

Qualification des Observations de vapeur d'eau dans la région de vol des Aéronefs dans le cadre du Projet BeCoM

Dunya Alraddawi⁽¹⁾, Philippe Keckhut⁽¹⁾, Guillaume Payan⁽²⁾, Sidy Diarra⁽¹⁾⁽³⁾, Jean-Charles Dupont⁽⁴⁾, Jean-Luc Baray⁽³⁾, Nadège Montroux⁽³⁾, Antoine Farah⁽⁵⁾, Alexis Poignard⁽¹⁾⁽⁵⁾, Florian Mandija⁽¹⁾, Abdanour Irbah⁽¹⁾, Florian Lapouge⁽⁴⁾, Michael Sicard⁽²⁾, Alain Sarkissian⁽¹⁾ Alain Hauchecorne⁽¹⁾

(1) LATMOS (2) LaCy (3) LaMP (4) SIRTA (5) Meteomodem

La Journée Scientifique du SIRTA: 24 Juin 2025





L'essentiel du BeCoM

- Le forçage radiatif effectif (ERF) des traînées de condensation représente environ 50 % du forçage radiatif total de l'aviation, avec une grande incertitude
- Les traînées persistantes se forment dans des régions en sursaturation glace (ISSR), $RH > 100\%$



Trainées de condensation à SIRTA (Mai 2025)
Crédit @MA. Drouin



BeCoM vise à optimiser les trajectoires Aériens pour mieux éviter les zones ISSR

Les modèles actuels de prévision numérique NWP, ont de mal à bien prévoir ISSR. Leurs principales sources d'erreur:

- Peu de mesures d'humidité en altitude (Gierens et al., 2023)
- Schémas de nuages trop simplifiés dans les NWP



WP1

- **Objectif WP1:** Améliorer la modélisation de l'humidité en Troposphère Haute
- **Actions WP1:**
 - Qualifier les mesures actuelles de l'humidité et identifier leurs limitations/incertitudes
 - Identifier des études de cas
 - Alimenter les modèles NWP



Table de matière



Actions de BeCoM WP1:

Qualifier les mesures d'humidité en haute troposphère



Octobre 2023 - Juin 2025



Evaluer les mesures Raman Lidar (IPRAL): Calibration + Validation (Alraddawi et al. 2025)

- Radiosondage (GRUAN M10 analyse)
- Re-analyse opérationnel ERA5
- Re-analyse corrigé de model ERA5 par (IAGOS)

Evaluer les mesures (contenus) de Radiosondage GRUAN M10 via comparaison à ERA5
(Diarra et al., à soumettre)

Evaluer les mesures (Campagne TRACIS) de Radiosondage (M10, M20, RS41), via comparaison à ERA5: (Thèse de Alexis Poignard) —> **Poster: Poignard et al.,**

Evaluer les mesure Raman Lidar (lid1200): (Alraddawi et al. en préparation)

- Incertitude de satellite (MLS)
- Incertitude de re-analyse ERA5





Actions de BeCoM WP1:

Qualifier les mesures d'humidité en haute troposphère



Octobre 2023 - Juin 2025



Evaluer les mesures Raman Lidar (IPRAL): Calibration + Validation (Alraddawi et al. 2025)

- Radiosondage (GRUAN M10 analyse) (Dupont et al., 2020)
- Re-analyse opérationnel ERA5 (Hersbach et al., 2023)
- Re-analyse corrigé de model ERA5 par (IAGOS) (Hafer et al., 2024)



IPRAL : Le Lidar (SIRTA 48.7°N 2.2°E)

