



Intercomparaison des observations du lidar spatial ATLID avec le lidar IPRAL du SIRT

Arezki Haddouche, Artem Feofilov
et équipe SIRT

- Formulation de problème
- Trois enjeux d'intercomparaison :
 - Calibration
 - Géométrie d'observation et comparabilité des données
 - Variabilité spatiotemporelle
- Résultats actuels
- Les axes d'amélioration

Introduction

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

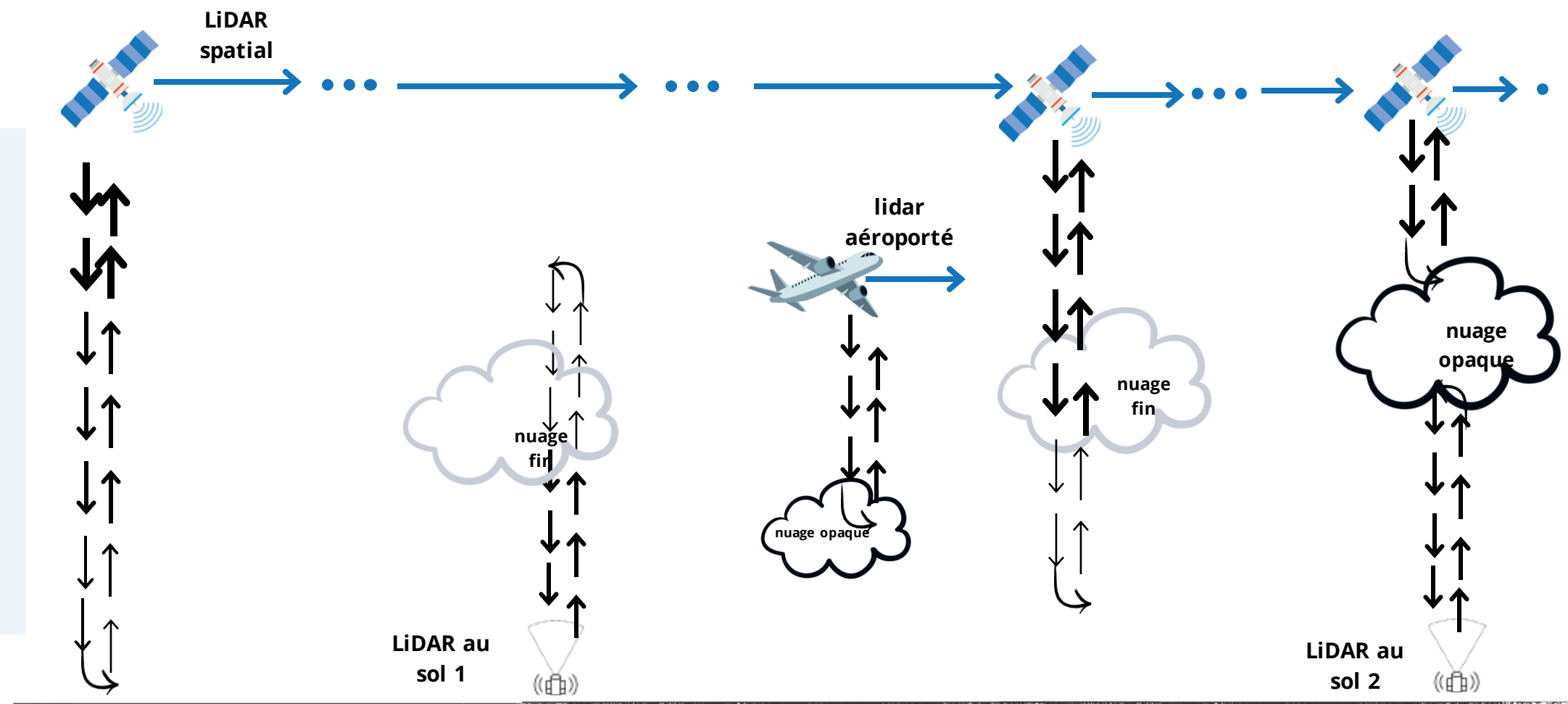


Schéma explicatif de la validation des données LiDAR spatiales

Stratégie de validation : pourquoi les lidars au sol ?

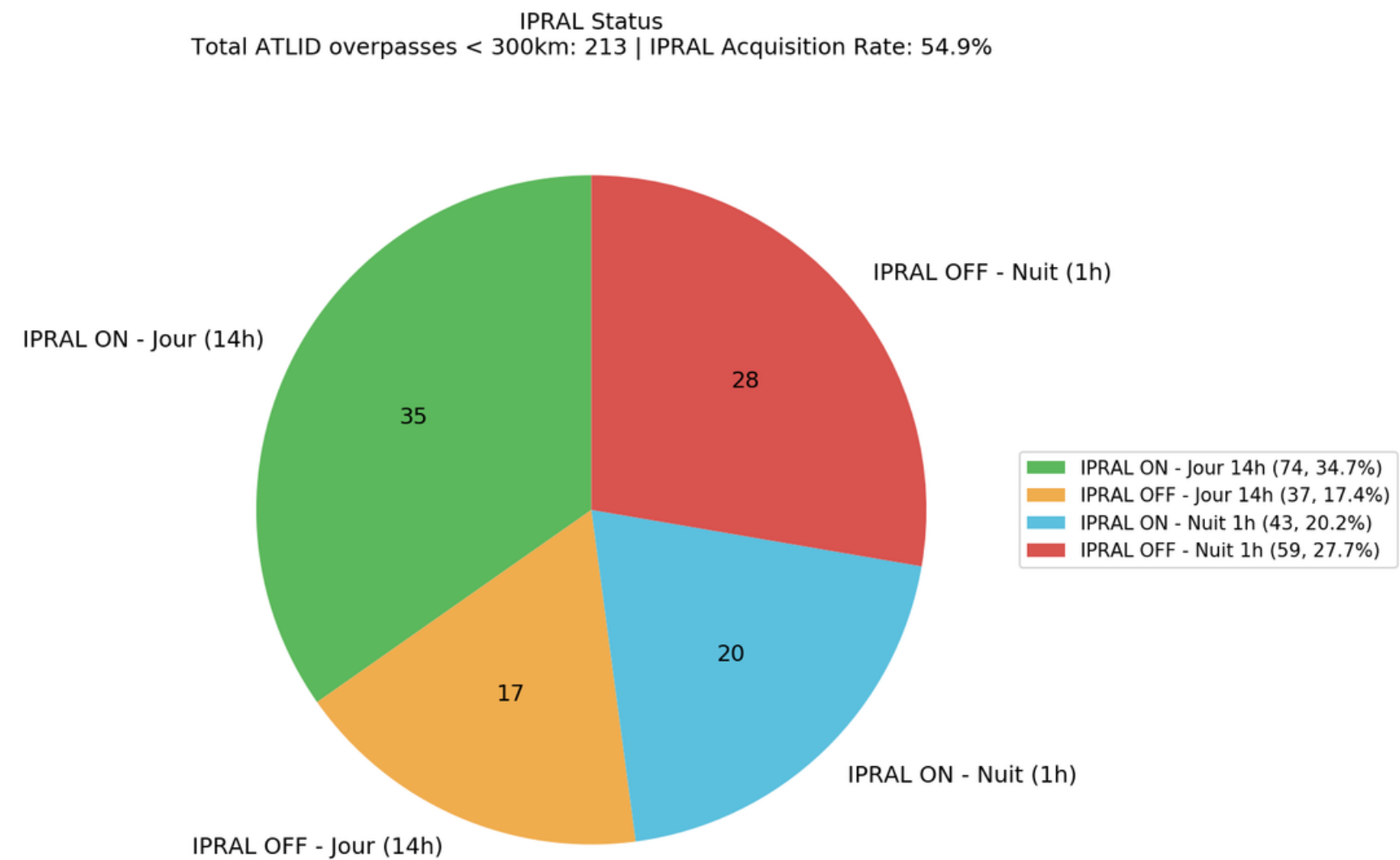
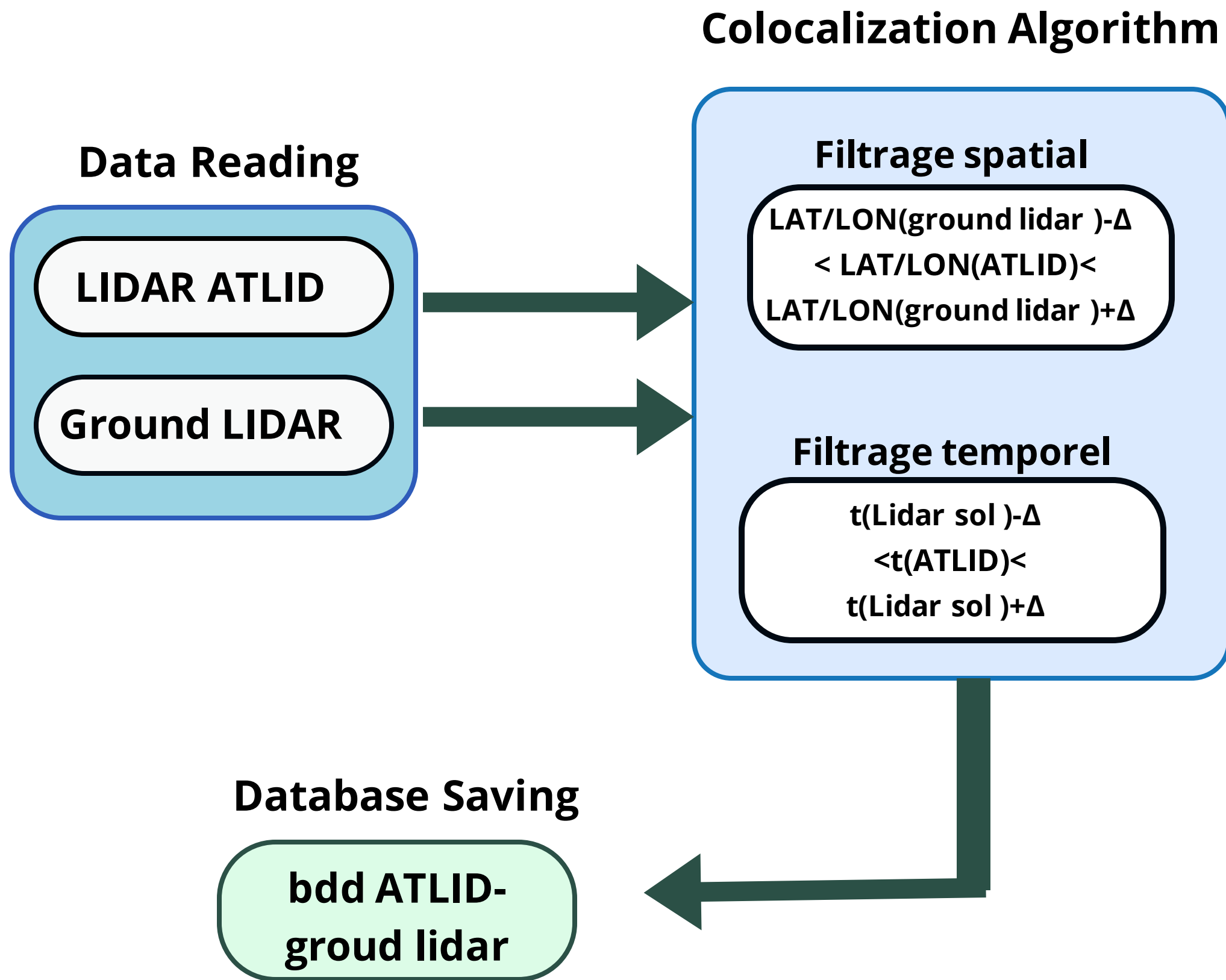
1. Opérationnels 24h/24 : Mesures continues vs vols ponctuels
2. Coûts maîtrisés pour les campagnes aéroportées
3. Accumulation sur de longues périodes

MAIS



1. Géométrie opposée : Nadir (satellite) vs Zénith (sol).
2. Défaut de colocalisation : Trace décalée (jusqu'à ~60 km).
3. Profils parfois non comparables (ex: un nuage opaque ...)

La chaine de colocalisation



Calibration d'IPRAL SIRTA

Lidar IPRAL:

- Deux télescopes (near range/far range)
- Rétrodiffusion parallèle/perpendiculaire
- Détection analogue/comptage des photons

Chaque canal devrait être calibré, puis fusionné dans le profil total.

Calibration du signal = passage de mV et photons/sec à $\text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$

Paramètres nécessaires :

- - K (coefficient de calibration)
- - ΔS (correction du biais)

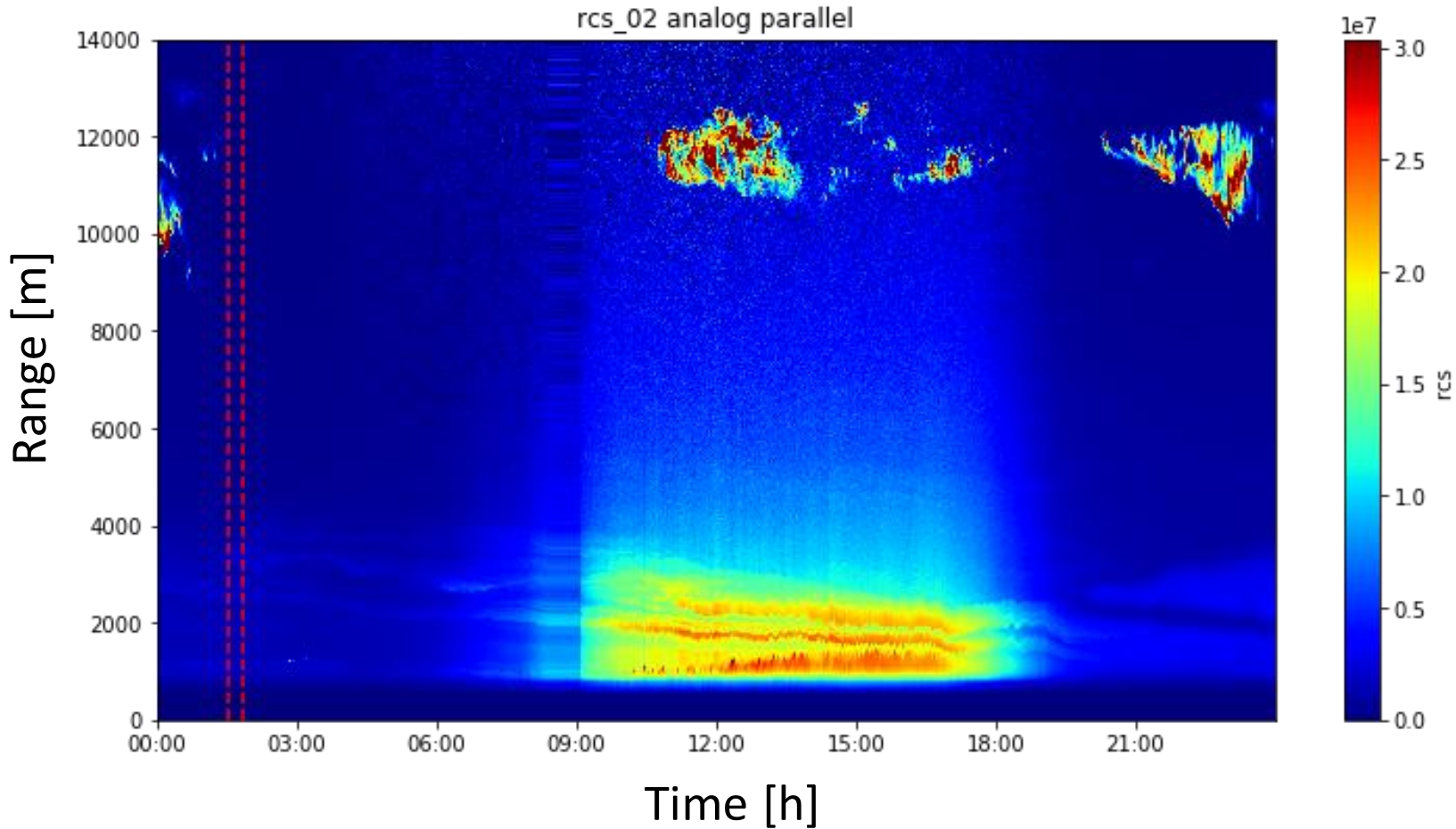
$$\text{ATB} = K \times (\text{RCS} - \Delta)$$

