

Deux approches possibles pour le savoir:

1. Programme SETI de recherches de signaux électromagnétiques « intelligents »
2. Détection d'exoplanètes et de traces de vie sur ces exoplanètes (14.4)

### Formule de Drake

Estimation du nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie

Programme SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence)

Planètes extra-solaires (ou exoplanètes) (14.4)

Méthodes de détection : interférométrie infrarouge annulante  
effet Doppler  
transits  
astrométrie

Résultats et surprises:- Jupiters chauds  
- diagramme excentricité - période identique pour les exoplanètes et les compagnons stellaires, malgré des mécanismes de formation différents

## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

Formule de Drake (1961) ou comment fractionner notre ignorance!

Nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie:

$$N = R f L$$

où

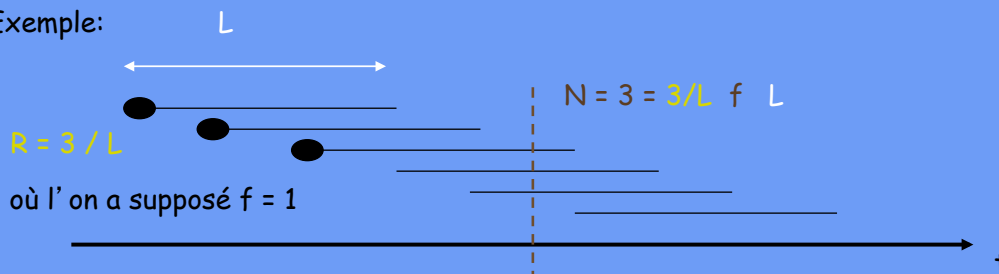
$R$  = rythme annuel moyen de formation d'étoiles de type solaire dans la Galaxie  
(de l'ordre de 1 par an)

$f$  = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques

$L$  = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables

( $L > 100$  ans, à en juger par l'Humanité)

Exemple:



## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

Formule de Drake (1961) ou comment fractionner notre ignorance!

Nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie:

$$N = R f L$$

où

$R$  = rythme annuel moyen de formation d'étoiles de type solaire dans la Galaxie  
(de l'ordre de 1 par an)

$f$  = fraction des étoiles de type solaire de la Galaxie abritant un système planétaire abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques

$L$  = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables

( $L > 100$  ans, à en juger par l'Humanité)

Exemple:

$$L = 10\,000 \text{ ans}, R = 1/\text{an}, f = 0.1 : N = 1000$$

réparties dans un disque de diamètre  $D = 100\,000 \text{ a-l}$

→ Distance moyenne  $d$  entre civilisations :

$$\pi d^2 = \pi D^2 / 1000 \rightarrow d = D / 1000^{1/2} = 3160 \text{ a-l}$$

Il y a environ 10 millions d'étoiles de type solaire dans cette surface !

## 5. Sommes-nous seuls?

Formule de Drake (1961) ou comment fractionner notre ignorance!

? Nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie:

$$N = R \cdot f_p \cdot n_e \cdot f_v \cdot f_i \cdot f_c \cdot L$$

facteurs astronomiques
biologiques
sociologiques

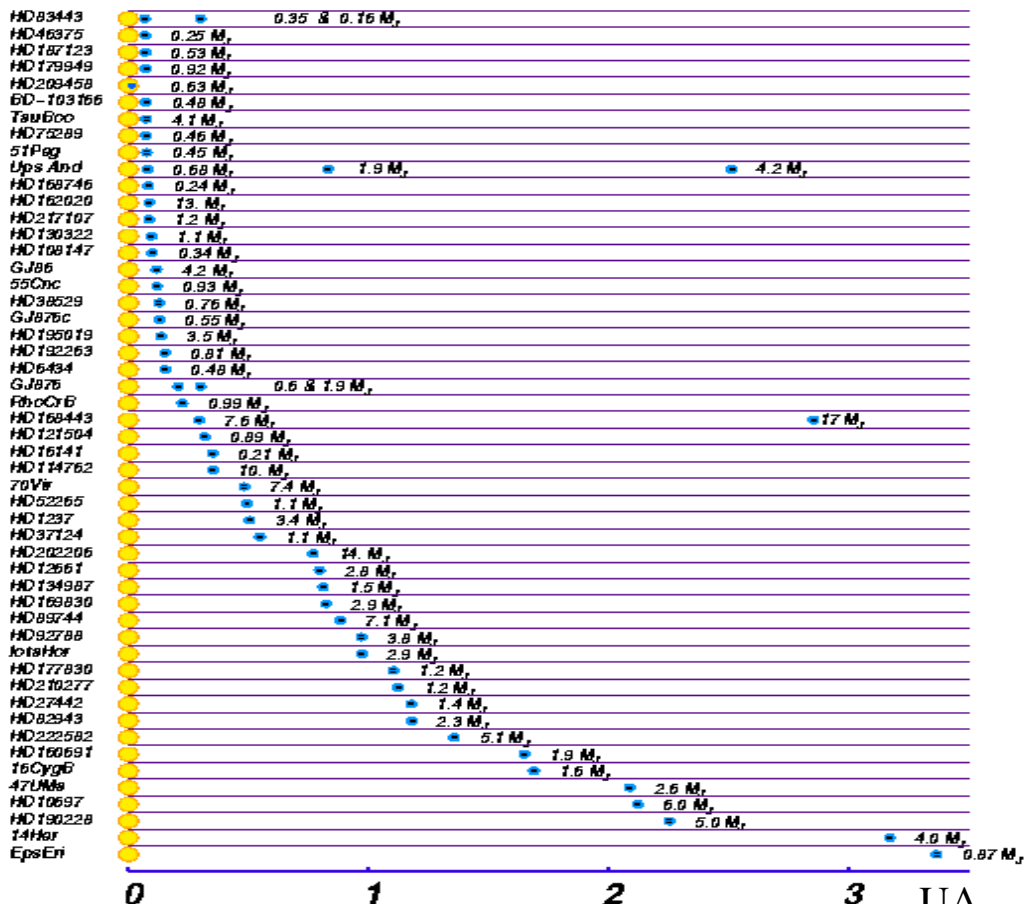
où

$f_p$  = fraction des étoiles de la Galaxie abritant un système planétaire  
(au moins 10 à 20% pour les étoiles de type solaire)

*Rappel: Planètes: sous-produit naturel de la formation des étoiles!*

$n_e$  = nombre moyen de planètes par système

EXOPLANÈTES



## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

Formule de Drake (1961) ou comment fractionner notre ignorance!

Nombre de civilisations, ayant développé une technologie électromagnétique, actuellement présentes dans notre Galaxie:

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

facteurs astronomiques
biologiques
sociologiques

où

$R$  = rythme annuel moyen de formation d'étoiles de type solaire dans la Galaxie  
(de l'ordre de 1 par an)

$f_p$  = fraction des étoiles de la Galaxie abritant un système planétaire  
(au moins 10 à 20% pour les étoiles de type solaire)

*Rappel: Planètes: sous-produit naturel de la formation des étoiles!*

$n_e$  = nombre moyen de planètes par système

$f_v$  = fraction des planètes abritant de la vie

$f_i$  = fraction des planètes abritant la vie où l'intelligence s'est développée

$f_c$  = fraction des planètes abritant une vie intelligente ayant développé des moyens de télécommunications électromagnétiques

$L$  = durée durant laquelle ces civilisations restent détectables

( $L > 100$  ans, à en juger par l'Humanité)

## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

La formule de Drake

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

Taux de formation d'étoiles de type solaire:  $R \sim 1$  / an dans l'ensemble de la Galaxie

Formation des planètes = sous-produit naturel de la formation des étoiles:  $f_p = 1$ ?

Systèmes planétaires pas rares:  $n_e = 2, 3, \dots, 8, \dots$

Conditions propices au développement de la vie:  $f_v$  ? de type terrestre !

ZCH = zone continuellement habitable

- Zone habitable (écosphère): eau liquide possible (p. 577)

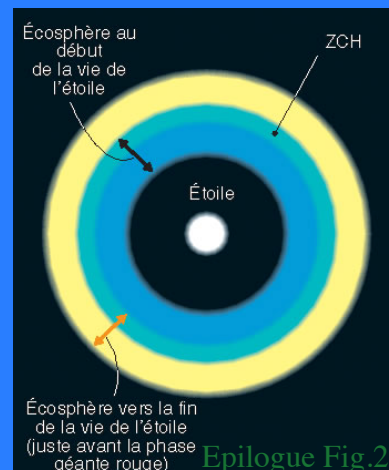
[voir leçon % Température d'équilibre d'une planète]

$$T_{eq} (K) = 280 \left( \frac{(1 - Albedo) L(L_{\odot})}{D^2 (UA)} \right)^{1/4}$$

Attention:  $L$  augmente au cours de la vie de l'étoile!

Etoiles de type solaire les plus favorables:

- si étoile plus froide, écosphère trop proche de l'étoile (et alors radiations de la couronne et des protubérances en quantités létales)
- si étoile plus chaude, durée de vie trop courte pour développement vie



Epilogue Fig.2

## 5. Sommes-nous seuls?

Conditions propices au développement de la vie

Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Eau sur Mars: calottes polaires (pp.484-485)

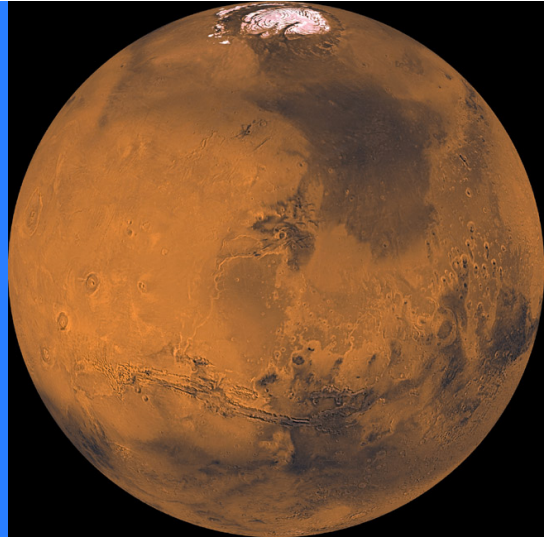
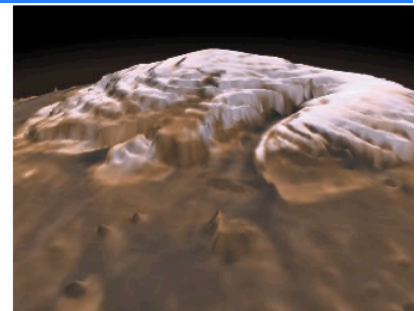
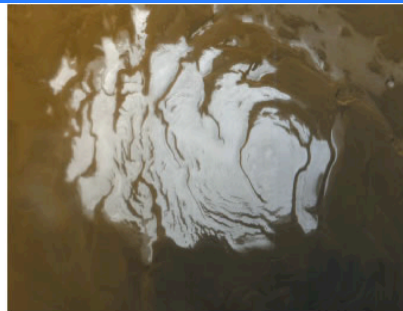


Fig. 12.22

Calotte polaire Nord durant son extension maximale

Calotte polaire Sud

Calotte polaire Nord (dimension verticale exagérée)



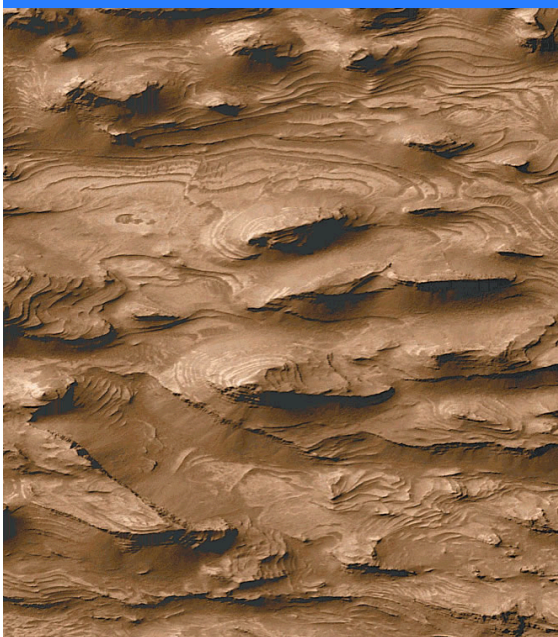
## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 12.6

Conditions propices au développement de la vie

Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

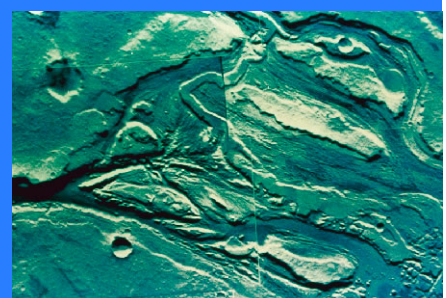
Eau sur Mars: dans le passé (pp.484-485)



Lorsque l'atmosphère était plus dense dans le passé (elle s'échappe facilement à cause de la faible gravité martienne),

l'effet de serre était plus important, donc température plus clémente, donc eau liquide

(qui ne s'évapore pas immédiatement comme lorsque la pression atmosphérique est trop faible)



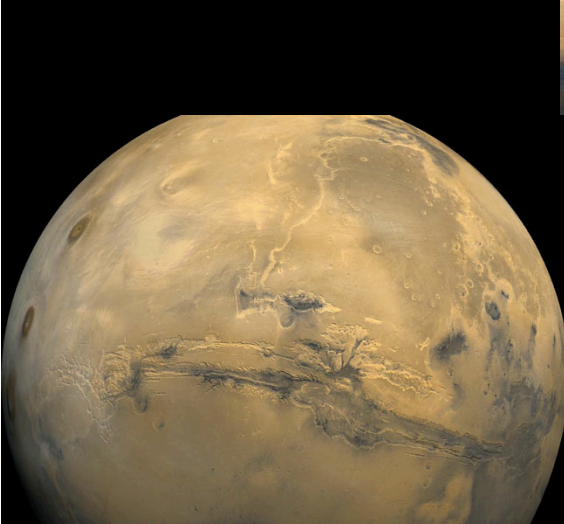
Figs. 12.25, 12.26



Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Grand Canyon du Colorado

Grand Canyon Valles Marineris



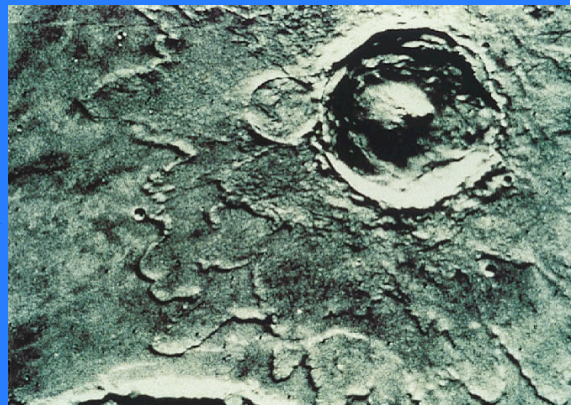
Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Eau sur Mars: eau/glace souterraine?