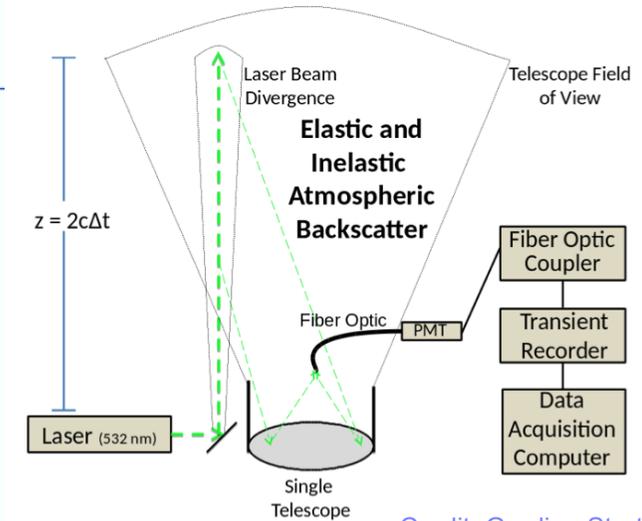


Lidar IPRAL

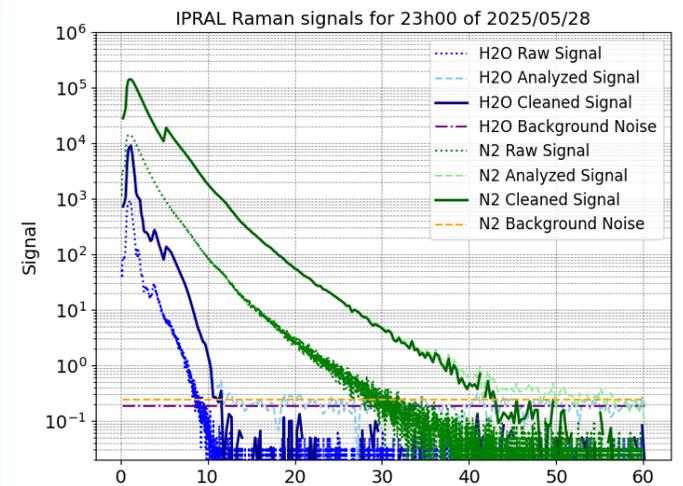
Système Lidar **bi-axial**, Mesures continus nocturnes/diurnes en absence de nuages bas

Faisceau Laser émis à 355 nm:

- Retrodiffusion (élastique): effet Reyleigh-Mie : Nuages (distribution et extension verticale)
- Retrodiffusion (inélastique): effet Raman (WVMR profiles)



Credit: Gordien Strato.



Les signaux Raman sommés d'une heure: pour N_2 , H_2O , avec leurs niveau de bruits, crédit (Alraddawi et al., 2025)

Le signal de rétrodiffusion Raman:

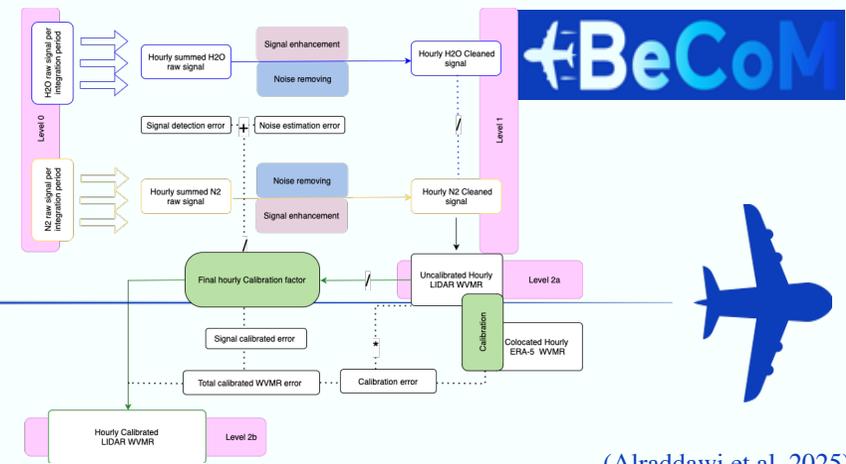
- Collecté par le télescope
- Détecté en mode de comptage de photon
- Enregistré en fonction de temps (Altitude), à deux longueurs d'ondes:
 - 387 nm pour N_2 (effet de l'air sec)
 - 408 nm pour H_2O (effet de vapeur d'eau)

$$WVMR(z) = C \cdot T(z) \cdot \frac{S_{H_2O}(z) - B_{H_2O}(z)}{S_{N_2}(z) - B_{N_2}(z)}$$



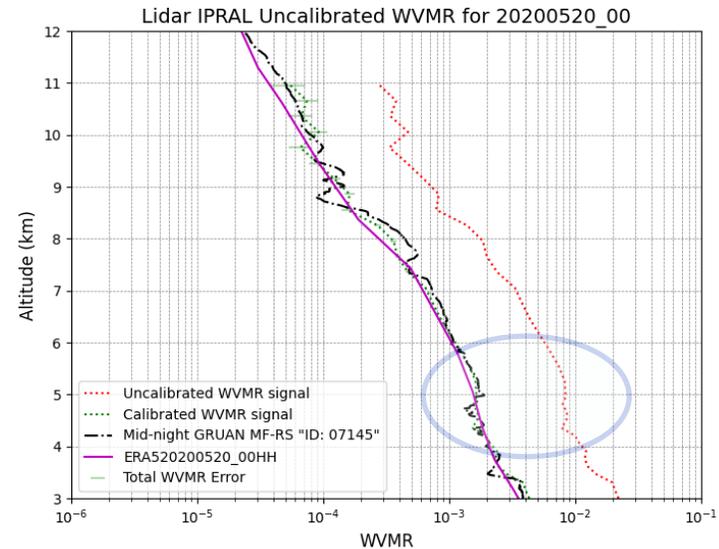
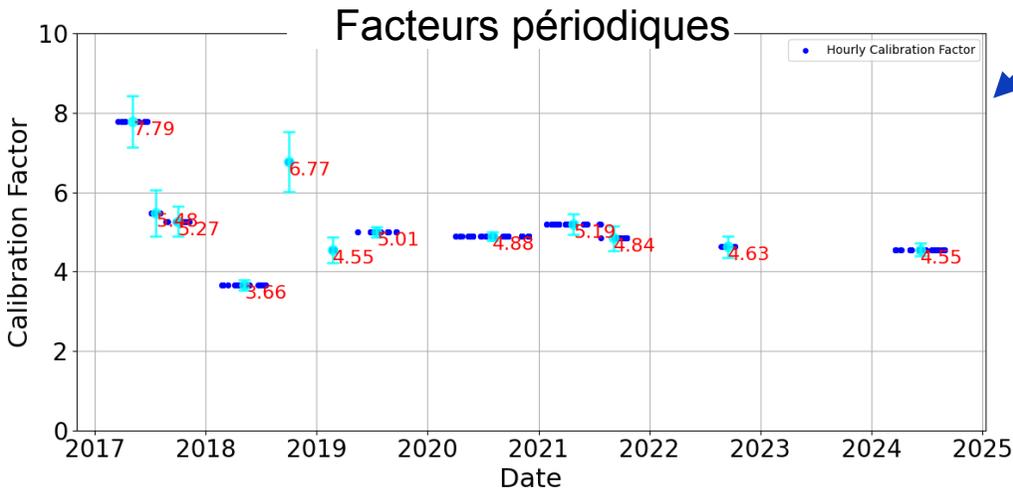
Evaluer les mesures Raman Lidar (IPRAL)

