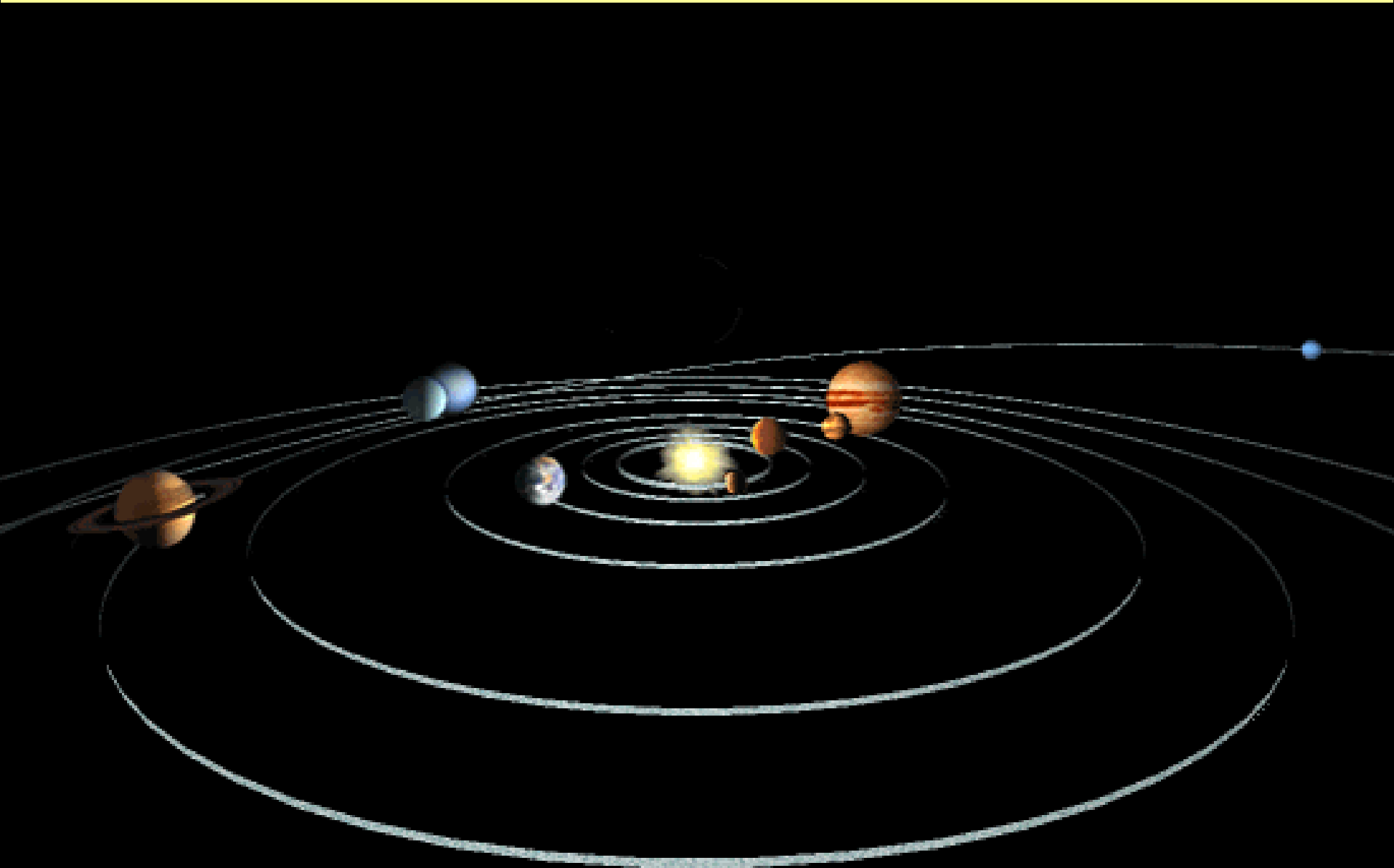


Observatoire de Lyon
14dec. 2011

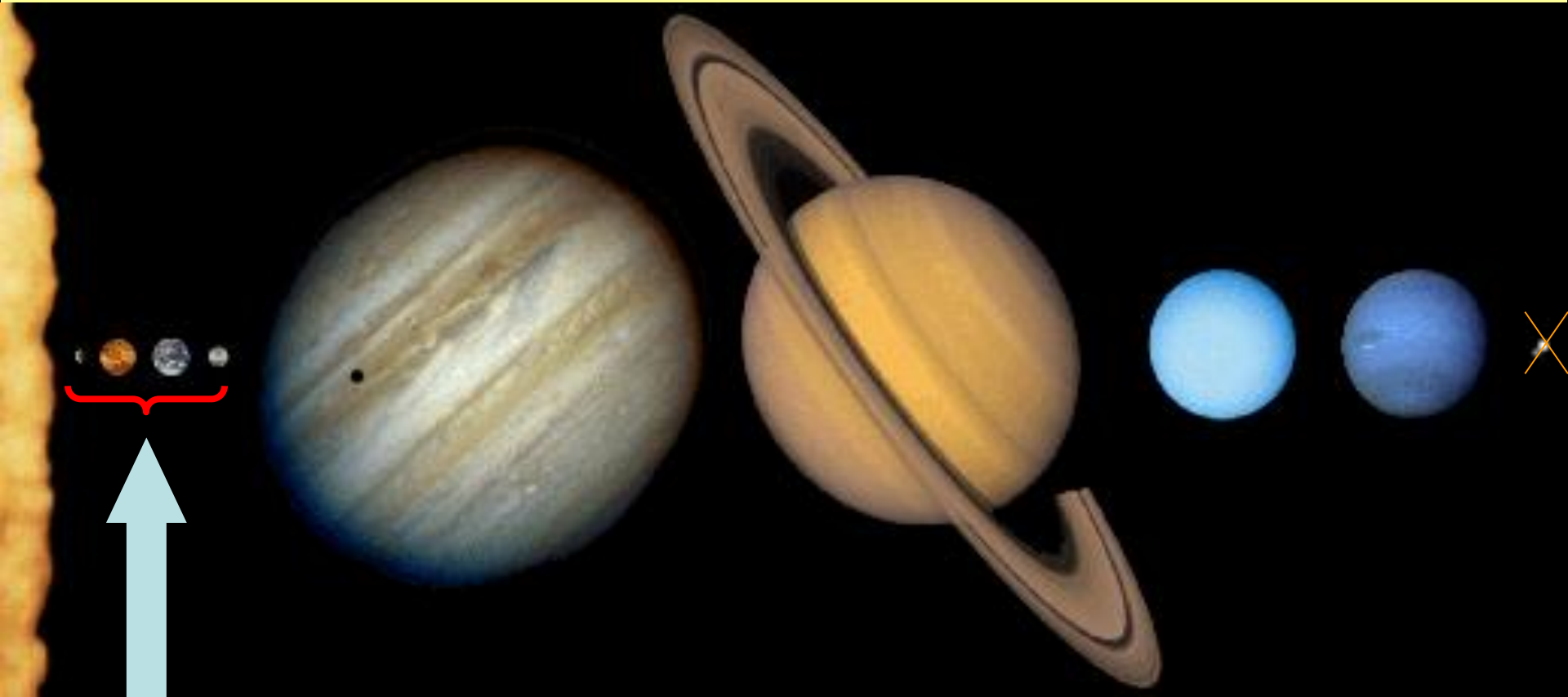
Exoplanètes

François Sibille
CRAL-Observatoire de Lyon

Systeme solaire : le mieux connu

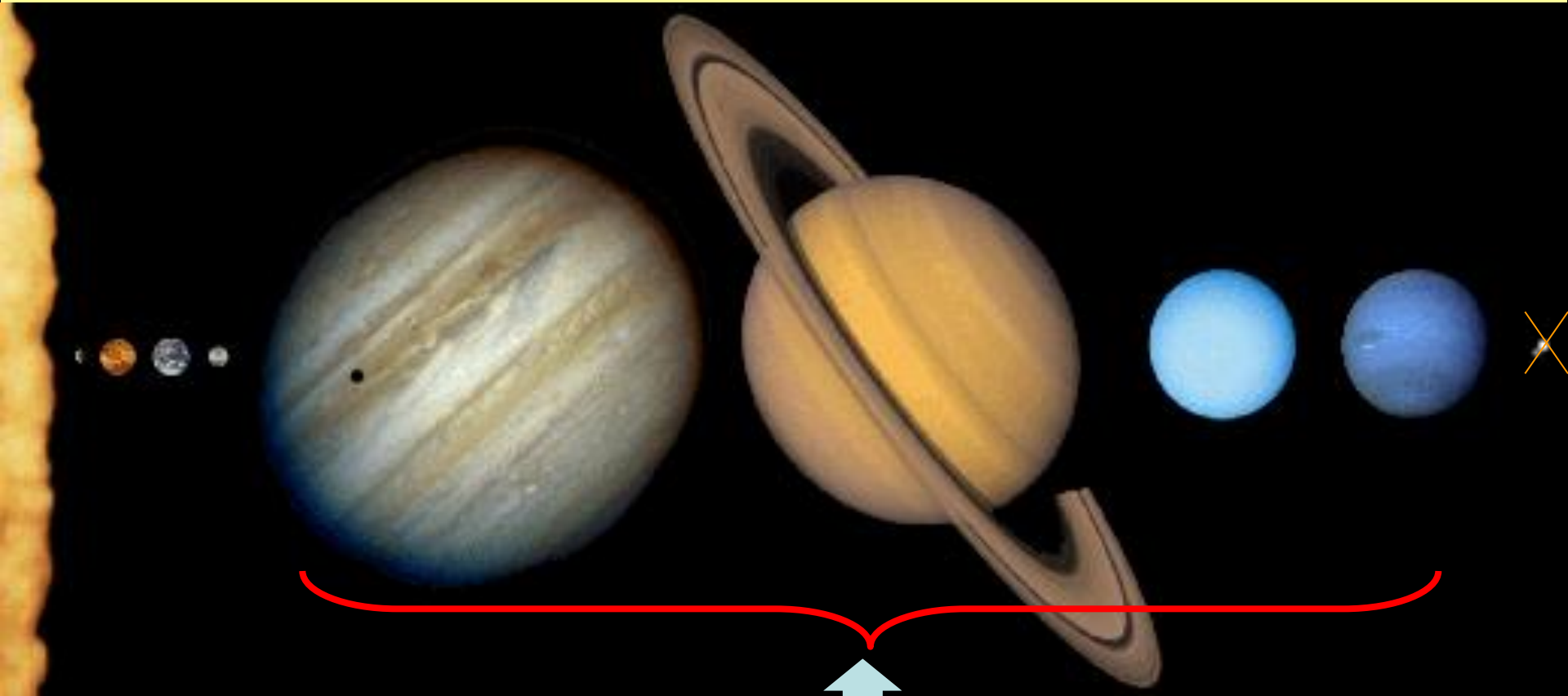


Des corps de tailles très différentes



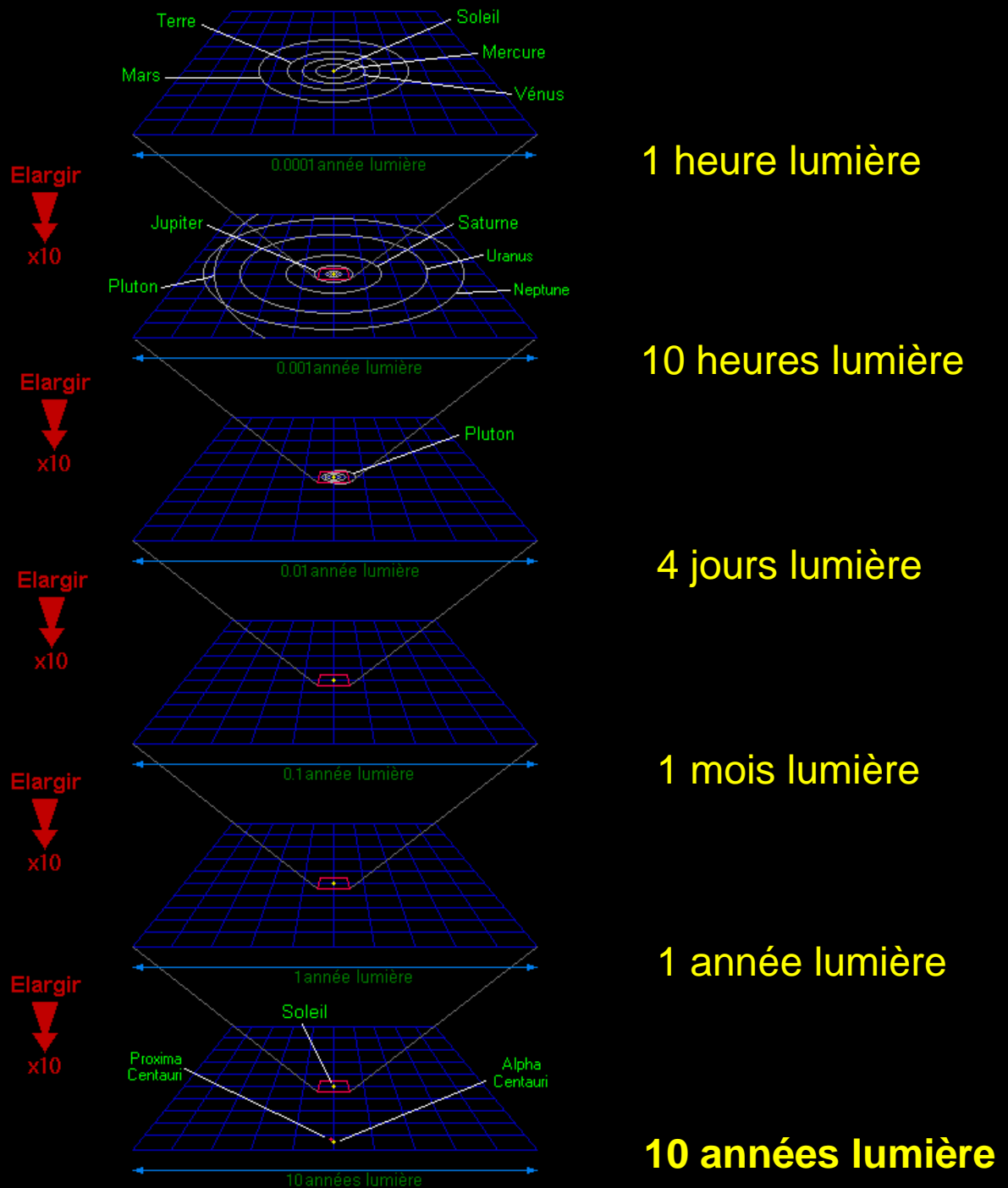
4 planètes telluriques

Des corps de tailles très différentes



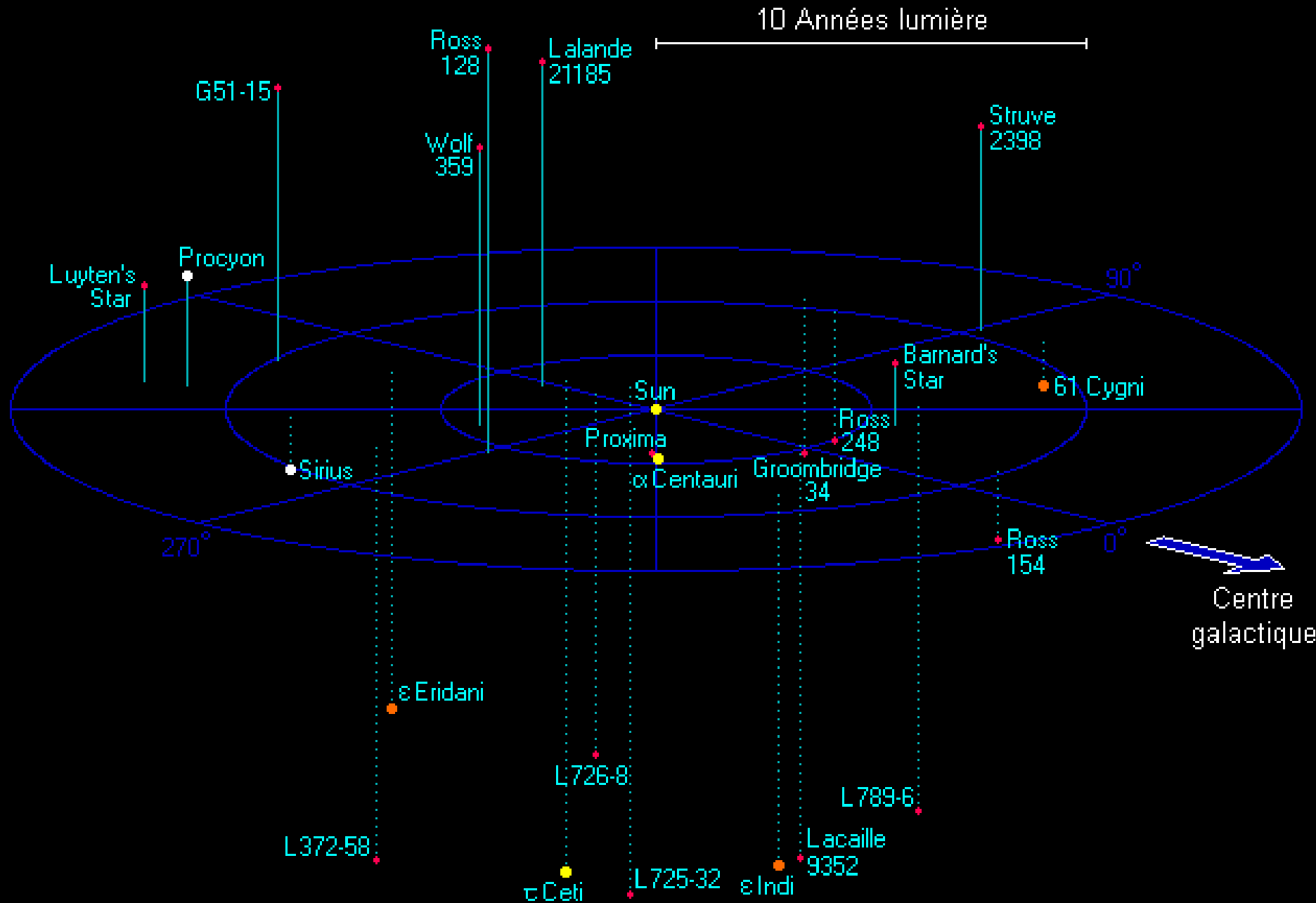
4 planètes joviennes

Des échelles
de distances
très différentes

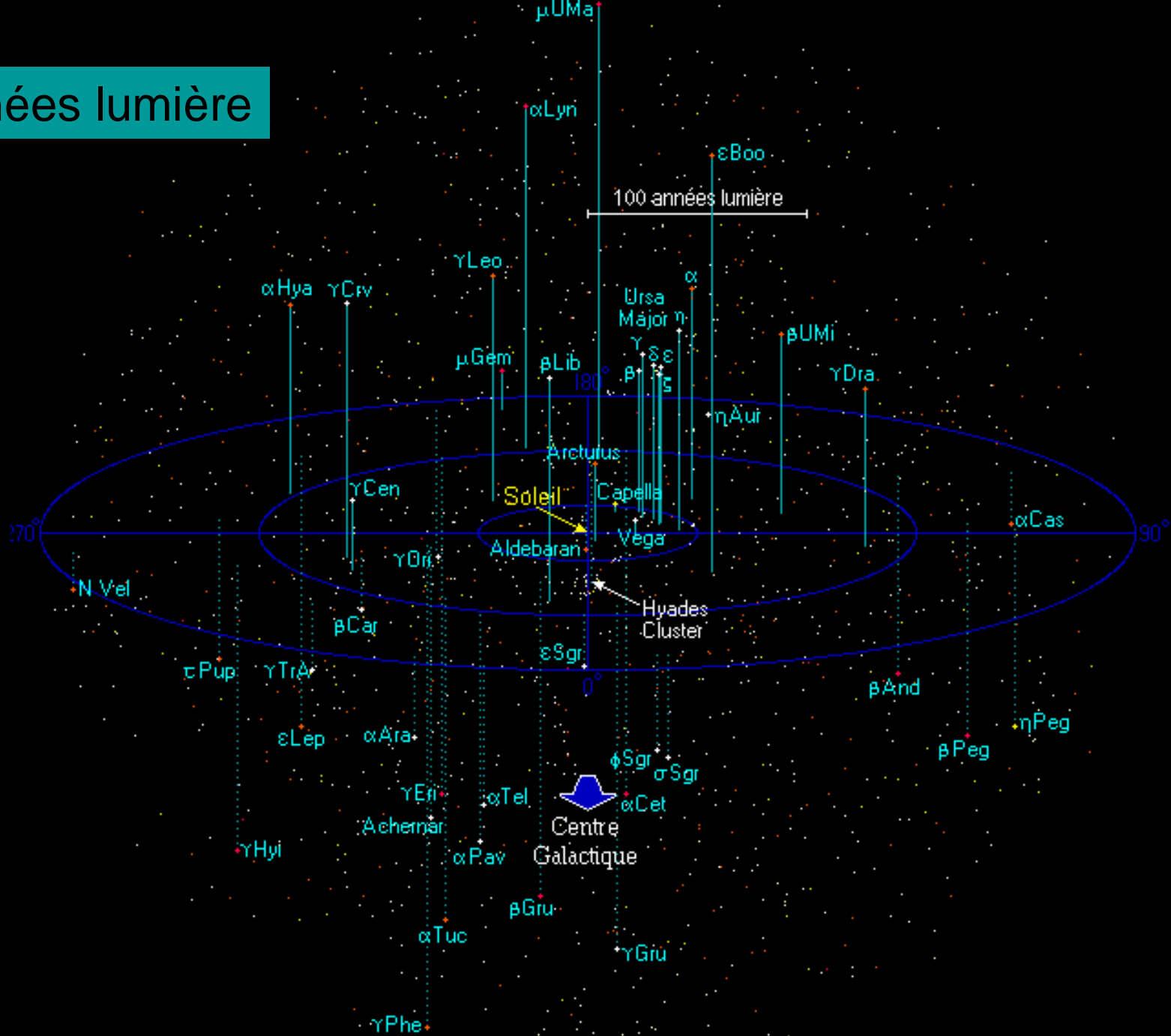


Proxima Centauri
L'étoile
La plus proche
du Soleil

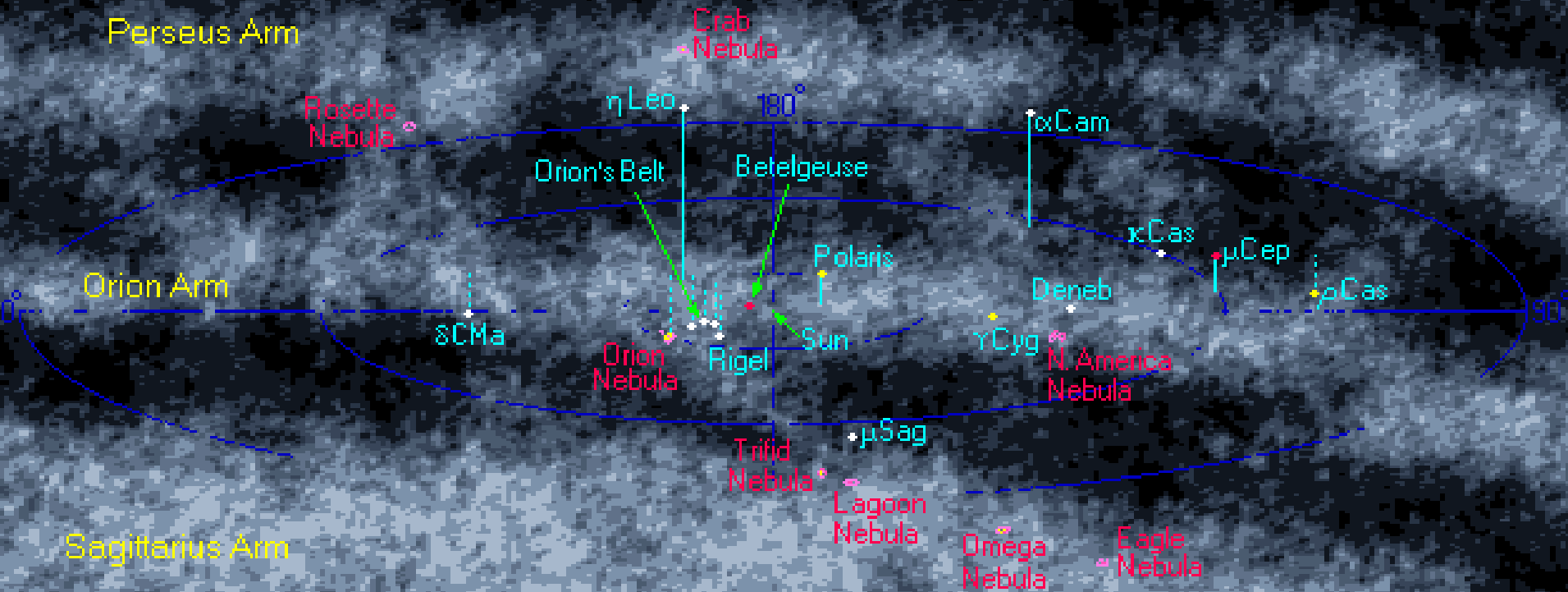
Tout le proche voisinage : 40 Années lumière



400 Années lumière



4000 Années lumière : les bras de la Galaxie



Les exoplanètes sont des objets :

-petits

-proches d'une étoile

-les étoiles sont loin

-les étoiles sont énormément plus lumineuses que les planètes
(problème du contraste)

exercice guidé

Diamètre apparent d'une exoplanète de type Terre

Terre : diamètre 12756 km

Alpha Centauri

étoile G2V (presque comme le Soleil), étoile la plus proche de nous
