

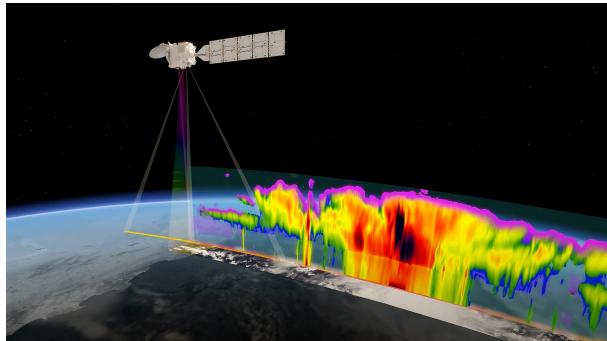


Rapport de Mission en Entreprise

MU4RBK06 - Master 1 ISI en Apprentissage

Comparaison des données de la mission spatiale EarthCare avec des observations de lidars au sol

*Colocalisation, comparaison et validation des données
du lidar spatial ATLID/EarthCare*



Étudiant :
HADDOUCHE Arezki
Master 1 ISI - Apprentissage
Sorbonne Université

Entreprise d'accueil :
Laboratoire de Météorologie
Dynamique
École Polytechnique - Palaiseau
UMR 8539 CNRS

Maître d'apprentissage :
Artem FEOFILOV
Ingénieur de Recherche
LMD/IPSL

Tuteur pédagogique :
Henri Boutin
Sorbonne Université

Période de mission : Septembre 2024 - Septembre 2025

Date de remise : Septembre 2025

Année universitaire : 2024-2025

Résumé

Résumé en français :

Dans le contexte de l'observation climatique mondiale, la validation des données satellitaires constitue un enjeu majeur pour garantir la fiabilité des mesures atmosphériques. La mission EarthCare, lancée en mai 2024, embarque le lidar spatial ATLID pour l'étude des nuages et aérosols, nécessitant une validation rigoureuse par comparaison avec des observations au sol. Cette validation présente des défis techniques liés aux différences instrumentales entre systèmes spatiaux et terrestres et à la synchronisation spatio-temporelle des mesures. Ma mission d'alternance au Laboratoire de Météorologie Dynamique consiste à développer une chaîne automatisée de validation des données ATLID en utilisant un réseau de lidars au sol, principalement le SIRTA et des stations internationales. L'objectif principal est d'automatiser le processus de colocalisation et de comparaison pour évaluer la précision des produits ATLID. Les outils développés permettent l'identification automatique des passages satellitaires et l'analyse comparative des profils atmosphériques. Cette approche multi-instrumentale fournit des statistiques de validation pour caractériser les performances d'ATLID dans différentes conditions atmosphériques. Les résultats contribuent directement à la validation officielle de la mission EarthCare.

Abstract in English :

In the context of global climate observation, the validation of satellite data constitutes a major challenge to guarantee the reliability of atmospheric measurements. The EarthCare mission, launched in May 2024, carries the ATLID space lidar for the study of clouds and aerosols, requiring rigorous validation through comparison with ground-based observations. This validation presents technical challenges related to instrumental differences between space and terrestrial systems and to the spatio-temporal synchronization of measurements. My internship mission at the Laboratory of Dynamic Meteorology consists of developing an automated validation chain for ATLID data using a network of ground-based lidars, primarily SIRTA and international stations. The main objective is to automate the colocation and comparison process to evaluate the accuracy of ATLID products. The developed tools enable automatic identification of satellite passes and comparative analysis of atmospheric profiles. This multi-instrumental approach provides validation statistics to characterize ATLID's performance under different atmospheric conditions. The results contribute directly to the official validation of the EarthCare mission.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de cette mission d'alternance.

Je remercie tout d'abord **Artem Feofilov**, mon maître d'apprentissage au LMD/IPSL, pour son encadrement expert, sa disponibilité constante et ses précieux conseils tout au long de cette année. Je remercie également **Hélène Chepfer**, chef d'équipe, pour son leadership scientifique, ainsi que l'ensemble de l'équipe avec laquelle j'ai eu le plaisir de travailler.

Ma reconnaissance s'adresse à tous les professeurs de mon Master, et tout particulièrement à **Henri Boutin**, mon tuteur académique à Sorbonne Université, pour son suivi attentif et ses conseils pédagogiques.

Je souhaite exprimer ma gratitude au CFA des Sciences, notamment à **Meriem Bousnina**, Chargée de Relations Entreprises, ainsi qu'à toute l'équipe du CFA pour leur accompagnement professionnel.

Mes remerciements s'adressent également à l'équipe SIRTA, et plus particulièrement à **Christophe Pietras**, Responsable technique de l'observatoire SIRTA, ainsi qu'à l'équipe IPRAL pour leur collaboration technique précieuse.

Je remercie aussi **Sergey M. Khaykin**, Chercheur au LATMOS/IPSL, CNRS UVSQ, Sorbonne Universités, pour sa collaboration sur la calibration des données IPRAL et la validation d'ATLID.

Enfin, je tiens à remercier le Laboratoire de Météorologie Dynamique pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette mission dans d'excellentes conditions, ainsi que Sorbonne Université pour la qualité de la formation dispensée dans le cadre du Master ISI en apprentissage.

Sommaire

1 Présentation de de Météorologie Dynamique (LMD)	4
1.1 Histoire et missions du laboratoire	4
1.2 Missions et expertises générales du laboratoire	4
1.3 Le pôle de télédétection et validation spatiale	5
1.3.1 Mon équipe de travail au sein du LMD :	5
1.3.2 L'équipe DPAO : Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan :	5
1.3.3 et ma relation avec l'infrastructure :	6
2 Introduction à la mission en laboratoire	7
2.1 La mission spatiale EarthCare	7
2.1.1 Objectifs scientifiques :	7
2.1.2 Opérations et orbite de la mission	8
2.1.3 Les instruments d'EarthCare	8
2.2 Contexte scientifique	10
2.2.1 Nécessité de la validation satellitaire :	10
2.2.2 Continuité des observations lidar spatiales	11
2.3 Problématique à résoudre	11
2.4 Objectifs de ma mission	13
2.4.1 Apports de la mission	13
3 Formalisme et définitions	14
3.1 Équations lidar fondamentales	14
3.2 Définitions des variables	14
4 Exposé des travaux effectués	15
4.1 Vue d'ensemble de la méthodologie développée	15
4.1.1 Répartition géographique des stations de validation	15
4.1.2 Caractéristiques techniques des instruments de validation	16
4.1.3 Développement de l'algorithme de colocalisation	16
4.2 Résultats de comparaison et validation	18
4.2.1 Sélection visuelle des cas de colocalisation	18
4.2.2 Scripts de visualisation automatisée	18
4.2.3 Validation avec le lidar IPRAL/SIRTA	20
4.2.4 Méthodologie de comparaison	23
4.2.5 Comparaison ATLID/TMF	25
4.2.6 Comparaison ATLID/AKY	26
4.2.7 Conclusions préliminaires sur les comparaisons ATLID avec les lidars sol	27
A Outils web développés	29
A.1 Interface web développée	29
A.2 Outils web complémentaires développés	29

Chapitre 1

Présentation de la Météorologie Dynamique (LMD)

1.1 Histoire et missions du laboratoire

Le Laboratoire de Météorologie Dynamique a été créé en 1968 par Pierre Morel, marquant une révolution dans les sciences atmosphériques : la transition de la météorologie de science descriptive vers une science "dure" basée sur la physique et les mathématiques. Cette création constitue une révolution de paradigme scientifique où la météorologie dynamique devient la science de l'atmosphère en mouvement.

Dès sa création, le LMD repose sur trois piliers fondamentaux qui constituent encore aujourd'hui l'ADN du laboratoire : **la mesure des mouvements atmosphériques, la simulation numérique des écoulements planétaires, et l'analyse de données**.

Le laboratoire est aujourd'hui une unité mixte de recherche CNRS (UMR 8539) hébergée à l'École Polytechnique (Institut Polytechnique de Paris), l'École Normale Supérieure (PSL Université) et Sorbonne Université, avec l'École des Ponts comme partenaire. Le LMD est membre fondateur de l'Institut Pierre Simon Laplace (IPSL), fédération de 9 laboratoires franciliens spécialisés dans les sciences de l'environnement.

Avec environ 180 personnes dont une quarantaine de doctorants, le LMD est devenu un laboratoire de dimension internationale étudiant le climat et l'environnement pour la Terre et les atmosphères planétaires.

1.2 Missions et expertises générales du laboratoire

Le LMD développe une approche intégrée associant modélisation numérique et observation de l'atmosphère, de l'océan et des surfaces continentales à diverses échelles, du local au global. La recherche s'structure autour de six thèmes scientifiques faisant du LMD un laboratoire de premier plan international :

- **Processus dynamiques atmosphériques** pour la Terre et les atmosphères planétaires
- **Interactions continent/océan/atmosphère**
- **Cycle de l'eau et nuages**
- **Composition atmosphérique, pollution et transport à grande échelle**
- **Variabilité et évolution du climat** aux échelles globale et régionales
- **Impacts sociétaux** (santé et énergie)

Ces recherches s'appuient sur des outils développés au laboratoire : les modèles de circulation générale LMDZ et DYNAMICO, le modèle de chimie-transport CHIMERE, et une expertise reconnue en développement instrumental pour les observations au sol, embarquées sur ballon, avion ou satellite.

Le laboratoire est organisé en 6 équipes scientifiques : ABC(t) (Atmosphère-Biosphère-Climatologie télédétection), DPAO (Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan), EMC3 (Etude et Modélisation du climat), InTro (Interfaces et troposphère), Planéto (Planétologie), et l'équipe SIRTA du LMD.

1.3 Le pôle de télédétection et validation spatiale

1.3.1 Mon équipe de travail au sein du LMD :

Mon travail d'alternance s'effectue dans une équipe spécialisée dans la validation de missions spatiales, composée de six personnes : une professeure, trois ingénieurs de recherche, deux doctorants dont la soutenance est prévue en octobre 2025, et deux apprentis, dont moi.

Mon maître d'apprentissage, **Artem FEOFILOV**, ingénieur de recherche au LMD/IPSL, supervise directement mes activités. L'équipe développe une expertise spécialisée dans l'étude de paramètres atmosphériques (nuages, vent, aérosols) à l'aide d'observations spatiales, et plus précisément de lidars spatiaux.

1.3.2 L'équipe DPAO : Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan :

Mon équipe de travail fait partie de l'équipe scientifique DPAO du LMD, l'une des 6 équipes structurant le laboratoire. L'équipe DPAO étudie la dynamique et la physique des enveloppes fluides de la Terre (atmosphère et océan), de l'échelle turbulente à l'échelle planétaire, en analysant ces mécanismes à l'aide d'outils d'observations satellitaires et de modèles numériques.

Au sein de DPAO, mon groupe de travail se spécialise en télédétection atmosphérique et validation de données satellitaires. Cette expertise s'inscrit dans l'approche de l'équipe qui combine modélisation numérique avancée et recherche expérimentale incluant nouvelles mesures satellitaires et campagnes de mesure.

