

# ImSpoc : un imageur hyperspectral compact pour les sciences de l'atmosphère

Yann Ferrec, Florence de la Barrière, Etienne Le Coarer,  
Laurence Croizé, Silvère Gousset, Juana Rodrigo

**colloque du groupe Hyperspectral de la SFPT**  
**Toulouse, 9 et 10 juillet 2019**



## 1. L'imageur hyperspectral ImSpoc

- l'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier
- le concept ImSpoc
- exemple d'application

## 2. Les interférogrammes partiels

- principe des interférogrammes partiels
- bibliographie
- exemples d'application:
  - Scarbo
  - IRS SpaceObs
  - Halesis

## Conclusion

## 1. L'imageur hyperspectral ImSpoc

- l'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier
- le concept ImSpoc
- exemple d'application

## 2. Les interférogrammes partiels

- principe des interférogrammes partiels
- bibliographie
- exemples d'application:
  - Scarbo
  - IRS SpaceObs
  - Halesis

## Conclusion

# L'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier

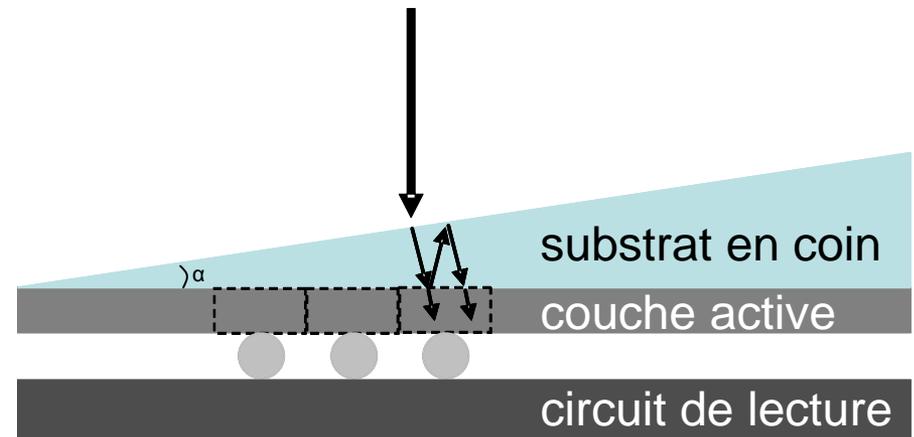
Microspoc:

polissage en biais du substrat d'un détecteur infrarouge

⇒ cavité

⇒ spectromètre à transformée de Fourier

S. Rommeluère, *Intégration d'un micro-spectromètre statique par transformée de Fourier sur un plan focal infrarouge*, thèse de l'Université Paris XI (2007)

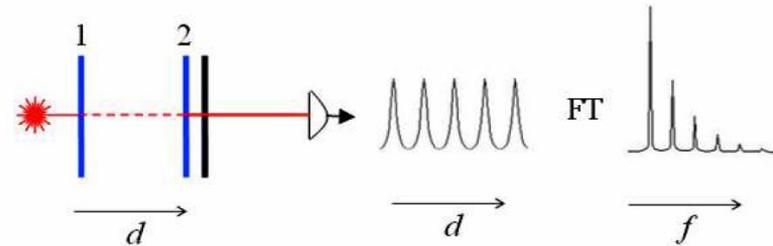


# L'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier

## Autres exemples:

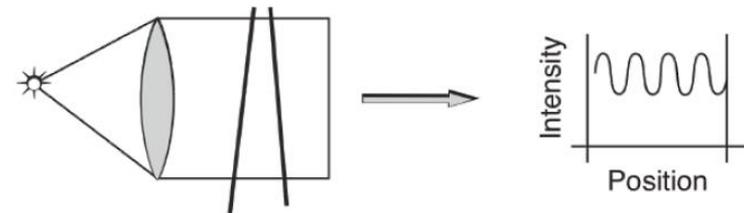
### InRiM (Italie)

M. Pisani et M. Zucco, Compact imaging spectrometer combining Fourier transform spectroscopy with a Fabry-Perot interferometer, Opt. Exp. 17 (10) p8319 (2009)



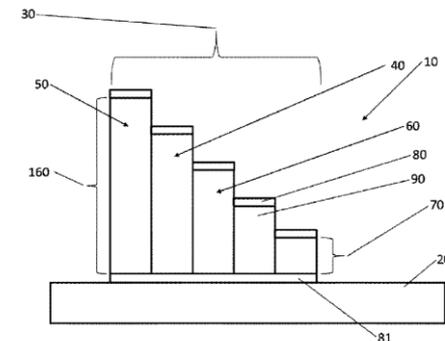
### Univ. Hawaï (USA)

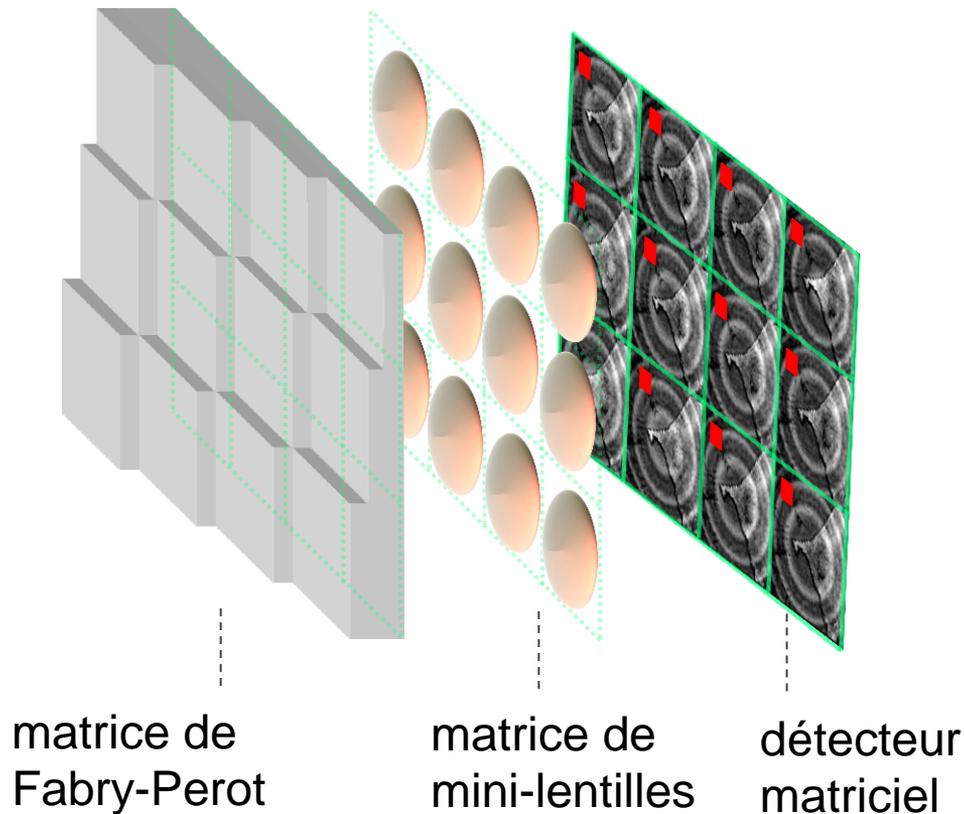
P. Lucey et J. Akagi, Compact imaging spectrometer combining Fourier transform spectroscopy with a Fabry-Perot interferometer, proc. SPIE 80480K (2011)



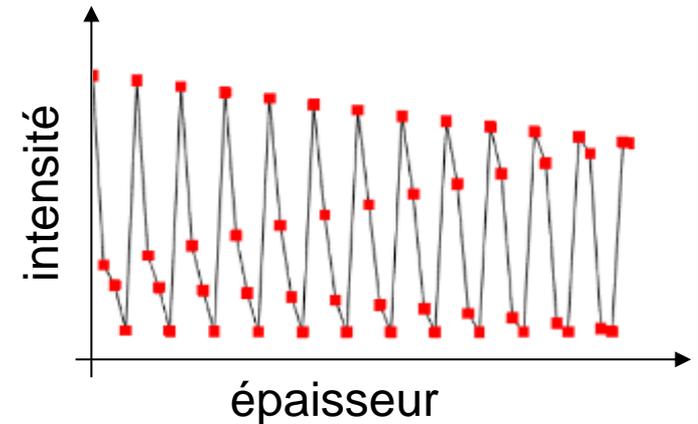
### NRL (USA)

