

# Techniques optiques pour la mesure atmosphérique

Frédérique Auriol

Laboratoire d'Optique Atmosphérique



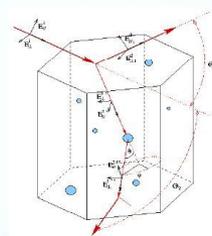
# Présentation du Laboratoire d'Optique Atmosphérique

Thèmes de recherche: étude des nuages, des aérosols, des gaz et de leur interaction avec le rayonnement solaire ou tellurique

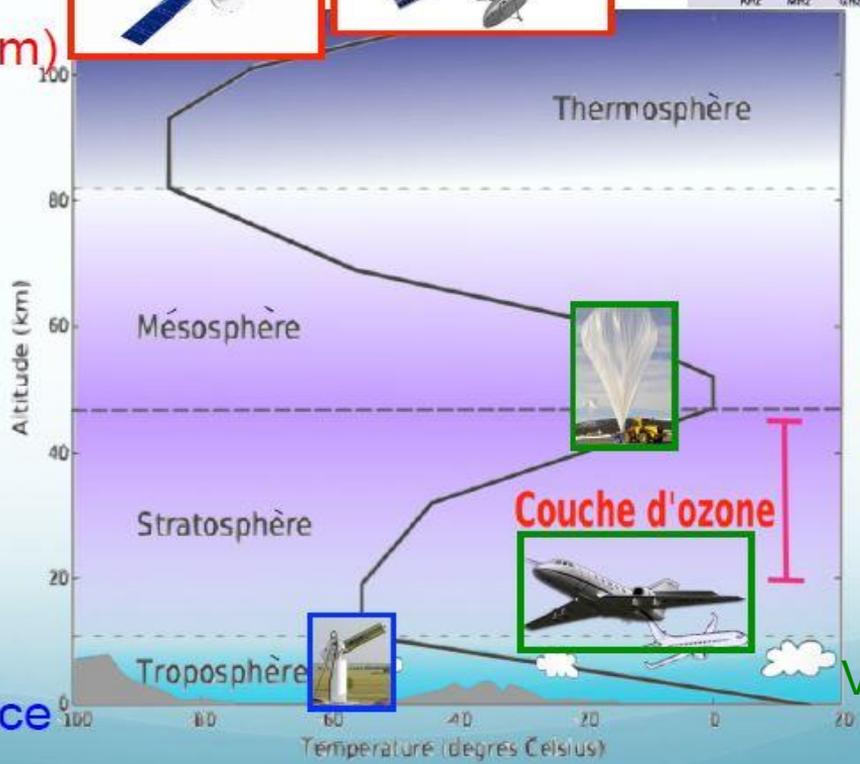
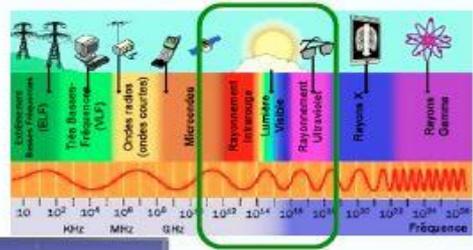
-modélisation (codes de transfert radiatif, modèles régionaux..)

-observations

## Prendre l'atmosphère en sandwich - la télédétection



Observations spatiales (800km; 36 000km)



Ballons (CNES)

Avions

Observations depuis la surface

Voitures, bateaux

## *Plan de la présentation:*

### **Observations depuis le sol : Station d'Observation de l'Atmosphère**

- **instruments de télédétection passifs**
  - spectroradiomètre UV
  - photomètres
  - spectromètre IR à Transformée de Fourier
  - radiomètre infrarouge
  - radiomètre micro-ondes
- **instruments de télédétection active**
  - lidars
- **instruments de mesure in-situ**
  - néphélomètre

**Observations aéroportées** : exemple du développement de l'instrument Osiris

**Observations depuis l'espace** : les mesures satellitaires: exemple de 3MI

# Observations depuis le sol : Station d'Observation de l'Atmosphère



Villeneuve d'Ascq: 50.61°N ; 3.14°E

Site web: <https://www-loa.univ-lille1.fr/>

# Téledétection passive

(source naturelle = le soleil ou la lune)

# Le spectroradiomètre UV

(PI C. Brogniez, F. Minvielle)

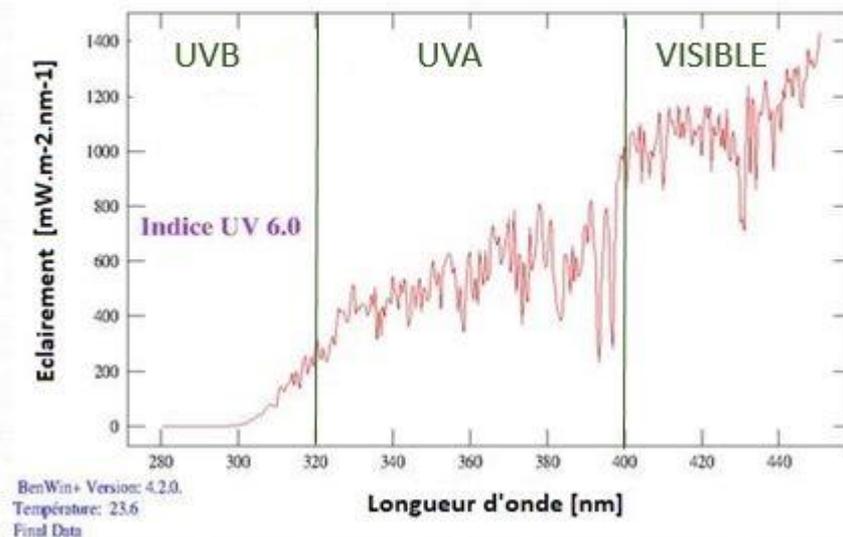


- mesure en continu de l'éclairement UV spectral de 280 à 450nm par pas de 0.5nm toutes les 15mn.
- permet de calculer l'indice UV, les UVA, les UVB et par inversion d'obtenir la colonne totale d'O<sub>3</sub>
- 3 instruments:
  - Villeneuve d'Ascq
  - Observatoire de Haute-Provence
  - Saint Denis, île de la Réunion

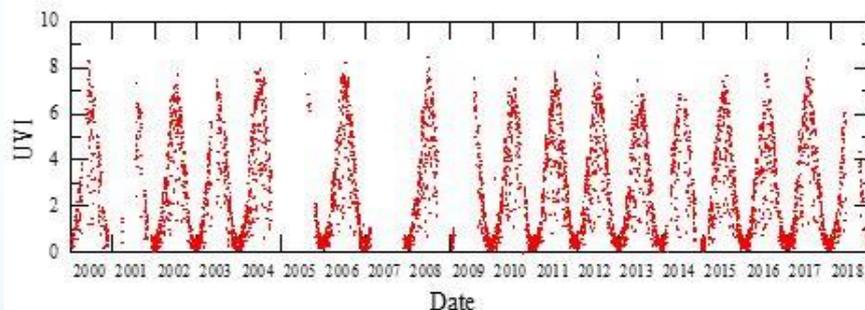
affiliés au réseau international NDACC  
(Network for the Detection of Atmospheric  
Composition Change)

GLOBAL

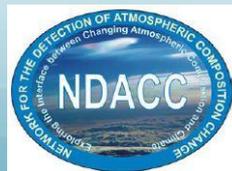
06 août 2020 12h00TU



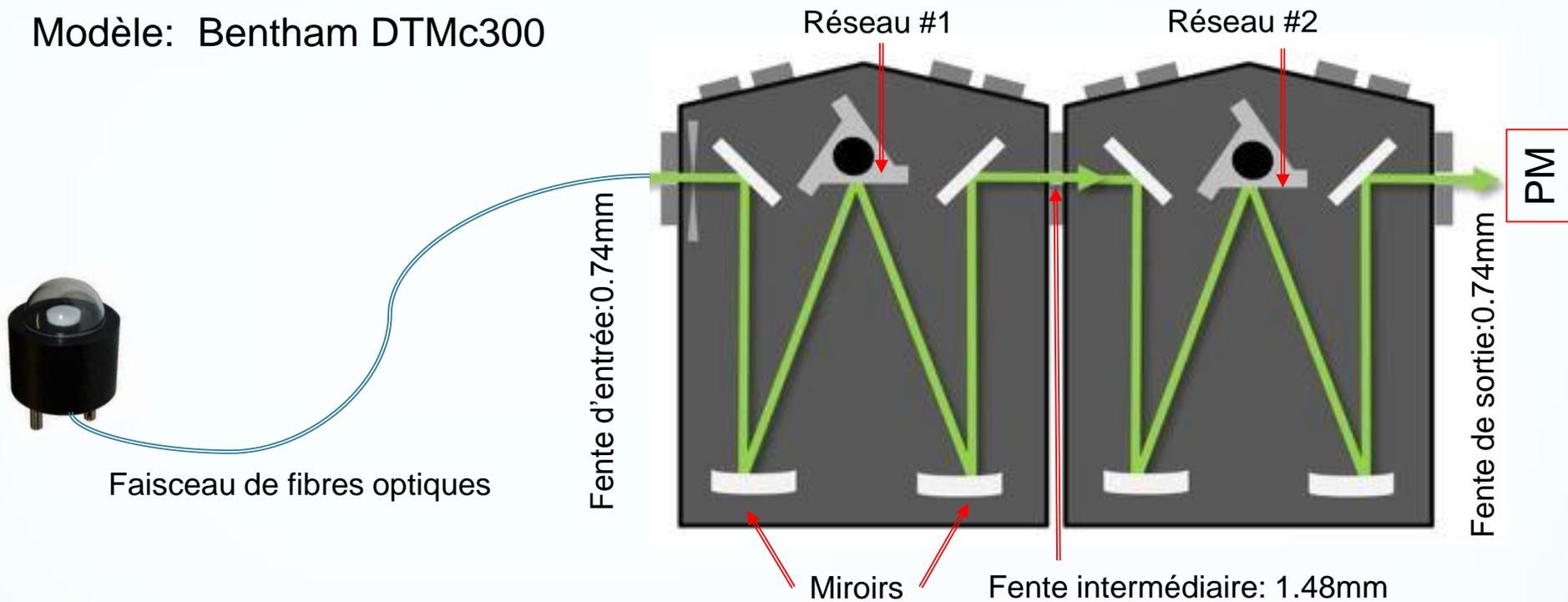
VDA : serie Bentham-UVImax - noon +/- 1h



Validation des mesures satellites:  
OMI, TROPOMI, GOME2



Modèle: Bentham DTMc300



Plusieurs parties:

Tête optique (diffuseur en téflon+dôme en quartz)

Faisceau de fibres optiques

Double monochromateur (focales: 2\*300mm)

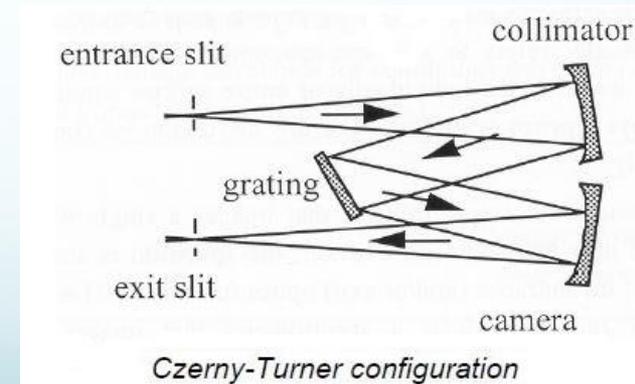
Réseau de diffraction (2400 traits/mm)

Résolution: 0.5nm

Régulé en température

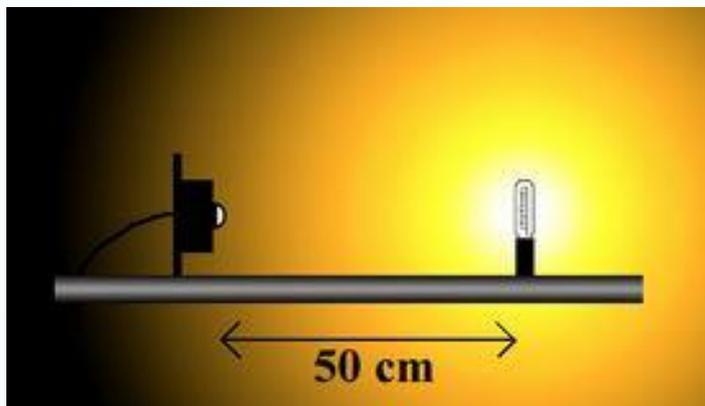
Photomultiplicateur+alimentation haute tension 950V

