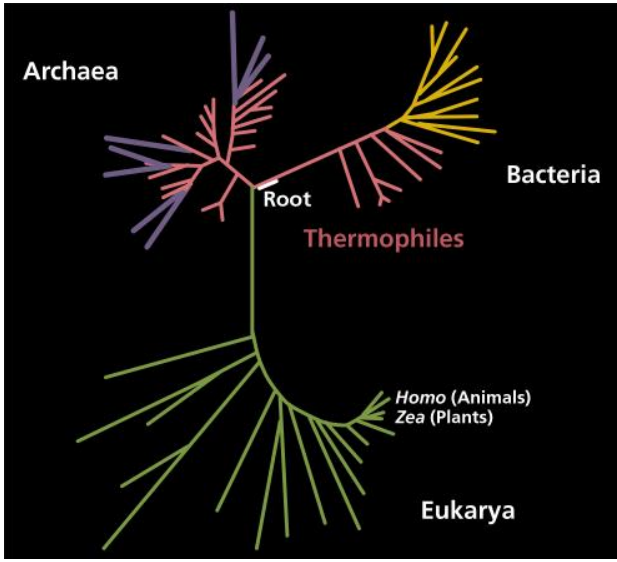
# Exobiologie



Sébastien Rodriguez

Université Paris 7 / A.I.M.

sebastien.rodriguez@cea.fr

# Les exo-planètes

# Existe-t-il d'autres planètes dans l'Univers ?

## REMARQUES HISTORIQUES

Cette question apparaît après
la révolution Copernicienne
(Système Héliocentrique, publié dans
*De revolutionibus 1551)*

Dans l'histoire Occidentale , le premier qui parle de la *Pluralité des Mondes* est le prêtre dominicain italien **Giordano Bruno**, disciple de Copernic, qui publie en 1584 :

« *De l'infini, de l'Univers, et des Mondes* »

Où il explique que les étoiles sont des Soleils semblables au nôtre, entourés de planètes semblables à la Terre…

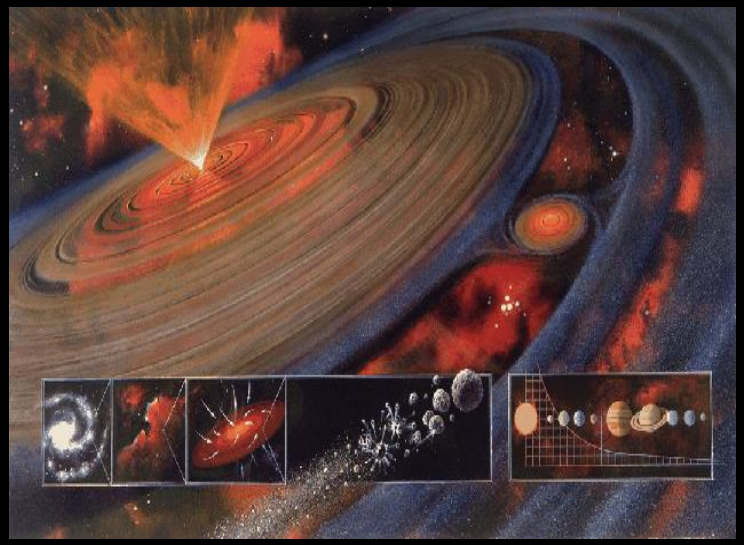
=> Giordano Bruno est brûlé vif par l'église en 1600…

Depuis cette époque, la question « traîne » dans les milieux scientifiques sans être réellement abordée scientifiquement.

CAR les outils , les connaissances, ne sont apparues qu'à partir de 1960 seulement

Remarque Epistémologiques :
La science ne peut répondre qu'aux questions qu'elle sait poser en termes scientifiques (exemples : le Big Bang, l'évolution des espèces etc..).

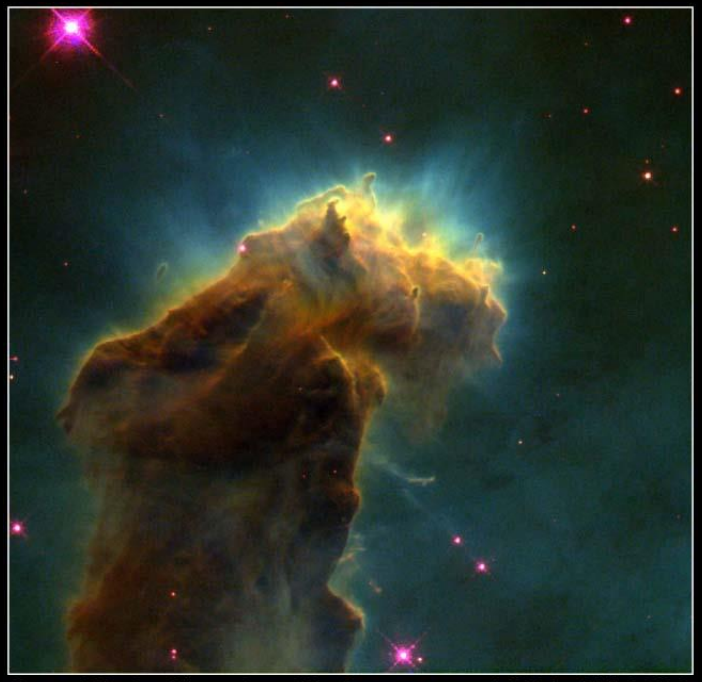
Il faut attendre la 2$^{ème}$ moitié du XX$^{éme}$ Siècle et les premiers travaux modernes sur la formation des planètes (Safronov puis Greenberg, Weidenschilling, Wetherill etc..) pour que la question revienne dans le cadre de la Science.



Dans le scénario « moderne » de formation des planètes ,

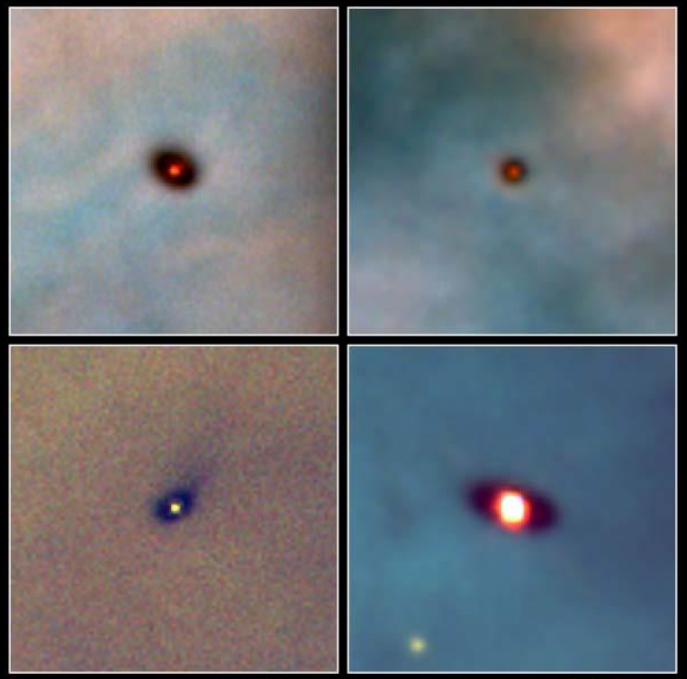
les planètes sont vues comme une conséquence naturelle de la formation des étoiles

=> Les planètes sont issues de la nébuleuse de gaz et de poussières environnant la jeune étoile.



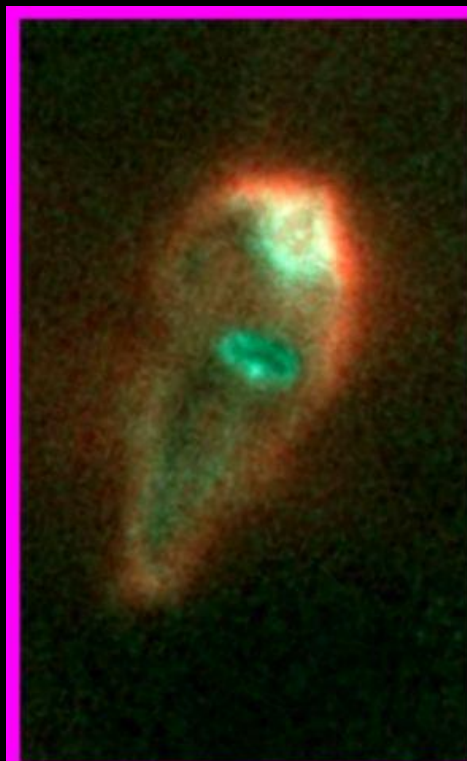
**Star-Birth Clouds · M16** HST · WFPC2

PRC95-44b · ST ScI OPO · November 2, 1995
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.), NASA



**Protoplanetary Disks Orion Nebula** HST · WFPC2

PRC95-45b · ST ScI OPO · November 20, 1995



Dans le cadre de ce scénario , d'autres planètes devraient exister… et même en très grand nombre !!

Exemple : ~ 100 milliards d'étoiles dans notre Galaxie ….

Ainsi , depuis les années 80, la communauté scientifique pense majoritairement que d'autres planètes devraient exister … ailleurs… sans risques de se faire brûler comme Giordano Bruno.

Les recherches commencent alors à cette époque…

Mais elle est EXTRAORDINAIREMENT difficile !!

# Comment détecter des planètes autour d'autres étoiles ?

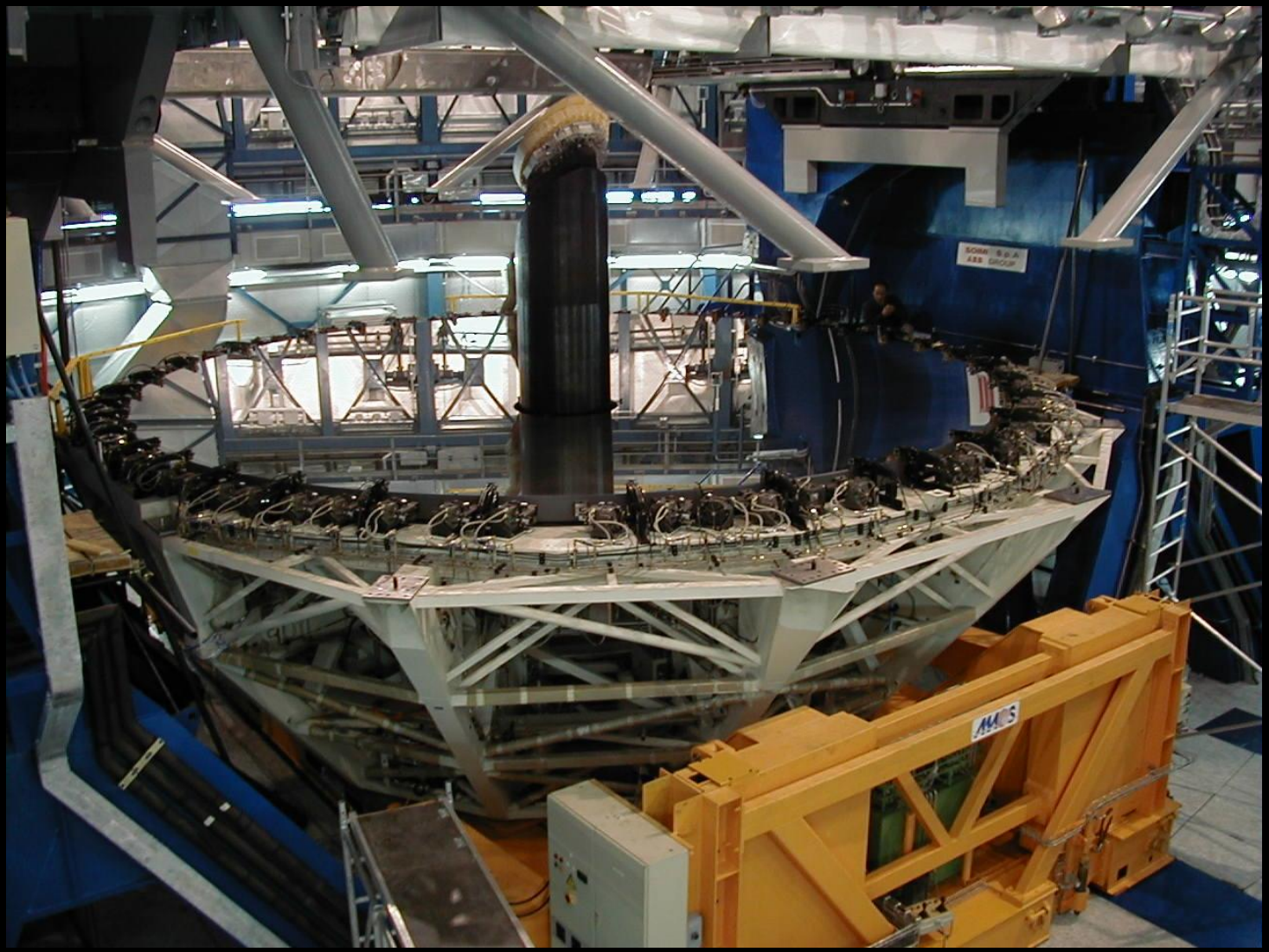
Le problème:

Essayons d'observer
une planète EXTRASOLAIRE

avec un grand télescope
moderne

V.L.T (Chili)

Un télescope est avant tout un *miroir* grossissant

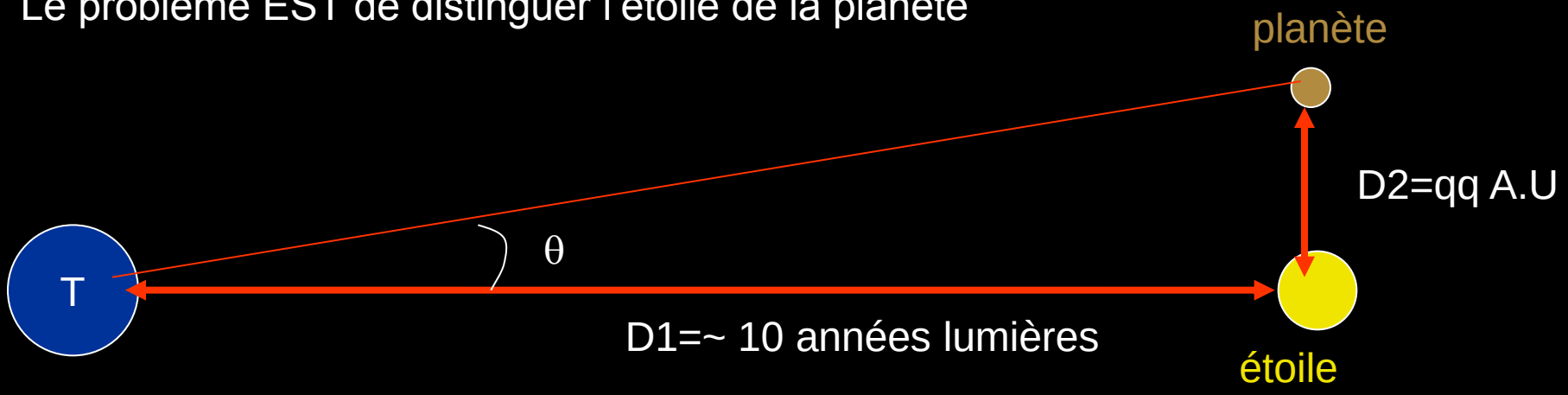


Miroir du VLT

8,2 m de diamètre !!