L'équipe travaille activement sur plusieurs missions spatiales majeures :

- **CALIOP/CALIPSO** : Analyse et traitement des données du lidar embarqué depuis 2006
- **ALADIN/ADM-AEOLUS** : Validation du lidar Doppler pour la mesure du vent atmosphérique
- **ATLID/EarthCare** : Validation de la nouvelle mission lancée en mai 2024 (cœur de ma mission d'alternance)

1.3.3 et ma relation avec l'infrastructure :

L'équipe DPAO bénéficie d'un accès privilégié au SIRTA (Site Instrumenté de Télédétection Atmosphérique), situé sur le site de l'École Polytechnique à Palaiseau. Cette infrastructure, développée par le LMD en 1997, constitue un atout majeur pour les activités de validation de missions spatiales.

Cette approche de validation croisée entre mesures spatiales et terrestres, développée au LMD depuis plus de 25 ans, constitue le contexte idéal pour ma formation en télédétection atmosphérique.



figure Vue aérienne de SIRTA

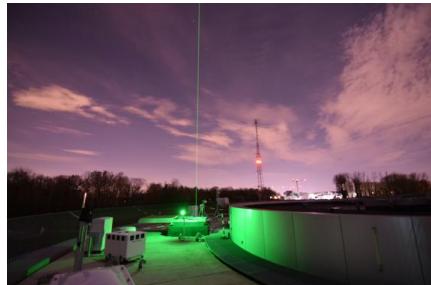


figure Lidar IPRAL en fonctionnement

Dans le cadre de ma mission, je travaille directement avec les données du SIRTA, notamment :

- **Le lidar IPRAL** : Instrument de référence au sol pour la comparaison avec les données ATLID
- **Les mesures continues** : Observations 24h/24 des propriétés atmosphériques
- **La base de données** : Archive historique permettant la colocalisation avec les passages du satellite EarthCare

Je collabore aussi avec l'équipe SIRTA spécialisée dans l'instrument IPRAL. Cette équipe est composée de plusieurs experts avec des fonctions complémentaires :

- **Responsable scientifique de l'instrument** : Questions techniques sur l'instrument IPRAL et explications méthodologiques
- **Ingénieurs de l'équipe** : Diagnostic des problèmes rencontrés sur les données et signalement des anomalies détectées
- **Responsable du flux de données** : Accès aux variables, formats de fichiers, codes de visualisation et gestion de la base de données
- **Ingénieur de recherche externe** : Expertise supplémentaire sur l'exploitation des données IPRAL et conseil scientifique

Chapitre 2

Introduction à la mission en laboratoire

2.1 La mission spatiale EarthCare

EarthCARE (Earth Clouds, Aerosols and Radiation Explorer) est un satellite d'observation de l'atmosphère terrestre faisant partie du programme Living Planet de l'ESA et développé en coopération avec l'agence spatiale japonaise JAXA. La mission a été lancée le 28 mai 2024 par un lanceur Falcon 9. L'objectif principal de la mission EarthCare est d'améliorer notre compréhension du bilan radiatif de la Terre et de ses effets sur le climat. À cet effet, le satellite doit déterminer les profils verticaux des nuages et aérosols et mesurer la luminance énergétique dans la couche supérieure de l'atmosphère.



FIGURE 2.1 – Le satellite EarthCare en orbite

2.1.1 Objectifs scientifiques :

Les objectifs scientifiques de la mission sont :

- Obtenir une série de profils verticaux des aérosols d'origine naturelle ou créés par l'activité humaine, leur radianc et leurs interactions avec les nuages
- Étudier les distributions verticales de l'eau sous forme liquide ou de glace dans l'atmosphère à une échelle globale, son transport par les nuages et son impact sur la radianc
- Obtenir des profils du réchauffement ou du refroidissement de l'atmosphère par rayonnement de la chaleur générée par les aérosols et les caractéristiques des nuages, avec une précision visée de 10 watts/m²

2.1.2 Opérations et orbite de la mission

EarthCare évolue sur une orbite héliosynchrone (Une orbite héliosynchrone est un type d'orbite spécial où le satellite est synchronisé avec le soleil, ce qui signifie qu'il passe toujours au-dessus d'un point donné de la Terre à la même heure solaire locale. Pour EarthCare, ce passage s'effectue à 14h00 heure solaire locale au noeud descendant) optimisée pour l'observation atmosphérique. Les caractéristiques orbitales ont été soigneusement sélectionnées pour maximiser la qualité des observations tout en assurant une couverture globale.

TABLE 2.1 – Caractéristiques orbitales d'EarthCare

Paramètre orbital	Valeur
Type d'orbite	Héliosynchrone
Temps solaire local moyen	14h00 (noeud descendant)
Altitude sphérique moyenne	393,14 km
Inclinaison	97,05°
Cycle de répétition	25 jours / 389 orbites
Durée orbitale	5552,7 secondes

2.1.3 Les instruments d'EarthCare

EarthCare embarque quatre instruments scientifiques complémentaires conçus pour des observations synergiques des nuages et aérosols :

CPR (Cloud Profiling Radar) : Le CPR fournit des mesures de profils verticaux de nuages et observe les vitesses verticales des particules nuageuses par mesures Doppler. Il opère à 94 GHz et complète les observations ATLID pour les nuages épais. Son antenne de 2,5 m de diamètre domine la conception du satellite.

MSI (Multi-Spectral Imager) : Le MSI hébergé par EarthCare fournit des informations transversales sur les nuages et aérosols avec des canaux dans le visible, proche infrarouge, ondes courtes et infrarouge thermique.

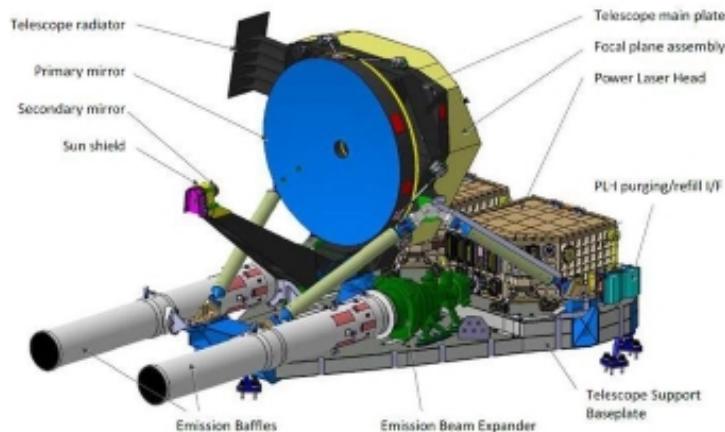
BBR (Broad-Band Radiometer) : Le BBR fournit des mesures de radiances et flux au sommet de l'atmosphère. Il dispose d'un canal onde courte et d'un canal onde longue avec trois directions de visée fixes pointant au nadir et vers l'arrière.

ATLID (Atmospheric Lidar) :

L'ATLID (Atmospheric Lidar) est un instrument de détection et télémétrie par ondes lumineuses (LIDAR) de rétrodiffusion atmosphérique à haute résolution spectrale embarqué sur le satellite EarthCare. Il détecte les limites des nuages et profile les nuages optiquement fins ainsi que les aérosols. L'ATLID fournit des profils verticaux d'aérosols et de nuages fins, constituant le cœur de ma mission de validation par comparaison avec les observations au sol .

Caractéristiques techniques d'ATLID

L'ATLID mesure les profils atmosphériques dans une direction proche du nadir (décalage de 3 degrés le long de la trajectoire du satellite), avec une résolution verticale d'environ 103 m (du sol à 20,2 km d'altitude) et de 500 m (de 20,2 à 40 km d'altitude).



The ATLID Instrument onboard EarthCARE

FIGURE 2.2 – L'instrument ATLID embarqué sur EarthCare

TABLE 2.2 – Paramètres de performance clés d'ATLID

Paramètre	Valeur
Longueur d'onde de fonctionnement	354,8 nm
Énergie émise	38 mJ
Diamètre de l'empreinte du récepteur	30 m
Fréquence de répétition des impulsions (PRF)	51 Hz
Largeur d'impulsion de transmission	20 ns
Gamme d'altitude	-0,5 à +40 km
Intervalle d'échantillonnage vertical	103 m (jusqu'à 20,2 km) et 500 m (20,2-40 km)
Intervalle d'échantillonnage le long de la trajectoire	285 m (2 tirs accumulés à bord)
Gamme dynamique	10^{-7} à $9,61 \times 10^{-3} \text{ sr}^{-1} \text{ m}^{-1}$
Stabilité radiométrique	1%

Principe de fonctionnement

ATLID fonctionne selon le principe suivant :

Émission : L'instrument émet des impulsions laser ultraviolettes (355 nm) vers l'atmosphère terrestre avec une fréquence de 51 Hz, soit environ 140 m de résolution spatiale le long de la trajectoire du satellite.

Interaction atmosphérique : Ces impulsions laser interagissent avec deux types de particules dans l'atmosphère :

- Les **molécules d'air** (diffusion Rayleigh) - signal de référence
- Les **aérosols et nuages** (diffusion Mie) - signal d'intérêt scientifique

Réception : Un télescope de 60 cm de diamètre collecte la lumière rétrodiffusée par ces particules. L'analyse de cette lumière permet de déterminer la distribution verticale des aérosols et des nuages dans l'atmosphère.

Mesures obtenues : ATLID fournit des profils verticaux de propriétés atmosphé-

riques essentiels pour l'étude du climat et de la qualité de l'air.

Approche d'échantillonnage

ATLID utilise une stratégie d'échantillonnage vertical adaptée à la distribution du signal atmosphérique.

Principe d'adaptation : Cette approche tire parti de la distribution naturelle du signal atmosphérique :

- **Basses altitudes** : Signal fort grâce à la densité élevée de particules → résolution fine possible
- **Hautes altitudes** : Signal plus faible → résolution réduite pour améliorer le rapport signal/bruit

Cette stratégie optimise la qualité des mesures en fonction des caractéristiques physiques de l'atmosphère, garantissant des données exploitables sur toute la gamme d'altitude couverte par l'instrument.

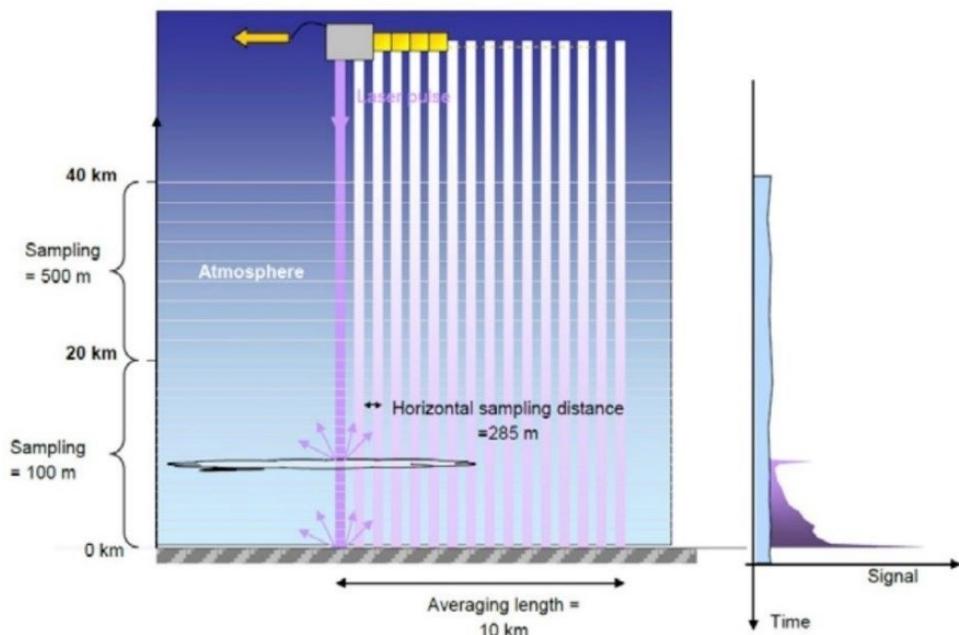


FIGURE 2.3 – Approche d'échantillonnage et de restitution d'ATLID

2.2 Contexte scientifique

Les données satellitaires constituent aujourd'hui un pilier essentiel de la recherche climatique et de la prévision météorologique. Cependant, leur exploitation scientifique nécessite une validation rigoureuse pour garantir leur fiabilité et leur précision.