- avec :
 - **ATB** : Signal calibré, Attenuated Backscatter
 - **RCS** : Signal brut, range-corrected signal

Choix des altitudes de calibration et de la fusion:

- Near range/far range
- Saturation
- Niveau de bruit

Exemple de calibration L0 → L1, signal moléculaire

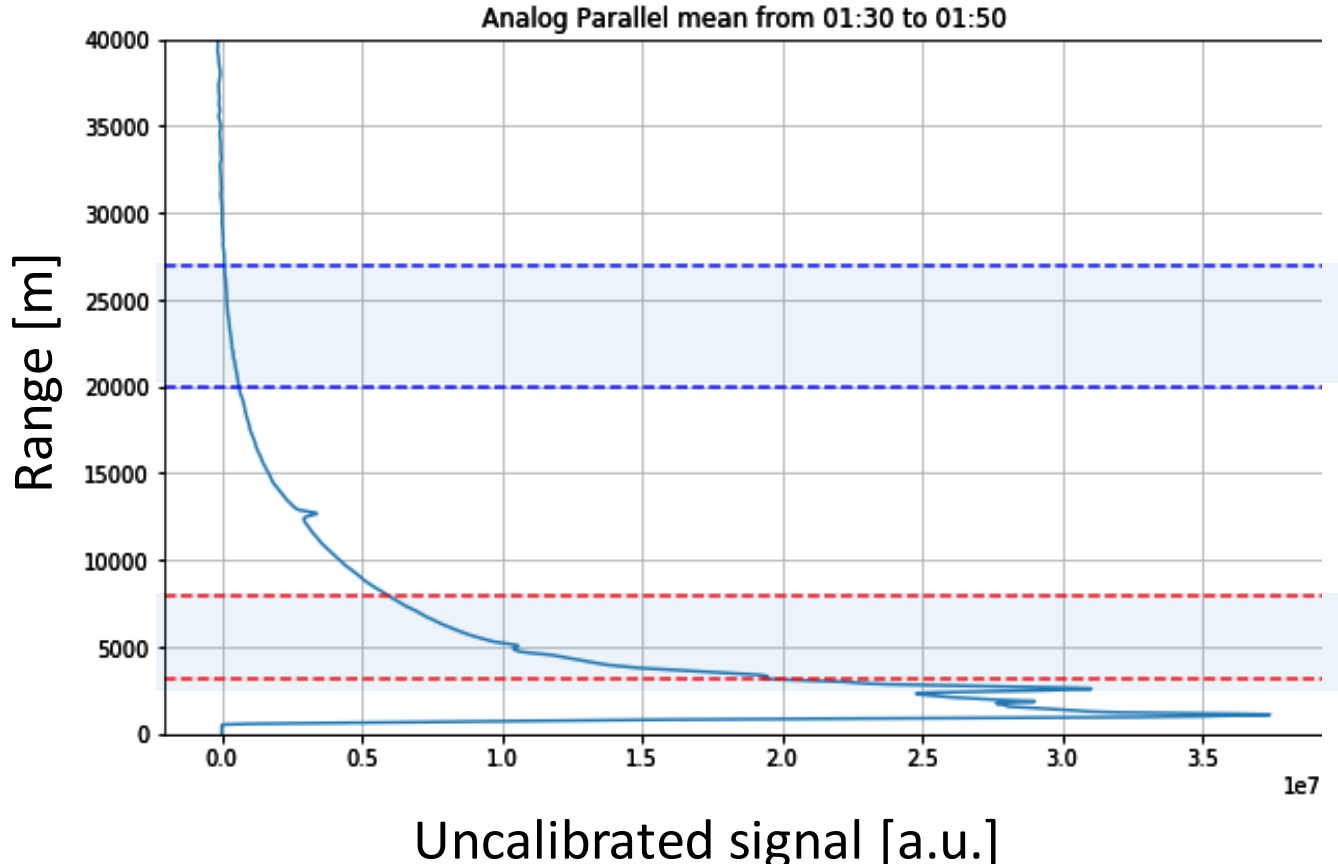


Calcul du profil moléculaire théorique

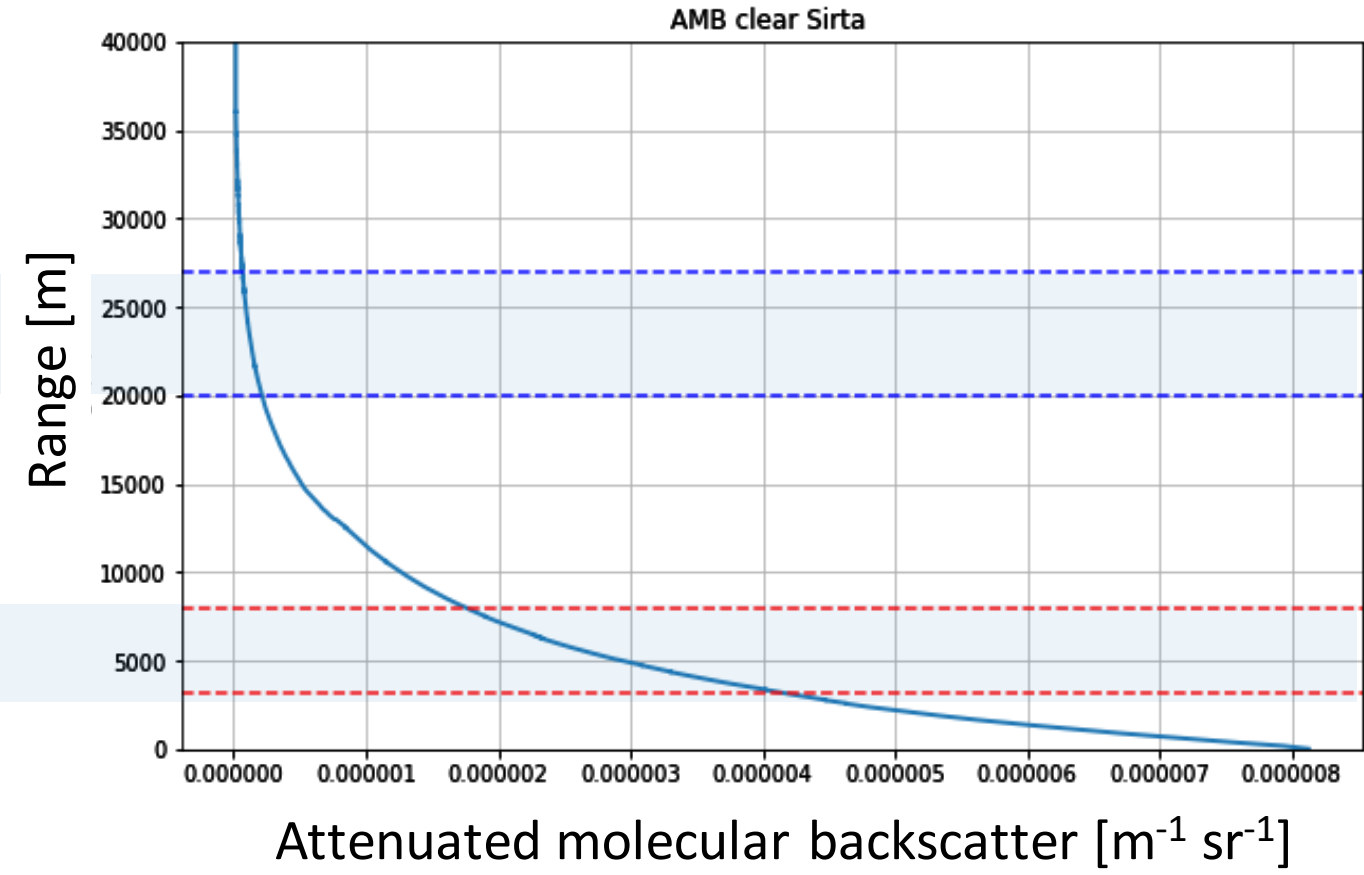
$$AMB_{\text{clear}}(\lambda, z) = \beta_{\text{mol}}(\lambda, z) \times e^{-2 \int_{z_{\text{sat}}}^z \alpha_{\text{mol}}(\lambda, z') dz'}$$

$$AMB_{\text{clear}}^{\parallel} = \frac{AMB_{\text{clear}}}{1 + \delta} \qquad AMB_{\text{clear}}^{\perp} = \frac{AMB_{\text{clear}} \cdot \delta}{1 + \delta}$$

avec $\delta = \frac{\beta_{\text{mol}}^{\perp}}{\beta_{\text{mol}}^{\parallel}} = 0.004$ pour ciel clair



Optimisation de K_{Optimal} et Δ_{Optimal} pour minimiser l'écart entre le RCS mesuré et l'AMBclear théorique.



Exemple du Traitement L0 → L1 : fusion des signaux parallèles calibrés

Calcul du signal calibré (ATB)

$$ATB \text{ (m}^{-1}\text{sr}^{-1}\text{)} = K_{\text{optimal}} \cdot (RCS(\text{mV}) - \Delta_{\text{optimal}})$$

Algorithme de fusion des signaux

($z < z_{\text{start}}$) : 100% Analogique

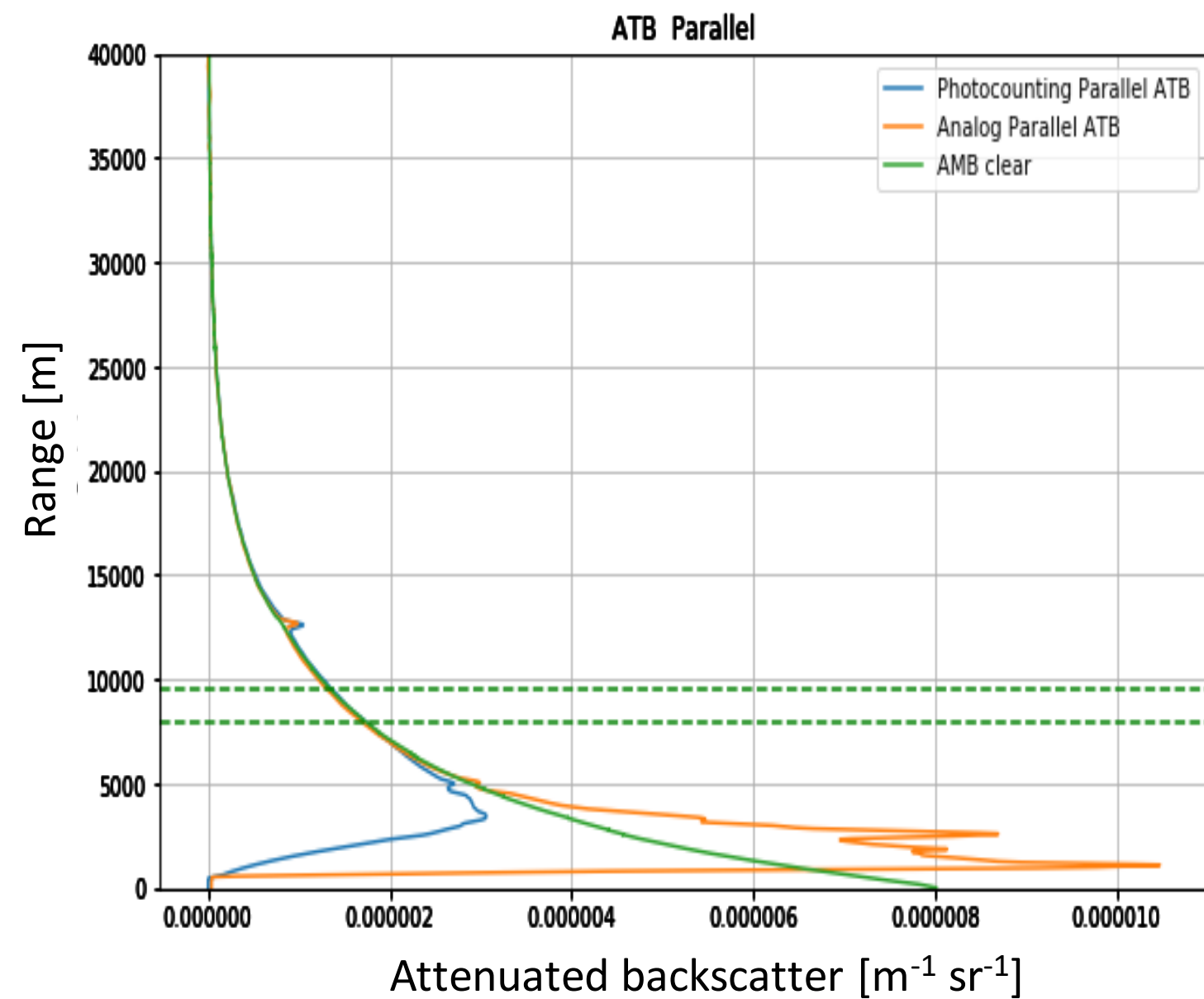
($z > z_{\text{end}}$) : 100% Comptage de photons

($z_{\text{start}} < z < z_{\text{end}}$) :