Système d'acquisition



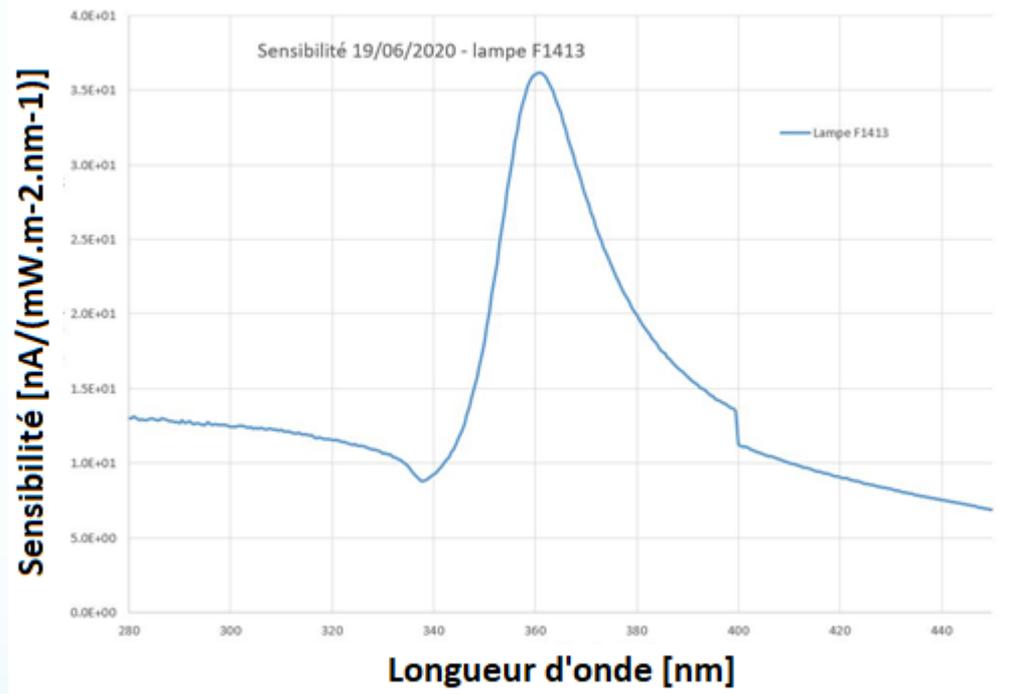
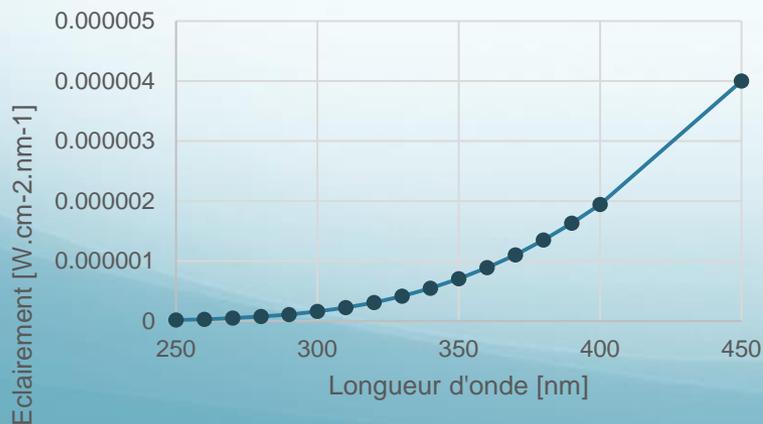
# Etalonnage du spectroradiomètre

Etalonnage régulier avec des sources de références: lampes 1000W, traçables jusqu'au NIST



Sources: lampes 1000W tungstène halogène traçables Nist

Lampe F1413



Incertitude (niveau de confiance 95%):  
\* UVI:  $\approx 5\%$

# Photomètres

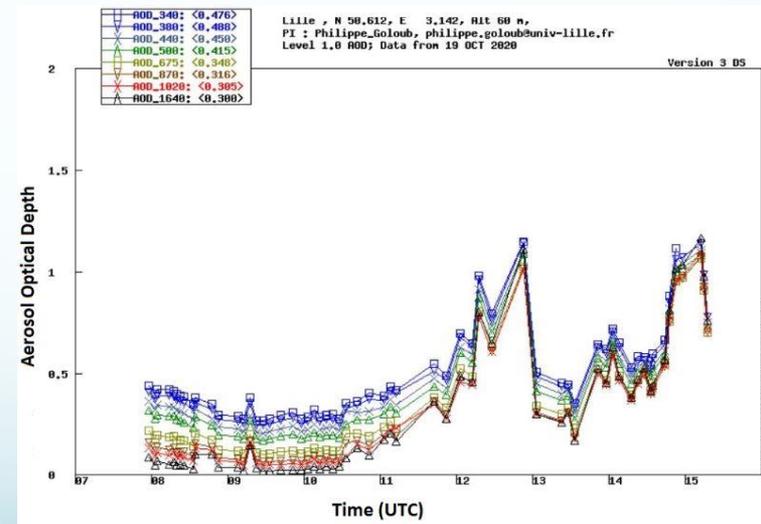
(PI P. Goloub)



Réseau international AERONET (NASA, plus de 1500 instruments dans le monde)

Mesures directes du rayonnement solaire direct et de la luminance du ciel à  $\neq \lambda$ : 340, 380, 440, 500, 675, 870, 937, 1020, 1640 nm. On en déduit l'épaisseur optique des aérosols et leurs propriétés microphysiques (nombre, taille,..)

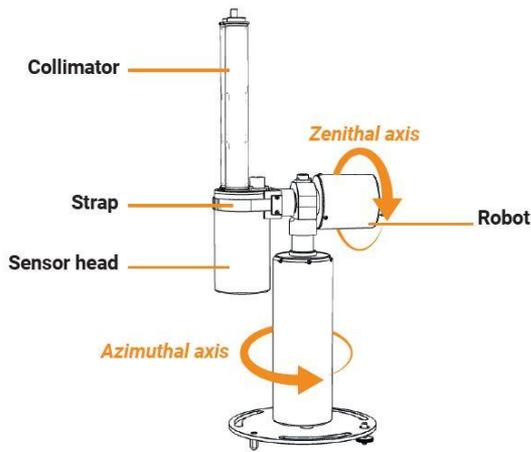
Modèle CIMEL CE318



LOA/Photons: Centre d'étalonnage Aeronet/Actris

Climatologie des aérosols; validation de modèles et des mesures satellite

## CIMELCE318-T



La tête optique est montée sur un robot permettant une rotation en azimuth et élévation

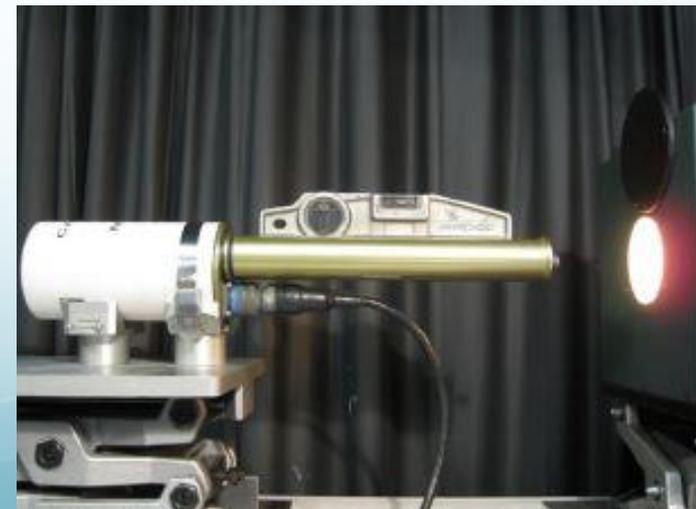
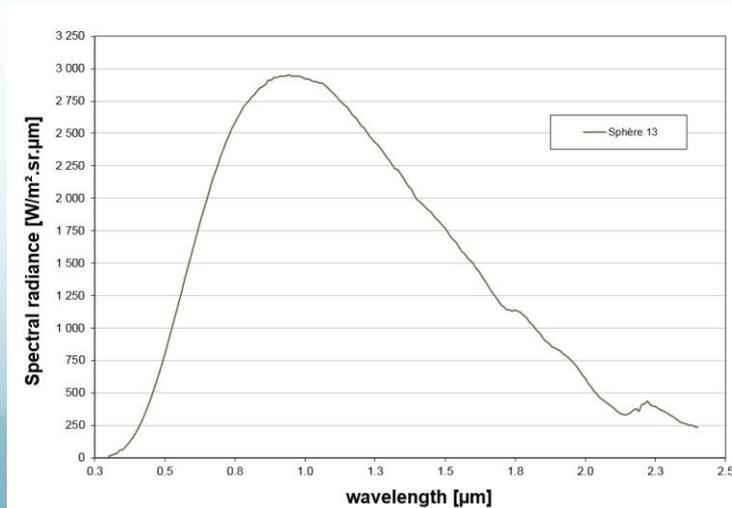
- 2 voies de mesures:
  - UV/VIS/NIR: détecteur: photodiode Si
  - SWIR: détecteur: photodiode InGaAs
- sur chacune des voies, une roue porte-filtres interférentiels
- $\frac{1}{2}$  FOV:  $0.63^\circ$
- « sun tracker »: photodiode 4 quadrants



### Etalonnage de l'instrument:

- mesures directes « SUN »: visée soleil site d'altitude. (méthode de Bouguer Langley). Précision 0.5%
- mesures ciel « SKY »: sphère intégratrice. Précision 2-3%

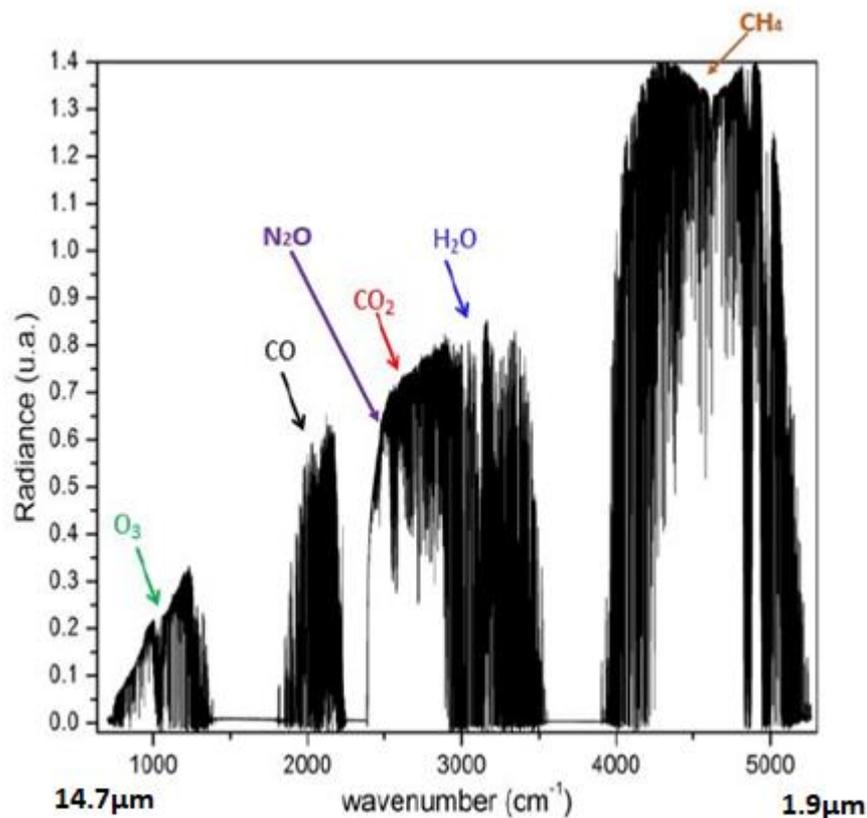
*Sphère intégratrice:*  
Source de luminance lambertienne, homogène, stable