2.2.1 Nécessité de la validation satellitaire :

La validation des données satellites répond à plusieurs enjeux critiques. Premièrement, les instruments spatiaux évoluent dans un environnement hostile (radiations, variations thermiques extrêmes) qui peut affecter leur calibration au cours du temps. Deuxièmement,

les algorithmes de traitement des données brutes (niveau 0) vers les produits géophysiques (niveau 2) nécessitent une validation avec des mesures de référence indépendantes.

Les niveaux de traitement des données satellitaires :

Le traitement des données satellitaires s'effectue selon trois niveaux standardisés :

- **Niveau 0 (L0) - Données brutes** : Signal électrique direct du détecteur, sans traitement géophysique, exprimé en unités instrumentales (volts, comptes)
- **Niveau 1 (L1) - Données calibrées** : Correction des effets instrumentaux, calibration radiométrique et géométrique, converties en unités physiques (puissance rétrodiffusée, géolocalisation)
- **Niveau 2 (L2) - Produits géophysiques** : Application d'algorithmes d'inversion pour obtenir les grandeurs atmosphériques (extinction, rétrodiffusion, classification des cibles)

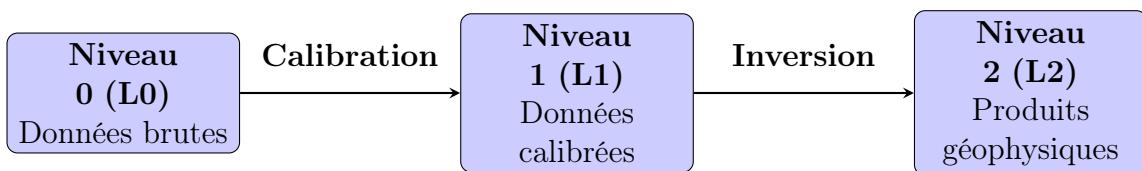


FIGURE 2.4 – Chaîne de traitement des données lidar

Chaque niveau nécessite une validation spécifique : validation technique pour L0, validation géométrique et radiométrique pour L1, et validation géophysique pour L2. Ma mission se concentre principalement sur la validation des produits L1 et L2 d'ATLID. Les observatoires au sol, comme SIRTA, constituent une ressource précieuse pour ce processus en fournissant des mesures continues et calibrées qui permettent la comparaison avec les observations spatiales. Cette approche de comparaison multi-instrumentale, malgré certaines limitations qui seront abordées ultérieurement, reste un élément important de la stratégie de validation des agences spatiales (ESA, NASA).

2.2.2 Continuité des observations lidar spatiales

La mission EarthCare s'inscrit dans la continuité des observations lidar atmosphériques spatiales initiées avec CALIPSO (2006). Bien qu'AEOLUS (2018) se concentre sur la mesure du vent atmosphérique plutôt que sur les nuages et aérosols, ces missions lidar complémentaires enrichissent notre capacité d'observation globale de l'atmosphère. Cette continuité temporelle est cruciale pour maintenir des séries climatiques cohérentes et détecter les tendances à long terme dans l'évolution des nuages et aérosols atmosphériques.

2.3 Problématique à résoudre

La validation des données ATLID soulève plusieurs défis techniques et scientifiques qu'il convient de résoudre pour garantir la qualité des produits EarthCare.

Défis de colocalisation :

Le premier défi consiste à synchroniser les mesures spatiales et terrestres. EarthCare ne survole SIRTA qu'occasionnellement, avec des fenêtres d'observation de quelques secondes, tandis que les instruments au sol mesurent en continu. Il faut donc développer des méthodes automatisées pour identifier et extraire les données correspondantes dans les deux systèmes.

Différences instrumentales :

ATLID et les lidars au sol (SIRTA (IPRAL) et autres stations de validation) opèrent à la même longueur d'onde (355 nm), mais présentent des différences techniques importantes. La différence majeure réside dans la géométrie d'observation : ATLID observe vers le nadir (du satellite vers la Terre) tandis que les lidars au sol observent vers le zénith (de la Terre vers l'atmosphère).

Les autres différences concernent la résolution spatiale et temporelle, les formats de stockage des données, les algorithmes de calibration et d'inversion spécifiques à chaque instrument, ainsi que les technologies de détection utilisées. Ces différences nécessitent des algorithmes de normalisation et de correction pour permettre une comparaison quantitative valide entre les différents systèmes lidar.

Défis méthodologiques de la validation :

La validation des lidars spatiaux par comparaison avec des instruments au sol présente des défis méthodologiques liés aux différentes configurations géométriques possibles. La Figure 2.5 illustre les trois approches principales : lidar spatial, lidar aéroporté, et lidar au sol.

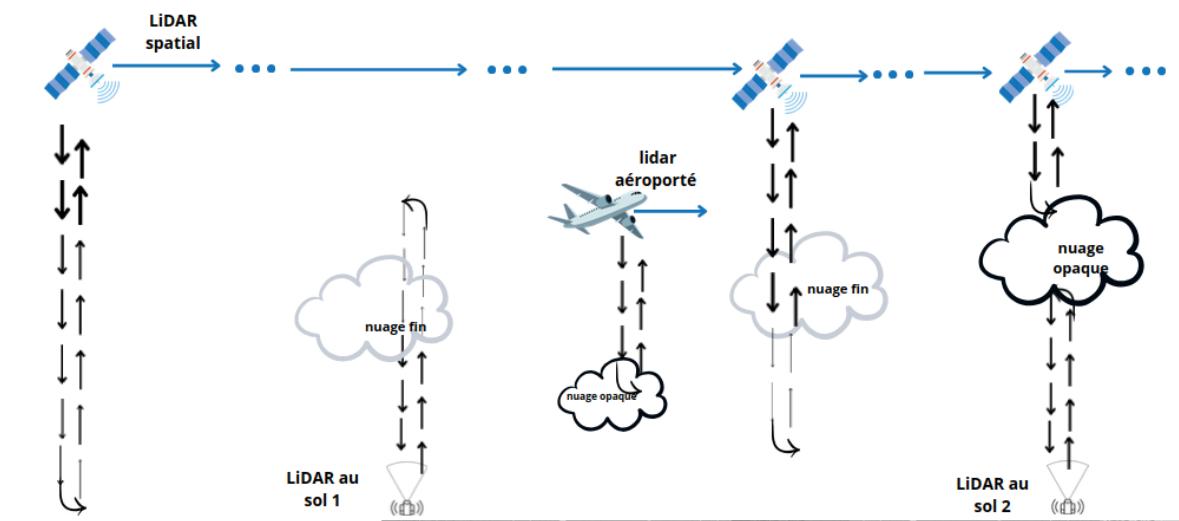


FIGURE 2.5 – Comparaison des géométries d'observation pour la validation des données lidar spatiales

Les lidars aéroportés offrent une géométrie de mesure identique au satellite (nadir), garantissant une comparaison directe. Cependant, leur utilisation présente des contraintes opérationnelles majeures : coût prohibitif des campagnes, disponibilité limitée pour synchroniser les vols avec les passages satellitaires, et couverture spatiale restreinte.

Les lidars au sol, bien que plus accessibles et opérationnels en continu, mesurent dans la géométrie opposée (zénith). Cette configuration crée des différences dans l'interaction avec les nuages selon leur opacité : les nuages opaques peuvent totalement atténuer le signal dans une direction mais permettre une transmission partielle dans l'autre, tandis que les nuages semi-transparents permettent une comparaison partielle entre les deux systèmes.

Malgré ces limitations géométriques, les lidars au sol restent l'approche la plus viable pour une validation systématique et continue des données ATLID, permettant l'accumulation de statistiques sur de longues périodes avec des coûts maîtrisés.

2.4 Objectifs de ma mission

Dans le contexte de validation des données EarthCARE, ma mission d’alternance consiste à développer des outils automatisés pour valider les données ATLID par comparaison avec les observations au sol.

Objectif principal : Créer une chaîne complète de validation automatisée permettant la colocalisation, comparaison et validation des données ATLID avec les lidars au sol du SIRTA. Cette approche multi-instrumentale garantit une validation robuste dans différentes conditions atmosphériques.

Automatisation du processus : Développer un système automatique depuis l’identification des passages satellite jusqu’à la génération de statistiques de comparaison, permettant un traitement systématique de grandes quantités de données.

Quantification des incertitudes de comparaison : Évaluer les incertitudes liées aux différences instrumentales, à la colocalisation spatio-temporelle, et aux méthodes de traitement lors de la comparaison entre ATLID et les lidars au sol pour chaque version des données (L2AA, L2AB, L2BA, etc.), afin de fournir aux utilisateurs finaux (chercheurs, modélisateurs) une évaluation de la fiabilité des résultats de validation obtenus.

2.4.1 Apports de la mission

Cette mission me permet de développer une expertise complète en télédétection atmosphérique à travers plusieurs aspects techniques et scientifiques :

- **Traitement de signal** : Méthodes de calibration des données lidar, algorithmes d’inversion pour l’extraction de paramètres géophysiques
- **Programmation Python** : Automatisation de chaînes de traitement, visualisation de données scientifiques, et création d’outils d’analyse statistique pour la comparaison multi-instrumentale
- **Données lidar atmosphériques** : Compréhension des équations fondamentales, manipulation des coefficients de rétrodiffusion et d’extinction, ainsi que l’interprétation des profils verticaux d’aérosols et de nuages
- **Validation de missions spatiales** : Méthodes de colocalisation, techniques de comparaison inter-instrumentale, et quantification des incertitudes de mesure

Cette formation pratique me permet de contribuer concrètement à l’effort international de validation des missions spatiales tout en acquérant des compétences transférables en télédétection, traitement de données, et programmation scientifique.

Chapitre 3

Formalisme et définitions

Cette section présente les définitions et équations fondamentales utilisées dans ce travail pour l'analyse des données lidar.