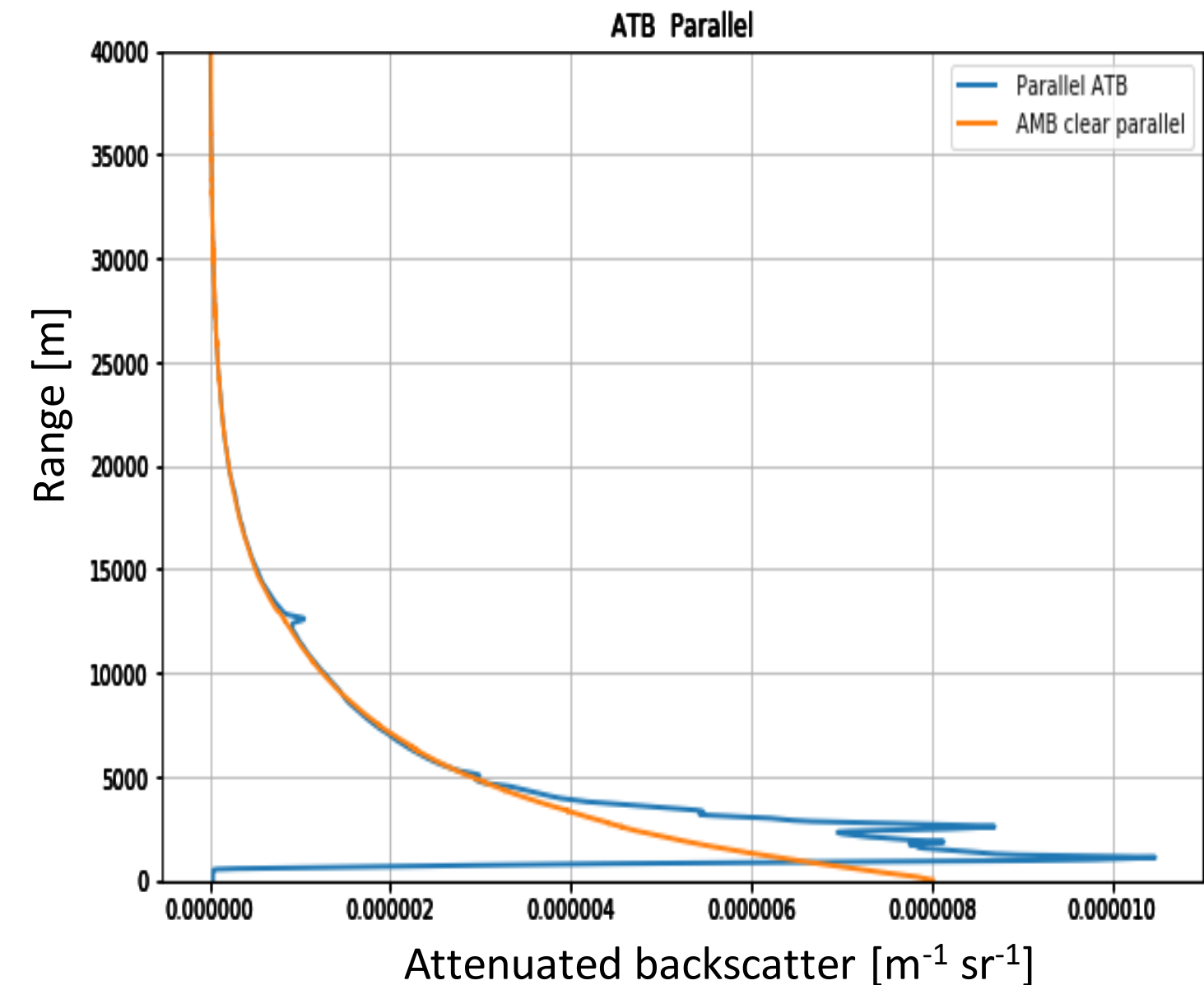
$$ATB_{\text{fusion}} = (1 - W_H) \cdot ATB_{\text{analog}} + W_H \cdot ATB_{\text{photo}}$$

Avec W_H le poids de la fenêtre de Hanning

(de 0 à 1)



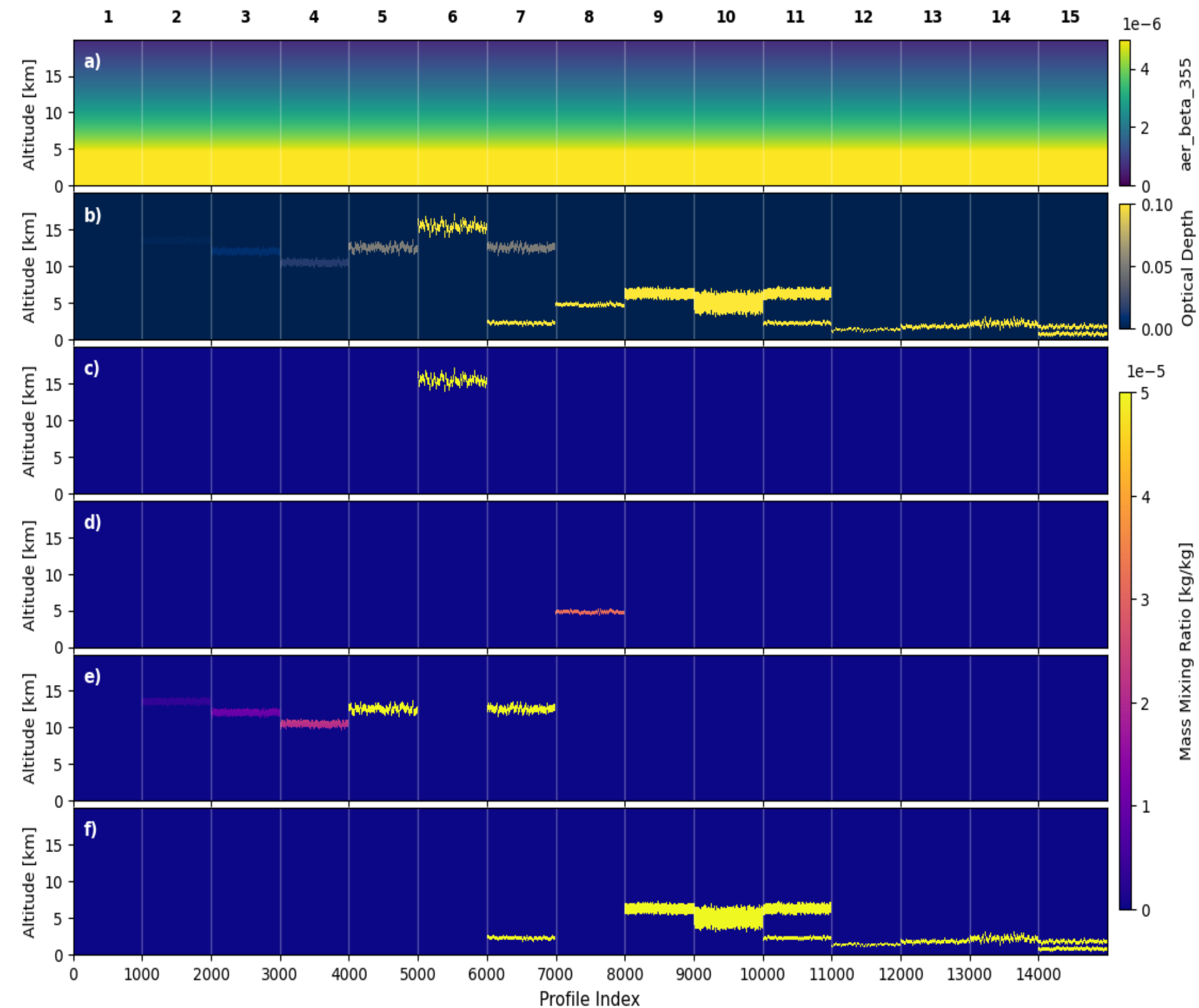
Fusion des signaux



**Maintenant que l'IPRAL est calibré,
comment déterminer si l'ATLID et l'IPRAL
observent bien la même chose ?**

Dans quelles conditions comparer ATLID et IPRAL ?

Scénarios atmosphériques pour simulateur lidar COSP+bruit instrumental (Feofilov et al., 2023)



Variables de comparaison (Niveaux L1 & L2)

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

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

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

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

Données de niveau 1 L1(ATLID/IPRAL) :

$$SR = \frac{ATB}{AMB_{\text{clear}}}$$

Données de niveau 2(ATLID/IPRAL) :

β_{part} : particle backscatter coefficient

$$SR' = 1 + \frac{\beta_{\text{part}}}{\beta_{\text{mol}}}$$

Comparabilité en chiffres : « comparability score », CS

Définition

For the input vectors \vec{a} and \vec{b} , the comparability score CS is calculated as follows:

$$CS = 0 \text{ if } \vec{a} \approx 0 \text{ or } \vec{b} \approx 0 \quad (16)$$

$$CS = \frac{N_{joint}}{N_{tot}} \times \{(1 - w_{shape}) \times S_{corr} + w_{shape} \times S_{shape}\} \quad (17)$$

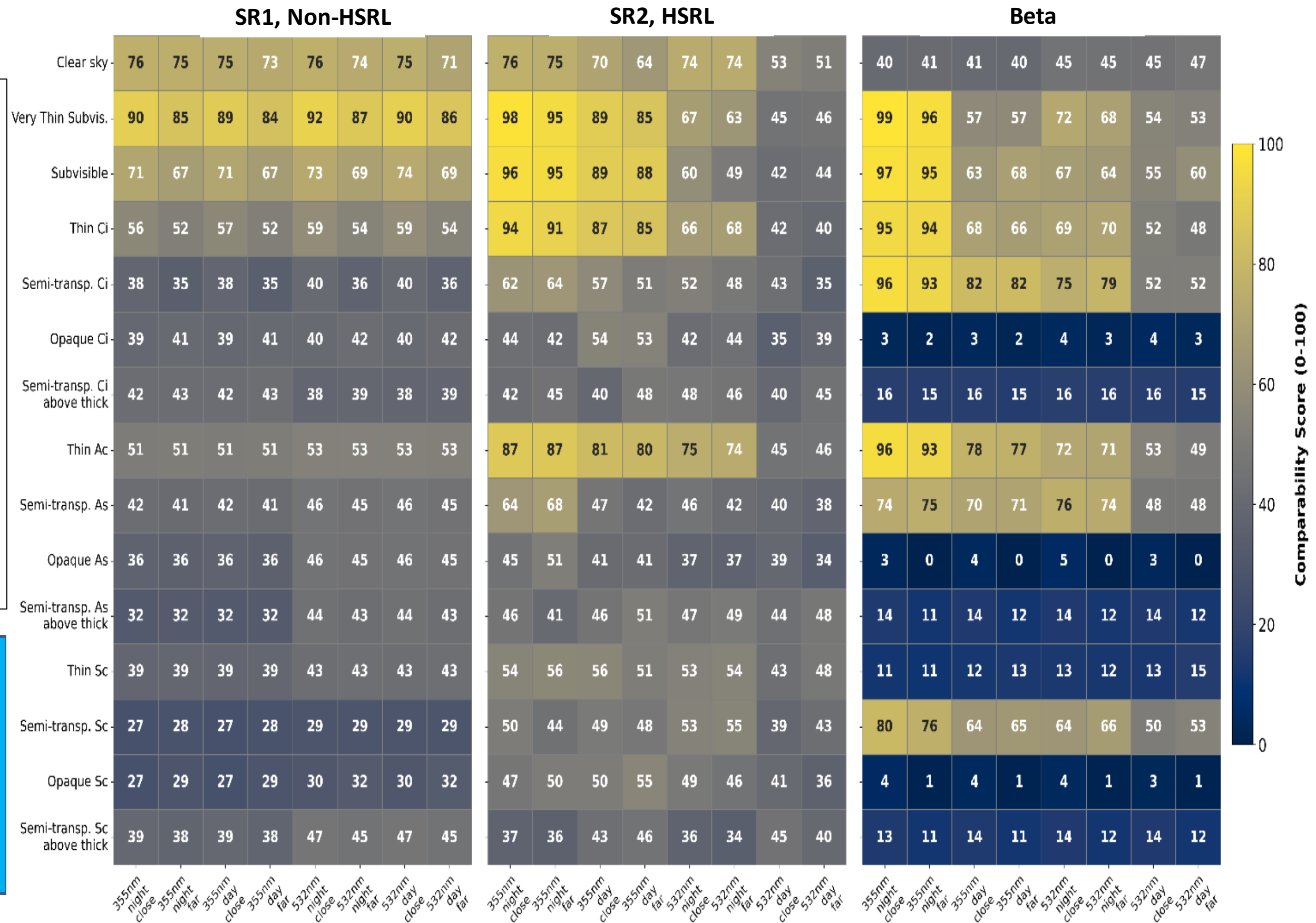
$$S_{corr} = \frac{\rho(\vec{a}, \vec{b}) + 1}{2}; \quad S_{shape} = e^{-2 \times \frac{|\vec{a} - \vec{b}|}{|\vec{a}| + |\vec{b}|}} \quad (18)$$

where \vec{a} and \vec{b} are mean values of the input vectors, N_{joint} is a number of valid points in the analyzed layer, vectors, N_{tot} is a total number of points in the analyzed layer, S_{corr} is a correlation term contribution to the score, $\rho(\vec{a}, \vec{b})$ is Pearson's correlation coefficient, S_{shape} is a scaled difference term and w_{shape} is its contribution to the total score.

A retenir:

- CS > 80 → très comparable
- CS ≈ 60-70 → à considérer avec prudence
- CS < 60 → comparaison peu fiable