M. Yetzbacher et al., Method and apparatus for multiplexed Fabry-Perot spectroscopy, brevet US9,304,040 (2016)





Pour chaque point, on a l'interférogramme, et donc le spectre



**Concept développé par l'Ipag (UGA) et l'Onera**

## Les atouts d'un système ImSpoc:

- acquisition simultanée
- avantage du multiplex (selon conditions)
- très compact  $\Rightarrow$  adapté à des petits porteurs
- très compact  $\Rightarrow$  stable/robuste
- choix des épaisseurs

## Les inconvénients d'un système ImSpoc:

- peu de points dans l'interférogramme
- difficulté aux très petites différences de marche
- risque de diaphotie entre les voies voisines
- inversion de l'interférogramme (cf. présentation A. Dolet)

# Exemple d'application

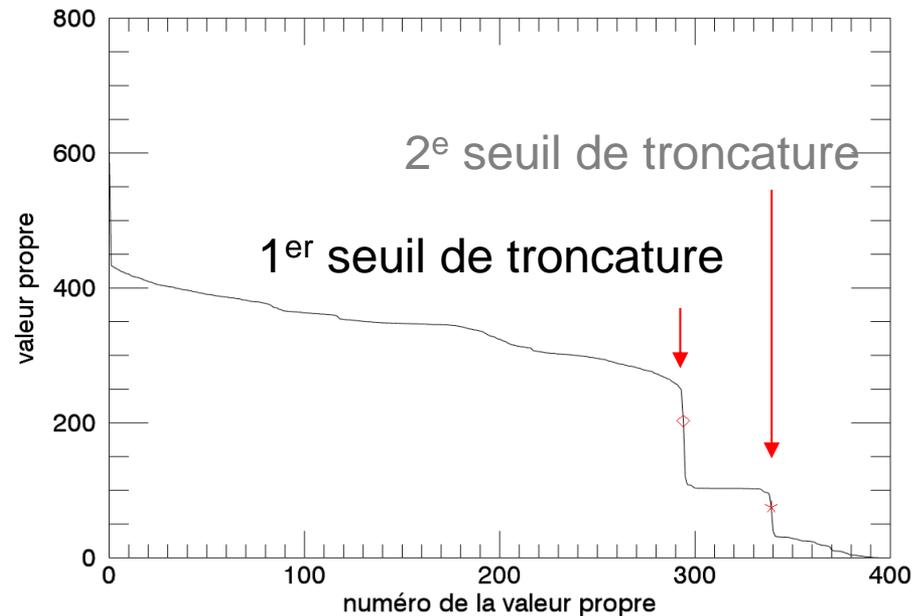
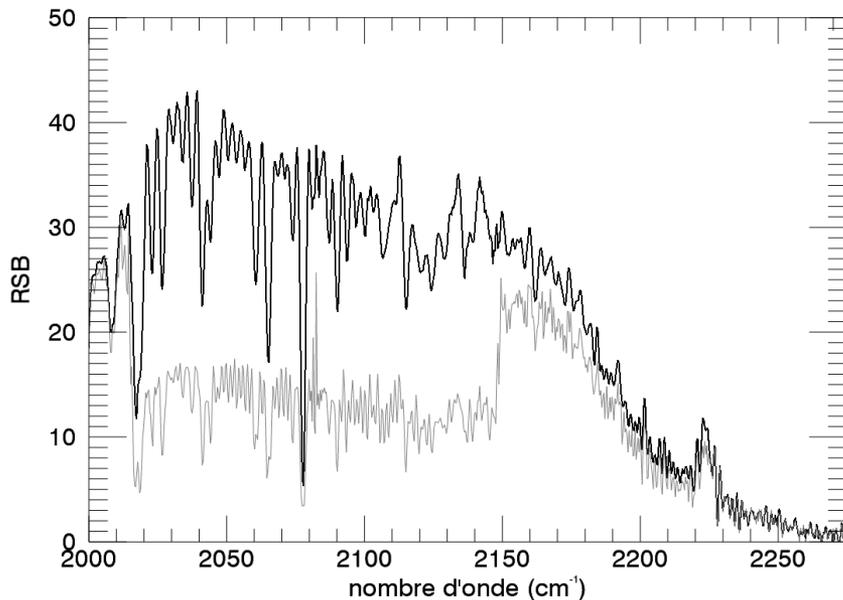
Mission :



bande spectrale	$[2000 - 2275] \text{ cm}^{-1}$ $[4,4 - 5,0] \mu\text{m}$
largeur à mi-hauteur de la fonction d'appareil (en considérant 2 ondes uniquement)	$1,8 \text{ cm}^{-1}$
indice de la cavité	3,40 (silicium)
format du détecteur	640x512, pixel de $15\mu\text{m}$
taille des imagettes	28x28 pixels
nombre d'ouverture	f/5,1
focale des mini-lentilles	1,13 mm
pas pixel au sol	2 km
grandissement de l'afocal	3,98
taille de la pupille d'entrée (en supposant la pupille de sortie sur la lame interférométrique)	$38 \times 31 \text{ mm}^2$ (diagonale : 49 mm)

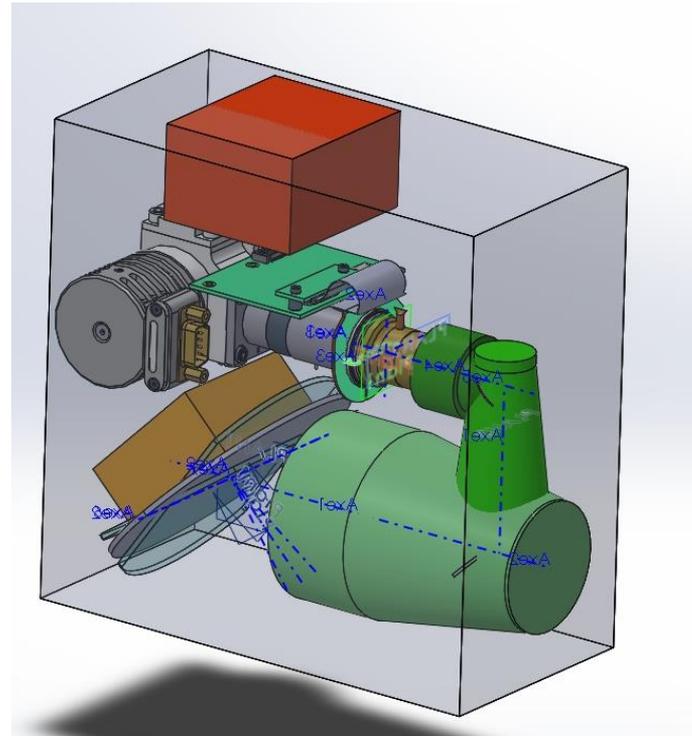
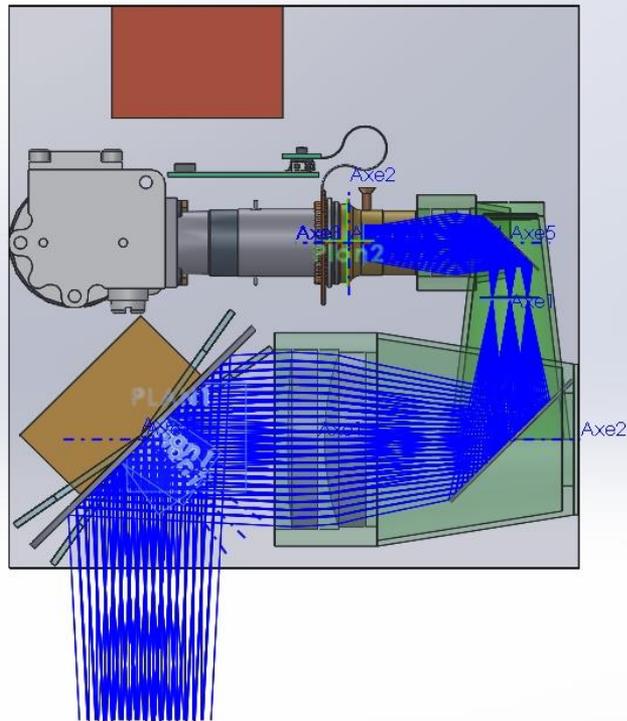
# Exemple d'application