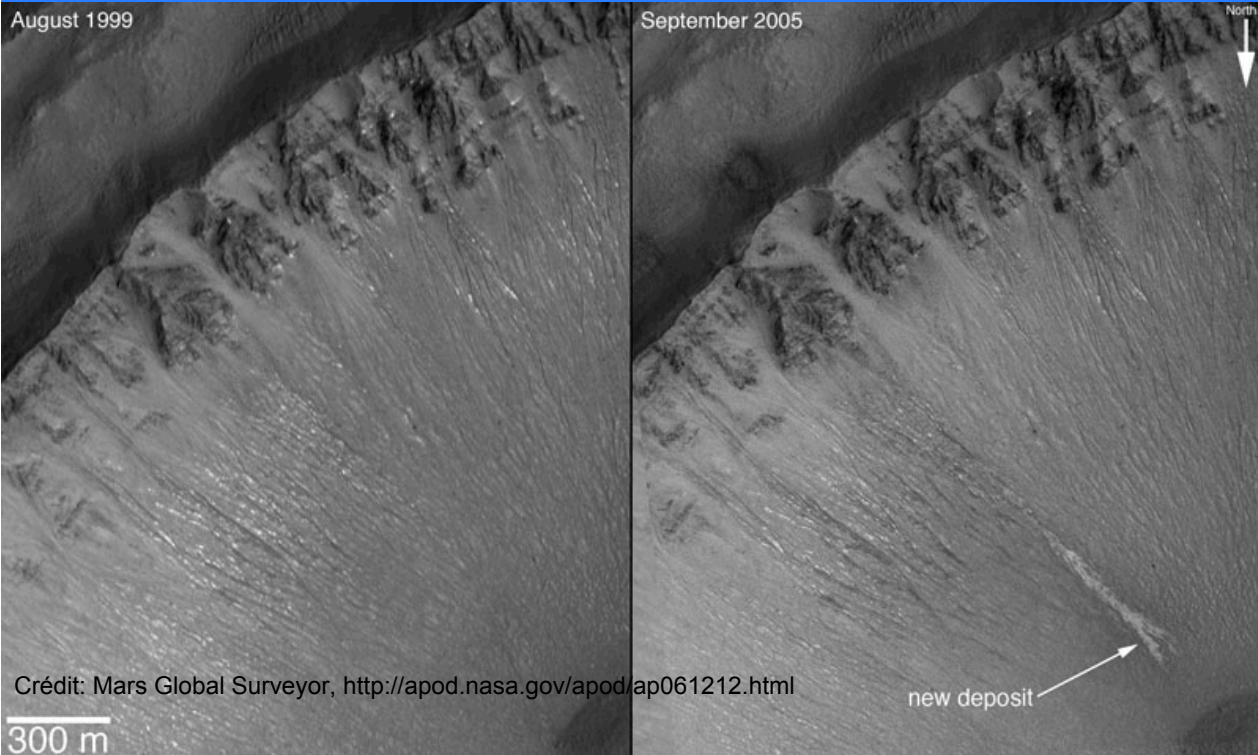
Fonte de la glace souterraine suite à un impact météoritique et coulées de boue

Fonte de la glace souterraine suite au volcanisme, et écoulement eau liquide



Figs. 12.23, 12.24

**Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?**  
**Eau sur Mars: eau/glace souterraine?**



Crédit: Mars Global Surveyor, <http://apod.nasa.gov/apod/ap061212.html>

**5. Sommes-nous seuls?**

Sect. 12.6

Conditions propices au développement de la vie

**Y a-t-il (eu) de la vie sur Mars ?**

**Expériences sondes Viking I,II (1976)**

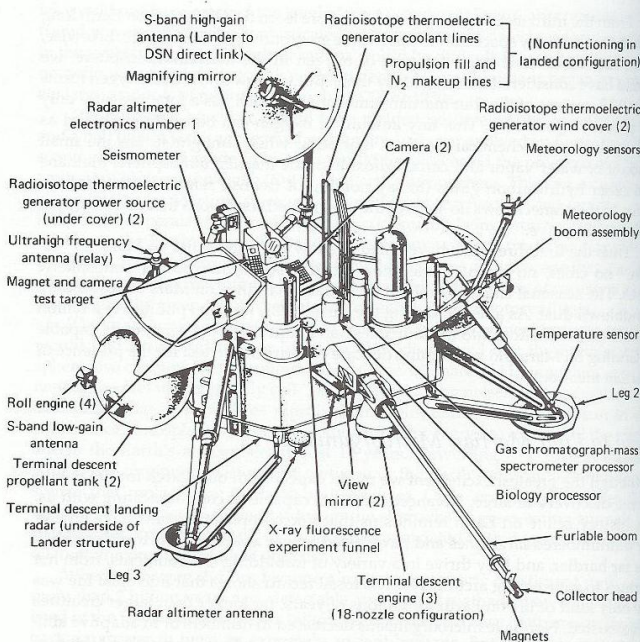


Fig. 12.27

Crédit: The Search for Life in the Universe, D. Goldsmith, T. Owen, 2001, Univ. Science Books

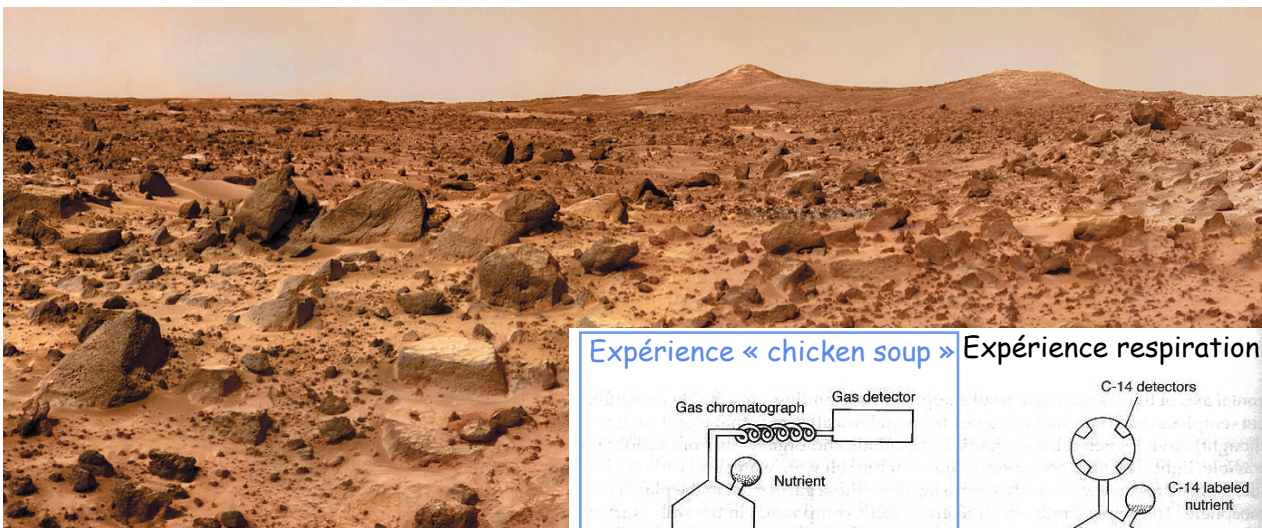
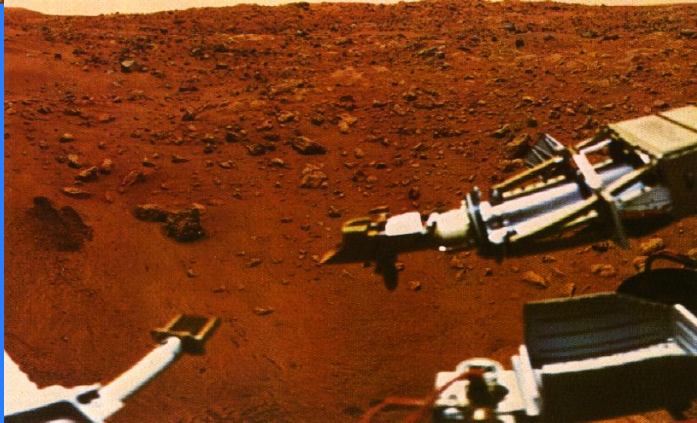


**Y a-t-il (eu) de la vie sur Mars ?**  
**Expériences sondes Viking I,II (1976)**  
**sur les prélèvements de sol**

**1. Traces de molécules organiques ?**

**Non** (< 1 ppb)  
 seulement H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>

Figs. 12.27,12.28

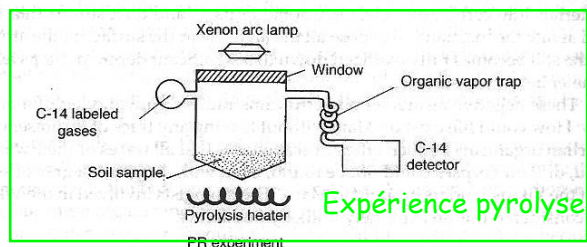
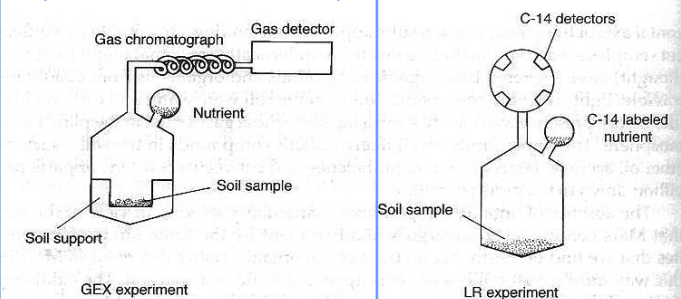


**Y a-t-il (eu) de la vie sur Mars ?**  
**Expériences sondes Viking I,II (1976)**  
**sur les prélèvements de sol**

**2. Traces de métabolisme ?**

**Oui?**  
 mais interprétation sujette à caution!  
 résultat positif lié à des réactions  
 chimiques plutôt que  
 métaboliques.

Expérience « chicken soup »      Expérience respiration



Crédit: The Search for Life in the Universe, D. Goldsmith, T. Owen, 2001, Univ. Science Books



## 5. Sommes-nous seuls? Sect. 13.2

Conditions propices au développement de la vie

Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Eau sur Europe: eau liquide sous la glace?

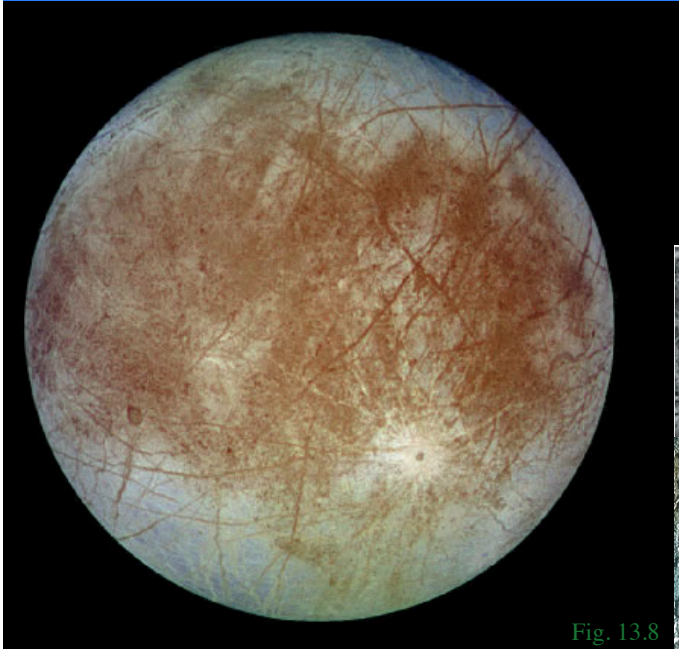
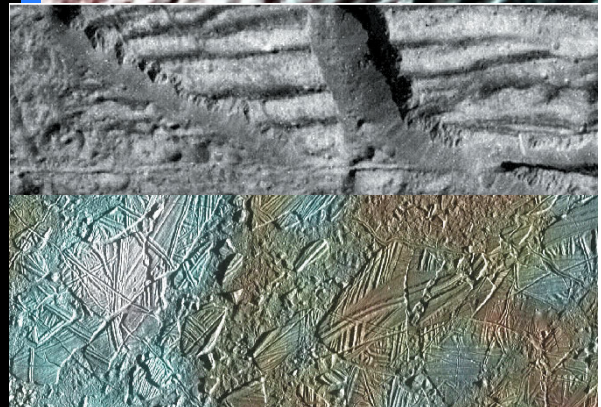


Fig. 13.8

Vue satellite de la banquise Arctique  
<http://www.passporttothepoles.org>



## 5. Sommes-nous seuls? Sect. 13.2

Sect. 13.2

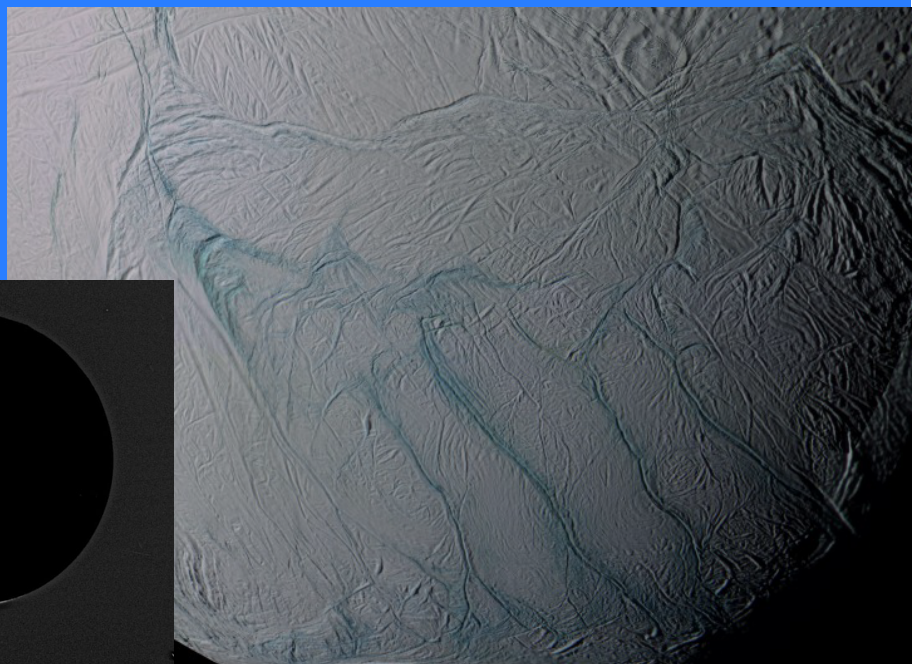
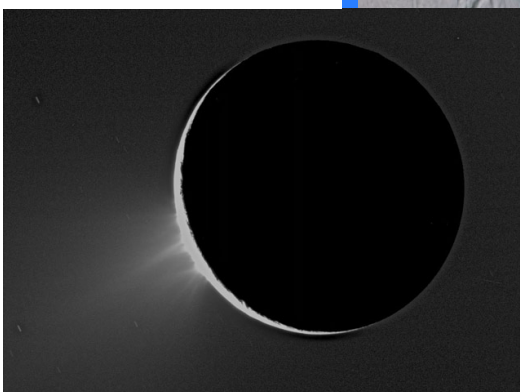
Conditions propices au développement de la vie