Scores de comparabilité selon le type de scène simulée

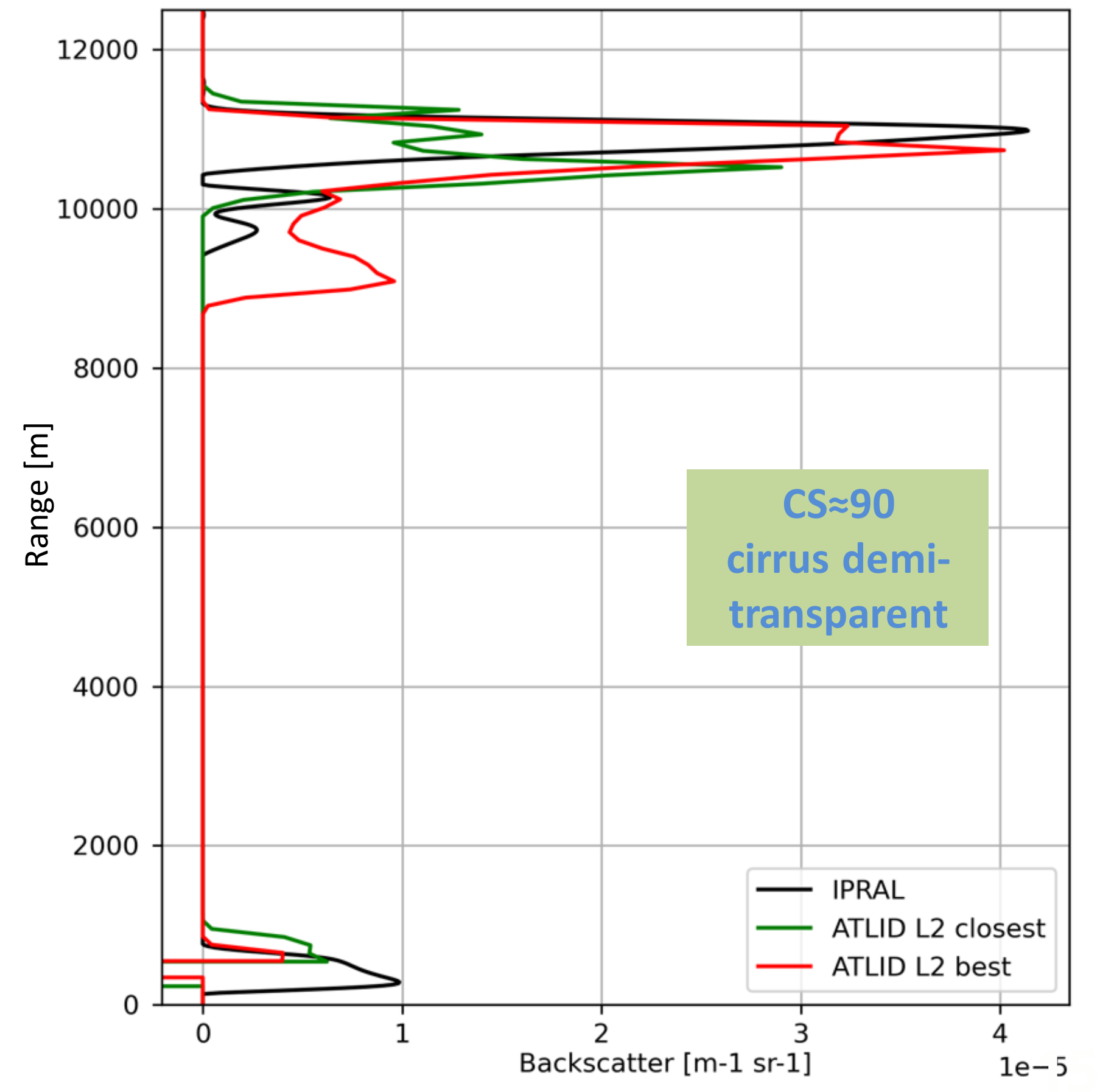
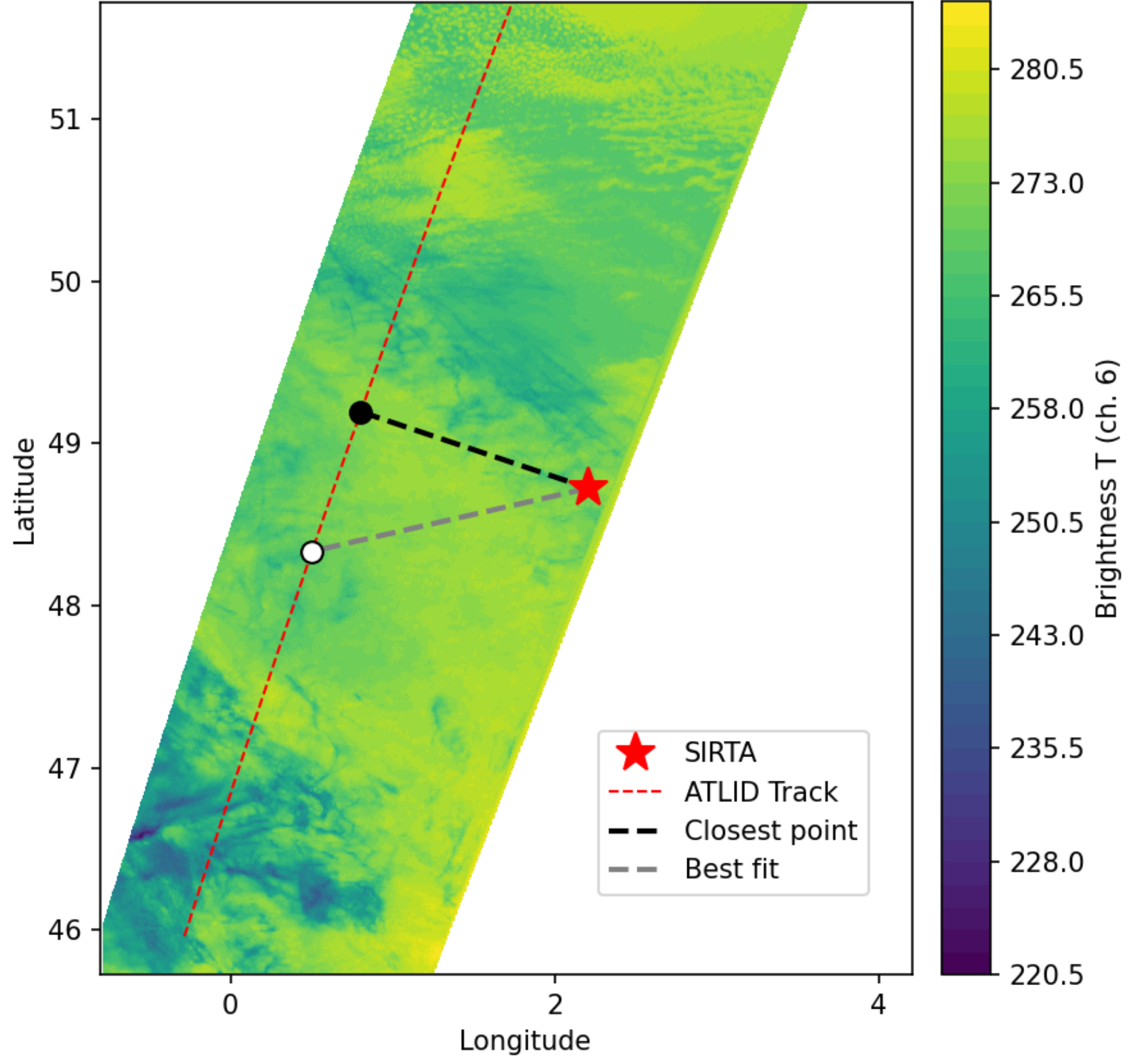


Variabilité spatiotemporelle et colocalisation:

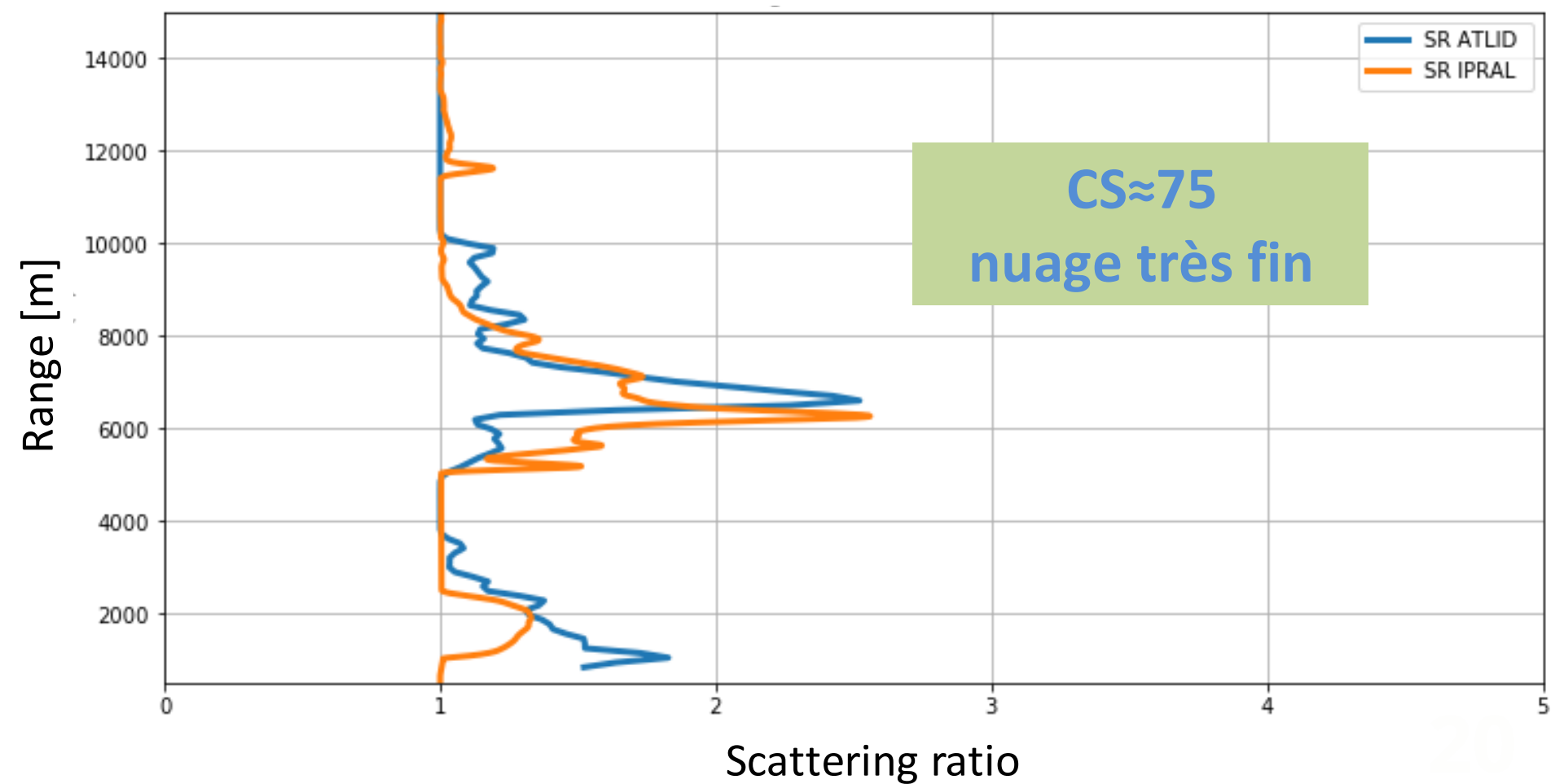
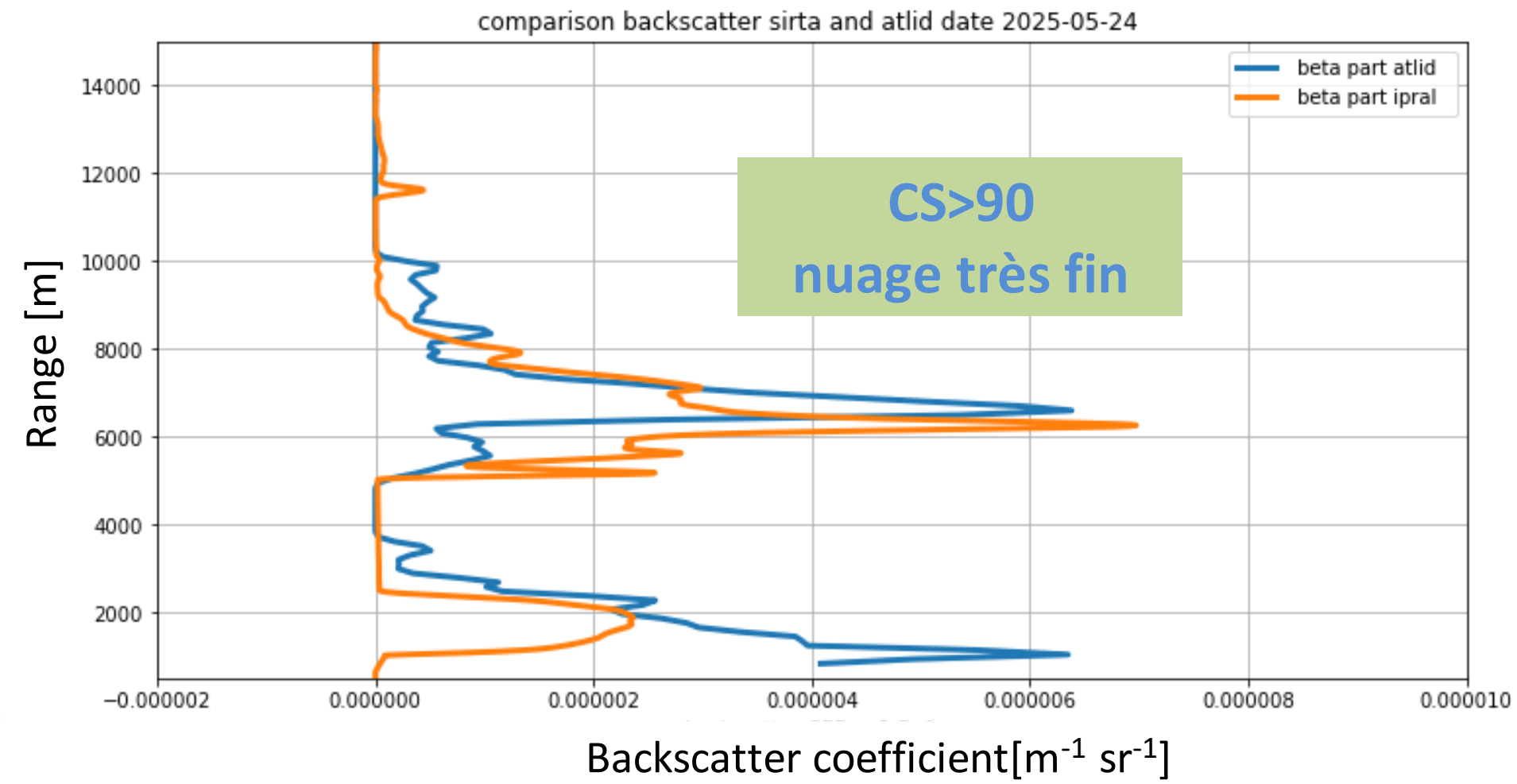
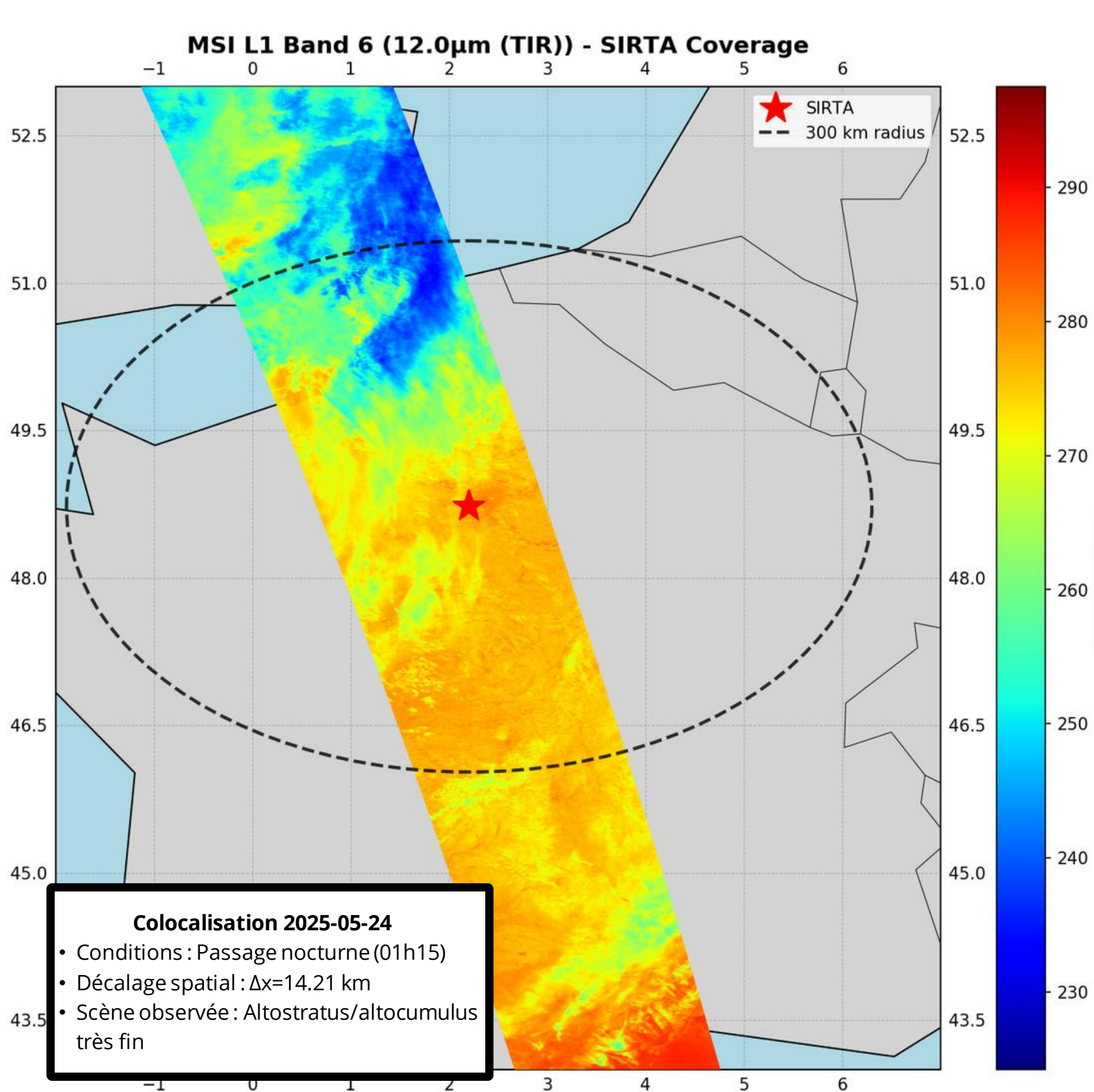
L'approche au choix des profils comparables

Sélection de la zone de comparaison : plus proche ou plus cohérente ?