Estimation des performances pour le point sur l'axe  
(inversion de l'interférogramme par TSVD):



- amélioration du RSB en moyennant plusieurs acquisitions successives
- RSB et fonction d'appareil dépendent de l'inversion choisie

# Exemple d'application



volume  $< 20 \times 20 \times 10 \text{cm}^3$   
masse  $< 2,5 \text{kg}$   
puissance  $< 8 \text{W}$   
(sans sources de calibration)

## 1. L'imageur hyperspectral ImSpoc

- l'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier
- le concept ImSpoc
- exemple d'application

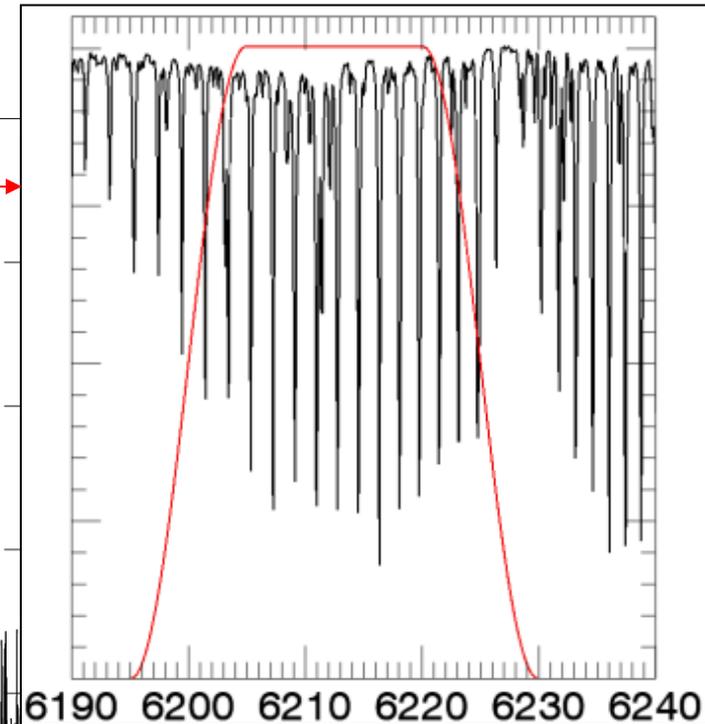
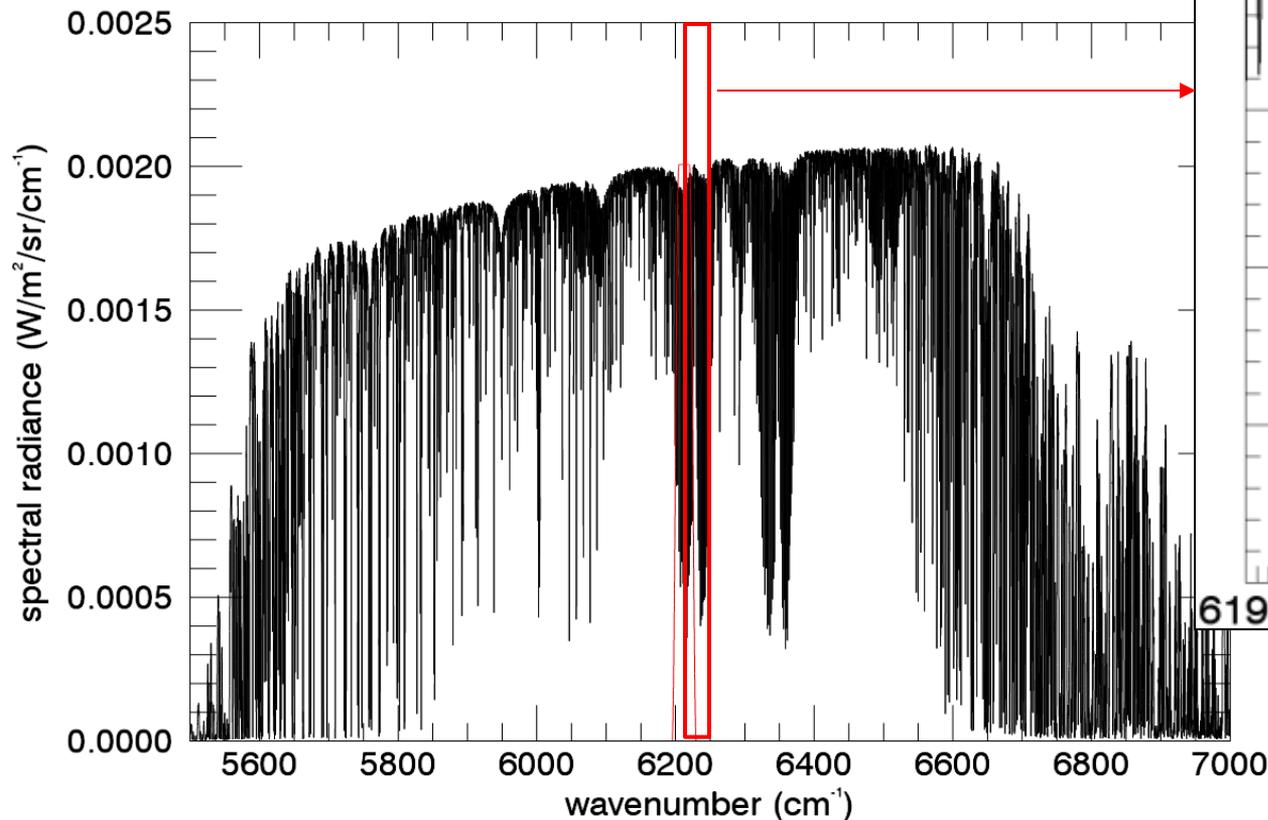
## 2. Les interférogrammes partiels

- principe des interférogrammes partiels
- bibliographie
- exemples d'application:
  - Scarbo
  - IRS SpaceObs
  - Halesis

## Conclusion

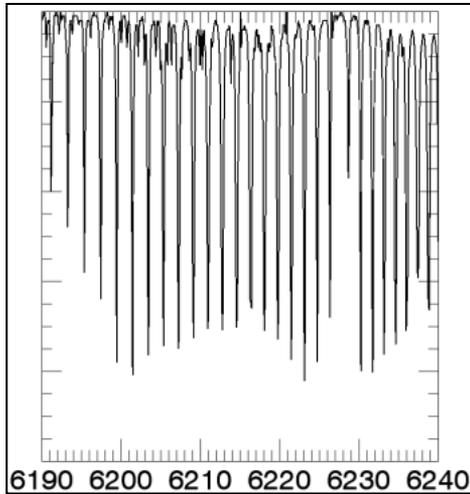
# Les interférogrammes partiels: principe

luminance spectrique typique  
du sol depuis un satellite:

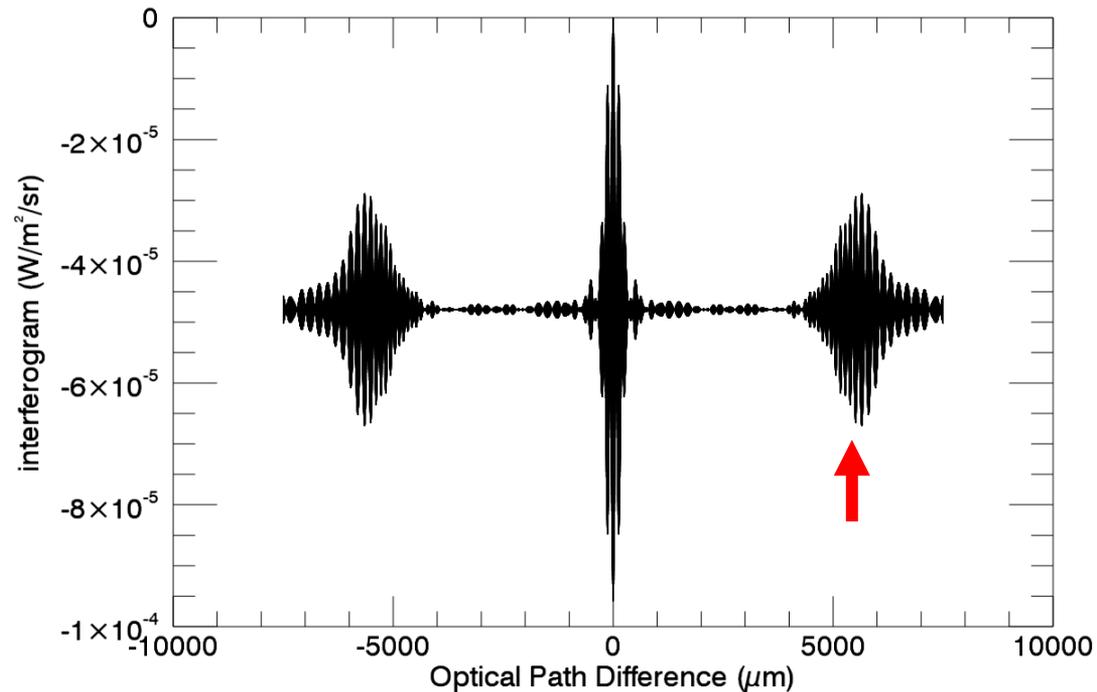


absorption par le  $\text{CO}_2$ :  
signal périodique

# Les interférogrammes partiels: principe



TF



*signal jacobien par rapport au CO<sub>2</sub>*

spectre périodique  $\Rightarrow$  signal concentré dans l'espace de Fourier  
 $\Rightarrow$  ne mesurer que les différences de marche où l'information est concentrée

# Les interférogrammes partiels: historique

## Concept proposé dans les années 1970:

T. G. Kyle, Temperature soundings with partially scanned interferograms, Appl. Opt 16 (2) p326 (1977)

G. Fortunato, Etude d'un spectromètre interférentiel à modulation sélective; applications, Thèse de l'Université Paris-Sud (1976)

## repris plus récemment comme proposition pour les données IASI ou pour SIFTI (Cnes)

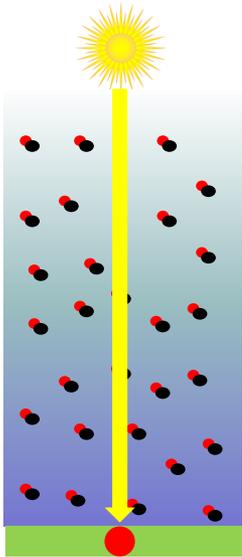
G. Grieco, Infrared Atmospheric Sounding Interferometer correlation interferometry for the retrievals of atmospheric gases: the case of H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>, Appl. Opt. 50 (22) p 4516 (2011)

C. Pierangelo et al., SIFTI : a Static Infrared Fourier Transform Interferometer dedicated to ozone and CO pollution monitoring, Proc. International TOVS Study Conferences (2008)

**Permet d'atteindre une résolution spectrale équivalente fine malgré le faible nombre de différences de marche mesurées**

# Exemples d'application

## SPACEOBS



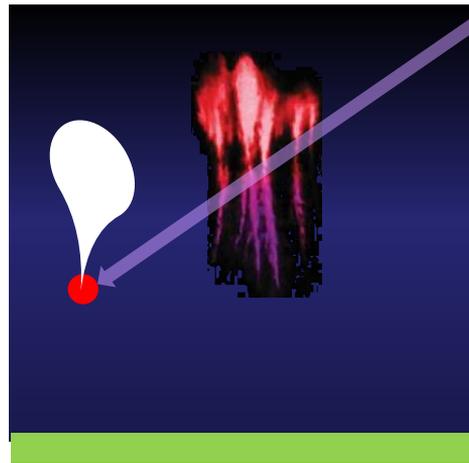
**2016-2019**

Mesure de CO en occultation solaire

Cas simple, validation par intercomparaison

université PARIS-SACLAY **SPACEOBS**

## HALESIS



**Depuis 2012**

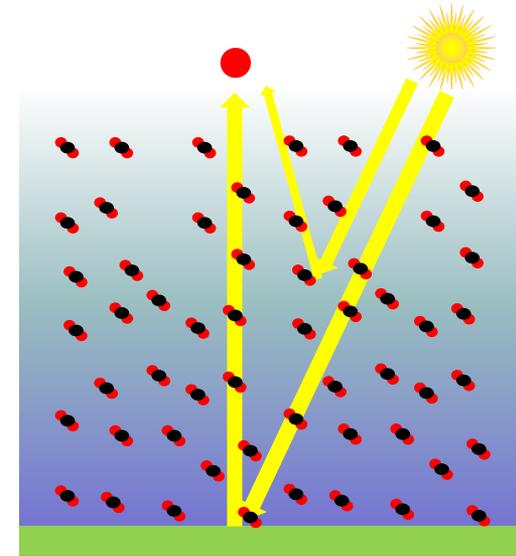
Mesure de la signature IR des TLEs

Défi: sensibilité de détection

ONERA-LATMOS



## SCARBO



**2018-2020**

Mesure de CO<sub>2</sub> en visée au nadir

Défi: métrologie

ONERA-IPAG-ADS-LMD-BREME-SRON-NOVELTIS-SPACETEC



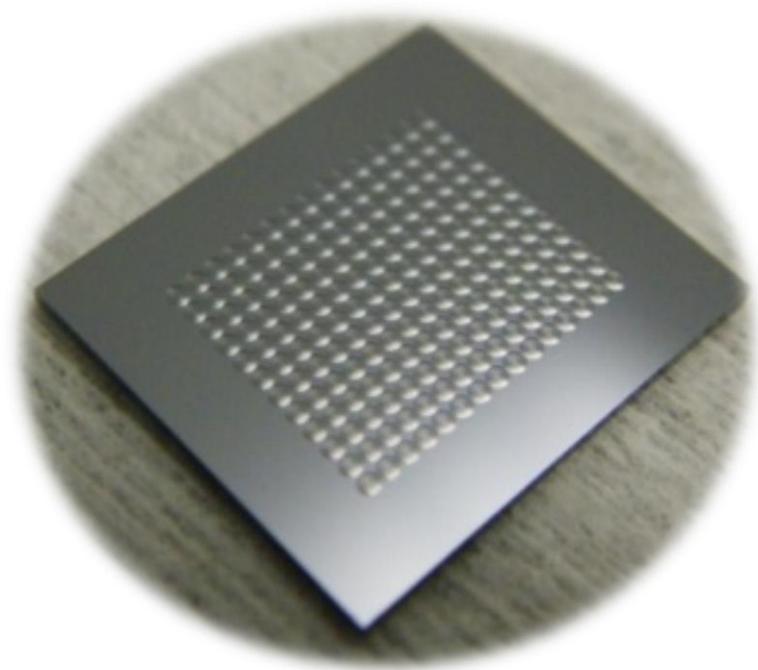
# Exemple d'application: l'IRS SpaceObs

mission: valider le concept ImSpoc dans l'infrarouge moyen en mesurant le CO par occultation solaire et en se comparant avec des instruments de référence