A. Calibration



(Alraddawi et al. 2025)

Chaîne de traitement (WVMR)



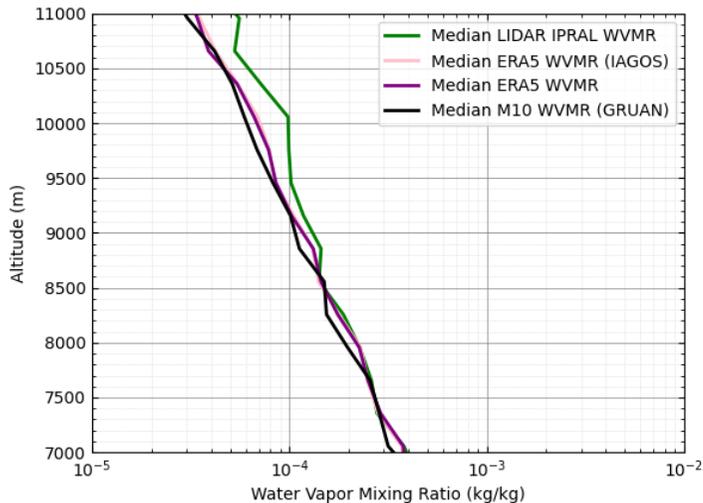
WVMR profile de: ERA5, GRUAN, Lidar non calibré, Lidar calibré pour l'heure de minuit de 20/05/2020

Evaluer les mesures Raman Lidar (IPRAL)

B. Validation (1): Jeu de données



Compared Dataset	Vertical Resolutio ^o	N ^o of compared profiles	WVMR calcul	Reference
IPRAL (LIDAR)	150m up to 6km and 300m above	122	WVMR Calibrated profiles	Alraddawi et al., 2025
ERA5	As LIDAR	122	WVMR from SH	Hersbach et al.,2023
ERA5 IAGOS	As LIDAR	122	WVMR from (T,P,RH corrected IAGOS) (Sonntage)	Hafer et al.,2024
RS M10 GRUAN	As LIDAR	62	Sonntage	Dupont et al.,2020



- Profiles Lidar/ERA5 WVMR à résolution 1 heure (minuit: TU)
- Profiles ERA5 avec corrections IAGOS (RH corrigés ciblent la mauvaise représentation des zones en sursaturation glace (ISSz))
- Profiles GRUAN WVMR pour le lâcher de minuit (TU)

- Comparaison entre 7 et 11 km
- Observations contenues : 03/2017 - 08/2024 

- ✓ Général agreement (Corrélation > 80%)
- ✓ IPRAL détecte plus d'humidité en haute Troposphère (>8.5 km)

Profil Médian du vapeur d'eau
LIDAR, ERA5, ERA5 corrigé IAGOS, GRUAN RS.

Crédit: (Alraddawi et al. 2025)



Altitude (m)

0



Evaluer les mesures Raman Lidar (IPRAL)

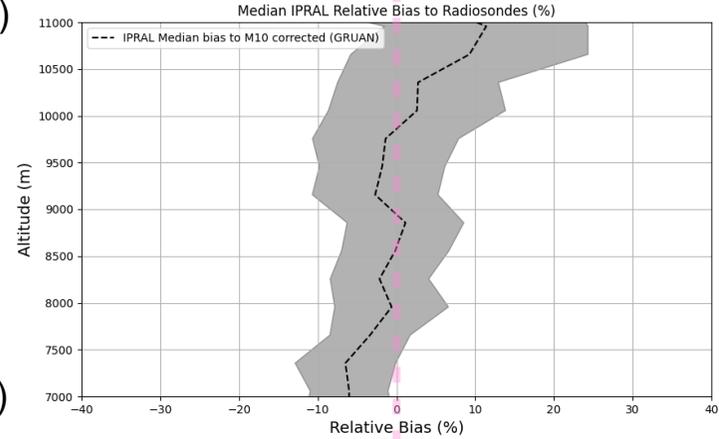
B. Validation (2): Biais

$$\text{Relative Bias} = \left(\frac{\text{WVMR}_{\text{lidar}} - \text{WVMR}_{\text{other}}}{\text{WVMR}_{\text{lidar}}} \right) \times 100$$

$$\text{Erreur}(z) = \frac{\text{pseudo}(\sigma_{\text{Relative Bias}(z)})}{\sqrt{N(z)}} \quad (\text{Lanzant 1996})$$