distance : 4,24 AL (1AL = $9,5 \cdot 10^{12}$ km) $\rightarrow 36 \cdot 10^{12}$ km

Diamètre apparent de la Terre vue de Alpha Centauri :

$$\begin{aligned} (12 \cdot 10^3) / 36 \cdot 10^{12} &= 3 \cdot 10^{-10} \text{ rad} \quad (1 \text{ rad} \rightarrow 206\,000 \text{ sec d'arc}) \\ &= 0.07 \text{ milli arc sec} \end{aligned}$$

1m à 200 km \rightarrow 1 sec d'arc

70 μ m (diamètre d'un cheveu) à 200km \rightarrow 0.07 milli arc sec

exercice guidé suite

Problème instrumental : limite de diffraction

Diamètre tache diffraction = $2.4 \frac{\text{longueur d'onde}}{\text{Diamètre du télescope}}$
(radian)

$D_{\text{tel}} > 2.4 \frac{\lambda}{\text{Diam apparent planète}}$

$$\lambda = 0.5 \mu\text{m} = 5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

Planète de type Terre :

$$\text{Diam apparent planète} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ rad}$$

$$D_{\text{tel}} > 3600 \text{ m}$$

Planète de Type Jupiter :

$$\text{Diam Jupiter} = 143 \cdot 10^3 \text{ km} = 11.2 * \text{Diam Terre}$$

$$D_{\text{tel}} > 3600 \text{ m} / 11.2 = 300 \text{ m}$$

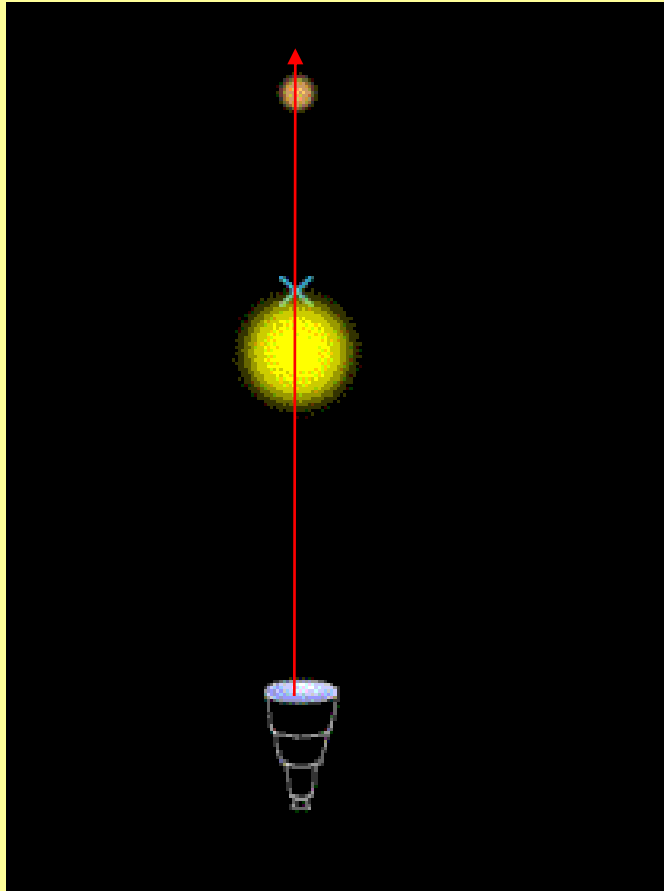
Le monde est grand !