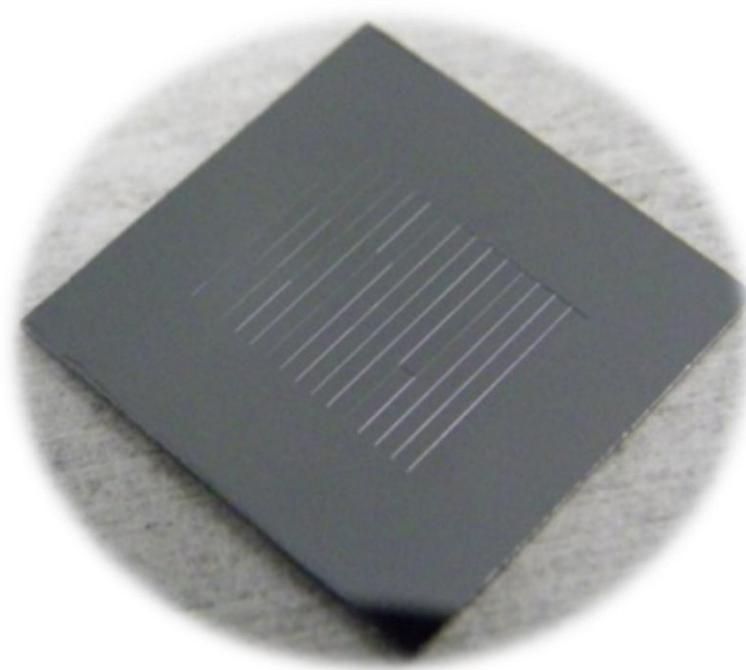
Performances	
Intervalle spectral	2080 - 2200 $\text{cm}^{-1}$
Intervalle de longueurs d'onde	4,54 – 4,81 $\mu\text{m}$
Résolution spectrale équivalente (Interférogramme partiel)	1,7 $\text{cm}^{-1}$
Détecteur	
Format	640 x 512 pixels
Taille d'un pixel	15 $\mu\text{m}$
Nombre de voies	15x12
Taille des imassettes	42 x 42 pixels

# Exemple d'application: l'IRS SpaceObs

microlentilles et lame en silicium réalisées par Silios



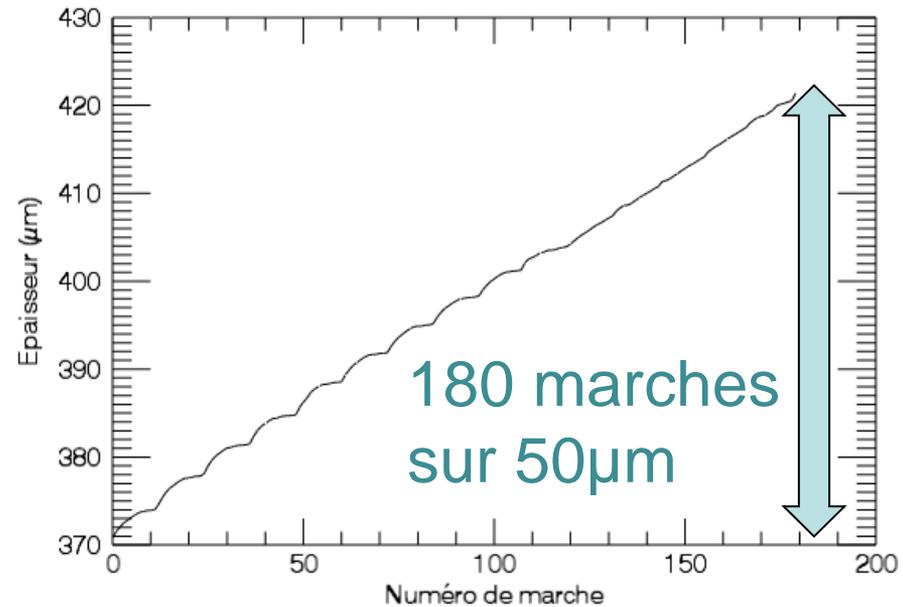
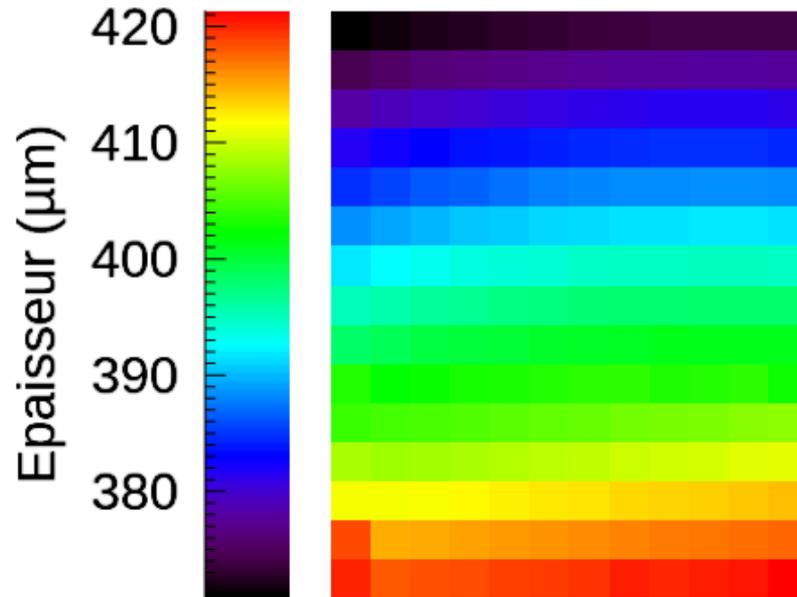
Matrice de micro-lentilles traitées AR



Lame interférométrique

# Exemple d'application: l'IRS SpaceObs

épaisseurs moyennes mesurées sur les 180 marches



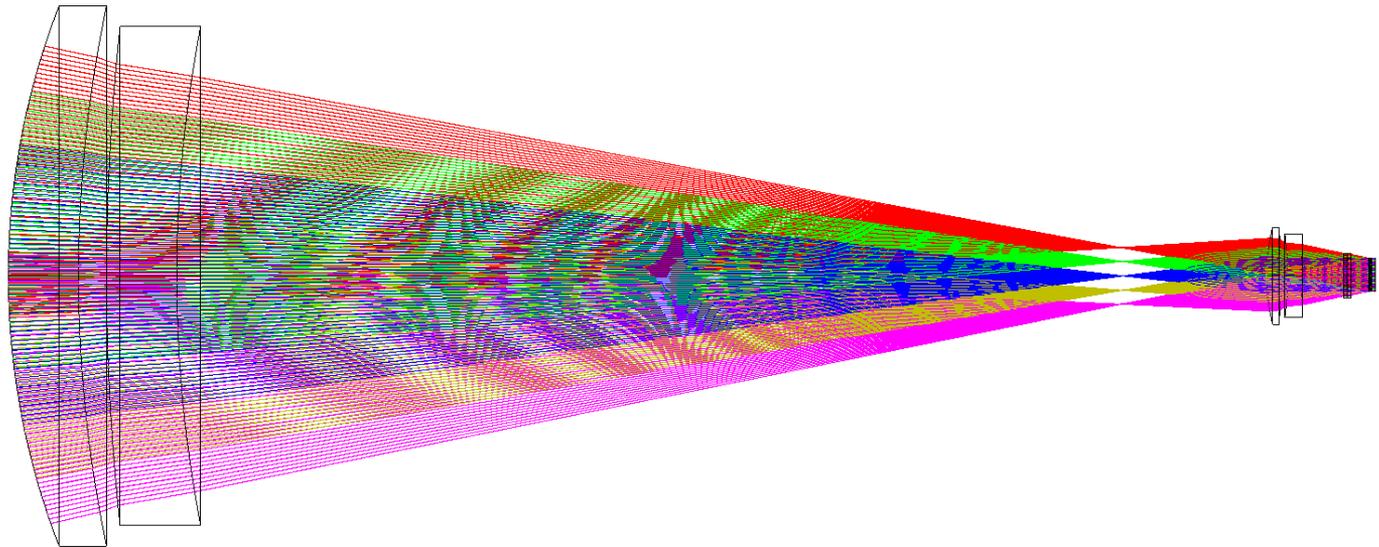
profondeur totale:  $\sim 50\mu\text{m}$