# Spectromètre infrarouge à transformée de Fourier : CHRIS (Compact High-spectral Resolution Infrared Spectrometer)

(PI H. Herbin)

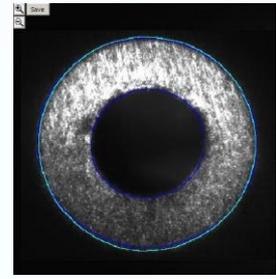
Il permet la mesure du spectre solaire entre  $680$  et  $5200\text{ cm}^{-1}$  avec une résolution de  $0.14\text{ cm}^{-1}$



Campagnes de mesures de validation satellite (gaz à effet de Serre: H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>)

Mesures des panaches volcaniques (Etna, Stromboli) : SO<sub>2</sub>

Sensible aux nuages et aux aérosols

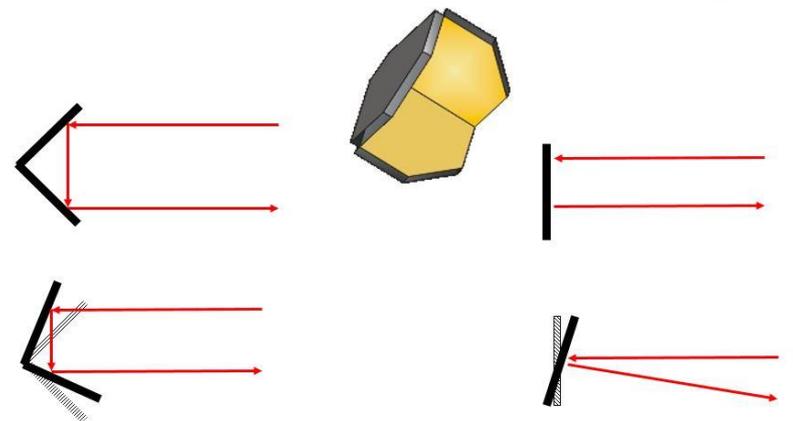


Sun Tracker

Modèle EM27MIR Brüker

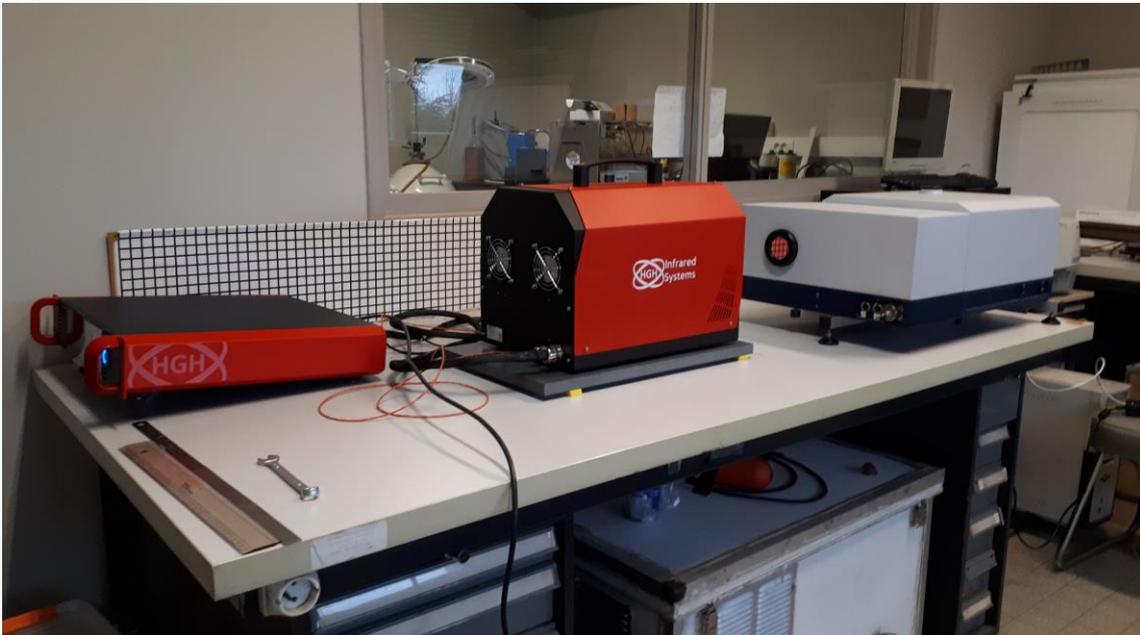
- Interféromètre de Michelson -
- Miroirs en coin de cube
- Séparatrice en KBr
- Détecteur MCT
- Vitesse de scan jusqu'à 160 kHz
- Différence de chemin optique max: 4.42cm
- Résolution:  $0.135\text{cm}^{-1}$
- Refroidi par cryo-cooler
- Portable->terrain
- Fonctionnement sur batterie

Rétro-réflecteur en coin de cube



Faisceau réfléchi est toujours parallèle au faisceau incident



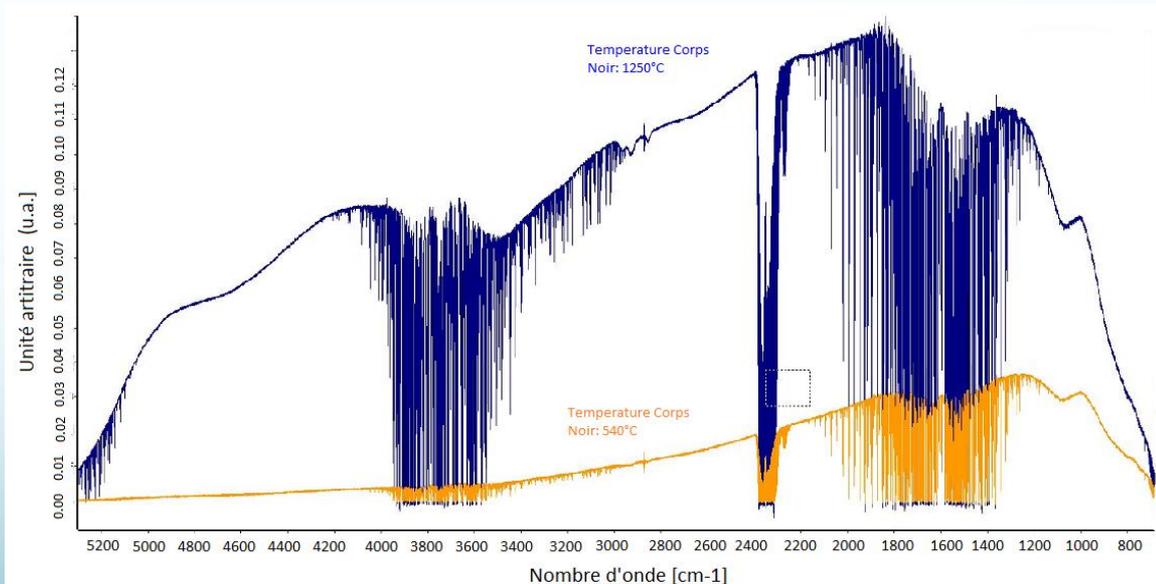


Système d'étalonnage absolu en luminance: corps noir à cavité (modèle HGH RCN1250N2).  
 Température: +50°C à 1250°C  
 Emissivité > 0.99

Spectres mesurés pour 2 températures du Corps Noir:  
 $T_c=540^\circ\text{C}$  et  $T_h=1250^\circ\text{C}$

$$m = \frac{S_c - S_h}{B_\nu(T_c) - B_\nu(T_h)}$$

$$b = \frac{S_c * B_\nu(T_h) - S_h * B_\nu(T_c)}{B_\nu(T_h) - B_\nu(T_c)}$$



# Radiomètre infrarouge

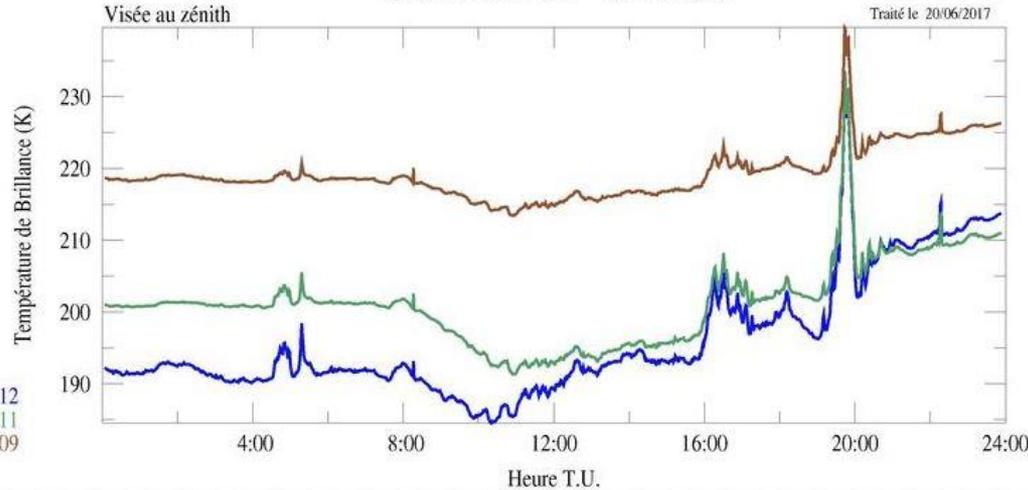
(PI G. Brogniez)



Modèle CE312 CIMEL

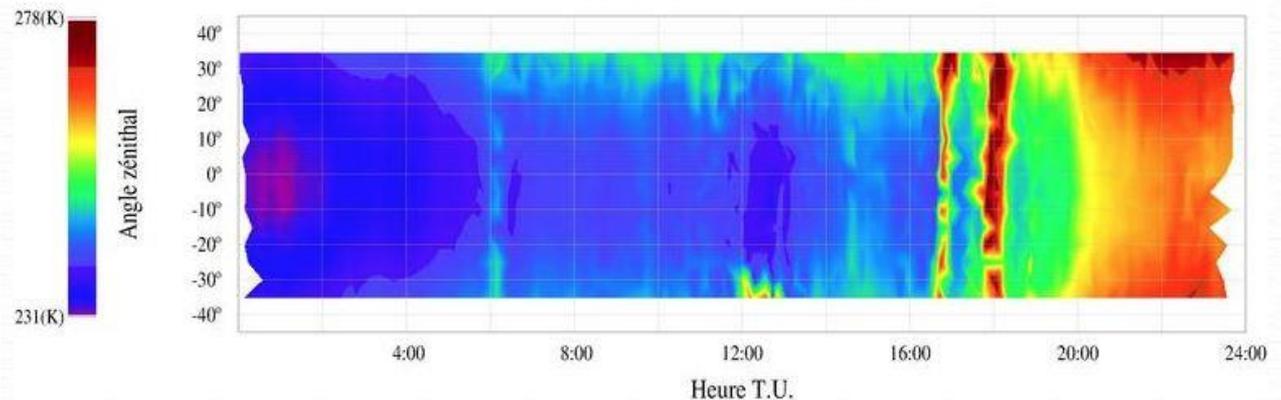
Mesure des luminances émises par différentes cibles (ciel, nuages, aérosols, surfaces) dans 3 canaux infrarouges ( $8.7\mu\text{m}$  (C09);  $10.8\mu\text{m}$  (C11) et  $12\mu\text{m}$  (C12)) et température de brillance

Radiomètre IRT - 30/11/2016



*Applications:* étude des cristaux de glace dans les cirrus, des particules minérales dans les panaches de poussières désertiques...