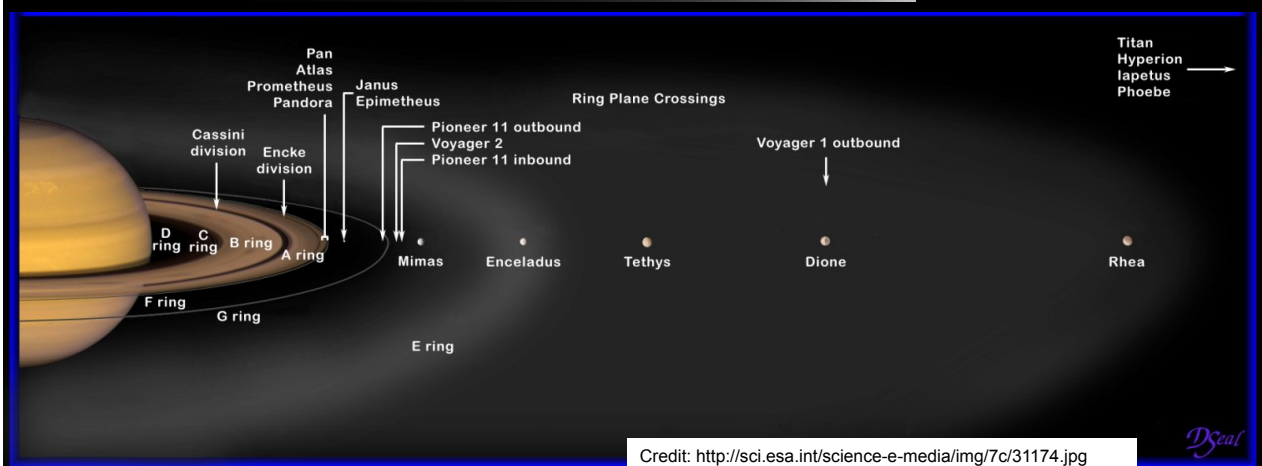
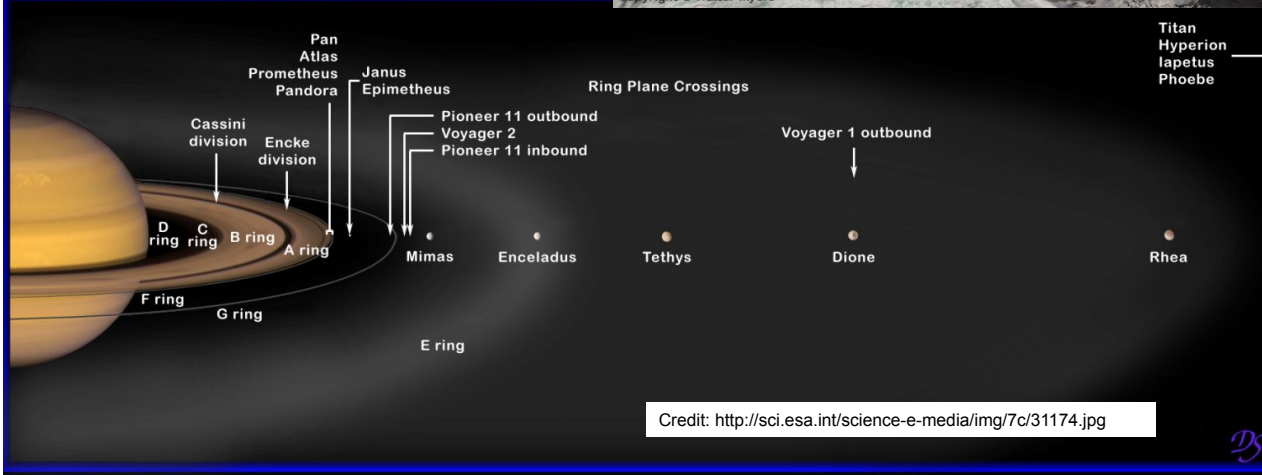
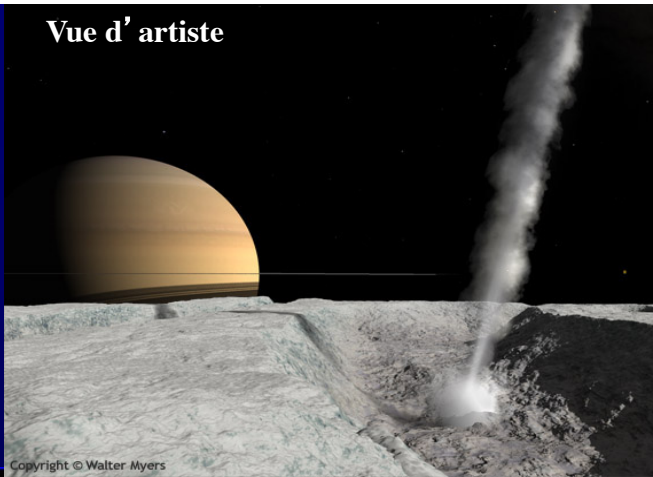
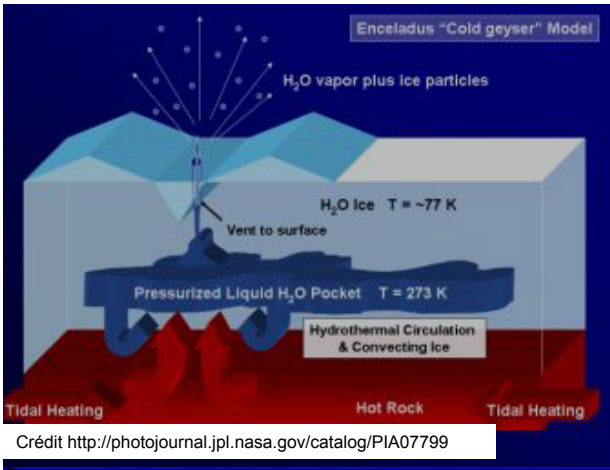
Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Encelade (Saturne): eau liquide quelques centaines de mètres sous la glace?

Crédit:

<http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap051205.html>





## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

Formule de Drake

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

Taux de formation d'étoiles **de type solaire** :  $R \sim 1 / \text{an}$  dans l'ensemble de la Galaxie

Formation des planètes = sous-produit naturel de la formation des étoiles:  $f_p = 1?$

Systèmes planétaires pas rares:  $n_e = 2, 3, \dots, 8, \dots$

Conditions propices au développement de la vie:  $f_v ?$

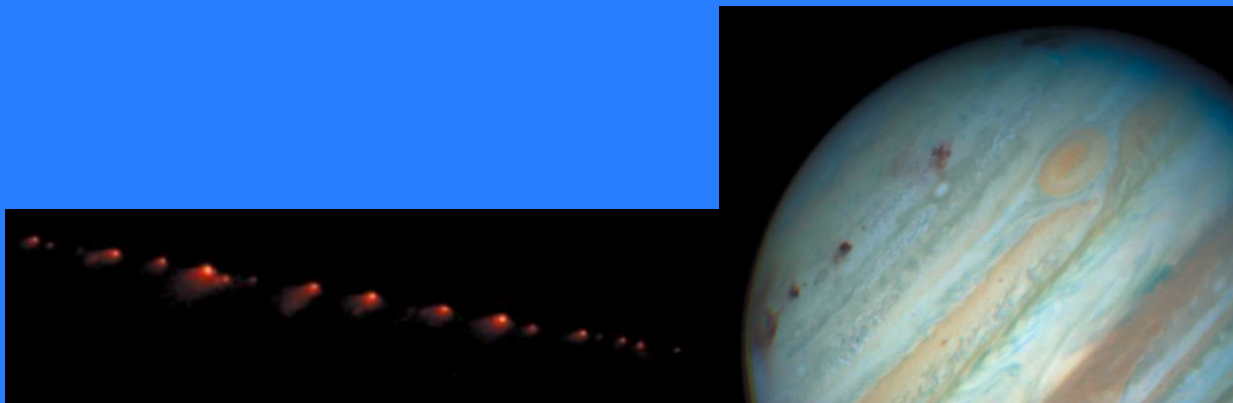
- **Zone habitable (écosphère): eau liquide possible** (p. 577)

Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Eau sur Mars: calottes polaires et eau souterraine? (p.484)

Eau liquide sous la glace d'Europe ou d'Encelade

- **Rôle protecteur des planètes géantes externes** : Jupiter et Shoemaker-Levy 9



## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

Formule de Drake

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

- Taux de formation d'étoiles **de type solaire** :  $R \sim 1 / \text{an}$  dans l'ensemble de la Galaxie

- Formation des planètes = sous-produit naturel de la formation des étoiles:  $f_p = 1?$

- Systèmes planétaires pas rares:  $n_e = 2, 3, \dots, 8, \dots$

- Conditions propices au développement de la vie:  $f_v ?$

- **Zone habitable (écosphère): eau liquide possible** (p. 577)

Y a-t-il de l'eau liquide ailleurs dans le système solaire ?

Eau sur Mars: calottes polaires et eau souterraine? (p.484)

Eau liquide sous la glace d'Europe ou d'Encelade

- **Rôle protecteur des planètes géantes externes** : Jupiter et Shoemaker-Levy 9

Rôle des impacts dans l'évolution biologique :

transition Crétacé-Tertiaire et impact du Yucatan (65  $10^6$  ans; Chicxulub)

transition Permien-Triassique et impact du Manicougan (210  $10^6$  ans)?

Perturbation du Nuage de Oort par étoiles voisines

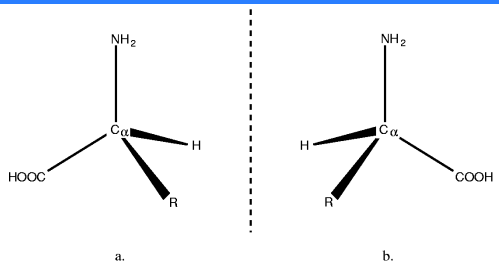
- **Orientation de l'axe de rotation à peu près perpendiculaire au plan de l'orbite**
- **Rôle stabilisateur de la Lune sur la direction de l'axe de rotation terrestre**
- **Effet protecteur du champ magnétique terrestre % particules ionisantes**

## Formule de Drake

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

- Conditions propices au développement de la vie:  $f_v$ ? (suite)

- ? **Théorie de la panspermie** [Arrhenius (1859-1927), Hoyle-Wickramasinghe]  
La Terre a-t-elle étéensemencée par des acides aminés? venus de l'espace?



Glycine dans le milieu interstellaire?

Acides aminés dans météorites (Murchison - Australie - 1969), avec excès énantiomérique

Origine de l' **homochiralité des acides aminés biologiques** ?

- Conditions propices au développement d'une intelligence:  $f_i$

?????



## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

### Formule de Drake

$$N = R f_p n_e f_v f_i f_c L$$

La meilleure image de l'OVNI de la 'vague belge' (1989-1990)

Document Guy Mossay/ERM/A.Acheroy

<http://www.astrosurf.com/luxorion/ovni-rencontre-1type2.htm>

Conditions propices au développement d'une civilisation technologique:  $f_c$

**Le paradoxe de Fermi** : « Mais où sont-ils ? »

« Ils » sont là!

OVNIs : le périlleux équilibre entre crédulité / ouverture d'esprit / esprit critique

Une petite fraction (5%?) de témoignages irréductibles à des phénomènes connus?

**Le rapport COMETA au gouvernement français (1999)**

<http://www.institut-pericles.com/npds/download.php?op=geninfo&did=27>

et son analyse critique (partielle) :

<http://www.unice.fr/zetetique/articles/articles.html#ovnis>

Difficulté d'appliquer la méthode scientifique (cartésienne) à ces phénomènes

non reproductibles, dépendants du témoignage d'un observateur

Existence (éventuelle) du phénomène OVNI n'implique pas son origine extraterrestre!

« Ils » sont là!

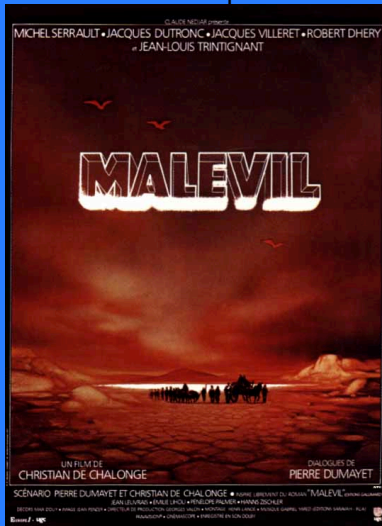
OVNIs : le périlleux équilibre entre crédulité / ouverture d'esprit / esprit critique  
Existence (éventuelle) du phénomène n'implique pas une origine extraterrestre!

... mais « ils » nous évitent

Terre = réserve naturelle protégée, à l'écart des visites d'ET ?

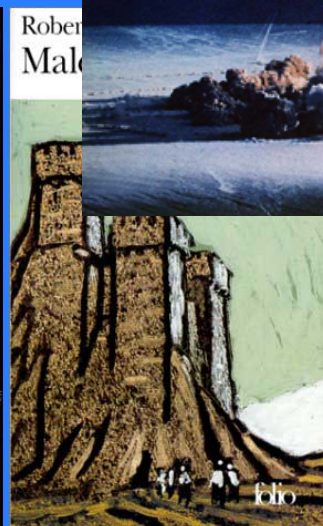
« Ils » ont disparu

Risque d'auto-destruction, destruction éco-système de civilisations technologiques,  
épuisement des ressources énergétiques (cf. *Malevil*, Robert Merle)

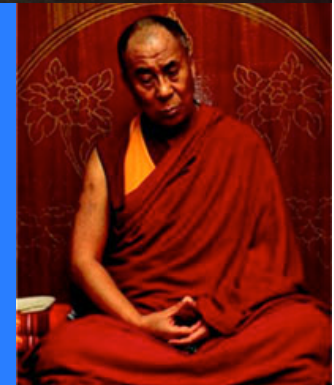


« Ils » méditent et ne voyagent pas...

Risque d'auto-destruction



Avons-nous un autre choix  
que de nous changer  
nous-même afin de  
changer le monde ?



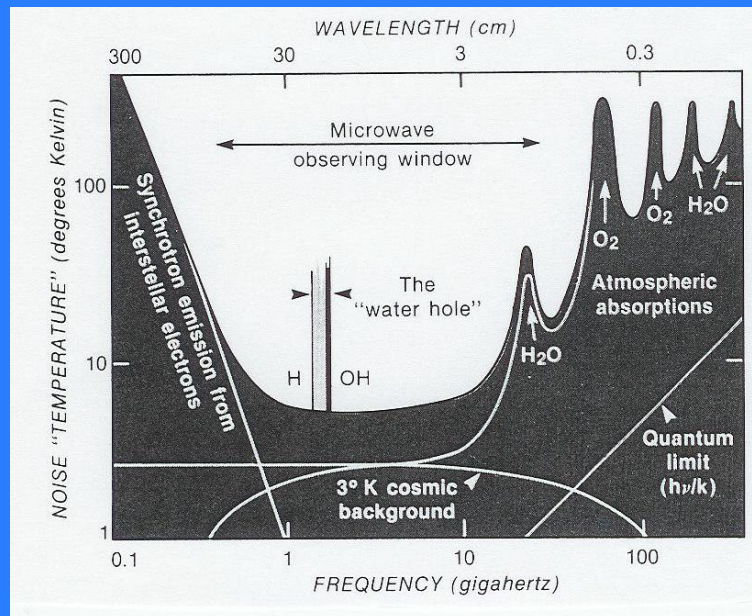
« Ils » méditent et ne voyagent pas...

## 5. Sommes-nous seuls?

Chap. Epilogue

### SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence

Recherche de signaux monochromatiques ( $\Delta\nu < 1$  Hz) dans la gamme des micro-ondes



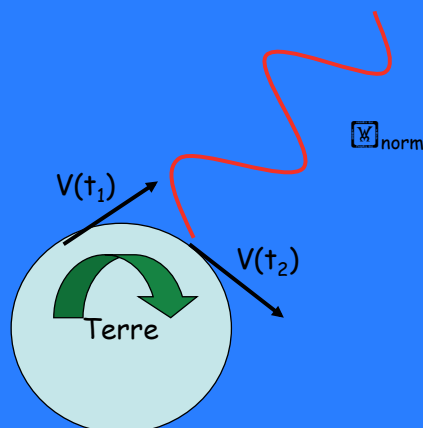
## 5. Sommes-nous seuls?

### SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence

Recherche de signaux monochromatiques ( $\Delta\nu < 1$  Hz) dans la gamme des micro-ondes, sur plusieurs milliards de fréquences simultanément

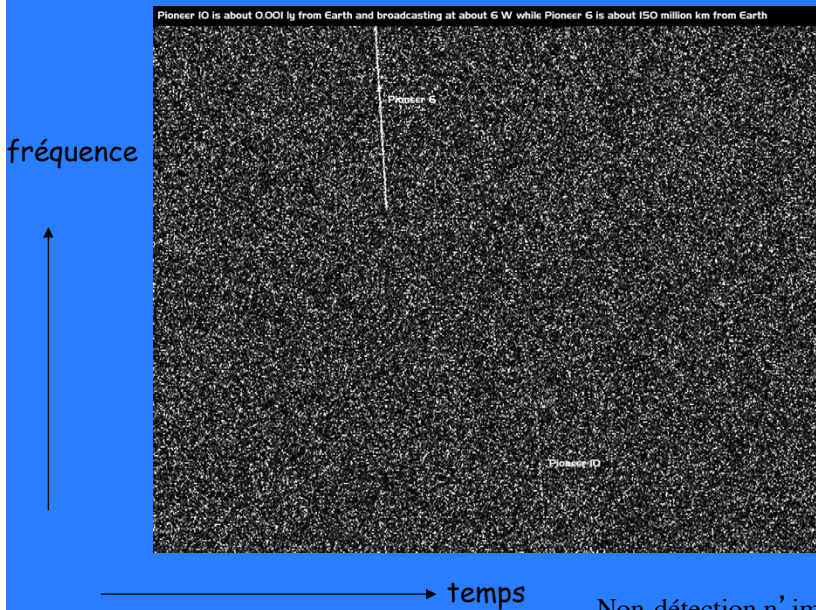
La fréquence (ou longueur d'onde) d'un tel signal monochromatique dérive lentement, à cause de l'effet Doppler (accélération centripète liée à la rotation/révolution de la Terre)

$$d(t) = \lambda_{\text{obs}}(t) / \lambda_{\text{norm}} = 1 + v(t) / c$$



# 5. Sommes-nous seuls?

## SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence



2 signaux suspects:  
Wow! (1977)  
août 2004

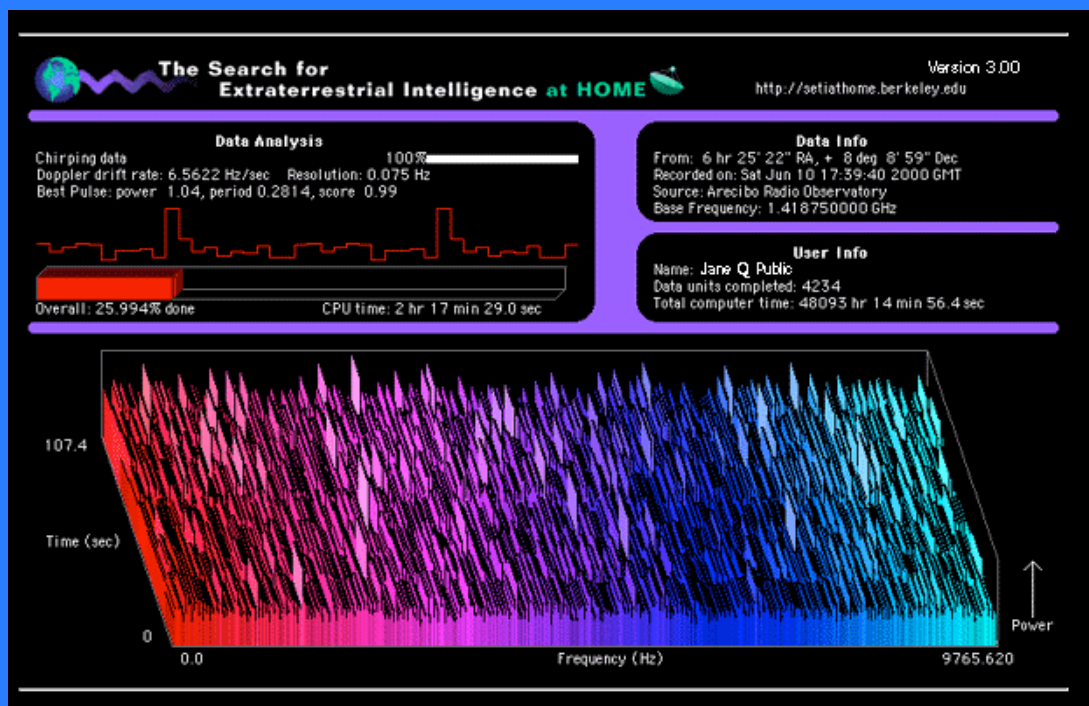
Non-détection n' implique pas absence de civilisations:

- Civilisations « méditatives » non-technologiques
- Civilisations technologiques quasi silencieuses électromagnétiquement (sauf radars)

# 5. Sommes-nous seuls?

## SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence

Seti @ home : <http://setiathome.ssl.berkeley.edu>



## 5. Sommes-nous seuls?

### SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence

**Table 1 : Propriétés de quelques programmes SETI radio**

Projet	Date	Gamme de fréquences (MHz)	Nombre d'étoiles ou fraction du ciel	Seuil de détection (W m <sup>-2</sup> )	PIE à 4 a-l (W)	PIE à 1000 a-l (W)
Square Kilometer Array	2010	150 – 20000	100 000	8 10 <sup>-29</sup>	1 10 <sup>6</sup>	9 10 <sup>10</sup>
Phoenix	1995-2004	1200 – 3000	700	1 10 <sup>-26</sup>	2 10 <sup>8</sup>	1 10 <sup>13</sup>
Serendip IV	1996-	1420 – 1620	28%	1 10 <sup>-24</sup>	2 10 <sup>10</sup>	1 10 <sup>15</sup>
Serendip III	1992-1998	424 – 436	28%	3 10 <sup>-25</sup>	5 10 <sup>9</sup>	3 10 <sup>14</sup>
META	1985-1995	1418 – 1421	68%	2 10 <sup>-23</sup>	3 10 <sup>11</sup>	2 10 <sup>16</sup>
Ohio Sate Univers.	1973-1986	1420.4	68%	1 10 <sup>-21</sup>	2 10 <sup>14</sup>	1 10 <sup>19</sup>
OZMA	1960	1420 – 1420	2 (t Cet, e Eri)	4 10 <sup>-22</sup>	8 10 <sup>12</sup>	4 10 <sup>17</sup>

1 a-l = 1 année-lumière = 9.46 10<sup>15</sup> m.

PIE = puissance *isotrope* équivalente que doit posséder un émetteur à la distance de 4 a-l (soit l'étoile la plus proche) ou 1000 a-l (contenant de l'ordre de un million d'étoiles de type solaire) pour être détecté. A titre indicatif, les puissances isotropes équivalentes PIE d'un certain nombre d'émetteurs terrestres sont donnés dans la Table 2.

Le seuil de détection  $S_d$  est relié à la distance  $R$  de la source et à sa puissance isotrope équivalente par la relation  $S_d = PIE / (4\pi R)^2$ .

Adapté de <http://www.ras.ucalgary.ca/SKA/science/node33.html>

et [http://astrop0.ulb.ac.be/Publications/aj\\_seuls.html](http://astrop0.ulb.ac.be/Publications/aj_seuls.html)

## 5. Sommes-nous seuls?

### SETI: Search for Extraterrestrial Intelligence

Source	Gamme de fréquences	Bande passante (Br)	Température du système + ciel (Fig.10) (T <sub>sys</sub> , K)	PIE (W)	Seuil de détection (R <sub>d</sub> )
Radio AM (signal)	530 – 1600 kHz	10 kHz	300	10 <sup>-5</sup>	12 UA
Radio AM (porteuse)	530 – 1600 kHz	1 Hz	300	10 <sup>-5</sup>	1200 UA
Radio FM	88 – 108 MHz	150 kHz	100	5 10 <sup>6</sup>	38 UA
Image TV UHF	470 – 806 MHz	6 MHz	50	5 10 <sup>6</sup>	9 UA
<b>Porteuse TV UHF</b>	<b>470 – 806 MHz</b>	<b>0.1 Hz</b>	<b>50</b>	<b>5 10<sup>6</sup></b>	<b>1 a-l</b>
Porteuse Pioneer 10	2.295 GHz	1 Hz	20	3.4 10 <sup>4</sup>	0.04 a-l
Radar météo	2.8 GHz	0.63 MHz	20	3.2 10 <sup>10</sup>	0.05 a-l
<b>Arecibo (émetteur)</b>	<b>2.38 GHz</b>	<b>0.01 Hz</b>	<b>20</b>	<b>10<sup>12</sup></b>	<b>2343 a-l</b>

1 a-l = 1 année-lumière = 9.46 10<sup>15</sup> m = 63235 UA

1 UA = 1 unité astronomique de distance = distance moyenne Terre – Soleil = 1.496 10<sup>11</sup> m

A titre de comparaison, le demi-grand axe de l'orbite de Pluton s'élève à 39.4 UA.

Adapté de S.A. Kaplan (éditeur), *Extraterrestrial Civilizations: Problems of Interstellar Communication*, NASA TT F-631 (1971).



## 5. Sommes-nous seuls?

Deux approches possibles pour le savoir:

1. Programme SETI de recherches de signaux électromagnétiques  
« intelligents »
2. Détection d'exoplanètes et de traces de vie sur ces exoplanètes  
(Mission Darwin - ESA - vers ??)

## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

Méthodes de détection des exoplanètes

*Il y a d'innombrables soleils  
et d'innombrables terres,  
toutes tournant autour de leur soleil  
comme le font les sept planètes de notre système.  
Nous n'en voyons que les soleils  
parce qu'ils sont les plus grands et les plus lumineux,  
mais leurs planètes nous restent invisibles  
parce qu'elles sont petites et peu lumineuses.  
Les innombrables mondes de l'univers ne sont pas pires  
et moins habités que notre Terre.*

**G. Bruno**

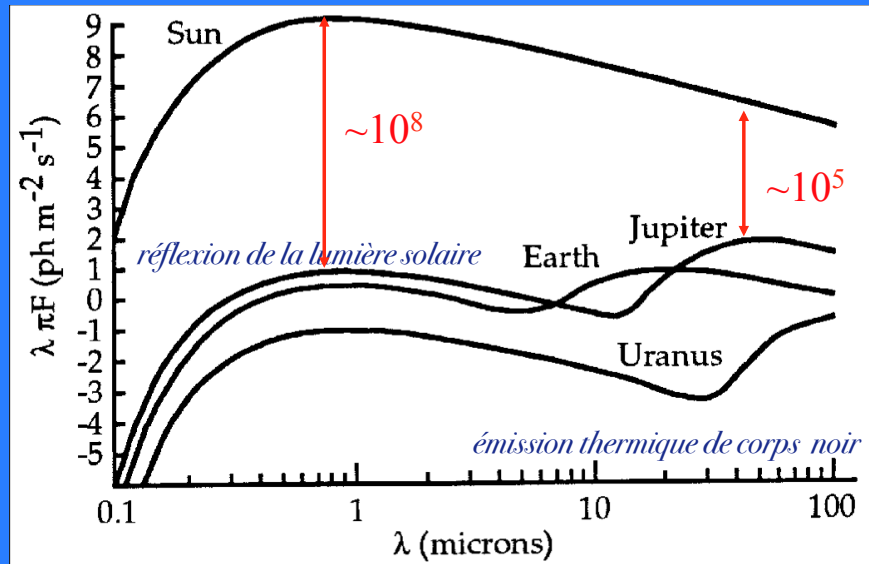
*De L'Infinito Universo e Mundi* (1584)

## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir): **Problème majeur: CONTRASTE**



## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 5.2

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir): **Problème majeur: CONTRASTE**

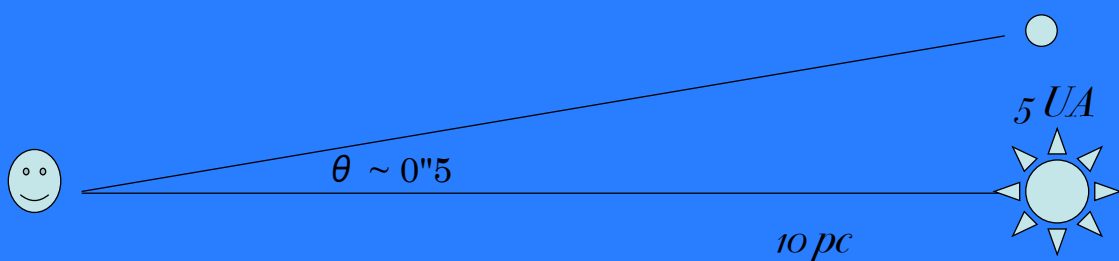
**Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE**

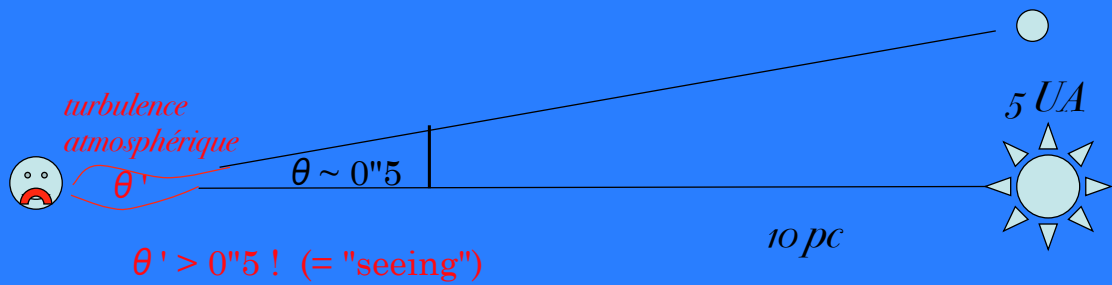
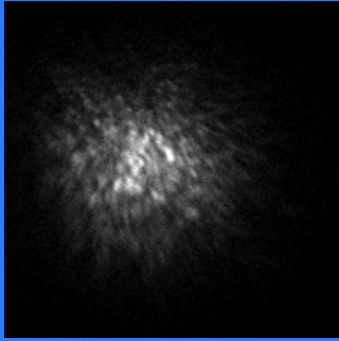
Planète distante de 5 UA de son étoile, à 10 pc (33 a-l) du soleil:  $\theta \sim 0''5$

1 UA ("unité astronomique") = distance moyenne Terre - Soleil

5 UA  $\sim$  distance Jupiter - Soleil

1 pc ("parsec") = 206265 UA = distance à laquelle 1 UA apparaît sous un angle de 1"





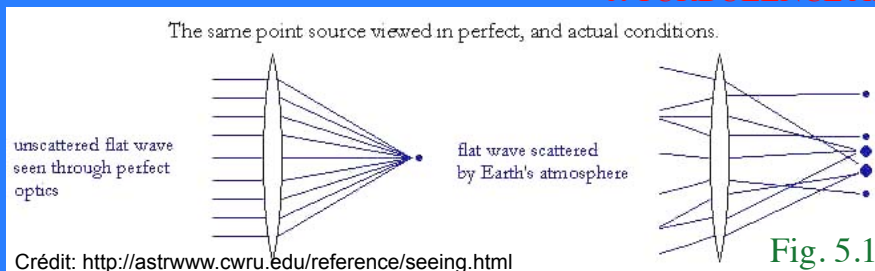
Crédit: <http://www.photonics.ic.ac.uk/speckle/movies.html>