saut entre 2 marches consécutives:  $\sim 280\text{nm}$

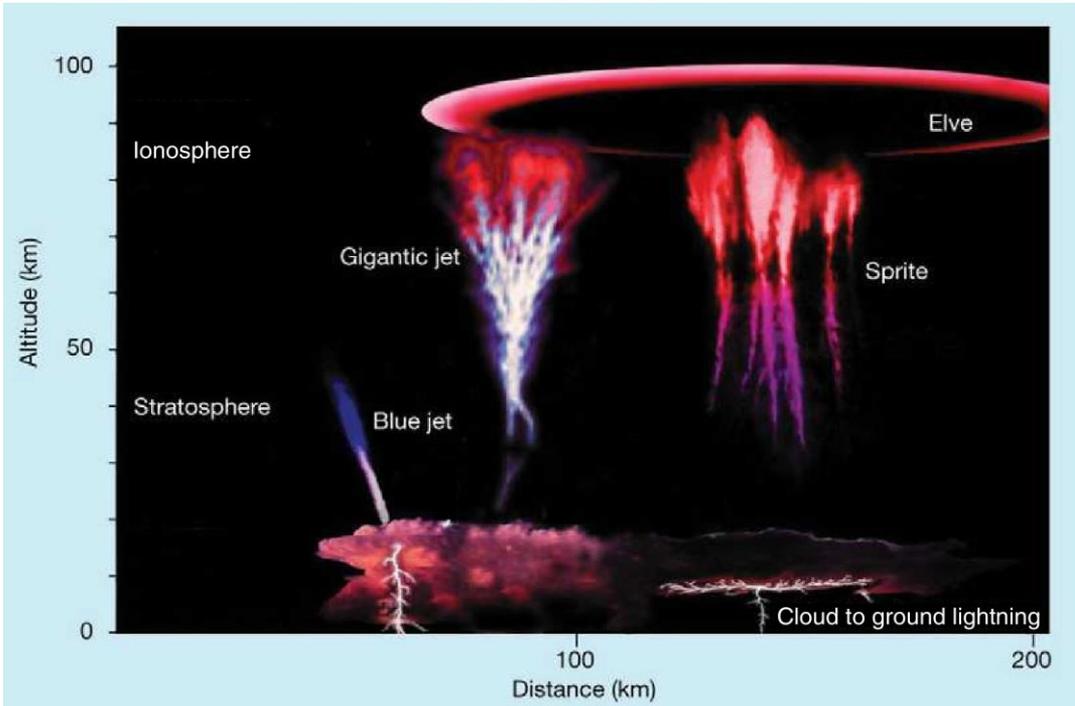
# Exemple d'application: l'IRS SpaceObs

Prochaines étapes:

- réalisation de l'afocal
- intégration du bloc interférométrique dans le cryostat du détecteur



# Exemple d'application: Halesis



TLEs: Transient Luminous Events

Première image: 1989

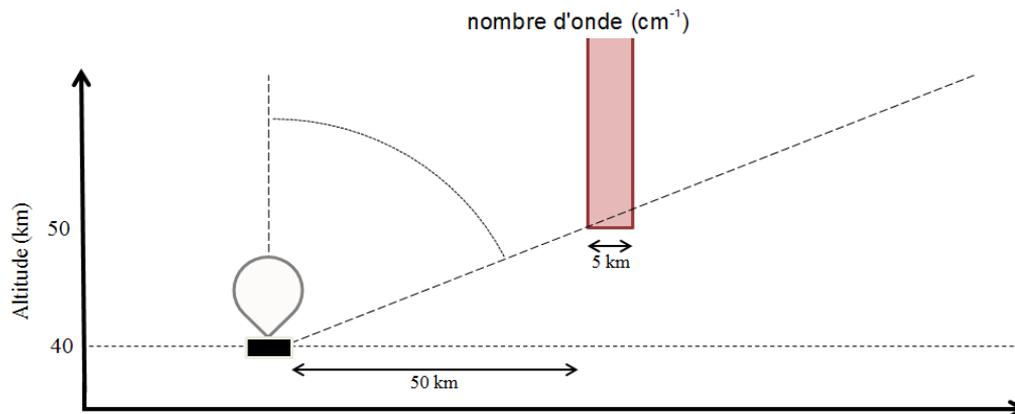
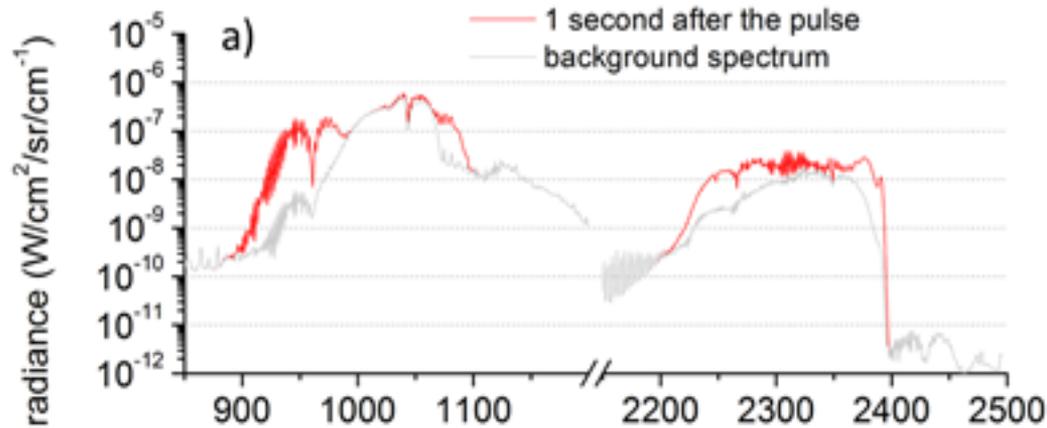
Que se passe-t-il dans les minutes qui suivent l'occurrence d'un TLE?

- mesurer et modéliser l'effet de ces événements sur la chimie stratosphérique en suivant la concentration des espèces potentiellement produites ou perturbées ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{O}_3$ , etc.)
- mesurer et modéliser la chimie des espèces vibrationnelles excitées produites ou perturbées par les TLE

# Exemple d'application: Halesis

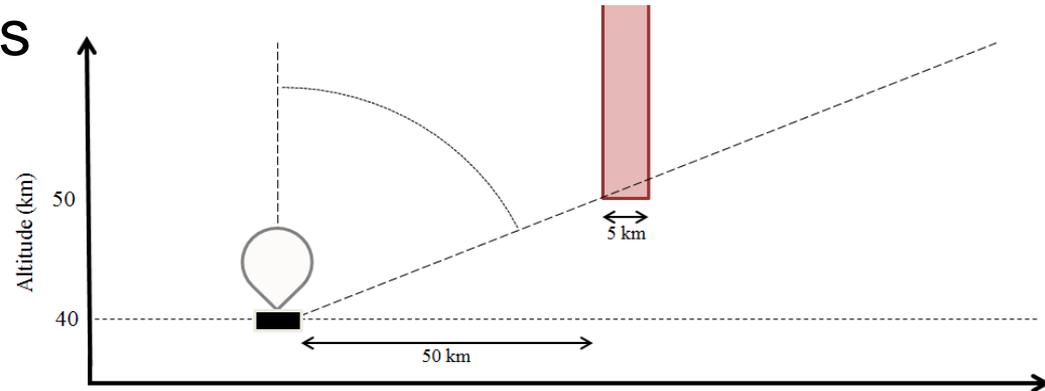
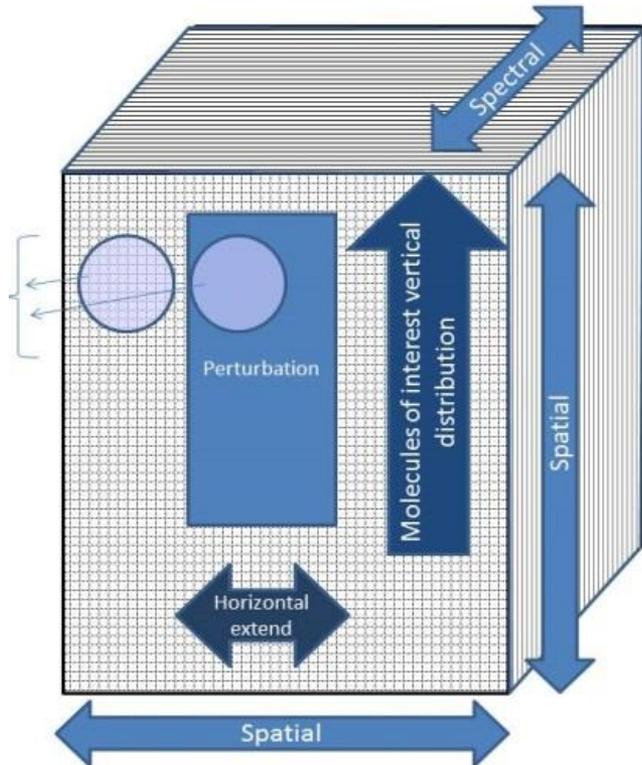
## modélisation de la signature infrarouge d'un sprite