Température de brillance (K)  
Canal12



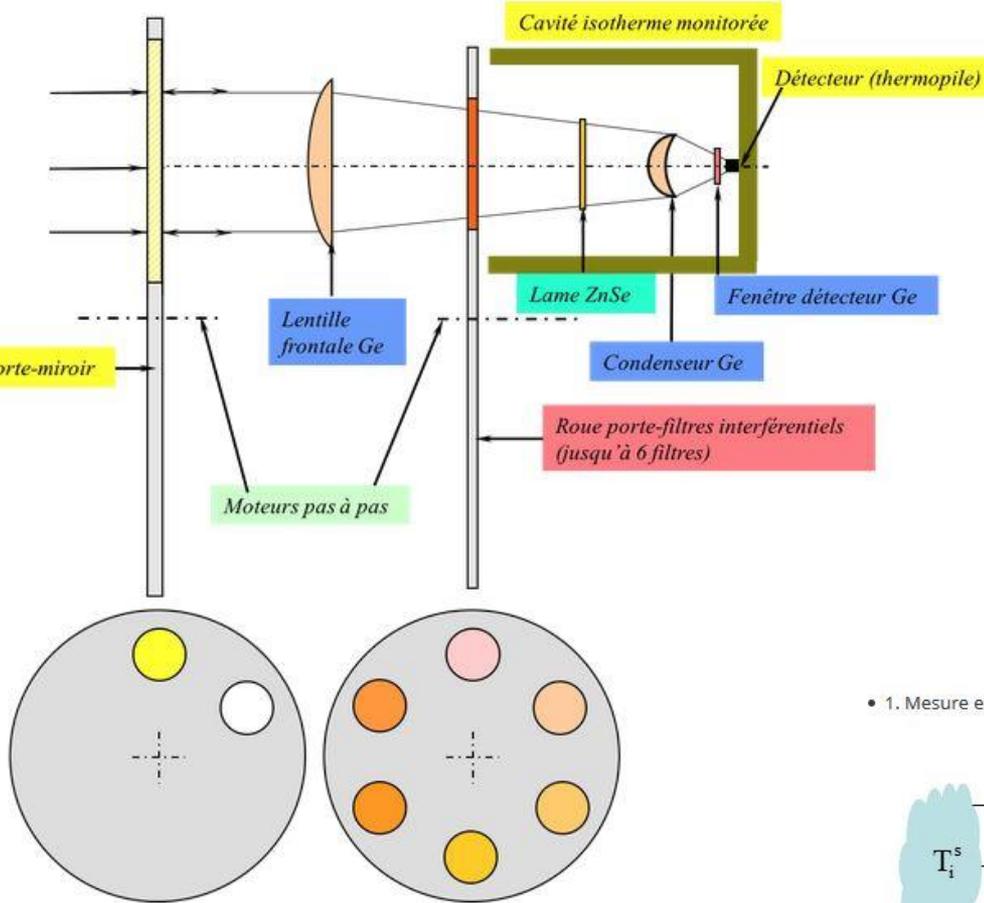


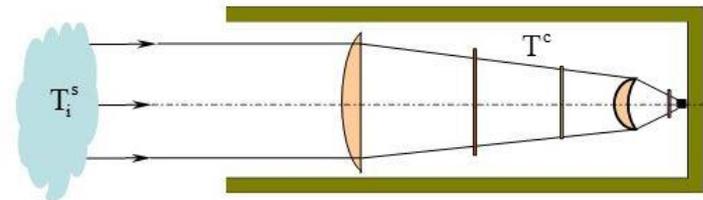
Schéma de la tête optique des radiomètres CE312 ou CE312T

FOV: 10°  
 FWHM: 1μm  
 Détecteur: thermopile  
 Lentille, condenseur, fenêtre: en Ge  
 Lame ZnSe: rejet  $\lambda \geq 15\mu\text{m}$   
 Bruit de mesure: 0.03K

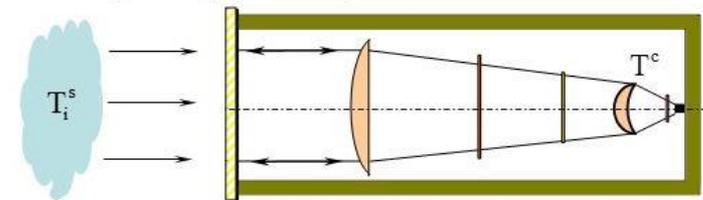
Principe:

- 1-Visée source en position ouverte
- 2-Mesure cavité (visée miroir)

- 1. Mesure en position 'Optique ouverte' (visée source):



- 2. Mesure en position 'Optique occultée par le miroir' ou 'Mesure cavité' dite 'Référence radiométrique':



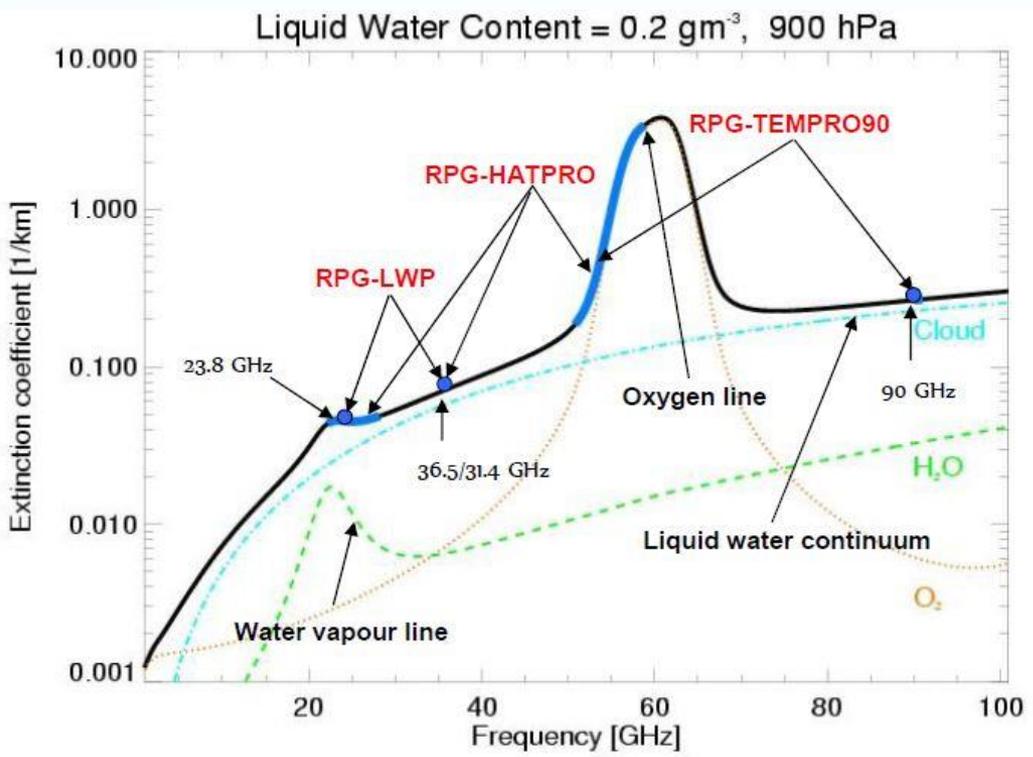
- 3. La luminance normalisée émise par la source se déduit des deux mesures précédentes (pos. 1 - pos. 2) et on déduit:

$$L_i(T_i^s) = L_i(T^c) + \frac{C_i^s - C_i^c}{\sigma_i(T^c)}$$

Banc d'étalonnage: corps noir:  
 T variable: -100°C -> +50°C  
 (dév. Interne LOA)

# Radiomètre micro-ondes

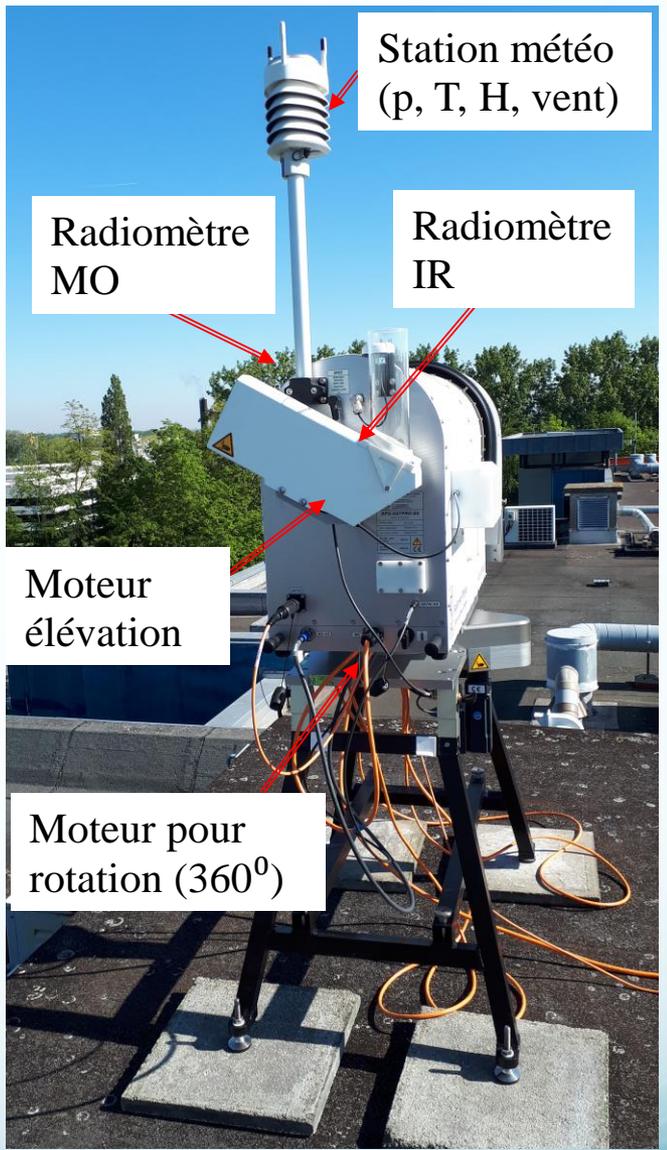
(PI O. Pujol)



Système passif: rayonnement émis par l'atmosphère

Différentes fréquences ( $\mu$ -ondes) → absorption différentielle

- Bande *K* (22 – 30 GHz) → profils d'*humidité*
- Bande *V* (51 – 59 GHz) → profils de *température*
- Produits *nuages* (si IRR)
  - Base des nuages
  - LWP
  - Rayon effectif



modèle: Radiometer Physics GmbH

## Calendrier

&lt;&lt;

18/10/2020

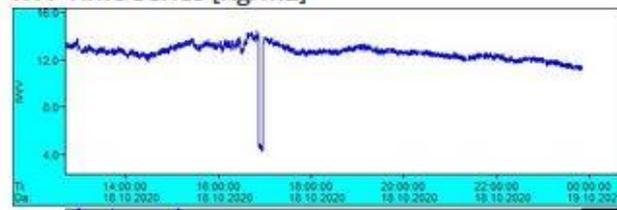
&gt;&gt;

## Informations

Premiers quicklooks de l'archive : 24/04/2020.

Cliquez sur chaque profil pour les agrandir.