## 5. Sommes-nous seuls?

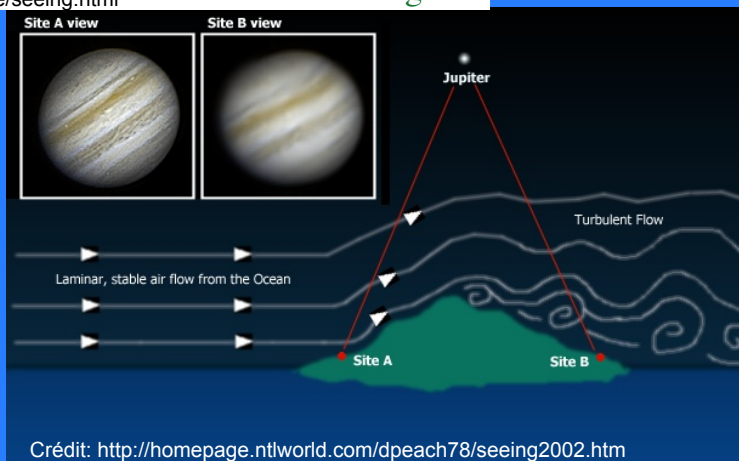
Sect. 5.2, p. 182

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir): **Problème supplémentaire: SEPARATION ANGULAIRE et TURBULENCE ATMOSPHERIQUE**



"seeing"



# 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

## Méthodes de détection des exoplanètes

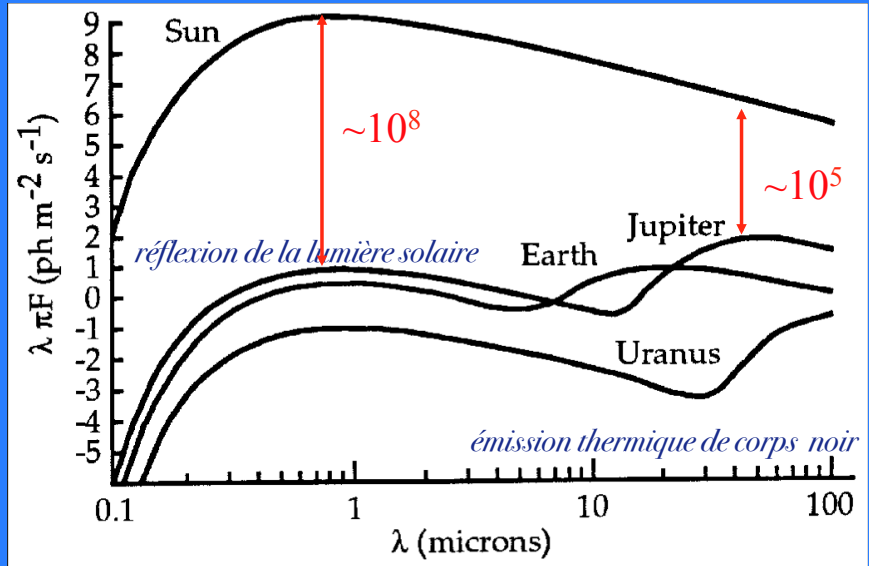
Méthodes directes (les voir): **Problème majeur: CONTRASTE**

**Problèmes supplémentaires: SEPARATION ANGULAIRE et TURBULENCE ATMOSPHERIQUE**

Ces trois problèmes disparaissent/sont atténués par une observation

- dans l'infrarouge
- depuis l'espace

➡ Interférométrie infrarouge « annulante »



# 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 5.2

## Méthodes directes de détection des exoplanètes



Copyright: Alcatel Space Industries

interférométrie infrarouge « annulante »

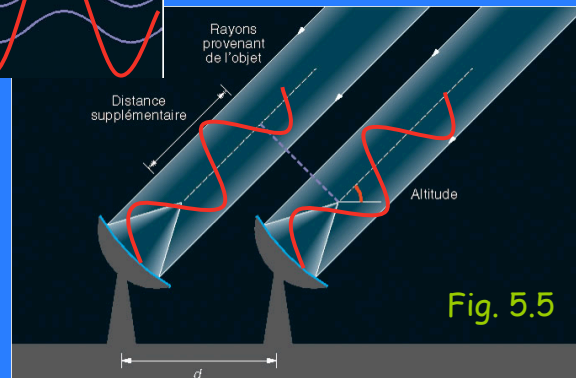
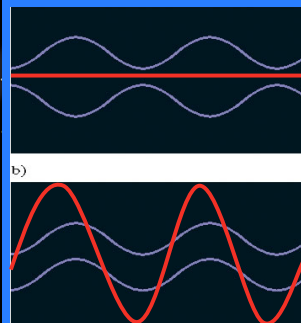
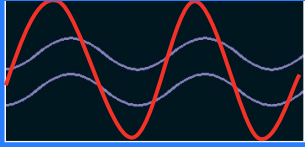


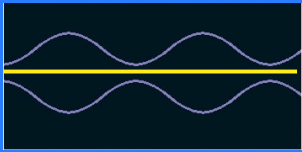
Fig. 5.5

concordance de phases



Exoplanète  
située sur l'axe optique

Etoile  
située hors de l'axe optique



opposition de phases

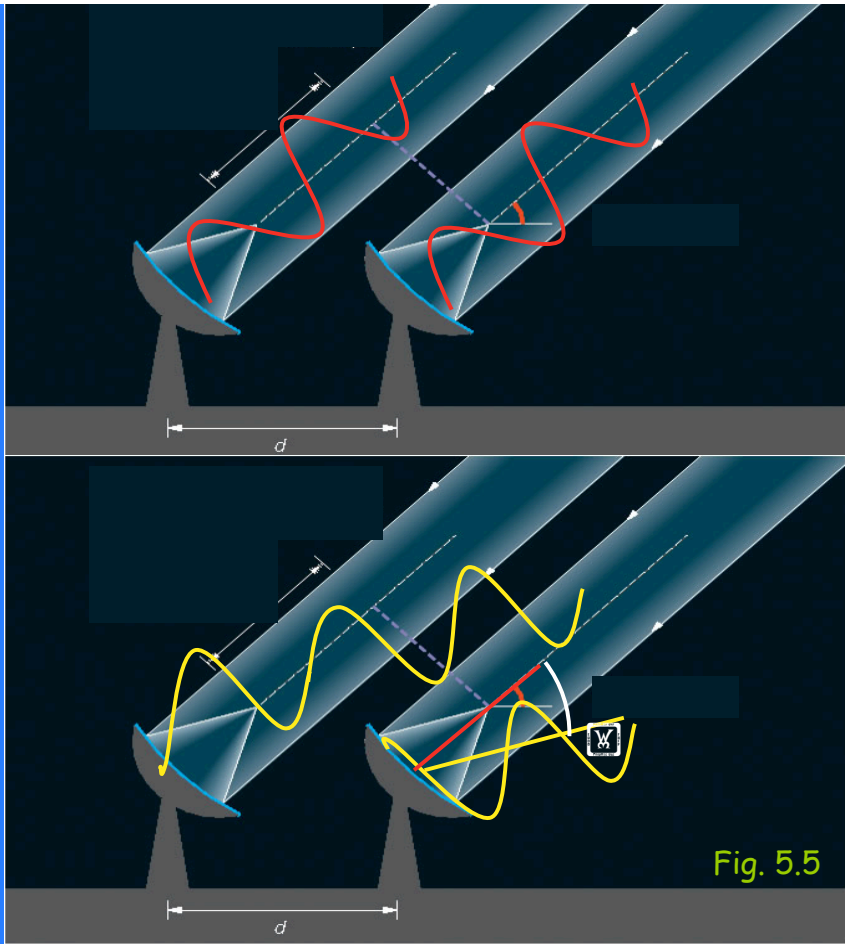


Fig. 5.5

## 5. Sommes-nous seuls?

Sects. 5.2 et 14.4

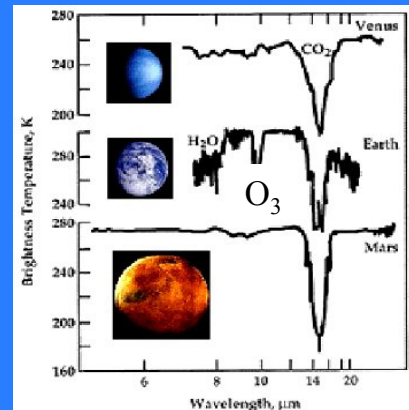
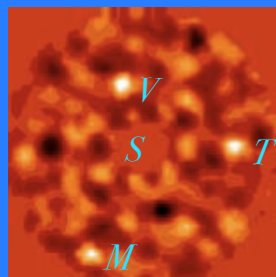
Méthodes directes de détection des exoplanètes

interférométrie infrarouge « annulante »



Projet de mission (*Darwin*)  
de l'Agence Spatiale Européenne  
Non retenue à ce jour,  
car technologiquement trop délicate !

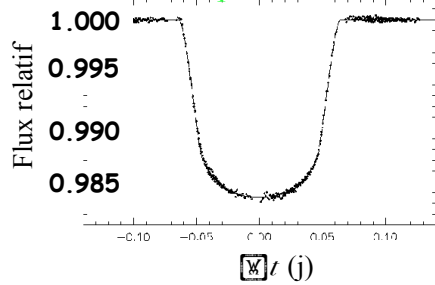
Simulation de l'observation par  
*Darwin* (60h) du système solaire  
vu à 10 pc



## 5. Sommes-nous seuls?

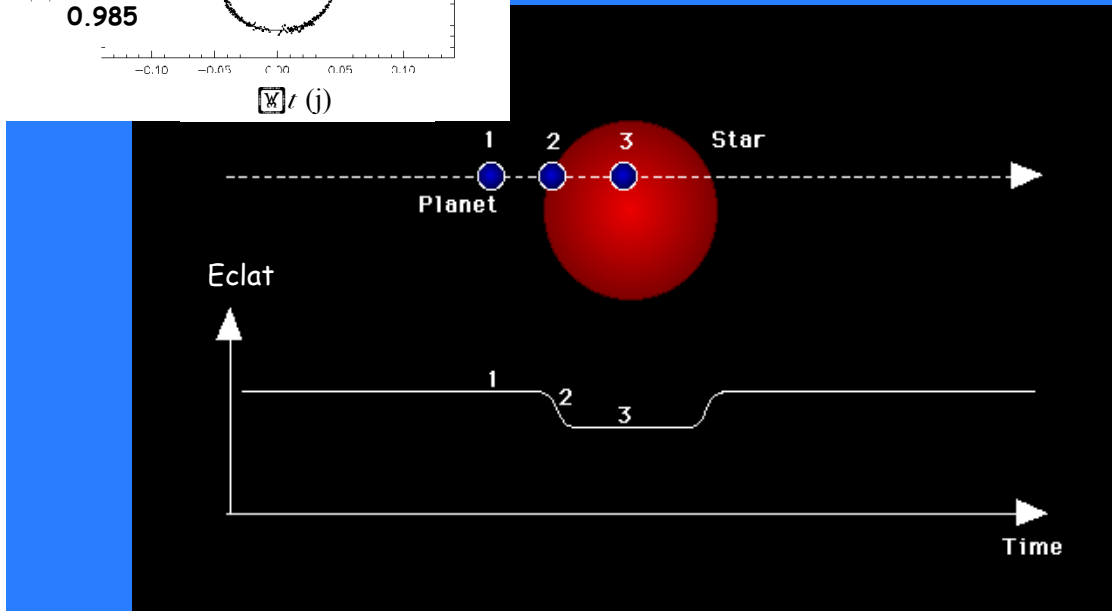
Méthodes de détection des exoplanètes

Le premier exemple : HD 209458



Méthodes indirectes (voir leur effet):

Transits



## 5. Sommes-nous seuls?

Méthodes indirectes de détection des exoplanètes

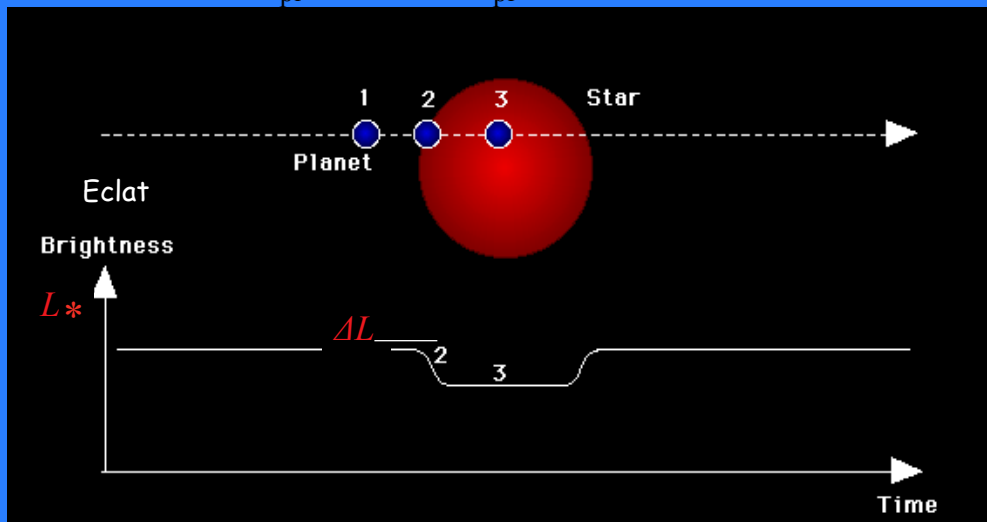
Transits

→ rayon planète

$\Delta L$  = baisse d'éclat lié au passage du disque planétaire (d'aire  $\pi R_{pl}^2$ ) devant le disque stellaire

Le disque stellaire présente une brillance de surface égale à  $L_* / \pi R_*^2$

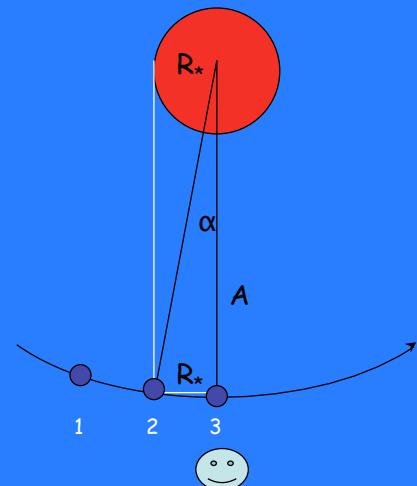
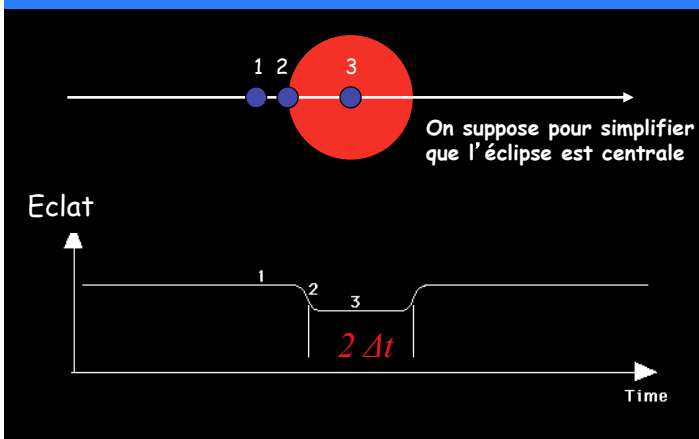
$$\rightarrow \Delta L = (L_* / \pi R_*^2) \pi R_{pl}^2 \quad \rightarrow \quad R_{pl} = R_* (\Delta L / L_*)^{1/2}$$