Et les planètes sont très petites !

Elles se forment avec les étoiles

C'est certain : on va les trouver !

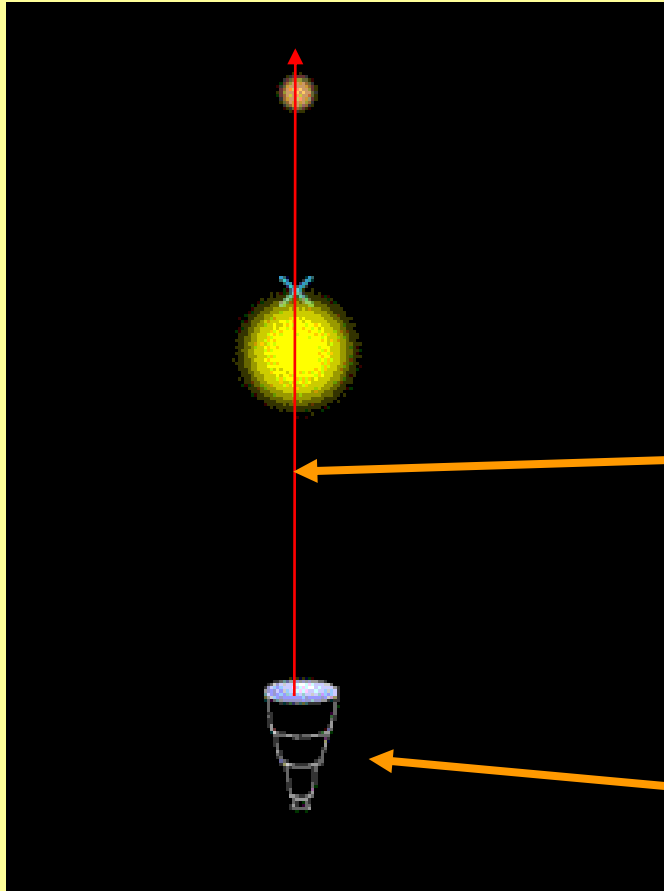
Détecter les planètes par l'effet Doppler



Une étoile et une planète
tournent autour de leur centre de gravité

Un observateur placé
près du plan de l'orbite

Détecter les planètes par l'effet Doppler

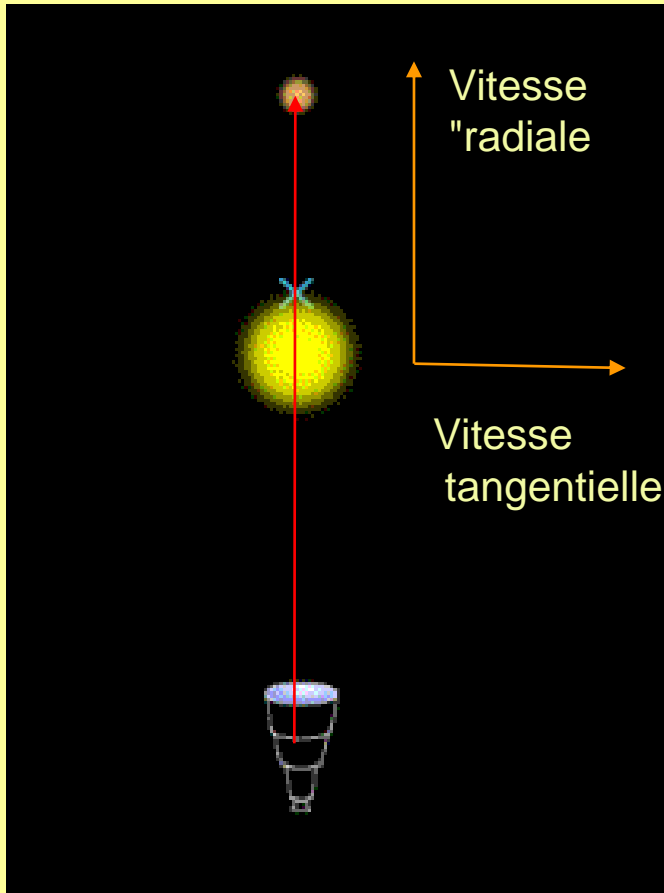


Une étoile et une planète
tournent autour de leur centre de gravité

La ligne de visée relie l'observateur
à l'étoile

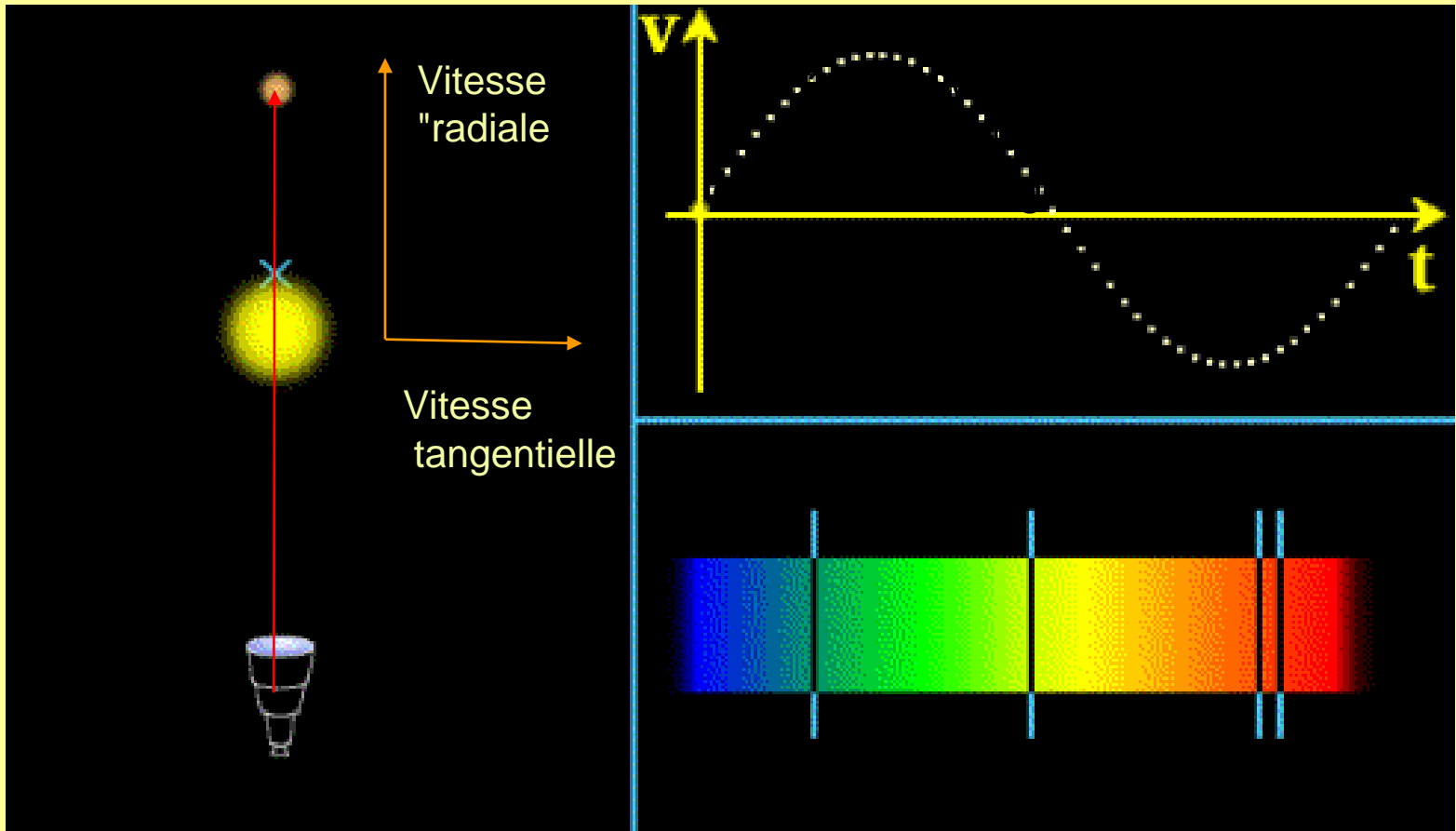
Un observateur placé
près du plan de l'orbite

Détecter les planètes par l'effet Doppler

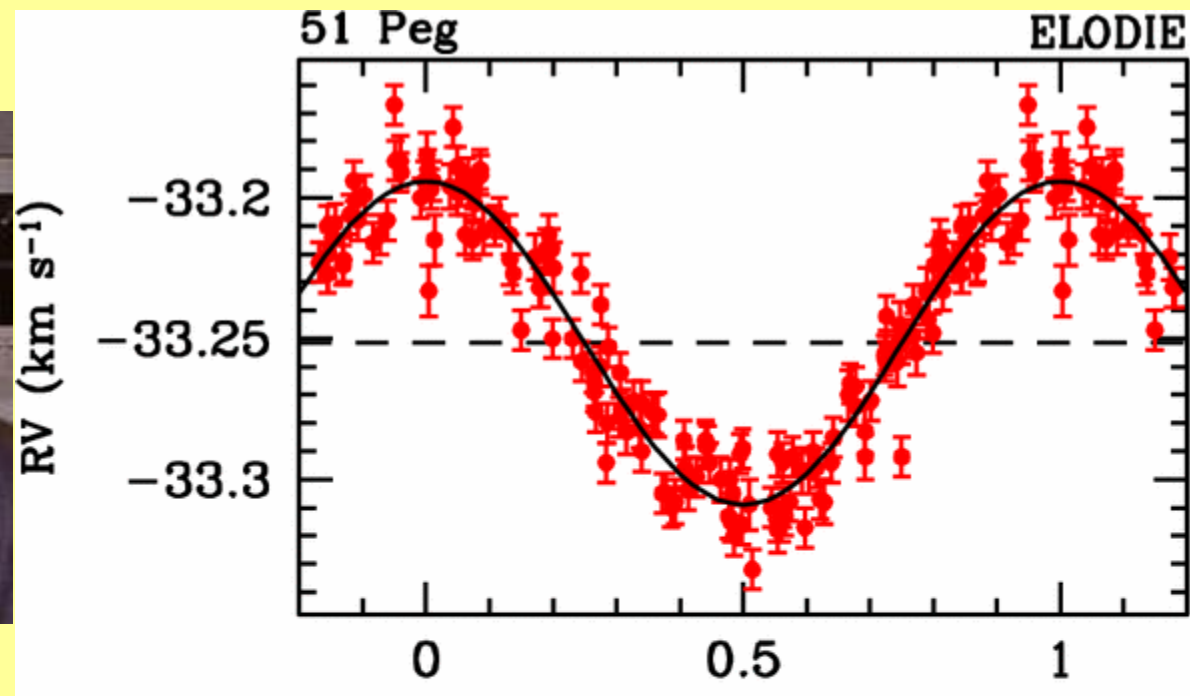


On sait mesurer
la vitesse "radiale"
de l'étoile le long
de la ligne de visée

Détecter les planètes par l'effet Doppler



1995 : Découverte de la première planète exosolaire
51 Peg
Mayor et Quelloz (Obs. de Genève)



exercice guidé

A (M)

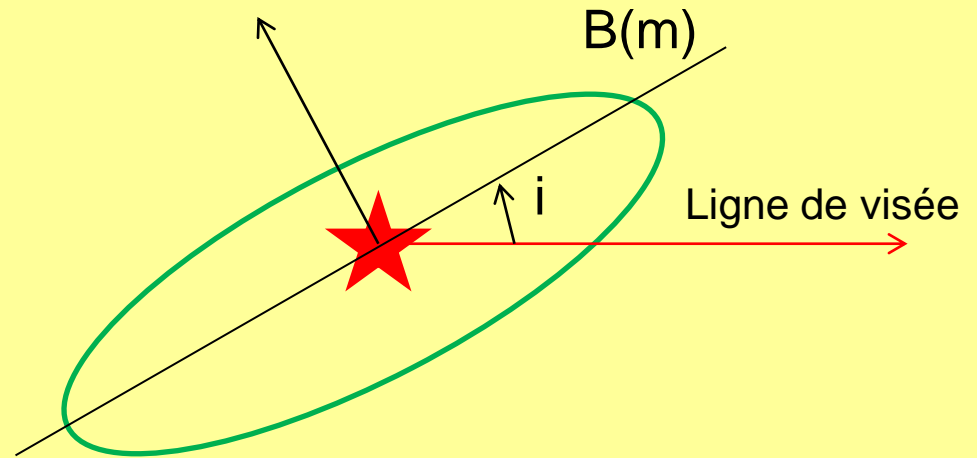
G

B(m)

$$M \vec{GA} + m \vec{GB} = 0$$

$$M \vec{V}_A + m \vec{V}_B = 0$$

$$V \sin i = V$$



$$3^{\text{e}} \text{ loi Kepler: } \frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM_*}$$

T = période orbitale d'une planète

a = $1/2$ grand axe de cette "

G = constante de la gravitation.

