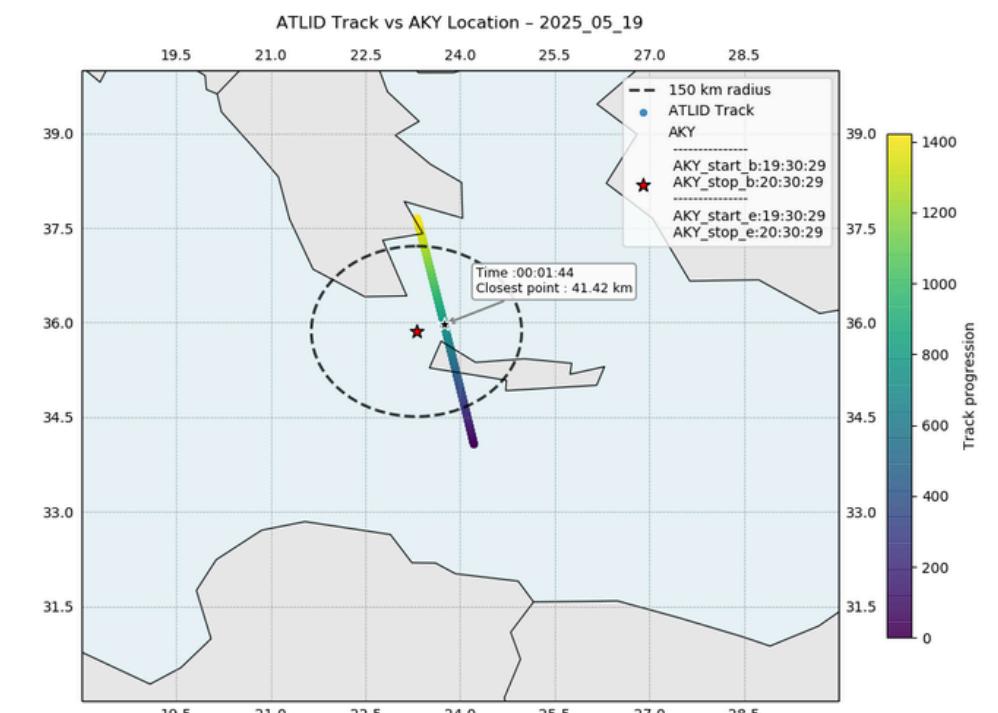


## Validation niveau L2 :

- bon accord observé dans la troposphère
- Validation des produits géophysiques pour les basses altitudes

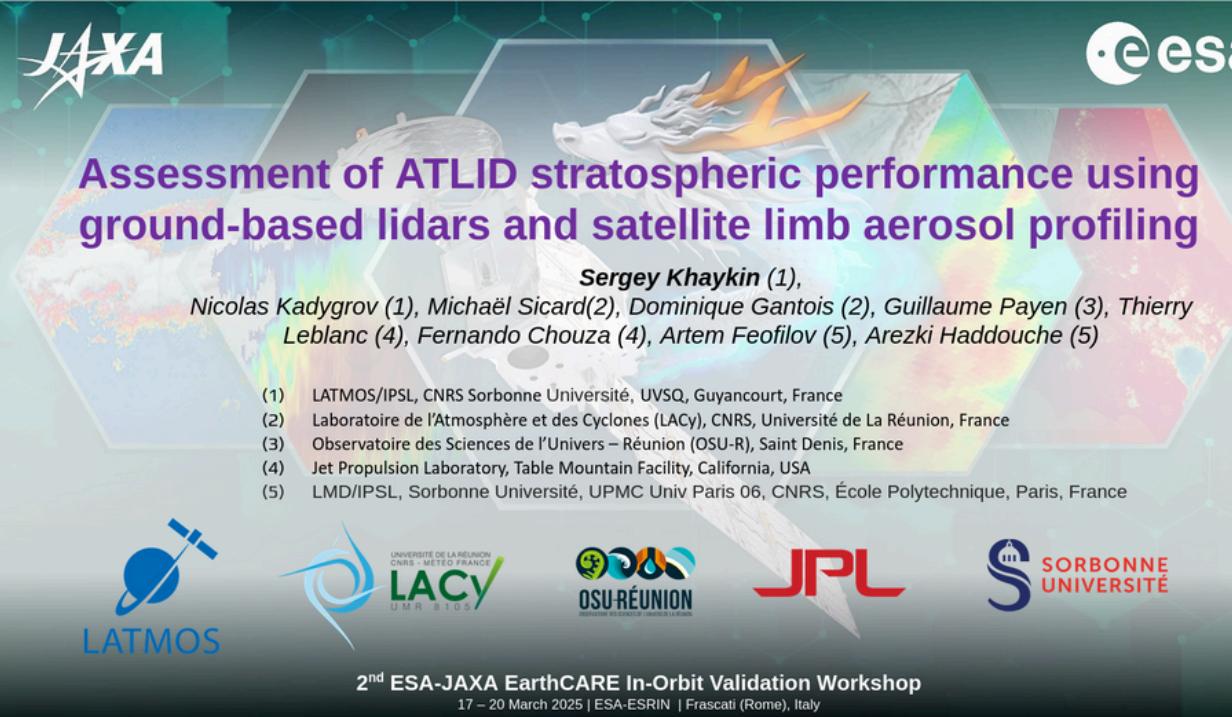
## Conclusions générales de validation ATLID préliminaires :