3.1 Équations lidar fondamentales

Le signal lidar détecté est décrit par les équations suivantes :

$$ATB(\lambda, z) = (\beta_{mol}(\lambda, z) + \beta_{part}(\lambda, z)) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z (\alpha_{mol}(\lambda, z') + \alpha_{part}(\lambda, z')) dz'} \quad (3.1)$$

$$APB(\lambda, z) = \beta_{part}(\lambda, z) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z (\alpha_{mol}(\lambda, z') + \alpha_{part}(\lambda, z')) dz'} \quad (3.2)$$

$$AMB(\lambda, z) = \beta_{mol}(\lambda, z) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z (\alpha_{mol}(\lambda, z') + \alpha_{part}(\lambda, z')) dz'} \quad (3.3)$$

$$AMB_{clear}(\lambda, z) = \beta_{mol}(\lambda, z) \times e^{-2 \int_{z_{sat}}^z \alpha_{mol}(\lambda, z') dz'} \quad (3.4)$$

$$SR(\lambda, z) = 1 + \frac{APB(\lambda, z)}{AMB(\lambda, z)} = 1 + \frac{\beta_{part}(\lambda, z)}{\beta_{mol}(\lambda, z)} \quad (3.5)$$

3.2 Définitions des variables

- $ATB(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion total atténué ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $APB(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion particulaire atténué ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $AMB(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion moléculaire atténué ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $AMB_{clear}(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion moléculaire pour ciel clair ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $SR(\lambda, z)$: rapport de rétrodiffusion (sans dimension)
- $\beta_{mol}(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion moléculaire ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $\beta_{part}(\lambda, z)$: coefficient de rétrodiffusion particulaire ($m^{-1}sr^{-1}$)
- $\alpha_{mol}(\lambda, z')$: coefficient d'extinction moléculaire (m^{-1})
- $\alpha_{part}(\lambda, z')$: coefficient d'extinction particulaire (m^{-1})
- z_{sat} : altitude du satellite (m)
- z : altitude considérée (m)
- λ : longueur d'onde laser (nm)

Le rapport de rétrodiffusion permet de quantifier la présence de particules par rapport à l'atmosphère pure. Cette approche suit la méthodologie développée pour ATLID, où le scattering ratio constitue la variable de référence pour la détection de nuages et la validation des produits L1 (Feofilov 2022).

Interprétation physique : $SR = 1$: Atmosphère pure (cas théorique) ; $SR > 1$: Présence de particules ; plus SR est élevé, plus la concentration de particules est importante.

Seuils pratiques : En pratique, le bruit instrumental et les incertitudes de mesure font que la détection fiable des particules nécessite des seuils plus élevés. Selon Feofilov et al. (2023), un seuil de $SR = 5$ est généralement requis pour une détection robuste des couches de particules atmosphériques, permettant de distinguer le signal des particules du bruit de fond.

Chapitre 4

Exposé des travaux effectués

4.1 Vue d'ensemble de la méthodologie développée

Dans le cadre de ma mission de validation des données ATLID, j'ai développé une chaîne complète d'outils automatisés permettant la colocalisation, la comparaison et la validation des données satellitaires avec plusieurs lidars au sol. Cette approche multi-instrumentale garantit une validation robuste et permet une caractérisation précise des performances d'ATLID dans différentes conditions atmosphériques et géographiques.

La méthodologie développée s'articule autour de trois composantes principales : l'algorithme de colocalisation spatiale et temporelle, les outils de visualisation automatisée, et le système de comparaison statistique. L'ensemble du processus a été automatisé en Python pour permettre un traitement systématique et reproductible des données.

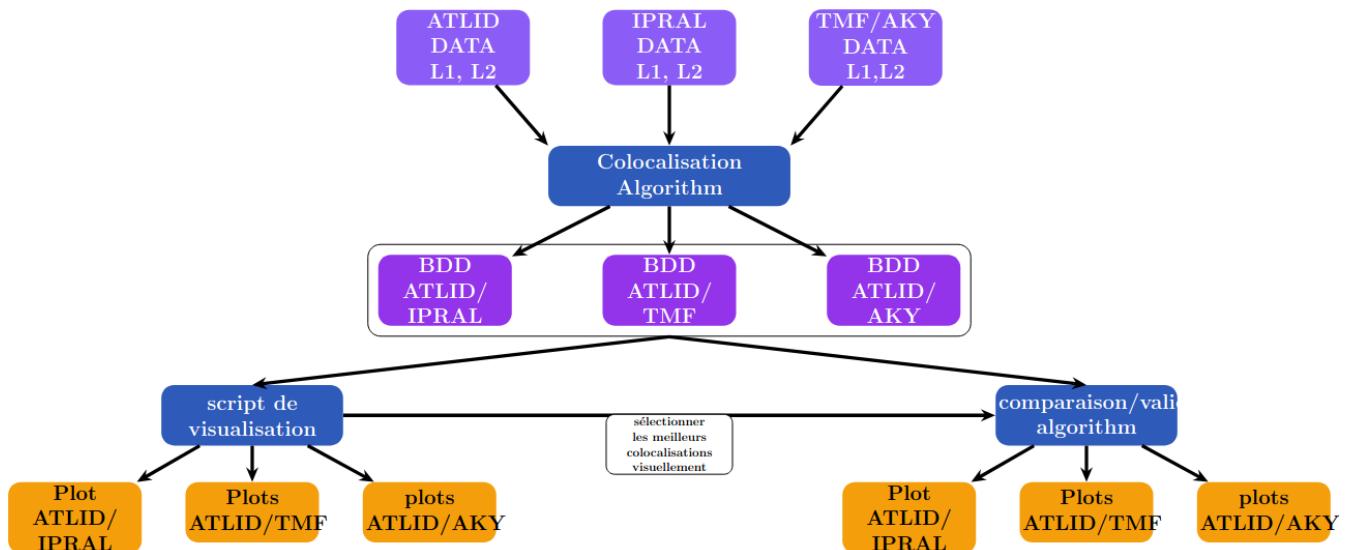


FIGURE 4.1 – Schéma du workflow de validation pour la mission Earthcare ATLID

4.1.1 Répartition géographique des stations de validation

Le réseau de validation utilise trois lidars au sol stratégiquement répartis pour couvrir différentes conditions climatiques et géographiques. Cette distribution permet une validation dans des environnements atmosphériques variés, renforçant la robustesse de la caractérisation des performances d'ATLID.



FIGURE 4.2 – Localisation géographique des lidars au sol utilisés pour la validation ATLID

4.1.2 Caractéristiques techniques des instruments de validation

La validation multi-instrumentale nécessite une connaissance précise des spécifications techniques de chaque lidar utilisé. Le tableau suivant présente les caractéristiques principales des trois systèmes lidar employés pour la validation des données ATLID.

TABLE 4.1 – Comparaison des 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	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

4.1.3 Développement de l'algorithme de colocalisation

L'algorithme de colocalisation développé vise à identifier automatiquement les passages d'EarthCare au-dessus des sites de validation au sol et à extraire les données ATLID correspondantes pour comparaison. EarthCare effectue **15 tours par jour** autour de la Terre sur une orbite héliosynchrone.

Cette configuration orbitale présente plusieurs avantages pour les observations atmosphériques : elle garantit des conditions d'éclairage constantes pour les instruments passifs, permet une couverture globale systématique, et facilite la planification des mesures de validation au sol.

Cependant, parmi ces 15 passages quotidiens, tous ne sont pas exploitables pour la validation : seule une fraction passe suffisamment proche des sites d'observation au sol. Il

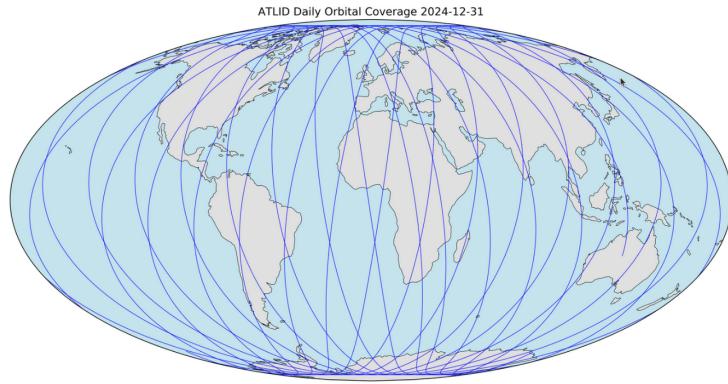


FIGURE 4.3 – Trajectoires orbitales d'EarthCare sur une journée

est donc nécessaire d'appliquer un **filtrage spatial et temporel** rigoureux pour identifier les cas de colocalisation pertinents .

Filtrage spatial

Le filtrage spatial constitue la première étape de l'algorithme de colocalisation. Un **rayon de 50 à 200 km** a été déterminé comme optimal autour de chaque station de validation au sol, en cohérence avec les pratiques établies dans la littérature pour la validation de missions lidar spatiales.

Cette gamme de distances s'appuie sur le standard CALIPSO/EARLINET bien documenté : Pappalardo et al. (2010) utilisent un **rayon de 100 km** comme critère principal pour les mesures corrélatives, définissant la stratégie de mesures où "EARLINET participating stations have to perform measurements, as close in time as possible, when CALIPSO overpasses their location within a horizontal radius of 100 km".

Ce choix résulte d'un compromis entre plusieurs facteurs documentés :

- **Représentativité atmosphérique** : L'analyse de Pappalardo et al. (2010) montre que cette approche permet "an estimate of the typical scale length for aerosol spatial and temporal variability"
- **Disponibilité statistique** : Un rayon trop restrictif limite les opportunités de validation, tandis qu'un rayon trop large introduit des variabilités spatiales importantes

Filtrage temporel

Le filtrage temporel représente un défi particulier car les lidars au sol ne sont pas toujours en fonctionnement. Plusieurs facteurs affectent la disponibilité des données au sol :

- **Maintenance programmée** : Interventions techniques régulières sur les instruments
- **Conditions météorologiques** : Arrêt automatique par temps de pluie ou conditions dégradées
- **Pannes techniques** : Dysfonctionnements temporaires des systèmes
- **Horaires d'opération** : Certaines stations n'opèrent que pendant des créneaux spécifiques

Pour optimiser la comparaison, Pappalardo et al. (2010) établissent qu'une fenêtre d'observation de 150 minutes centrée sur le passage satellite est nécessaire pour étudier la

variabilité temporelle des champs d'aérosols et de nuages. Cette durée permet d'obtenir un temps d'intégration de 30 à 130 minutes pour les mesures EARLINET afin d'investiguer des échelles de longueur comparables aux résolutions horizontales de CALIPSO (5, 20 ou 80 km).

Résultats de colocalisation obtenus

L'application de l'algorithme de colocalisation sur les trois principales stations de validation a donné les résultats suivants :

TABLE 4.2 – Résultats de colocalisation par station de validation

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

Il convient de noter que ces résultats sont obtenus sur une période limitée, les données ATLID étant disponibles uniquement depuis août 2024. Cette contrainte temporelle explique l'adoption de critères de colocalisation plus larges (200 km de rayon et 4 heures de fenêtre temporelle) pour IPRAL/TMF et AKY, permettant d'obtenir un nombre suffisant de cas de validation malgré la courte période d'observation disponible. Pour TMF, les deux jeux de critères (4h/50km et 12h/150km) illustrent l'impact des paramètres de colocalisation sur le nombre de cas disponibles.

Ces résultats démontrent l'efficacité de l'algorithme développé et révèlent l'impact des critères de colocalisation sur le nombre de cas disponibles. La comparaison pour TMF montre qu'un assouplissement des contraintes (12h/150km vs 4h/50km) peut tripler le nombre de colocalisations disponibles pour la validation.