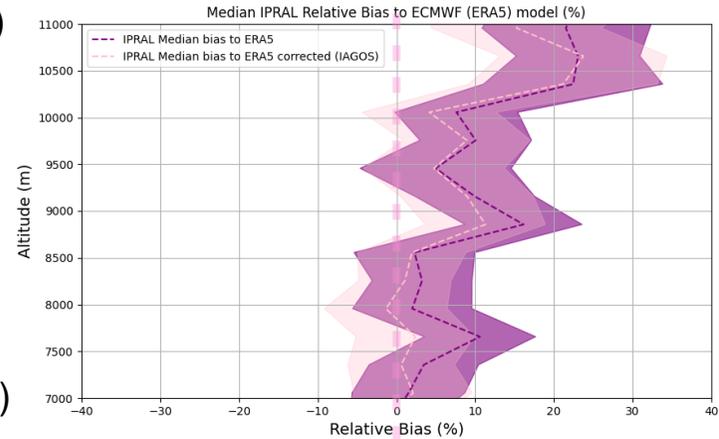
11000 (m)



7000 (m)

Crédit: (Alraddawi et al. 2025)

11000 (m)



7000 (m)

Biais médian relative (lidar-autre)/lidar

Biais (%)

0



Actions de BeCoM WP1:

Qualifier les mesures d'humidité en haute troposphère



Octobre 2023 - Juin 2025



Evaluer les mesures (contenus) de Radiosondage GRUAN M10 via comparaison à ERA5

(Diarra et al., à Soumettre)



Evaluer l'humidité relative de Radiosondage comparé à ERA5

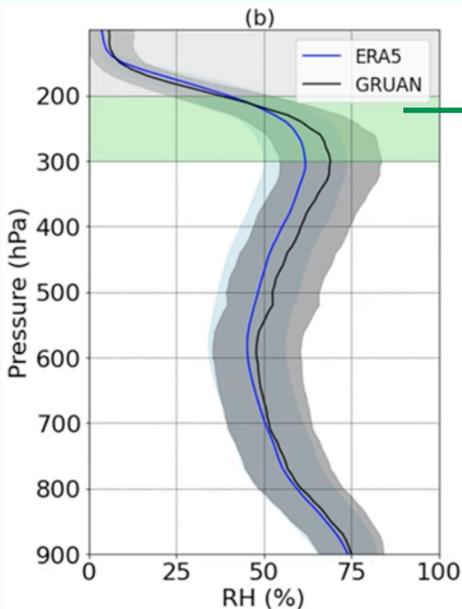


GRUAN Vs ERA5

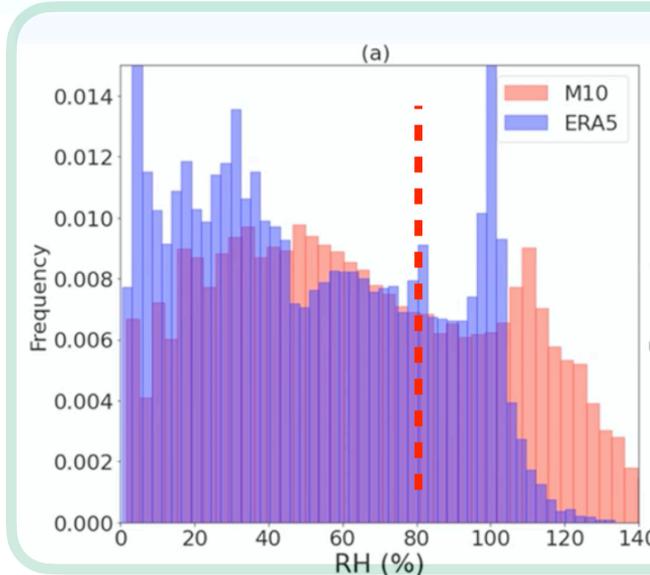
- ✓ ERA5 a un bias sec par rapport au GRUAN qui augment avec l'altitude (5-15%)
- ✓ Le Biais est plus important dans les conditions humides (RH>80%)
- ✓ ERA5 voit moins de situation de sursaturation (RH>100)