(~ 50 tonnes)

Le problème EST de distinguer l'étoile de la planète




D1= distance Terre-Etoile ~ Quelques parsecs (1 parsec= 3.3 A.L.)
=> 10 AL ~ 3 $10^{14}$ Km

D2= distance Etoile-Planète ~ quelques Unités Astronomiques
=> 2 AU ~ 3. $10^{8}$ Km

θ= Ecart angulaire dans le ciel entre l'étoile et la planète

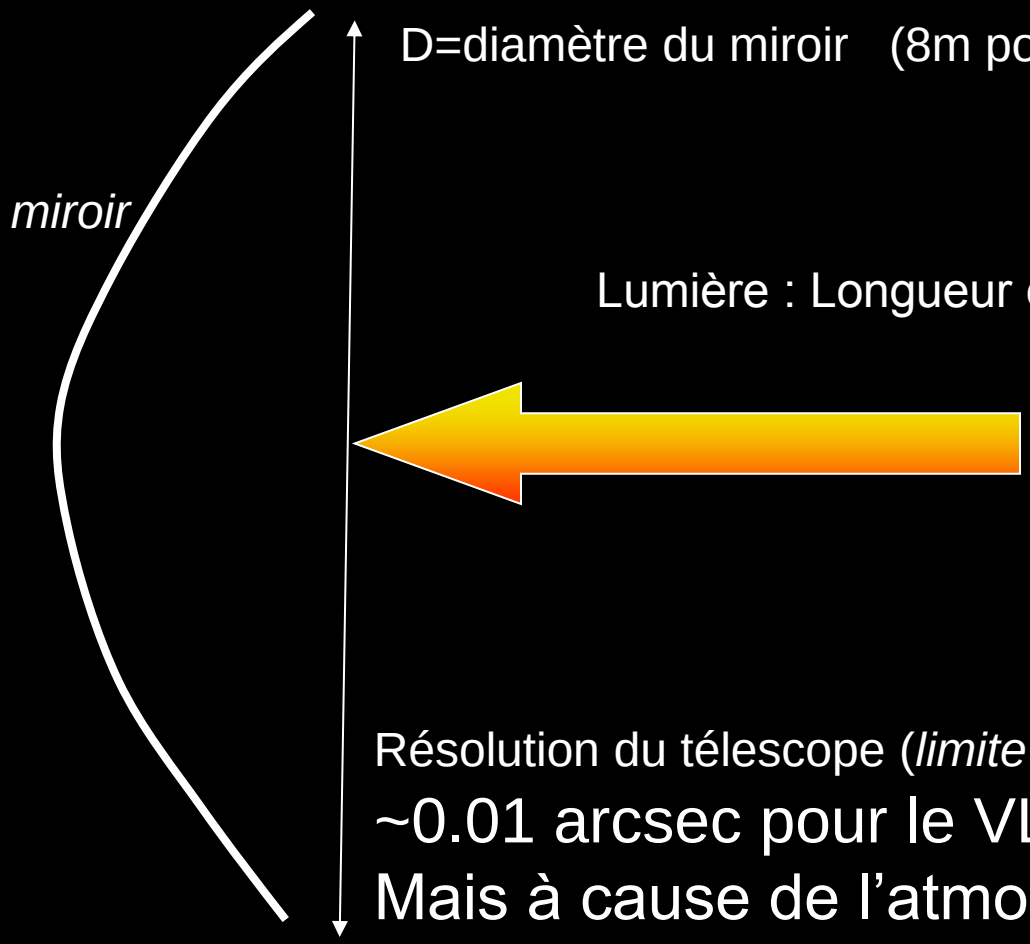
θ= D2/D1 ~ 6 $10^{-7}$ deg = 0.002 arcsec
(1 arcsec = 1/3600 degré)

Donc pour distinguer une étoile d'une planète il faut une résolution angulaire de l'ordre du *millième de seconde d'arc*

Grands télescope actuels : de l'ordre de 0.1 seconde d'arc [problème de turbulence Atmosphérique (100 fois trop grand)

Remarque :
0.1 seconde d'arc ~ Une pièce de 10 centimes vue à 10 km !!!

# RESOLUTION D'UN TELESCOPE




D=diamètre du miroir (8m pour les plus grands)

Lumière : Longueur d'onde $\lambda$ ~ 500 nm

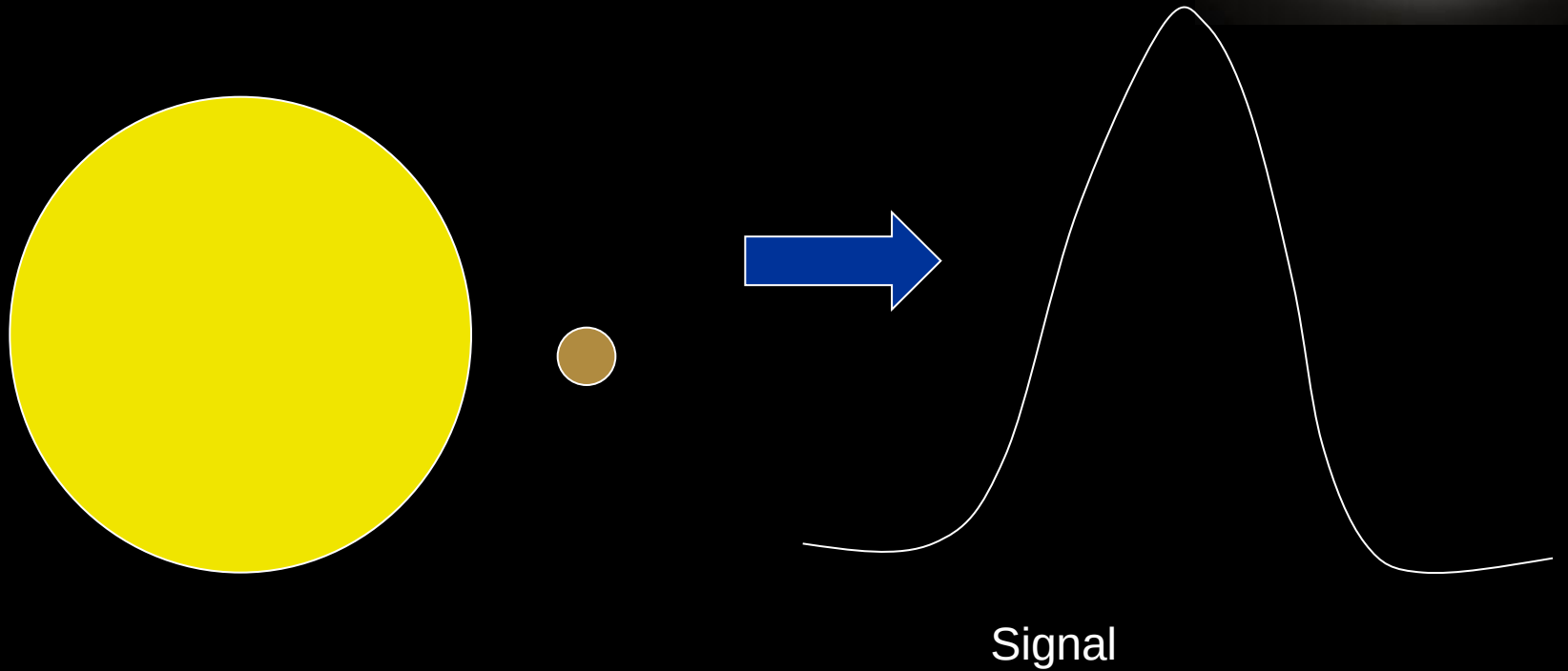
Résolution du télescope (*limite de diffraction*) ~ $\lambda/D$

~0.01 arcsec pour le VLT (10x trop grand)

Mais à cause de l'atmosphère : 0.1 Arcsec (Seeing)

Autre problème : Brillance trop faible de la planète / étoile.

BRUIT DE PHOTON



Signal

Bruit ~ $(N)^{1/2}$ >> signal de la planète  => la planète est très difficilement détectable

Donc la méthode d'observation directe n'est pas adaptée ou très difficile à mettre en place.

Il faut imaginer d'autres techniques dites *indirectes*

=>

Inférer la présence d'une planète autour d'une étoile à partir de conséquences indirectes.

4 grandes méthodes

- Les vitesses radiales
- Les transits
- Les microlentilles gravitationnelles
- chronométrage

# Principes des différentes méthodes:

## Vitesses radiales

Détecter le mouvement de l'étoile perturbé par la présence d'une planète (massive et proche) en orbite

## Transits

Détecter la diminution de luminosité de l'étoile quand une planète passe devant

## Microlentilles gravitationnelles

Effet de relativité générale par lequel la brillance d'une étoile de champ augmente temporairement quand une étoile accompagnée d'une planète passe dans la ligne de visée.

# La méthode des vitesses radiales

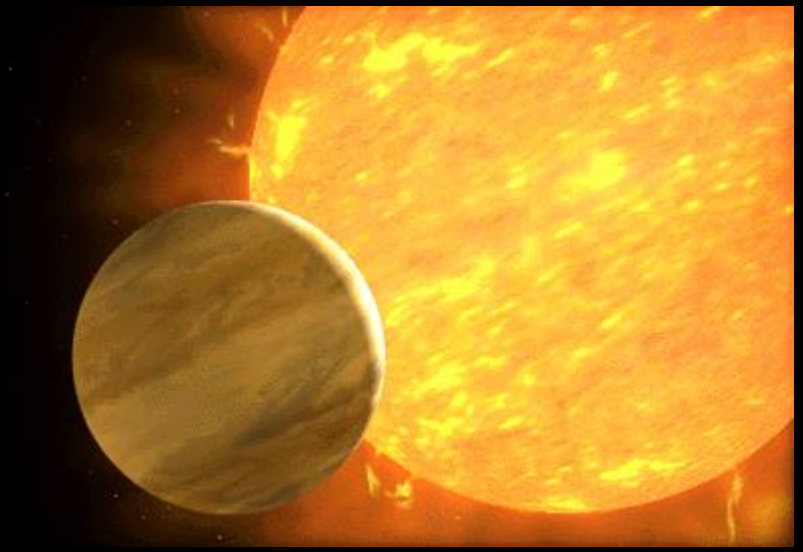
Méthode la plus courante aujourd'hui.

Premier succès en 1995 :

Détection de la première planète extrasolaire autour de l'étoile 51 Pégase

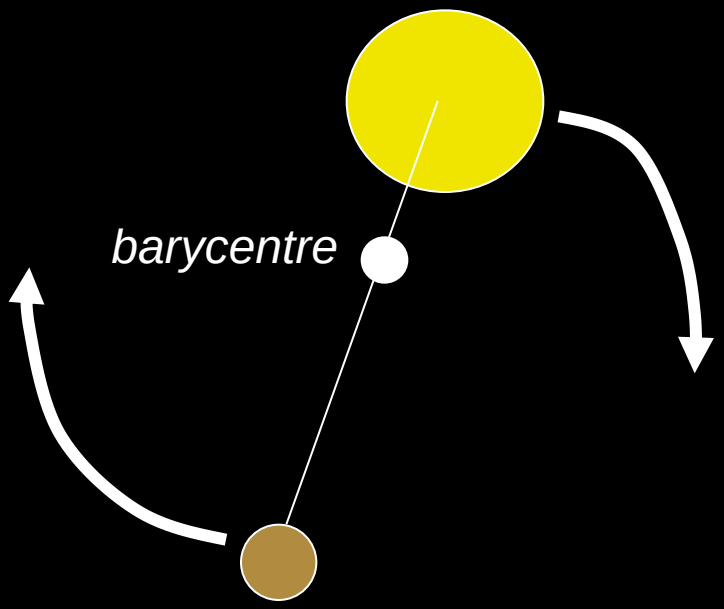
Par les astronomes suisses Michel Mayor & Didier Queloz

En 2005 : Plus de 200 planètes extrasolaires détectées par cette technique !!!

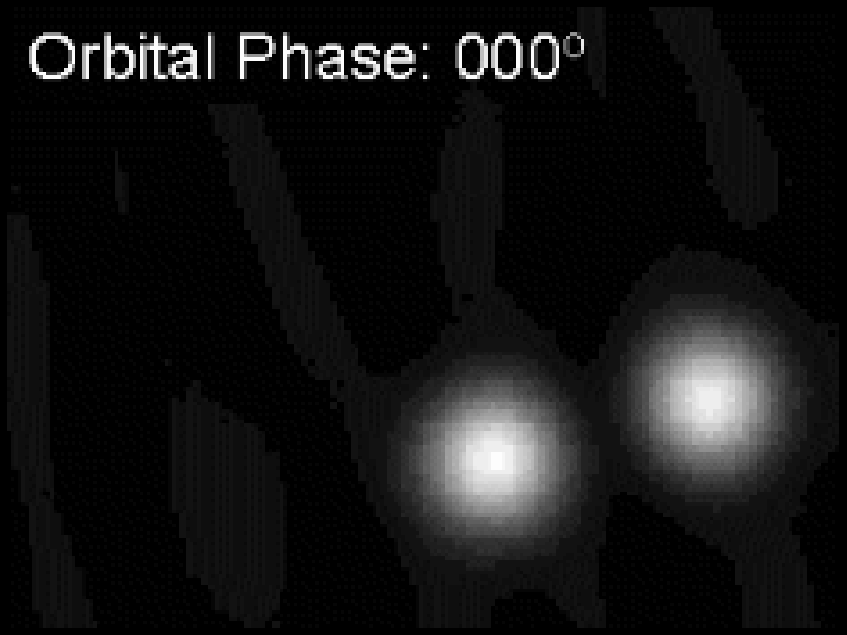


*Vue d'artiste de 51 Pégase*

Mayor & Queloz

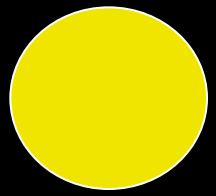



Les lois de la mécanique
nous enseignent que seul
la barycentre est fixe dans le ciel
(Point imaginaire)

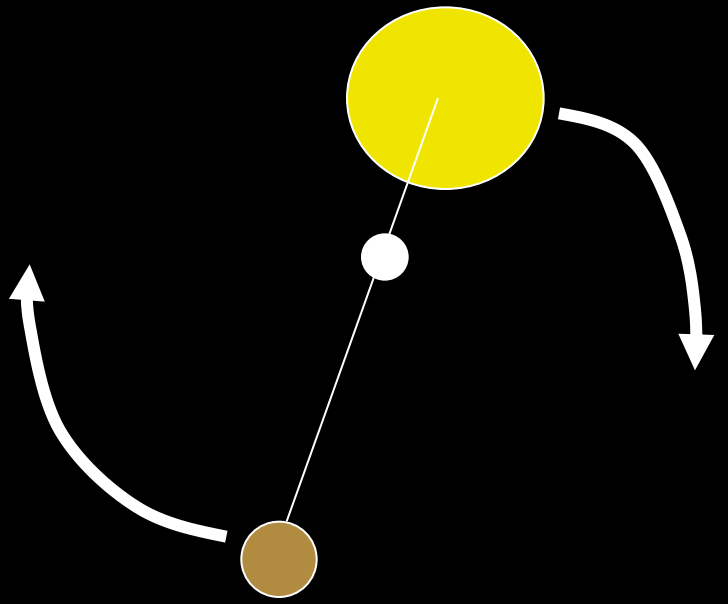



Exemple : MIZARD
(étoile double)

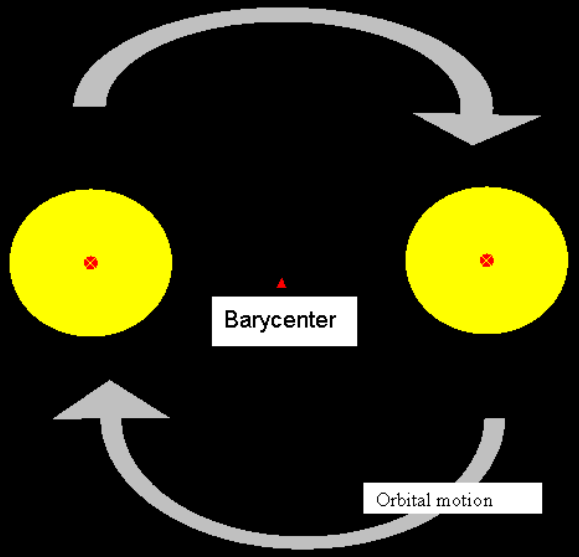
Principe : Détecter les perturbations du mouvement de l'étoile



*Une étoile isolée est fixe dans le ciel*



Une étoile et une planète tournent autour de leur barycentre

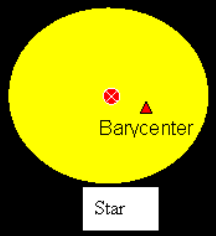



Two objects of the same mass orbiting their barycenter

Etoile double

Star and planet

Orbital motion



Etoile + planète

Cette perturbation en vitesse est mesurée en Mètres / Seconde ( $\Delta V$ )

Plus la planète EST PROCHE de l'étoile , plus $\Delta V$ est GRAND

Plus la planète est MASSIVE , plus $\Delta V$ est GRAND

=> Cette méthode est plus SENSIBLE pour les planètes MASSIVES & TRES PROCHES de l'étoile