- L1 : Excellent accord du Scattering Ratio - calibration ATLID validée
- L2 : Bon accord dans la **troposphère (AKY)** mais surestimation systématique en **stratosphère (TMF)**



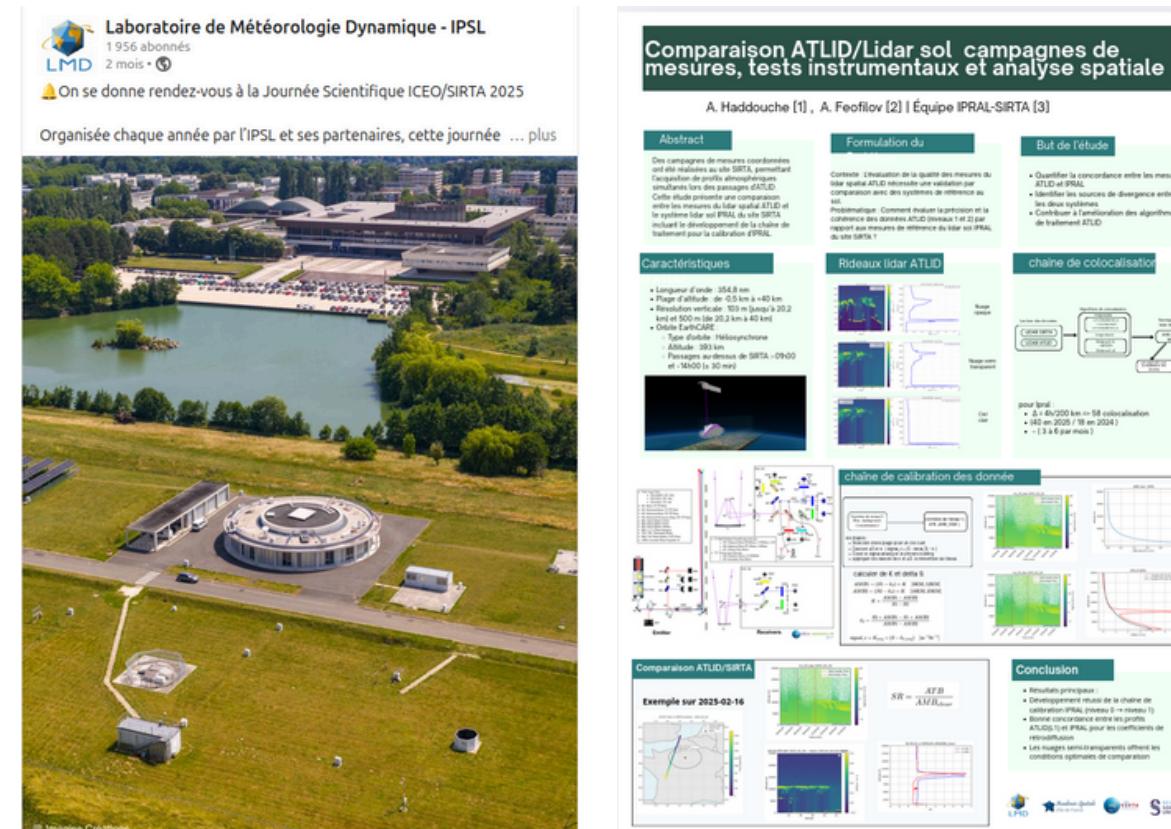
# Participation aux événements scientifiques