Données 
2021, 2022

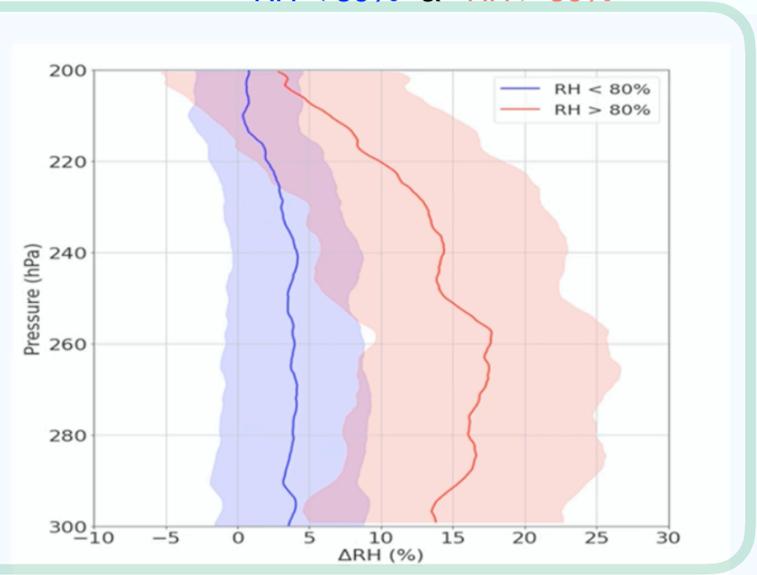
Profil médian de l'humidité relative par GRUAN, ERA5



Distribution des valeurs de l'humidité relative (200-300 hpa) par GRUAN, ERA5



Biais médian de l'humidité relative (200-300 hpa) distingués en deux catégories RH < 80% & RH > 80%





Actions de BeCoM WP1: Qualifier les mesures d'humidité en haute troposphère



Octobre 2023 - Juin 2025



Evaluer les mesures (Campagne TRACIS) de Radiosondages (M10, M20, RS41), via
comparaison à ERA5: (Thèse de Alexis Poignard) —> **Poster: Poignard et al.,**





TRACIS: Tropospheric Research campaign of Air humidity Content by lidar Ipral at Sirta

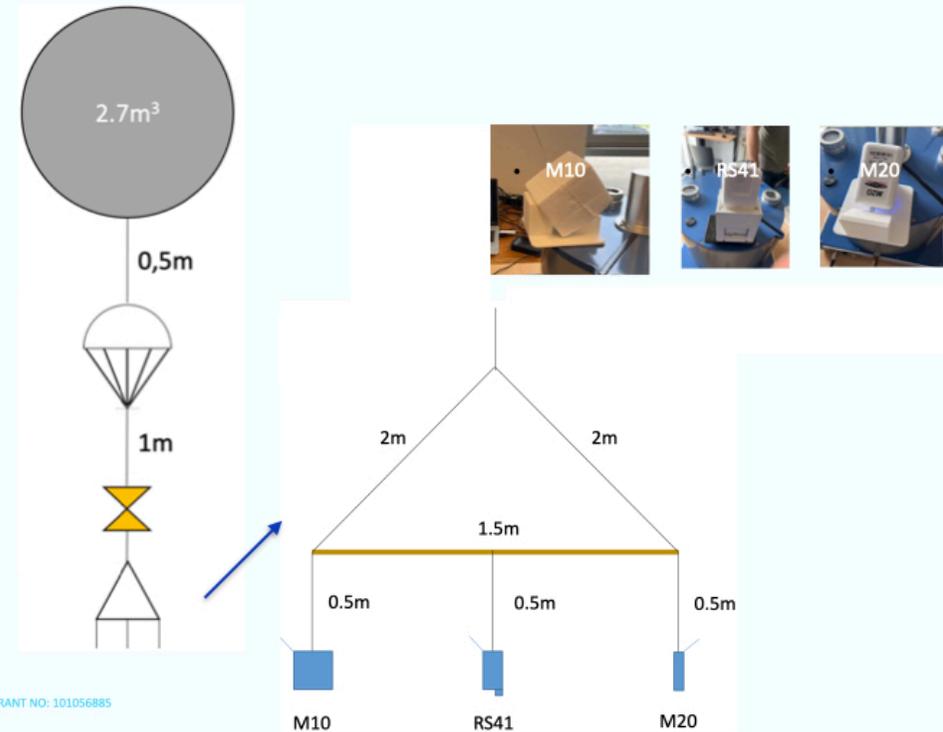


Figure 1: Representation schematic de système de vol de ballon stratosphérique triple-attelage (M10, M20, and RS41), équipé d'une parachute pour assurer la descente.