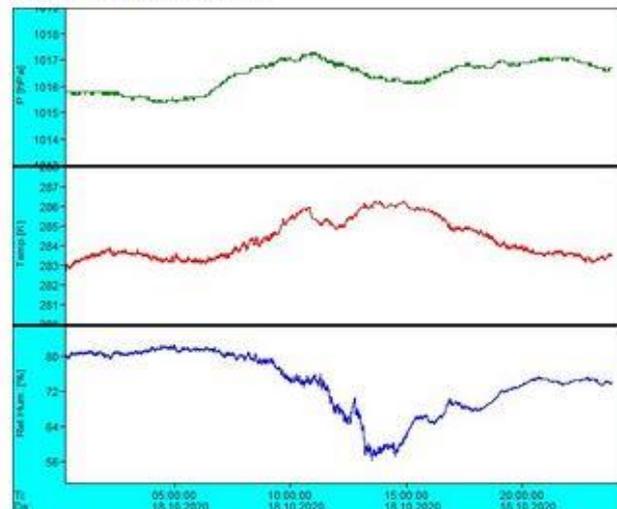
### IWV Time Series [Kg/m2]



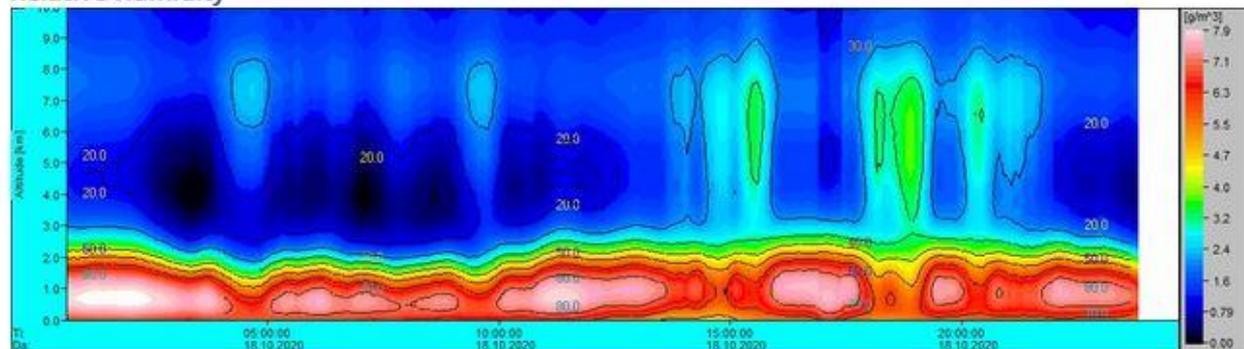
### LWP Time Series [g/m2]



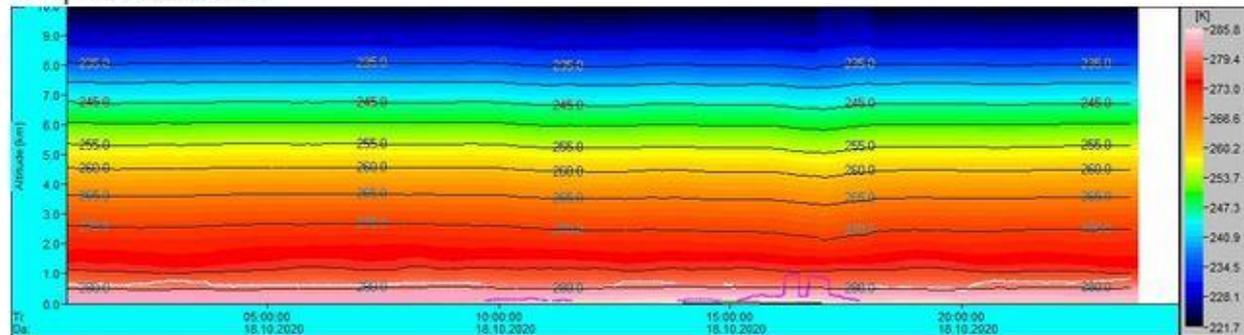
### Met. Surface Sensors



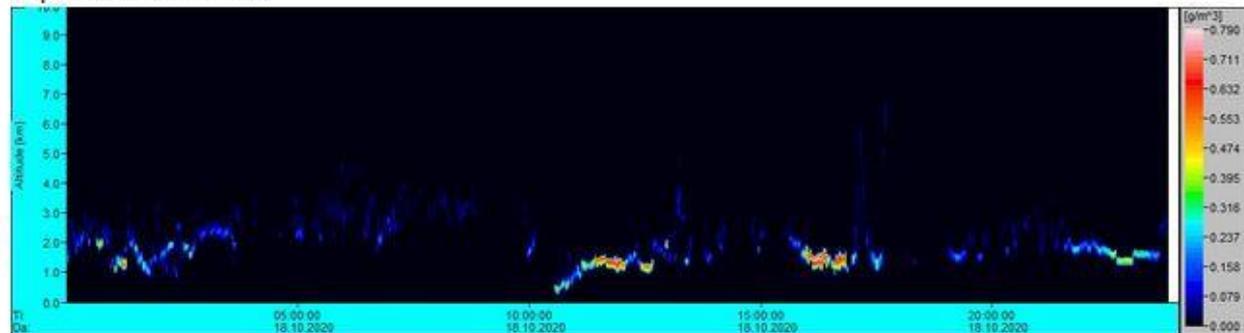
### Relative Humidity

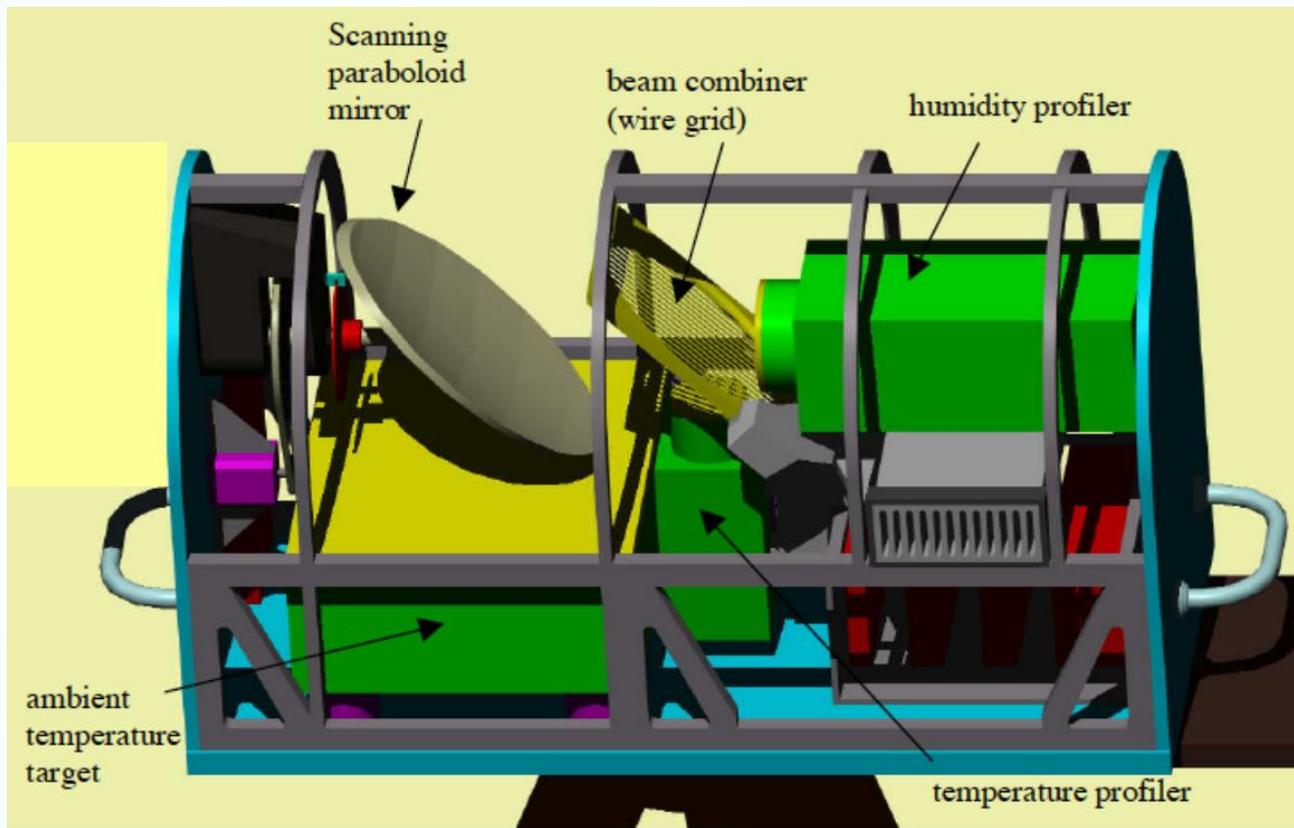


### Temperature Profiles



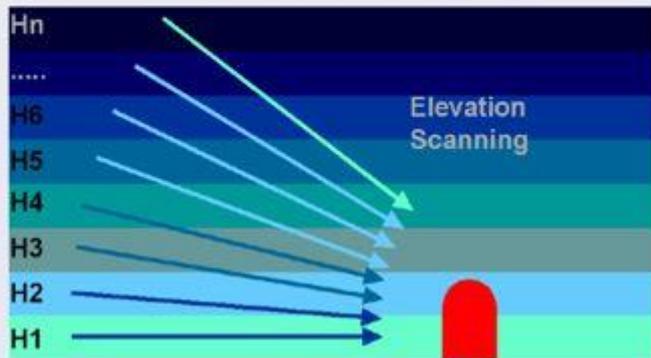
### Liquid Water Profiles





• Deux modes d'observations :

- zenith
- off-zenith (boundary-layer mode,  $T$ -profil)



- Résolution temporelle : 10 s (mesures "continues") !
- 14 canaux de fréquences
- Résolution verticale : 30 – 800 m. Elle croît avec l'altitude, dépend de la variable mesurée et du mode d'observation.
- Portée max. : 10 km
- Précision : inférieure à 5% (RMS)

## Flux visible/infrarouge Kipp & Zonen



## 2 pyranomètres UV (Scintec et YES)



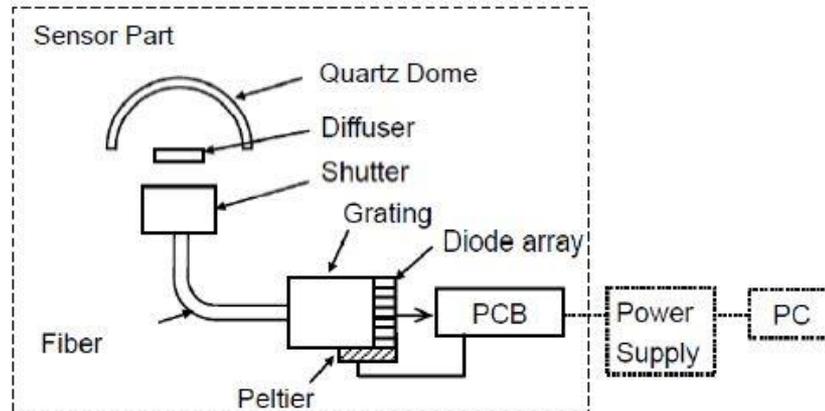
## Sky Imager (CMS): 1 image du ciel toutes les 3 mn



## Spectroradiomètre UV/VIS/NIR EKO MS711

(PI N. Ferlay)

300->1100nm, résolution 1nm



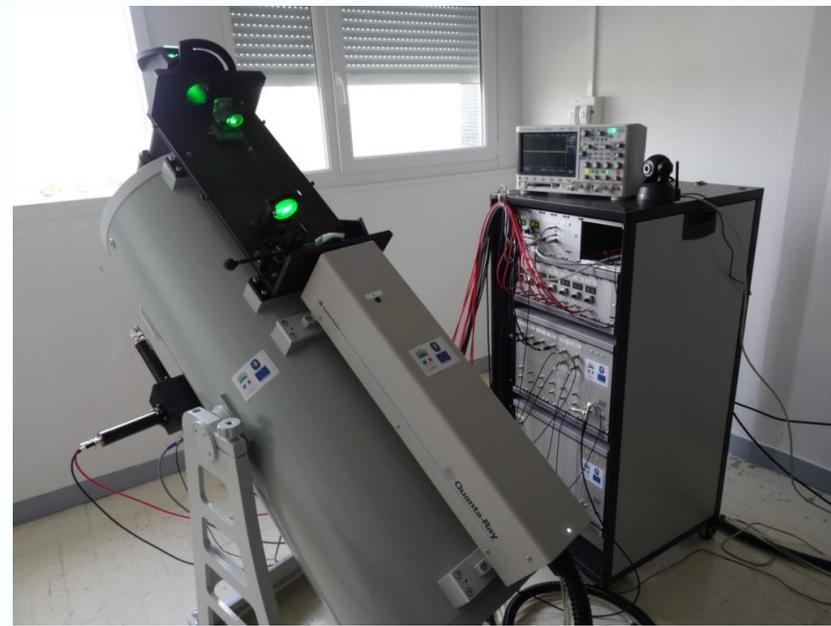
# Téledétection active

(source = laser)

# Lidars

(PI P. Goloub)

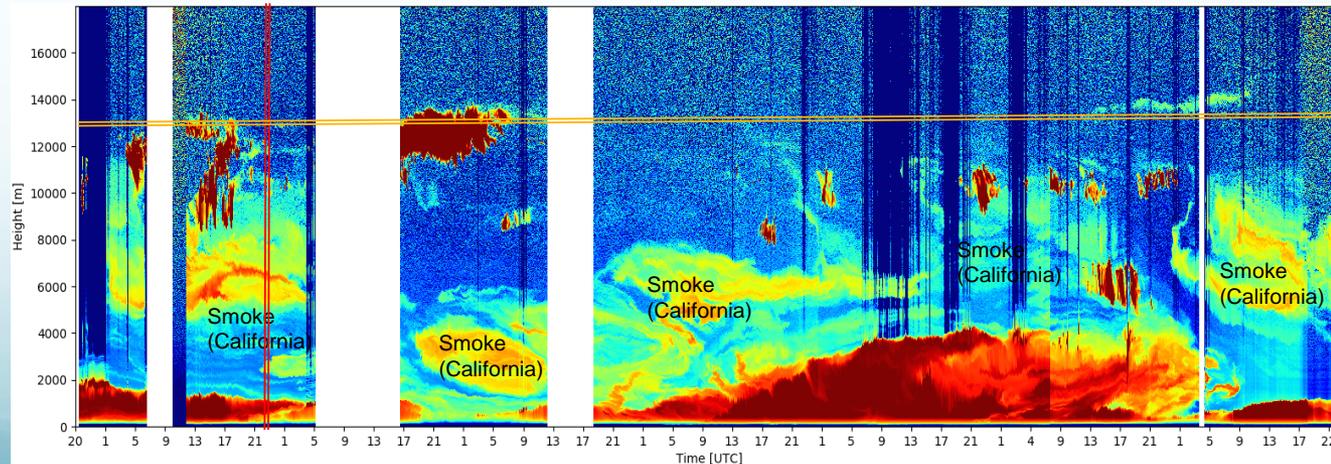
LILAS: Lidar Mie-Raman-Polarisé Multispectral  
(capacité de sondage de 0,5 à 20 km d'altitude)  
(Collaboration LOA/CIMEL Electronique/PICS (labo russe))



Par inversion, profils verticaux:

- aérosols (extinction, épaisseur optique, distribution en taille, concentration, coefficient d'Angstrom, indice de réfraction, albédo de diffusion simple...)
- vapeur d'eau
- nuages

## Variabilité temporelle aérosols (du 10/09 au 17/09 2020)



11/09-12/09

Rétrodiffusion élastique Rayleigh  
Rétrodiffusion inélastique Raman  
spontané  
Polarisation

## Recepteur

**Telescope:** de type Newton

**Diamètre:** 400 mm, longueur: 1m30

**Champs de vue :** 0.2 - 0.8 mrad

**Voies élastiques** 355 nm, 532 nm, 1064 nm.

**Voies Raman:** 387 et 608 nm ( N<sub>2</sub>) et 408 nm (vapeur d'eau)

**Polarisation:** 532 et 355 nm

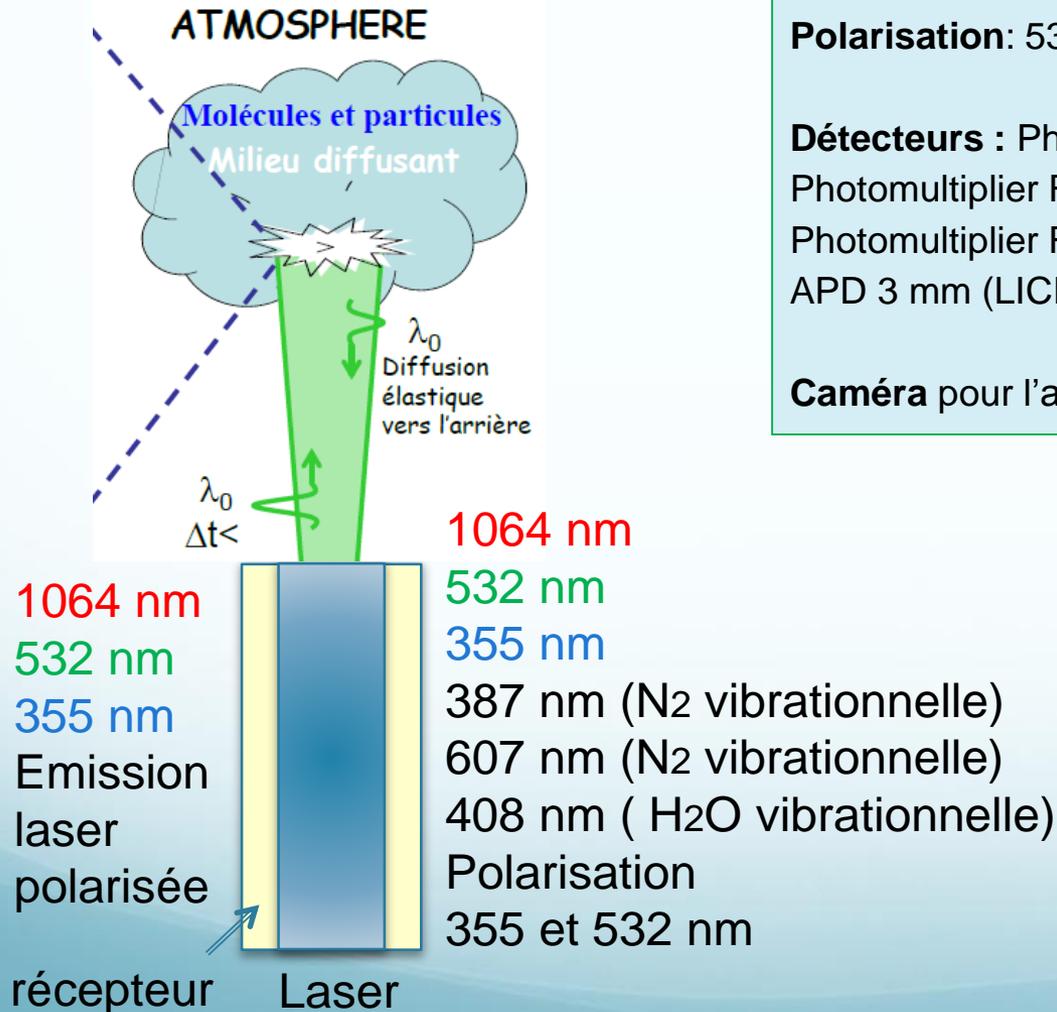
**Détecteurs :** Photomultiplicateur R1924A (355 et 532 nm)

Photomultiplicateur R9880-110 ( 387 nm et 408 nm)

Photomultiplicateur R9880-20 (608 nm)

APD 3 mm (LICEL) (1064 nm)

**Caméra** pour l'alignement des miroirs



## Emetteur

laser NdYag pulsé : Spectra INDI-40

Longueurs d'onde: 1064, 532, 355 nm

Energie/impulsion: 150/100/100 mJ

Durée impulsion: 8 ns

Taux de répétition : 20 Hz

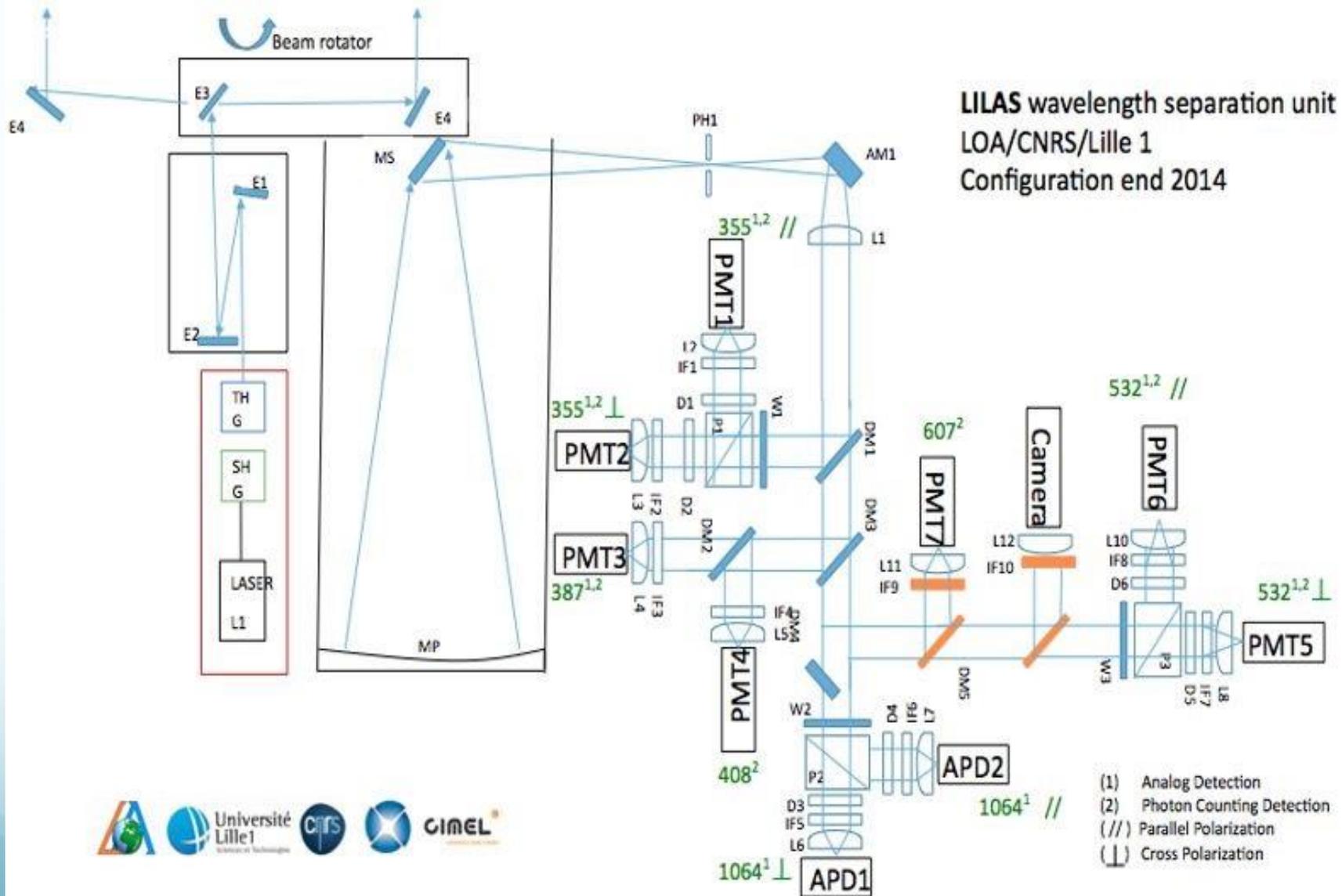
Pompe: lampe flash (30 M de tirs)

Diamètre du faisceau laser: 10 mm

Divergence: 0.5 mrad

Diameter après extension du faisceau: 50mm

# Schéma optique



## D'autres lidars sur la plateforme:



**Micro-lidar**  
PI P. Goloub  
CIMEL CE370

Emetteur	<b>Laser : Nd:YAG, SHG 532 nm</b>
Longueur d'onde	532 nm
Energie par impulsion	4 $\mu$ J
Fréquence	5 kHz
Durée d'impulsion	< 1 ns
Ouverture	314 cm <sup>2</sup>
Champ (angle total)	55 $\mu$ rad
Bande passante du filtre	0.5 nm
Détecteur	APD
Mode de détection	Photon counting
Temps d'acquisition	> 0.8 s
Résolution verticale	15 m
Taille (diamètre x hauteur)	220 x 1000 mm
Poids	12.5 kg

**Lidar Metis**  
PI P. Goloub  
CIMEL CE376

2 longueurs d'onde: 532nm (laser NdYag)  
et 850nm (diode laser pulsée)



# **Instruments de mesure in-situ**

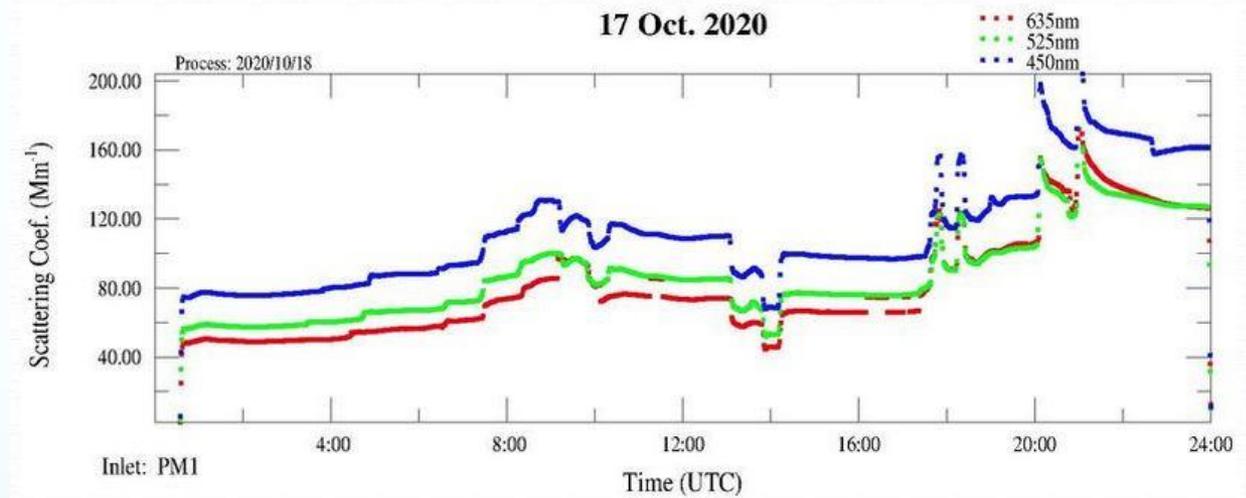
# Néphélomètre

(PI S. Crumeyrolle)

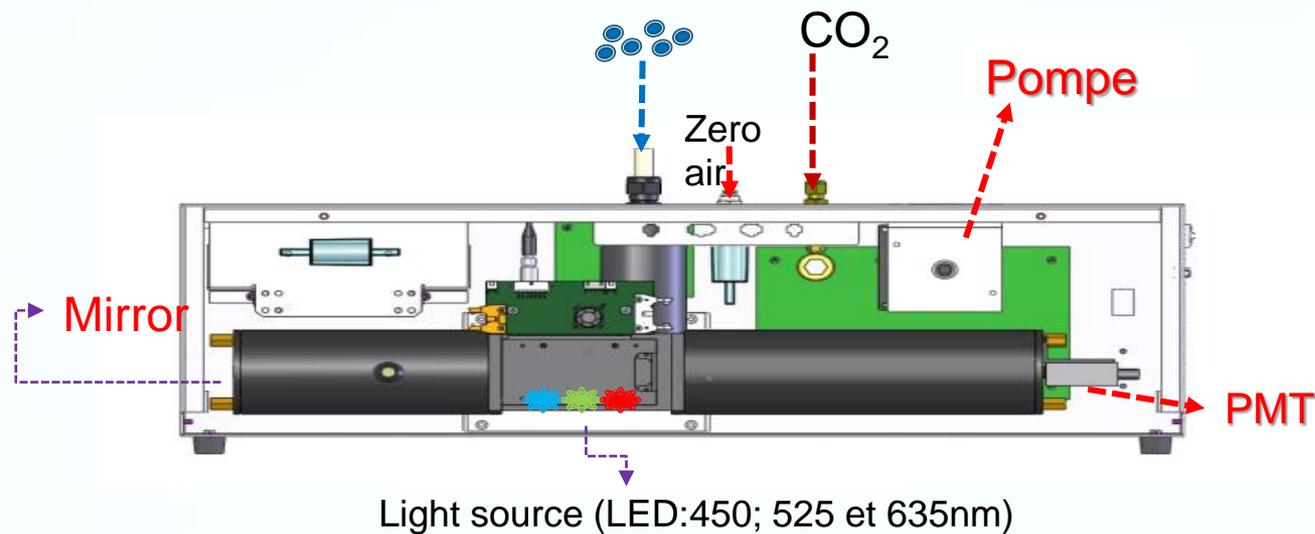
Prélèvement local (veines de prélèvements situées sur le toit de la véranda)



Modèle Ecotech Aurora400

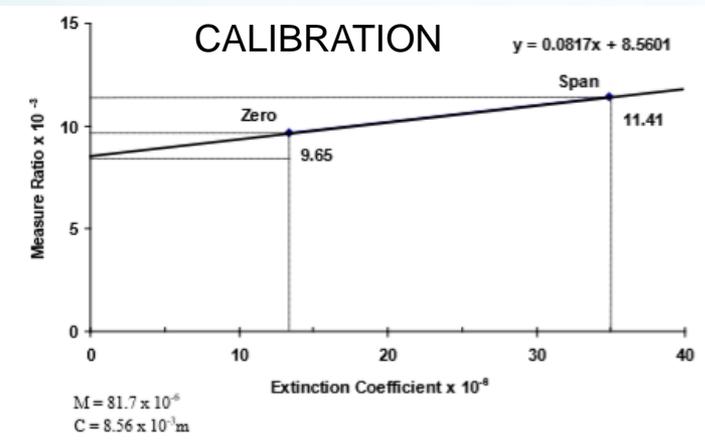
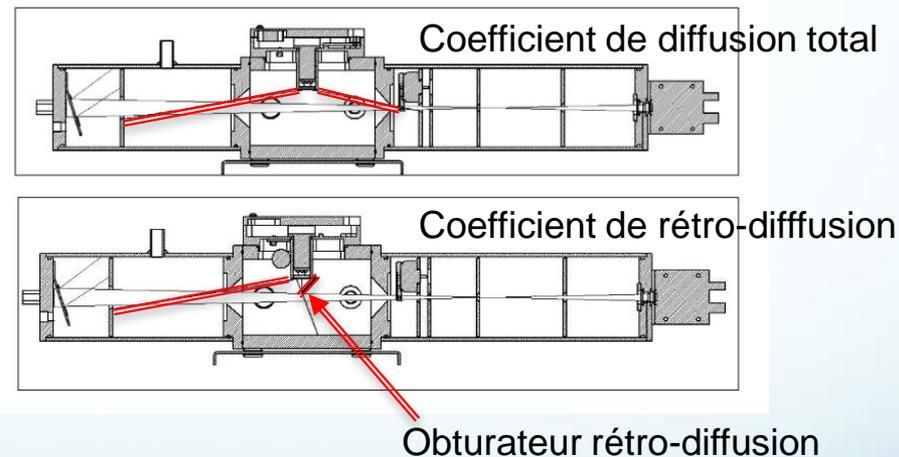


Mesure du coefficient de rétro-diffusion des particules pour 3 longueurs d'onde différentes (450; 525 et 635nm)



**Etalonnage:** 3 LEDS illuminent un volume d'air

- libre de particules (zéro)
- gaz (CO<sub>2</sub>). Facteur de Rayleigh connu
- air atmosphérique



**Diffusion totale/retro-diffusion** = en bloquant les angles de diffusion entre 0 et 90°  
**Nephelometre polaire** : mesures pour différents angles (obturateur mobile)

## D'autres instruments de mesure in-situ:



### SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer)

(PI S. Crumeyrolle)

Modèle: TSI

Distribution en taille des particules

$<1\mu\text{m}$

Granulométrie à mobilité électrique

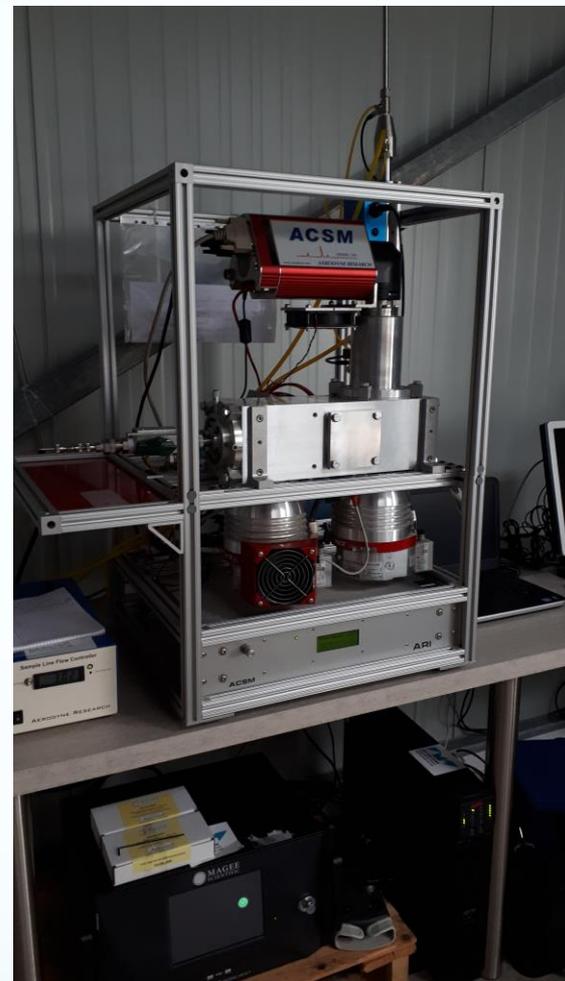
### Mini-capteurs

PI S. Crumeyrolle,  
B. Hanoune (PC2A)



### Compteurs de particules autonome

- PM10/2,5/1
- T° / Humidité / Pression
- Sauvegarde sur carte SD
- Horloge temps réel
- Autonome
- Acquisition sur smartphone



### ACSM

(PI Véronique Riffault, IMT Lille/Douai)

Aerodyne

Spectromètre de masse,  
composition chimique des  
particules ( $\text{SO}_4$ ,  $\text{NO}_3$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{Cl}$ )

### Aéthalomètre

(PI S. Crumeyrolle)

Magee Scientific

Absorption des particules



# Observations aéroportées

**OSIRIS** (PI F. Parol, resp. projet F.Auriol)

Observing System Including PolaRization In the Solar Infrared Spectrum),  
développé au LOA

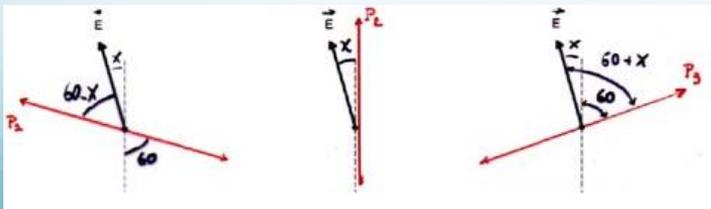
Radio-polarimètre imageur grand champ: luminance totale et polarisée dans une gamme spectrale allant de l'UV/VIS (440nm) au SWIR (2200nm)

Central Spectral wavelength (nm)	FWHM (nm)	Polarization Measurement
VIS-NIR		
440	10	Yes
490	10	Yes
670	12	Yes
763	10	No
765	50	No
865	55	Yes
910	20	No
940	50	No
SWIR		
940	50	No
1020	40	Yes
1240	35	Yes
1365	80	No
1600	65	Yes
2200	48	Yes

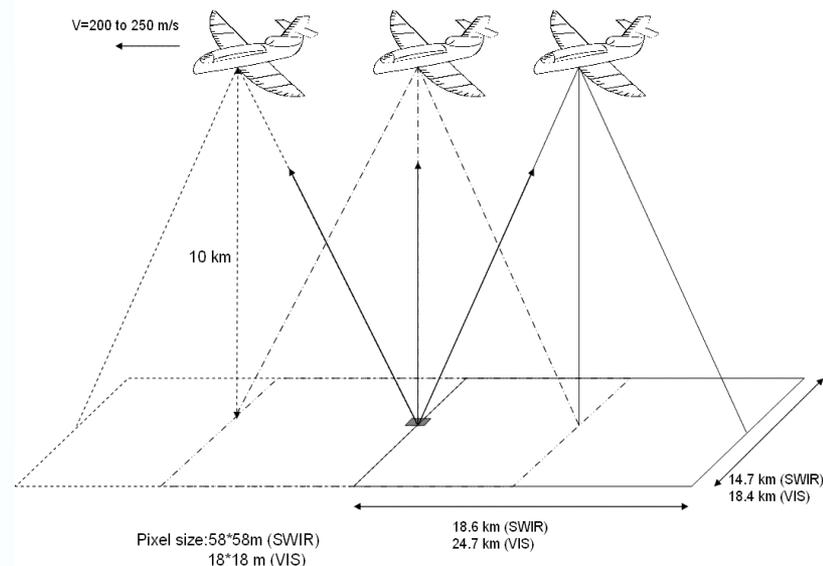
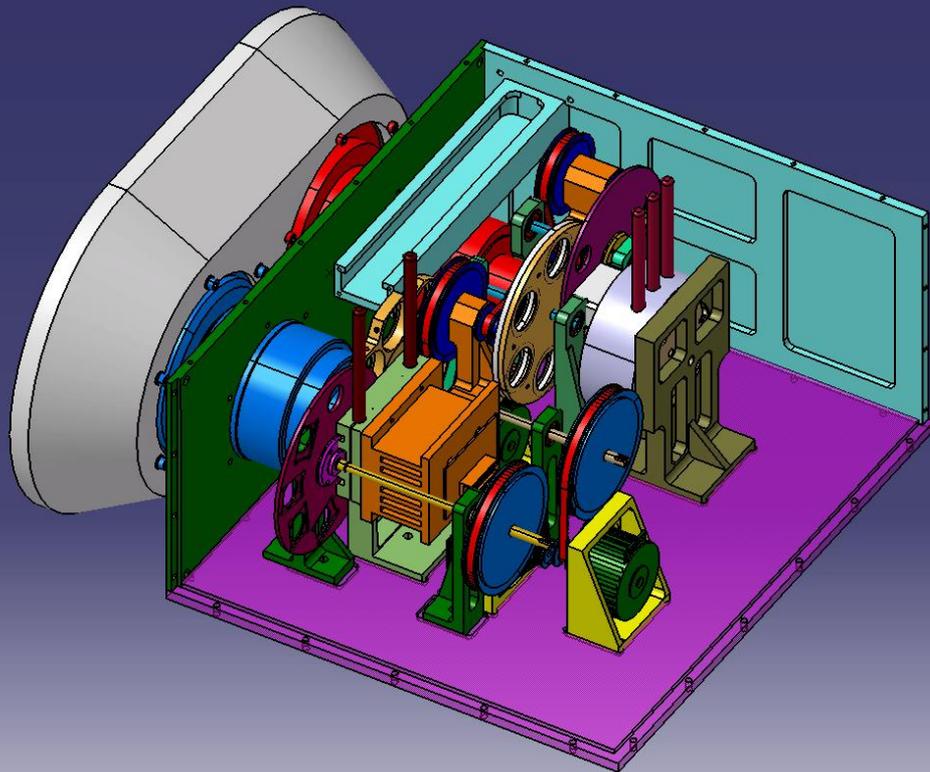


**Principe** : concept « Polder » étendu au SWIR  
OSIRIS est constitué de deux systèmes optiques  
(VIS/NIR: 440 - 940 nm et SWIR: 940 - 2200nm)

- des objectifs grand champ (+/- 55°), télécentriques
- des roues porte filtres interférentiels et porte analyseurs,
- deux matrices de détecteurs (CCD pour le VIS/NIR et MCT pour le SWIR)
- possibilité d'observer une même scène sous différents angles (jusqu'à 16)



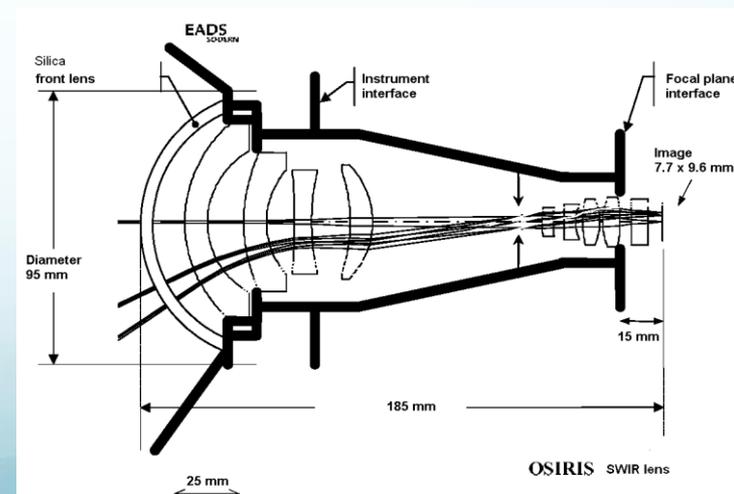
Principe de la mesure de polarisation:  
3 analyseurs orientés à 60°. Par projection de la loi de Malus=>L<sub>tot</sub> et L<sub>pol</sub>



## Principe de visée multidirectionnelle

	VIS-NIR	SWIR
Focal length	3.6mm	5.2mm
Aperture	F/5.6	F/5
Horizontal Field Of View	+/- 51.1°	+/- 45.5°
Vertical Field Of View	+/- 42.9°	+/- 39.2°
Diagonal Field Of View	+/- 57.15°	+/- 52.5°
Detector type	CDD SONY	HgCdTe (Sofradir)
Detector size	8.9x6.7mm	9.6x7.7mm
Pixel size	6.45µm*6.45µm	30µm*30µm
Number of pixels	1384*1032	320*256
Foot print	1.8m/(km altitude)	5,8m/(km altitude)
Data flow	24 Go/h	1,8 Go/h

Optical characteristics of OSIRIS lens (VIS-NIR and SWIR)



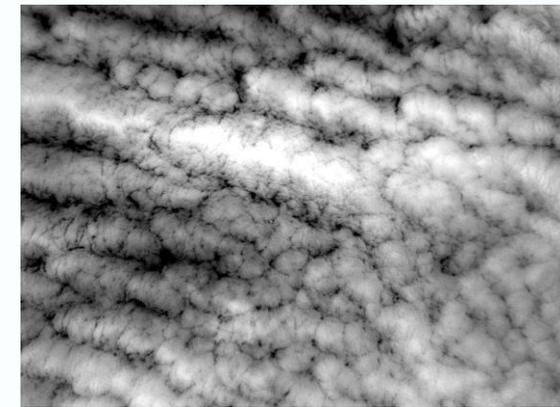


Image à 865nm au dessus d'un champ de stratocumulus (altitude 1km)

Sur le Falcon 20 de l'UMS SAFIRE (CNES/CNRS/Météo-France)

### Etalonnage

- absolu: sphère intégratrice. Précision 2-3%
- en polarisation: boîte polarisante: taux de polarisation linéaire variable de 0 à 60%. Précision 0.5%

OSI\_L1A\_VIS\_0011\_25037354\_AEROCLO\_2017-09-07T10-22-26\_V0-10.hdf  
(RGB 870nm\_pol,670nm\_pol,490nm\_pol)

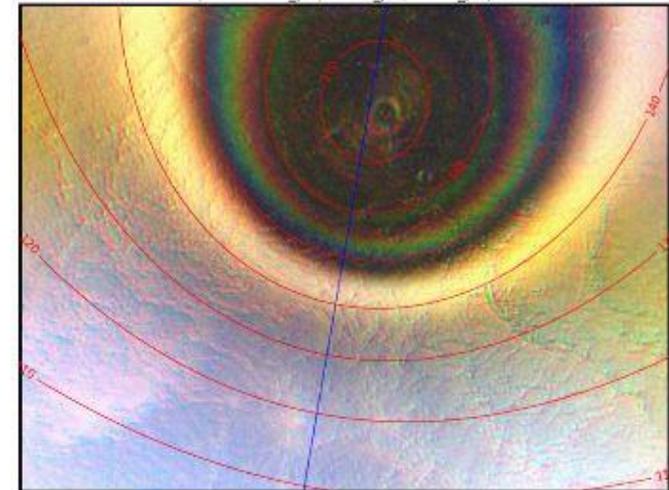
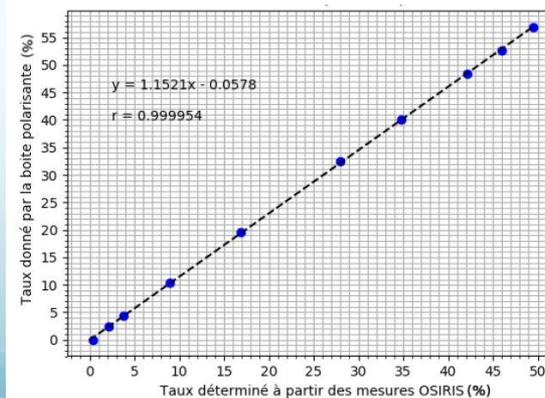


Image visible au dessus d'un champ de stratocumulus: composition colorée (RGB des luminances polarisées à 490; 670 et 865nm): arc en ciel et arcs surnuméraires



# Observations depuis l'espace

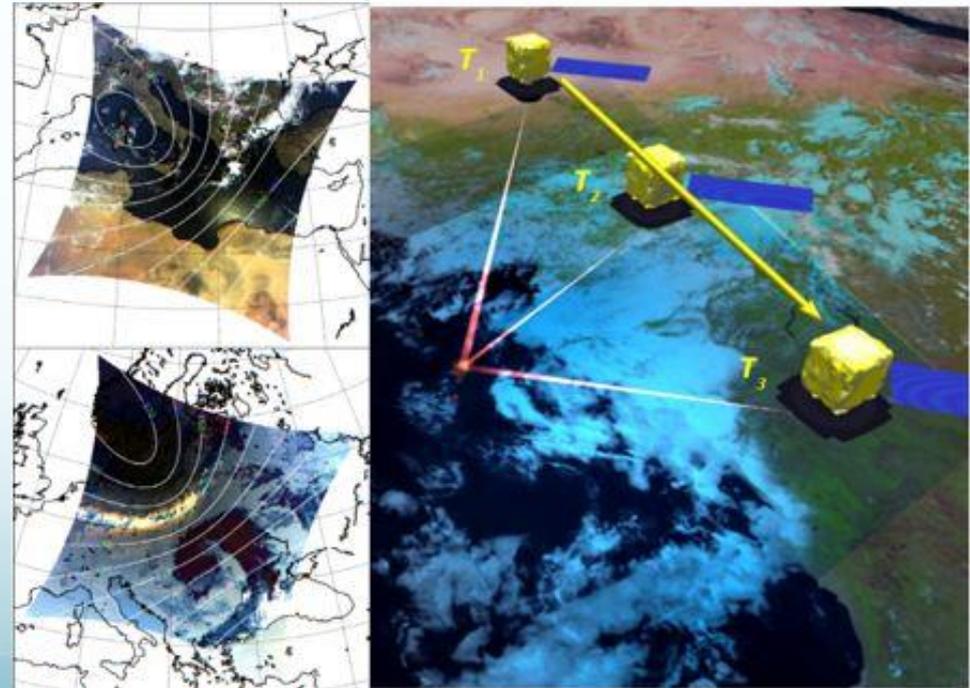
## L'instrument 3MI (Multi-spectral, Multi-directional, Multi-polarization)

(membre du SAG, J. Riedi)



Héritage de l'instrument Polder/Parasol (LOA/CNES).  
Mission A-Train: NASA 2005/2013: constellation de 8 satellites (à 10mn d'intervalle)

## 3MI: extension spectrale de Polder au SWIR



Plateforme: Metop-SG, avec IASI-NG

Orbite polaire, 835km

Eumetsat/ESA

Fauchée: 2200 km

Taille du pixel au sol 4km x4km au nadir

Lancement prévu en 2022

3 missions planifiées sur 15 ans



*3MI Opto-Mechanical Unit*



*Filters Wheel Assembly*

*Etalonnage*: pas de système d'étalonnage à bord. Etalonnage au sol avant lancement puis en vol: visée de cibles connues (déserts, océan, glitters..)

# Conclusion

Grande gamme d'instruments basés sur différents principes de mesure optique et sur une large gamme spectrale. On n'a pas fait le tour..

Le laboratoire > Recherche > Formation > Observations > Instrumentation > Modélisation > Informatique > Offres de thèses & stages > Offres d'emplois > Communication > Services > Espace Intranet

## Plateformes d'Observation

🇫🇷 Lille 🇸🇳 Dakar Mobile À propos

### LIDAR + d'infos

Access aux données depuis août 2005

P.I. : philippe.goloub@univ-lille.fr

### Station météo

Access aux données depuis juillet 2005

P.I. : thierry.podvin@univ-lille.fr

### NAScube (MSG/SEVIRI) + d'infos

18 Novembre 2020 10h15(TU)

Données depuis juillet 2007

P.I. : louis.gonzalez@univ-lille.fr

### Spectro radiomètre U.V. + d'infos

Access aux données depuis mars 2008

P.I. : colette.brognez@univ-lille.fr

### Fluxmètres + d'infos

Access aux données depuis février 2007

P.I. : gerard.brognez@univ-lille.fr

### Sky Imager + d'infos

18 nov. 11:09TU

Données depuis juillet 2009