Soient  $2 \Delta t$  = durée du transit,  $A = 1/2$  grand axe,  $P$  = période orbitale

En une durée  $\Delta t$  est décrit l'angle  $\alpha = \text{arc tg} (R_* / A)$  Or  $\alpha / 2\pi = \Delta t / P$

$$\rightarrow R_* = A \text{tg} (2 \pi \Delta t / P)$$



## 5. Sommes-nous seuls?

Méthodes indirectes de détection des exoplanètes

Transits → masse volumique de la planète

Soient

- $R_{pl}$  connu par la méthode des transits
- $M_{pl}$  connu par la troisième loi de Kepler

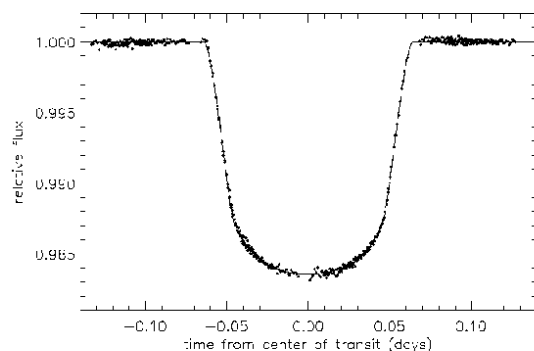
$$\rightarrow \rho_{pl} = M_{pl} / (4/3 \pi R_{pl}^3)$$

Exemple: HD 209458,  $P = 3.524$  j

$$R_* = 1.2 \pm 0.1 R_o \quad M_* = 1.1 \pm 0.1 M_o$$

$$R_{pl} = 1.40 \pm 0.17 R_J \quad M_{pl} = 0.69 \pm 0.05 M_J$$

- $\rho_{pl} = 0.31 \pm 0.07 \text{ g/cm}^3$
- planète gazeuse ( $\sim \rho_{\text{Saturne}} / 2$ )

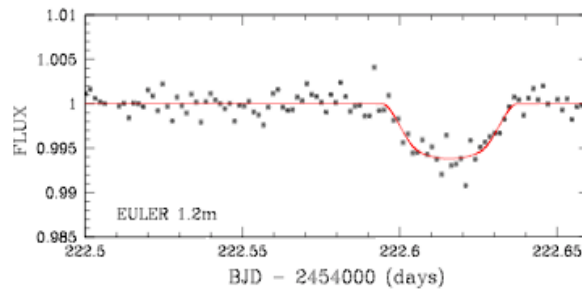
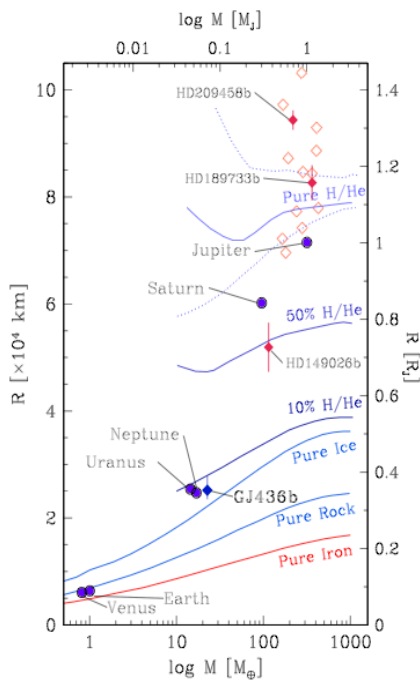


## 5. Sommes-nous seuls?

Méthodes indirectes de détection des exoplanètes : **Transits**

*Exemple: Gliese 436b*

(Gillon et al., A&A 472, L13, 2007)



*Star*

Stellar Mass [ $M_{\odot}$ ]	$0.44 (\pm 0.04) ^*$
Stellar Radius [ $R_{\odot}$ ]	$0.44 (\pm 0.04)$

*Planet*

Period [days]	$2.64385 \pm 0.00009 ^*$
Eccentricity	$0.16 \pm 0.02 ^*$
Orbital inclination [ $^{\circ}$ ]	$86.5 \pm 0.2$
Radius ratio	$0.082 \pm 0.005$
Planet Mass [ $M_{\oplus}$ ]	$22.6 \pm 1.9$
Planet Radius [ $R_{\oplus}$ ]	$3.95^{+0.41}_{-0.28}$
[km]	$25200^{+2600}_{-1800}$

## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

Méthodes de détection des exoplanètes

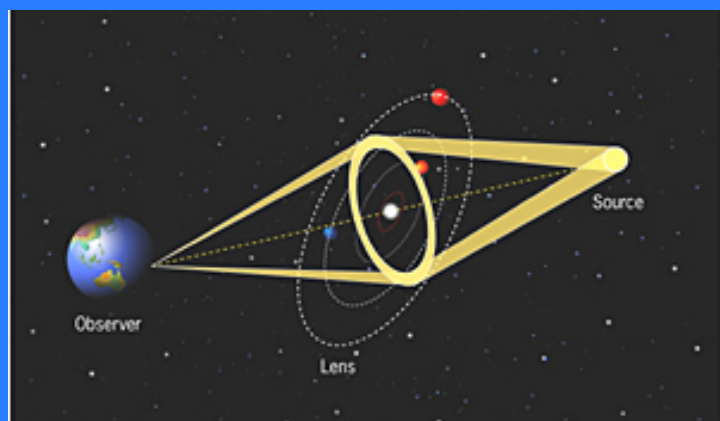
Méthodes directes (les voir):

interférométrie infrarouge « annulante »

Méthodes indirectes (voir leur effet):

transits

micro-lentilles gravitationnelles





# 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

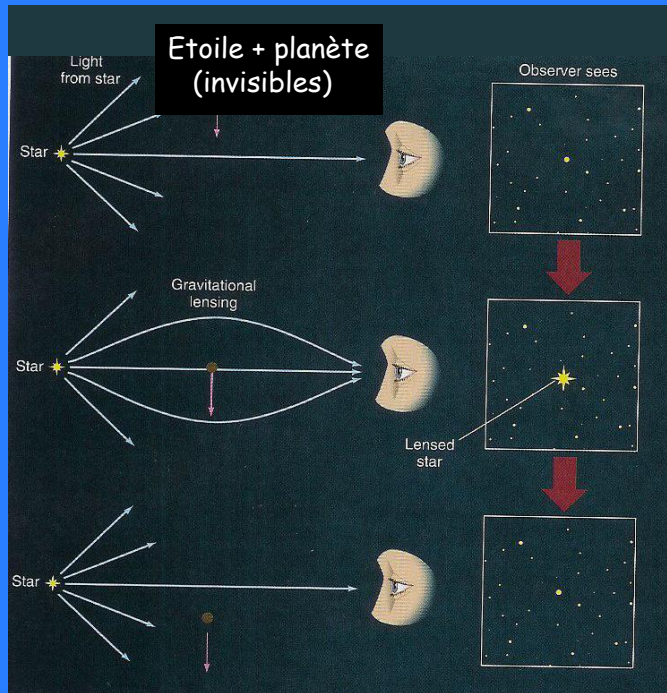
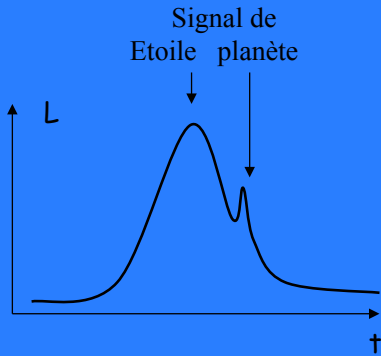
## Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir):

interférométrie infrarouge « annulante » (Darwin/ESA)  
coronographie

Méthodes indirectes (voir leur effet):

transits  
micro-lentilles gravitationnelles



Crédit: Astronomy Today;  
Chaisson & McMillan; Prentice Hall, 1996

# 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

## Méthodes de détection des exoplanètes

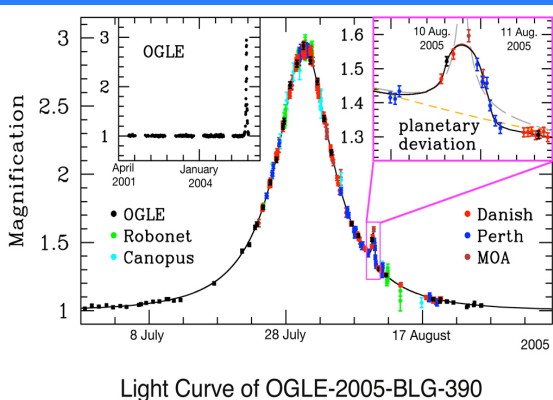
I. Méthodes directes (les voir):

interférométrie infrarouge « annulante »

II. Méthodes indirectes (voir leur effet):

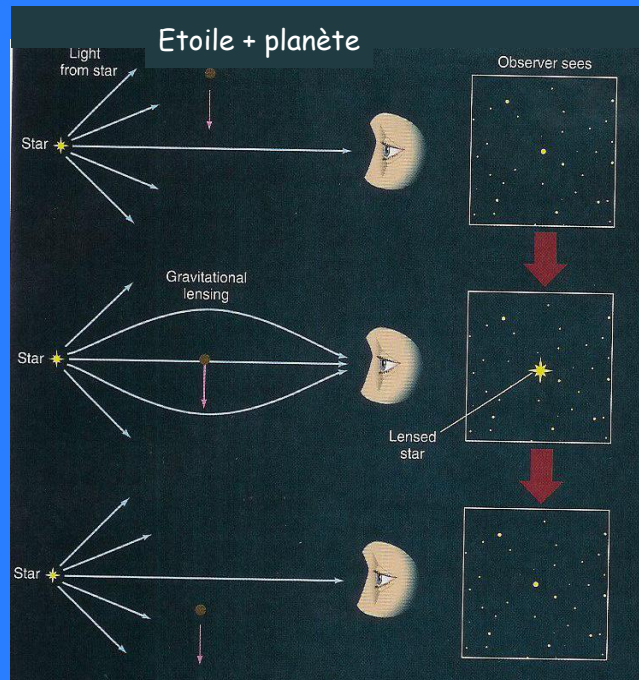
transits  
micro-lentilles gravitationnelles

Planète dont la masse est estimée à 5 fois la masse de la Terre !!



ESO PR Photo 03b/06 (January 25, 2006)

© ESO



## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir):

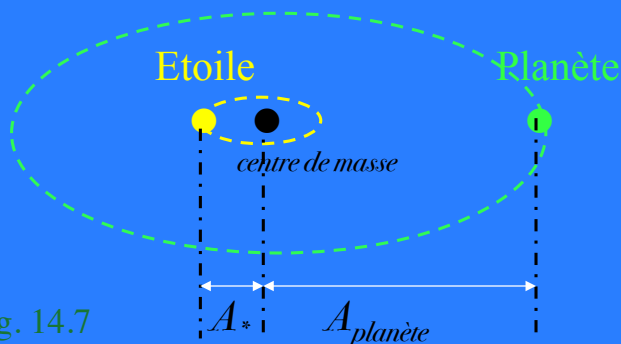
interférométrie infrarouge « annulante »

Méthodes indirectes (voir leur effet):

transits

micro-lentilles gravitationnelles

mouvement d'oscillation de l'étoile autour du centre de masse du système



$$\frac{A_{planète}}{A_*} = \frac{M_*}{M_{planète}}$$

Fig. 14.7

## 5. Sommes-nous seuls?

Sect. 14.4

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes directes (les voir):

interférométrie infrarouge « annulante »

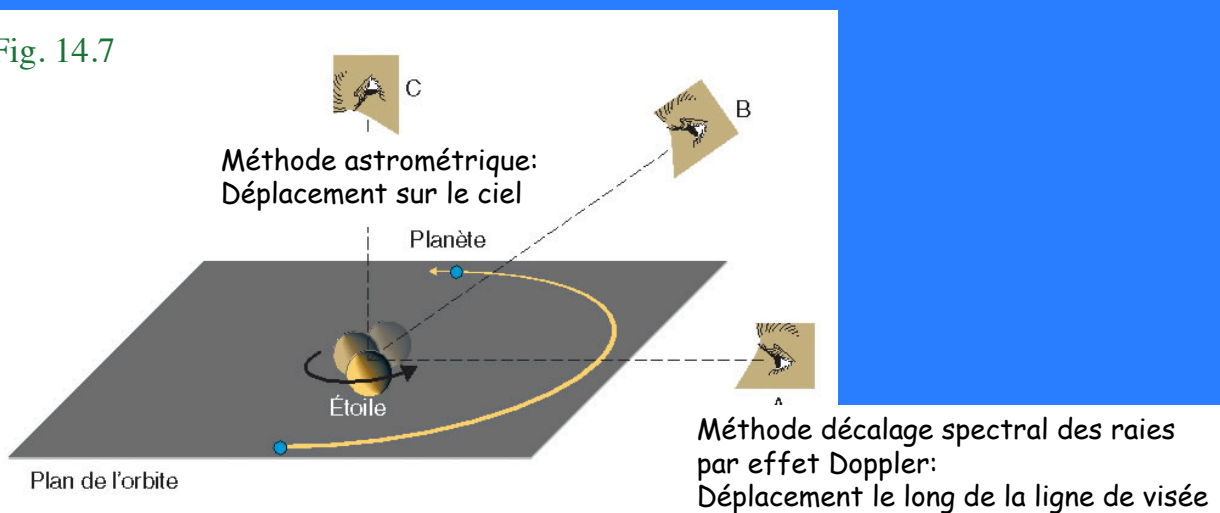
Méthodes indirectes (voir leur effet):

transits

micro-lentilles gravitationnelles

mouvement d'oscillation de l'étoile autour du centre de masse du système

Fig. 14.7



## 5. Sommes-nous seuls?

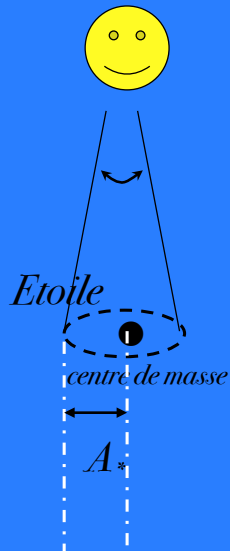
Sect. 14.4

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes indirectes (voir leur effet):

mouvement d'oscillation de l'étoile autour du centre de masse du système:

mouvement apparent sur le ciel (astrométrie)



$$\frac{A_{\text{planète}}}{A_*} = \frac{M_*}{M_{\text{planète}}}$$

## 5. Sommes-nous seuls?

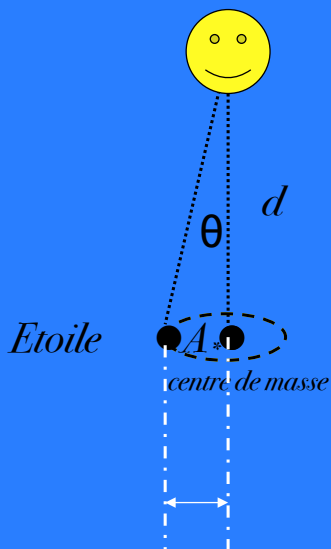
Sect. 14.4

### Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes indirectes (voir leur effet):

mouvement d'oscillation de l'étoile autour du centre de masse du système:

mouvement apparent sur le ciel (astrométrie)