Objectives

- ✓ Validation de l'algorithme vapeur d'eau lidar IPRAL (Alraddawi et al., 2025)
- ✓ Inter-comparison entre (M10, M20, RS41) et ERA5 + étape vers la certification GRUAN M20 (Thèse A. Poignard: Metemodem/LATMOS) → **Poster: Poignard et al.,**
- ✓ Etudes de cas traînées de condensation (jour/nuit): Images IR, lidar, RS
- ✓ Inter-comparison TCWV (MiniSaoz, GNSS, RS)



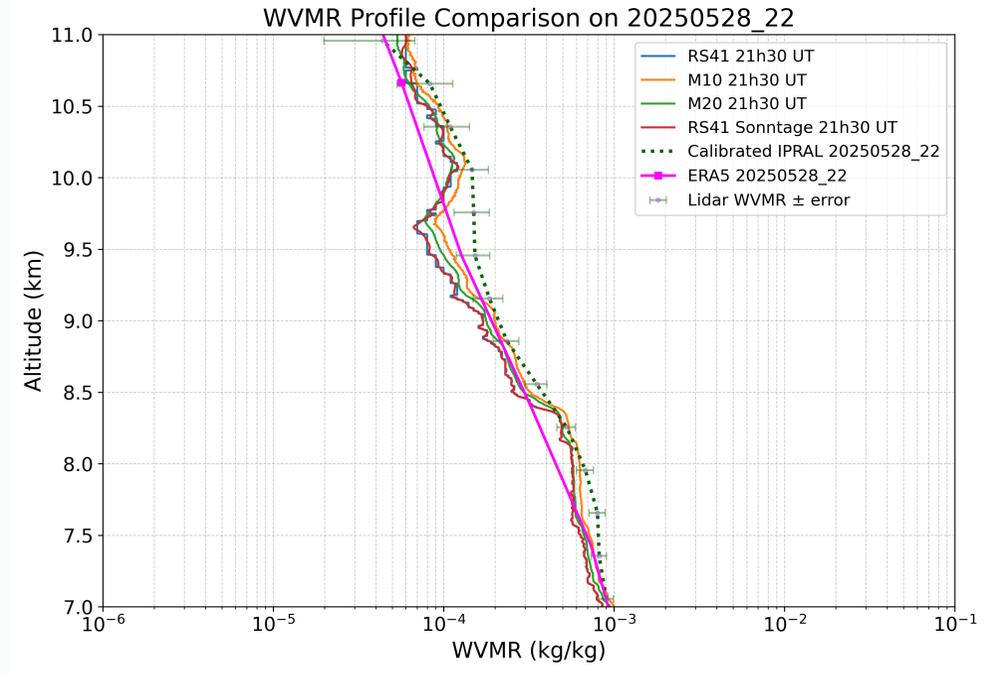


TRACIS: Tropospheric Research campaign of Air humidity Content by lidar Ipral at Sirta



TRACIS objective principale

✓ Validation de l'algorithme vapeur d'eau lidar IPRAL (Alraddawi et al., 2025) via Inter-comparaison à (M10, M20, RS41) et ERA5



Exemple de la nuit de 28/05/2025: Profil vapeur d'eau: IPRAL en vert pointé, et lignes horizontales est l'erreur, radiosondes (M10: orange, M20: vert, RS41 operational en bleu et RS41 sonntage Calculé en rouge, ERA5 WVMR profile en violet.



Actions de BeCoM WP1:

Qualifier les mesures d'humidité en haute troposphère



Octobre 2023 - Juin 2025



Evaluer les mesures Raman Lidar (lid1200): (Alraddawi et al. en préparation)

1. Incertitude de satellite (MLS)
2. Incertitude de re-analyse ERA5



Evaluer les mesures d'humidité dans la troposphère haute tropicale:

A. Jeu de données universel: MLS, ERA5



2013 - 2023

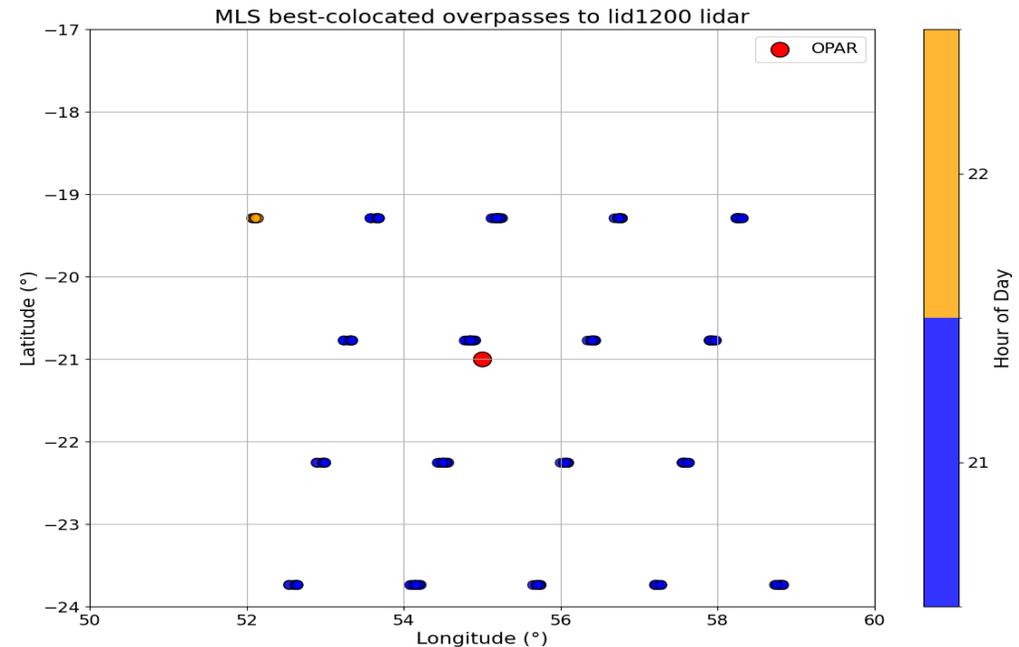


Microwave Limb Sounder MLS (Lambert et al., 2020), L1 journalière

- Peu de survols MLS → besoin d'une période plus longue pour pouvoir comparé au Lidar
- MLS survols nocturnes à 21h00 & 22h00 (TU)
- Altitude valide > 8 km
- Résolution verticale dégradée avec l'altitude (1.5 km en troposphère haute)

ERA5 (Hersbach et al., 2023), Horaires

- Résolution vertical et temporelle très fine
- 37 niveaux de pressions
- Résolution spatiale fine (0.25°)
- Meilleur coïncidence spatiale au Lidar





Evaluer les mesures d'humidité dans la troposphère haute tropicale:

B. Méthode de comparaison au lidar Raman (lid1200)



2013 - 2023

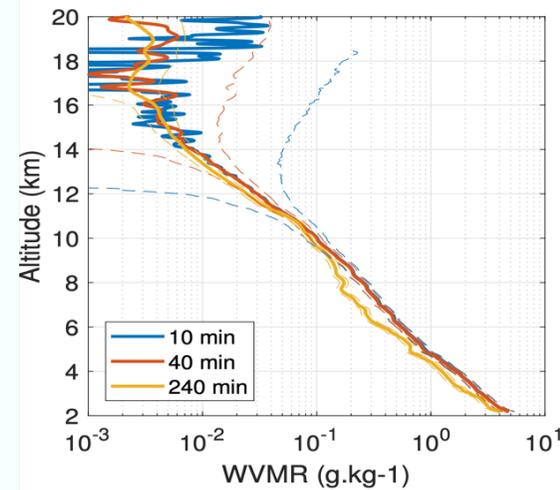


Le Lidar puissant **lid1200**, fait partie de réseau NDACC, avec une système **Co-axial** —> calibrés via la quantité totale en vapeur intégrée GNSS (IWV), fournit des **profils vapeur d'eau à partir de la surface jusqu'au:**

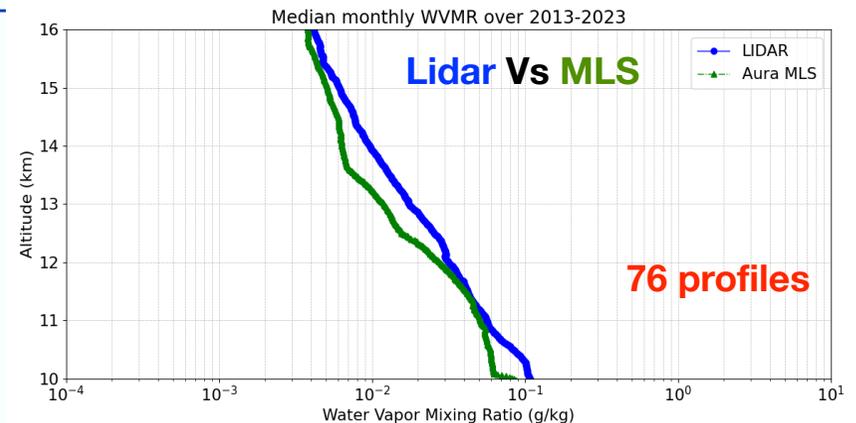
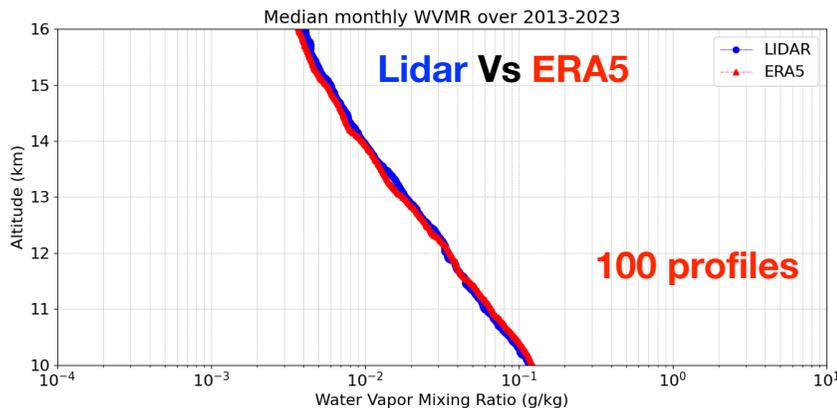
- 14 km dans une routine d'intégration de quelques minutes
- Si temps d'intégration lidar plus longue -> gagne de signal (Hérèmes et al., 2019) —> profile étendue plus haute —> Haute troposphère tropicale (12-16 km)
- Critère de qualité : erreur < 30 %