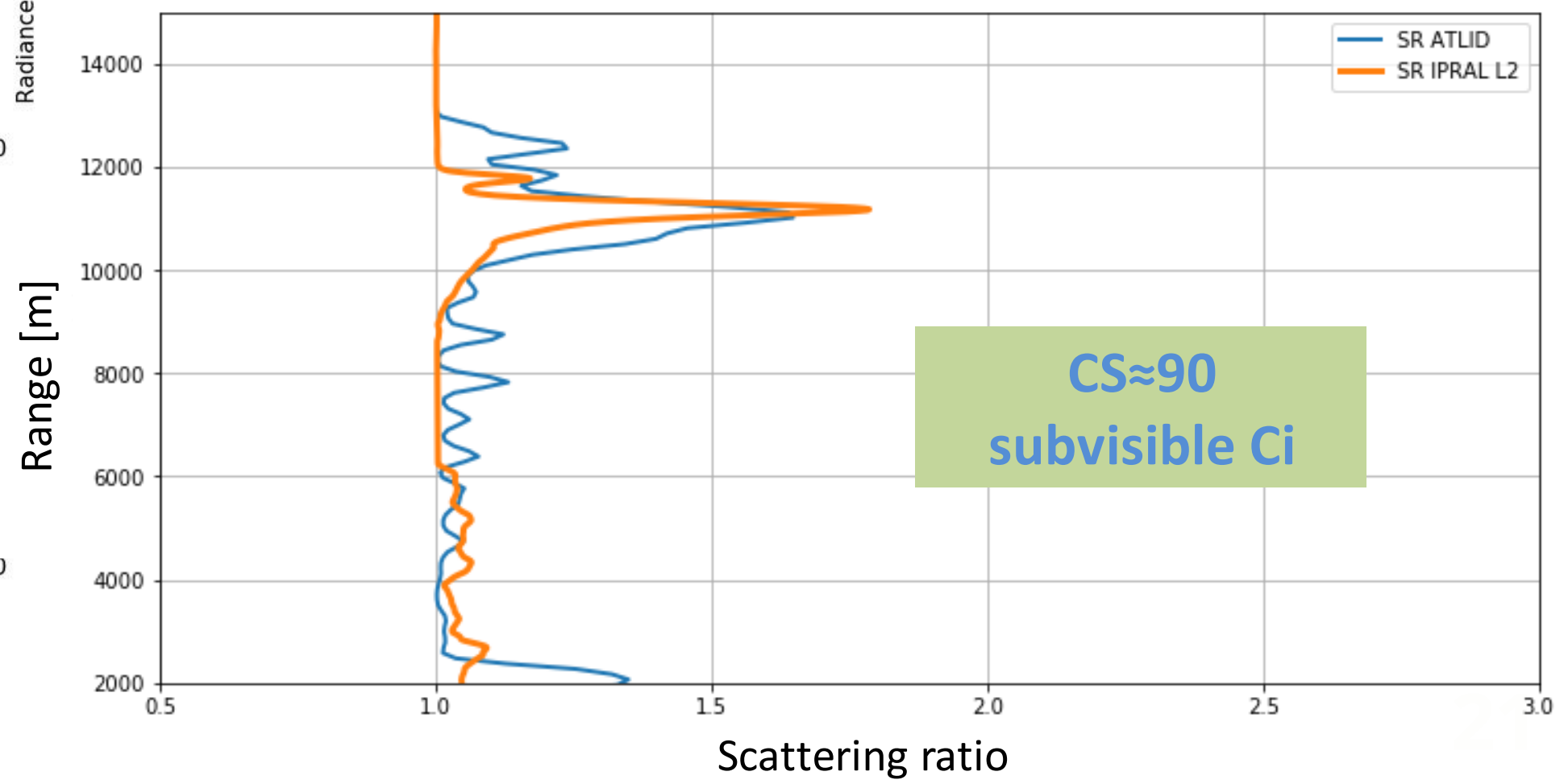
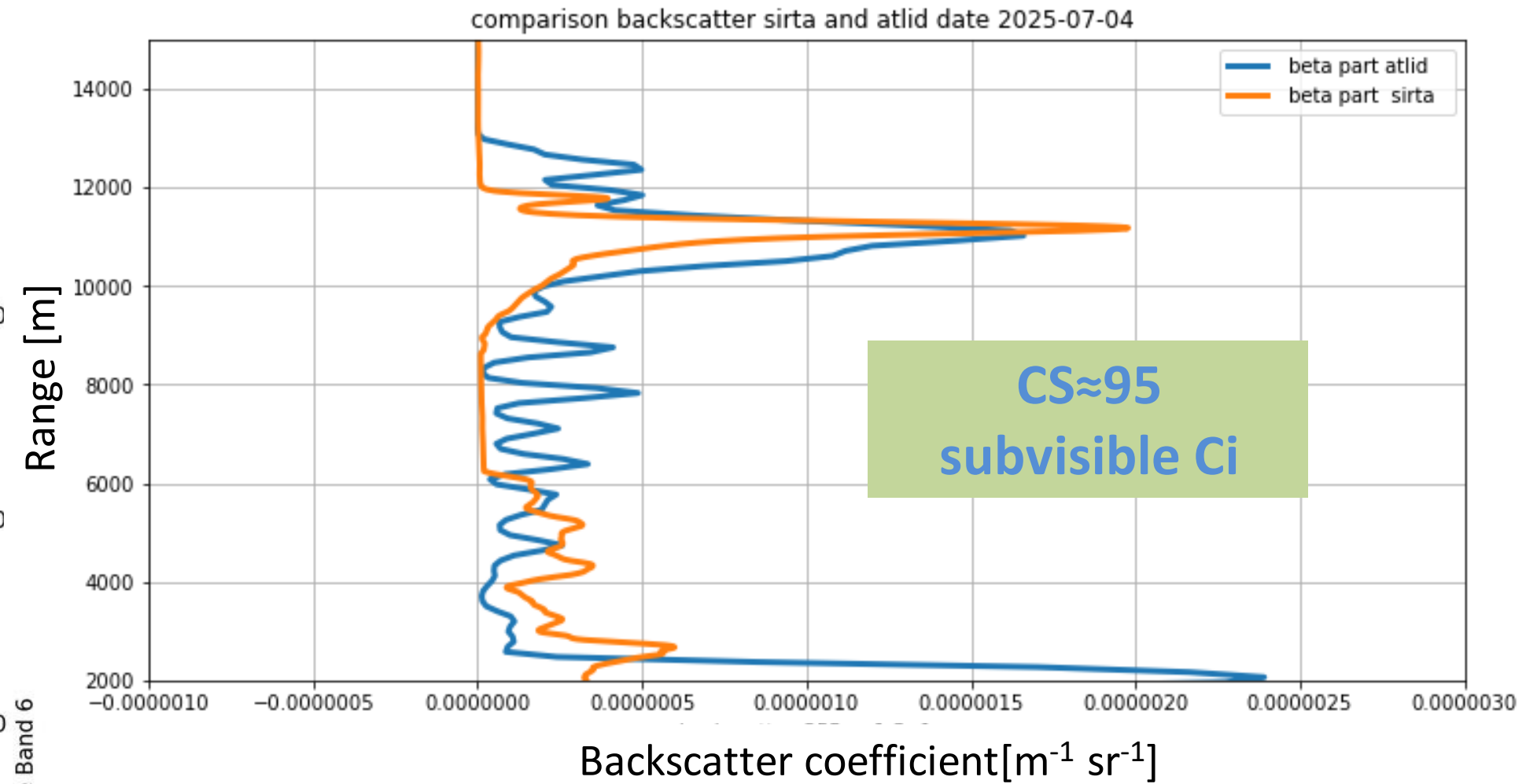
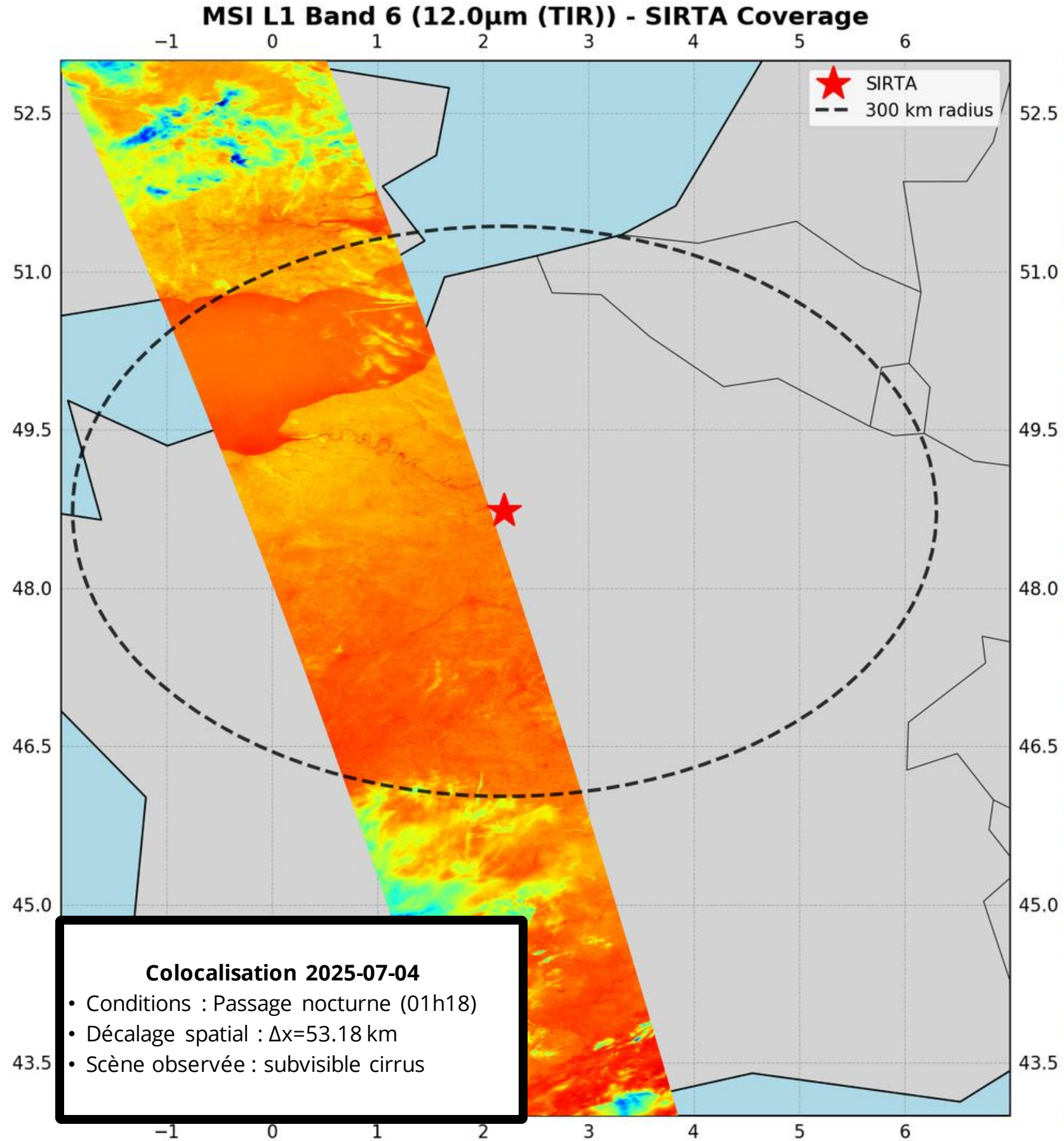
EarthCare ATLID/MSI collocation with SIRTA 2025 02 16