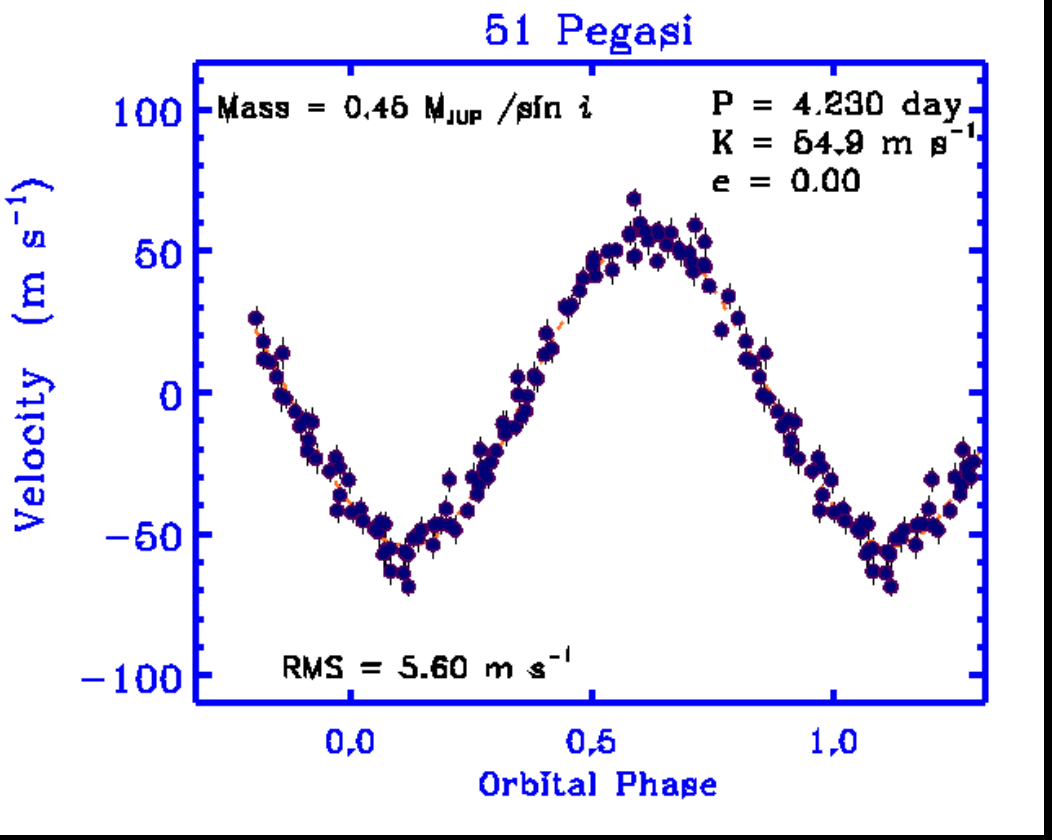
ORDRES DE GRANDEUR

TERRE : $\Delta V$ sur le Soleil ~ 3 cm/s

JUPITER : $\Delta V$ sur le Soleil ~ 13 m/s

SATURNE : $\Delta V$ sur le Soleil ~ 3 m/s

JUPITER à 1 AU : $\Delta V$ sur le Soleil ~ 30 m/s



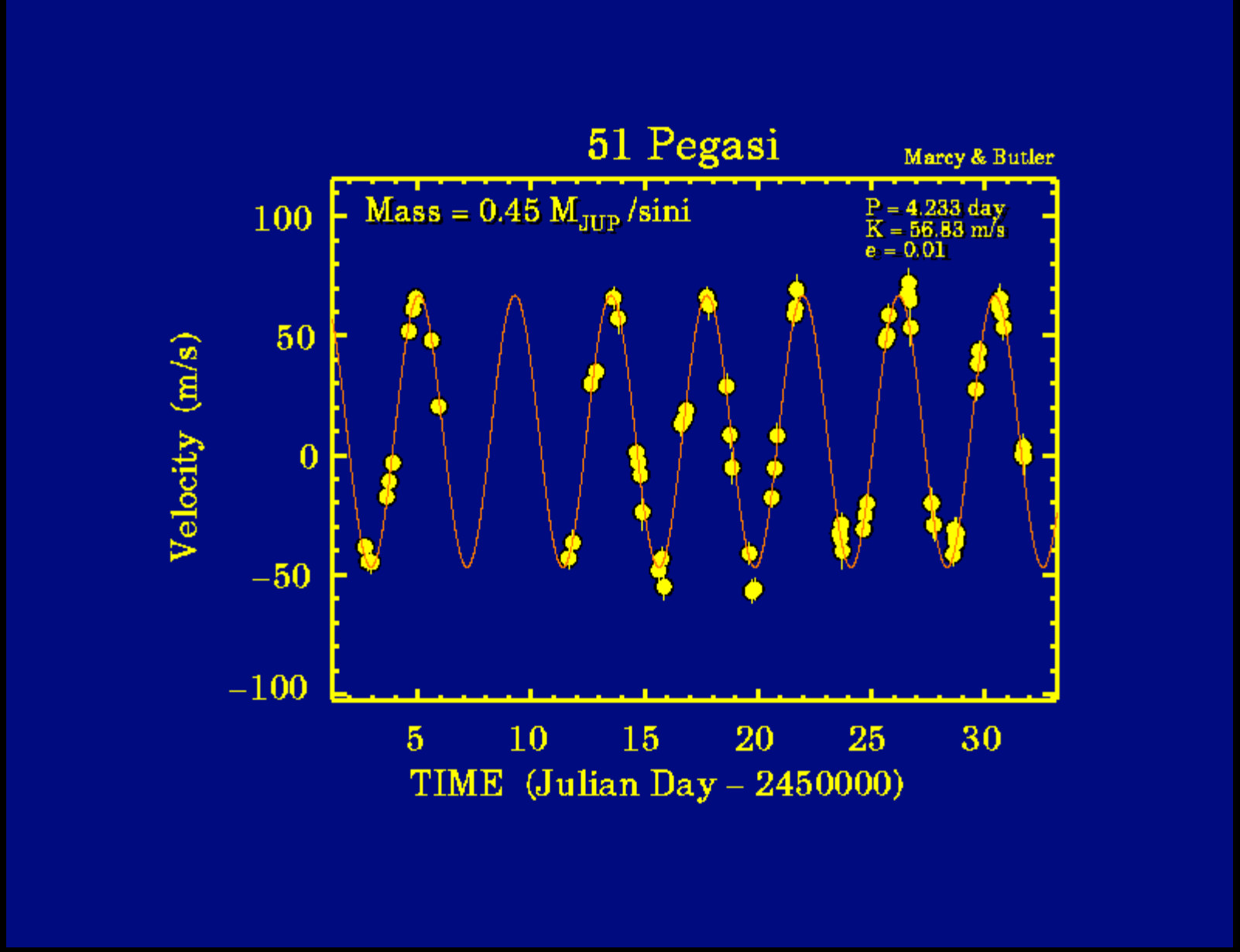

Exemple de détection avec 51 Pégase

<ΔV> ~ 50 m/s !!

La distance de la planète à l'étoile est liée à la période orbitale par la relation

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_*}}$$

T=période orbitale
R=distance




Ceci correspond à une planète de 0.5 $M_{jup}$ qui orbite en 4,3 jours !!!

⇔ Distance = 0.05 AU (plus prés que Mercure du Soleil, Mercure= 0.4 AU)

# FACTEURS LIMITANTS

Pour savoir s'il y a une planète on est obligé d'avoir au moins 1 cycle complet => 1 période orbitale de la planète.

OR les planètes orbitent très lentement :

1 objet à 1 AU orbite en 1 an

1 objet à 5 AU orbite en 15 ans

Etc…

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{R^3}{GM_*}}$$

Donc après 10 ans d'observations, on ne peut détecter que des planètes à ~4AU max

La sensibilité actuelle des détecteurs est de l'ordre de 10 m/s

$\Rightarrow$ ~ Jupiter à 1 AU

La turbulence stellaire limite la méthode à ~ 1-2 m/s >> $\Delta$V planètes terrestres

La méthode de vitesse radiale renseigne uniquement sur :

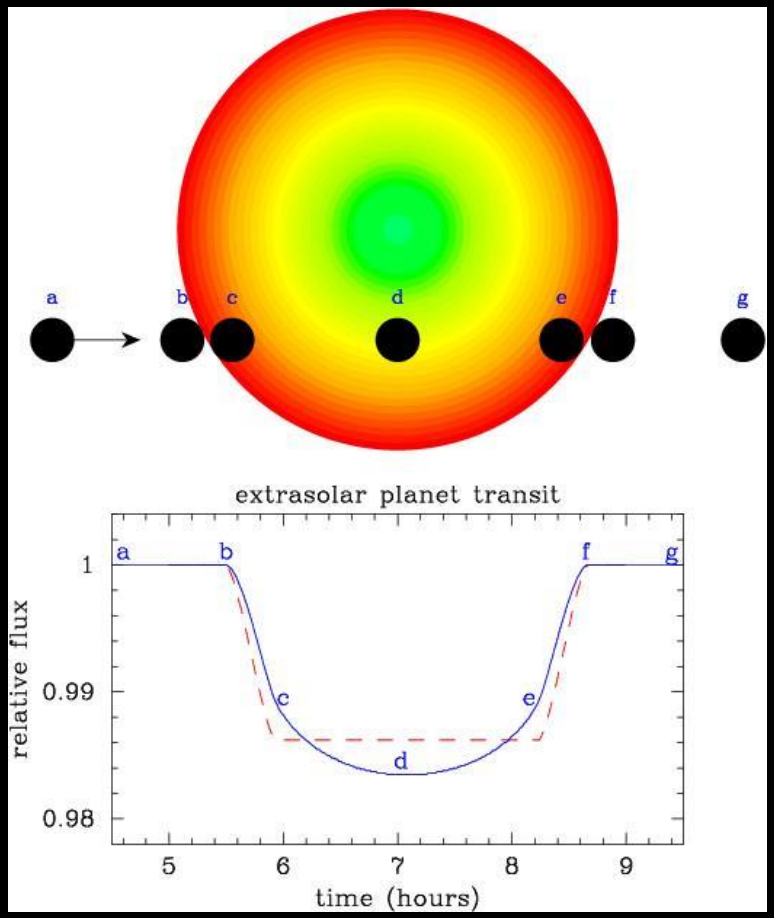
- La masse de la planète
- Sa distance

Elle ne donne aucune information sur ses propriétés physiques
$\Rightarrow$ Nécessité d'utiliser d'autres méthodes

Environ 560 planètes détectées par cette méthode.

# Méthode des transits

Statistiquement 1% des planètes ont une chance de passer dans la ligne de visée Terre-Etoile.
Lors de ce passage, elles produisent une petite occultation




Nécessite une photométrie de précision :

$$\frac{\text{Flux occulté}}{\text{Flux étoile}} = 1 - \left( \frac{r_{planète}}{r_{étoile}} \right)^2$$

Ou $r_{planète}$ est le rayon apparent de la planète.
On trouve le rayon physique en connaissant la distance par la méthode des vitesses radiales.

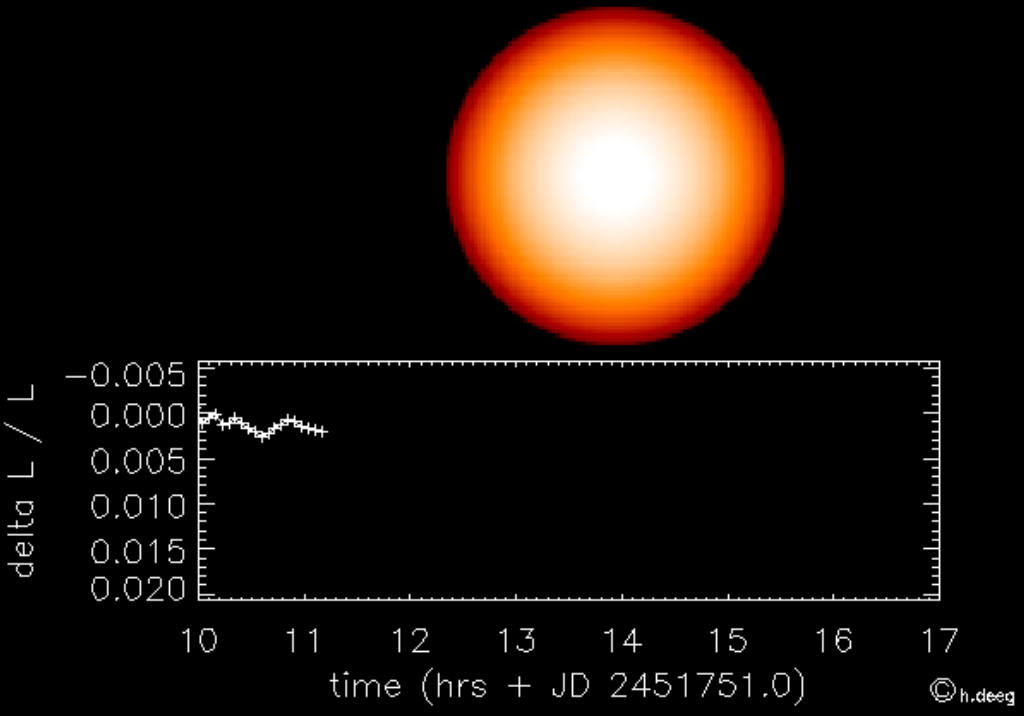
La méthode des transits est de plus en plus utilisée.

Elle a permis de découvrir/confirmer la présence plus de 1100 planètes actuellement

C’était , au début, une CONFIRMATION de la méthode des vitesses radiales (méthode complémentaire).
Maintenant, c’est une méthode de détection à part entière.

Les méthodes de TRANSIT sont plus sensibles aux grandes  planètes proches de leur étoile

Pour une planète , la diminution de brillance de l'étoile est de l'ordre de 1%



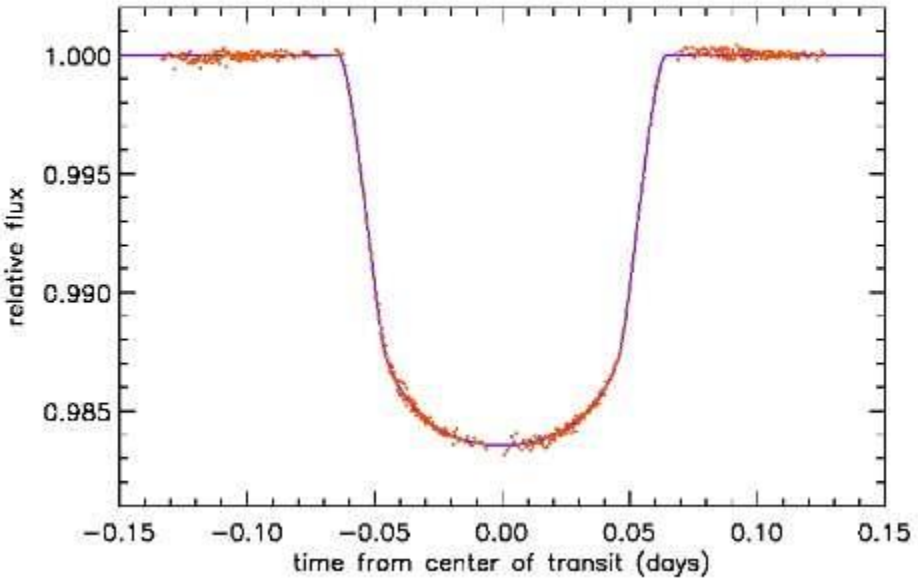

Statisquement ~1% des planètes ont une chance de passer devant dans la ligne
de visée

La méthode des transits donne :

=> l'angle du plan orbital i
=>La taille de la planète
⇒Densité (donc  composition moyenne)

- Avec de la spectroscopie de précision on peut même réussir à  faire un spectre de la planète

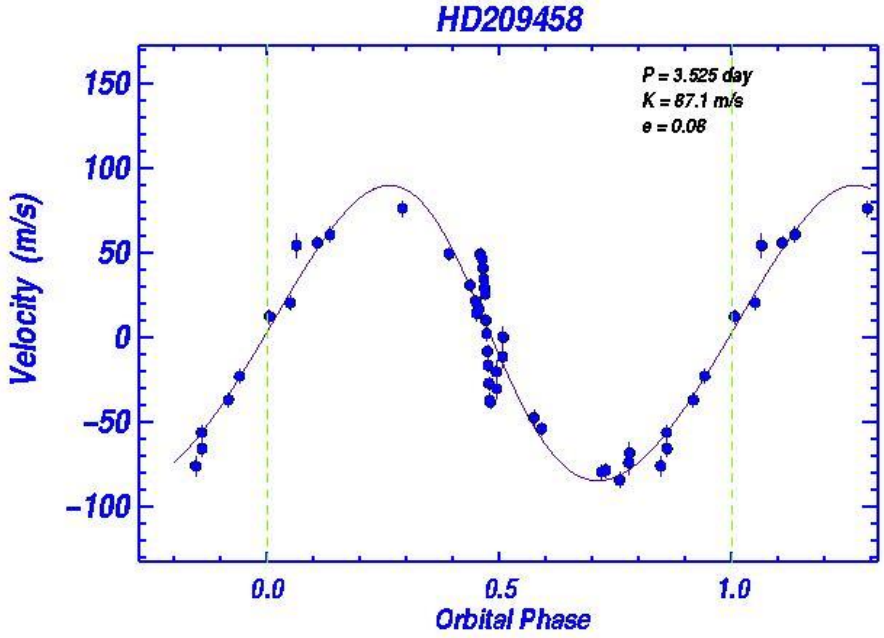
=> Composition chimique




Courbe de lumière
Observation du HST

Période orbitale : 3.5 jours

Rayon de la planète : 1,2 $R_{jup}$




Confirmation par Vitesse Radiale

Grâce à ce transit nous pouvons dériver la densité de la planète : ~ 0.5 X Saturne

⇒ C’est donc une planète géante gazeuse
⇒ Ce n’est pas une planète solide

POURQUOI UNE SI FAIBLE DENSITE ???