F. Romand, Simulation de la signature infrarouge des phénomènes lumineux transitoires en moyenne atmosphère, thèse de Sorbonne Université (2018)



# Exemple d'application: Halesis

intérêt pour un spectro-imageur compact « snapshot » dans l'infrarouge moyen



Dimension spatiale horizontale:

Accès à perturbation par comparaison

Dimension spatiale verticale:

Accès à la distribution verticale des espèces

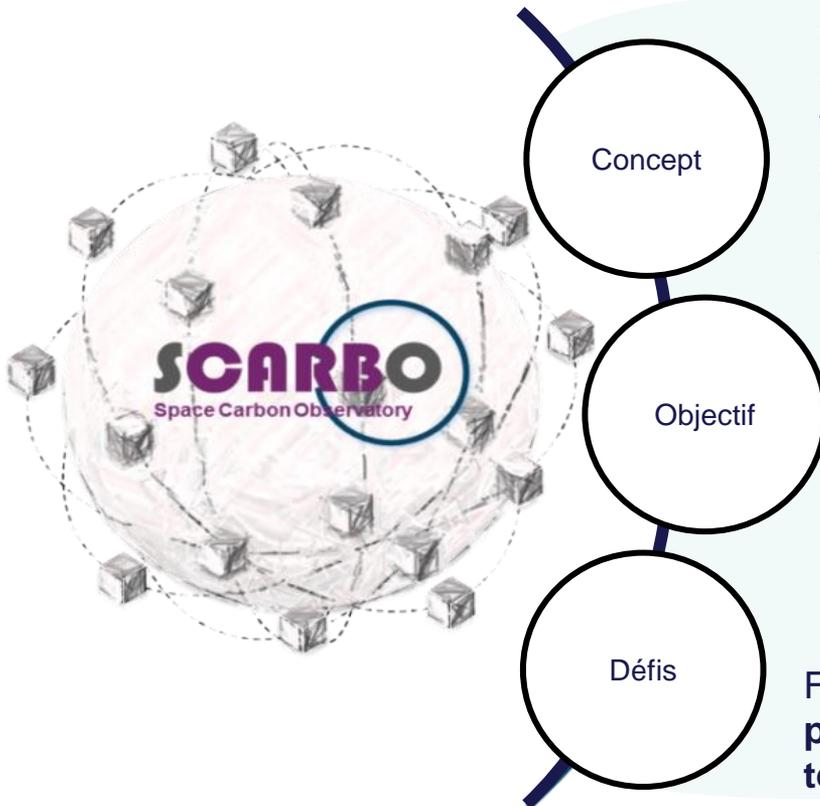
Dimension spectrale :

Région spectrale et résolution à définir en fonction des espèces d'intérêt.



# Exemple d'application: Scarbo

## Projet H2020 (2018-2020)



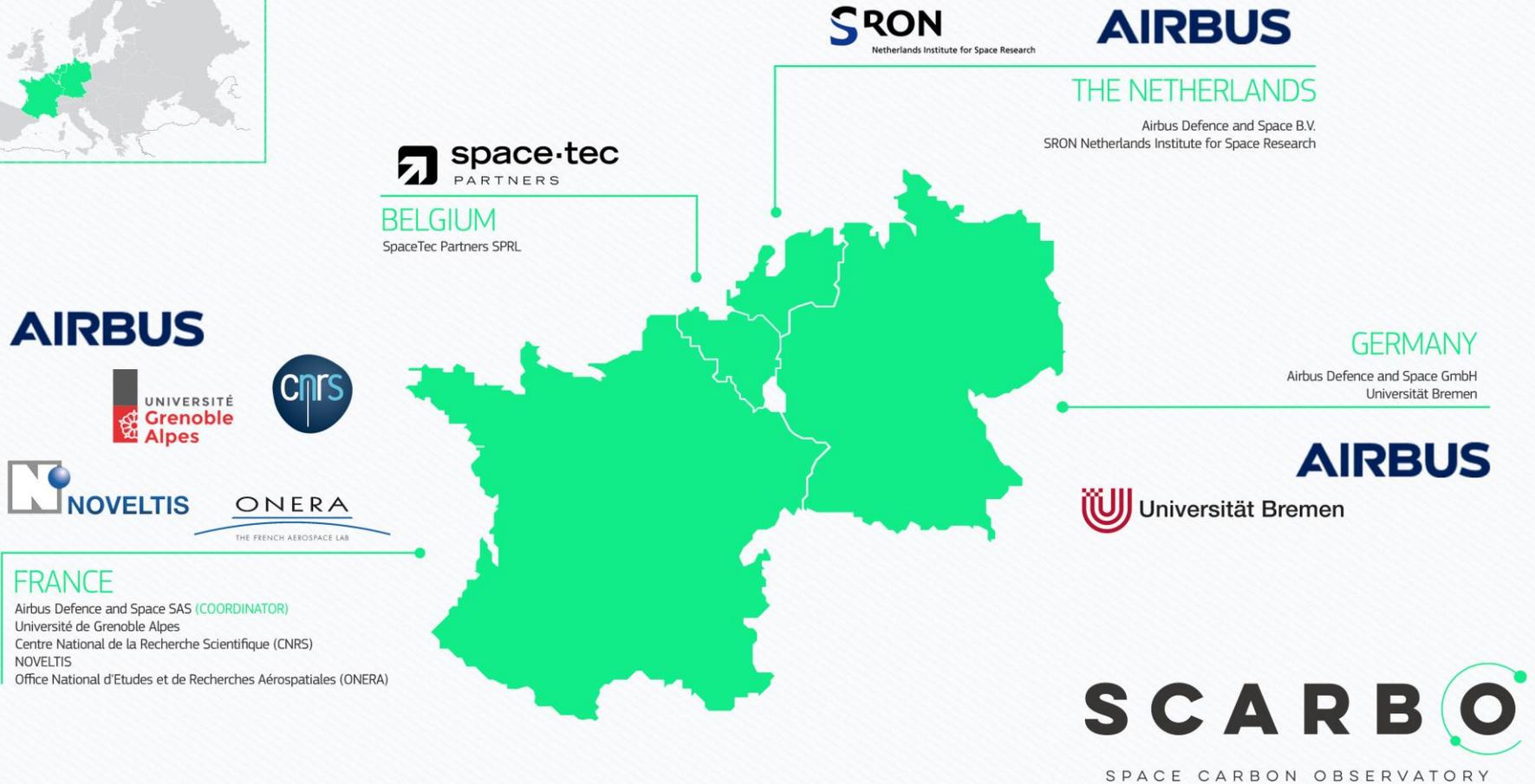
**Constellation « low-cost »** pour le suivi des **émissions anthropogéniques de gaz à effet de serre ( $\text{CO}_2 + \text{CH}_4$ )**, fondée sur des **concepts instrumentaux nouvelle-génération**, combiné avec des instruments de référence ( $\text{CO}_2$  et aérosols), pour des applications **académiques et commerciales**

**Etude de faisabilité technique**  
Estimation des **performances de la mission**  
**Démonstrateur de concept** (Monté en TRL)  
**Plan d'exploitation** et cas d'utilisation

Fournir des mesures présentant à la fois une **haute précision sur les produits** et une **haute fréquence temporelle**, à un **prix abordable**



# Exemple d'application: Scarbo



# Exemple d'application: Scarbo

Le concept ImSpoc (« Nanocarb ») est au cœur du projet Scarbo

## Objectifs:

- réalisation d'une démonstration expérimentale (campagne avion en 2020)
- estimation des performances potentielles dans le cadre d'une mission spatiale