4.2 Résultats de comparaison et validation

4.2.1 Sélection visuelle des cas de colocalisation

Avant de procéder aux comparaisons quantitatives, une étape de sélection visuelle des meilleurs cas de colocalisation s'avère indispensable pour garantir la qualité des analyses. Pour faciliter cette sélection, j'ai développé des interfaces web interactives utilisant Streamlit qui automatisent la visualisation et l'exploration des colocalisations (voir Annexe A).

4.2.2 Scripts de visualisation automatisée

Principe de visualisation des rideaux lidar

Les rideaux lidar constituent un outil fondamental pour la visualisation et la comparaison des données de télédétection atmosphérique. Un rideau lidar représente une coupe verticale de l'atmosphère sous forme de profils de rétrodiffusion en fonction de l'altitude, permettant de visualiser les structures atmosphériques (nuages, couches d'aérosols) détectées par l'instrument.

L'objectif principal de ces visualisations est de permettre une comparaison visuelle directe des structures atmosphériques détectées simultanément par ATLID et les lidars au sol lors des événements de colocalisation identifiés par l'algorithme de colocalisation .

Différences entre rideaux sol et spatial

La nature fondamentalement différente des mesures spatiales et terrestres se traduit par des représentations distinctes des rideaux lidar :

Rideau lidar sol (dimension temporelle) :

- L'instrument reste fixe au sol en un point géographique donné
- Le rideau représente l'évolution temporelle de l'atmosphère au-dessus du site
- L'atmosphère "bouge" et évolue devant l'instrument fixe
- L'axe horizontal correspond au temps (heures, minutes)

Rideau lidar ATLID (dimension spatiale) :

- Le satellite se déplace rapidement le long de sa trajectoire orbitale
- Le rideau représente une coupe instantanée de l'atmosphère le long du trajet
- L'axe horizontal correspond à la distance géographique (kilomètres)
- Révèle la variabilité horizontale des structures atmosphériques

Exemples de comparaisons ATLID/IPRAL

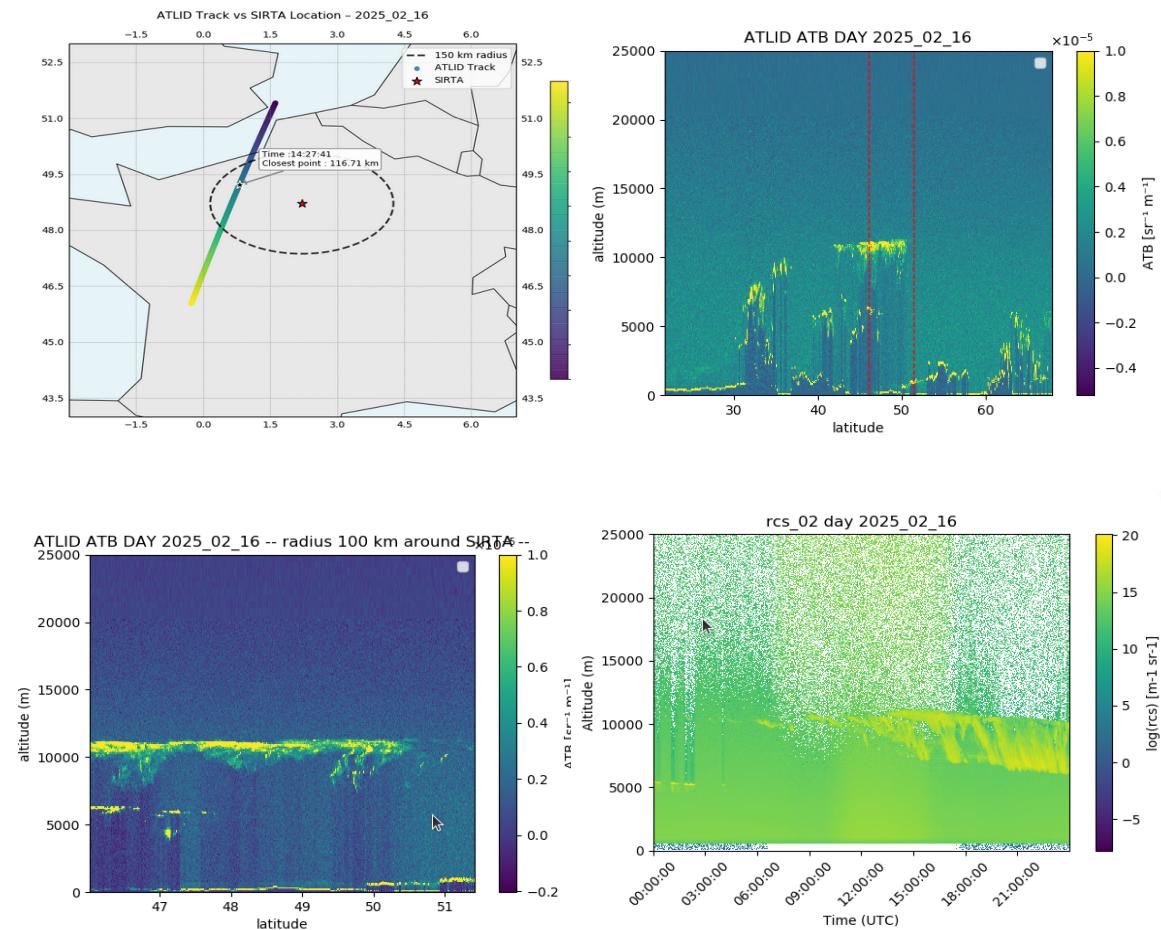


FIGURE 4.4 – Exemples de visualisations de colocalisation du 16 février 2025. (a) Trajectoire orbitale d'EarthCare au-dessus de la France, (b) Rideau spatial ATLID complet, (c) Zone de colocalisation ATLID, (d) Rideau temporel IPRAL au SIRTA

Figure 4.4(a) - Trajectoire orbitale : Carte montrant la trajectoire de passage d'EarthCare au-dessus de la France, avec la position du lidar IPRAL au SIRTA (étoile rouge) et la trace spatiale d'ATLID (ligne colorée).

Figure 4.4(b) - Rideau spatial ATLID complet : Profil vertical du coefficient de rétrodiffusion mesuré par ATLID sur l'ensemble de la trajectoire présentée en Figure 3.4(a), révélant les structures atmosphériques détectées.

Figure 4.4(c) - Zone de colocalisation : Zoom sur la portion du rideau ATLID correspondant à la zone de colocalisation avec IPRAL (zone encerclée en Figure 3.4(a)), permettant la comparaison directe.

Figure 4.4(d) - Rideau temporel IPRAL : Évolution temporelle des mesures IPRAL au SIRTA, montrant les structures atmosphériques observées au sol pendant la journée de colocalisation.

4.2.3 Validation avec le lidar IPRAL/SIRTA

Nécessité de la calibration

Pour effectuer une comparaison quantitative valide entre les données ATLID et les mesures au sol d'IPRAL, il est indispensable de disposer de produits géophysiques de même niveau de traitement. Pour les données ATLID distribuées sous forme de produits L1 /L2 , tandis que les données brutes d'IPRAL (niveau L0) nécessitent un traitement spécifique pour obtenir des grandeurs physiques comparables.

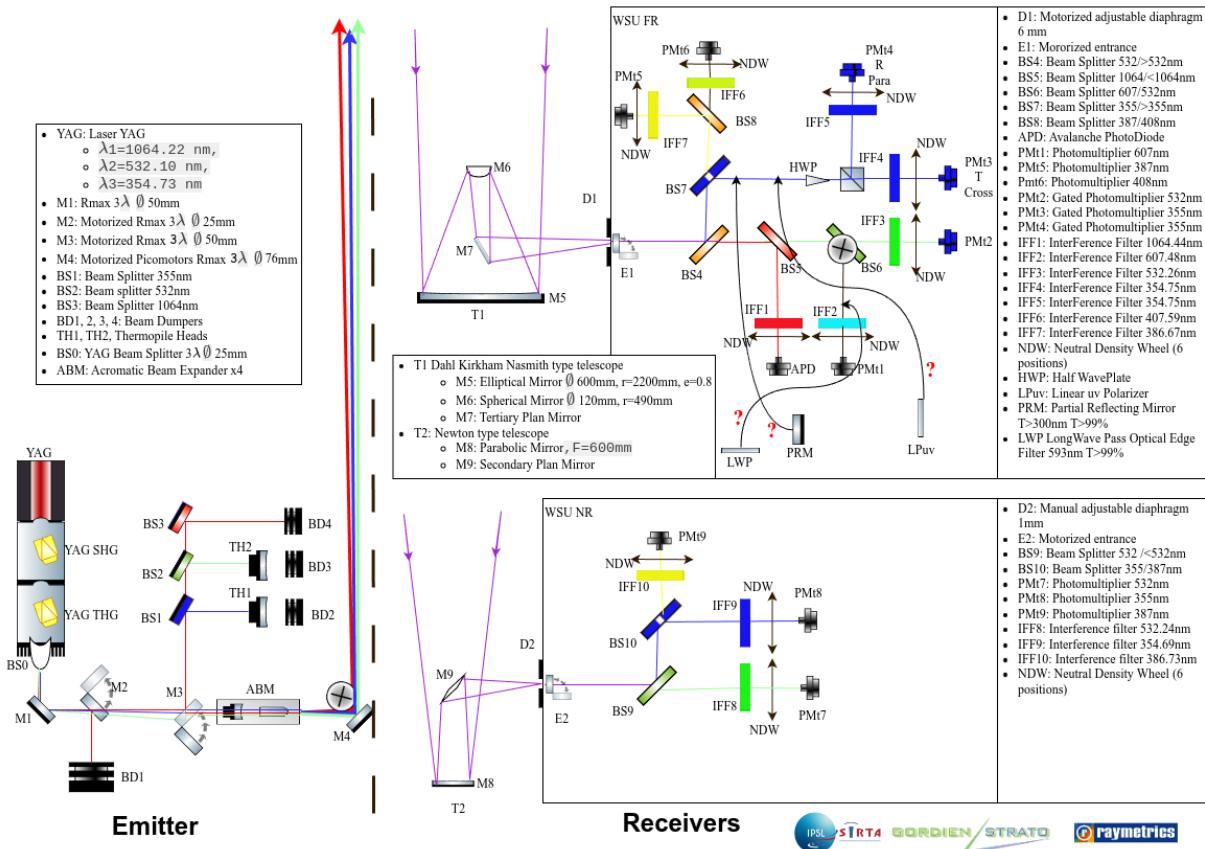


FIGURE 4.5 – Architecture et instrumentation IPRAL (SIRTA). Source : Document technique IPRAL fourni par l'équipe SIRTA lors de la présentation de l'instrument (mai 2024).

IPRAL est un instrument lidar multi-spectral très performant présentant les caractéristiques instrumentales suivantes :

- **Capacités multi-spectrales** : IPRAL fonctionne sur six longueurs d'onde (355nm, 387nm, 408nm, 532nm, 607nm, 1064nm), permettant une caractérisation complète des propriétés optiques des aérosols et nuages.
- **Télescopes** : Configuration double (far range / near range)
- **Résolution verticale** : 15 m sur une gamme de 15 m à 60 km
- **Détection** : Modes photocounting et analogique
- **Polarisation** : Mesures parallèle et perpendiculaire

Pour la validation d'ATLID, nous utilisons spécifiquement la longueur d'onde 355 nm en modes photocounting et analogique, avec le signal total (parallèle + perpendiculaire), afin d'assurer la compatibilité avec les mesures d'ATLID.

Traitement L0 → L1 (Produits géométriques) - Développement d'une chaîne de calibration

Dans le cadre de cette mission, nous avons développé une chaîne de calibration spécifique pour traiter les données brutes (L0) d'IPRAL et obtenir des produits calibrés (L1) comparables aux données ATLID. Ce développement a été réalisé en collaboration étroite avec l'équipe SIRTA à travers plusieurs échanges techniques pour comprendre les spécificités instrumentales et valider notre approche méthodologique.

Cette chaîne de calibration développée comprend plusieurs étapes automatisées, depuis la sélection des plages de référence jusqu'à la fusion des signaux photocounting et analogique, permettant d'obtenir des coefficients de rétrodiffusion calibrés en unités physiques.

Ce développement a été réalisé en collaboration étroite avec l'équipe SIRTA à travers plusieurs échanges techniques et s'inspire des algorithmes de traitement développés par la communauté lidar (communication personnelle, équipe SIRTA, 2024).

Sélection automatique de la plage de calibration

La première étape critique du processus de calibration consiste à identifier automatiquement la zone de référence optimale pour le calcul des paramètres K et ΔS . Un algorithme adaptatif a été développé pour gérer différentes situations atmosphériques :

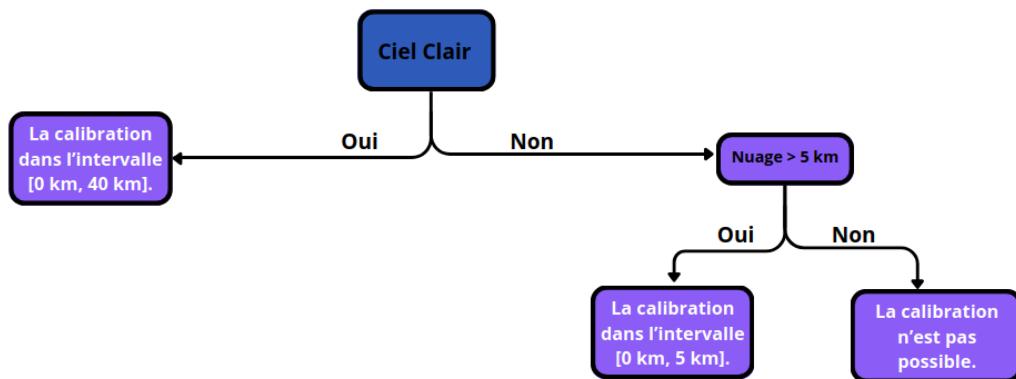


FIGURE 4.6 – Algorithme de sélection automatique de la plage de calibration développé dans le cadre de cette mission

Logique de sélection :

L'algorithme suit un arbre de décision basé sur les conditions atmosphériques détectées, développé à travers des échanges techniques approfondis avec l'équipe SIRTA, en collaboration avec sergey khaykin (LATMOS), et finalisé avec mon maître d'apprentissage :

Cas 1 - Ciel clair détecté : Lorsque l'atmosphère est transparente, la calibration s'effectue dans l'intervalle standard [0 km, 40 km] où le signal de référence atmosphérique est stable et bien caractérisé.

Cas 2 - Présence de nuages > 5 km : Si des nuages sont détectés au-dessus de 5 km d'altitude, l'algorithme adapte la plage de calibration à l'intervalle [0 km, 5 km] pour éviter les perturbations dues aux structures nuageuses.

Cas 3 - Nuages très bas : Lorsque les nuages sont présents à très basse altitude (2-3 km), la calibration automatique devient impossible car il n'existe plus de zone de ciel clair suffisante pour établir une référence fiable.

Calcul des paramètres de calibration K et ΔS

Cette méthodologie s'inspire du code de traitement ARC (Siomos et al. <https://github.com/nikolaos-siomos/arc>) et a été adaptée selon les recommandations de l'équipe SIRTA pour les spécificités d'IPRAL. Nous avons ensuite apporté nos propres modifications pour optimiser le processus de calibration selon les contraintes de notre étude. :

1. Calcul d'AMB clear théorique : Utilisation de l'équation (4) définie au chapitre 3 pour calculer le coefficient de rétrodiffusion moléculaire pour ciel clair.

2. Récupération des signaux : Extraction des signaux photocounting et analogique dans la plage sélectionnée par l'algorithme Figure 13.

3. Calcul de K et ΔS : À partir de deux points de référence, résolution du système :

$$\Delta S = \frac{AMB_1 \cdot S_2 \cdot z_2^2 - AMB_2 \cdot S_1 \cdot z_1^2}{AMB_1 \cdot z_2^2 - AMB_2 \cdot z_1^2}$$
$$K = \frac{AMB_1}{(S_1 - \Delta S) \cdot z_1^2}$$

Fusion des signaux photocounting et analogique :

Création d'un profil vertical continu en combinant les deux modes de détection selon leur domaine de validité :

- **Analogique** : Utilisé pour les altitudes < 10 km (signal fort, évite la saturation)
- **Photocounting** : Utilisé pour les altitudes > 10 km (signal faible, meilleure sensibilité)

Cette séparation à 10 km, recommandée par les spécialistes du domaine, optimise la détection : le mode analogique gère les signaux intenses des basses altitudes sans saturer, tandis que le photocounting capture efficacement les faibles signaux des hautes altitudes.

Exemple de calibration

La figure suivante illustre un exemple concret du processus de calibration appliquée aux données L0 d'IPRAL :

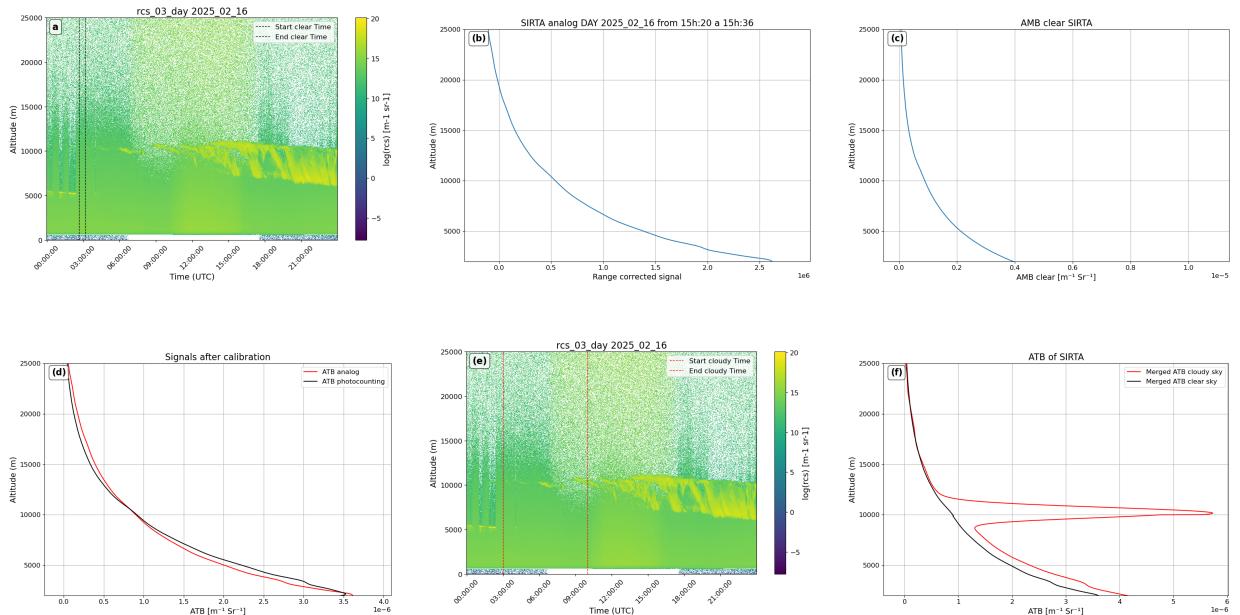


FIGURE 4.7 – Exemple de processus de calibration IPRAL : (a) ciel clair, (b) signal analogique, (c) AMB clear, (d) signal à fusionner, (e) ciel nuageux, (f) comparaison des signaux

Cet exemple illustre les étapes successives du processus de calibration L0→L1 :

Étape 1 - Sélection du ciel clair : Dans ce cas, l'algorithme détecte l'absence de nuages sur l'ensemble du profil vertical, (figure a).

Étape 2 - Extraction des signaux : Récupération des signaux analogique et photocounting avec calcul de la moyenne sur la plage sélectionnée à l'étape 1 (figure b - signal analogique).

Étape 3 - Calcul des paramètres : Calcul d'AMB clear théorique (figure c), puis détermination des constantes K et S selon les formules établies.

Étape 4 - Traitement photocounting : Application du même processus au signal photocounting, puis fusion des signaux analogique et photocounting (figure d).

Étape 5 - Calibration finale : Application des paramètres K et ΔS à l'ensemble du rideau pour obtenir le signal calibré en unités physiques $m^{-1}sr^{-1}$ (figure e).

Étape 6 - Validation : Test et comparaison entre le signal nuageux et le signal de ciel clair pour vérifier la cohérence de la calibration (figure f).

Traitements L1 → L2 (Produits géophysiques)

Une chaîne de traitement L1 → L2 est actuellement en cours de développement. Cette étape constituera la phase suivante de notre travail de validation, permettant une évaluation complète des produits géophysiques ATLID une fois la calibration L1 validée.

4.2.4 Méthodologie de comparaison

Critères de sélection des cas de validation

Comme présenté précédemment dans la section problématique (Figures 2.4 et 2.5), la comparaison entre ATLID (lidar spatial) et les lidars au sol s'effectue dans le contexte de

géométries de mesure opposées. Selon les conditions atmosphériques présentes entre les deux instruments, trois situations peuvent se présenter :

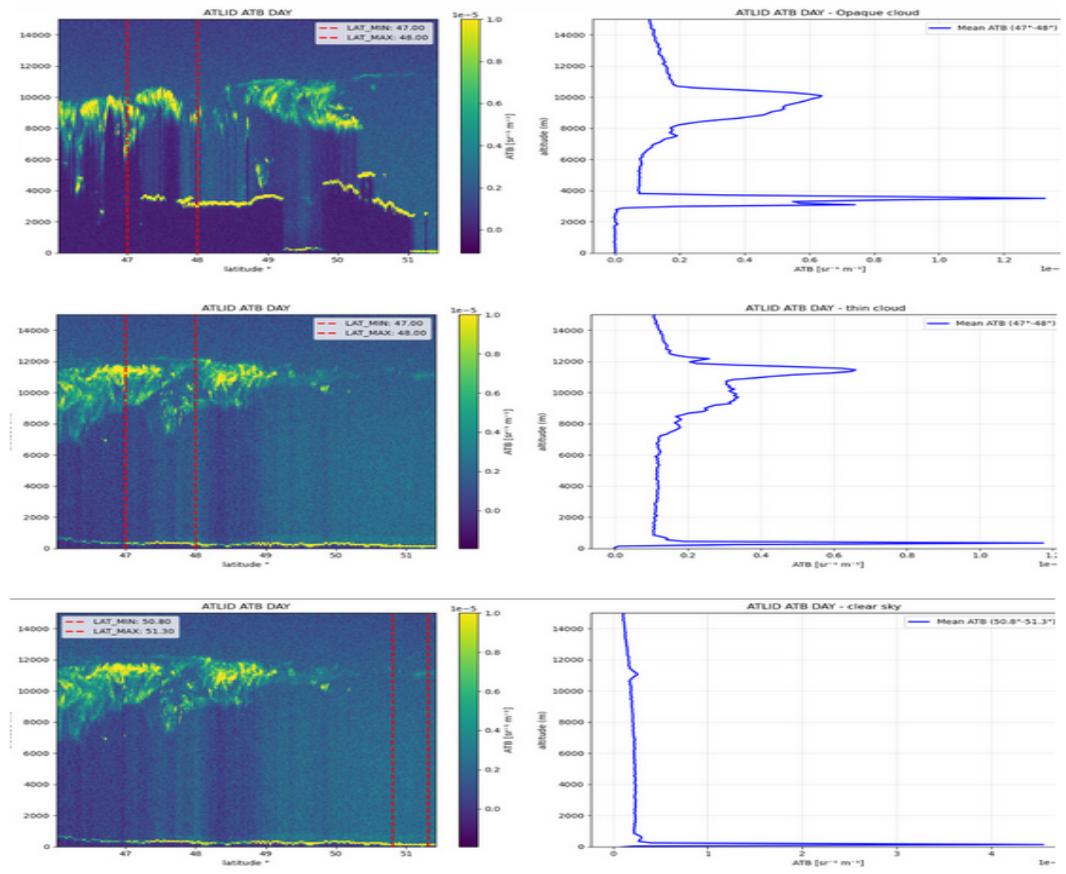


FIGURE 4.8 – Les trois situations atmosphériques possibles vues par le lidar spatial

Cas 1 - Nuage opaque : Présence d'un nuage dense entre les instruments. Le lidar spatial est totalement atténué avant d'atteindre le sol, et c'est le même cas pour le lidar sol qui subit une atténuation totale dans la direction opposée, rendant impossible toute comparaison des profils. Ce cas est exclu de la validation.

Cas 2 - Nuage semi-transparent : Présence de nuages fins ou de couches d'aérosols permettant une transmission partielle du signal spatial. Cette configuration est **optimale pour la validation** car elle permet de comparer le chevauchement des signaux des deux instruments tout en évitant l'atténuation totale du signal.

Cas 3 - Ciel clair : Absence de nuages significants entre les instruments. Bien que permettant une transmission maximale, ce cas présente moins d'intérêt pour la validation des algorithmes de détection de cibles atmosphériques.

Stratégie de sélection retenue :

Conscients des limitations des géométries opposées mentionnées précédemment, nous sélectionnons prioritairement les cas où :

- **Nuages semi-transparents ou couches d'aérosols** sont présents
- **Signal ATLID non nul** sur l'ensemble du profil vertical
- **Absence d'atténuation totale** permettant la comparaison quantitative
- **Structures atmosphériques communes** identifiables sur les deux instruments

Variables utilisées pour la comparaison

La validation d'ATLID s'effectue pour les données de deux niveaux L1 et L2, suivant les méthodologies établies dans la littérature pour la validation des lidars spatiaux : **1- Validation niveau L1 (données calibrées)** :

Pour le niveau L1, la comparaison s'appuie sur le **rapport de rétrodiffusion lidar SR** (Scattering Ratio), tel que défini dans la section 3.1 par l'équation (5). Ce paramètre permet une comparaison directe entre les mesures ATLID et les lidars au sol en quantifiant la contribution des particules atmosphériques par rapport au signal moléculaire de référence.

2- Validation niveau L2 (produits géophysiques) :

Pour le niveau L2, la validation utilise le **coefficent de rétrodiffusion particulaire β_{part}** , qui représente la contribution spécifique des particules atmosphériques (aérosols et gouttelettes nuageuses) à la rétrodiffusion totale. Cette méthodologie est cohérente avec les pratiques de validation établies par le réseau EARLINET pour les "backscatter coefficient profiles" Pappalardo2010.

4.2.5 Comparaison ATLID/TMF

Statistiques de co-localisation

Comme présenté dans le Tableau 3.2, la co-localisation entre ATLID et TMF basée sur les critères de 12h et 150 km a permis d'identifier **43 cas de validation** au total, répartis sur différentes versions de données. Voici quelques cas d'étude pour différentes versions des données :

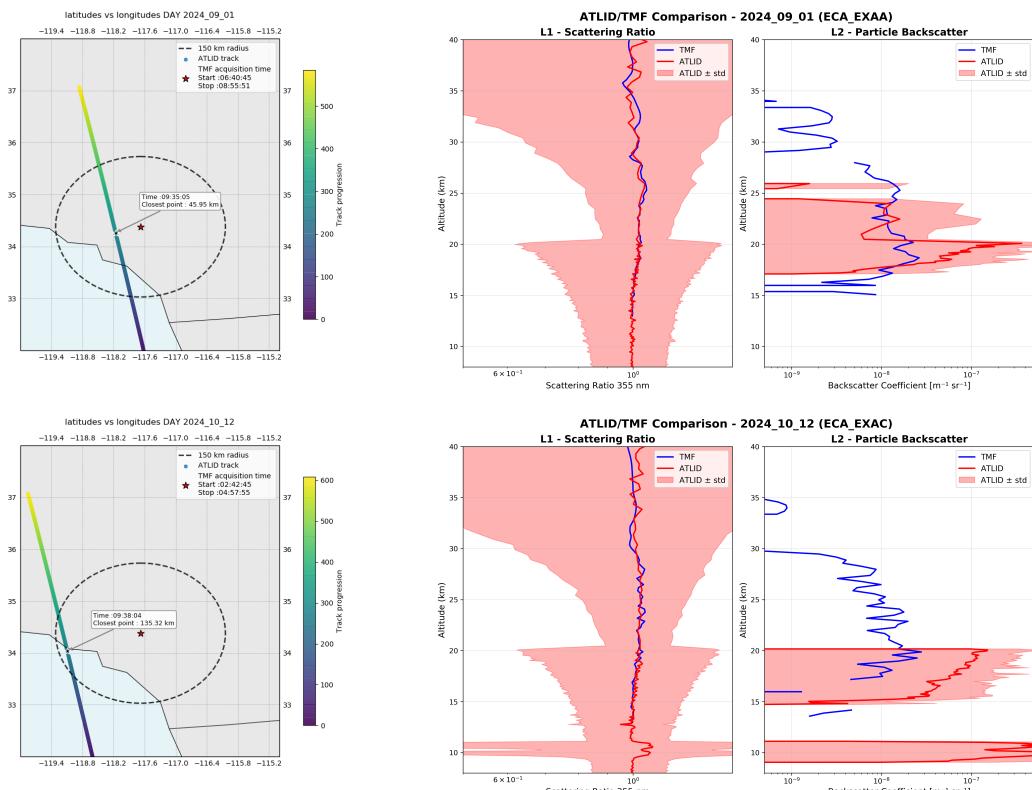


FIGURE 4.9 – Comparaisons ATLID/TMF - Exemples représentatifs pour différentes versions de données.

L1 : Les données de Scattering Ratio montrent un accord satisfaisant entre ATLID et TMF , validant la qualité de la calibration instrumentale.

L2 : Les données de coefficient de rétrodiffusion particulaire révèlent une surestimation systématique des valeurs ATLID par rapport à TMF, indiquant des problèmes dans les algorithmes de traitement L2.

4.2.6 Comparaison ATLID/AKY

Les données du lidar AKY d'Antikythera constituent une source de validation complémentaire pour ATLID, offrant des mesures dans des conditions atmosphériques différentes de celles observées aux autres stations. L'analyse de ces données est actuellement en cours de développement. Les premiers résultats de comparaison ATLID/AKY sont présentés pour deux cas d'étude représentatifs :

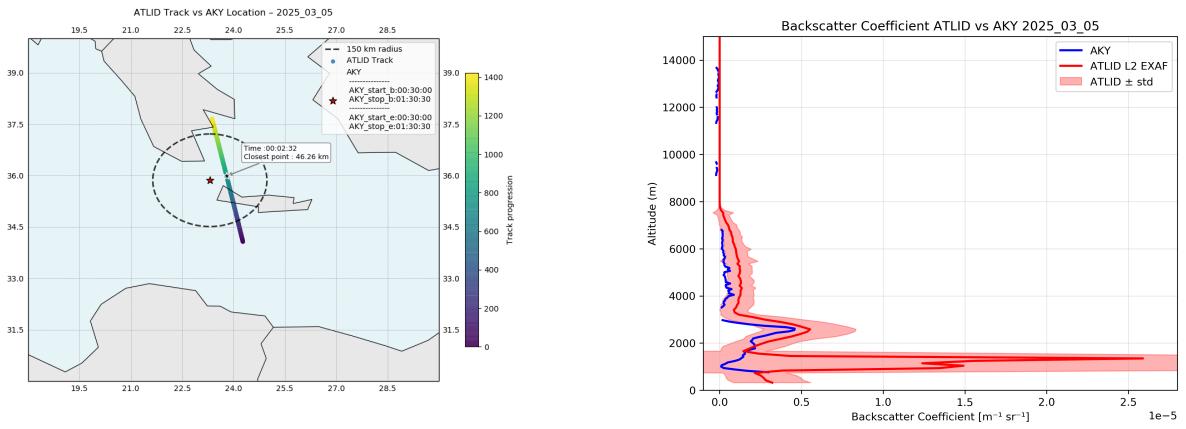


FIGURE 4.10 – Comparaison ATLID/AKY - 2025-03-05 (ECA_EXAE). Gauche : Passage ATLID, Droite : Profils de coefficient de rétrodiffusion

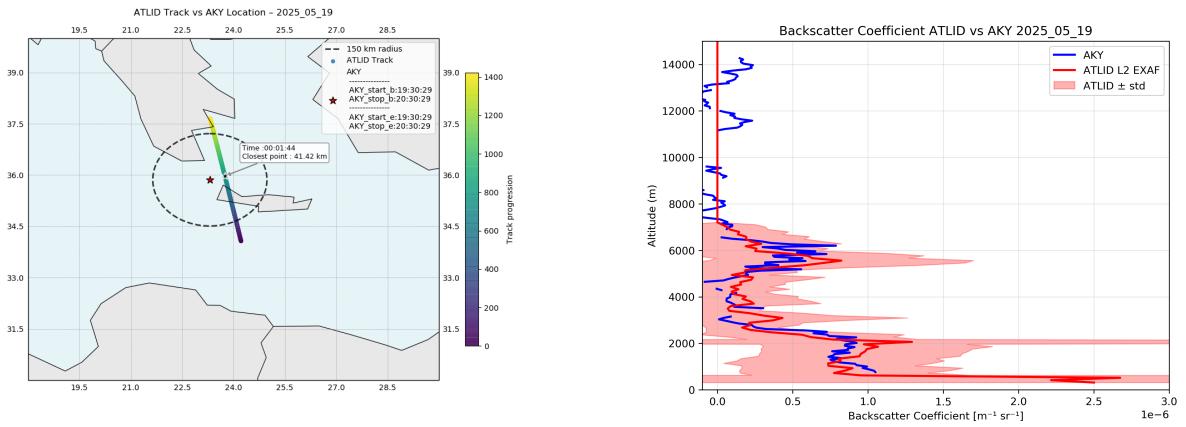


FIGURE 4.11 – Comparaison ATLID/AKY - 2025-05-19 (ECA_EXAF). Gauche : Passage ATLID, Droite : Profils de coefficient de rétrodiffusion

4.2.7 Conclusions préliminaires sur les comparaisons ATLID avec les lidars sol

Cette étude de validation d'ATLID basée sur les observations au sol du TMF et AKY a permis d'évaluer les performances du lidar spatial EarthCARE à deux niveaux de traitement.

Il est important de noter que la validation d'un lidar spatial par comparaison avec des lidars sol est une approche méthodologiquement valide (Pappalardo et al., 2010), mais elle nécessite des conditions de co-localisation optimales. Dans le cadre de cette étude, bien que nous ayons développé et validé la méthodologie de comparaison, nous n'avons identifié qu'un nombre limité de jours présentant des co-localisations intéressantes (comme mentionnés précédemment). Pour faire une étude d'analyse statistique détaillée, il nous faut plus de co-localisations intéressantes.

Néanmoins, les quelques cas analysés permettent d'apporter les conclusions préliminaires suivantes :

Niveau L1 :

Les comparaisons du rapport de rétrodiffusion (Scattering Ratio) montrent un **bon accord** entre ATLID et TMF sur 25 jours de co-localisation, validant la qualité de la calibration instrumentale d'ATLID. Cette cohérence s'observe à travers plusieurs indicateurs statistiques :

- Biais moyen : $\pm 0.2 \%$
- Écart-type : $\pm 2.8 \%$
- Erreur quadratique moyenne (RMSE) : 1.6 %

Ces résultats confirment la fiabilité des mesures de base du système spatial au niveau L1 et suggèrent que les processus de calibration d'ATLID fonctionnent de manière satisfaisante pour les paramètres fondamentaux de rétrodiffusion.

Niveau L2 :

Les données de coefficient de rétrodiffusion particulaire révèlent des **performances contrastées** selon l'instrument de référence :

- **ATLID/AKY** : Bon accord observé dans la troposphère. L'analyse statistique (2 cas de co-localisation) révèle :
 - Biais moyen : $\pm 34.6 \%$
 - Écart-type : $\pm 49.5 \%$
- **ATLID/TMF** : Accord limité avec surestimation systématique d'ATLID. L'analyse statistique sur (25 cas de co-localisation) révèle :
 - Biais moyen : $\pm 7.1 \%$
 - Écart-type : $\pm 376.6 \%$

Ces différences s'expliquent par deux facteurs principaux :

1. Gammes d'altitude différentes :

- AKY : Troposphère (0-13 km d'altitude) - région atmosphérique dense avec une forte concentration d'aérosols
- TMF : Stratosphère (14-44 km d'altitude) - région atmosphérique plus ténue avec une faible concentration particulaire

2. Niveaux de signal distincts :

- AKY : Signal de l'ordre de 10^{-5} à $10^{-6} \text{ sr}^{-1}\text{m}^{-1}$ - signal fort permettant une détection aisée
- TMF : Signal de l'ordre de 10^{-7} à $10^{-8} \text{ sr}^{-1}\text{m}^{-1}$ - signal faible proche du bruit instrumental, nécessitant des traitements plus sophistiqués

Cette différence d'intensité de signal impacte directement la précision des mesures et explique en partie les écarts observés dans les statistiques de comparaison.

Perspectives de développement :

Pour approfondir cette validation, plusieurs axes d'amélioration sont envisagés :

- **Extension temporelle** : Accumulation de davantage de cas de co-localisation sur une période plus longue pour obtenir des statistiques plus robustes
- **Élargissement du réseau** : Intégration d'autres stations lidar au sol (réseau EARLINET, MPLNET) pour diversifier les conditions atmosphériques et géographiques
- **Développement méthodologique** : Amélioration des critères de sélection des cas de co-localisation et des méthodes de comparaison inter-instrumentale
- **Validation des produits L2** : Finalisation de la chaîne de traitement IPRAL L1→L2 pour une validation complète des produits géophysiques ATLID

Ces développements contribueront à consolider la validation officielle de la mission EarthCare et à améliorer la caractérisation des performances d'ATLID dans différentes conditions atmosphériques.

Annexe A

Outils web développés

A.1 Interface web développée

J'ai développé une interface web interactive utilisant Streamlit permettant l'exploration et la visualisation des colocalisations identifiées. Cette interface offre les fonctionnalités suivantes : navigation temporelle par date, visualisation comparative des rideaux ATLID et IPRAL, paramétrage interactif des produits, téléchargement des données au format CSV, et automatisation complète de la base de données.

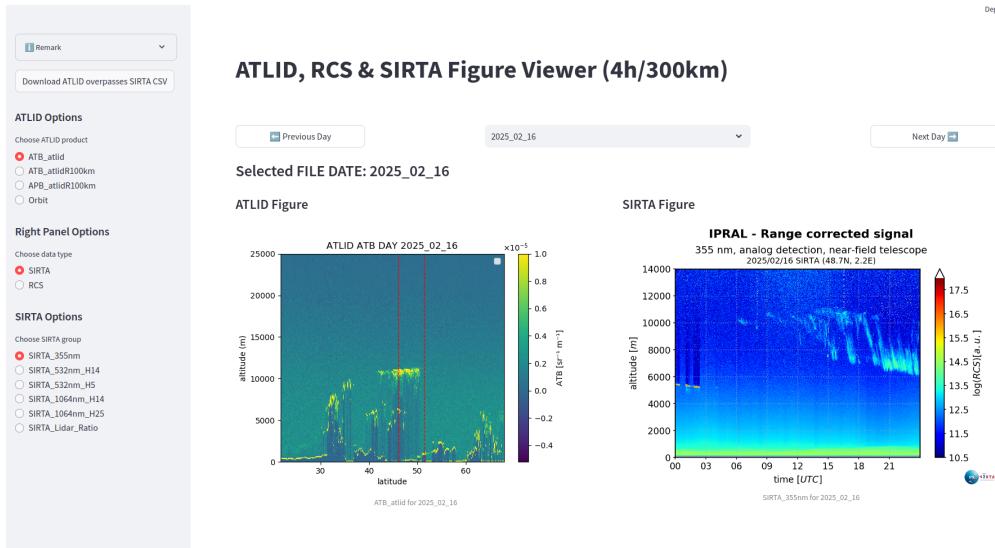


FIGURE A.1 – Interface web Streamlit développée pour la visualisation des colocalisations

A.2 Outils web complémentaires 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/>

Cette interface permet la récupération automatique des figures depuis le site officiel du lidar AKY, une navigation intuitive par date et configuration, ainsi que la sélection de longueurs d'onde (355nm, 532nm, 1064nm) et modes (backscatter, dépolarisation).

Bibliographie

- [1] Laboratoire de Météorologie Dynamique. (2025). *Présentation du LMD - Laboratoire de recherche en climat, pollution et atmosphères planétaires*. <https://www.lmd.ipsl.fr/>
- [2] Laboratoire de Météorologie Dynamique. (2025). *Les équipes de recherche du LMD*. <https://www.lmd.ipsl.fr/home/le-lmd/les-equipes/>
- [3] Équipe DPAO, Laboratoire de Météorologie Dynamique. (2025). *Dynamique et Physique de l'Atmosphère et de l'Océan*. <https://www.lmd.ipsl.fr/equipe/equipe-dpao/>
- [4] Illingworth, A. J., Barker, H. W., Beljaars, A., Ceccaldi, M., Chepfer, H., et al. (2023). *The EarthCARE mission – science and system overview*. Atmospheric Measurement Techniques, 16, 3581–3608. <https://doi.org/10.5194/amt-16-3581-2023>
- [5] Wandinger, U., Haarig, M., Baars, H., et al. (2024). *The EarthCARE lidar cloud and aerosol profile processor (A-PRO) : the A-AER, A-EBD, A-TC, and A-ICE products*. Atmospheric Measurement Techniques, 17, 5301–5324. <https://doi.org/10.5194/amt-17-5301-2024>
- [6] Campbell, J. R., et al. (2017). *Comparisons of aerosol backscatter using satellite and ground lidars : implications for calibrating and validating spaceborne lidar*. Scientific Reports, 7, 42337. <https://doi.org/10.1038/srep42337>
- [7] Haeffelin, M., Barthès, L., Bock, O., et al. (2005). *SIRTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research*. Annales Geophysicae, 23, 253–275. doi:[10.5194/angeo-23-253-2005](https://doi.org/10.5194/angeo-23-253-2005)
- [8] Feofilov, A. G., Chepfer, H., Noël, V., et al. (2022). *Comparison of scattering ratio profiles retrieved from ALADIN/Aeolus and CALIOP/CALIPSO observations*. Atmospheric Measurement Techniques, 15, 1055–1077. doi:[10.5194/amt-15-1055-2022](https://doi.org/10.5194/amt-15-1055-2022)
- [9] Feofilov, A. G., Chepfer, H., Noël, V., and Szczap, F. (2023). *Incorporating EarthCARE observations into a multi-lidar cloud climate record : the ATLID cloud climate product*. Atmospheric Measurement Techniques, 16, 3363–3392. doi:[10.5194/amt-16-3363-2023](https://doi.org/10.5194/amt-16-3363-2023)
- [10] Pallotta, J. V., Carvalho, S. A. de, Lopes, F. J. da S., et al. (2023). *Collaborative development of the Lidar Processing Pipeline (LPP) for atmospheric aerosols and clouds*. Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems, 12, 171–192. doi:[10.5194/gi-12-171-2023](https://doi.org/10.5194/gi-12-171-2023)
- [11] Pappalardo, G., et al. (2010). *EARLINET correlative measurements for CALIPSO : First intercomparison results*. Journal of Geophysical Research : Atmospheres, 115(D00H19). doi:[10.1029/2009JD012147](https://doi.org/10.1029/2009JD012147)
- [12] Knepp, T. N., Thomason, L., Roell, M., et al. (2020). *Evaluation of a method for converting SAGE extinction coefficients to backscatter coefficients for intercomparison with lidar observations*. Atmospheric Measurement Techniques, 13, 4261–4276. doi:[10.5194/amt-13-4261-2020](https://doi.org/10.5194/amt-13-4261-2020)
- [13] Chepfer, H., Picon, L., Bonazzola, M., et al. (2024). *Principes de la télédétection : Applications à l'observation de la Terre et son climat*. Dunod, Paris.
- [14] Gimmestad, G. G. and Roberts, D. W. (2023). *Lidar Engineering : Introduction to Basic Principles*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [15] Siomos, N. (2024). *ARC : Automatic Raman lidar and Ceilometer processing*. GitHub repository. <https://github.com/nikolaos-siomos/arc>