Contribution à une présentation de Sergey Khaykin lors du 2nd ESA-JAXA EarthCARE In-Orbit Validation Workshop  
17–20 mars 2025 | ESA-ESRIN | Frascati (Rome), Italie

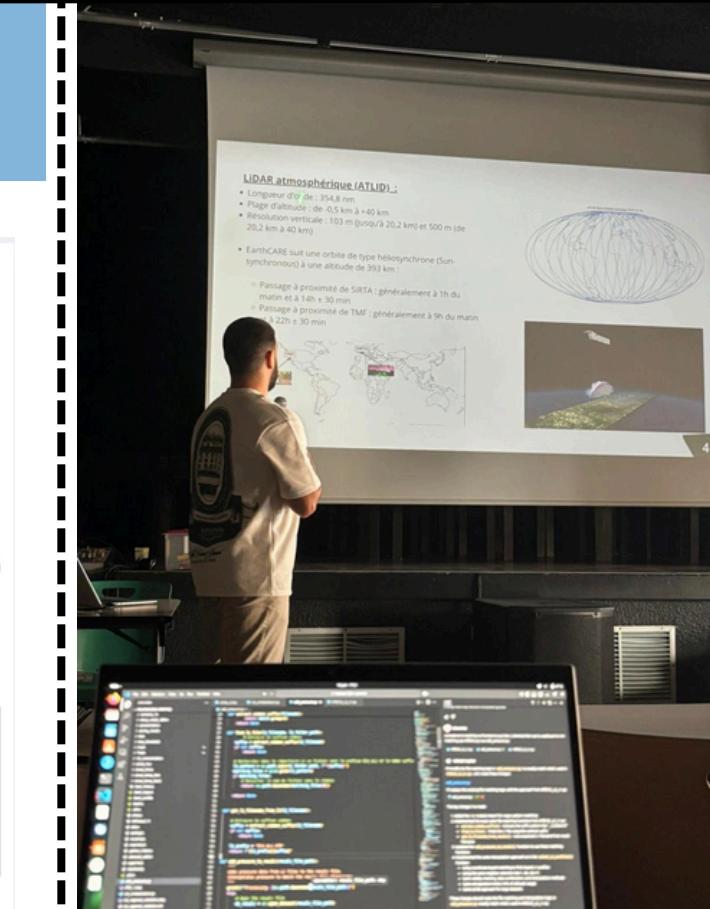


Co-auteur d'un article qui va être publié par M. Khaykin dans le journal ACP.