Profils Pseudo mensuels de rapport de mélange WVMR de:

- **Lidar Raman (lid1200)**
- **MLS:** Survol MLS coïncides au lidar avec contrainte spatiale de $\pm 4^\circ$
- **ERA5:** Données horaires ERA5 coïncides au lidar, avec seuil spatial de $0,2^\circ$



Crédit: Hérèmes et al., 2019





Evaluer les mesures d'humidité dans la troposphère haute tropicale: C. Biais (Lidar Vs MLS), (Lidar Vs ERA5)



2013 - 2023



$$\text{Relative Bias} = \left(\frac{\text{WVMR}_{\text{lidar}} - \text{WVMR}_{\text{other}}}{\text{WVMR}_{\text{lidar}}} \right) \times 100$$

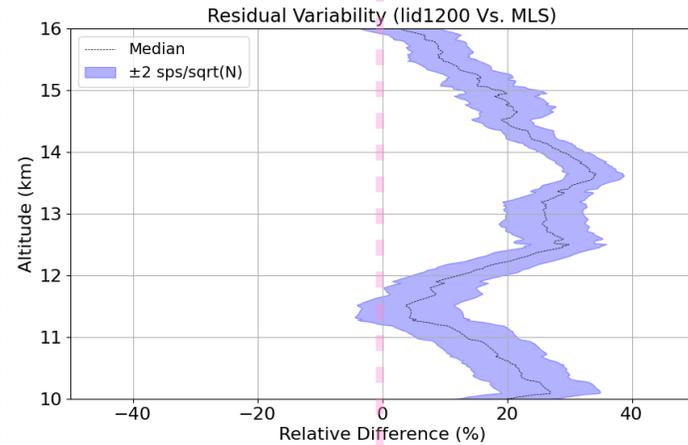
Lidar Vs MLS

- Biais sec MLS dépendent de l'altitude dès 10 km, atteignant 30%
 - Une variabilité plus forte en saison humide (de oct à avr), peut être lié à de meilleure performance de lidar

Lidar Vs ERA5

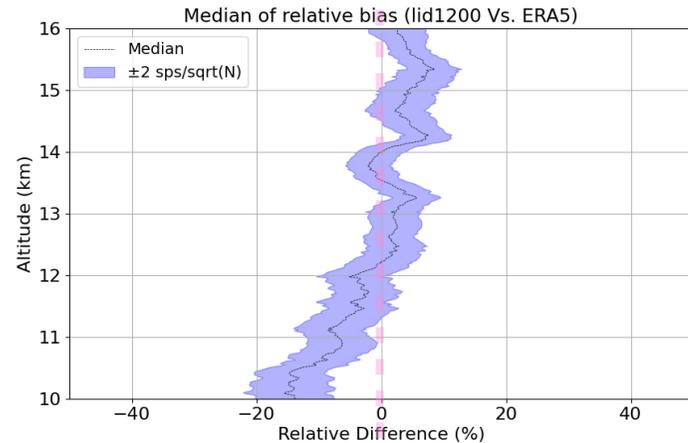
- Petit biais sec ERA5 dépendent de l'altitude dès 12 km, atteignant 10%
 - devient plus marqué au-dessus de 14 km, notamment en saison humide.

16 (km)



10 (km)

16 (km)



10 (km)

Biais (%)

0

À retenir



Pour améliorer la capacité des modèles à prévoir les zones de sursaturation en glace (ISSR) dans la haute troposphère, et ainsi optimiser les trajectoires d'avions pour limiter la formation de traînées de condensation persistantes, *des mesures précises de l'humidité sont indispensables.*

Les mesures Raman lidar semblent moins affectés aux conditions de sursaturation en glace

Les mesures Raman lidar permettent d'évaluer les incertitudes/limitations des autres sources de mesures (**MLS, ERA5, GRUAN**), **via des comparaisons à différents échelles temporels**

ERA5 présente **un biais sec systématique**:

- **Moyennes latitudes** : jusqu'à **20 %**, mieux corrigé avec les jeux de données IAGOS-MOZAIC ciblant de corriger l'humidité relative d'ERA5 aux situations de sursaturation
- **Tropiques** : biais plus modéré (~10 %), mais plus marqué en saison humide

MLS est biaisé sec dans les tropiques, le biais allant jusqu'à **20–30 %**, est plus marqué en saison humide tropicale, (résultats en accord avec des études antérieures: Yan et al., 2016 ; Dionisy et al., 2015 ; Leblanc et al., 2012)

GRUAN a le meilleur accord avec lidar aux moyennes latitudes (**petit biais sec < 10%**)

Merci!

Questions ?