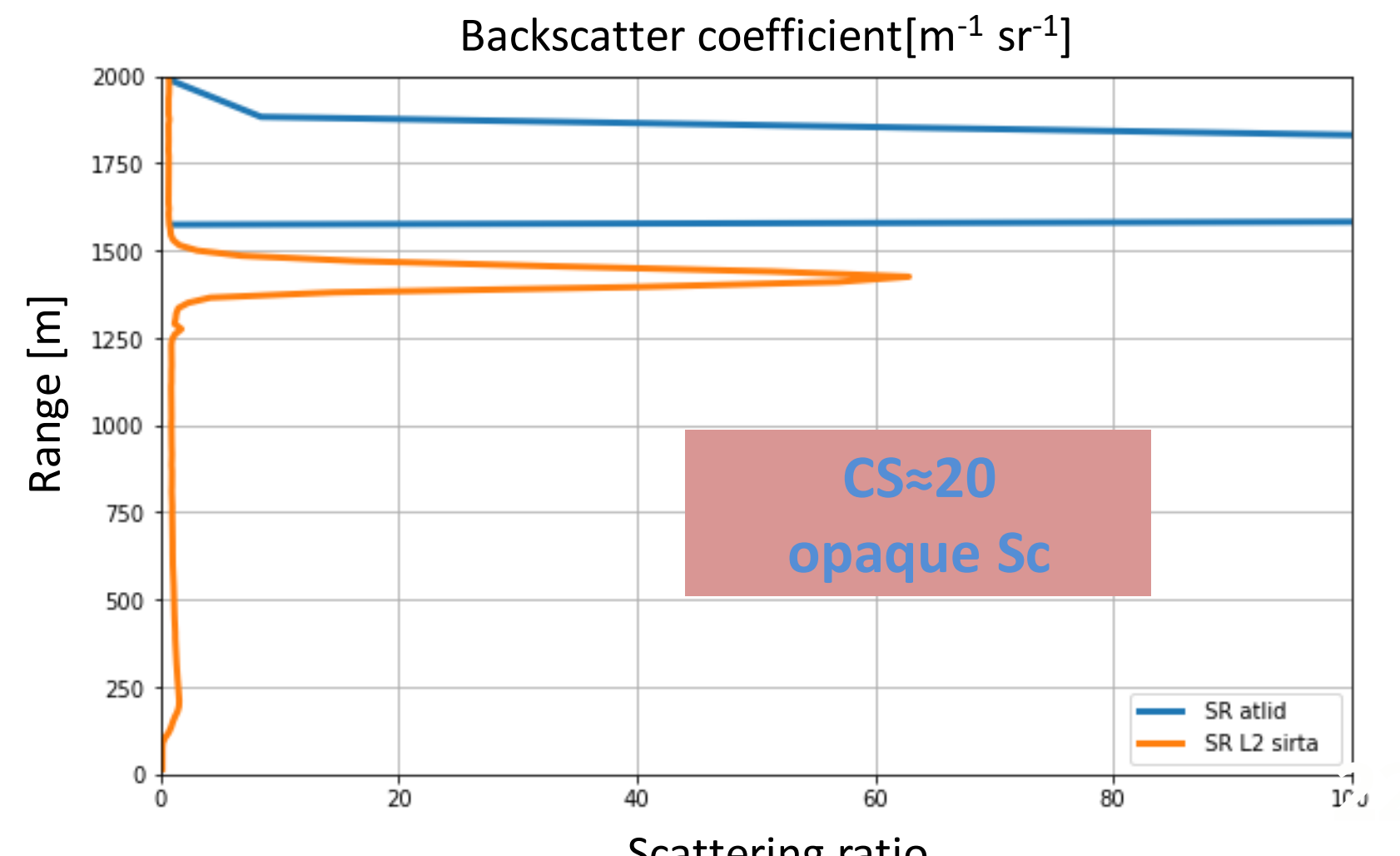
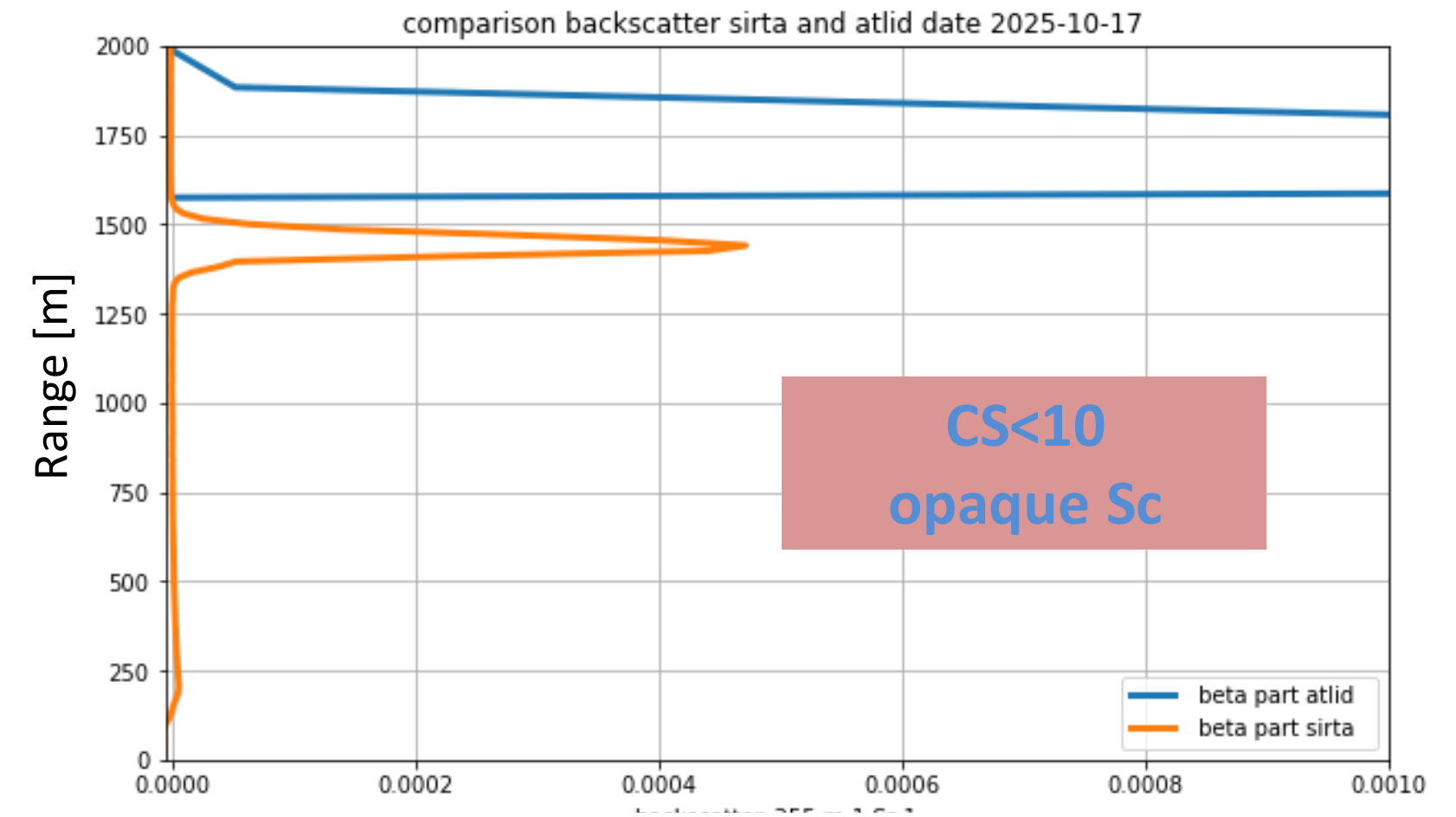
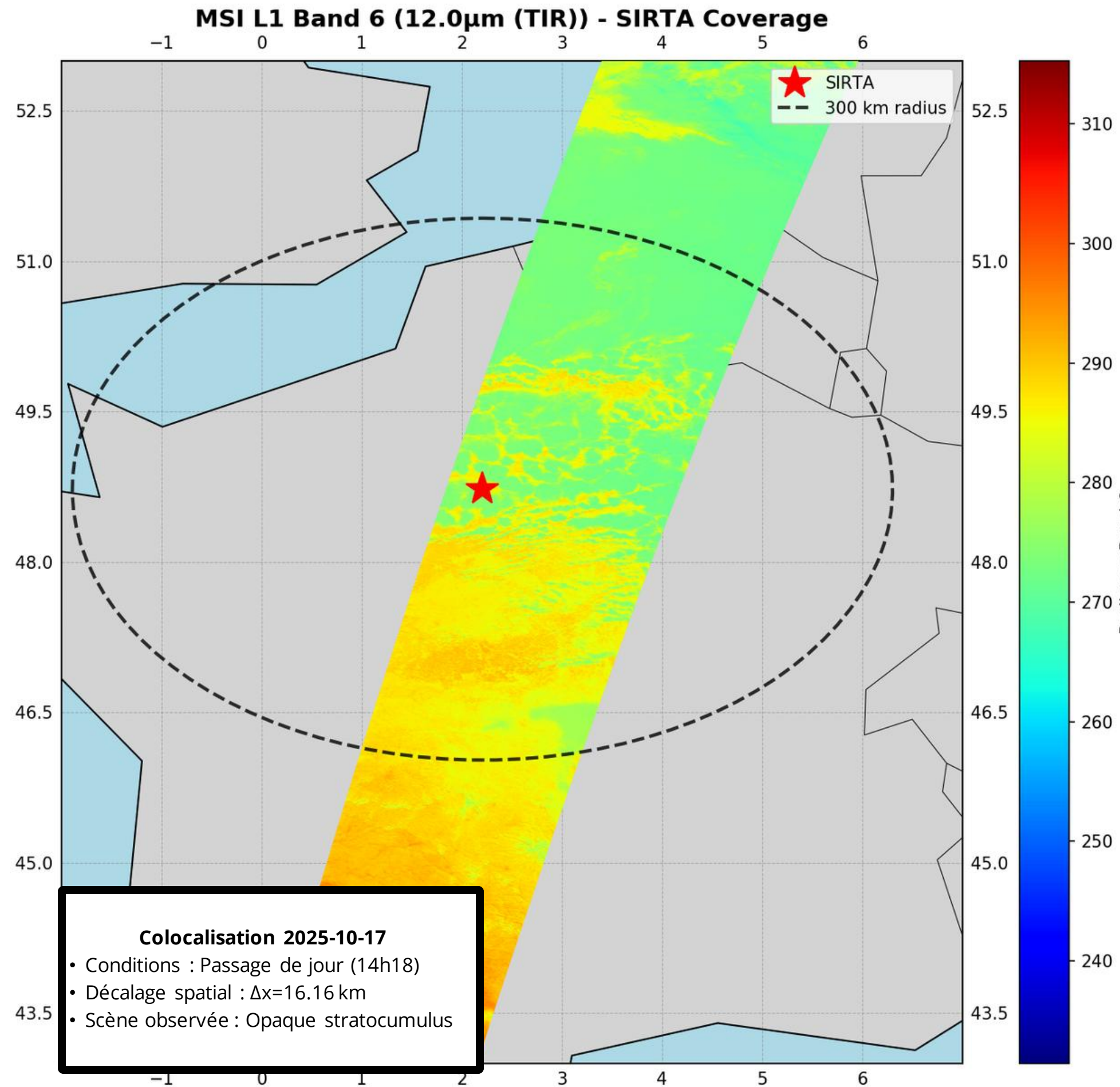
Cas d'étude 1



Cas d'étude 2



Cas d'étude 3



Les axes d'amélioration :

utilisation des vents pour la colocalisation

Données Satellitaires : SEVIRI (Meteosat Second Generation) :

- Orbite : Géostationnaire (vue continue sur l'Europe/Afrique).
- Résolution spatiale : 3 km au point sous-satellite (Infrarouge).
- Résolution temporelle : 1 image toutes les 15 minutes.
- Canal utilisé : Infrarouge (IR 10.8 μm) pour le suivi de jour comme de nuit.



Sélection de l'intervalle spatio-temporel par Block Matching

Conclusions sur la méthode, enseignements tirés

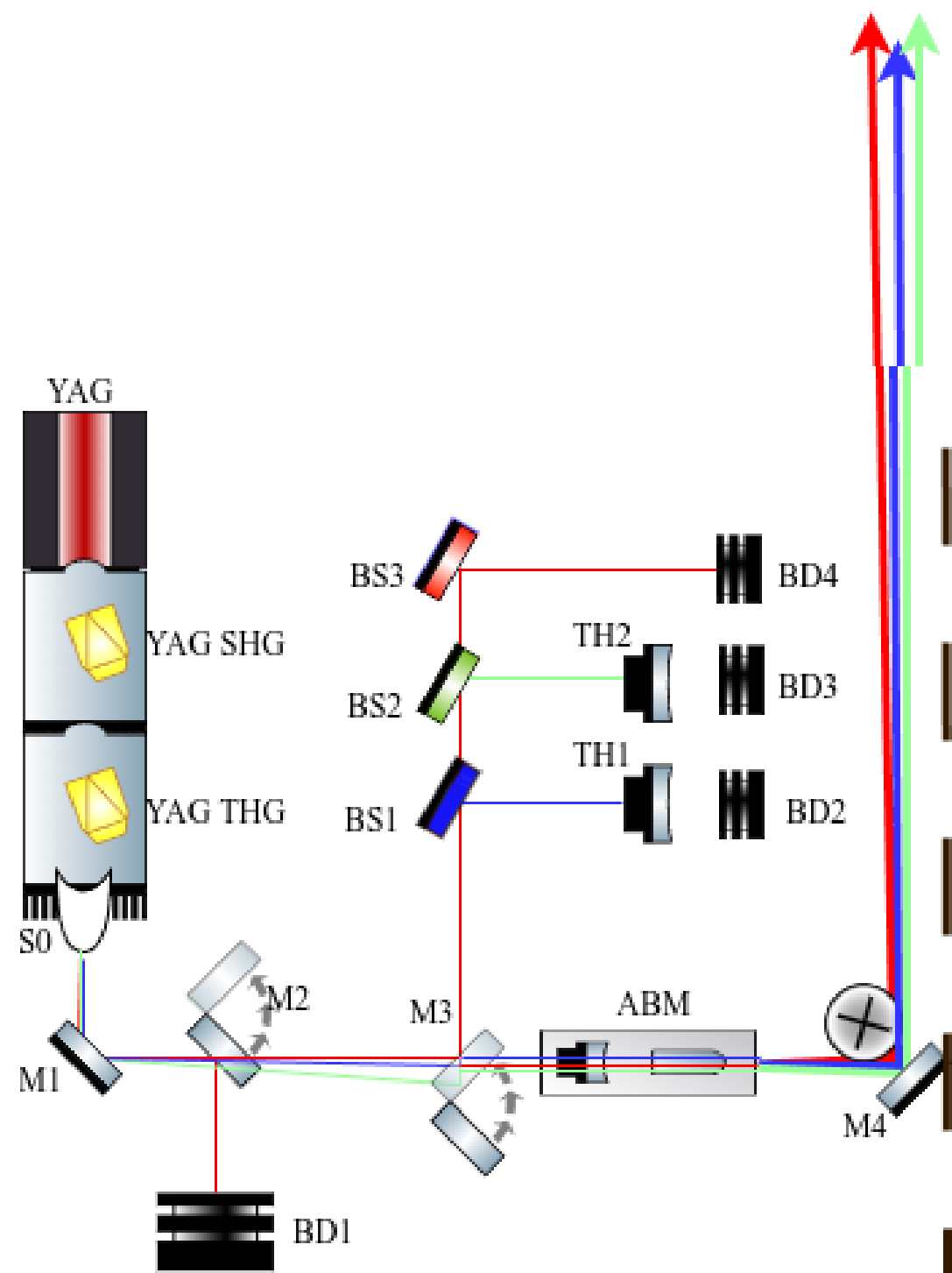
- Intercomparaison lidar sol – lidar spatial n'est pas triviale :
 - choix des variables (L1/L2)
 - scénario atmosphérique (nuages transparents sont favorisés)
 - variabilité spatiotemporelle
- Calibration de lidar multi-canaux IPRAL :
 - code recherche développé, opérationnel en développement
 - biais/calibration et fusion des plusieurs canaux dans 1 profil
 - cross-talk parallèle → perpendiculaire d'environ 1-2%
- Profil le plus proche n'est pas toujours le profil comparable pour les données colocalisées

Conclusions sur la comparaison IPRAL-ATLID, validation quantitative

- 3 à 6 colocalisations par mois (4h, 200km) depuis août 2024.
- Colocalisations avec faible CS (nuages opaques, multicouches, ou ciel claire) ne sont pas comparables (70% des cas)
- Colocalisations avec haute inhomogénéité des nuages ne sont pas directement comparables, sans l'analyse des vents (~15%)
- Colocalisations avec $CS > 60$ sont comparables :
 - pour β , RMS du pic = $\pm 10\%$
 - pour SR1, RMS du pic = $\pm 8\%$