Dans le cas d'un plan orbital perpendiculaire à la ligne de visée:

$$\vartheta = \frac{A_{\text{étoile}}}{d} = \frac{M_{\text{planète}}}{M_{\text{étoile}}} \frac{A_{\text{planète}}}{d}$$

Avec  $\theta$  en secondes  
d'arc,

si  $A_{\text{planète}}$  en UA  
et  $d$  en pc

Exemple:  $A_{\text{planète}} = 5 \text{ UA}$ ,  $d = 10 \text{ pc}$   
 $M_{\text{planète}} = 1 M_J = 0.001 M_*$

→ typiquement  $\theta < 0''001!$  → satellite GAIA (~2010)

# 5. Sommes-nous seuls?

Sects. 4.7 & 14.4

## Méthodes de détection des exoplanètes

Méthodes indirectes (voir leur effet):

mouvement d'oscillation de l'étoile autour du centre de masse du système:

mouvement le long de la ligne de visée (spectroscopie Doppler)

$$d = \lambda_{\text{obs}} / \lambda_{\text{norm}} = 1 + v/c \quad (\text{Eq. 4.10})$$

Validité :  $v \ll c$

Convention:  $v =$  vitesse radiale  
 $v > 0$  si source s'éloigne de l'observateur

⇒  $\lambda_{\text{obs}} > \lambda_{\text{norm}}$

⇒ décalage vers le rouge (« redshift »)

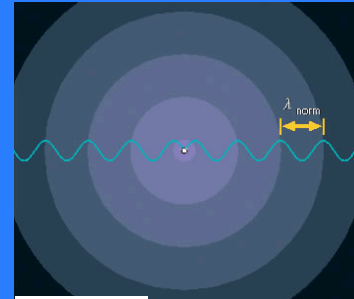
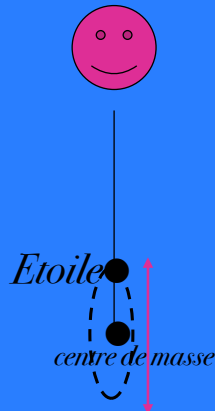


Fig. 4.14

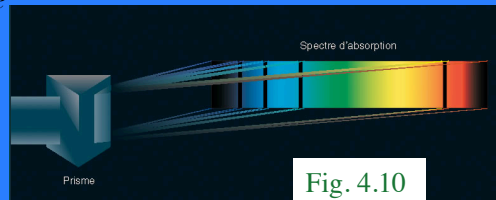


Fig. 4.10

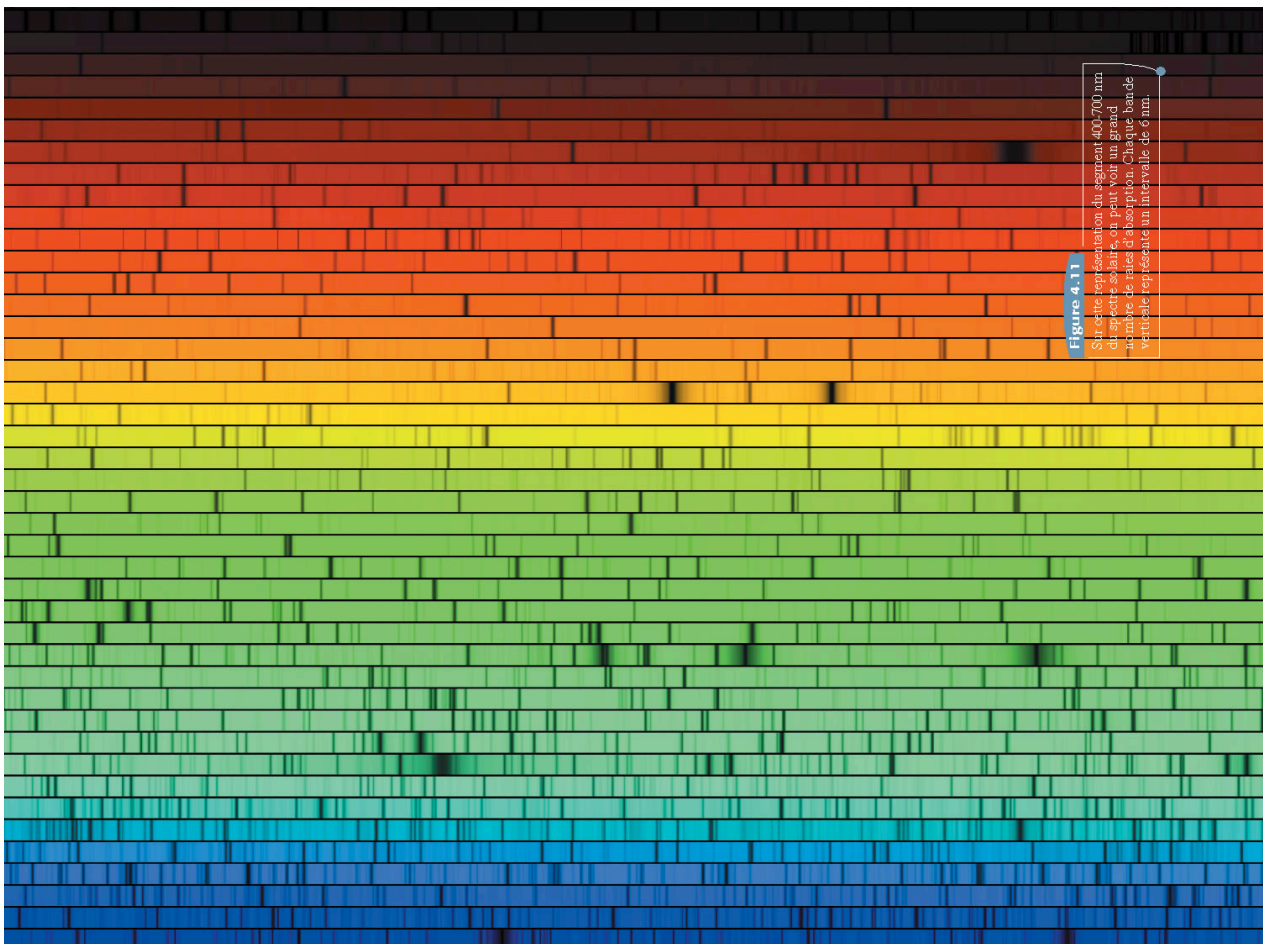
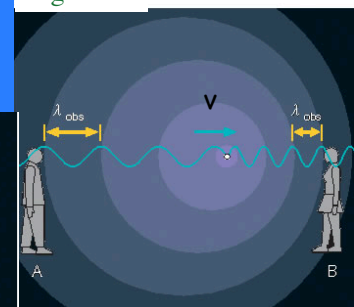
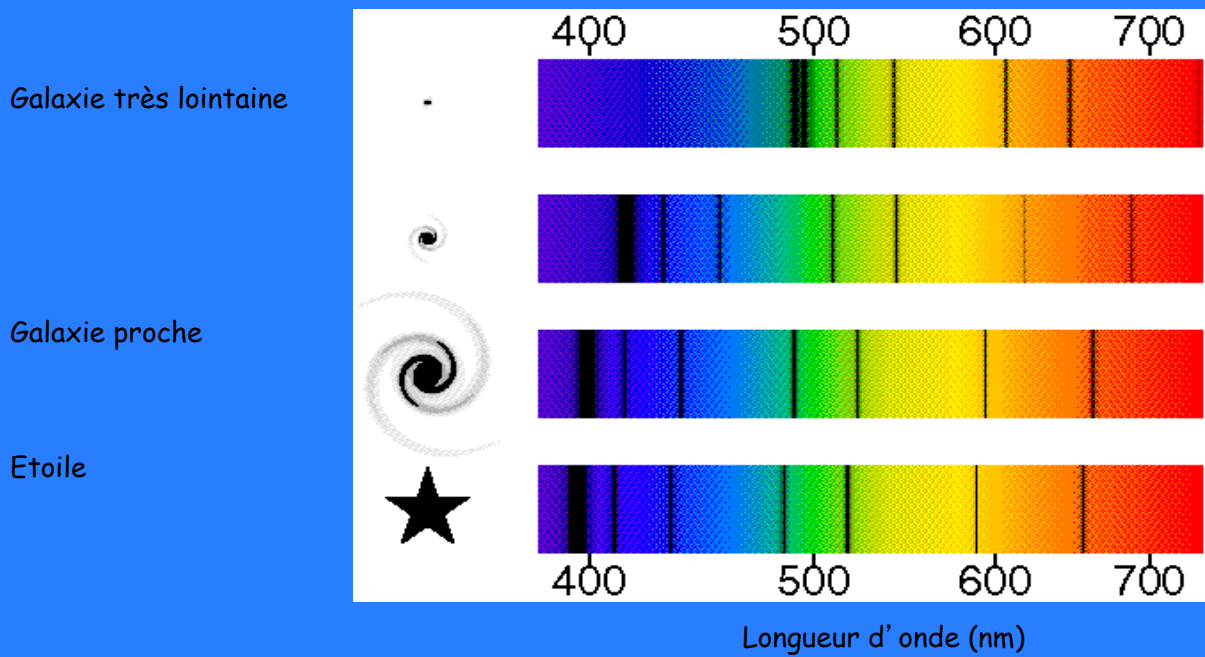


Figure 4.11

Si l'on représente le segment 400-700 nm du spectre solaire, on peut voir un grand nombre de raies d'absorption. Chaque bande verticale représente un intervalle de 6 nm.

# Effet Doppler

Sect. 4.7, Compl. 4.4



$V = 2\pi A / P$  (module de la vitesse dans une orbite circulaire)

$$A^3 / P^2 = G (M_* + m_{pl}) / 4 \pi^2$$

! Dans cette relation,  $A$  désigne le 1/2 grand-axe de l'orbite *relative*

$$\rightarrow V_{rel} = [ G (M_* + m_{pl}) / A ]^{1/2}$$

Ceci est la vitesse de l'étoile dans l'orbite *relative* (étoile relativement à la planète) !

Vitesse étoile par rapport au centre de masse:

$$M_* V_{*CM} = m_{pl} V_{plCM} \quad V_{rel} = V_{*CM} + V_{plCM}$$

Donc:

$$V_{*CM} = m_{pl} / (M_* + m_{pl}) V_{rel}$$

$$V_{*CM} = m_{pl} / (M_* + m_{pl}) [ G (M_* + m_{pl}) / A ]^{1/2}$$

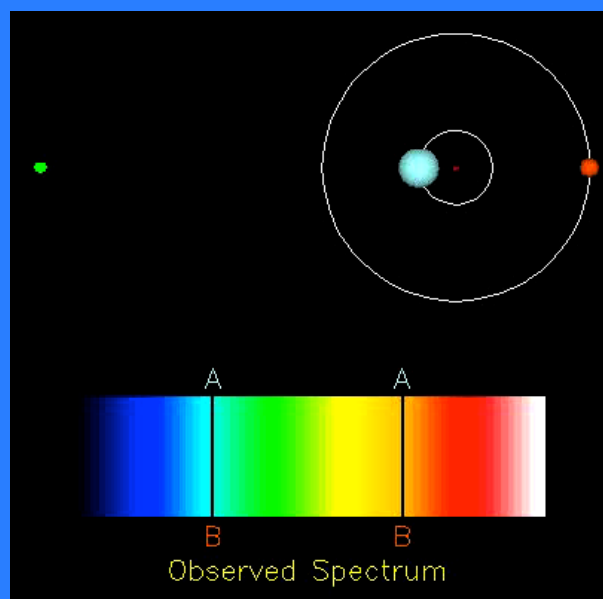
$$V_{*CM} = m_{pl} [ G / A (M_* + m_{pl}) ]^{1/2}$$

$$V_{*CM} \sim m_{pl} [ G / A M_* ]^{1/2} \text{ si } M_* \gg m_{pl}$$

→ Méthode sensible aux planètes serrées et massives

Sect. 4.7, Compl. 4.4

## Amplitude de la variation de vitesse



$V = 2\pi A / P$  (module de la vitesse dans une orbite circulaire)

$$A^3 / P^2 = G (M_* + m_{pl}) / 4 \pi^2$$

! Dans cette relation,  $A$  désigne le 1/2 grand-axe de l'orbite relative

$$\rightarrow V_{rel} = [ G (M_* + m_{pl}) / A ]^{1/2}$$

Ceci est la vitesse de l'étoile dans l'orbite relative (étoile relativement à la planète) !

Vitesse étoile par rapport au centre de masse:

$$M_* V_{* \% CM} = m_{pl} V_{pl \% CM} \quad V_{rel} = V_{* \% CM} + V_{pl \% CM}$$

Donc:

$$V_{* \% CM} = m_{pl} / (M_* + m_{pl}) V_{rel}$$

$$V_{* \% CM} = m_{pl} / (M_* + m_{pl}) [ G (M_* + m_{pl}) / A ]^{1/2}$$

$$V_{* \% CM} = m_{pl} [ G / A (M_* + m_{pl}) ]^{1/2}$$

$$V_{* \% CM} \sim m_{pl} [ G / A M_* ]^{1/2} \text{ si } M_* \gg m_{pl}$$

→ Méthode sensible aux planètes serrées et massives

### Amplitude de la variation de vitesse

Exemple:

Si compagnon planétaire:

$$A = 5 \text{ AU}$$

$$m_{pl} = 1 M_J = 0.001 M_\odot$$

$$M_* = 1 M_\odot$$

$$\rightarrow V_{* \% CM} = 13 \text{ m/s} !!$$

Si compagnon stellaire:

$$A = 5 \text{ AU}$$

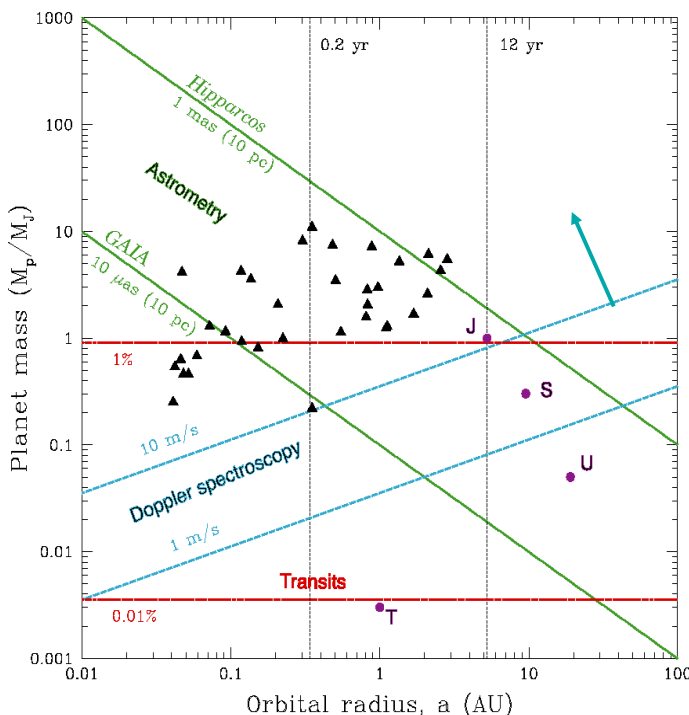
$$m_{comp} = 1 M_\odot$$

$$M_* = 1 M_\odot$$

$$\rightarrow V_{* \% CM} = 13 \text{ km/s} !!$$

### Méthodes de détection des exoplanètes

Les trois méthodes indirectes (transits, spectroscopie Doppler, astrométrie) sont complémentaires:



**astrométrie:**  $\theta = \frac{M_{planète} A_{planète}}{M_{étoile} d}$   
surtout sensible aux planètes massives éloignées de l'étoile  
→ satellite GAIA (~ 2010)

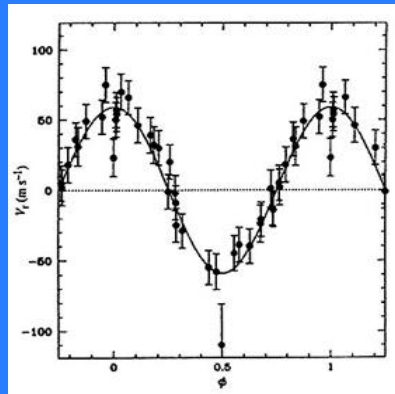
**spectroscopie Doppler:**  
 $V_{* \% CM} \sim m_{pl} [ G / A M_* ]^{1/2}$   
surtout sensible aux planètes massives proches de l'étoile

**transits:**  $\Delta L = L_* (R_{pl} / R_*)^2$   
détection de planètes telluriques ( $R_{pl} / R_* = 1/100$ )  
possible si précision suffisante ( $\Delta L / L < 0.01 \%$ )  
→ missions spatiales: COROT, MONS, MOST...