M_* = Masse de l'étoile

Valable pour toutes les planètes du système.

$$\frac{2\pi a}{T} = V = \frac{2\pi}{T} \left(\frac{GM_* T^2}{4\pi^2} \right)^{\frac{1}{3}}$$

↑ a tiré de 3^e loi

$$m_p \sin i = \left(\frac{M_*^2 T}{2\pi G} \right)^{\frac{1}{3}} V_{\text{rad}}$$

$$\left. \begin{array}{l} T, M_* \text{ connus} \\ V_{\text{rad}} \text{ mesuré} \end{array} \right\} \rightarrow \boxed{m_{\text{planète}} \cdot \sin i}$$

Autre forme (en reintroduisant a)

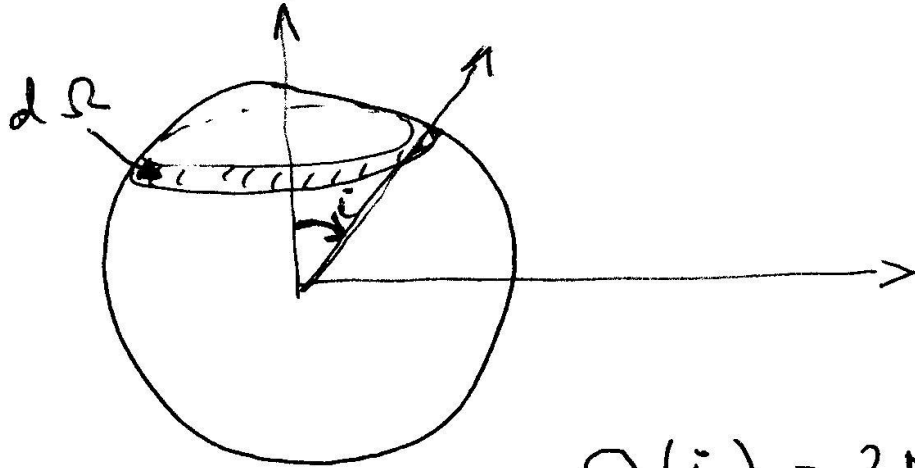
$$V_{\text{rad}}^2 = (m \sin i)^2 \frac{G}{M_*} \frac{1}{a}$$

Biais de la méthode :

On détecte le mieux :

- les grandes masses
- les orbites courtes
- (les périodes courtes)
- (les planètes proches de l'*)

probabilité de la valeur de i



$$\Omega(i) = 2\pi(1 - \cos i) \times 2$$

$$d\Omega = 4\pi \sin i \cdot di \quad (\text{aire d'un cône})$$

$$p(i) = \frac{d\Omega}{4\pi \cdot di} = \sin i$$

= probabilité de i

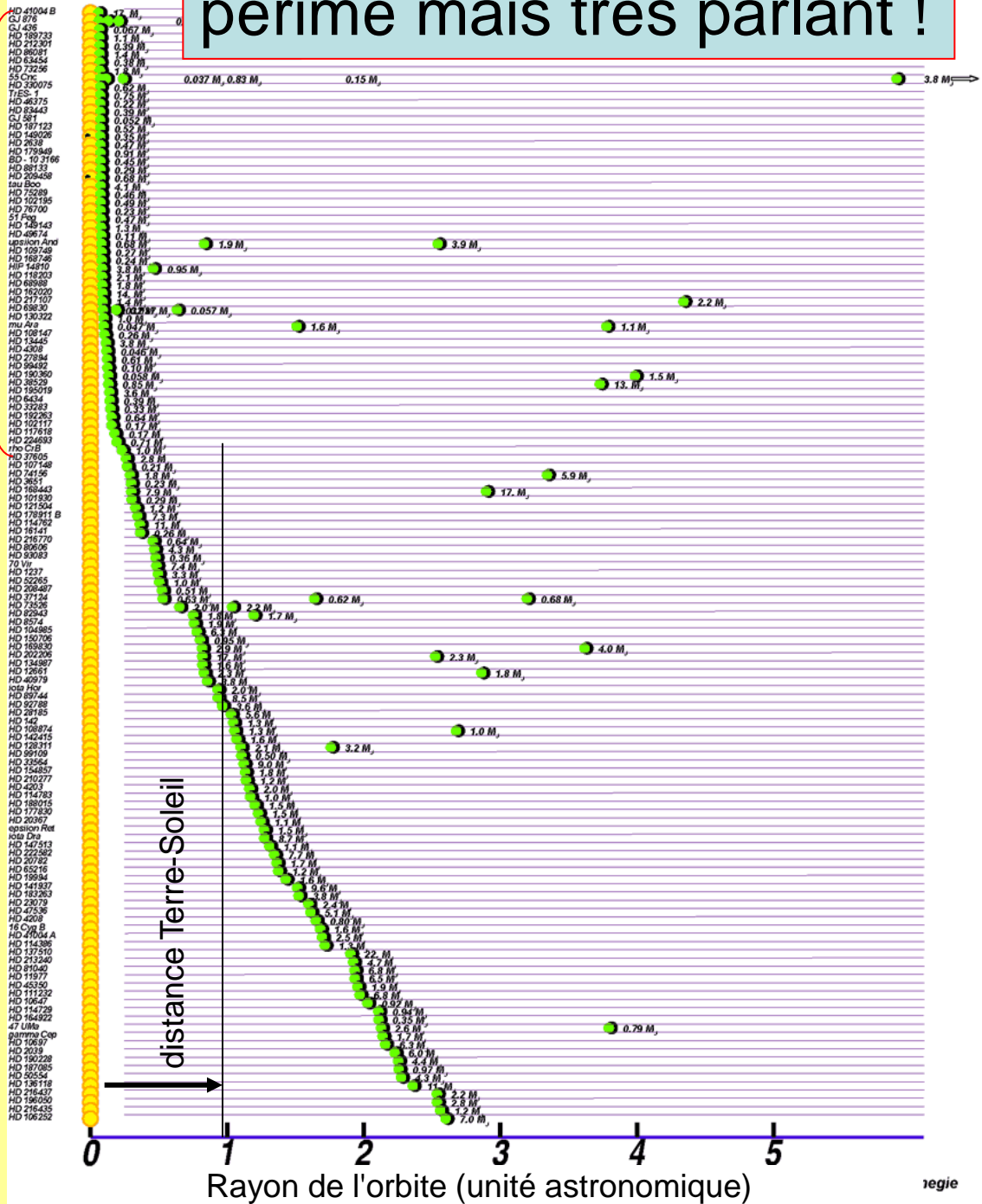
$$\langle \sin i \rangle = \frac{\int_0^{\pi/2} \sin i \times p(i) \, di}{\int_0^{\pi/2} \sin i \, di} = \frac{\pi}{4} = 0,78$$

périmé mais très parlant !

1ere surprise :
Beaucoup
de planètes
très proches
de l'étoile

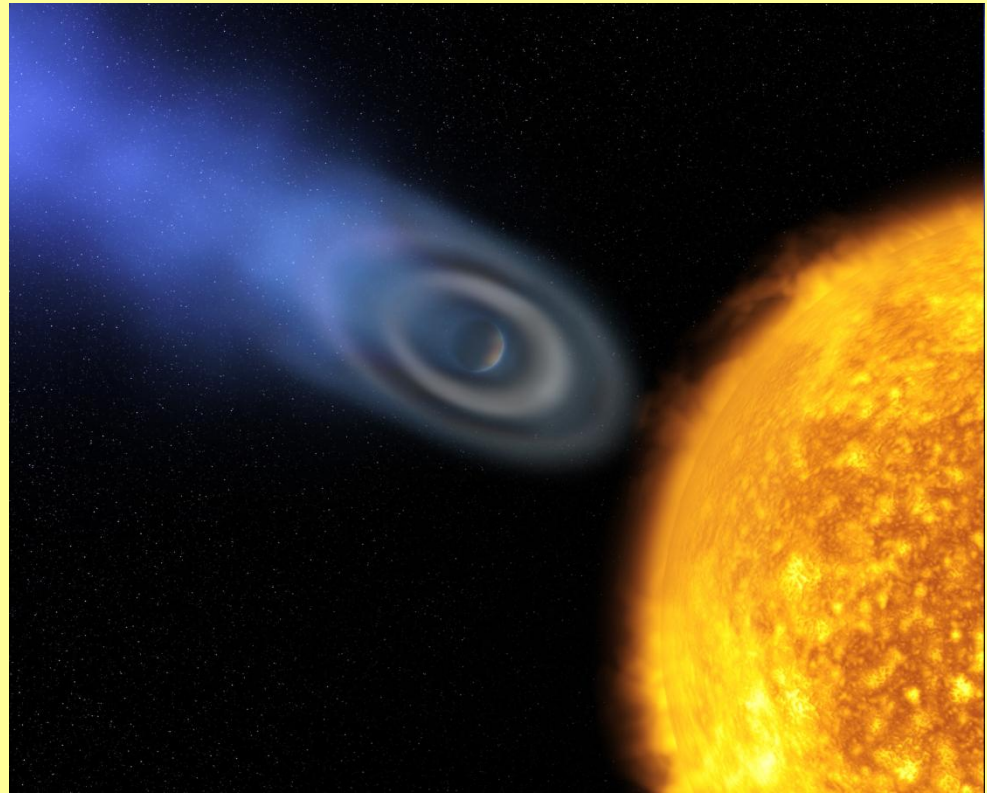
Environ
~~326~~
Planètes

500



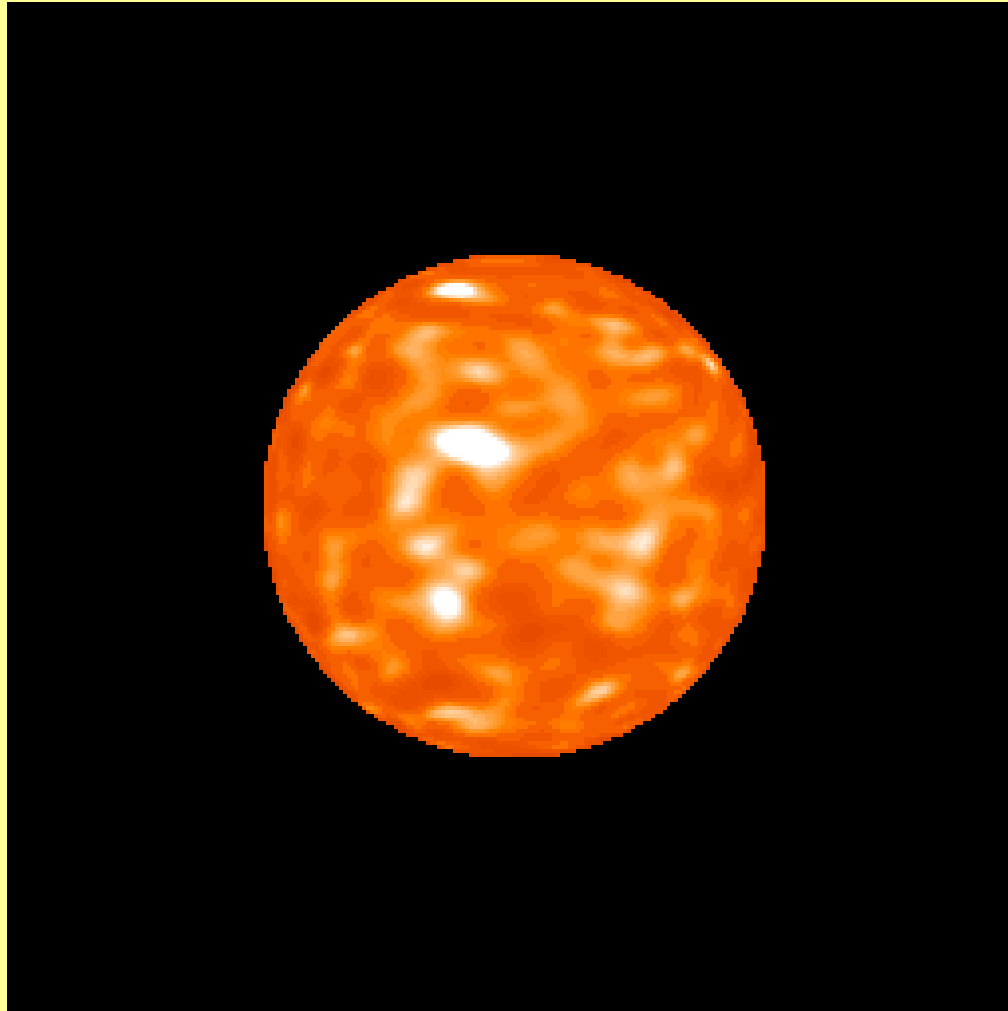
- HD 41004 B
- GJ 57b
- GJ 436
- HD 189733
- HD 212101
- HD 86081
- HD 63454
- HD 73256
- S Co
- HD 230075
- TJSS - 1
- HD 46715
- HD 83443
- GJ 581
- HD 187123
- HD 149026
- HD 3638
- HD 179849
- BD - 10 2166
- HD 88153
- HD 209438
- tau Boo
- HD 75289
- HD 102185
- HD 76700
- 51 Pa
- HD 38143
- HD 40974
- epsilon And
- HD 10948
- HD 168746
- HD 14900
- HD 118203
- HD 69888
- HD 162020
- HD 217107
- HD 69850
- HD 130322
- tau Aii
- HD 108147
- HD 13445
- HD 4208
- HD 27984
- HD 98492
- HD 190360
- HD 38529
- HD 19019
- HD 6434
- HD 32283
- HD 192263
- HD 102117
- HD 117618
- HD 224693
- theta CrB
- HD 37605
- HD 107148
- HD 24156
- HD 3651
- HD 168443
- HD 101530
- HD 121504
- HD 179111
- HD 114782
- HD 16141
- HD 216770
- HD 40506
- HD 93903
- 70 Vir
- HD 1237
- HD 52265
- HD 26807
- HD 37154
- HD 73526
- HD 10453
- HD 8574
- HD 104885
- HD 150706
- HD 189830
- HD 202206
- HD 134987
- HD 12651
- HD 46979
- iota Hor
- HD 69744
- HD 92788
- HD 26185
- HD 142
- HD 108874
- HD 142415
- HD 128311
- HD 96109
- HD 33564
- HD 154857
- HD 210277
- HD 4203
- HD 114783
- HD 188015
- HD 177830
- HD 20367
- epsilon Ret
- iota Dra
- HD 147513
- HD 22282
- HD 5272
- HD 65216
- HD 15984
- HD 141937
- HD 183263
- HD 23079
- HD 47536
- HD 4208
- 18 Cyt B
- HD 10684 A
- HD 114386
- HD 113710
- HD 213240
- HD 81040
- HD 1797
- HD 46350
- HD 111232
- HD 16647
- HD 114729
- HD 164922
- 47 UMa
- gamma Cap
- HD 15837
- HD 2039
- HD 192228
- HD 187085
- HD 20554
- HD 138118
- HD 216437
- HD 196050
- HD 216435
- HD 106252

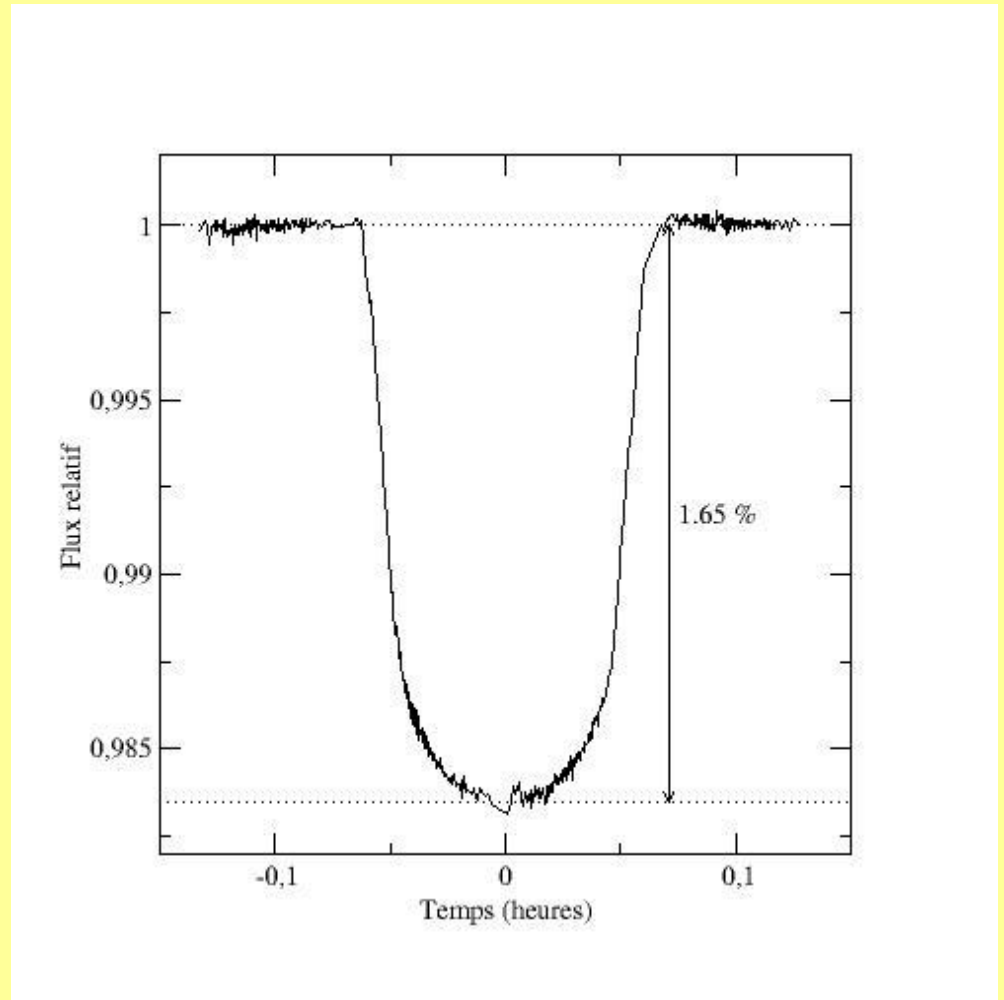
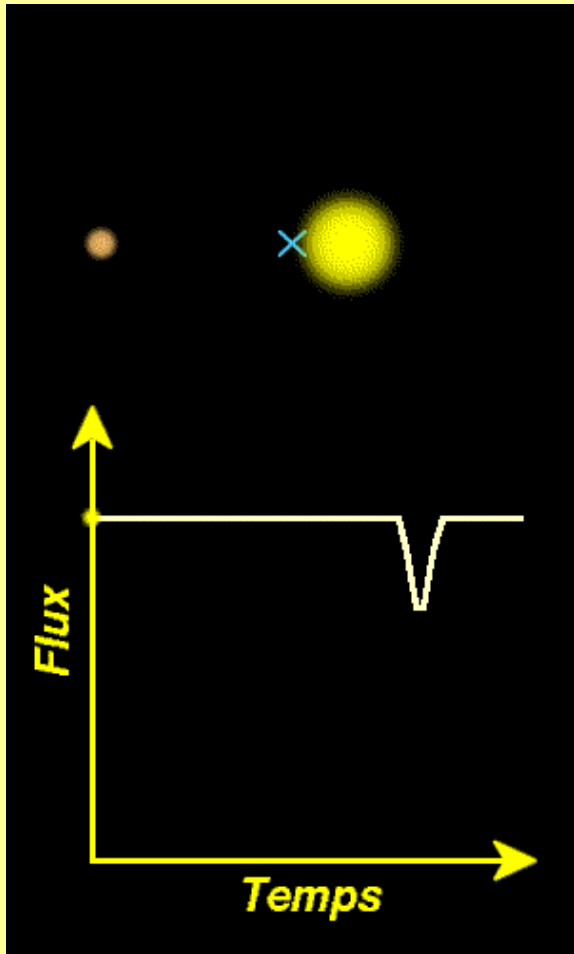
Première surprise : les "Jupiter-Chauds" ...



vues "artistiques"

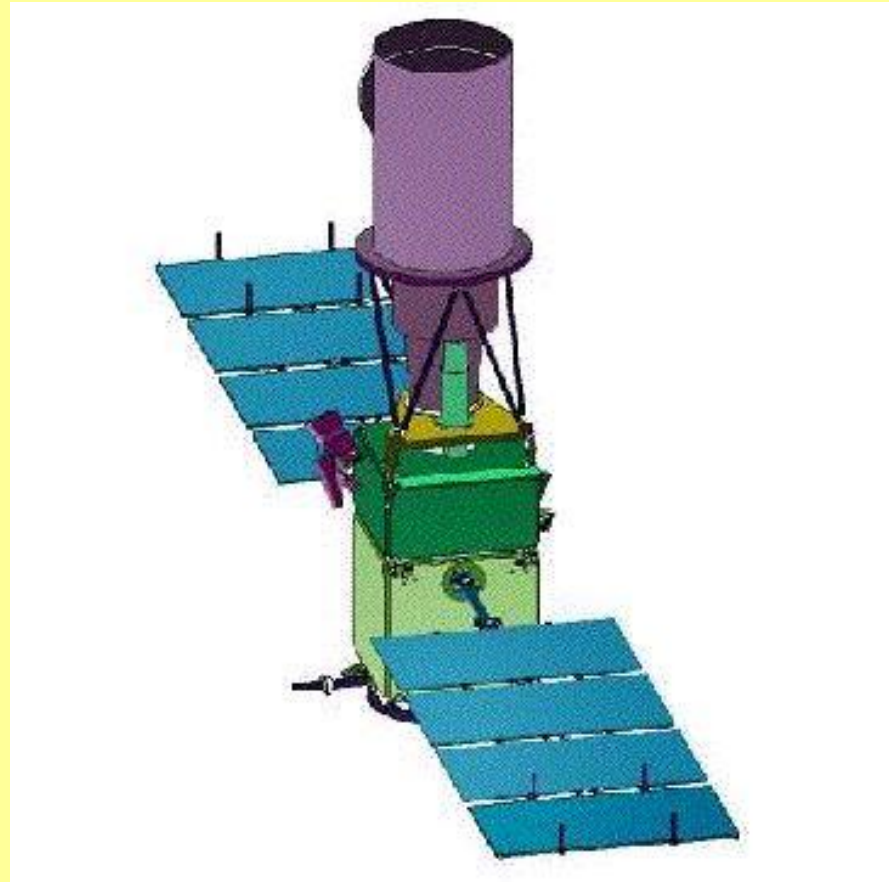
Autre Méthode : **Le transit (Le passage !)**
Occultation quand la planète passe devant l'étoile





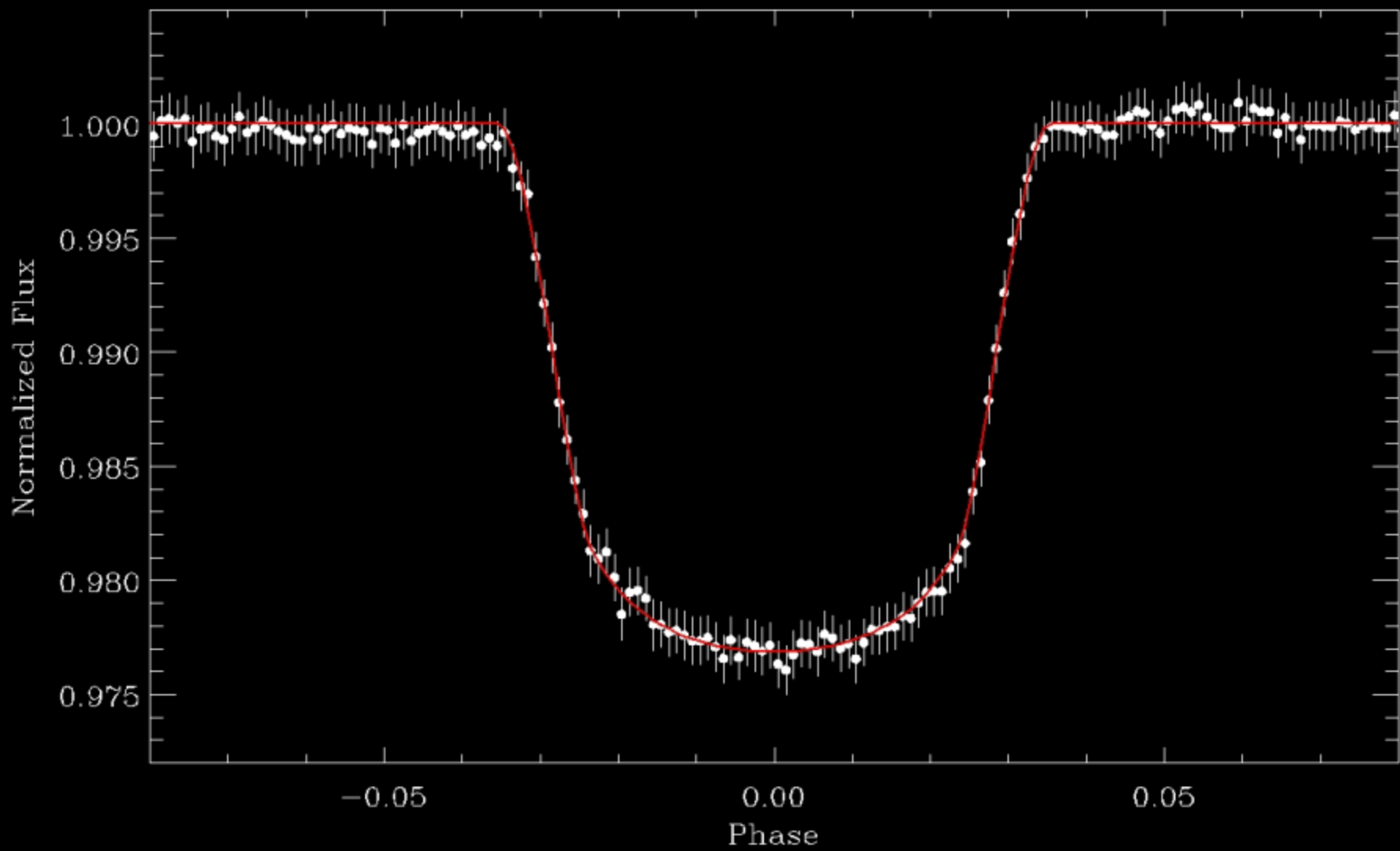
Et on en déduit le **DIAMETRE** !

Avec COROT



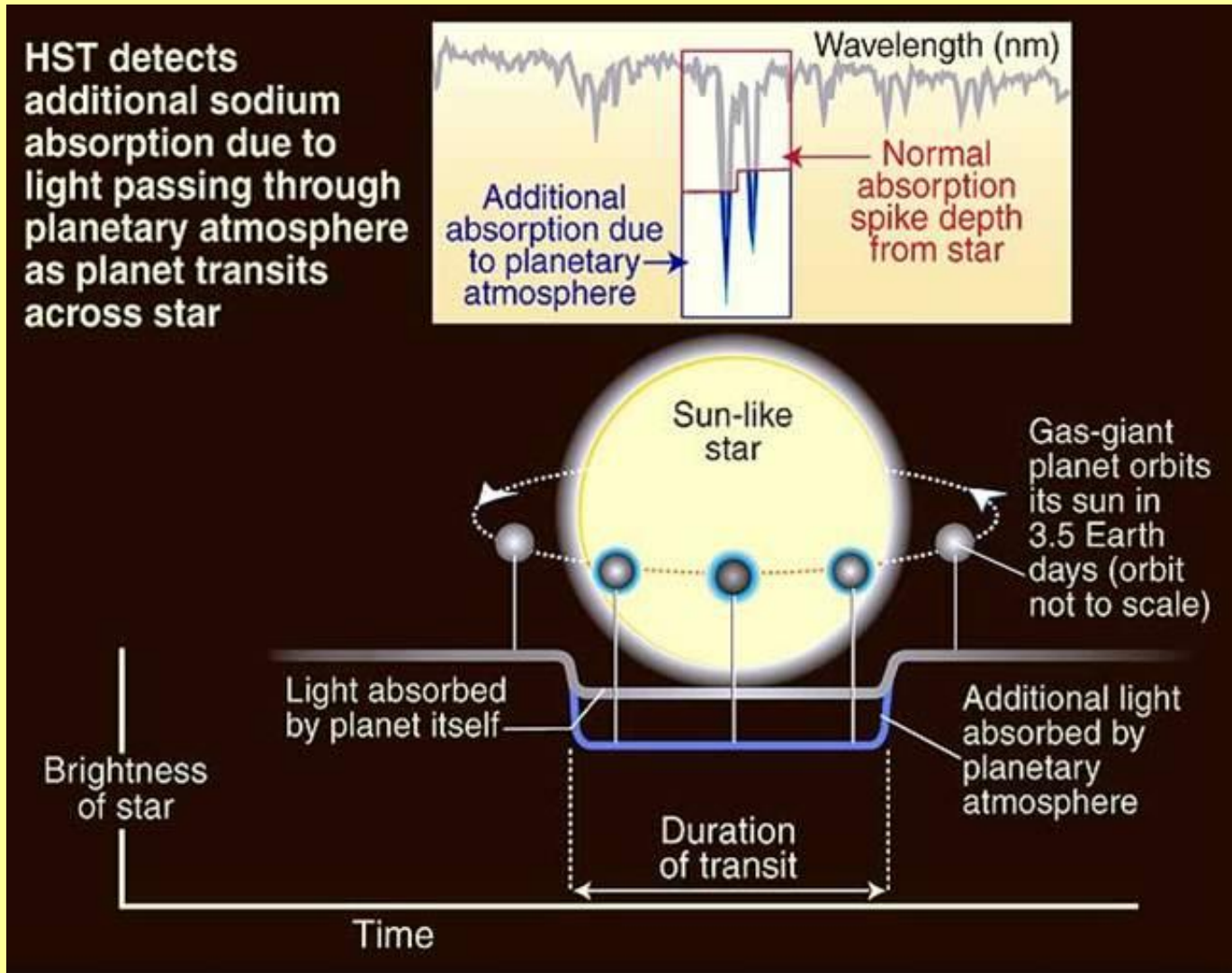
Voir des planètes telluriques par la méthode du Transit

Lancé 27 décembre 2006 de Baïkonour par une Soyous



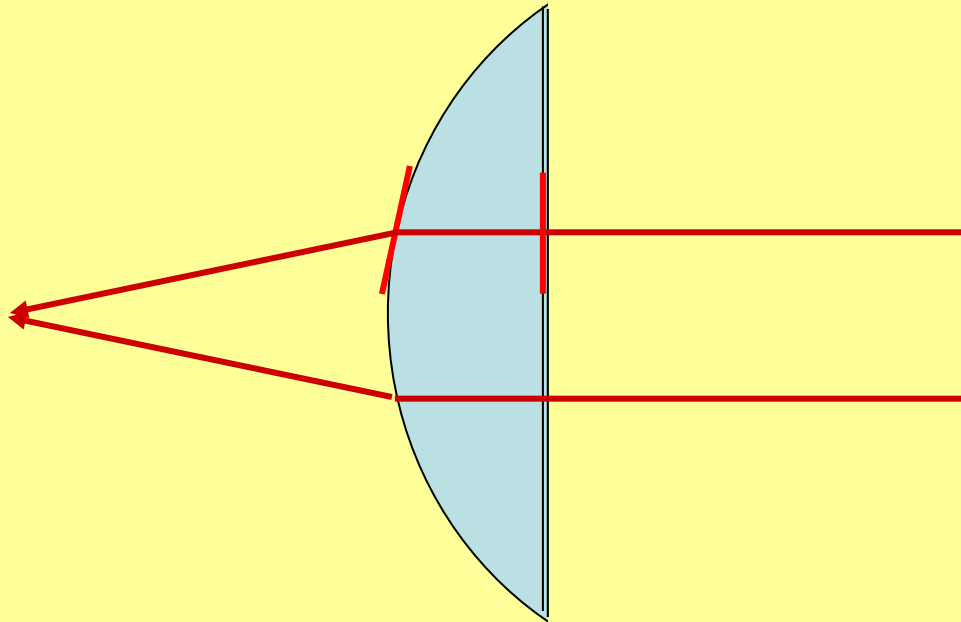
Copyright Corot

HD 209458 : Première identification d'un élément dans une planète (Hubble Space Telescope)

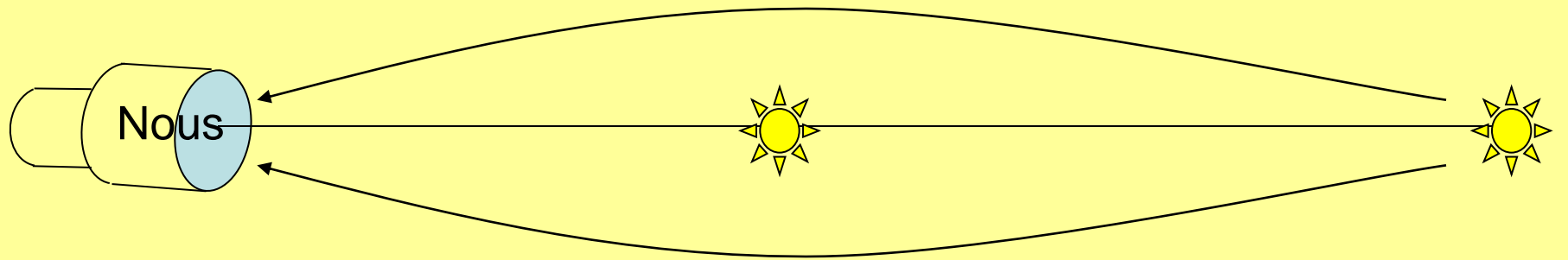


Encore une autre méthode : micro-lensing

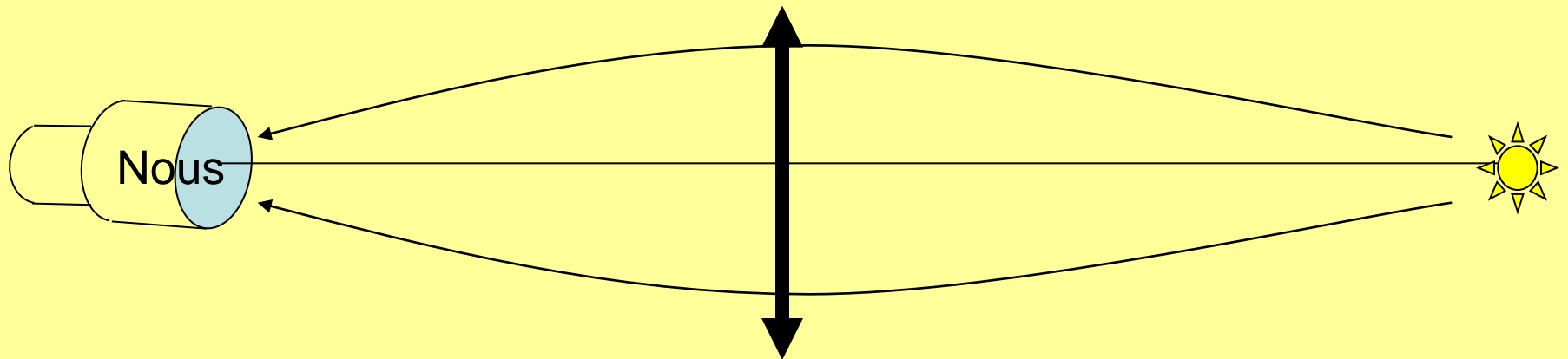
Lentille en optique



Une lentille naturelle : La (micro) lentille gravitationnelle

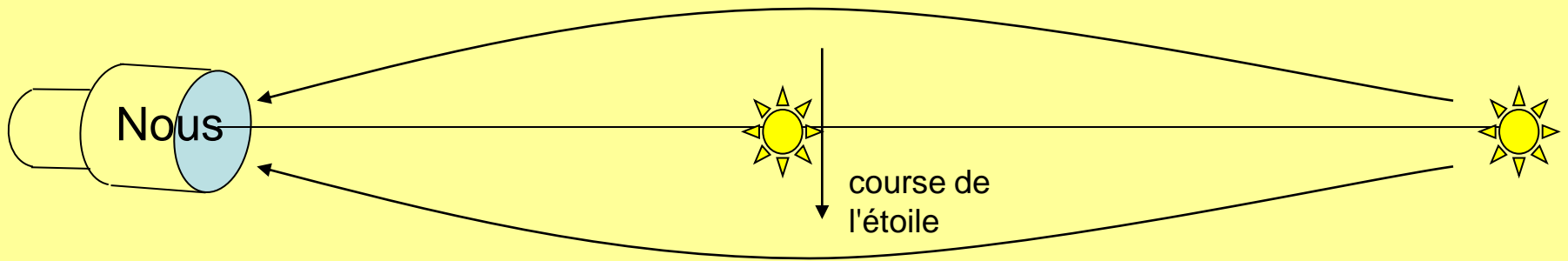


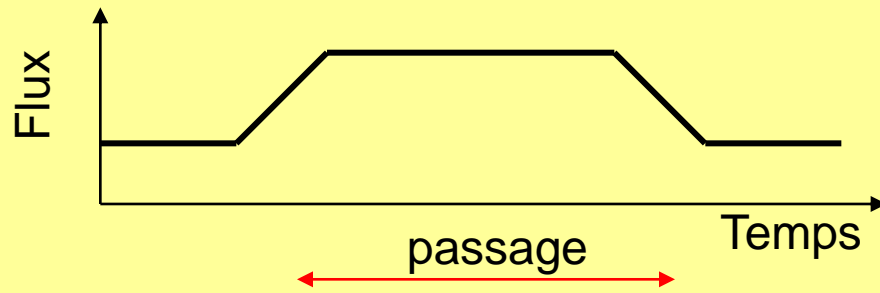
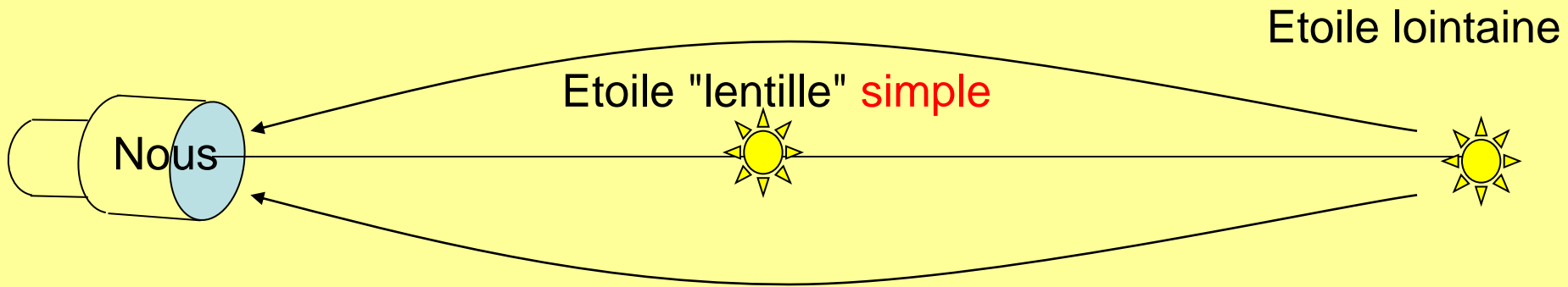
Équivalent à un télescope naturel

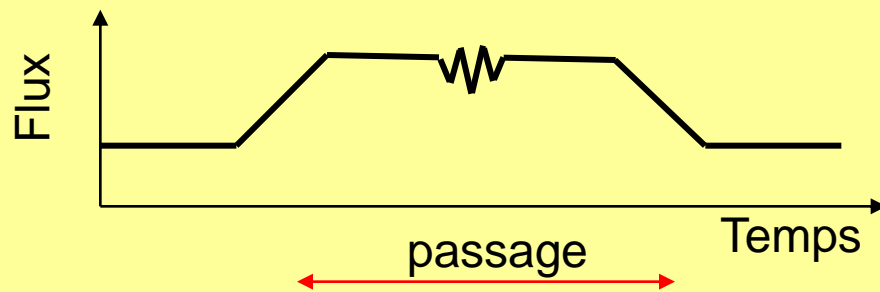
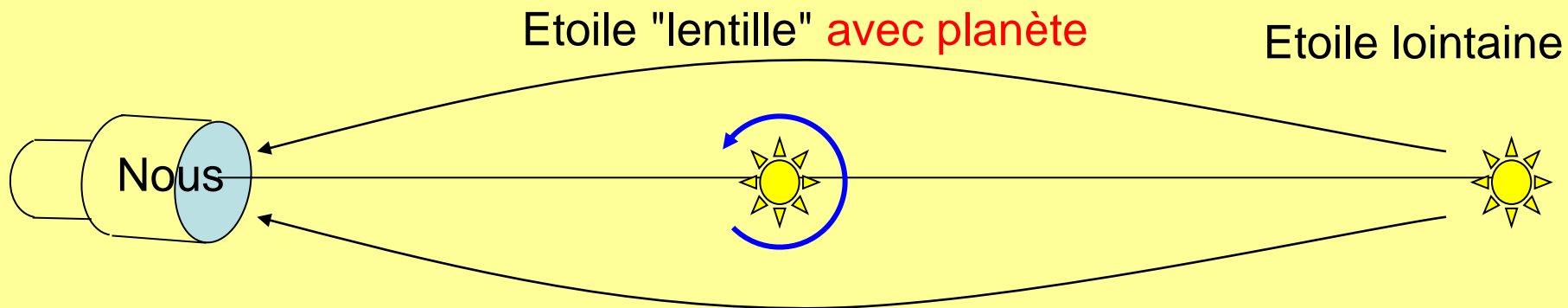
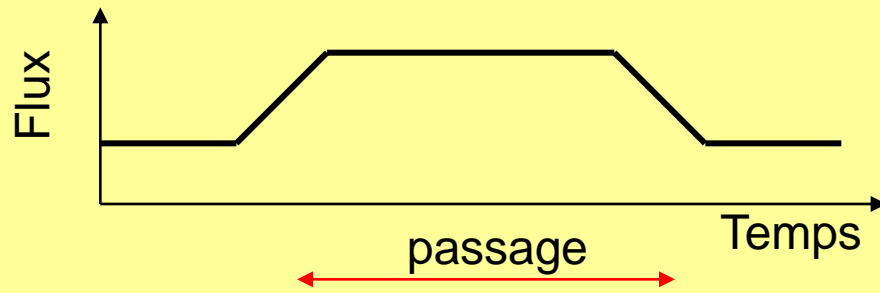
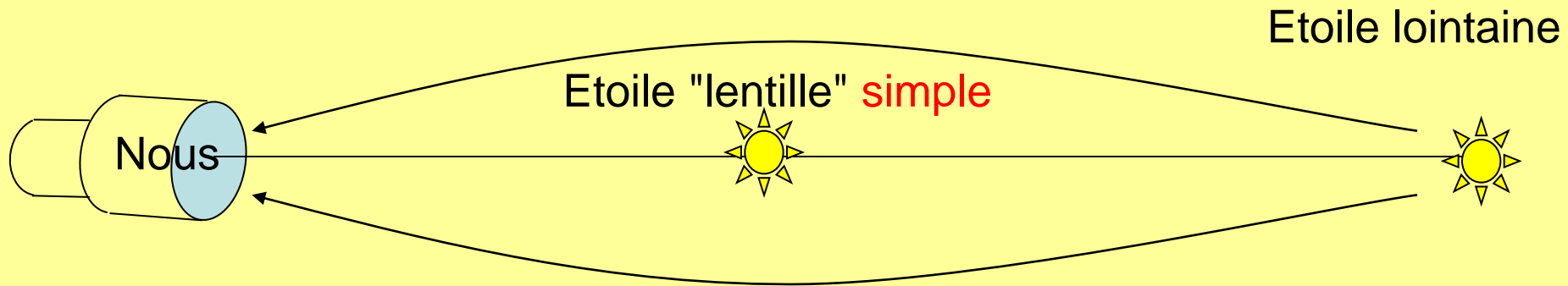


Une technique originale : La (micro) lentille gravitationnelle

Ou : Quand une étoile passe devant une autre

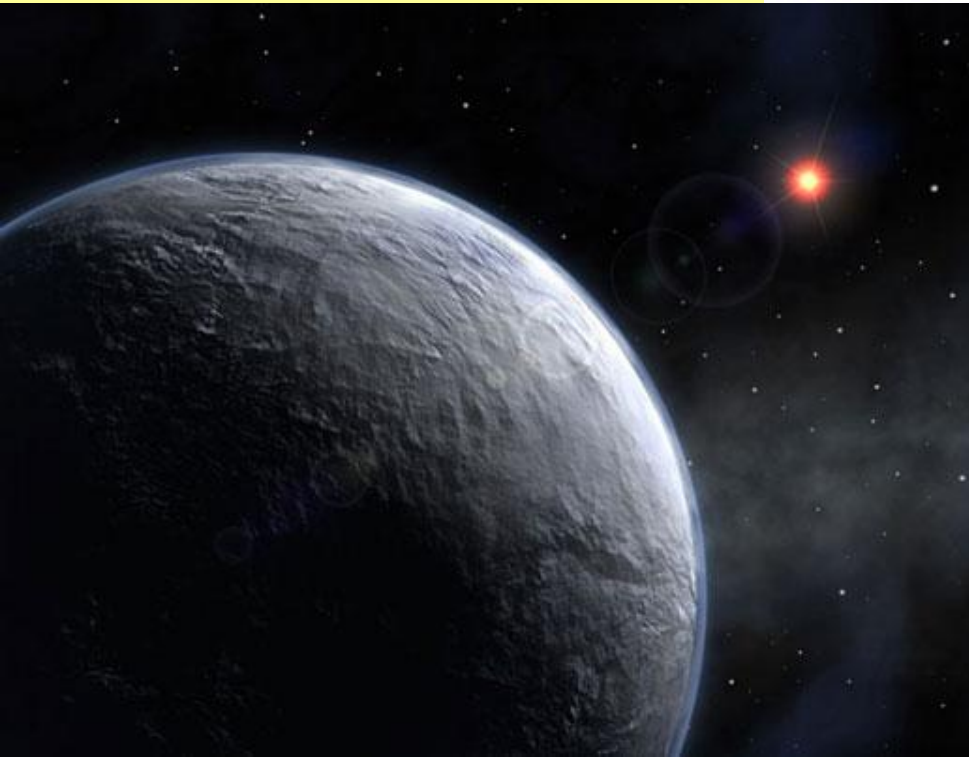
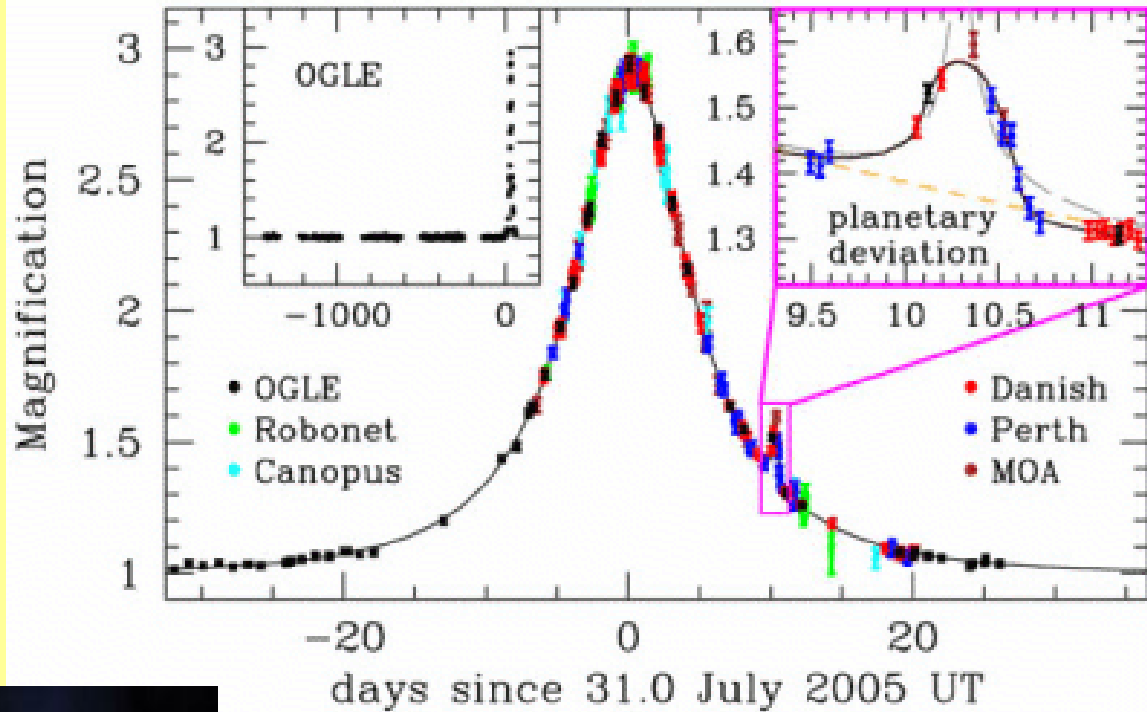






Les "vraies" mesures

OGLE-2005-BLG-390Lb



Une méthode qui permet de découvrir des planètes très lointaines

Vue artistique

Le monde est grand !

Et les planètes sont très petites !

On les a trouvées ...

... Maintenant on veut les voir !

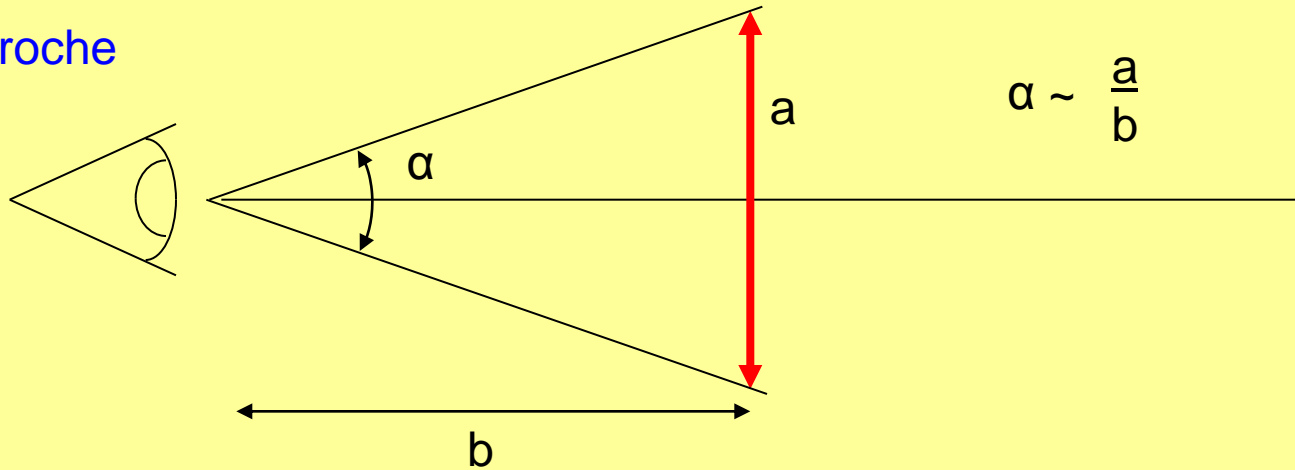
Ce n'est pas facile !

2 problèmes :

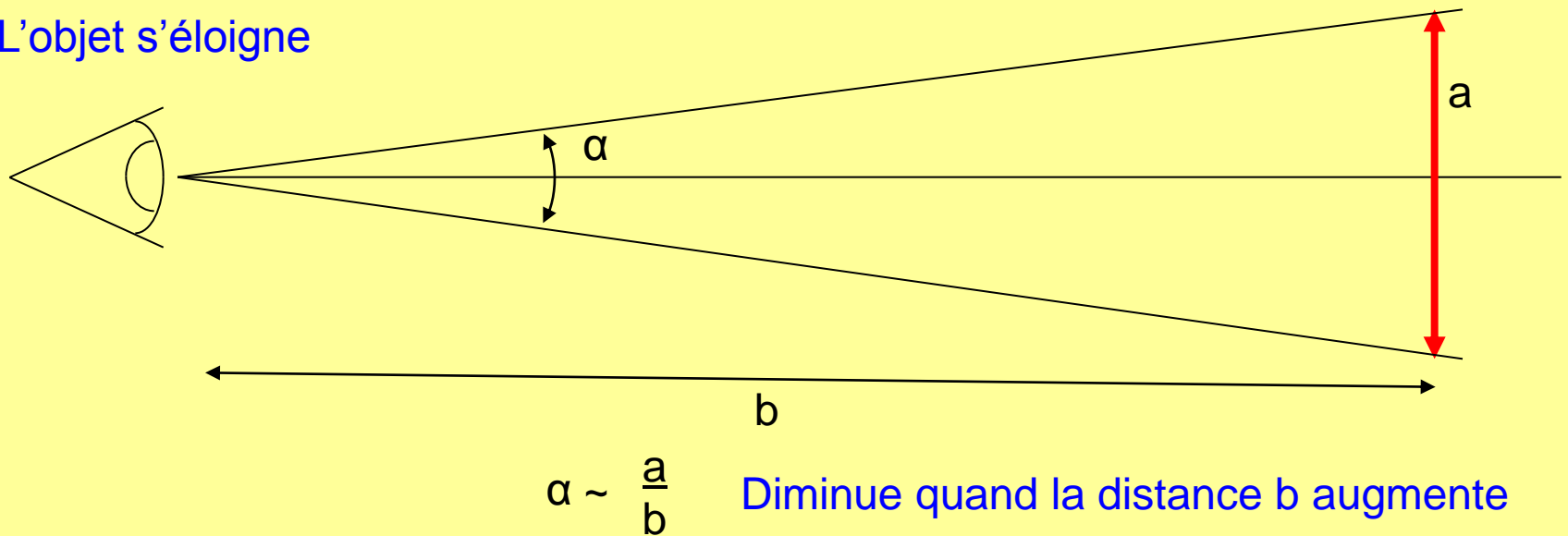
- Résolution spatiale : λ/D
- Eblouissement