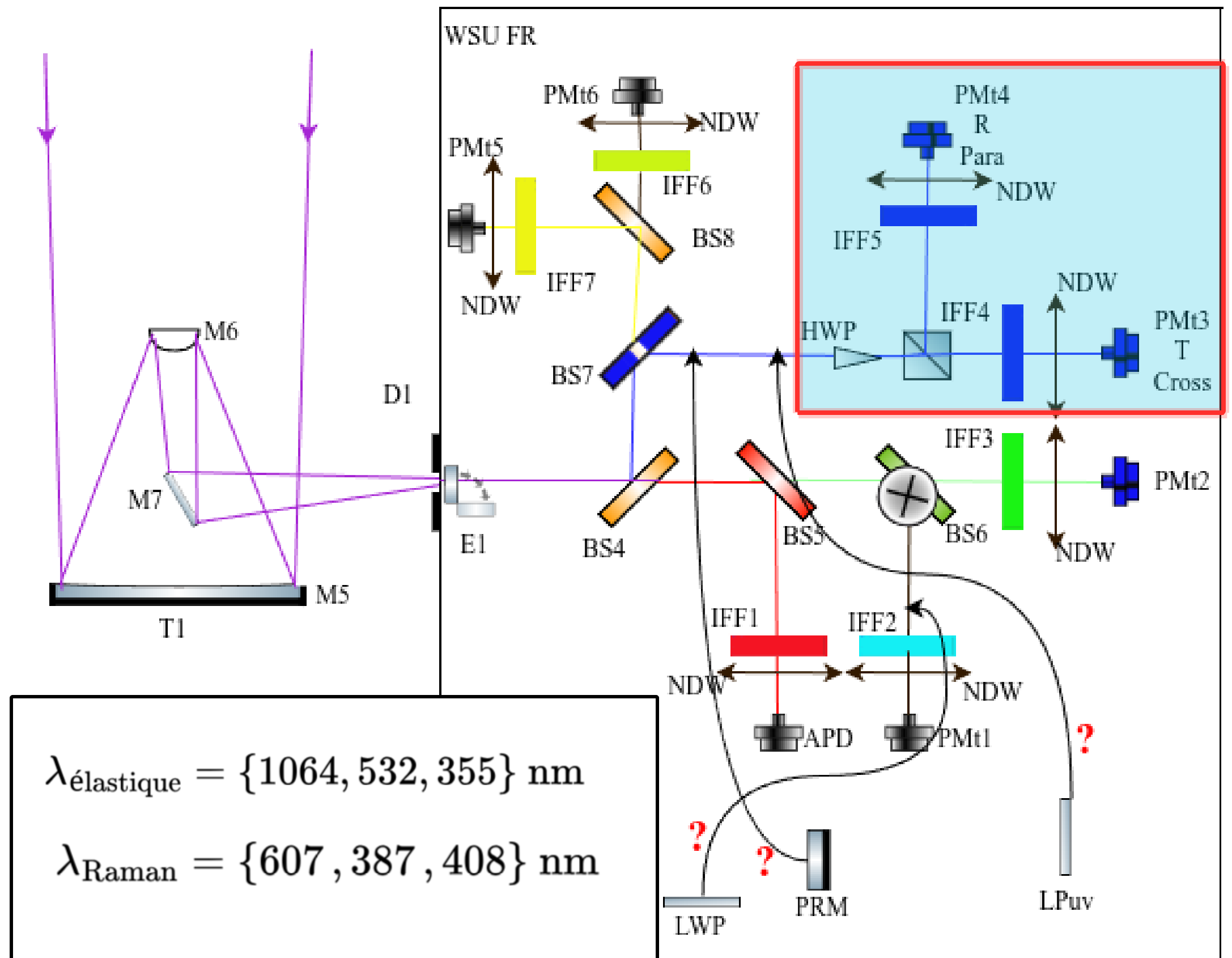
Les matériaux supplémentaires

Architecture du système LIDAR IPRAL (SIRTA)



Émission

Laser : 3λ (1064 - H, 532 - V, 355 - H)

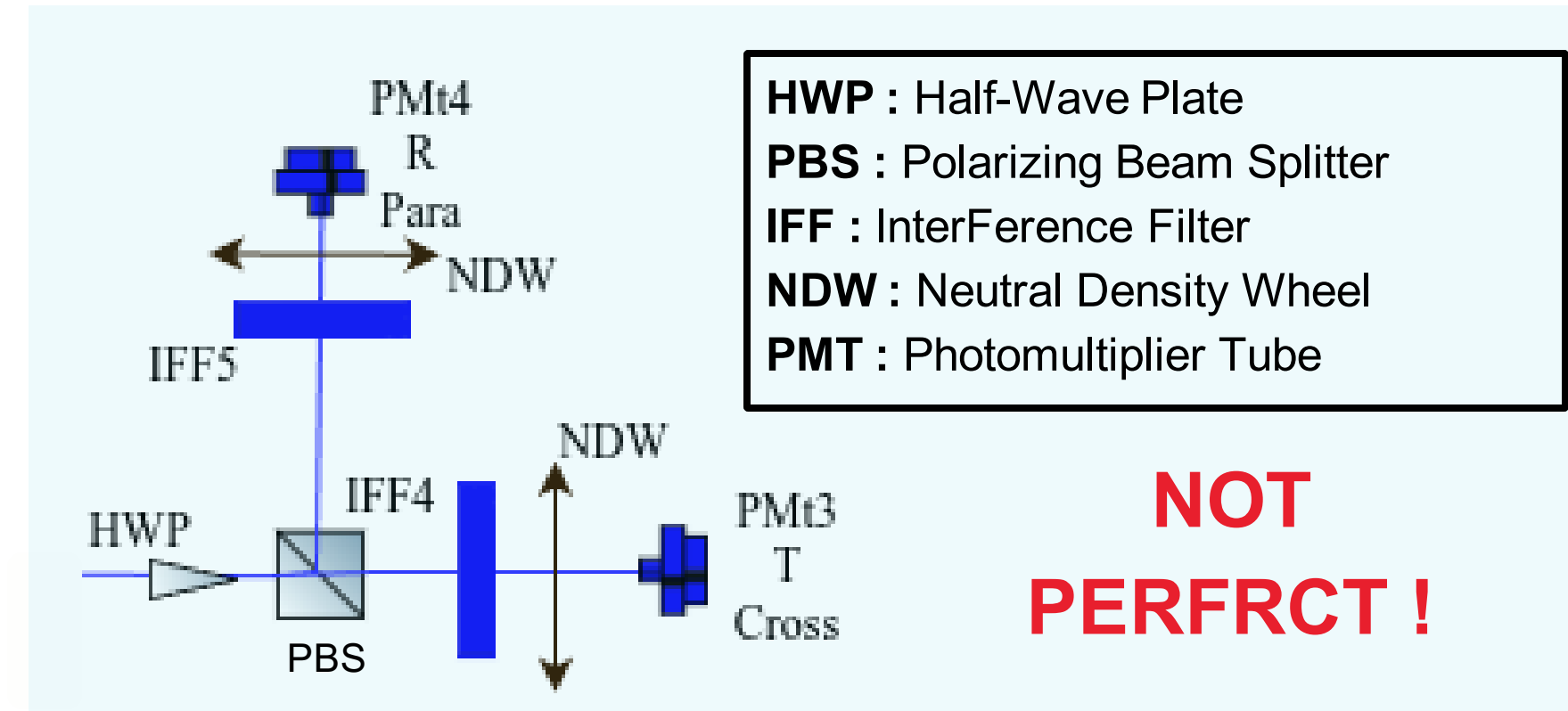
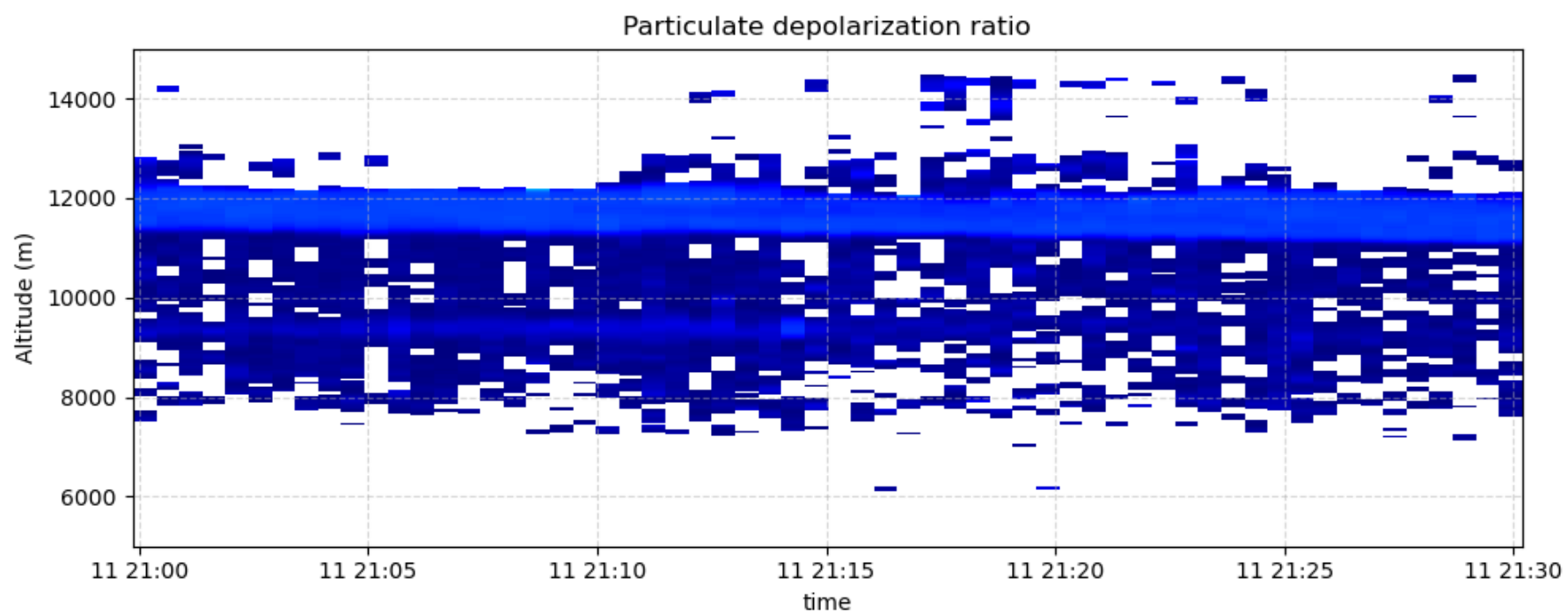
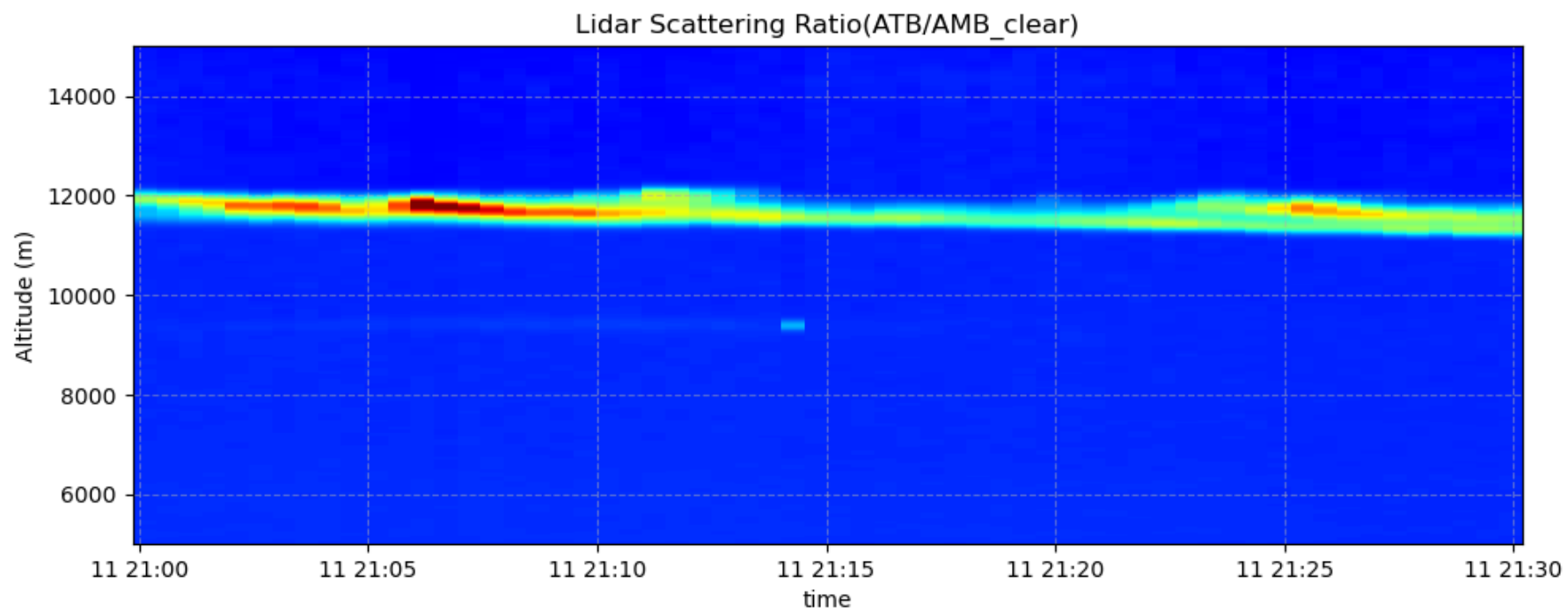


Réception

Validation du calcul de dépolarisation

Calcul de la dépolarisation :

$$\delta = \frac{ATB_{\perp} - AMB_{\perp}^{\text{clear}}}{ATB_{\parallel} - AMB_{\parallel}^{\text{clear}}}$$



1) Correction de la fuite du canal parallèle vers le canal perpendiculaire.

$$P_{\perp}^{\text{vrai}} = P_{\perp}^{\text{mesuré}} - \gamma \cdot P_{\parallel}^{\text{mesuré}}$$

- (γ) : Fuite du signal \parallel vers \perp évaluée à $\sim 2\%$.

Le Crosstalk des canaux (parallèle vs perpendiculaire)

$$\begin{pmatrix} P_{\perp, \text{true}} \\ P_{\parallel, \text{true}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_1 & d_2 \\ d_3 & d_4 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} P_{\perp, \text{mes}} \\ P_{\parallel, \text{mes}} \end{pmatrix}$$

$$P_{\perp, \text{true}} = d_1 P_{\perp, \text{mes}} + d_2 P_{\parallel, \text{mes}}$$

$$P_{\parallel, \text{true}} = d_3 P_{\perp, \text{mes}} + d_4 P_{\parallel, \text{mes}}$$

Pour résoudre ce système d'équations, on utilise :

$$d_3 = 0 \quad (\text{car } P_{\parallel} \gg P_{\perp})$$

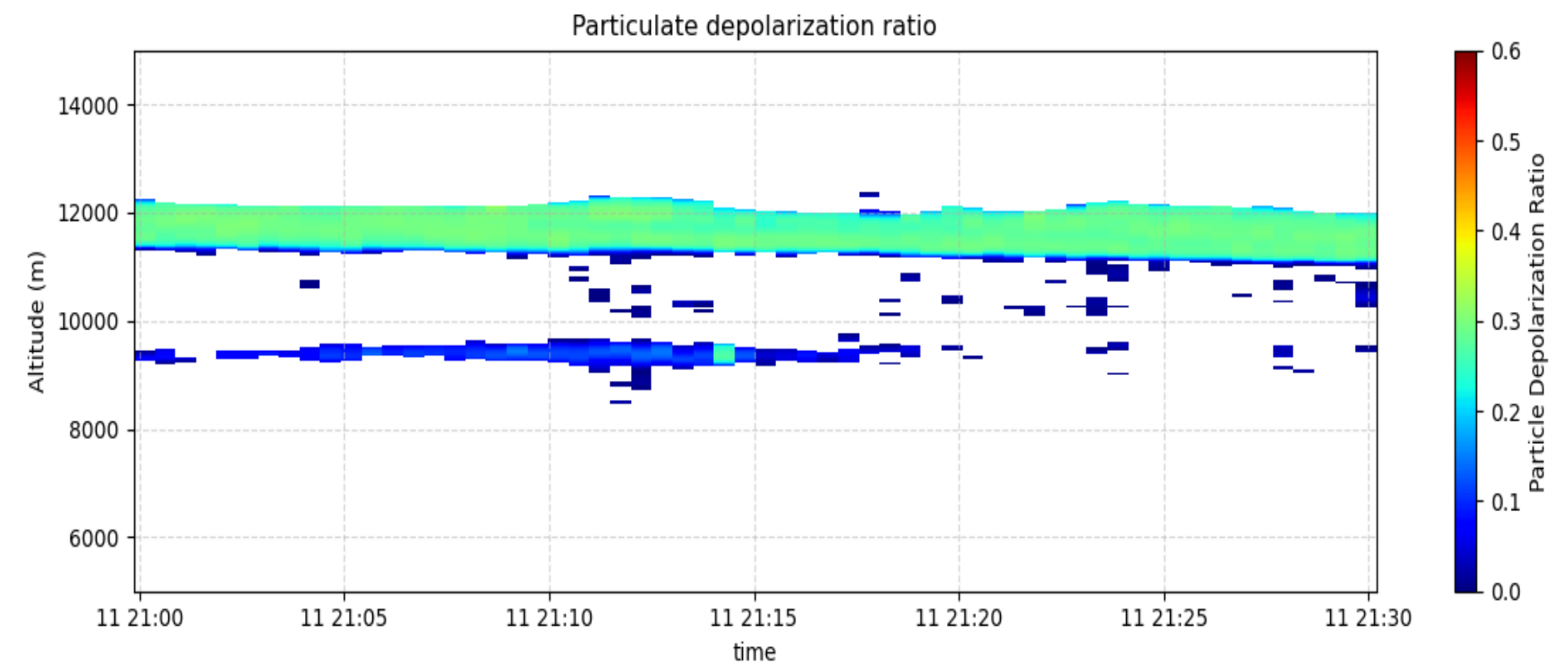
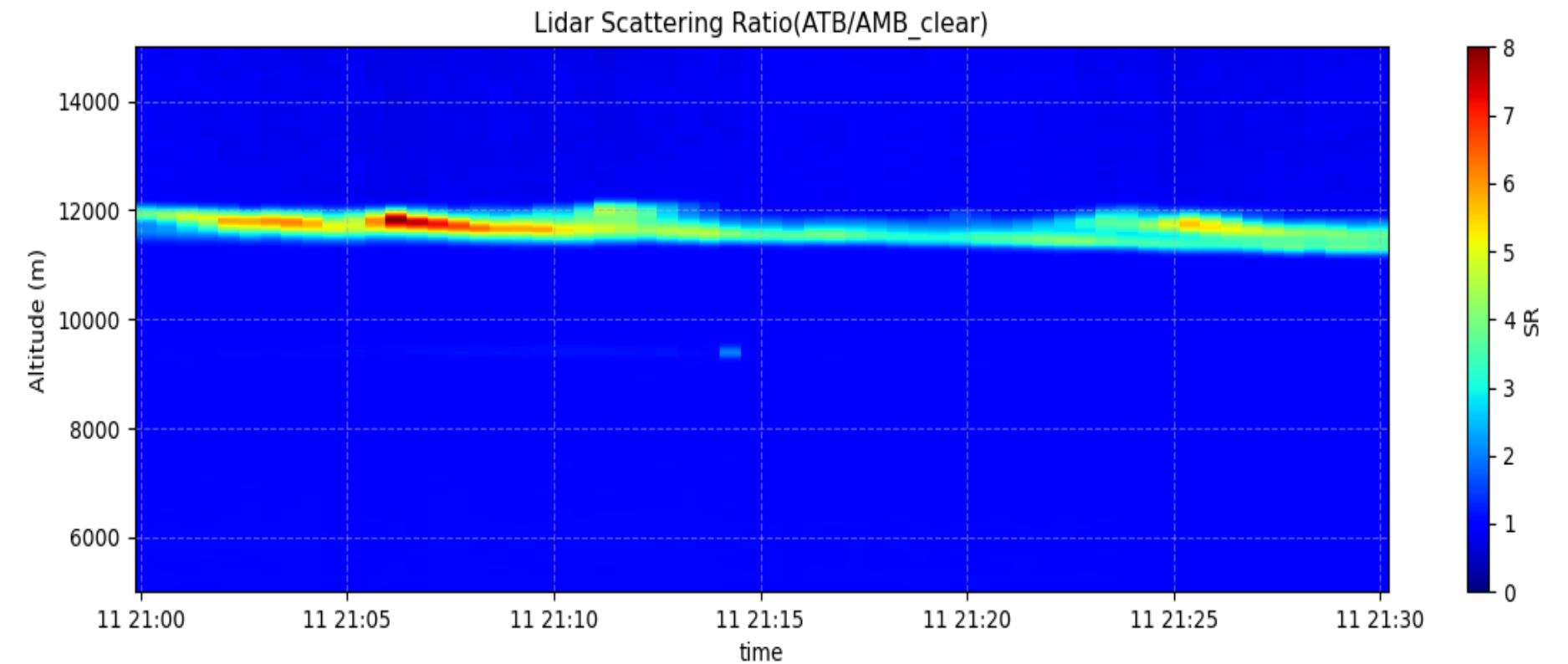
$$d_4 = \frac{P_{\parallel, \text{true, mol}}}{P_{\parallel, \text{mes, mol}}}$$

Avec $\begin{cases} \delta_{\text{mol}} = 0.004 & (\text{Ciel clair}) \\ \delta_{\text{cirrus}} \approx 0.4 & (\text{Cristaux de glace}) \end{cases} \implies \text{On obtient :}$

$$d_1 = \frac{\delta_{\text{mol}} P_{\parallel, \text{true, mol}} - d_2 P_{\parallel, \text{mes, mol}}}{P_{\perp, \text{mes, mol}}}$$

$$d_2 = \frac{\delta_{\text{cirrus}} d_4 P_{\parallel, \text{mes, cirrus}} P_{\perp, \text{mes, mol}} - \delta_{\text{mol}} P_{\parallel, \text{true, mol}} P_{\perp, \text{mes, cirrus}}}{P_{\parallel, \text{mes, cirrus}} P_{\perp, \text{mes, mol}} - P_{\parallel, \text{mes, mol}} P_{\perp, \text{mes, cirrus}}}$$

Après la correction du cross-talk



L'équation lidar
:

$$P(z, \lambda) = \frac{K(\lambda)}{z^2} \beta(z, \lambda) \exp \left[-2 \int_0^z \alpha(z', \lambda) dz' \right] \quad (\text{Lafrique, 2015})$$

Inversion klett : contrainte fixée Lidar Ratio $\text{LR}(\lambda) = \frac{\alpha(z, \lambda)}{\beta(z, \lambda)}$ constant

En fixant une condition z_r (où $\beta_p(z_r) \approx 0$), on obtient :

$$\beta_p(z) = \frac{P(z) z^2 \exp \left[2(\text{LR} - \text{LR}_m) \int_z^{z_r} \beta_m(z') dz' \right]}{\frac{P(z_r) z_r^2}{\beta_p(z_r) + \beta_m(z_r)} + 2(\text{LR}) \int_z^{z_r} P(z') z'^2 \exp \left[2(\text{LR} - \text{LR}_m) \int_{z'}^{z_r} \beta_m(z'') dz'' \right] dz'} - \beta_m(z)$$

- β_p : Rétrodiffusion des particules (inconnue)
- β_m : Rétrodiffusion des molécules (connue)
- LR : Rapport lidar aérosols
- LR_m : Rapport lidar moléculaire
- z : Altitude de mesure
- z_r : Altitude de référence
- P(z) : Signal lidar reçu
- K : Constante du système

Le Block Matching : Suivi Spatio-Temporel des Nuages

T0 (Frame 1) :



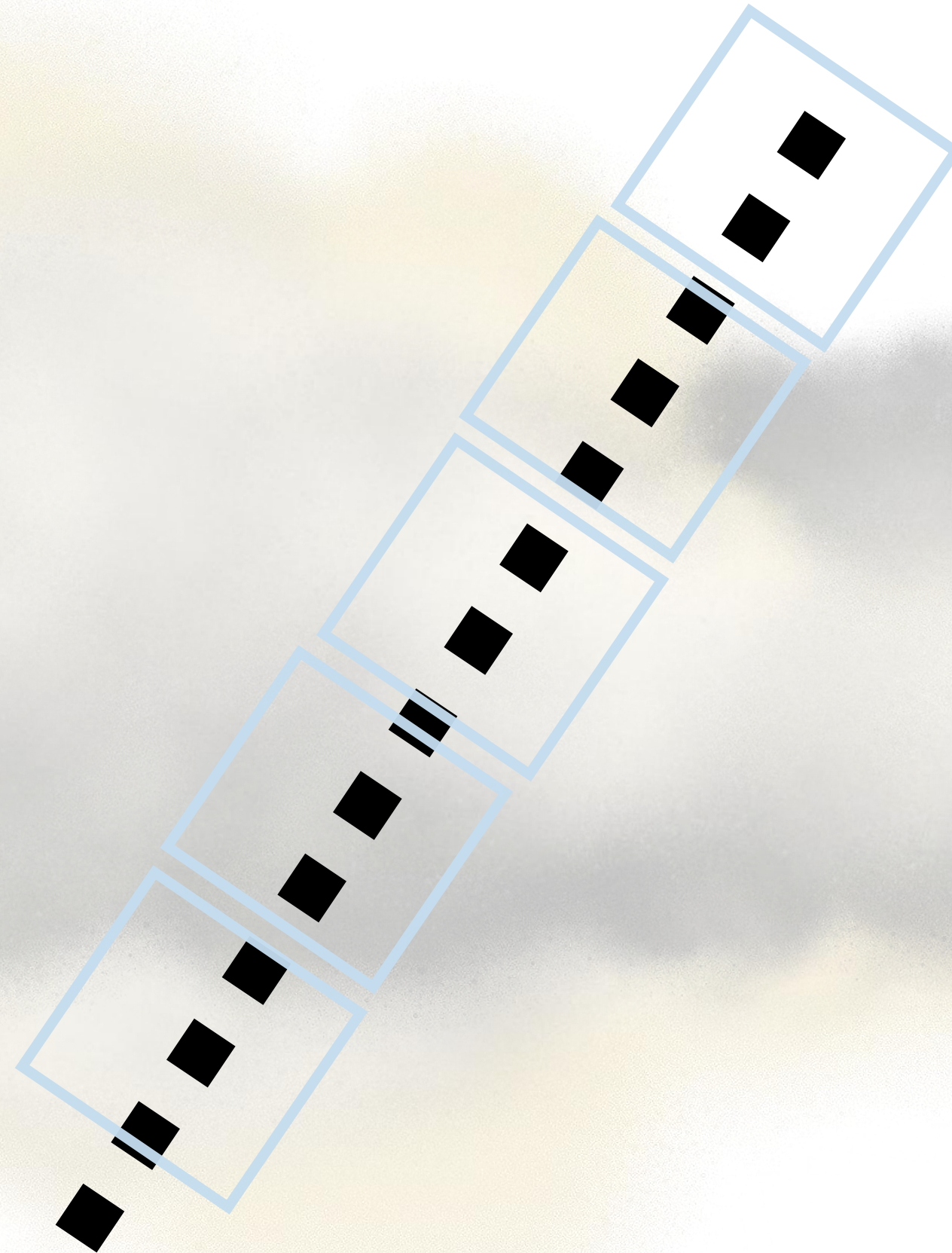
IPRAL / SIRTA : Station fixe au sol.



Trace ATLID : Passage du satellite.



Blocs SEVIRI : Fenêtres de Block Matching.



Le Block Matching : Suivi Spatio-Temporel des Nuages

T1 (Frame 2) :



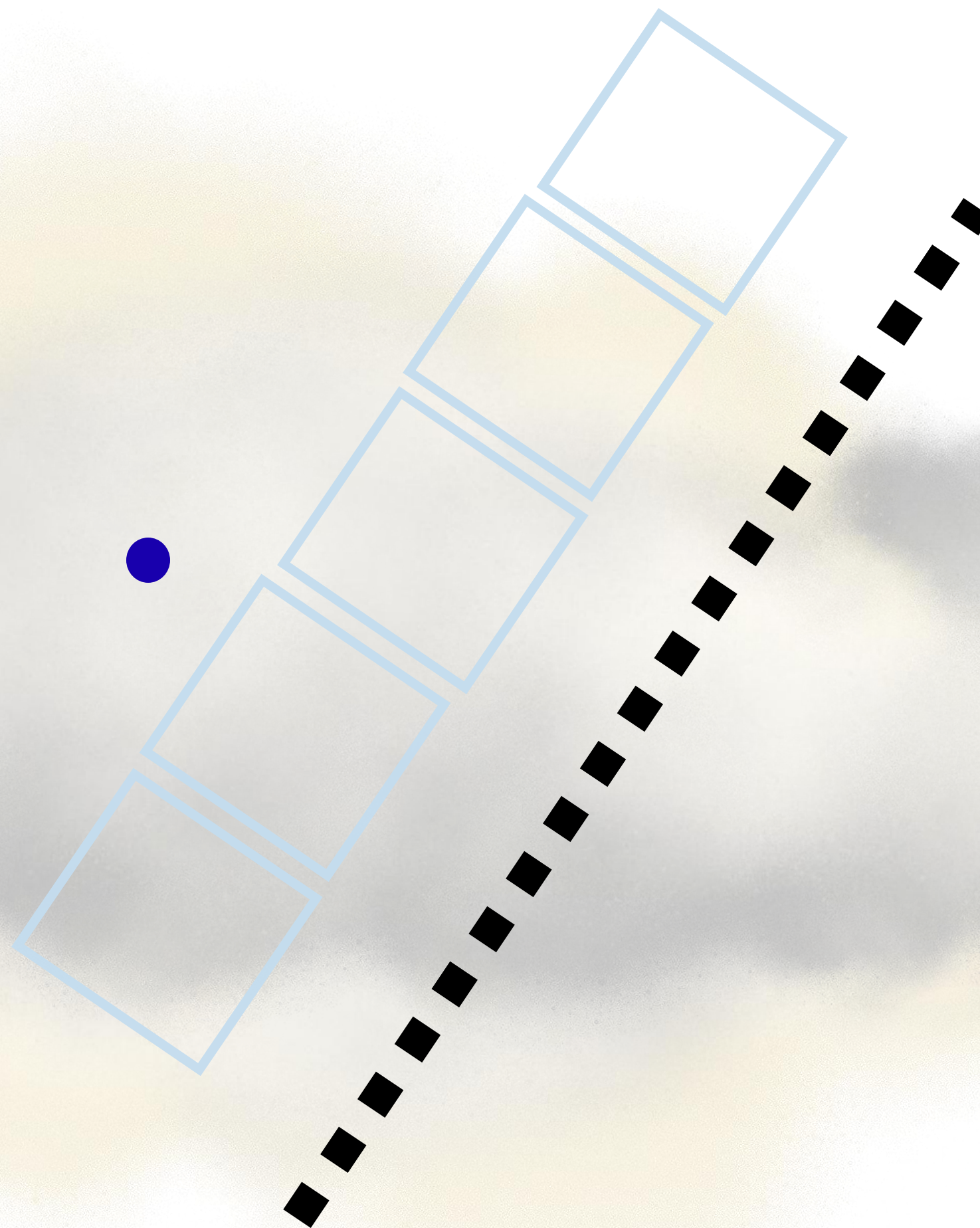
IPRAL / SIRTA : Station fixe au sol.



Trace ATLID : Passage du satellite.






Blocs SEVIRI : Fenêtres de Block Matching.



Le Block Matching : Suivi Spatio-Temporel des Nuages

T2 (Frame 3) :

-  **IPRAL / SIRTA** : Station fixe au sol.
-  **Trace ATLID** : Passage du satellite.
-  **Blocs SEVIRI** : Fenêtres de Block Matching.