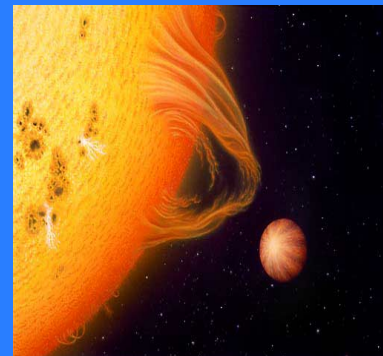
**Octobre 1995:**  
**Annnonce de la découverte de la première exoplanète orbitant autour de l'étoile 51 Peg**  
**par Mayor et Queloz (Observatoire de Genève),**  
**à l'Observatoire de Haute Provence, sur le télescope de 1.93 m**  
**au moyen de la spectroscopie Doppler**

$P = 4.23 \text{ j} !!$   
 $M_{pl} > 0.45 M_J !!$

→ "Jupiters chauds"



Crédit: Lynette Cook; <http://extrasolar.spaceart.org>



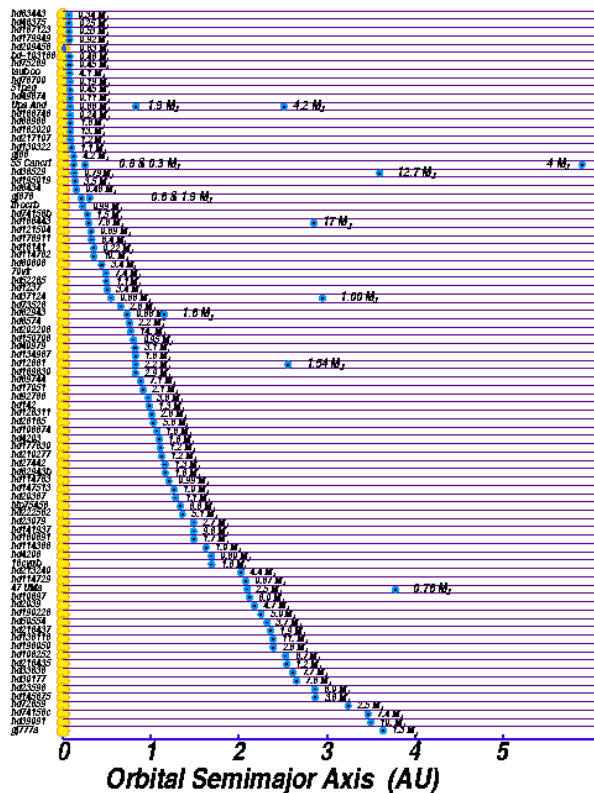
Sect. 14.4

Mars 2006:

- 153 étoiles recensées abritant une ou plusieurs exoplanètes
- 18 systèmes contenant plus d'une planète (2 ou 3 planètes : résonances 1: 2 , 1: 10)
- 173 planètes au total

Encyclopédie des planètes extrasolaires  
<http://www.obspm.fr/encycl/catalog.html>

5. Sommes-nous seuls?  
 Exoplanètes

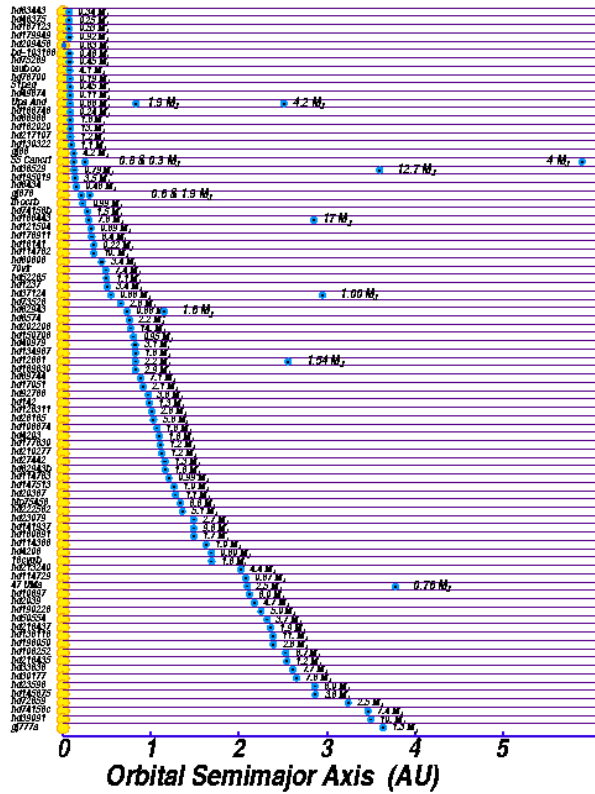
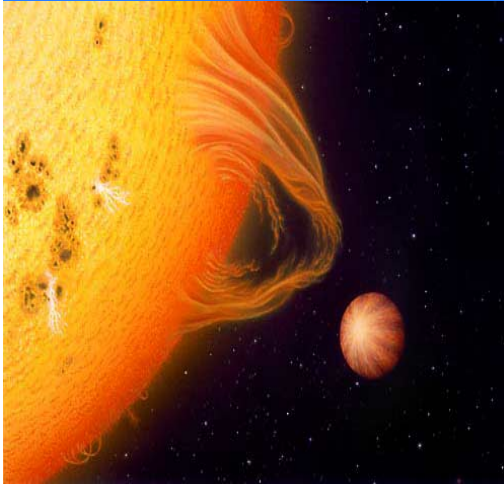


## 5. Sommes-nous seuls?

### Exoplanètes: Résultats surprenants

« Jupiters chauds »

Crédit: Lynette Cook; <http://extrasolar.spaceart.org>

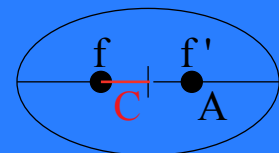
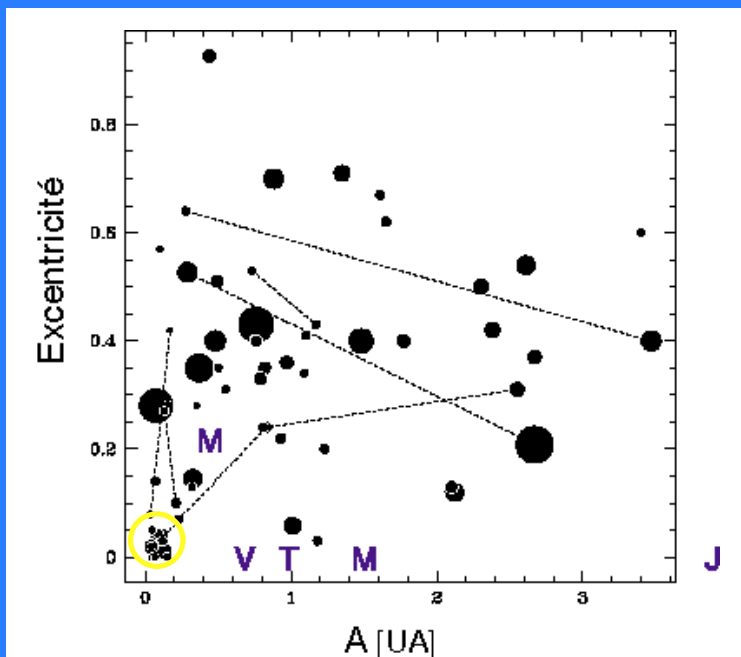


### Exoplanètes: Résultats surprenants

Diagramme excentricité -- demi-grand-axe

Deux catégories d'exoplanètes:

- Jupiters chauds
- Planètes géantes sur orbites excentriques



Excentricité =  $C/A$   
= 'écart' au cercle



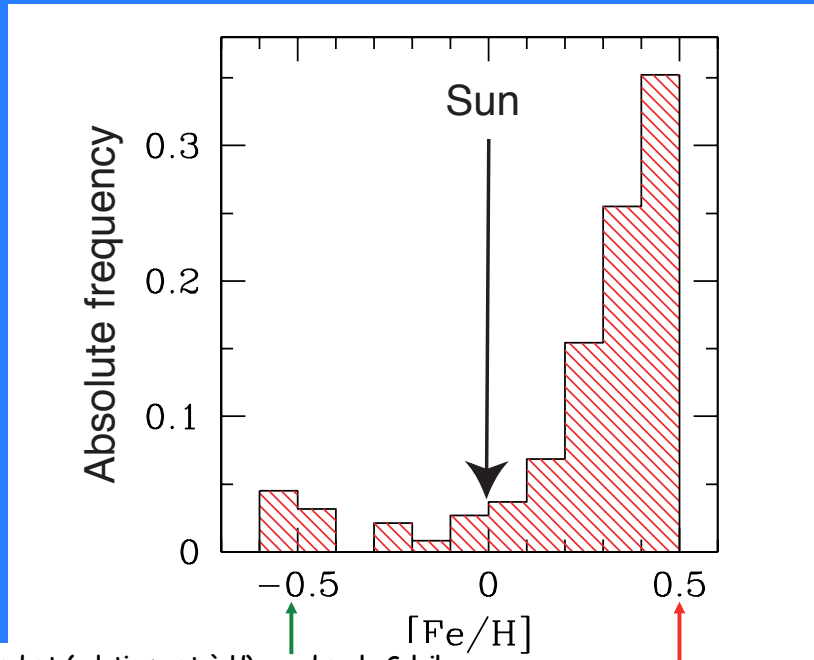
# Exoplanètes: Résultats surprenants

Sect. 14.4

La proportion d'étoiles entourées de planètes dépend fortement de leur métallicité

= contenu en "métaux"

$$= [Fe/H] = \log \left( \frac{(Fe/H)_*}{(Fe/H)_\odot} \right)$$



Fe 3 fois moins abondant (relativement à H) que dans le Soleil

Fe 3 fois plus abondant (relativement à H) que dans le Soleil

La plupart des raies de ce spectre sont causées par les atomes de fer présents dans l'atmosphère de l'étoile. L'intensité de ces raies spectrales constitue donc une mesure de l'abondance de fer

Figure 4.11

Si cette représentation du segment 400-700 nm du spectre solaire est peinte sur un grand nombre de raies d'absorption. Chaque bande verticale représente un intervalle de 6 nm.

## Exoplanètes: Résultats surprenants

Sect. 14.4

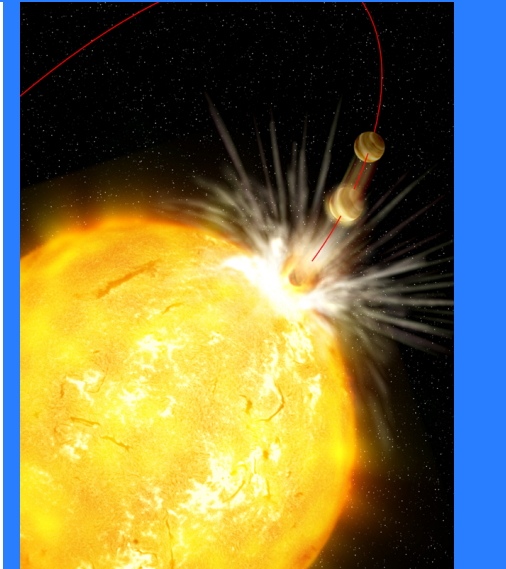
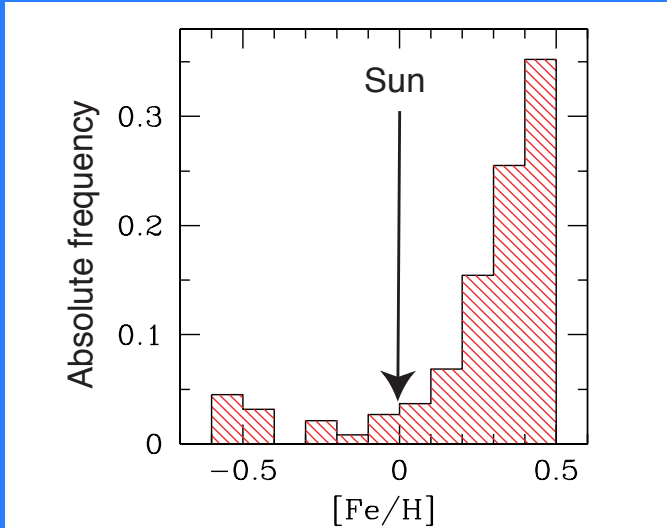
La proportion d'étoiles entourées de planètes dépend fortement de leur **métallicité**

$$[Fe/H] = \log \left( (Fe/H)_* / (Fe/H)_\odot \right)$$

Un environnement riche en « éléments lourds » favorise la formation de planètes

ou ?

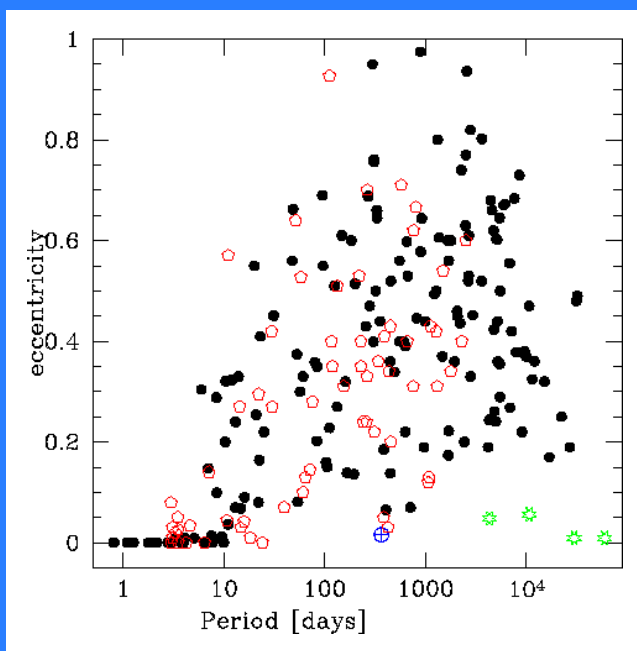
l'étoile a été enrichie en « éléments lourds » par l'accrétion de planètes



## Exoplanètes: Résultats surprenants

Sect. 14.4

Diagramme excentricité -- période



Surprenante similitude entre les propriétés orbitales de

planètes géantes gazeuses

et de

compagnons stellaires

→ processus de formation identique?

A priori, non!

- planètes = formation par agrégation
- étoiles = formation par contraction
- étoiles et planètes se séparent en terme de masse:

