

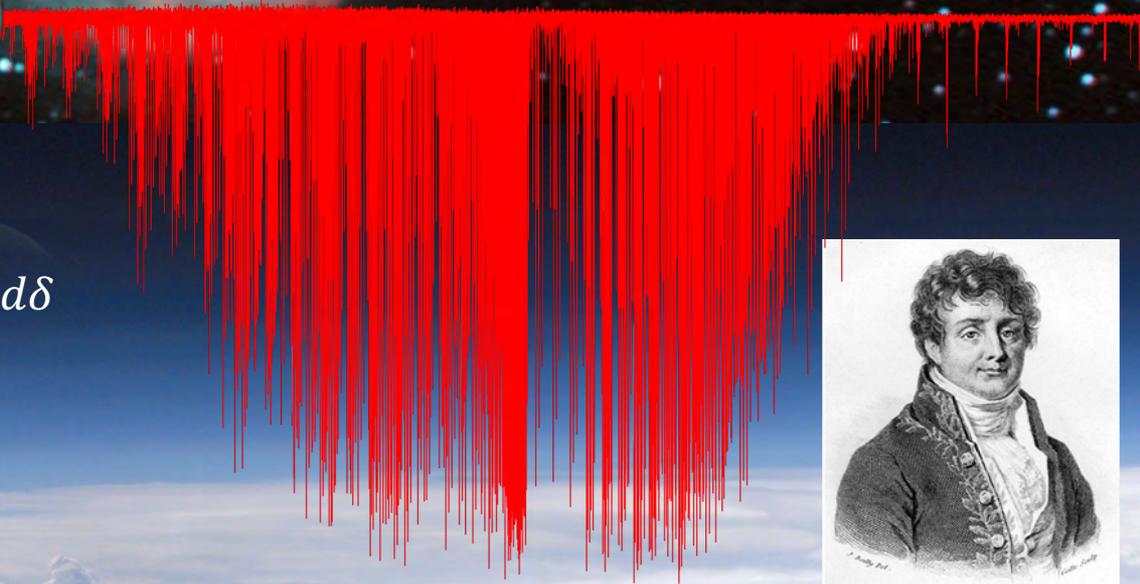
# La Spectroscopie par Transformée de Fourier, un héritage emblématique de Joseph Fourier en Physique et en Astronomie

Vincent BOUDON

Directeur de Recherche CNRS / Laboratoire ICB  
Président de la Société Française de Physique Bourgogne Franche-Comté  
Président de la Société Astronomique de Bourgogne

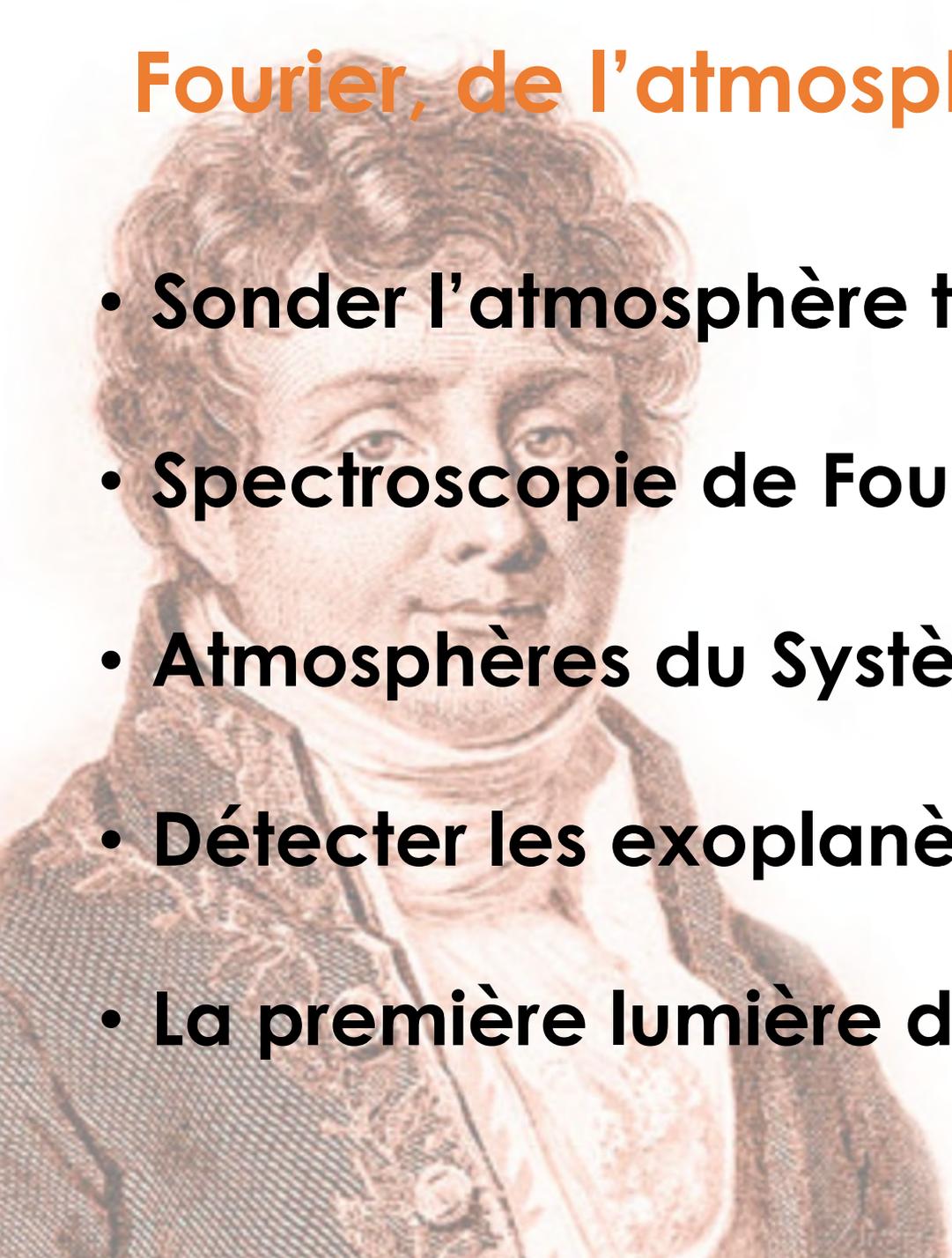


$$B(\tilde{\nu}) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(\delta) \cos(2\pi\tilde{\nu}\delta) d\delta$$



# Fourier, de l'atmosphère à l'Univers

- **Sonder l'atmosphère terrestre**
- **Spectroscopie de Fourier et astronomie**
- **Atmosphères du Système Solaire**
- **Détecter les exoplanètes**
- **La première lumière de l'Univers**



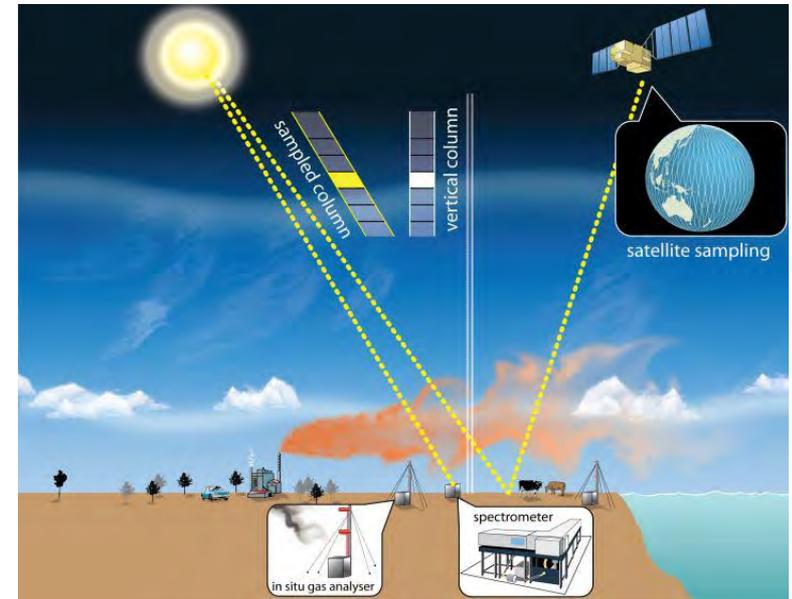


# Sonder l'atmosphère terrestre

Instrumentes et spectres par transformée de Fourier

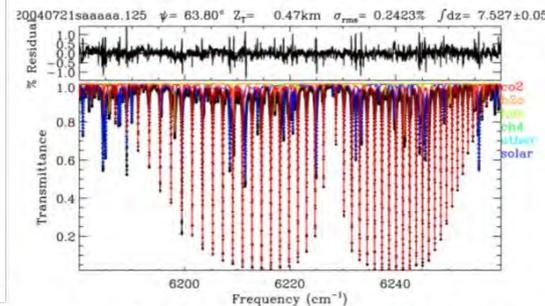
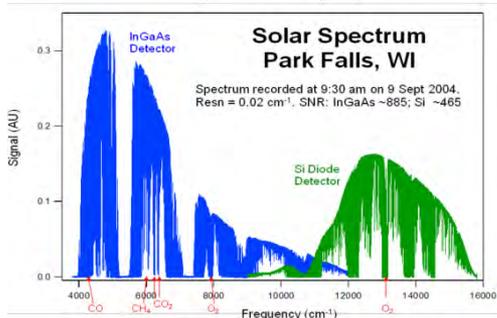
# Instrumentes au sol : le réseau TCCON

## Total Carbon Column Observing Network

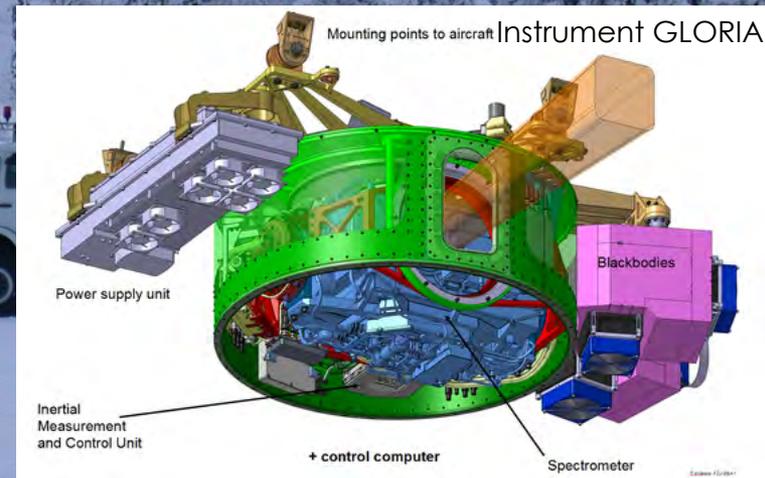


26 spectromètres par Transformée de Fourier (+ 4 à venir)

Mesures simultanées par des stations au sol (spectromètres Bruker) et des satellites de colonnes de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ , ...



# En ballon et en avion !



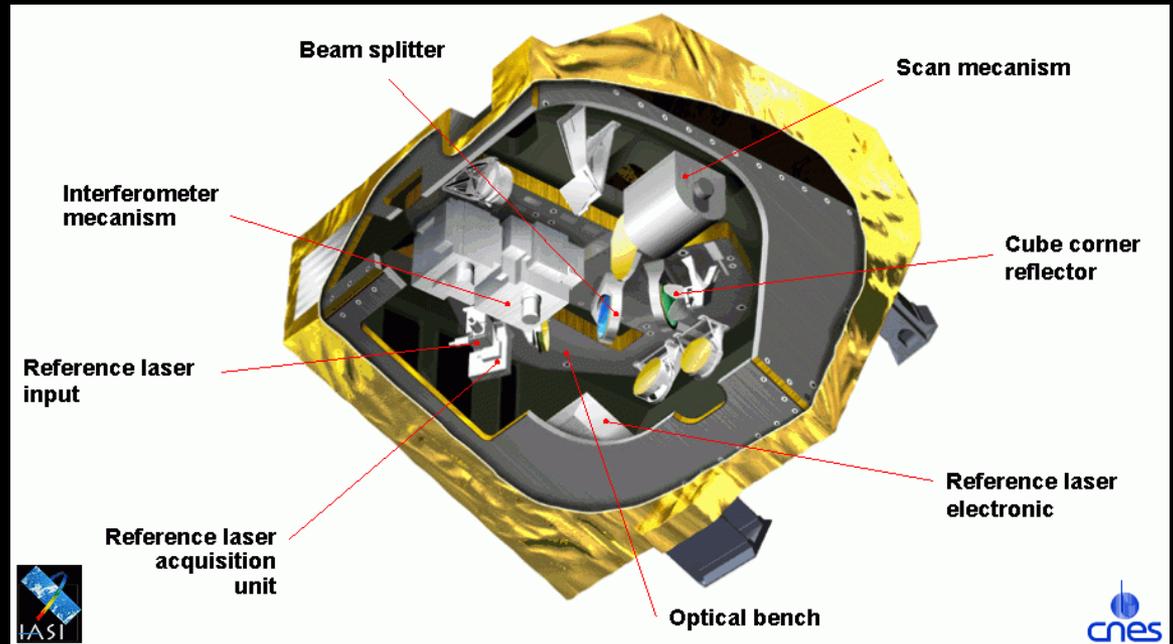
Des spectromètres par transformée de Fourier sont régulièrement embarqués à bord de ballons stratosphériques ou d'avions, afin de mesurer, dans l'infrarouge, les composants atmosphériques.

# Depuis l'espace : les satellites



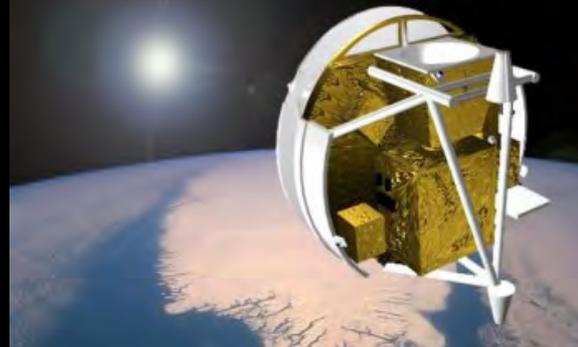
Satellite MetOp-C en cours d'assemblage

De nombreux satellites mesurent la composition atmosphérique par spectroscopie de Fourier.