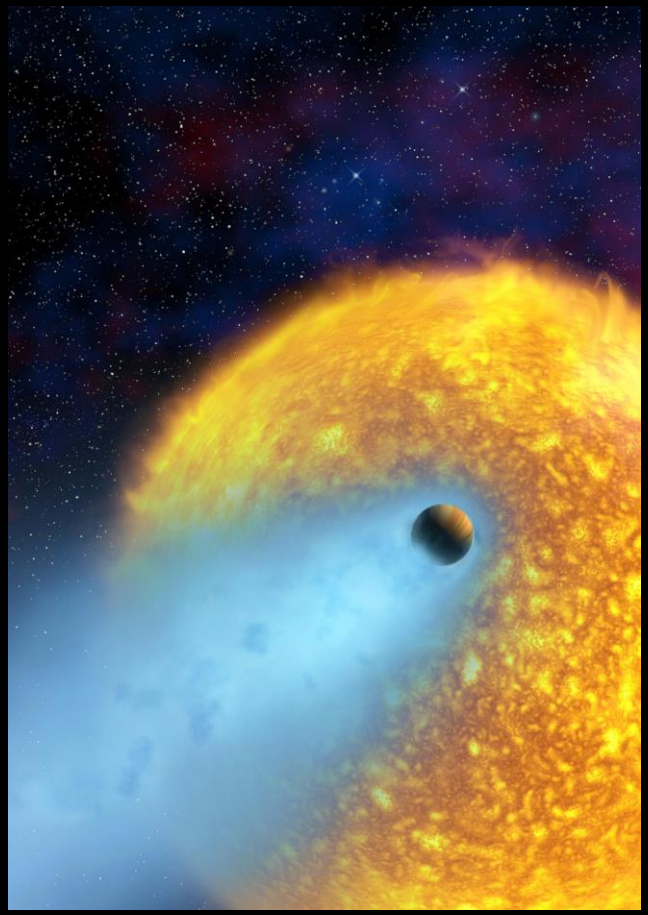
Ces planètes très proches de leur étoiles doivent être intensément chauffées !!

=> Leur atmosphère s’étend et peut-être même s’évapore

Planète OSIRIS (**HD209458** )

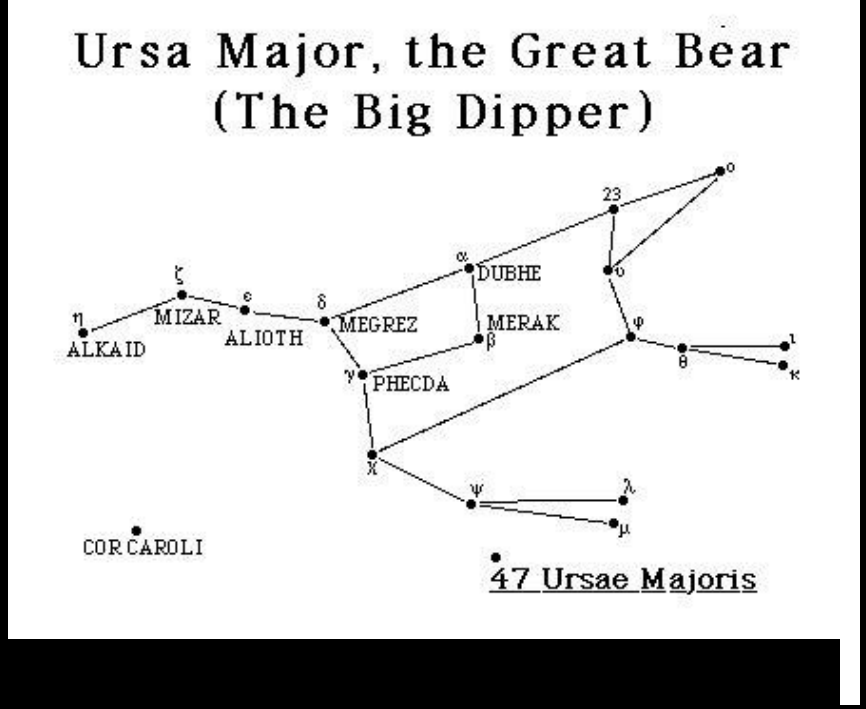
Température de surface : 1000 K

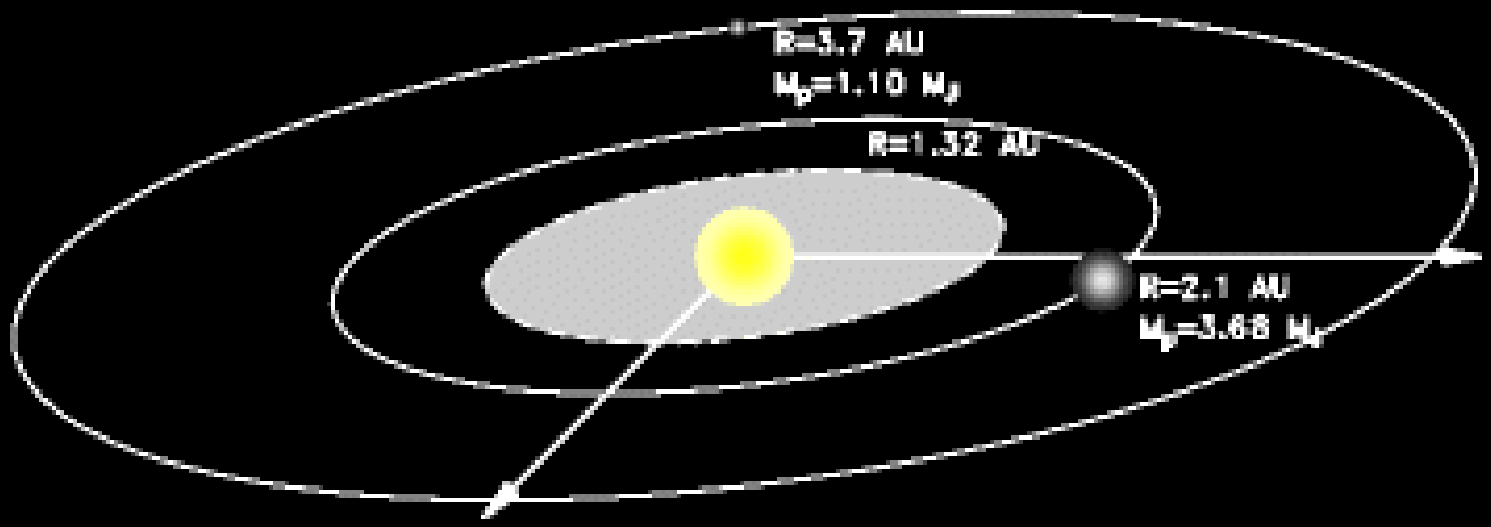
S’évapore lentement sous l’effet de la chaleur



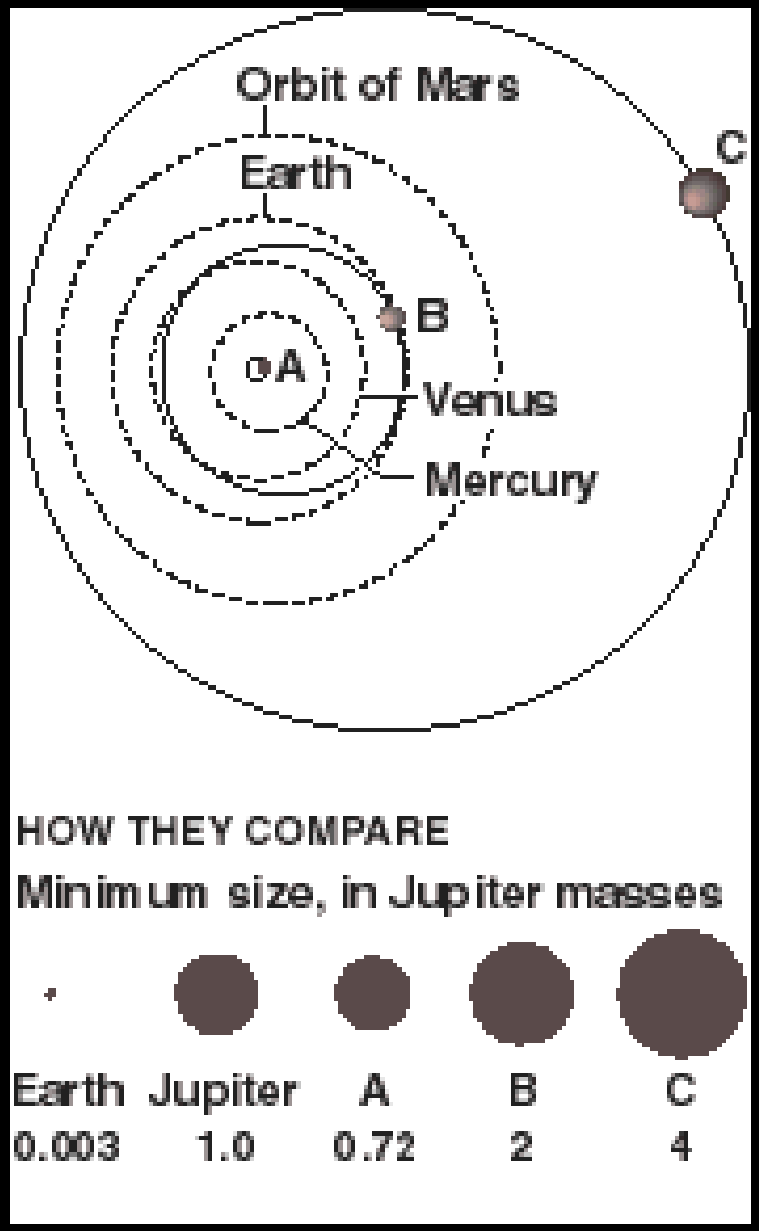
# PREMIER SYSTEME PLANETAIRE « PLAT »

## EN 2001 : 47 UMA



# Un système planétaire Autour de Upsilon Andromède



2005 :
Première image d'une planète extrasolaire au VLT

Distance = 55 AU

# Résumé

**Ensemble des Candidats Compagnons Planétaires** — **1786 planètes**

**Exoplanètes détectées par vitesses radiales ou par astrométrie**
*mise à jour : 9 mai 2014*

419 systèmes planétaires
502 planètes
98 systèmes planétaires multiples

**Planètes en transit**
*mise à jour : 9 mai 2014*

615 systèmes planétaires
1133 planètes
350 systèmes planétaires multiples

**Exoplanètes détectées par microlentille**
*mise à jour : 9 mai 2014*

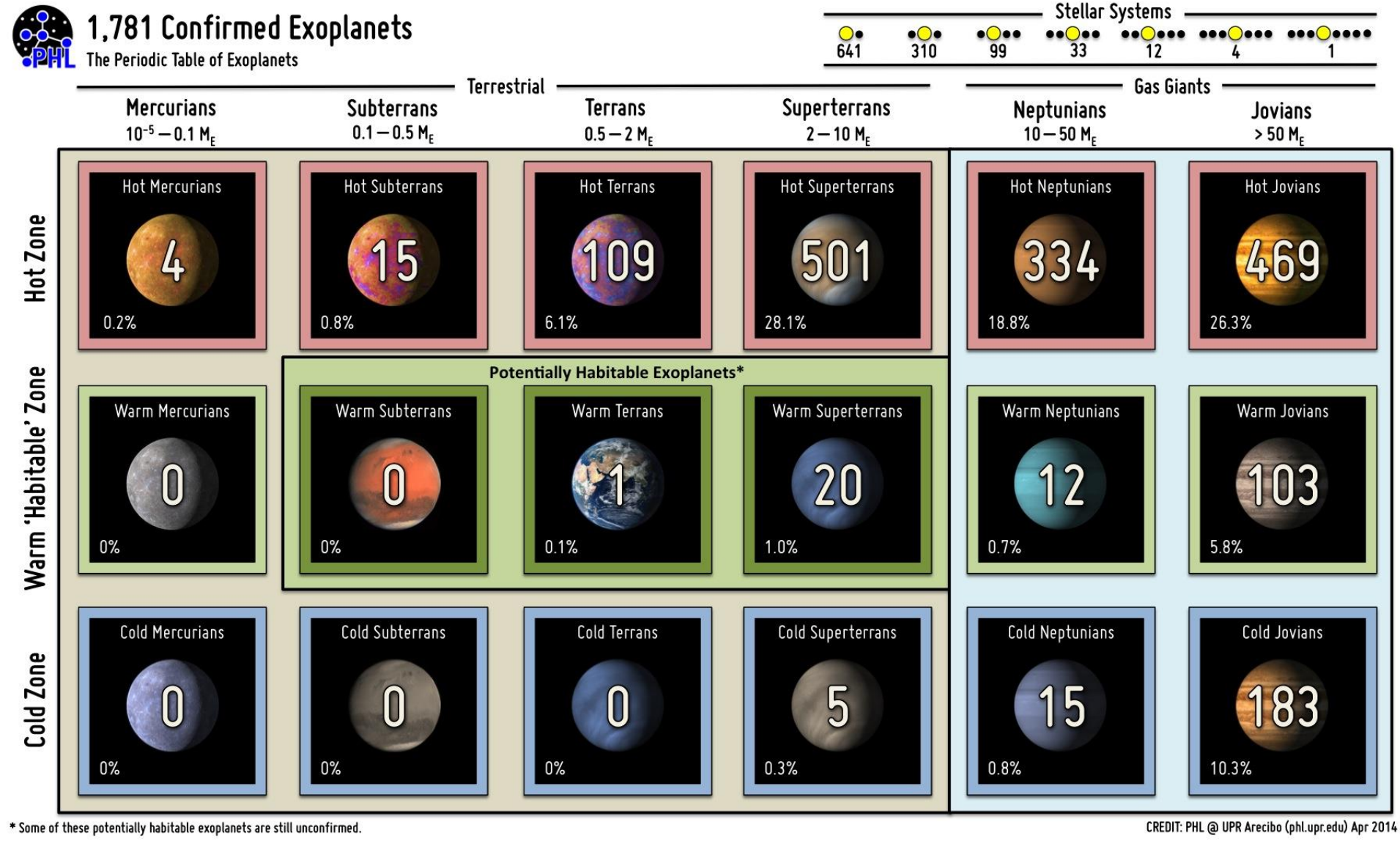
27 systèmes planétaires
29 planètes
2 systèmes planétaires multiples

**Exoplanètes détectées par imagerie**
*mise à jour : 9 mai 2014*

44 systèmes planétaires
48 planètes
2 systèmes planétaires multiples

**Exoplanètes détectées par chronométrage**
*mise à jour : 9 mai 2014*

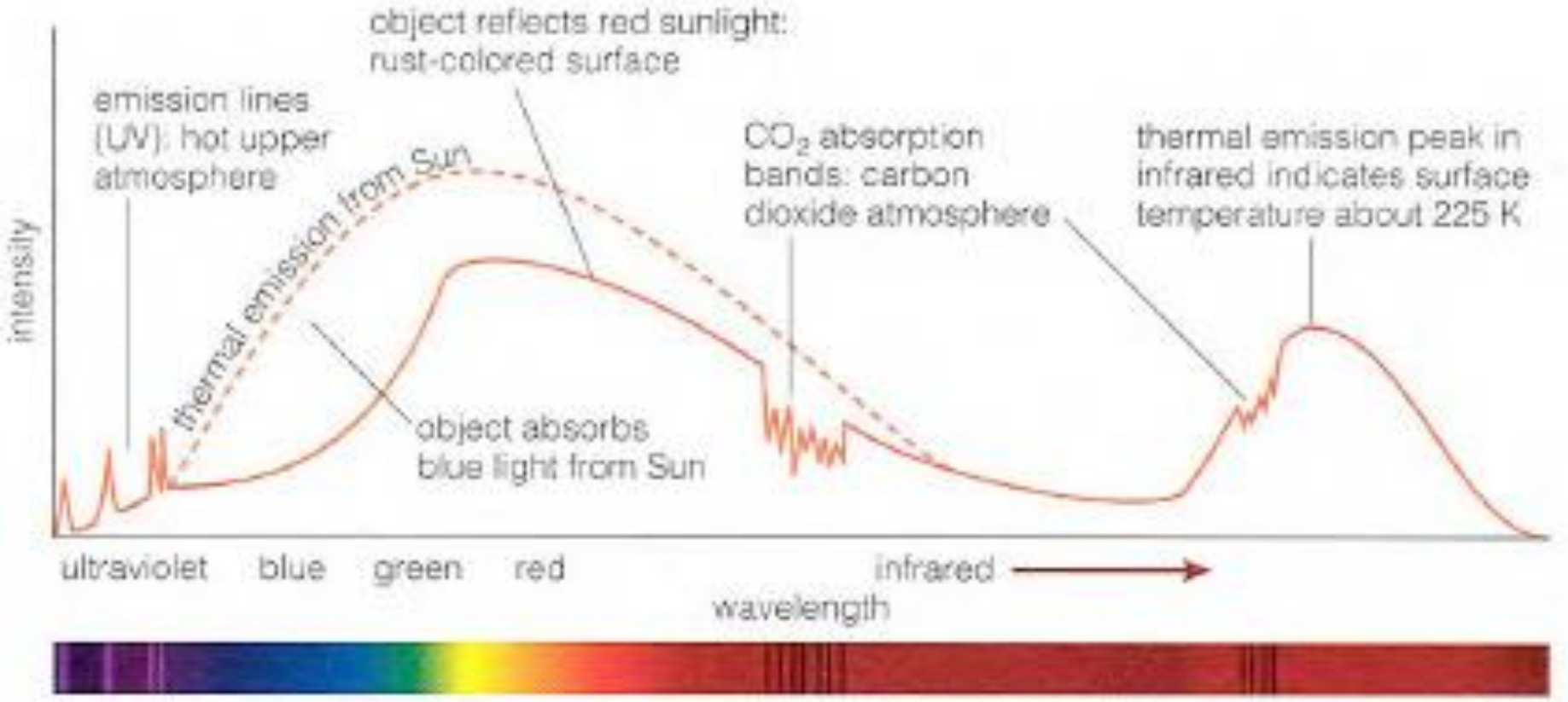
11 systèmes planétaires
14 planètes
2 systèmes planétaires multiples