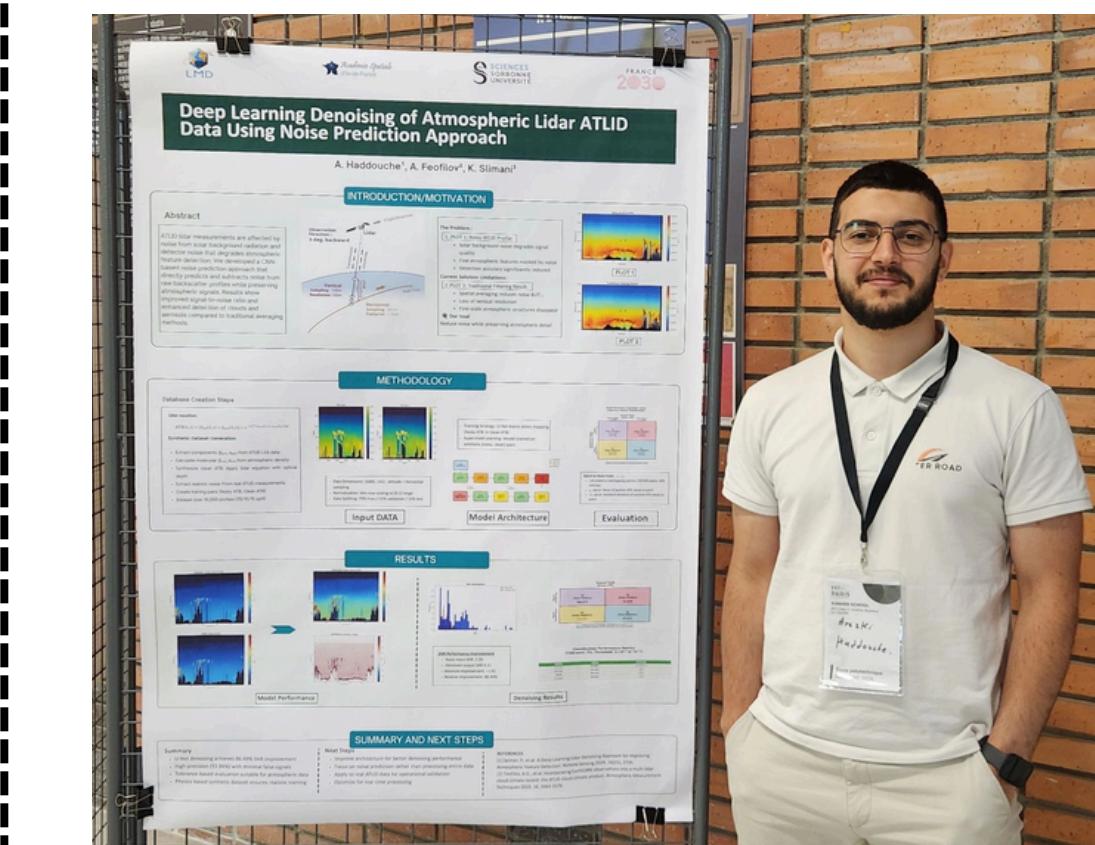
## Présentation d'un poster à la Journée Scientifique ICEO/SIRTA 2025



Présentation des travaux réalisés et des problèmes sur les données IPRAL pour l'équipe SIRTA.



Présentation d'un poster à la Hi!PARIS Summer School 2025 - AI for Science, Business & Society.



# Conclusion et bilan de l'alternance

## Objectifs atteints :

- 5 lidars sol étudiés (IPRAL, TMF, AKY, SIRTA + Mado)
- 95 colocalisations identifiées sur 1 an de données (**Centaines de GB**)
- 4 bases de données créées et structurées
- Algorithme de colocalisation fonctionnel et automatisé
- 2 pages web développées pour l'accès aux données
- Première validation des données ATLID réussie avec performances mesurées (**Résultats dans le rapport**) :
  - ATLID/AKY : Biais moyen  $\pm 34.6\%$ , Écart-type  $\pm 49.5\%$
  - ATLID/TMF : Biais moyen  $\pm 7.1\%$ , Écart-type  $\pm 376.6\%$
- Outils développés opérationnels (application web, scripts de diagnostic)



## Valorisation scientifique :

- 5 présentations en conférences/workshops
- 2 posters scientifiques présentés
- Collaboration avec équipe SIRTA/LATMOS établie

## Perspectives M2 :

- Étude statistique approfondie avec plus de colocalisations
- Finalisation de la calibration des données IPRAL
- Publication des résultats dans une revue scientifique
- Extension à d'autres stations du réseau EARLINET

**Merci pour votre attention !**