Spectromètre IASI (Interféromètre Atmosphérique de Sondage dans l'Infrarouge)

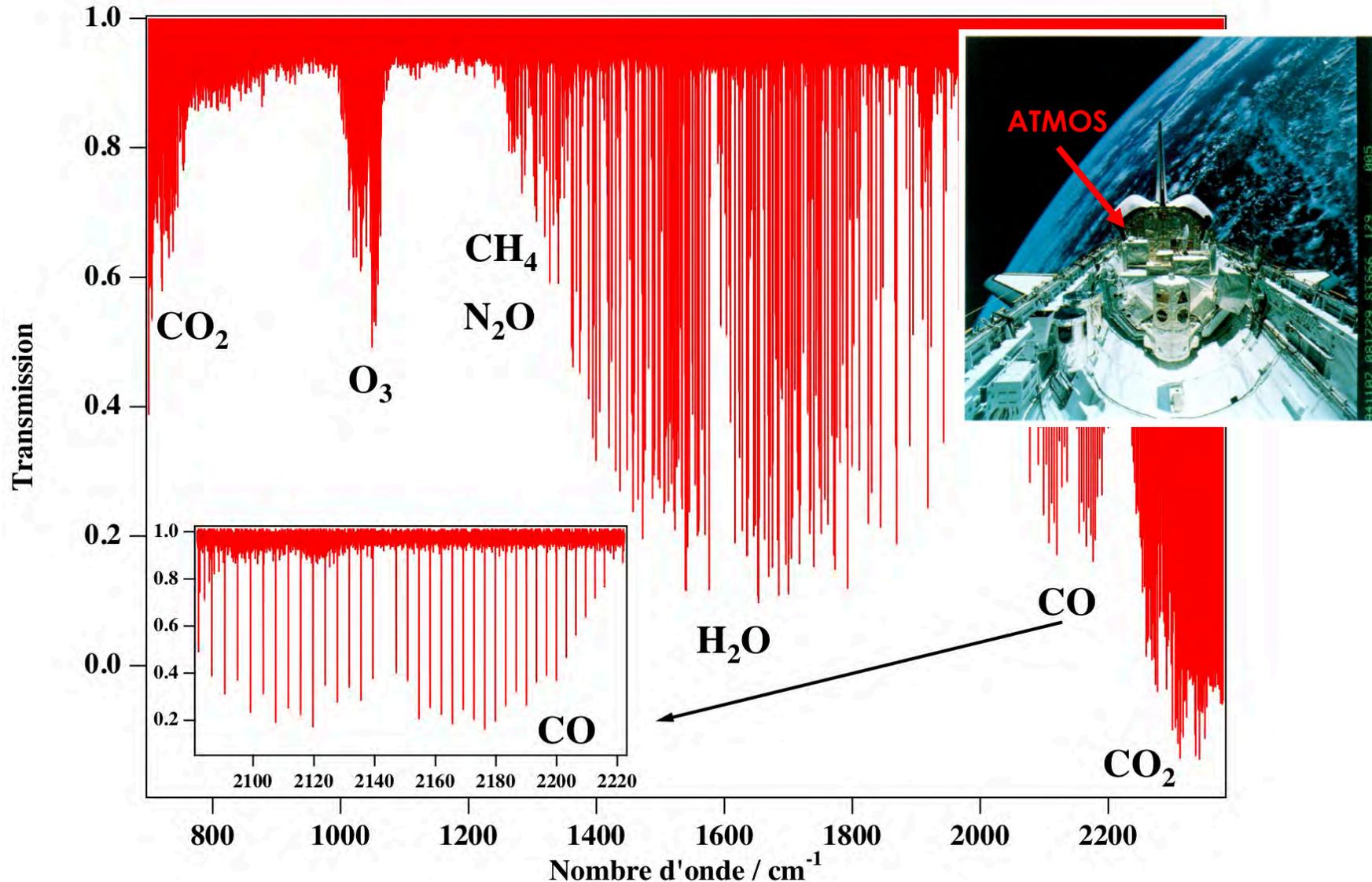
Atmospheric Chemistry Experiment (Canada) et instrument ACE-FTS



# Exemple : l'expérience ATMOS (1985–1994)

## Atmospheric Trace Molecule Spectroscopy

Spectromètre par Transformée de Fourier embarqué à bord de la navette spatiale

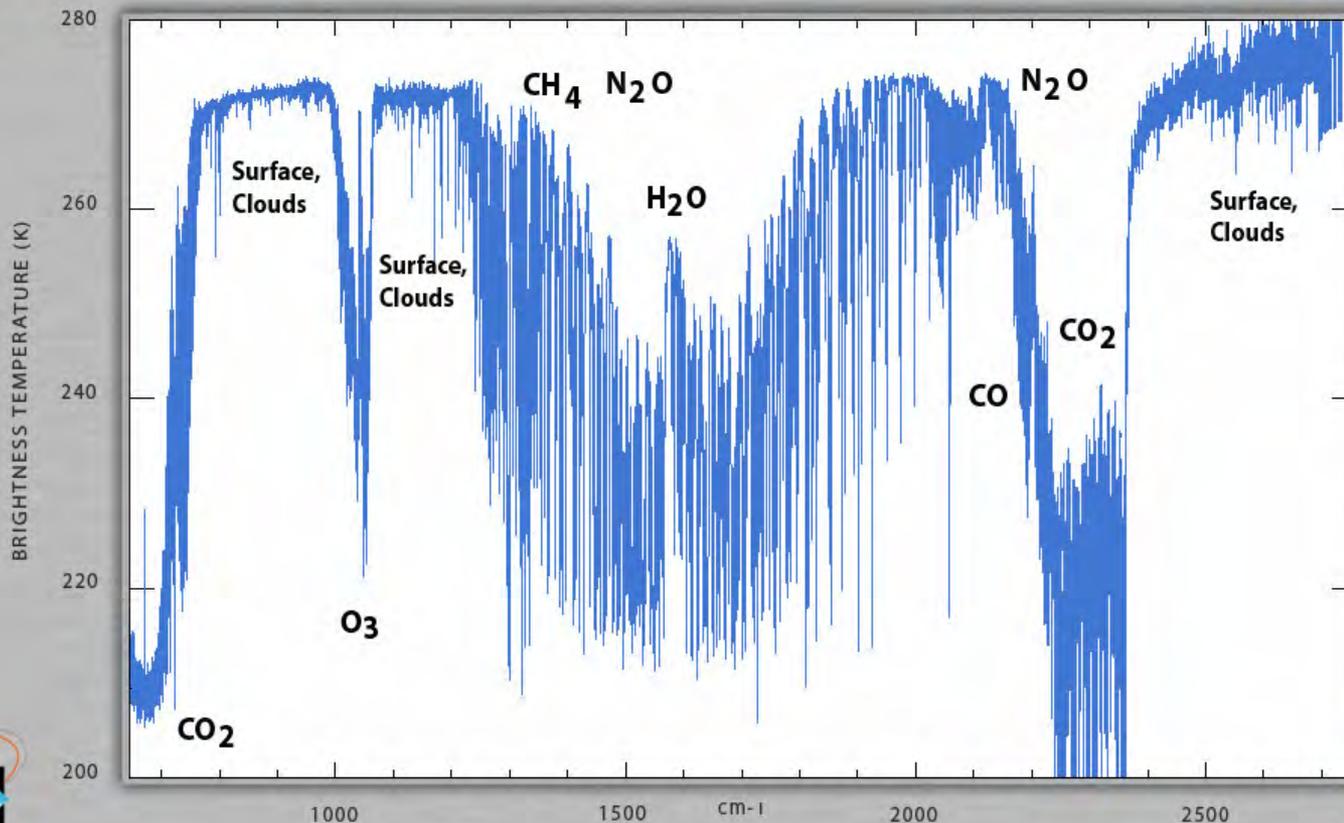


# Exemple : l'expérience IASI (MetOp)

cnes

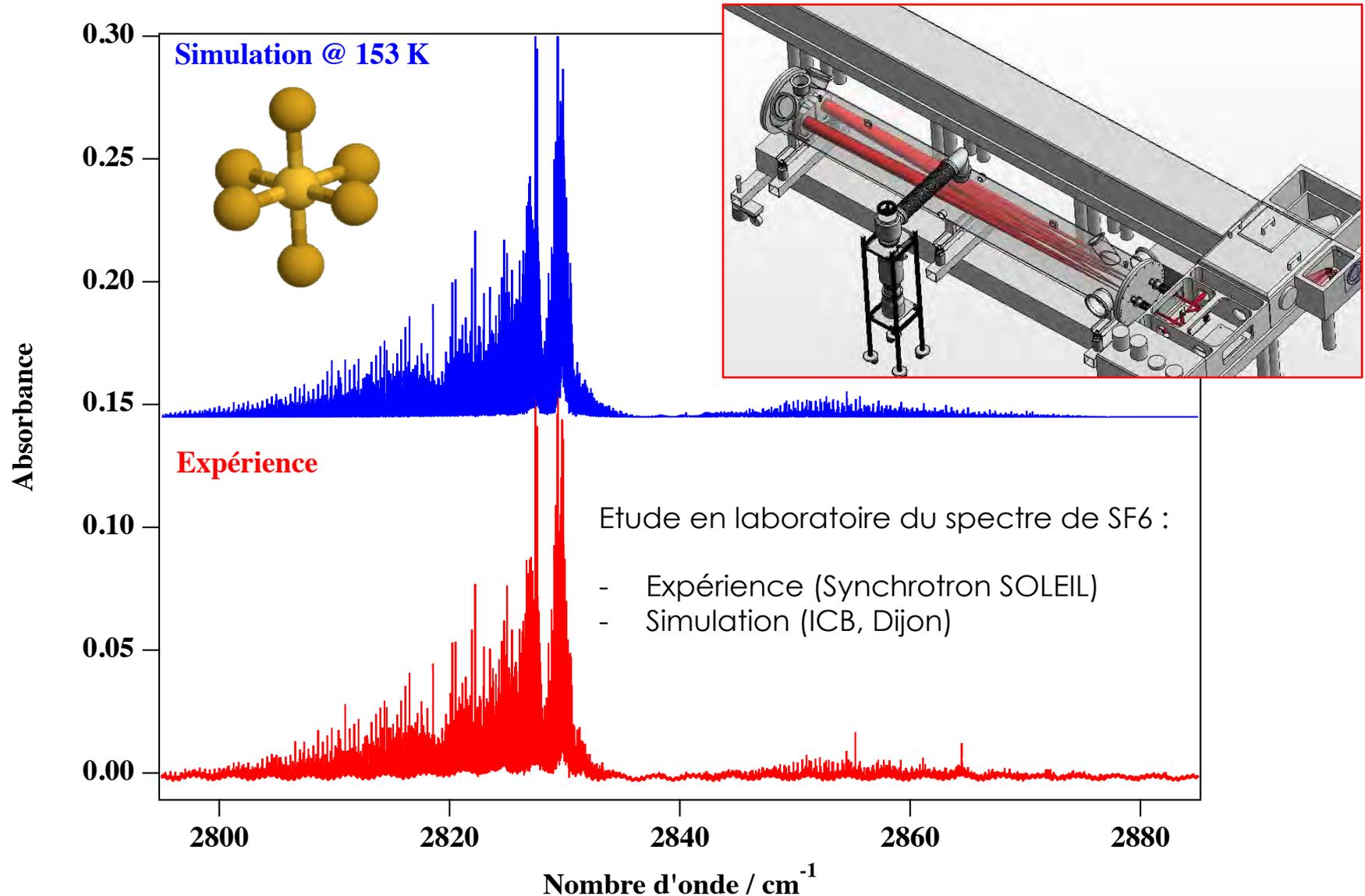
EUMETSAT

First IASI/METOP-B spectrum 24/10/2012 at 03:04 PM



# SF<sub>6</sub> : un gaz à effet de serre puissant

Potentiel de réchauffement = 23900 fois celui de CO<sub>2</sub>, durée de vie dans l'atmosphère 3200 ans





# Spectroscopie de Fourier et astronomie

Instrumentes au sol et embarqués

# Spectroscopie de Fourier avec un télescope

## L'exemple du CFHT



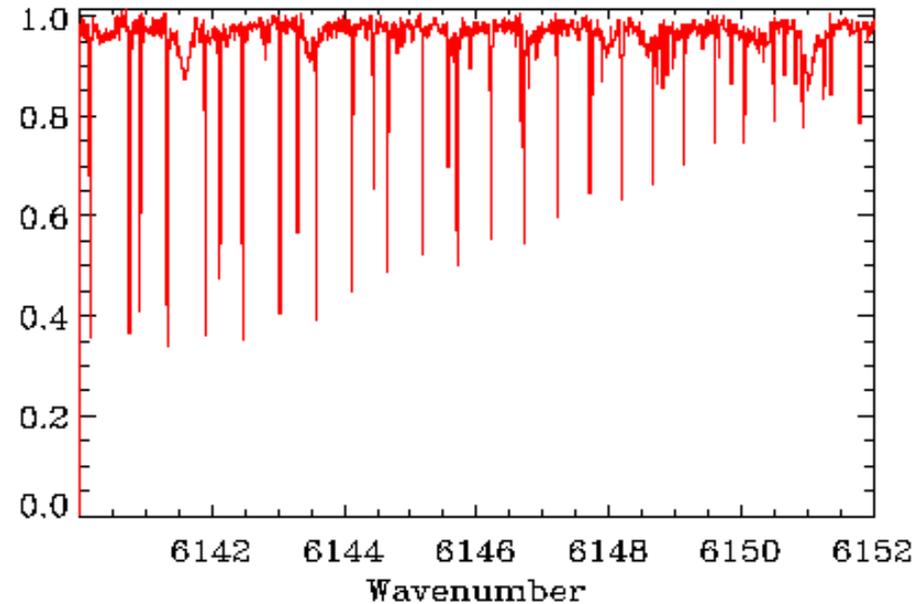
Spectromètre par transformée de Fourier du télescope Canada-France-Hawaï (CFHT)

Source : Observatoire de Paris



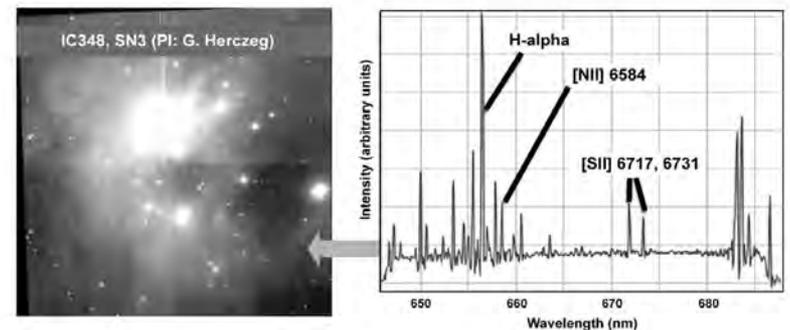
SITELLE :  
Nouveau spectromètre-  
imageur par  
transformée de  
Fourier au CFHT  
Source : CFHT

$$d\sigma = 0.0147 \text{ cm}^{-1} \quad R = 418,500$$



Spectre d'une bande du dioxyde de carbone de l'atmosphère martienne, enregistré avec le spectromètre FTS du CFHT.

Source : CFHT



# Instruments de Fourier embarqués sur des sondes spatiales



Voyager 1 & 2  
Instrument IRIS  
(NASA, 1977–1989)



Venera 15 et 16  
Infrared Fourier Spectrometer  
(URSS, 1983)



Mars Express (et Venus Express)  
Planetary Fourier Spectrometer  
(ESA, 2003–...)



Cassini  
Instrument CIRS  
(NASA, 1997–2017)

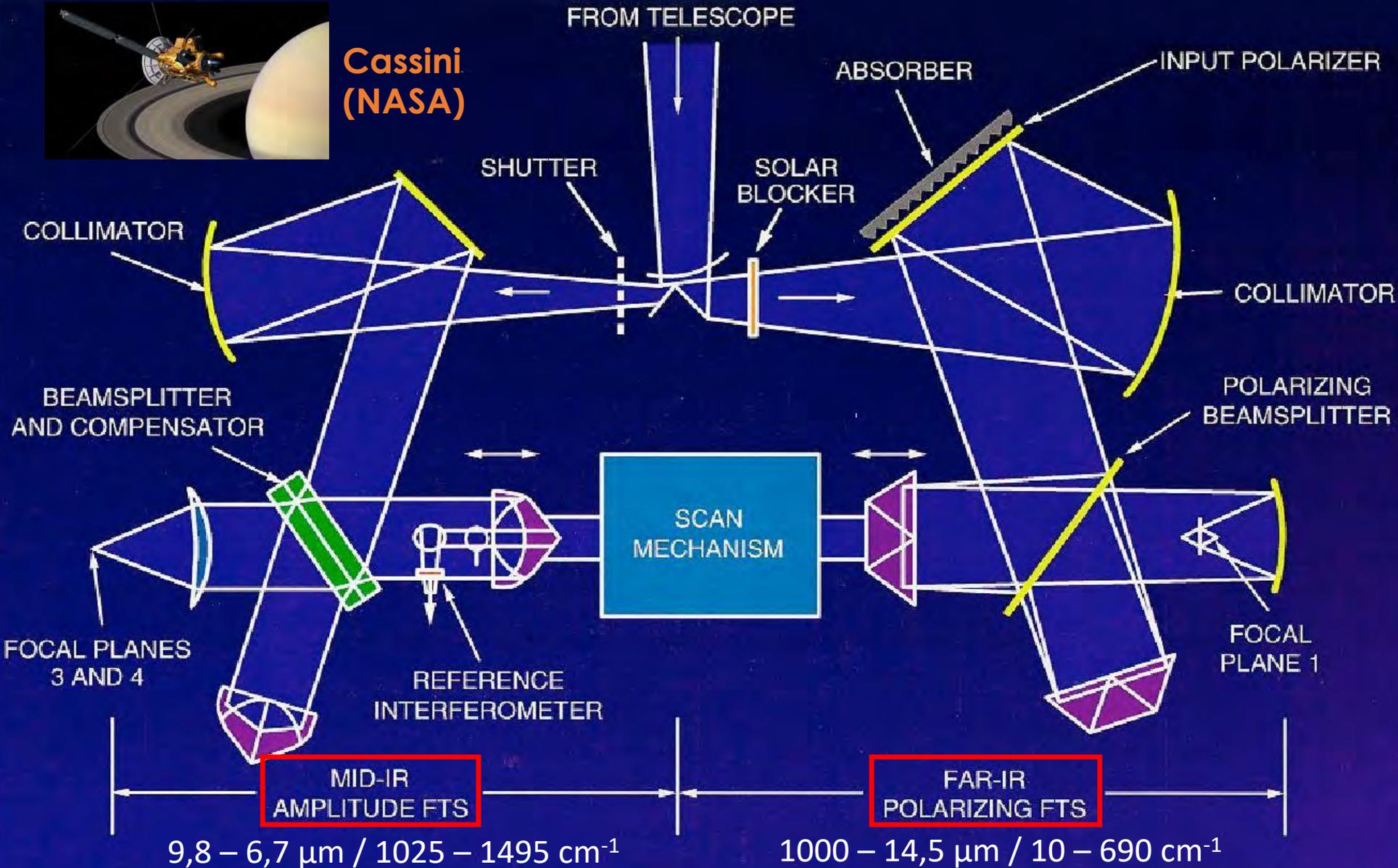


ExoMars Trace Gas Orbiter  
Instrument ACS-TIR  
(ESA, 2016–...)

# CIRS : Composite Infrared Spectrometer



Cassini  
(NASA)



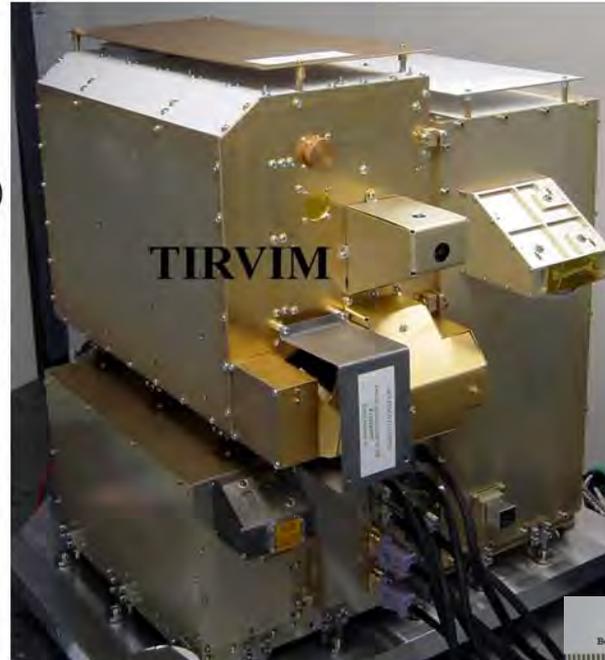
# ACS TIR

## (Atmospheric Chemistry Suite – Thermal InfraRed)

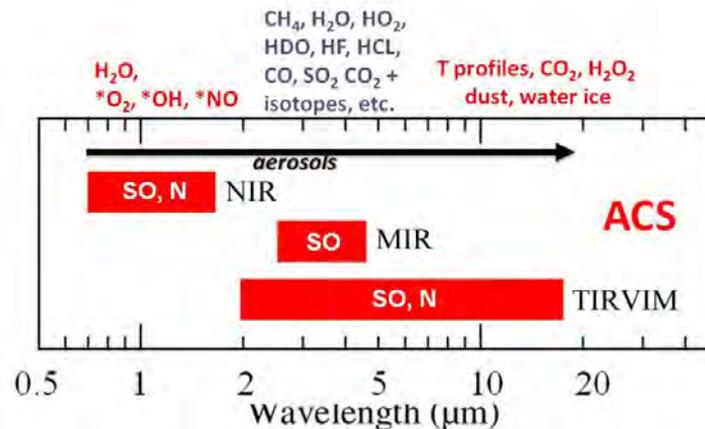


### ACS: Main TIRVIM parameters

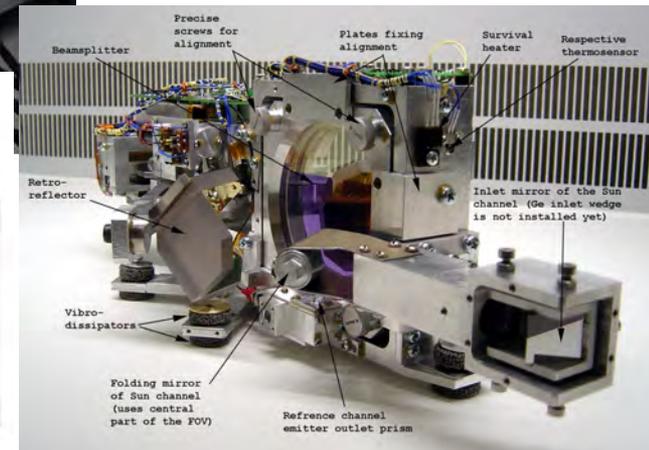
Spectral range: 2–17 $\mu$  (600–5000 $\text{cm}^{-1}$ )  
 Inst. spectral range: 2–17 $\mu$   
 Observation modes: Sun (occultation)  
 Mars (nadir, day & night)  
 Max OPD: 6cm  
 Spectral resolution: 0.25 $\text{cm}^{-1}$  (Sun)  
 1.6 $\text{cm}^{-1}$  (Mars)  
 FOV:  $\varnothing 2.5^\circ$  ( $=\varnothing 17\text{km}$  @ nadir)  
 One measurement: 2s (Sun)  
 7s (Mars, shift=24km)  
 Pointing: Internal 1-axis  
 Flight calibrations: Internal BB, space



Max aperture: 2 inch (Mars mode)  
 Mass: 12kg  
 Power: 15W  
 Thermal stabilization: Internal

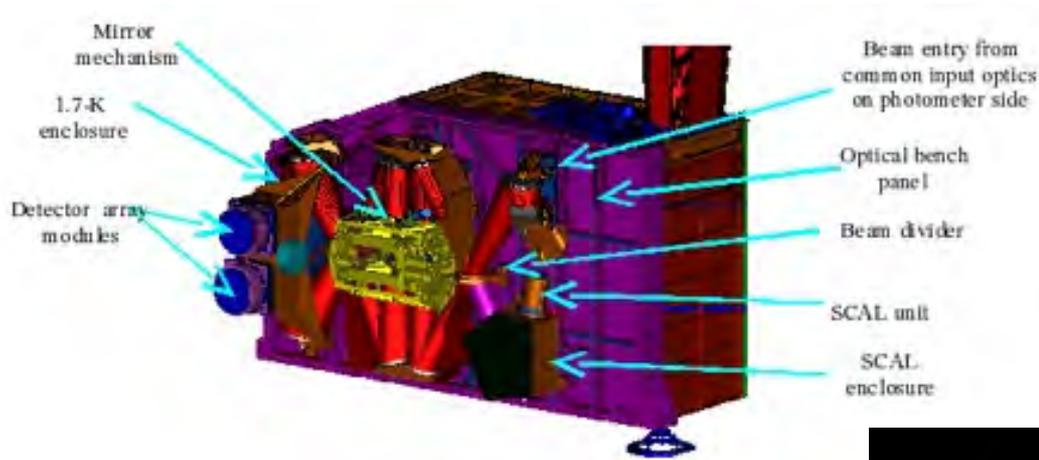


ExoMars TGO  
(Trace Gas Orbiter, ESA)



Source : Alexey Shakun & ESA

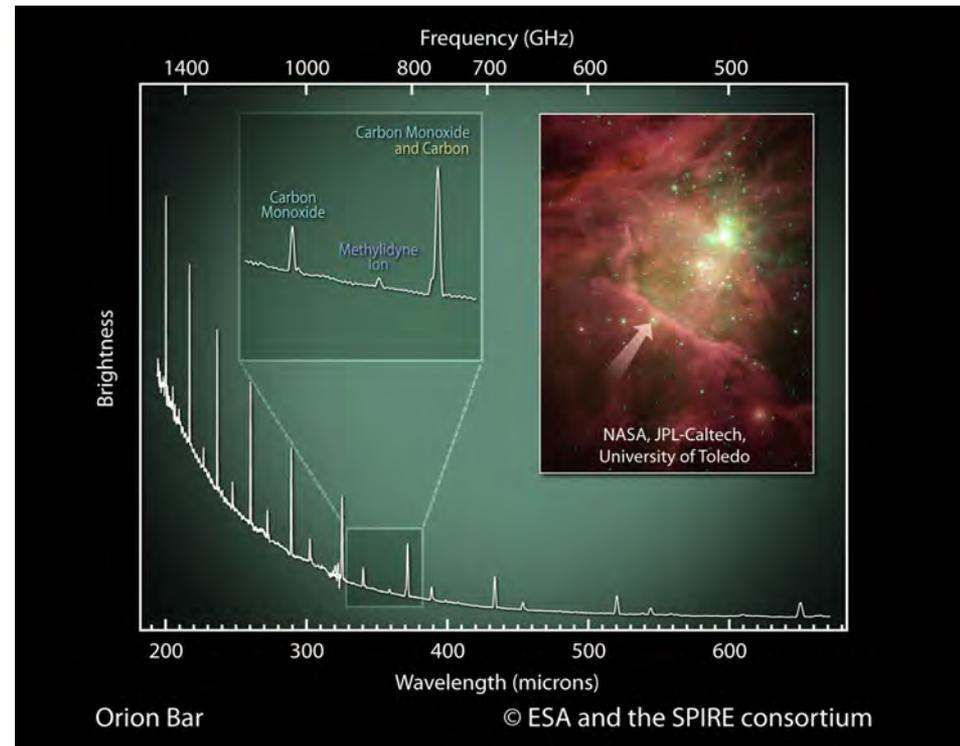
# Un satellite pour l'astronomie Infrarouge : Herschel



Spectromètre à Transformée de Fourier de l'instrument SPIRE

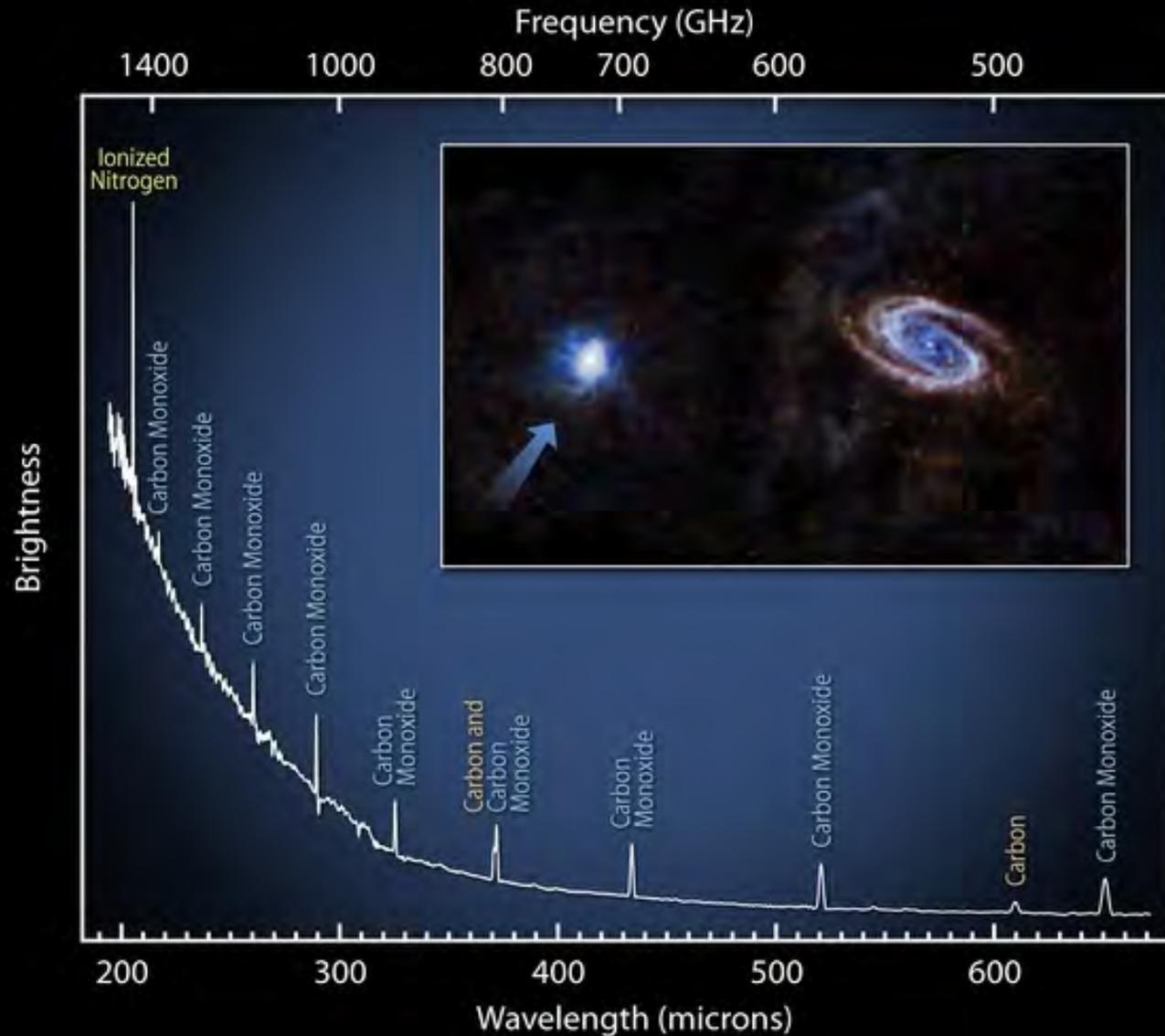
(Spectral and Photometric Imaging Receiver)

200 – 670  $\mu\text{m}$



# Herschel : Molécules dans M82

Galaxies à 12 millions d'années-lumière

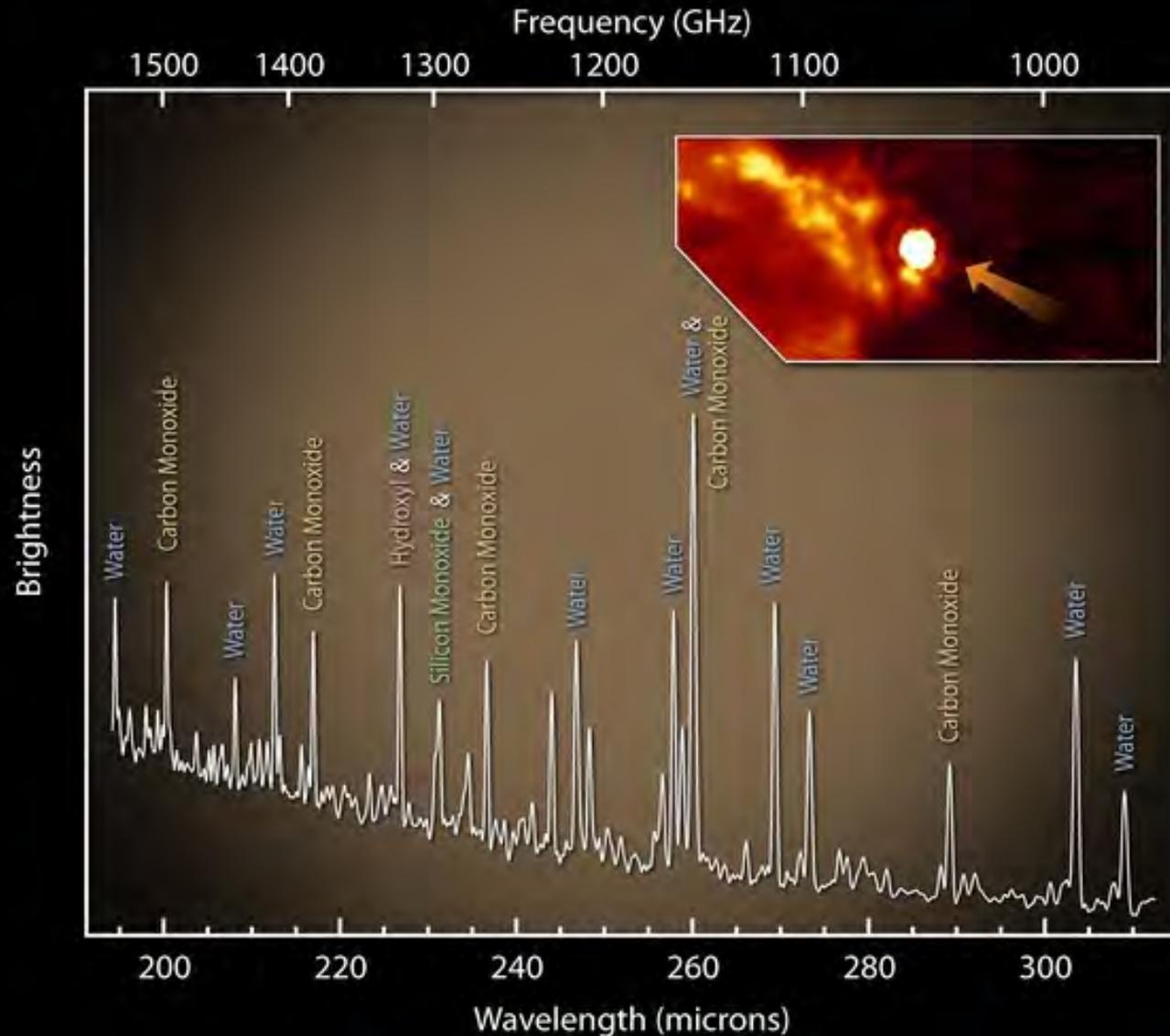


Messier 82

© ESA and the SPIRE consortium

# Herschel : L'étoiles VY Canis Majoris

La plus grosse étoile connue (2600 rayons solaires)



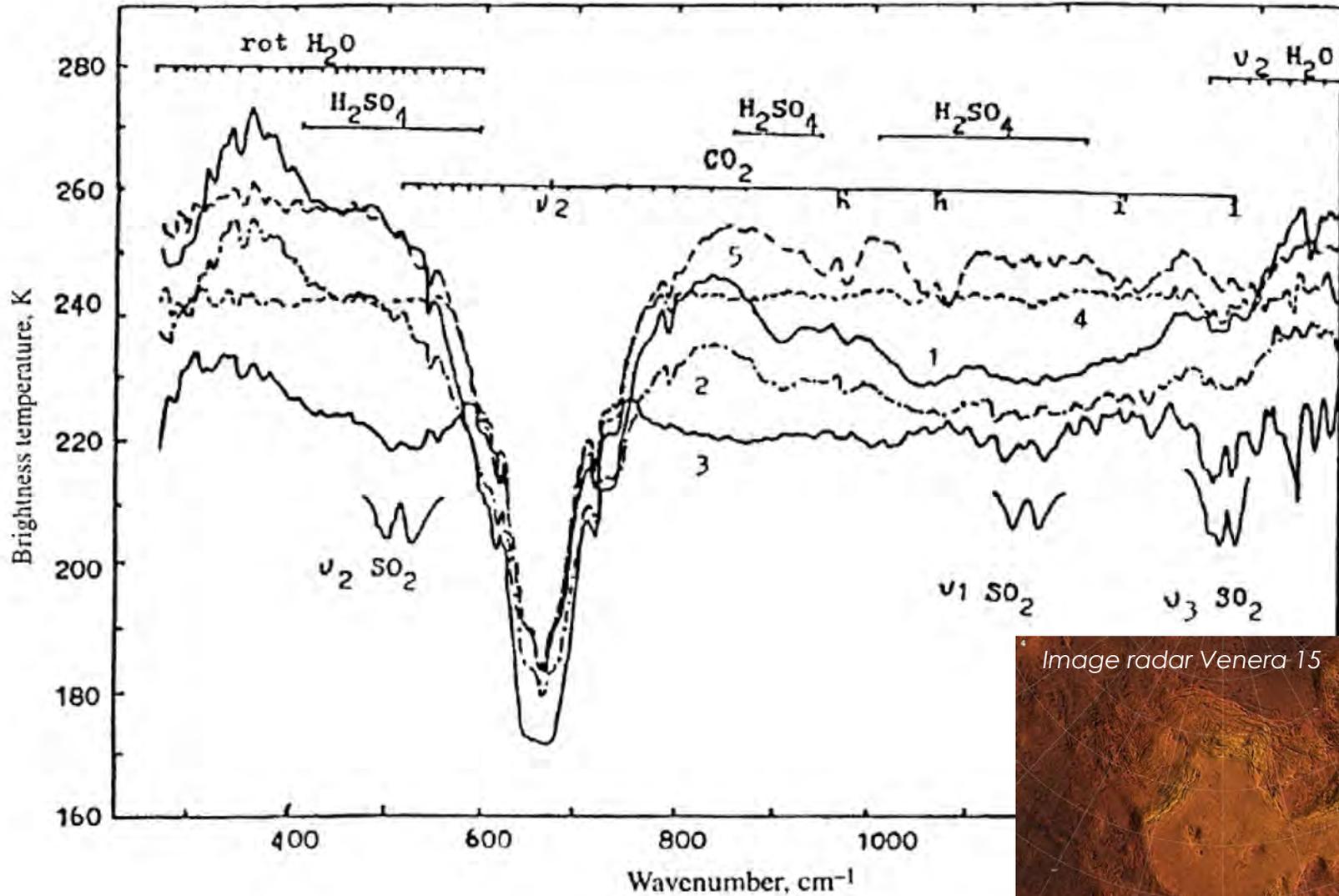


# Atmosphères du Système Solaire

Quelques exemples de spectres par Transformée de Fourier

# Spectre de Vénus

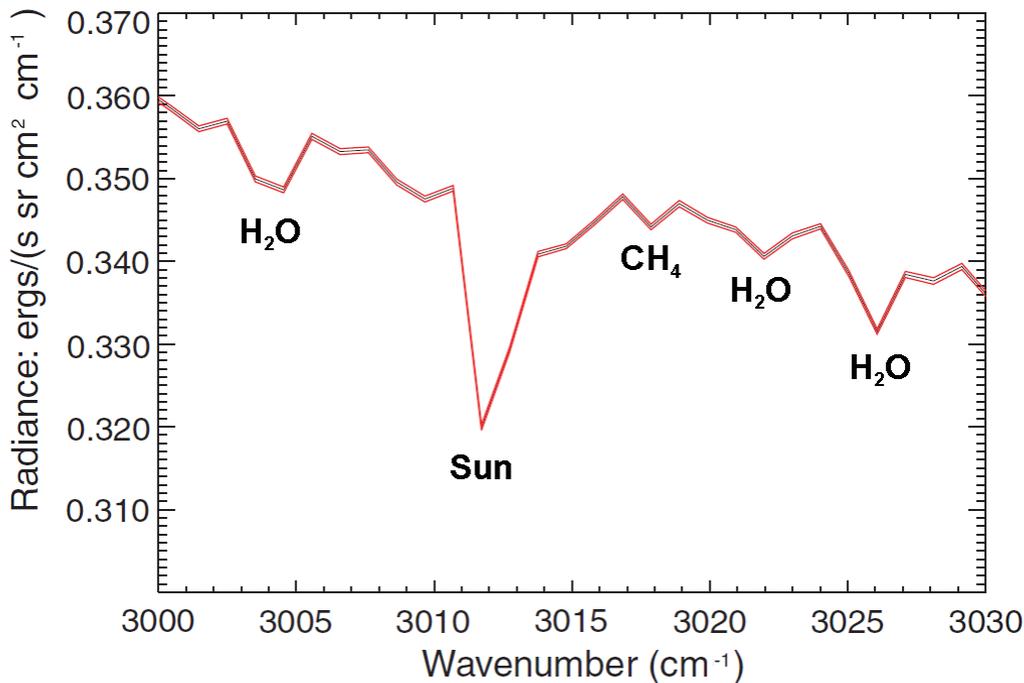
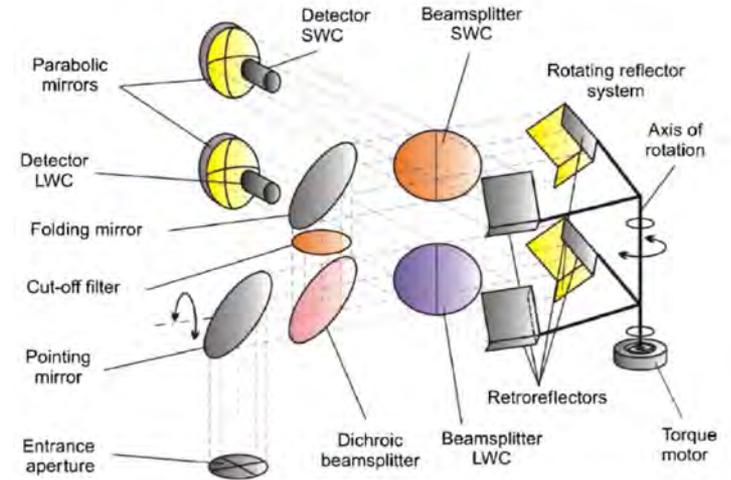
Spectres par transformée de la sonde Venera 15, en 1983



# Spectres de Mars

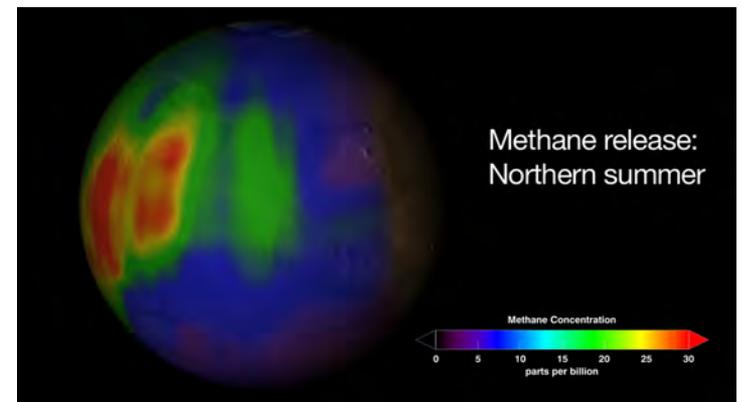
Schéma du spectromètre PFS de Mars Express.

La différence de marche est générée par des miroirs rotatifs.



Première détection du méthane (CH<sub>4</sub>) avec PFS

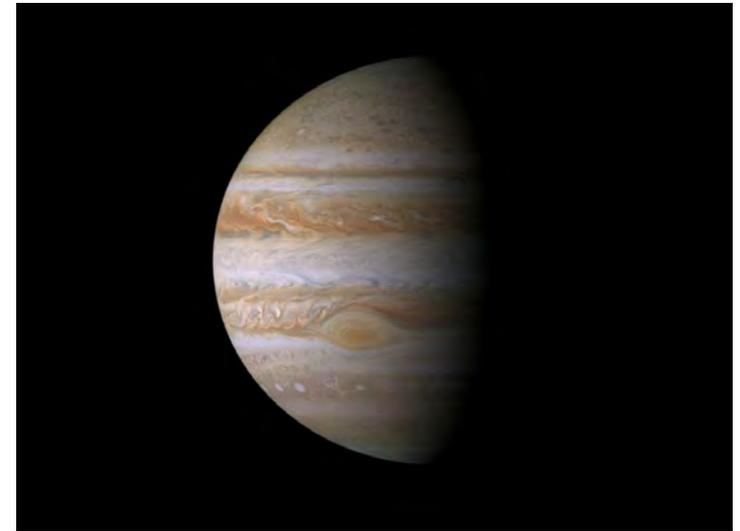
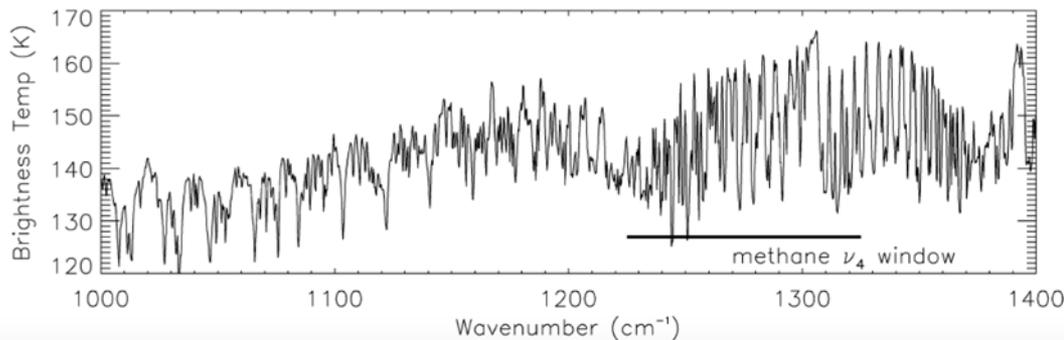
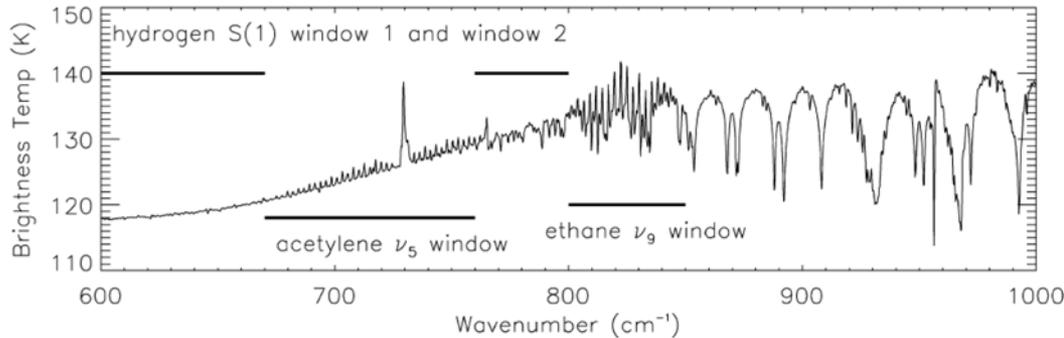
Source : Formisano et al.



Source : ESA

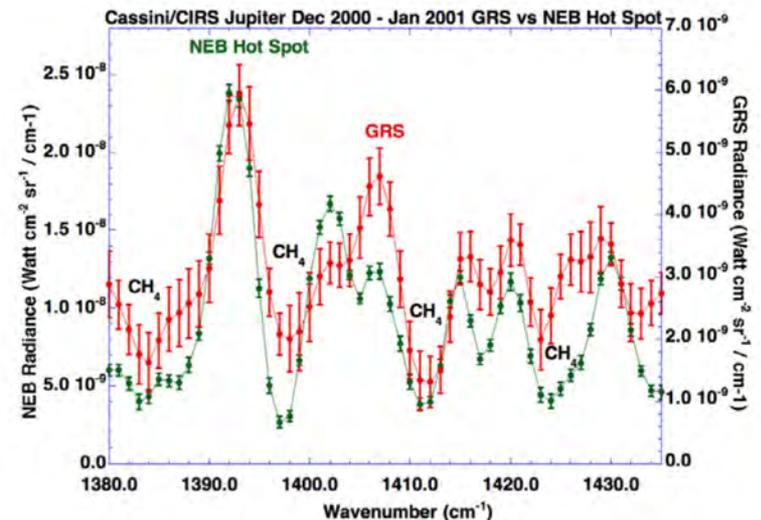
# Spectre CIRS de Jupiter

En décembre 2000, Cassini a survolé Jupiter et enregistré des spectres.



Les spectres enregistrés dans différentes régions permettent de comparer leur composition.

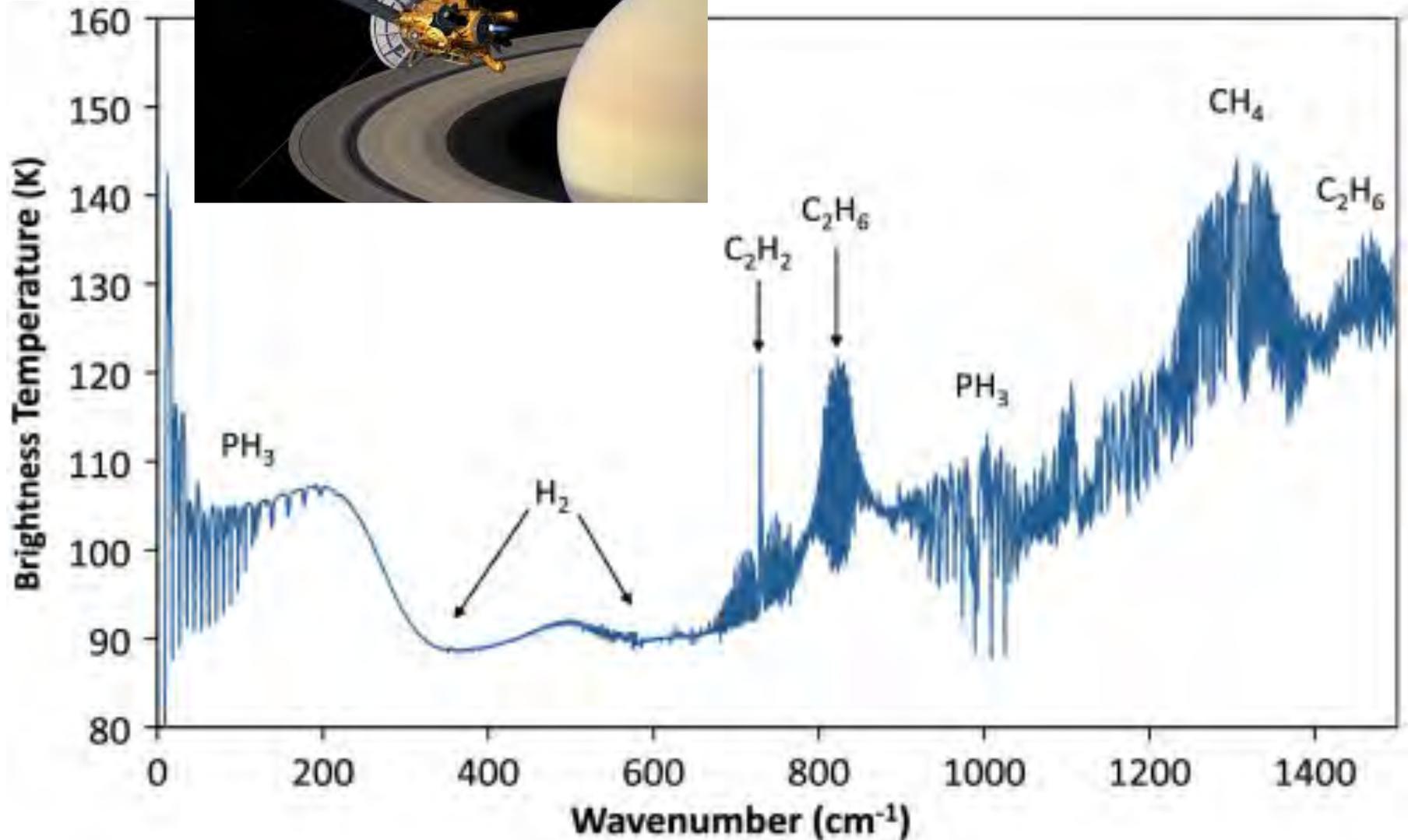
A droite : la Grande Tache Rouge et un point chaud.



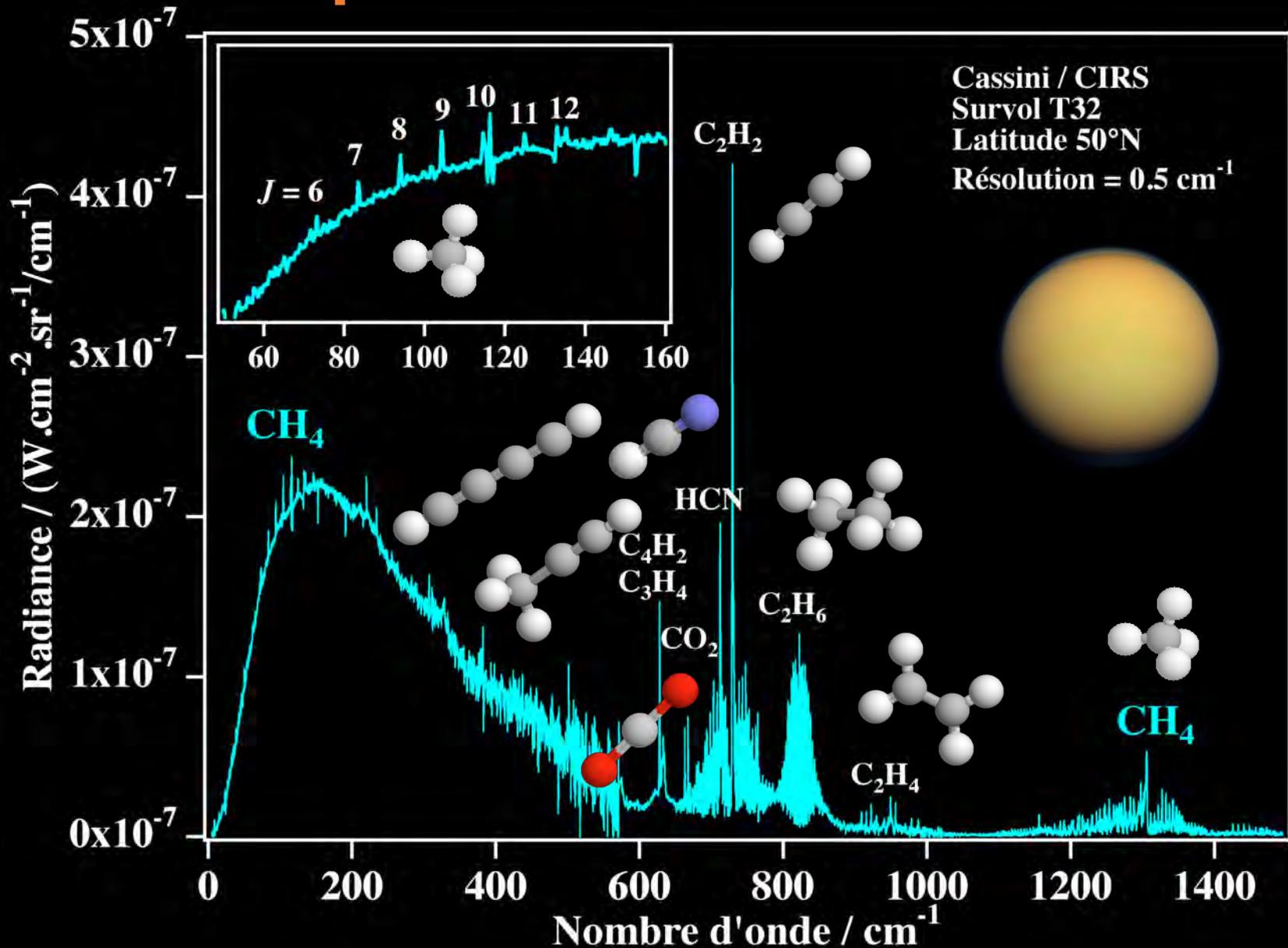
# Spectre CIRS de Saturne



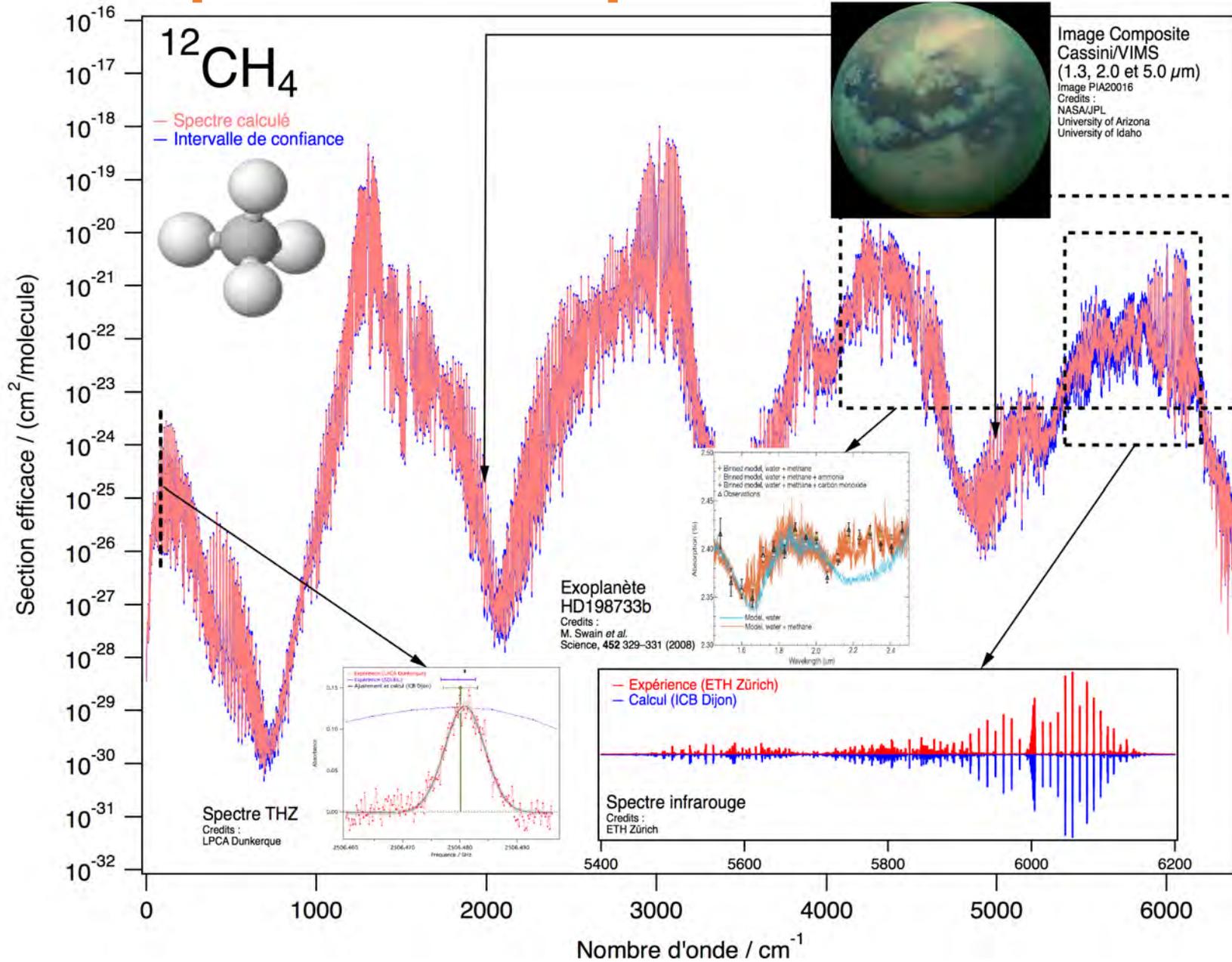
Spectre et image : NASA



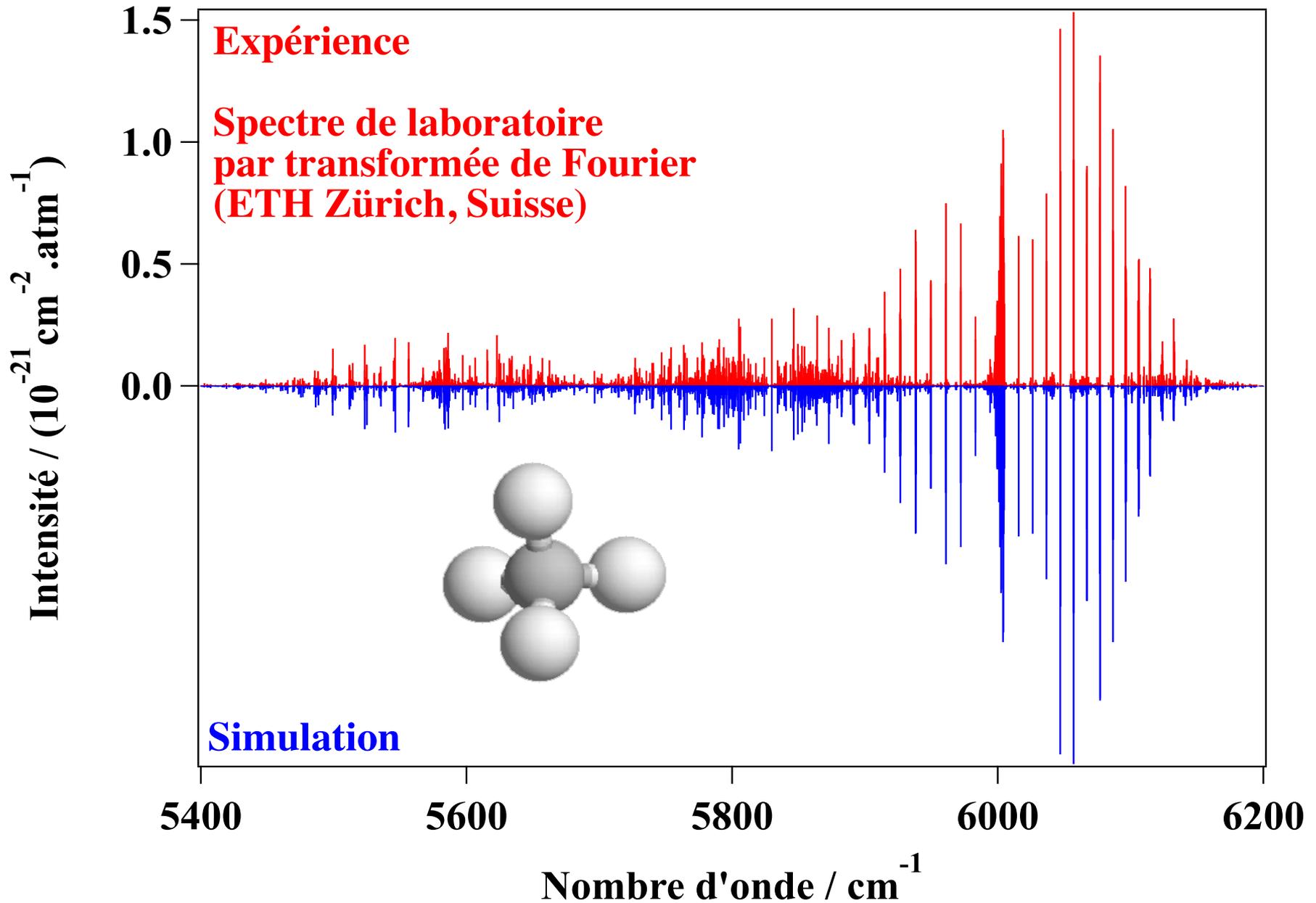
# Spectre CIRS de Titan



# Le spectre complexe du méthane



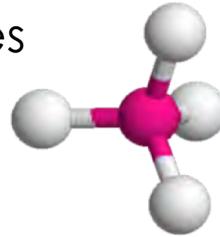
# Le méthane : expérience et simulation



# Le germane : expérience et observation

Le germane ( $\text{GeH}_4$ ) est présent dans l'atmosphère des planètes géantes Jupiter et Saturne.

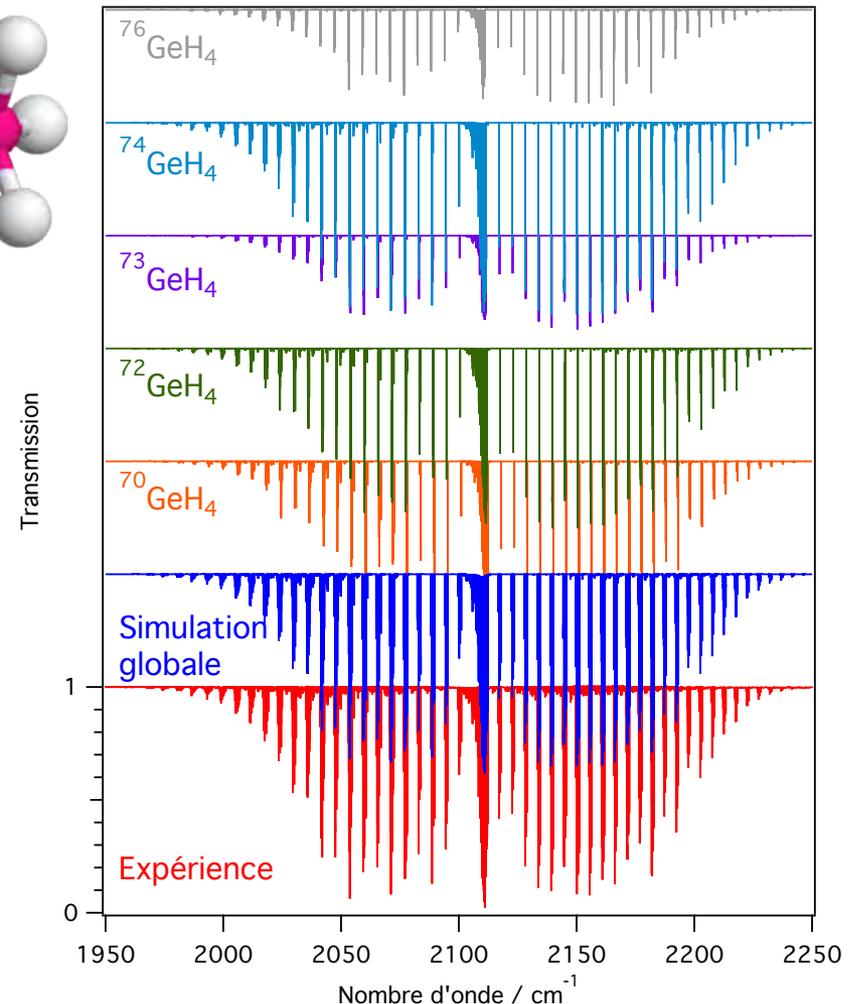
Il contribue au bilan radiatif des ces atmosphères. Il est donc nécessaire de bien modéliser son spectre d'absorption.



Spectre de laboratoire par transformée de Fourier (LISA, Créteil) et simulation (ICB, Dijon).



La mission Juno (NASA, 2016–...)  
Vue d'artiste : NASA



An artistic rendering of an exoplanetary system. A large, bright orange star is in the upper left corner. Several planets of various colors (yellow, blue, green) are shown in elliptical orbits around the star. The background is dark with scattered dust and small celestial bodies.

# Détecter les exoplanètes

Histoires de périodes

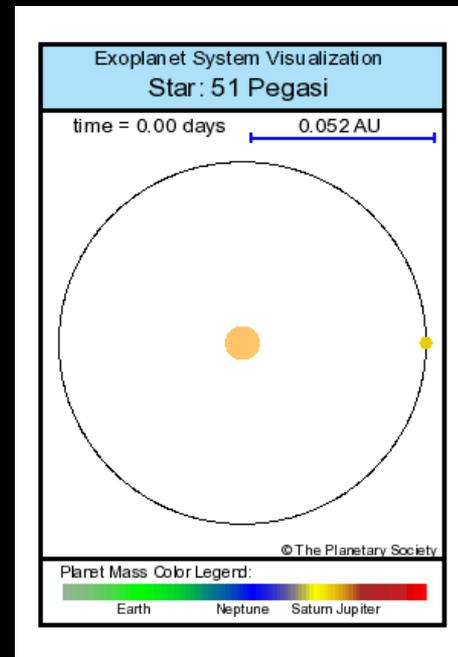
# Les exoplanètes

**1990** : Aleksander Wolszczan découvre les premières planètes extrasolaires autour du pulsar PSR B1257+12 à l'aide du radiotélescope d'Arecibo (Porto-Rico).

**1995** : Michel Mayor et Didier Queloz (Observatoire de Genève) découvrent à l'observatoire de Haute-Provence la première exoplanète autour d'une étoile, 51 Pegasi, par la méthode des vitesses radiales.



*D. Queloz, M. Mayor*



On connaît aujourd'hui près de 4000 exoplanètes.

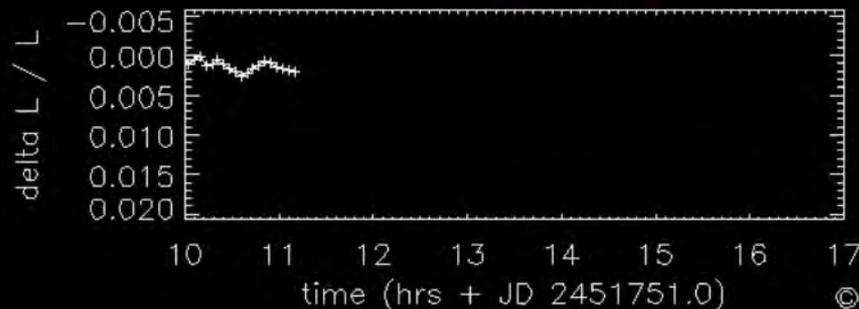
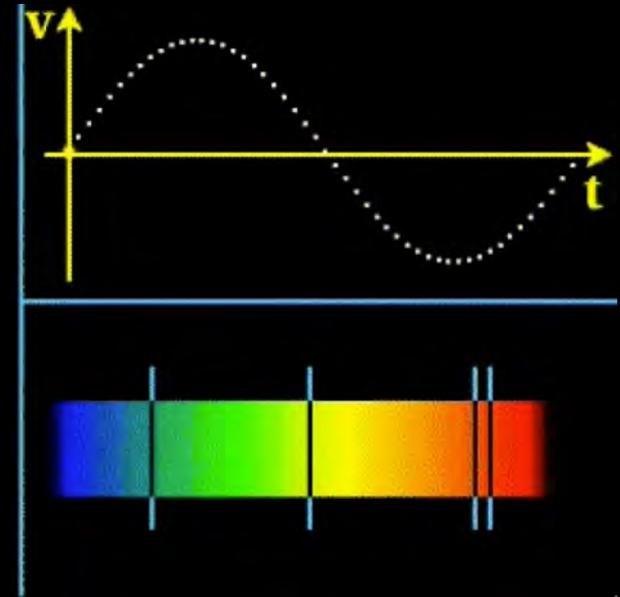
De nouveaux instruments et satellites vont encore augmenter ce nombre.

# Vitesse radiales et transits

## Les 2 méthodes principales de détection des exoplanètes

La présence d'une planète fait bouger l'étoile.

On détecte la variation de la vitesse radiale de celle-ci dans son spectre via l'effet Doppler.



Si la planète passe devant son étoile (transit), la luminosité de celle-ci diminue.

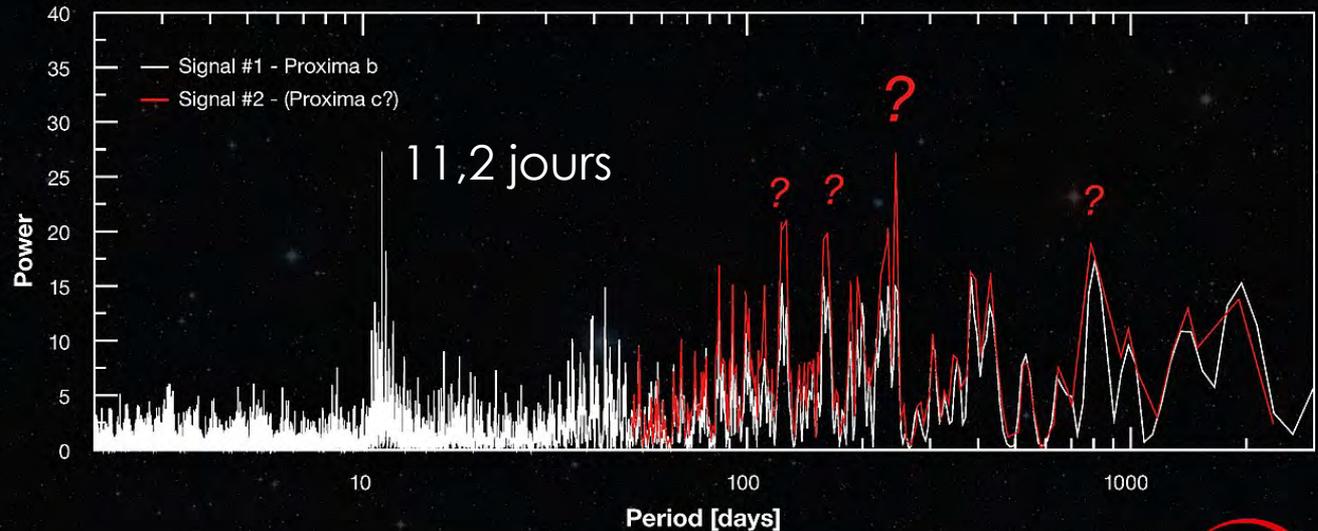
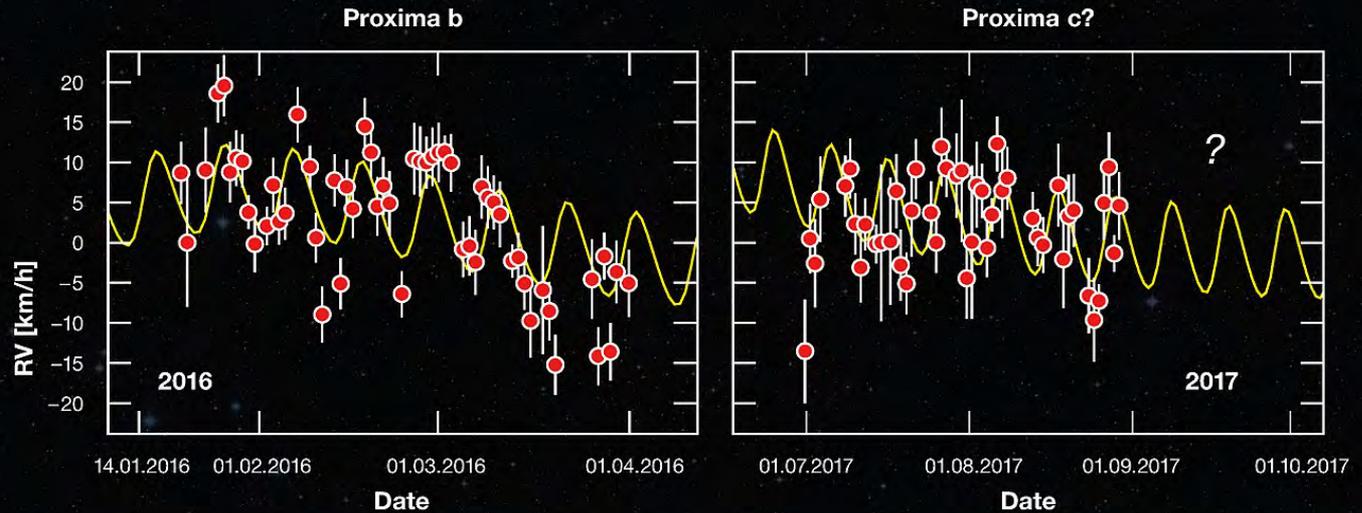
Dans les deux cas, on a un signal temporel périodique. La transformée de Fourier permet d'en extraire la ou les périodes.

# Le périodogramme

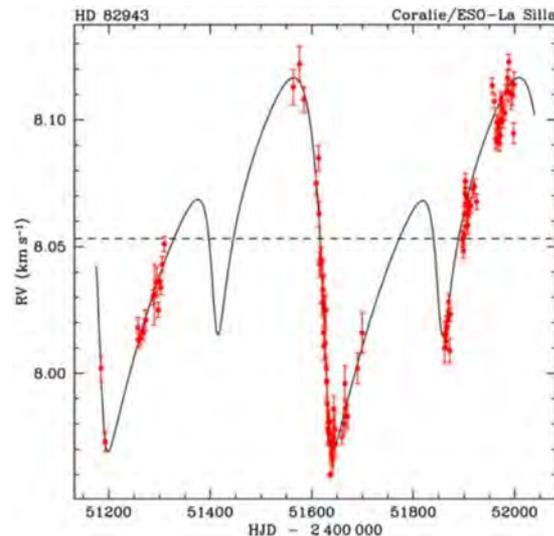
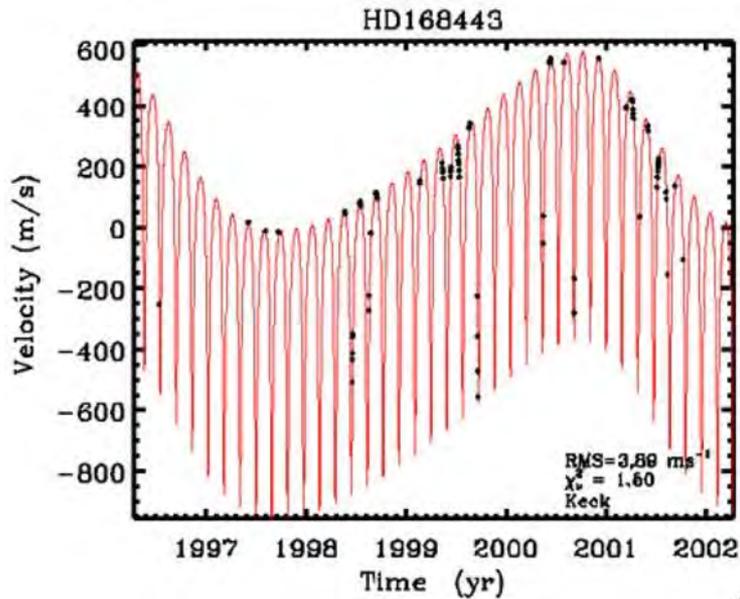
La transformée de Fourier des données de vitesse radiale donne la période de la ou des planètes présentes.

Ici l'exemple de **Proxima b**.

La présence d'une éventuelle seconde planète, Proxima c n'est pas encore claire.



# Systemes multiples – périodes multiples

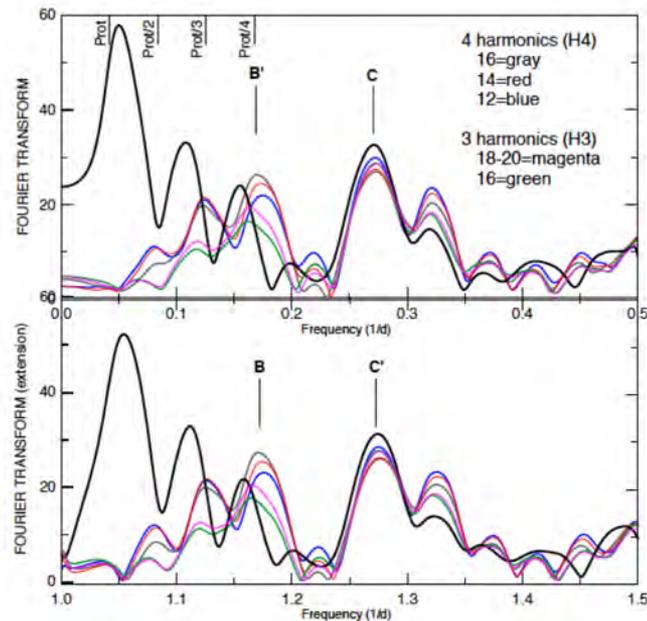


La courbe de vitesse pour l'étoile HR 82943 montre deux exoplanètes avec des orbites non circulaires.

Source : Observatoire de Genève

La courbe de vitesse radiale de l'étoile HD 168443 présente deux composantes, dues à deux compagnons planétaires. Les orbites des deux planètes détectées autour de HD 168443 ont des périodes d'ordres de grandeur bien distincts et une excentricité élevée.

Source : Butler et Marcy



Transformée de Fourier des données de transit de CoRoT-7, montrant la présence de deux planètes.

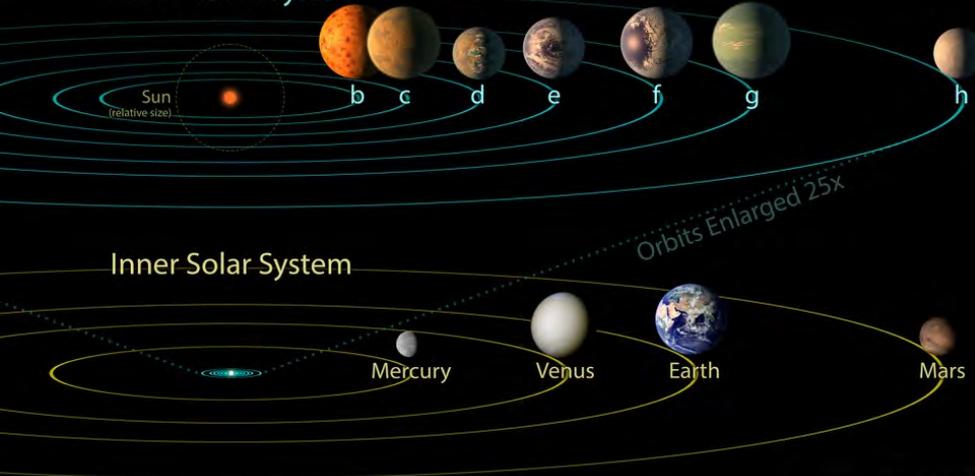
Source : S. Ferraz-Mello et al.

# Trappist-1 : 7 planètes

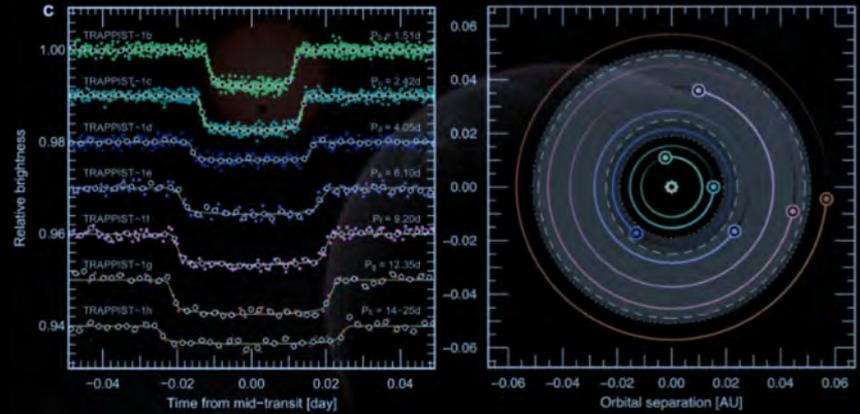
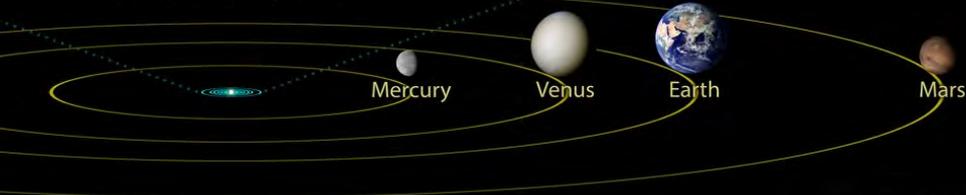
## Jupiter & Major Moons



## TRAPPIST-1 System

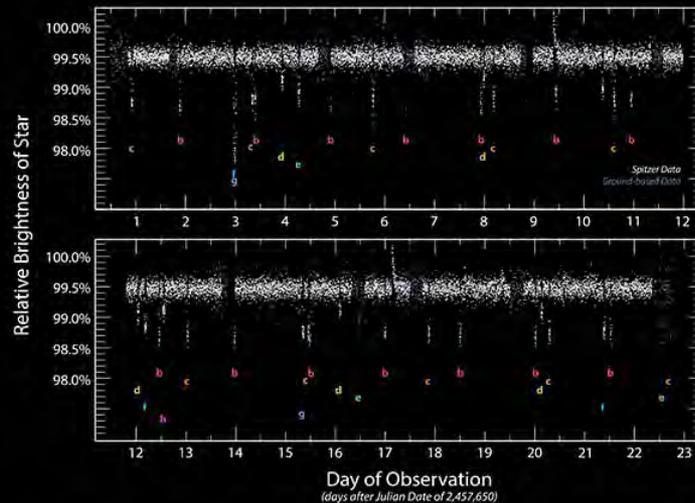


## Inner Solar System



Un système compact de 7 planètes telluriques, en orbite autour d'une naine rouge, à 40 al.

b, c, d, e, f, g et h sont en résonance 24:15:9:6:4:3:2.



Orbits of the TRAPPIST-1 Planets



# Les résonances de Trappist-1

- Une note de piano à chaque transit de planète
- Un battement de tambour à chaque conjonction

# La première lumière de l'Univers

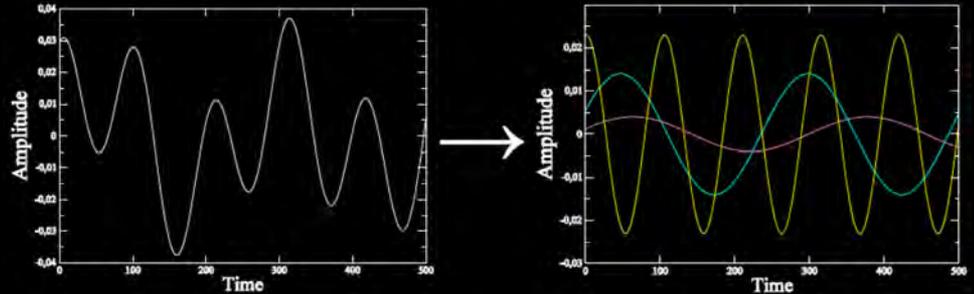
Fourier généralisé à deux dimensions

# Fourier généralisé !

- Une dimension : série (et transformée) de Fourier



$$f(x) = \sum_k a_k e^{ikx}$$

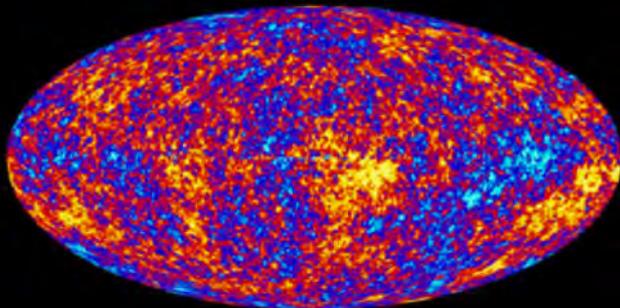


Spectre de puissance :  $P(k) = |a_k|^2$

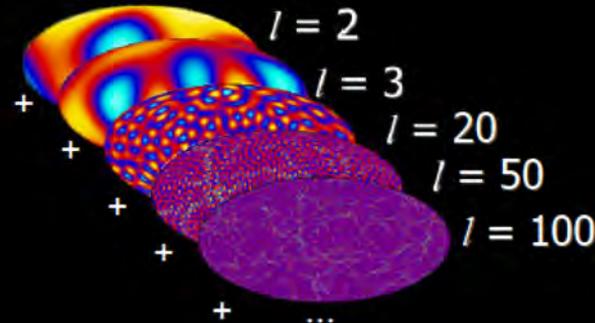
- Deux dimensions (sur une sphère) : harmoniques sphériques

$$F(\theta, \varphi) = \sum_{l=0}^{l_{\max}} \sum_{m=-l}^l a_{lm} Y_m^{(l)}(\theta, \varphi)$$

Spectre de puissance :  $C_l = \sum_{m=-l}^l |a_{lm}|^2$



=



# Libérez les photons !

Après le Big Bang, le jeune Univers est très chaud. C'est un plasma opaque.

Après 380 000 ans, il se refroidit suffisamment pour que les électrons se lient aux noyaux et que la lumière circule librement.



*R. Wilson, A. Penzias*

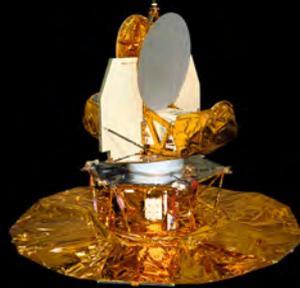
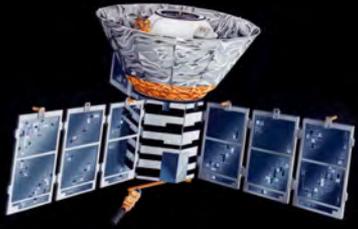
Cette première lumière est encore observée aujourd'hui en **micro-ondes** : c'est le **fond diffus cosmologique**.

Il est prédit par la théorie du Big-Bang.

Il fut détecté (par hasard) par **A. Penzias et R. Wilson** en 1965 (prix Nobel de Physique 1978).

Sa cartographie est très riche d'enseignements sur l'histoire de l'Univers ...

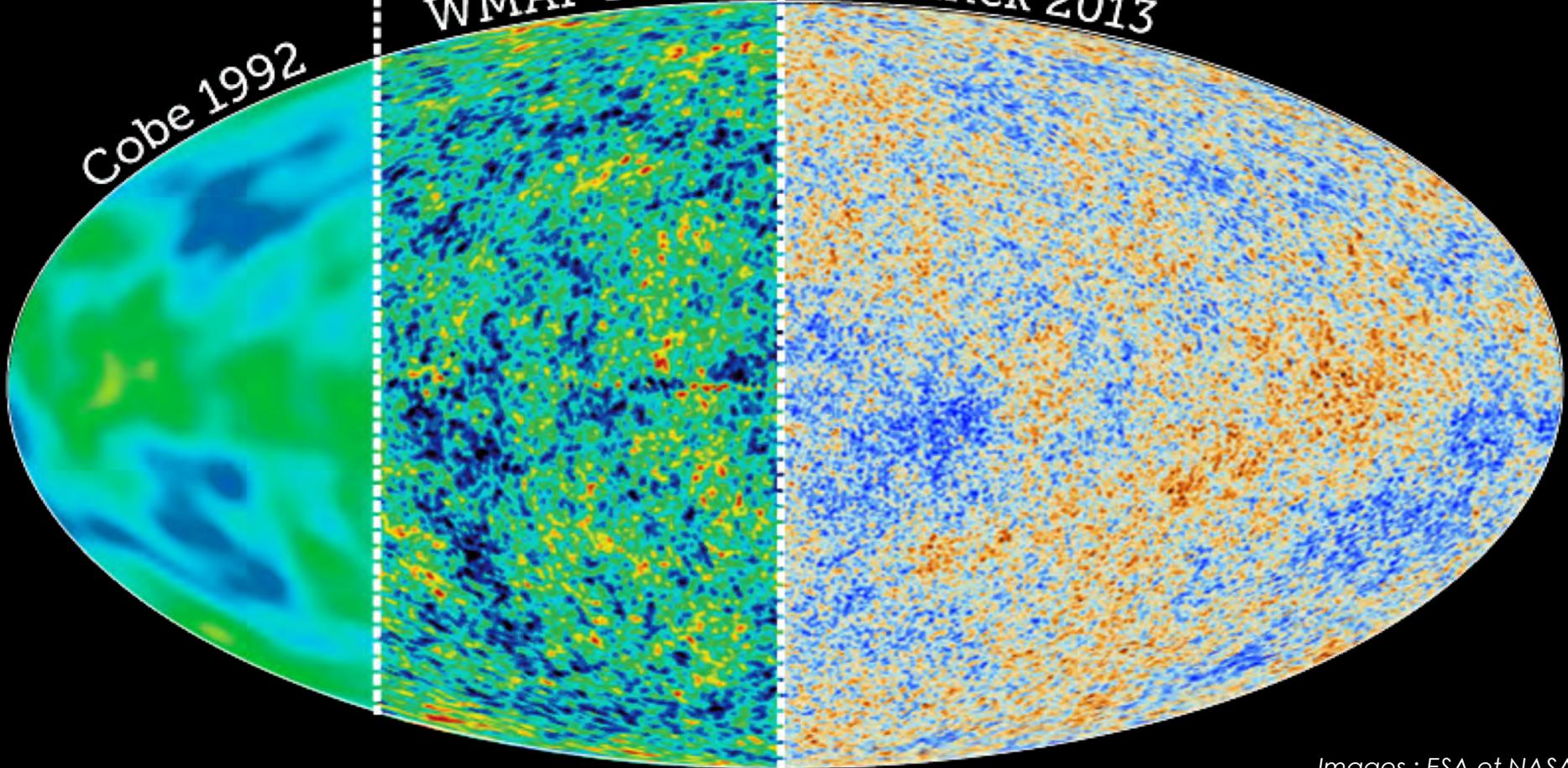
# COBE, WMAP, Planck : révélation progressive



Cobe 1992

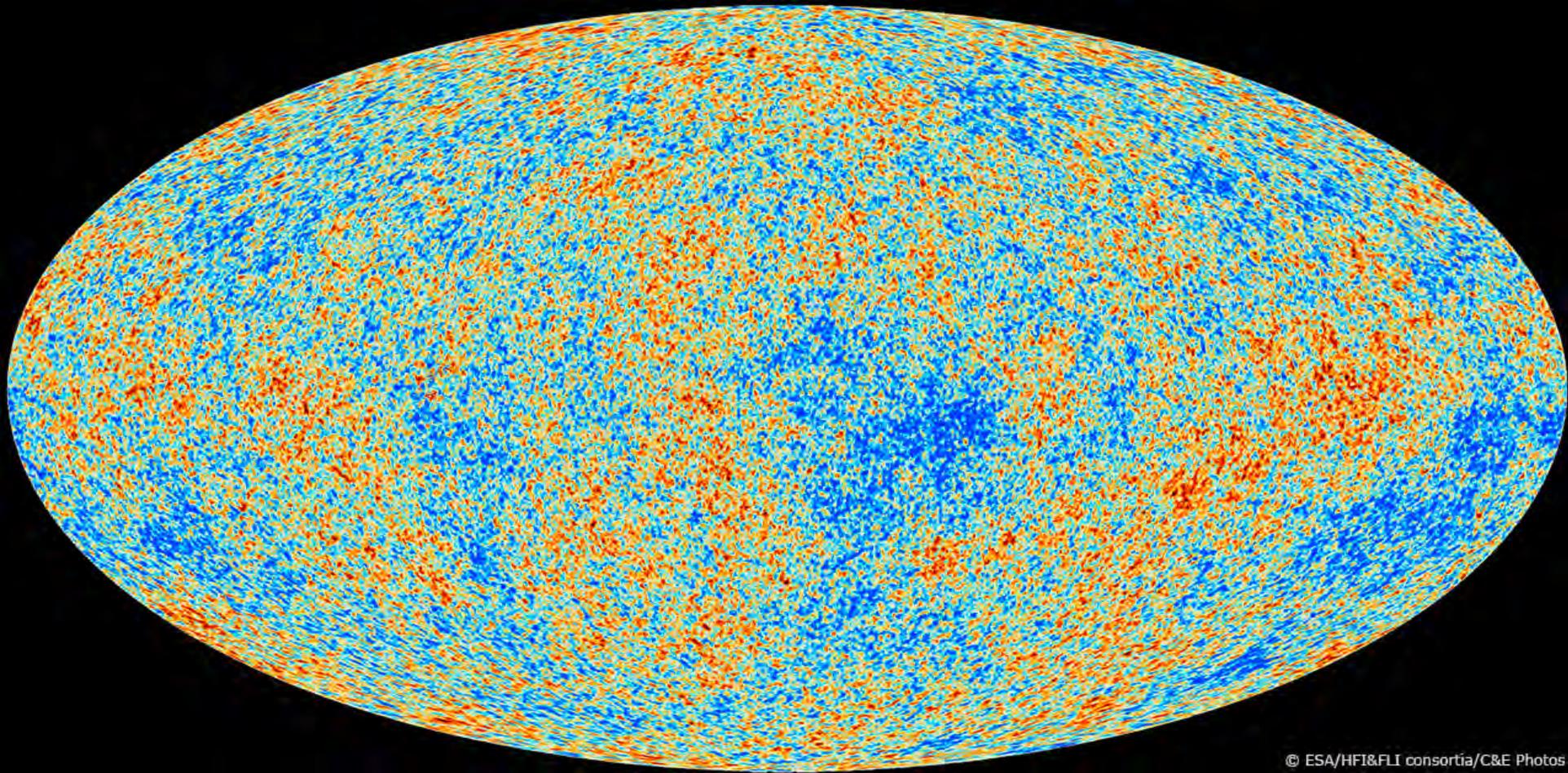
WMAP 2003

Planck 2013



# La carte de Planck

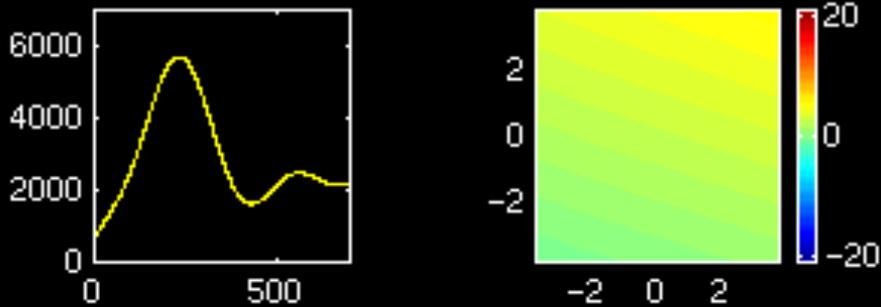
(21 mars 2013)



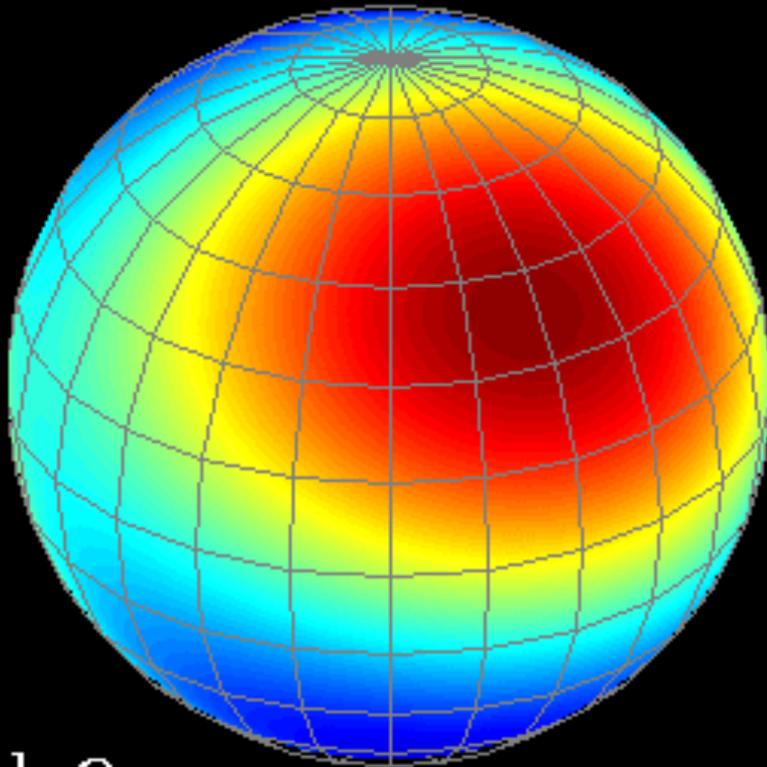
© ESA/HFI&FLI consortia/C&E Photos

Image : Planck / ESA

# Le spectre de puissance



## Décomposition en série d'harmoniques sphériques sur l'ensemble du ciel



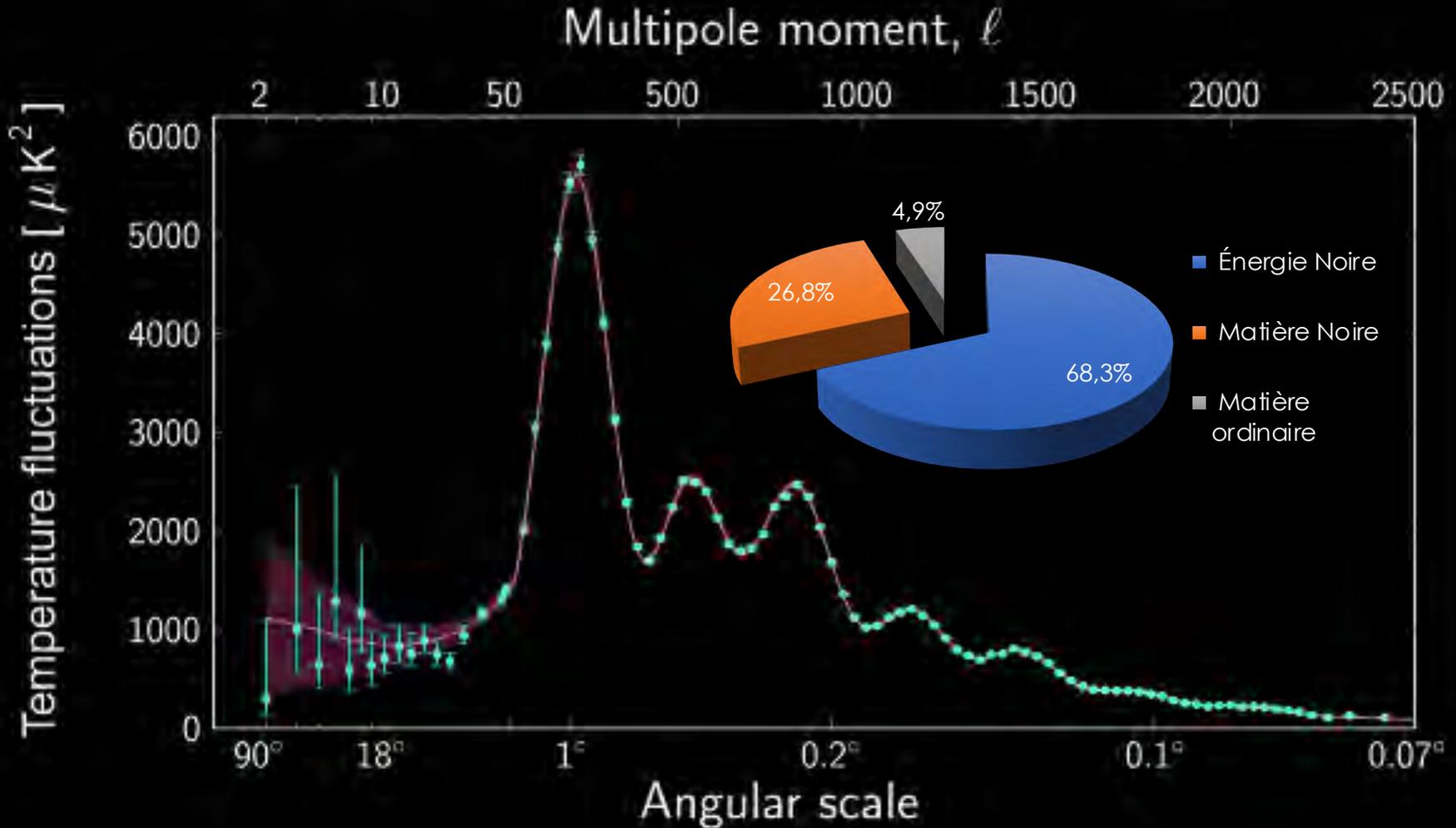
$l=2$

L'étude statistique de ces fluctuations en fonction de l'échelle (le « spectre de puissance ») permet également de tirer des enseignements importants :

- Mesurer la courbure de l'Univers.
- Détecter des ondes acoustiques liées à l'inflation.
- ...

# Les fluctuations selon Planck

Les modèles reproduisent parfaitement les données de Planck (en particulier aux petites échelles) et permettent de préciser les paramètres décrivant l'Univers.

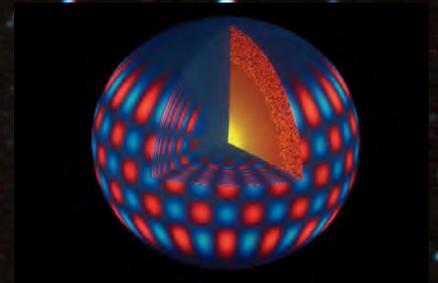


# Fourier est partout !

- Décomposition en ondelettes : traitement d'images
- Sismologie solaire et stellaire ...
- Et bien plus encore !



Image : V. Boudon / SAB



Source : NOAO

**Merci de votre attention !**