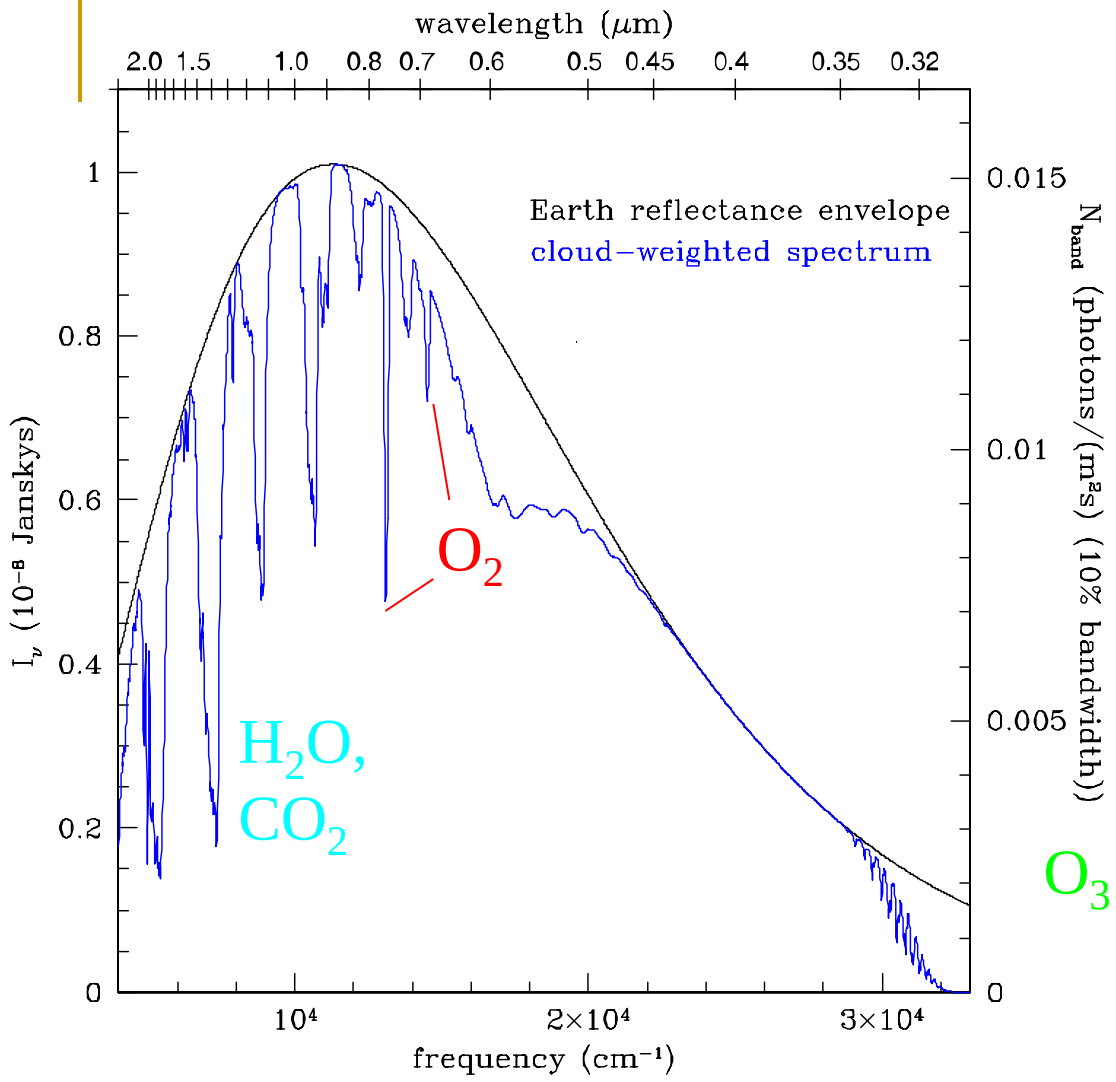

1,781 Confirmed Exoplanets
The Periodic Table of Exoplanets
PHL
Stellar Systems
641
310
99
33
12
4
1
Terrestrial
Gas Giants
Mercurians
$10^{-5}$ — 0.1 $M_E$
Subterrans
0.1 — 0.5 $M_E$
Terrans
0.5 — 2 $M_E$
Superterrans
2 — 10 $M_E$
Neptunians
10 — 50 $M_E$
Jovians
> 50 $M_E$
Hot Zone
Warm 'Habitable' Zone
Cold Zone
Hot Mercurians
4
0.2%
Hot Subterrans
15
0.8%
Hot Terrans
109
6.1%
Hot Superterrans
501
28.1%
Hot Neptunians
334
18.8%
Hot Jovians
469
26.3%
Potentially Habitable Exoplanets*
Warm Mercurians
0
0%
Warm Subterrans
0
0%
Warm Terrans
1
0.1%
Warm Superterrans
20
1.0%
Warm Neptunians
12
0.7%
Warm Jovians
103
5.8%
Cold Mercurians
0
0%
Cold Subterrans
0
0%
Cold Terrans
0
0%
Cold Superterrans
5
0.3%
Cold Neptunians
15
0.8%
Cold Jovians
183
10.3%
* Some of these potentially habitable exoplanets are still unconfirmed.
CREDIT: PHL @ UPR Arecibo (phl.upr.edu) Apr 2014

# Signatures biologiques du vivant

Recherche de marqueurs biologiques

# Que peut nous dire le spectre en réflexion (visible) et en émission (IR) d'une planète ?






# Spectre en réflexion visible/proche IR de la Terre

NATURE · VOL 365 · 21 OCTOBER 1993

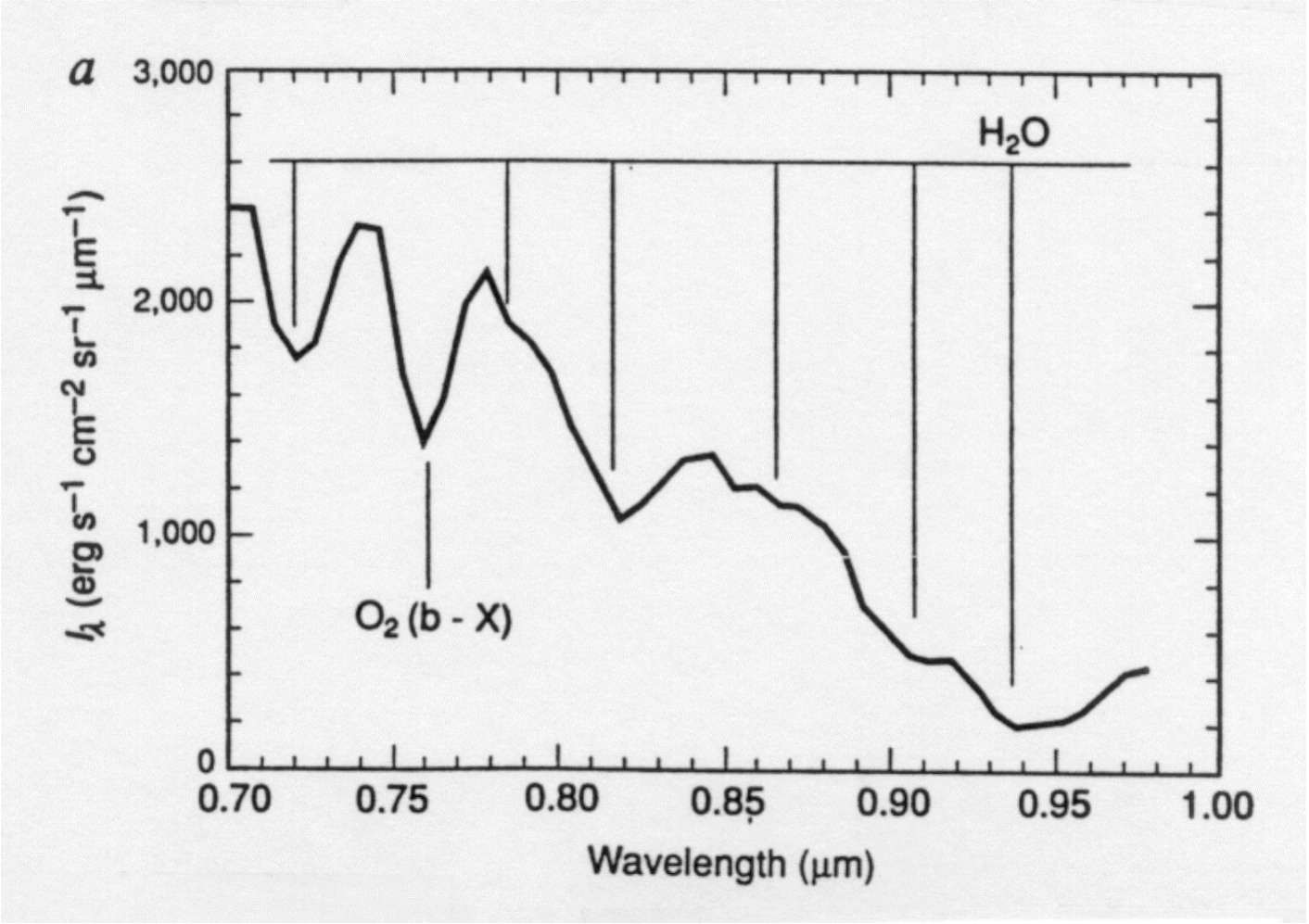
# A search for life on Earth from the Galileo spacecraft

**Carl Sagan*, W. Reid Thompson*, Robert Carlson†, Donald Gurnett‡ & Charles Hord§**

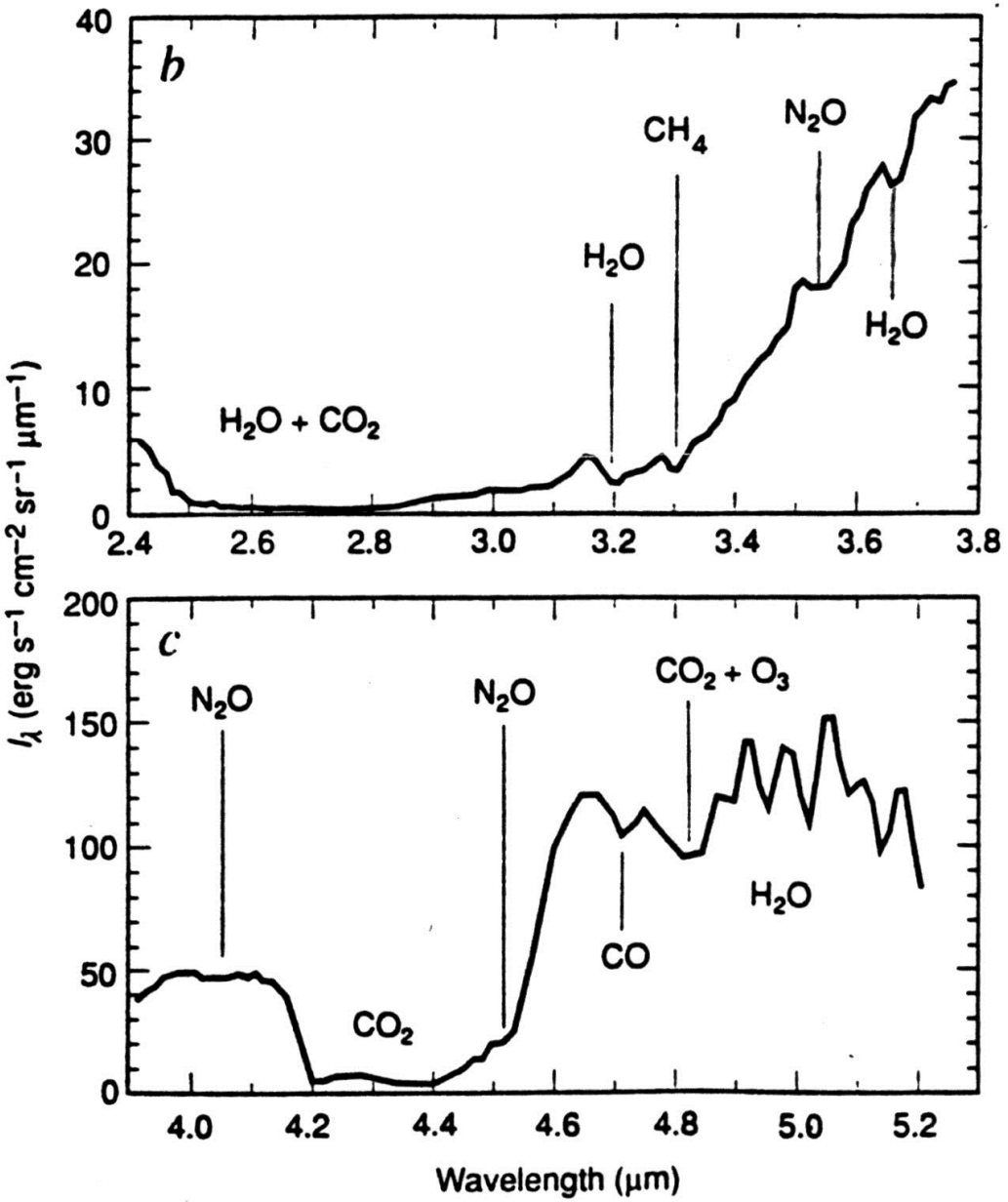
* Laboratory for Planetary Studies, Cornell University, Ithaca, New York 14853, USA
† Atmospheric and Cometary Sciences Section, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, California 91109, USA
‡ Department of Physics and Astronomy, University of Iowa, Iowa City, Iowa 52242-1479, USA
§ Laboratory for Atmospheric and Space Physics, University of Colorado, Boulder, Colorado 80309, USA

**In its December 1990 fly-by of Earth, the Galileo spacecraft found evidence of abundant gaseous oxygen, a widely distributed surface pigment with a sharp absorption edge in the red part of the visible spectrum, and atmospheric methane in extreme thermodynamic disequilibrium; together, these are strongly suggestive of life on Earth. Moreover, the presence of narrow-band, pulsed, amplitude-modulated radio transmission seems uniquely attributable to intelligence. These observations constitute a control experiment for the search for extraterrestrial life by modern interplanetary spacecraft.**

# Données NIMS (de Galileo)




Spectromètre infrarouge




Données NIMS dans le proche IR: grand nombre de raies d'absorption par les éléments présents dans l'atmosphère de la Terre

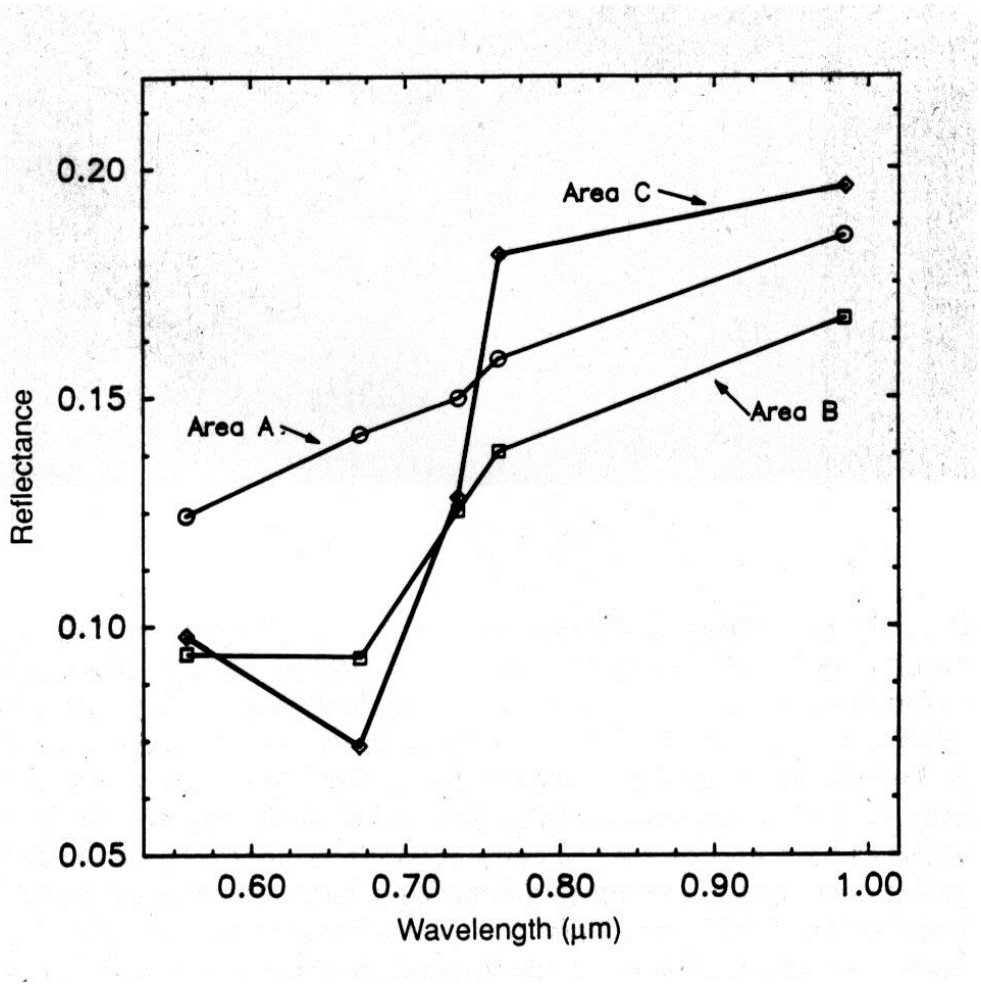
# Spectro-imagerie de la Terre par Galileo

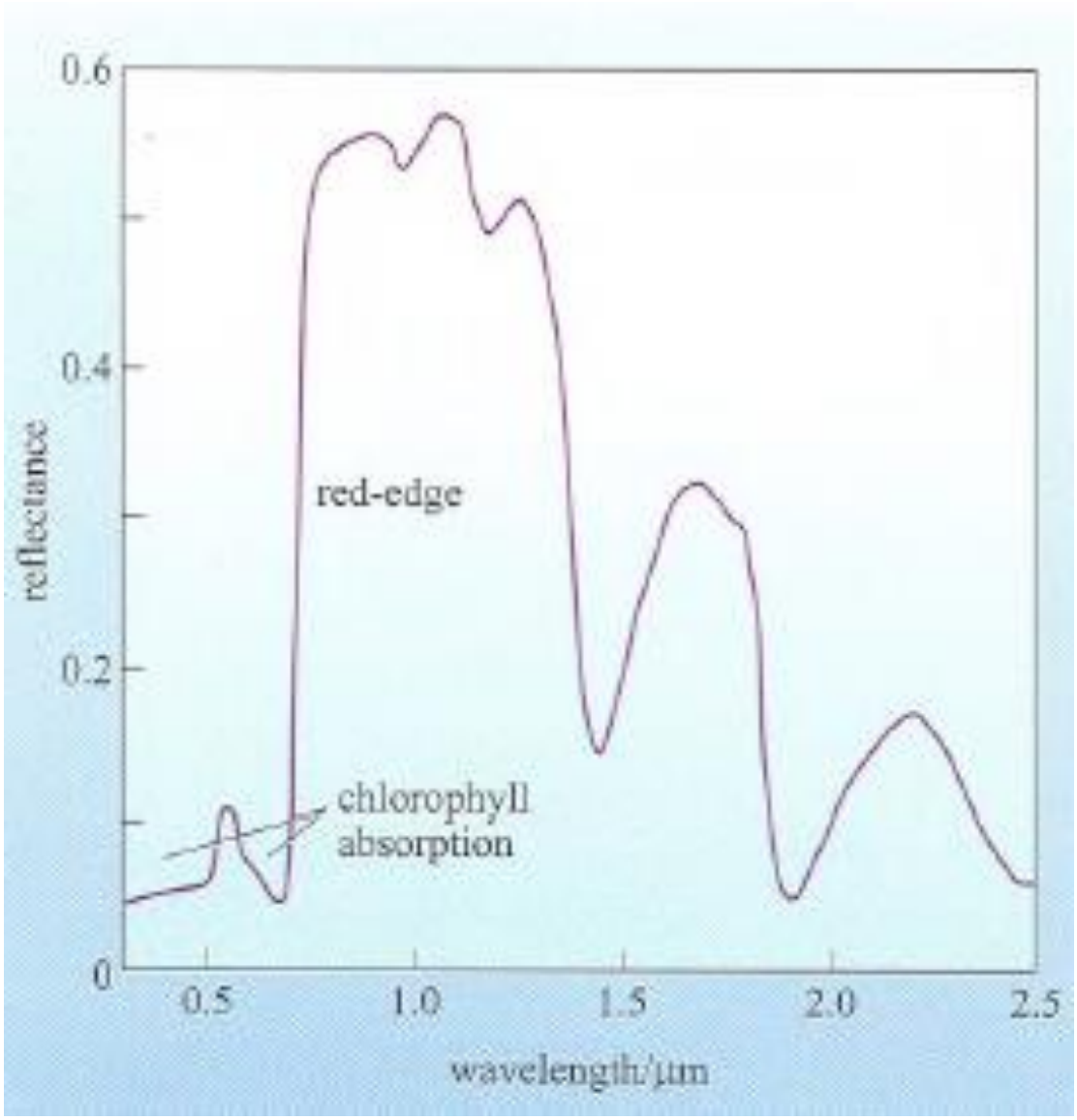
‘Vraie” couleur
(rouge, vert, violet)

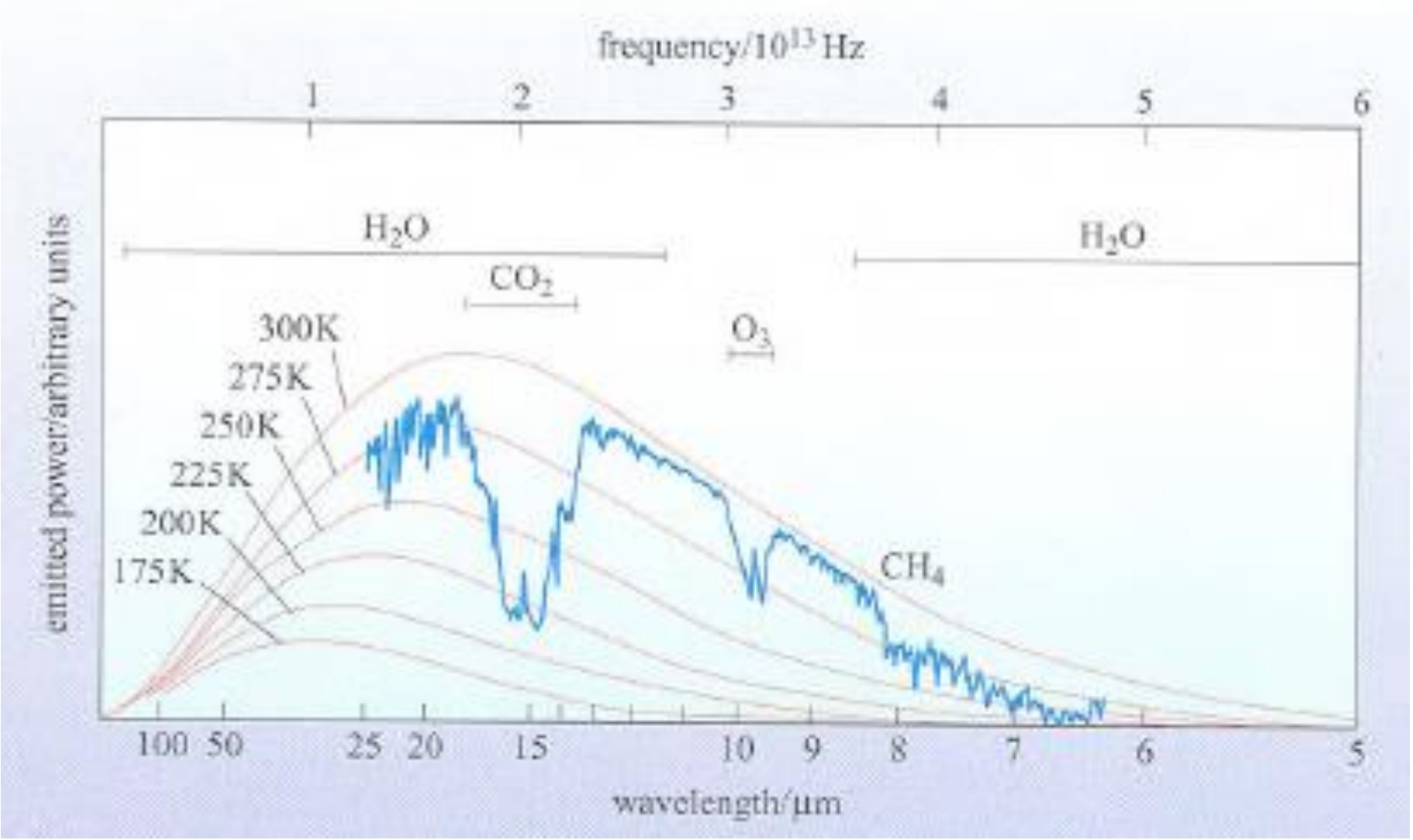
Grande longueur d’onde
(rouge, vert, 1 µm )

# Le ‘Red Edge’ de la chlorophylle

Bande spectrale centrée sur le ‘red edge’



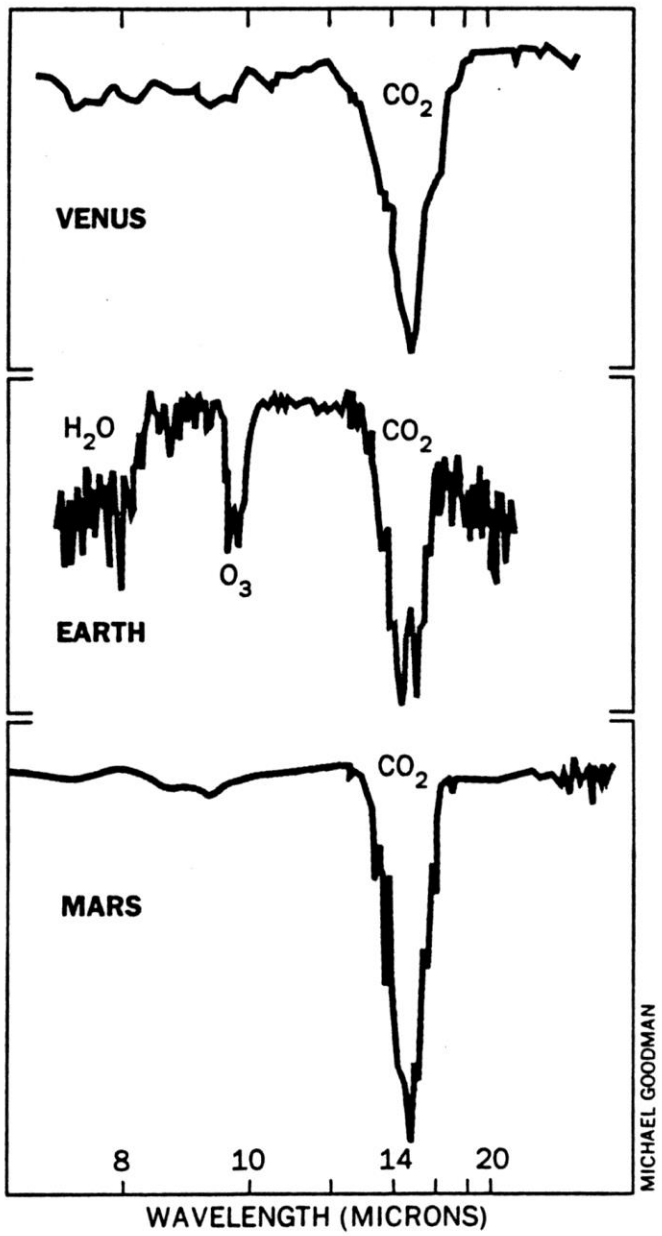

0.6
0.4
0.2
0
reflectance
red-edge
chlorophyll
absorption
0.5
1.0
1.5
2.0
2.5
wavelength/μm

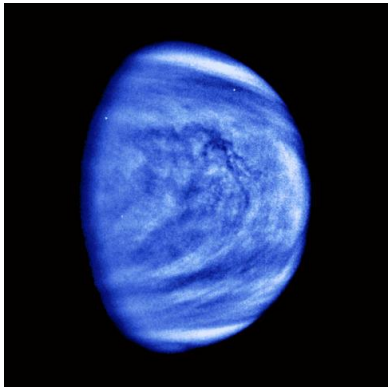


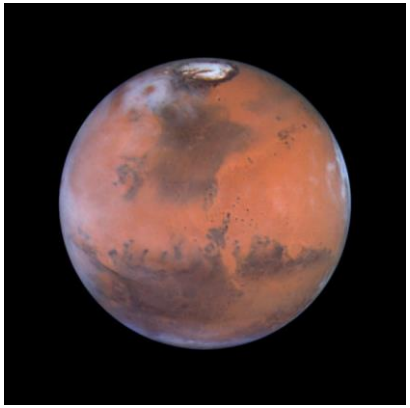

Discutons à partir d'un spectre moderne (Nimbus-4) obtenu de jour dans une région sans nuage au dessus de l'Océan Pacifique

- Entre 8 et 12 µm (-creux à 9.6 µm) : courbe compatible avec corps noir à 300 K ⇨ rayt émis par la surface de la Terre ou par nuage plutot qu'une couche de l'atm (pas de raie d'abs). Comme pas de nuage ⇨ sol à la temp 300K, eau liquide possible, compatible avec vie biologique
- L'eau est présente sur Terre (au – ds l'atm) cf ttes les raies (bandes) d'abs de $H_20$ + courbe CN à 275K ⇨ La vapeur d'eau a absorbé tt le rayt émis par la surface et l'a réémit à une temp + faible (de sa propre position). Profil temp ⇨ qq km.
- 15 µm : large abs par $CO_2$ + CN à 220 K. Profil temp ⇨ haute troposphère à 10 km. Ce n'est pas parce que le $CO_2$ est concentré à cet endroit, mais simplement nous pouvons regarder (de l'ext) aussi profond que cet endroit ⇨ la planète a du carbone

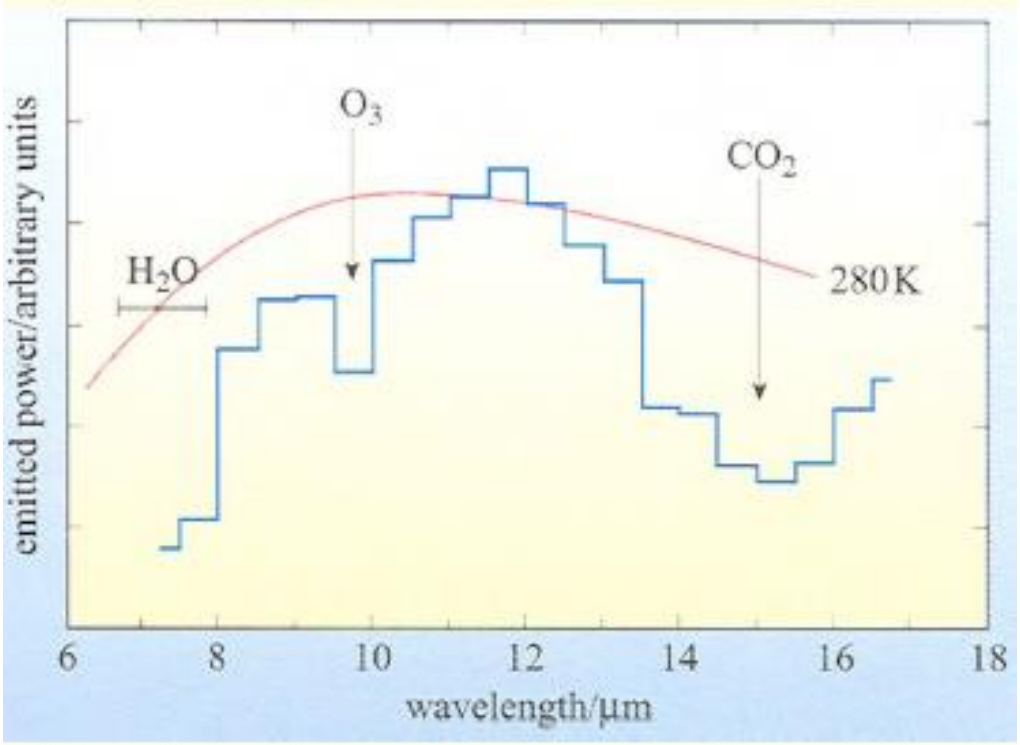
- Creux à 9.6 µm: Ozone $O_3$ ⇨ photolyse $O_2$ Doit être présent en gde quantité. $O_2$ pas détectable directement car absorbe peu IR. Temp du CN 275 K ⇨ basse troposphère ou haute stratosphère
- Source $O_3$ ? Biosphère ou photolyse ?
- Présence du $CH_4$ en même tps qu'$O_2$ ⇨ biosphère !!!

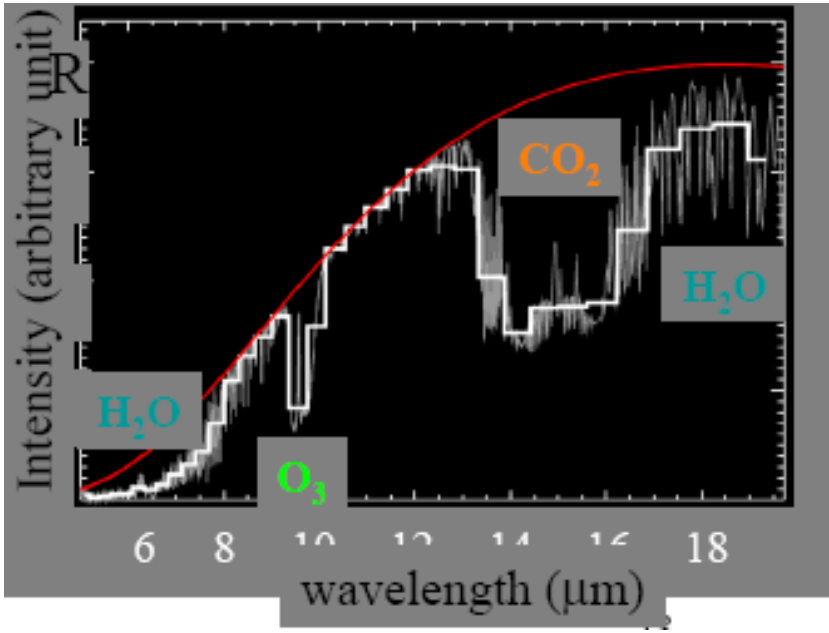




# Spectres IR thermiques

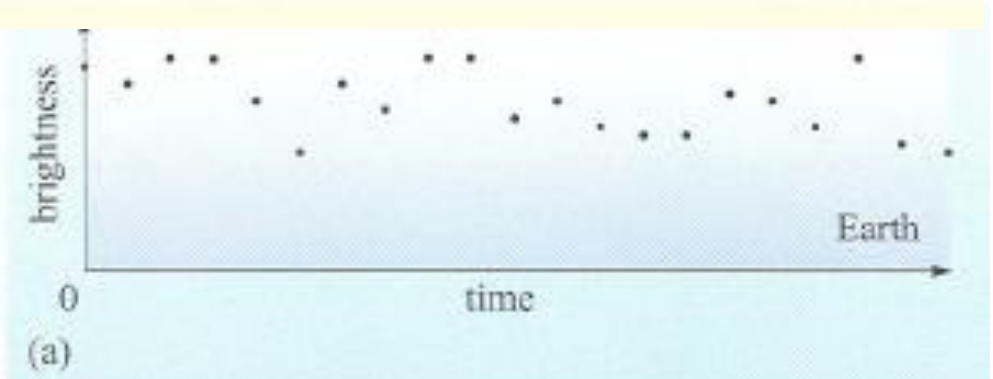


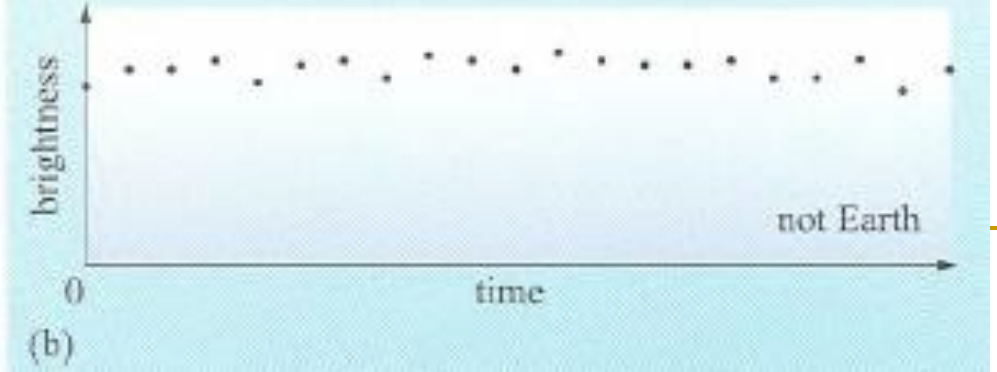




Simulation d'un spectre d'une planète type Terre à 10 pc observée par TPF ou Darwin  en 40h : la faible résolution spectrale est un problème majeur pour la détection de marqueurs biologiques

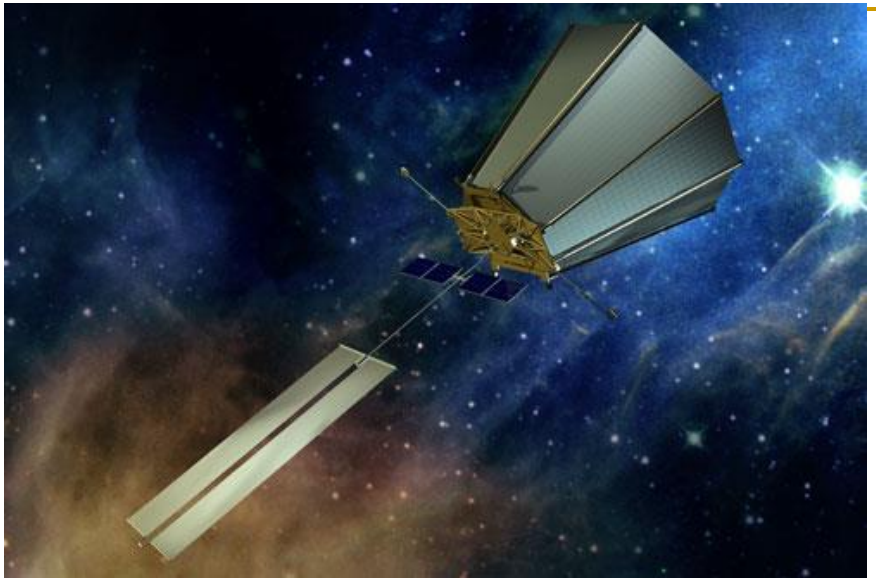
**Typical Albedos of Terrestrial Materials**

| Material | Albedo (Percent) |
|---|---|
| Earth system as a whole | 30 |
| Sand | 25 |
| Dense Forest | 8 |
| Field crops | 25 |
| Water (sun near horizon) | 40-75 |
| Water (sun overhead) | 6 |
| Fresh snow | 85-95 |
| Concrete | 20-30 |



# Projets en cours & futurs

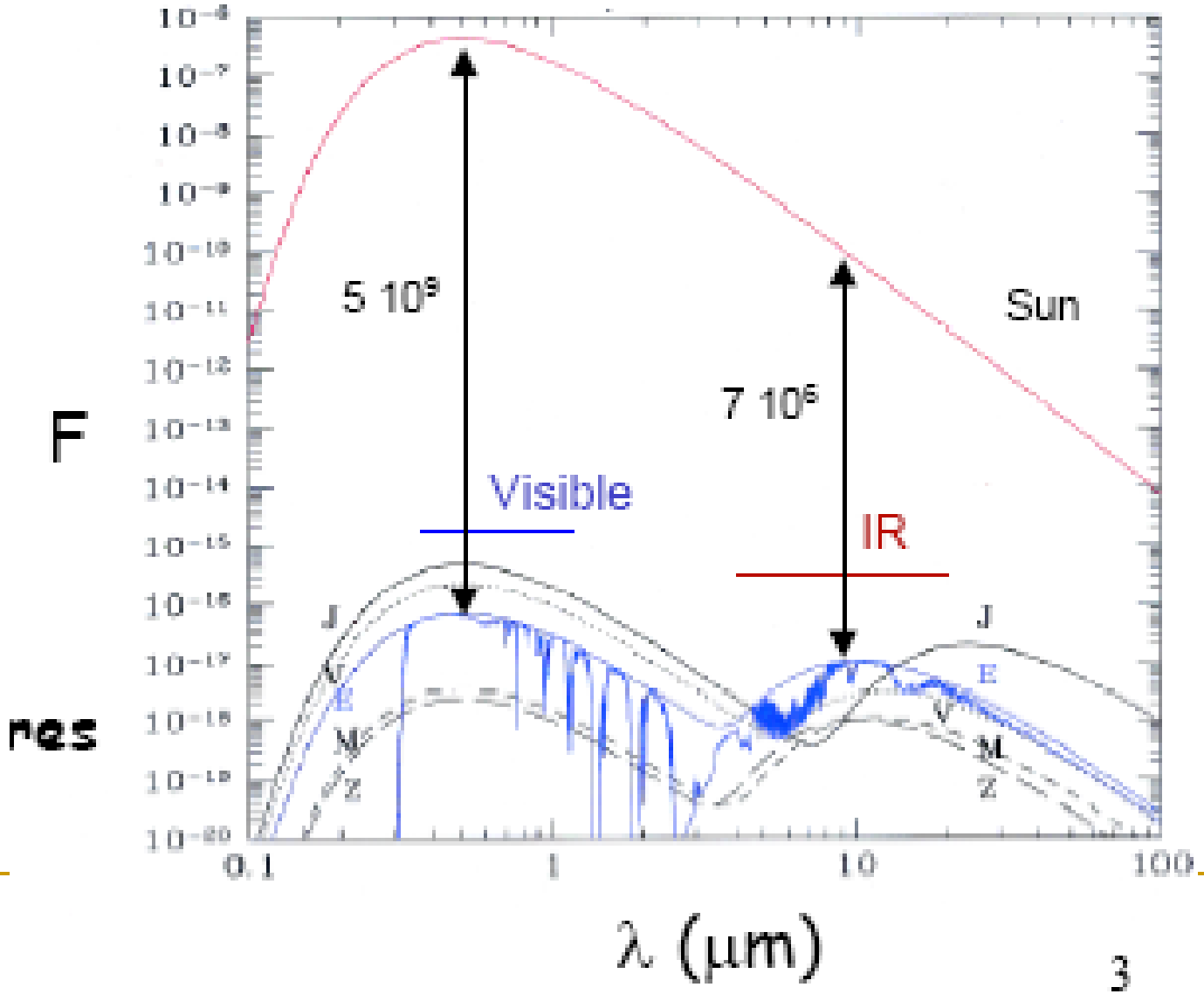


| | Mercure | Vénus | Lune | Mars | Jupiter | Saturne | Uranus | Neptune | Pluton |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Survol ou mise en orbite d'une sonde spatiale | MESSENGER (2004-?)<br>BEPICOLUMBO (2014) - ESA | VENUS EXPRESS (2005-?)<br>VENUS ORBITER PLANET-C (2010-?) - Japon | LRO (2009-?)<br>SELENE-2 (2012) – Japon<br>CHANG'E 2 (2012) - Chine | MARS ODISSEY (2001-?)<br>MARS EXPRESS (2003-?)<br>MRO (2005-?)<br>Yinghuo-1 (2010) - Chine<br>MAVEN (2013) – NASA | JUNO (2011) – NASA<br>EJSM (2020) – NASA, ESA | CASSINI (2004-?)<br>TSSM (2020) – NASA, ESA | | NEPTUNE ORBITER (2017) - NASA | PKB (2006-?) - USA |
| Atterrissage d'un robot fixe ou mobile | | | SELENE-2 (2012) – Japon | MER A-B (2004-?)<br>MSL (2011) – NASA<br>MetNet (2011) – Finland,Russia,Spain<br>AFL (2016) - NASA | | | | | |
| Retour d'échantillon | | | | PHOBOS 3 (2011) - Russie<br>ExoMars (2016) – NASA, France<br>MSR (2020) - NASA, ESA | | | | | |
| Exploration par l'homme | | | 2020-2030 ? | 2025-50 ? | | | | | |

# Détection et caractérisation des exo-planètes

- En cours :
  - Grands télescopes au sol (VLT, Keck, Gemini...) : astrométrie
  - SPITZER (2003 – NASA) : imagerie et spectroscopie IR thermique
  - CoRoT (2006 – France, Europe, Brésil) : transits
  - EPOXI (2008 - NASA) : transits
  - KEPLER (2009 – NASA) : transits
- Projets :
  - SIM (2009+...?? – NASA) : astrométrie
  - ExoplanetSat (??) : transits
  - E-ELT (2011 – ESO) : astrométrie, imagerie et spectroscopie
  - GAIA (2011 - ESA) : astrométrie, transits
  - JWST (2018 – NASA) : imagerie IR, transits
  - Plato (2015-2025 – ESA) : transits, spectroscopie
  - TPF/Darwin (?? -NASA-ESA) : imagerie et spectroscopie Vis/IR

# Difficulté de la tache .

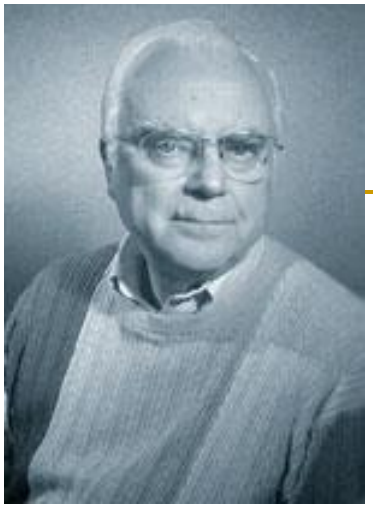


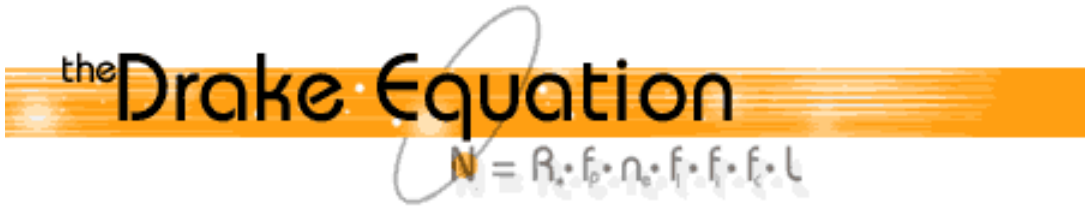
- Étude de la Terre
  - Antarctique et Arctique
  - Sources chaudes
  - Désert chaud
  - Volcanisme
  - Sources hydrothermales
  - Environnement souterrain
  - Stratosphère terrestre

# Quelques mots sur SETI

- Moyens de communication extraterrestre : ondes électromagnétiques (radio). Exemple de notre civilisation depuis les années 1940
- Pourrait-on détecter les mêmes transmission de ces extraterrestres ?
- Recherches par radio télescope de signaux radio variables sur des étoiles proches.
- Pb : ondes radio émises dans des cônes ⇨ nécessite de puissants émetteurs !!!
- TV + radio ne sont plus ceux qu'elles étaient : câble + satellites  ne fuit pas vers l'espace !! ⇨ tps de détection = qq 100 ans.
- Alternatives : lasers (recherche de messages envoyés directement dans notre direction) ⇨ SETI optique