⇒ établissement des règles de conception

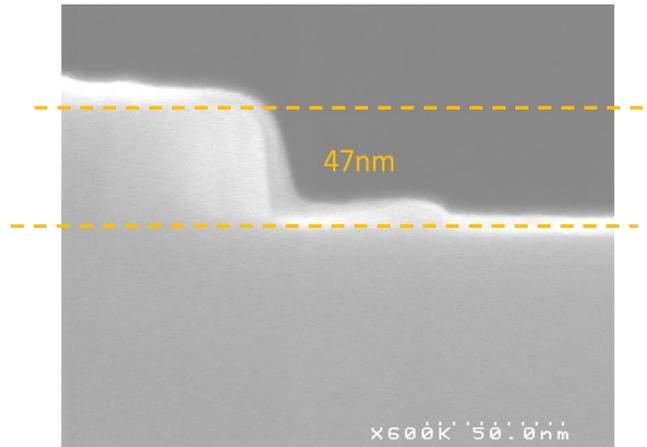
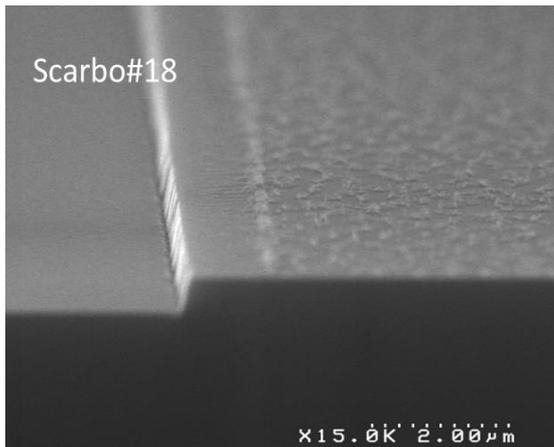
⇒ réalisation de prototypes

⇒ développement de modèles pour l'estimation de performances

⇒ développement d'outil pour l'inversion des données (cf. présentation A. Dolet)

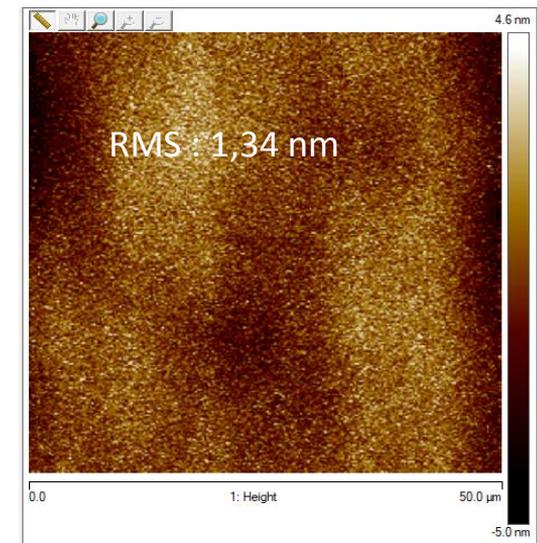
# Exemple d'application: Scarbo

## Réalisation des lames interférométriques au LTM



MEB control

AFM control

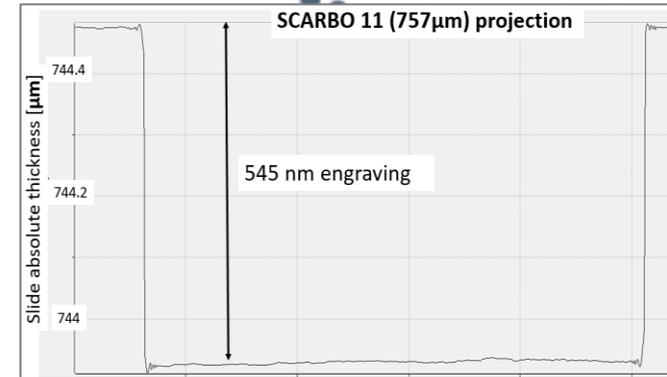
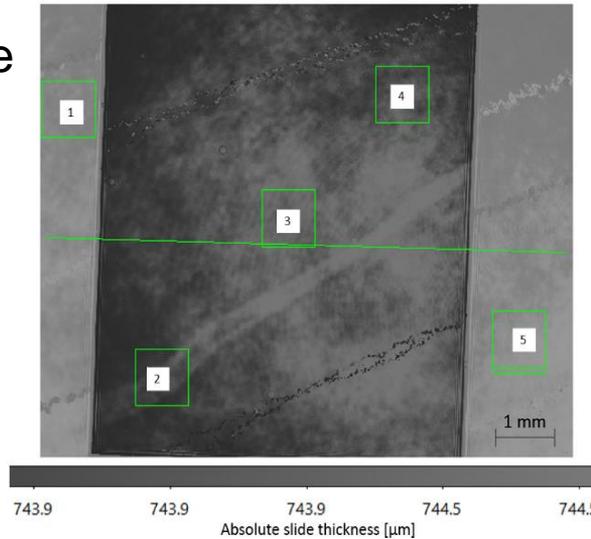


# Exemple d'application: Scarbo

## Tests de gravure et polissage

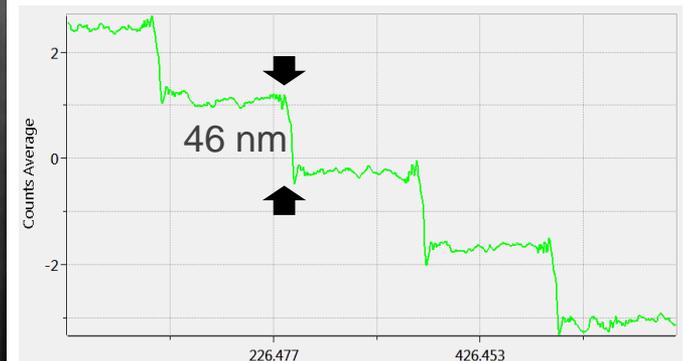
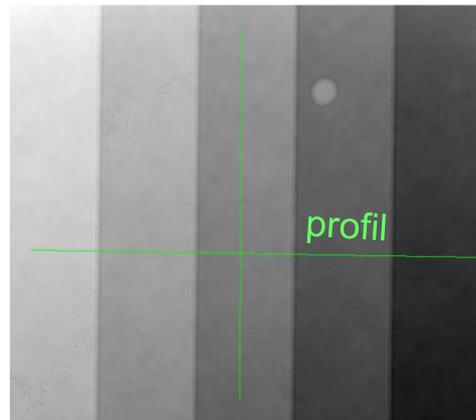
- Profondeur de gravure visée: 550nm
- Rugosité 1 nm rms

Region	RMS [nm]
1	1.2
2	2.6
3	0.9
4	1.4
5	1.8



## Tests de gravure de marches

- 4 marches de 46 nm
- rugosité 1 nm rms



## Prochaines étapes:

- caractérisation du premier prototype de laboratoire
- réalisation du prototype aéroporté
- développement des outils d'inversion

## 1. L'imageur hyperspectral ImSpoc

- l'interféromètre de Fabry-Perot comme spectromètre à transformée de Fourier
- le concept ImSpoc
- exemple d'application

## 2. Les interférogrammes partiels

- principe des interférogrammes partiels
- bibliographie
- exemples d'application:
  - Scarbo
  - IRS SpaceObs
  - Halesis

## Conclusion

- ImSpoc est un concept de spectro-imageur « snapshot » compact développé par l'UGA et l'Onera
- Plusieurs réalisations sont en cours, avec des premiers résultats expérimentaux attendus pour bientôt (TRL4)
- Dans les prochains mois, l'accent sera mis sur:
  - la réalisation des premiers démonstrateurs
  - l'analyse des premières données expérimentales
  - le traitement des données (cf. présentation A. Dolet)

# Remerciements

ImSpoc permet plusieurs collaborations fructueuses, et bénéficie de plusieurs sources de financement, en particulier:

- FUI



- IRS SpaceObs



- Cnes



- H2020



This project has received funding from the European Union's Horizon 2020 research and innovation program under grant agreement No 769032