# L’équation de Drake



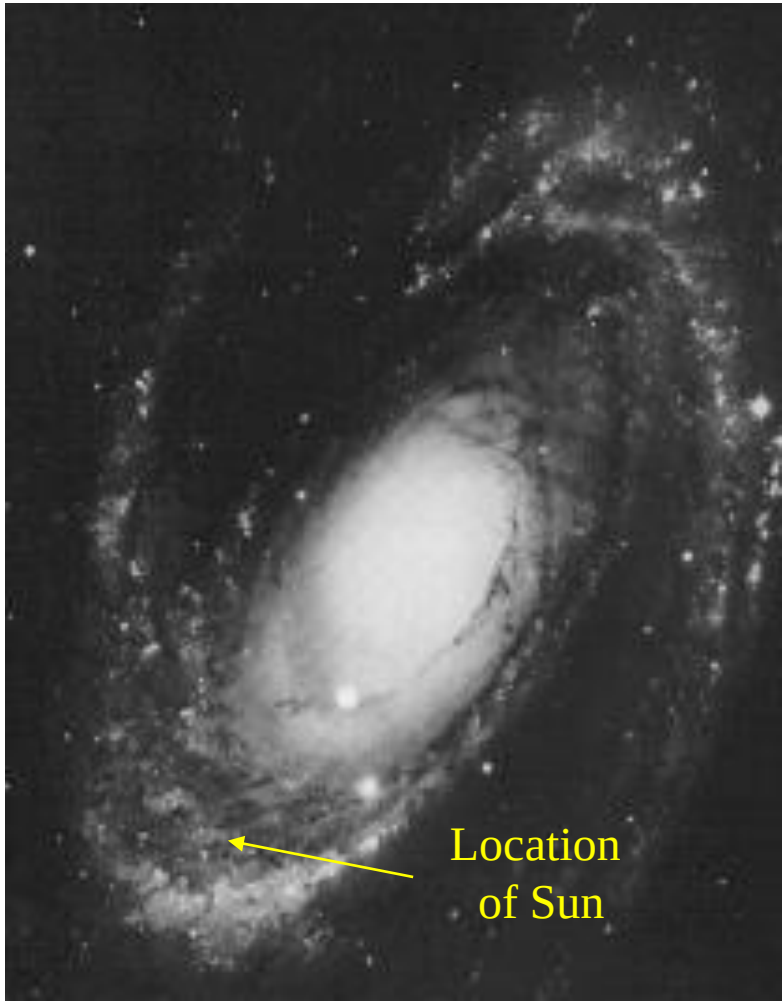


# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$

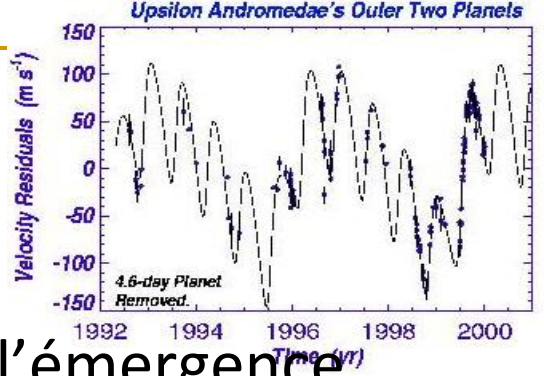
- N: Nombre de civilisations capable de communiquer dans notre Galaxie.
- N est le produit des facteurs suivants:
  - $R_*$: taux de formation des étoiles
  - $f_p$: fraction des étoiles ayant un système planétaire
  - $n_e$: nombre de planètes (par syst plan) dans la zone habitable (ou éventuellement viable).
  - $f_l$ : fraction de planètes « habitables » où la vie se développe réellement
  - $f_i$ : fraction des planètes avec vie ET émergence de l'intelligence
  - $f_c$: probabilité que cette civilisation ait accès aux communications
  - L: durée durant laquelle ces civilisations sont détectables
- On peut estimer certains de ces facteurs, mais attention à la numérologie !!! Base de travail, mais pas de réponse complète !

# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$

- $R_*$ : taux de formation des étoiles
- Mvt du Soleil dans la Galaxie :
  - Masse à l'int de l'orbite du Soleil = $10^{11}$ $M_\odot$
  - Mais aussi gaz + étoile à l'ext ⇨ 1.6 $10^{11}$ $M_\odot$
  - <M> ≈0.4 $M_\odot$ ⇨ 4 $10^{11}$ étoiles ds notre Galaxie
- Age Galaxie: 10 Gans ⇨ $R_*$ = 40 étoiles/ans. Paramètre plutôt bien connu.



# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$

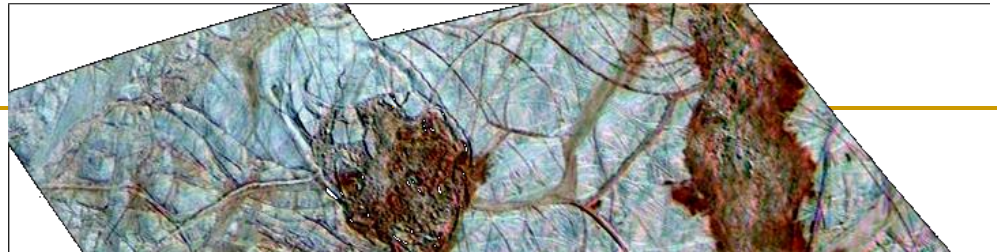



- Estimer $f_p$ ? De mieux en mieux connu avec l'émergence des exoplanètes!
- $f_p \approx 1$ : toutes les étoiles jeunes ont un disque
- Binaire d'étoiles: des disques oui, mais que dire des planètes ? Et même s'il y en a, orbite instable. Si on les rejette ⇨ $f_p < 0.3$
- Valeur minimale ? Taux de détection des exoplanètes = $n_{détection}/n_{observé} = 0.05$ (! Type Jupiter)
- Dans le futur: planète + petite, orbite + large

  ⇨ $f_p$(min) entre 0.11 et 0.25

# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$

- $n_e$ : nombre de planètes (par syst plan) dans la zone habitable (ou éventuellement viable).
- Facteur complexe, subdivisn possible : $n_e = n_p \times f_s$ avec $n_p \approx n_e$ mais avec des étoiles comme le Soleil et $f_s$ la fraction d'étoile dont les propriétés sont compatible avec le développement de la vie.
- $n_e$, $n_p$ peuvent être > 1, mais f <1
- $N_p$ : critère T pour ZH ⇨ 3 : optimiste (Venus, Terre, Mars), mais aussi pourquoi pas Europe ?
- Autre aspect: gravité, P, taille de la lune ⇨ $n_p \approx 0.1$ pessimiste!



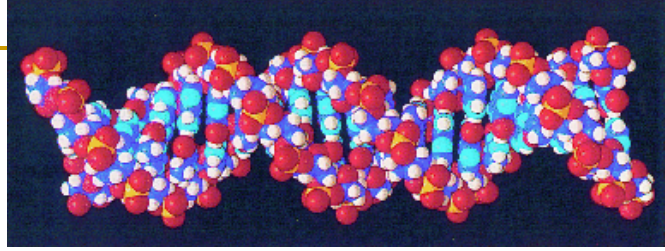
# Contribution dans $f_s$

- $f_s$ : fraction des étoiles compatible avec dvpt vie
- Facteurs à considérer :
  - 1 : 1ère génération d'étoile (Pop II): pas d'élt lourd (>He) ⇨ pas bon pour dvt vie. Etoiles avec + de métaux ont + de chance d'avoir des planètes. OK: Pop I ~ 100%
  - 2 : séquence principale: phase de luminosité constante pdt longue période. En dehors pas très bon pr dvt vie. OK: 99% des étoiles sur la séquence principale
  - 3 : $T_{planète}$ reste correcte (pr vie) pdt 5 Gans ⇨ éliminer ttes les étoiles de masse > 1.25 $M_\odot$ ⇨ reste OK 90%
  - 4 : Pb étoile faible masse (planète géante proche, petite ZH, effet de marée, orbite synchrone, …) ⇨ masse > 0.5 $M_\odot$ reste 25% OK
  - 5 : Étoiles binaires (orbites instables, …) ⇨ reste 30% OK (! si pas déjà enlevé dans $f_p$)
  - 6 : Éventuellement, orbite ok qd étoiles bien séparées (30 u.a.) alors 50% des étoiles pourrait être OK.

| Critères | Fraction d'étoile OK | Fctn cumulée |
|---|---|---|
| 1: Elt lourd | 1.0 | 1.0 |
| 2: Seq princ | 0.99 | 0.99 |
| 3:M<1.25$M_\odot$ | 0.90 | 0.89 |
| 4:M>0.5 $M_\odot$ | 0.25 | 0.22 |
| 5: pas binaire | 0.30 | 0.07 |
| 5: binaire large ok | 0.50 | 0.11 |

- Si vous pensez que 1-4 important, alors $f_s$ ~0.07, mais si binaire ok, alors $f_s$ ~0.22.
- $n_e = n_p \, . \, f_s$ : 3 * 0.89 = 2.7 (opt) à 0.1*0.07=0.007 (pess)

# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$



- $f_l$ : fraction de planètes « habitables » où la vie se développe réellement
- Existence de macromolécules dans nuages moléculaires montre que l'évolution vers la complexité (au niveau des acides aminés) est cosmique.
- Sur Terre, l'évolution chimique est allée + loin: la vie semble un processus d'évolution naturelle se fondant sur les lois de la nature ⇨ $f_l \approx 1$ ??
- Autres considérations : atmosphère réductrice ? Bonne source d'énergie ? Régions sèches + Marées (polymères) ? Lune large ? Faible compréhension de l'origine de la vie sur Terre.
- $f_l$ peut prendre des valeurs de $10^{-6}$ à 1 !!!!
- $f_l$ ne peut pas être trop petit car la vie est apparue très rapidemt sur T : $f_l > 0.33$ pour planète > 1Gy

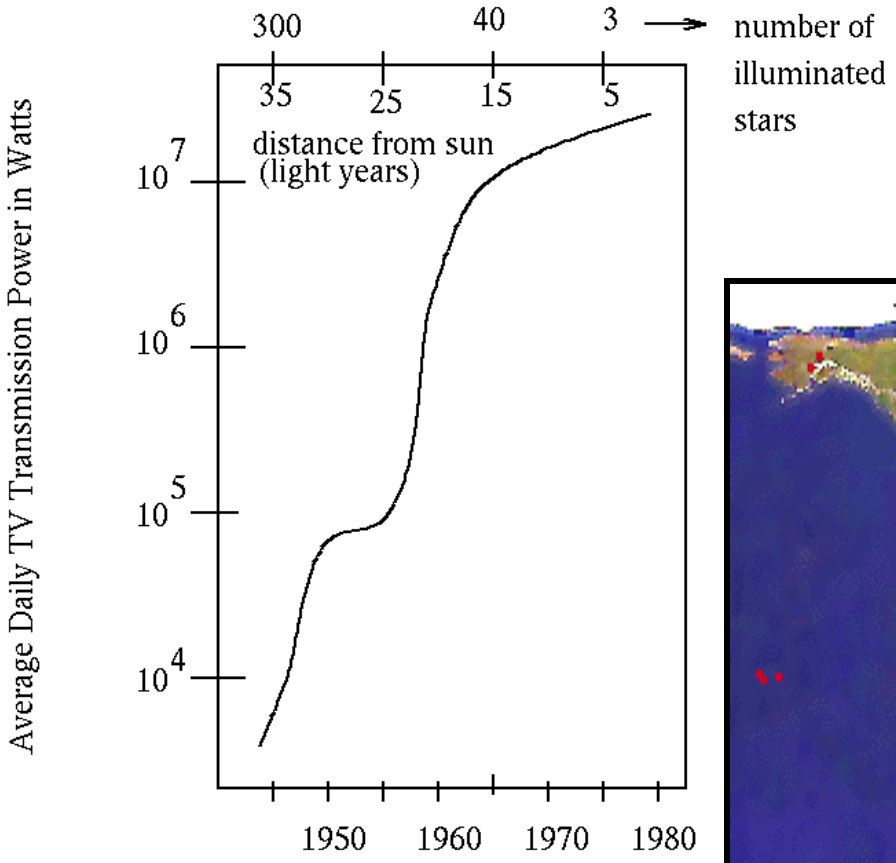
# $N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$

- $f_i$ : fraction des planètes avec vie ET émergence de l'intelligence
- Définition de l'intelligence ?????
- L'intelligence se traduit par un coût supplémentaire ⇨ pas forcément adapté aux milieux extrêmes. La taille peut être un meilleur critère d'adaptabilité.
- Évolution vers l'intelligence humaine a pris 4.5 Gy
- Rôle des mains, de la bipédie, rôle traditionnel des sexes, développement de règles de vie sociétale...
- $f_i$ peut prendre n'importe quelle valeur : de $10^{-9}$ à 1

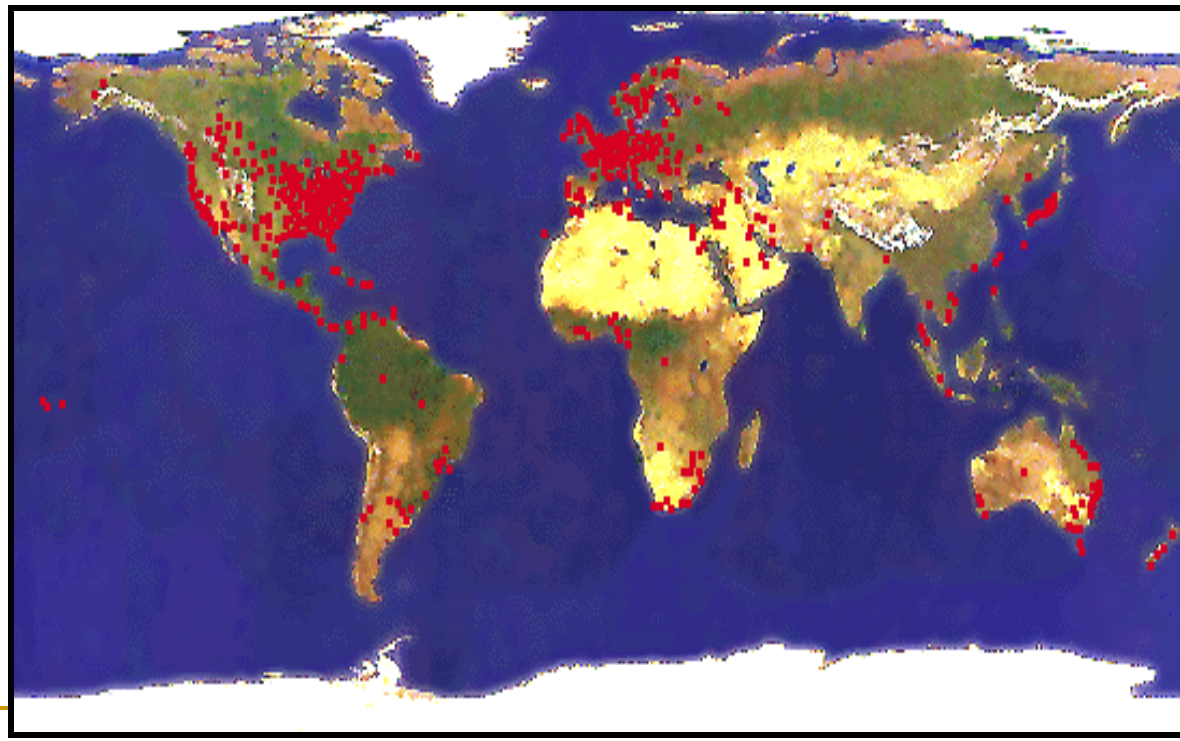
$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

- $f_c$ : probabilité que cette civilisation ait accès aux communications.
- Civilisation doit pouvoir communiquer sur des distances stellaires.
- Rayonnement électromagnétique : la physique est la même partout.
- $f_c$ ne peut être estimé qu'en terme d'expériences humaines en développement technique : < 1

# *En 1980, la Terre était détectable à une distance de 35 a.l.: ~300 étoiles*




En 2000, cette sphère a un rayon de 55 a.l. et illumine ~1200 étoiles !



SETI

Position des émetteur TV

$$N = R_* f_p n_e f_l f_i f_c L$$

- L : durée pendant laquelle ces civilisations sont détectables
- Est ce que ces civilisations se détruisent elles-mêmes ou restent-elles détectables pdt des Millions d'années ?
- L est dominée par la période de développement technologique et est probablement + grd que qq 10 000 ans et < qq Gy.

# Évaluation eq Drake: cas optimiste ☺

| Paramètres | R | $f_p$ | $n_e$ | $f_\ell$ | $f_i$ | $f_c$ | L | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Estimation | 50 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | $5 \times 10^9$ | $2.5 \times 10^{11}$ |
| | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | 50 | | |

2.5 étoiles sur 4 !!!

# Évaluation eq Drake: cas pessimiste ☹

Paramètres

Estimation

| R | $f_p$ | $n_e$ | $f_\ell$ | $f_i$ | $f_c$ | L | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 5 | 0.1 | 0.1 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 100 | $5 \times 10^{-6}$ |
| 5 | 0.5 | 0.05 | $5 \times 10^{-4}$ | $5 \times 10^{-6}$ | $5 \times 10^{-8}$ | | |

Jamais 2 civilisations en même temps !!!

# Évaluation eq Drake: cas moyen 😐

| Paramètres | R | $f_p$ | $n_e$ | $f_\ell$ | $f_i$ | $f_c$ | L | N |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Estimation | 10 | 0.5 | 0.89 | 0.5 | 0.7 | 0.6 | $1 \times 10^6$ | $9.4 \times 10^5$ |
| | 10 | 5 | 4.45 | 2.23 | 1.56 | 0.94 | | |

1 étoiles sur 40000 !!!

- A vous d'évaluer votre équation de Drake !!!
- Aucune réponse n'est mauvaise. Il faut simplement que l'on puisse exister et N ne peut pas être + grd que le nb d'étoiles.
- Éventuellement permet de mettre des limites sur L.