La "grosseur" d'un objet = angle α = son diamètre apparent

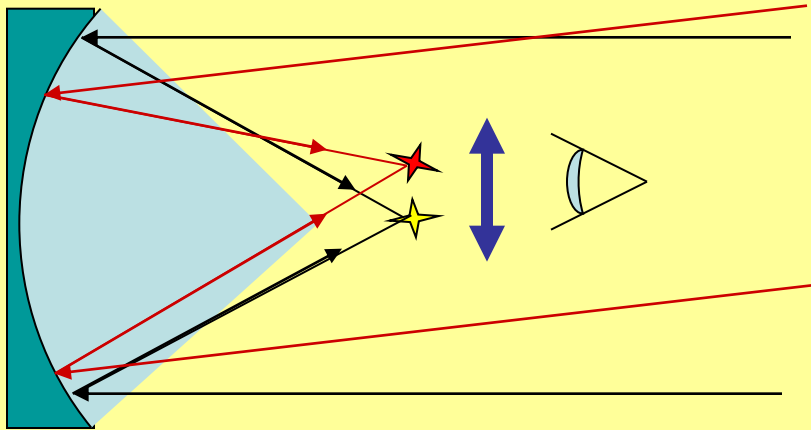
Objet proche



L'objet s'éloigne



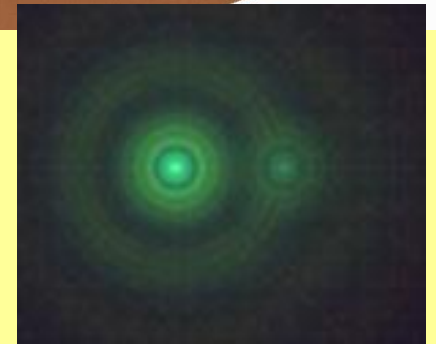
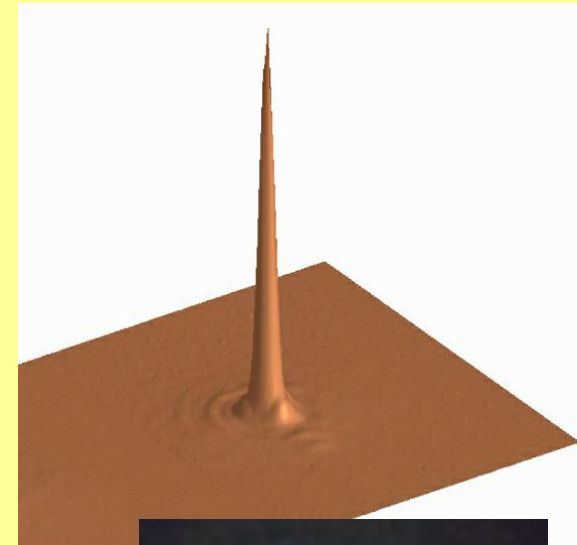
Les plus petits détails qu'un télescope peut discerner : λ/D



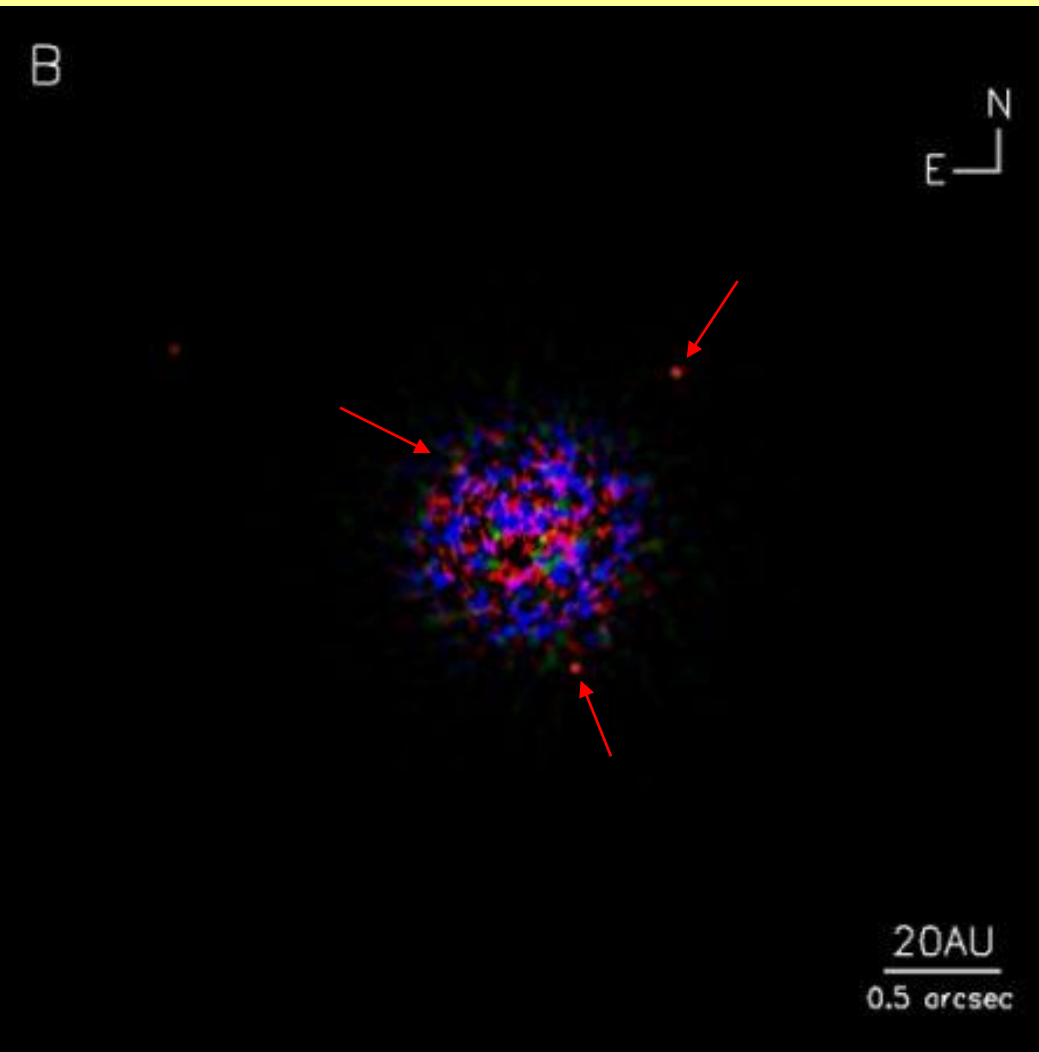
L'image de l'étoile est en fait une tache

de diamètre : $\lambda/D \rightarrow$

Plus D est grand , plus on distingue les détails



Imagerie directe d'exoplanètes : HR 8799



- Optique adaptative :

→ amélioration des images

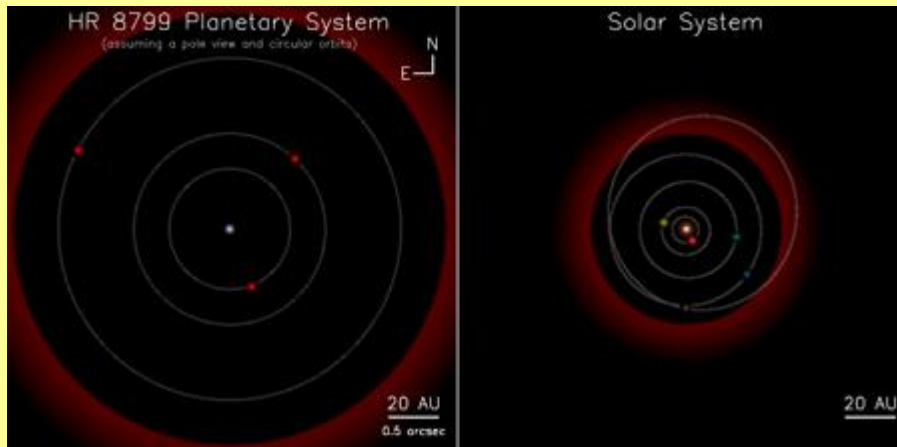
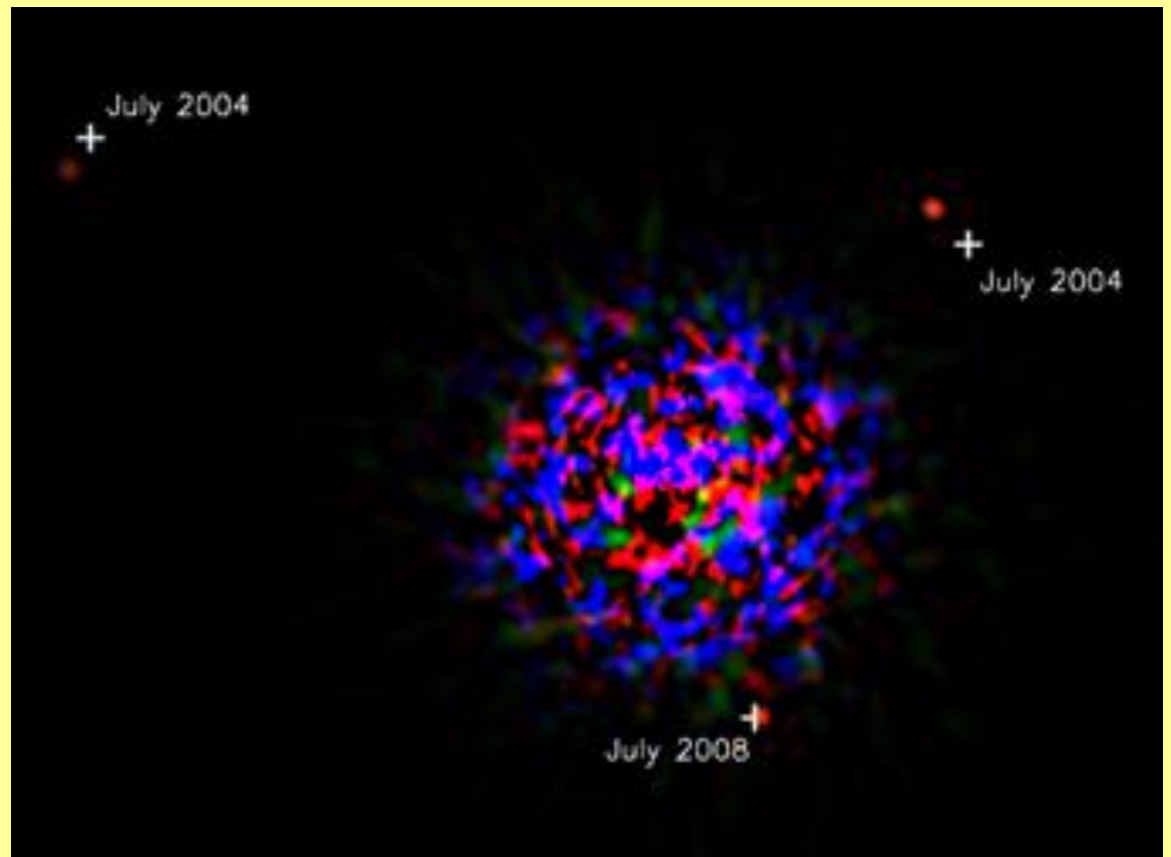
- Micro balayage :

→ amélioration du « champ plat »

- Infrarouge + coronographe :

→ amélioration du contraste

Déplacement orbital entre 2004 et 2008



Jupiter
Saturne
Uranus
Neptune

On en a vu quelques unes

Celles qu'on a vues sont très loin de leur étoile

On est très loin de voir une « Terre »

Pour aller plus loin

Télescope → Interféromètre

Pour augmenter encore la résolution :

INTERFEROMETRIE

Combiner plusieurs petits télescopes qui travaillent ensemble
On s'approche d'un très grand télescope

Michelson et Pease 1919

Radioastronomie

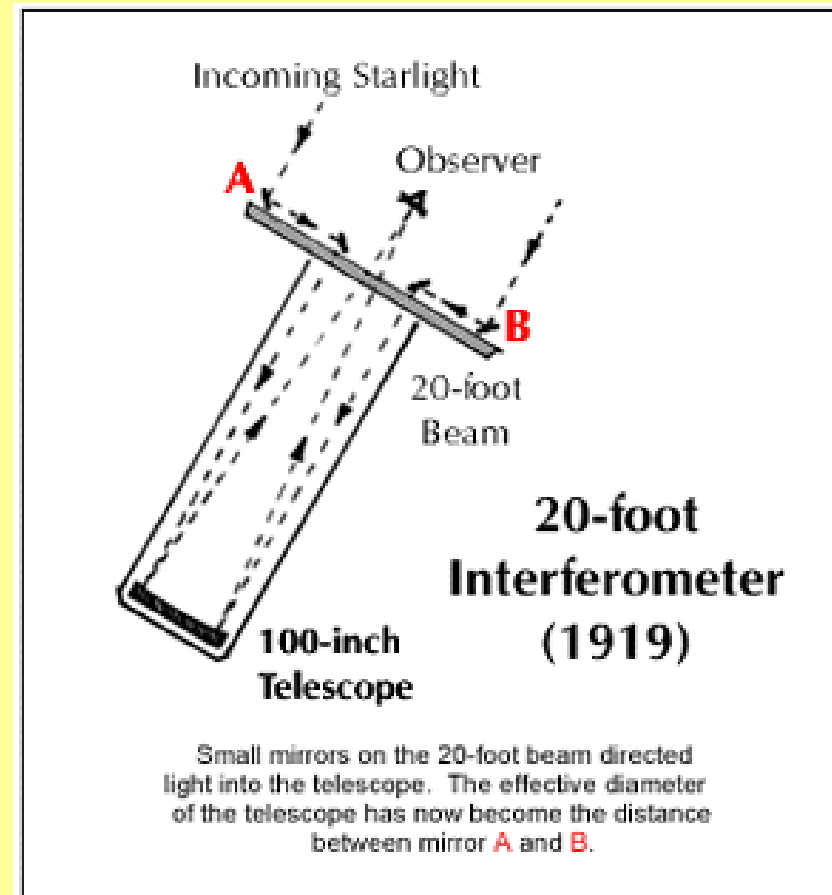
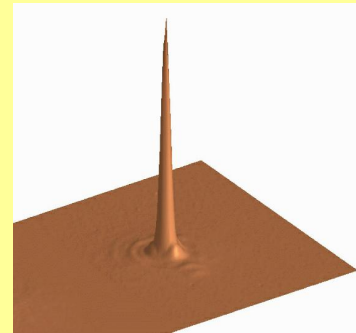
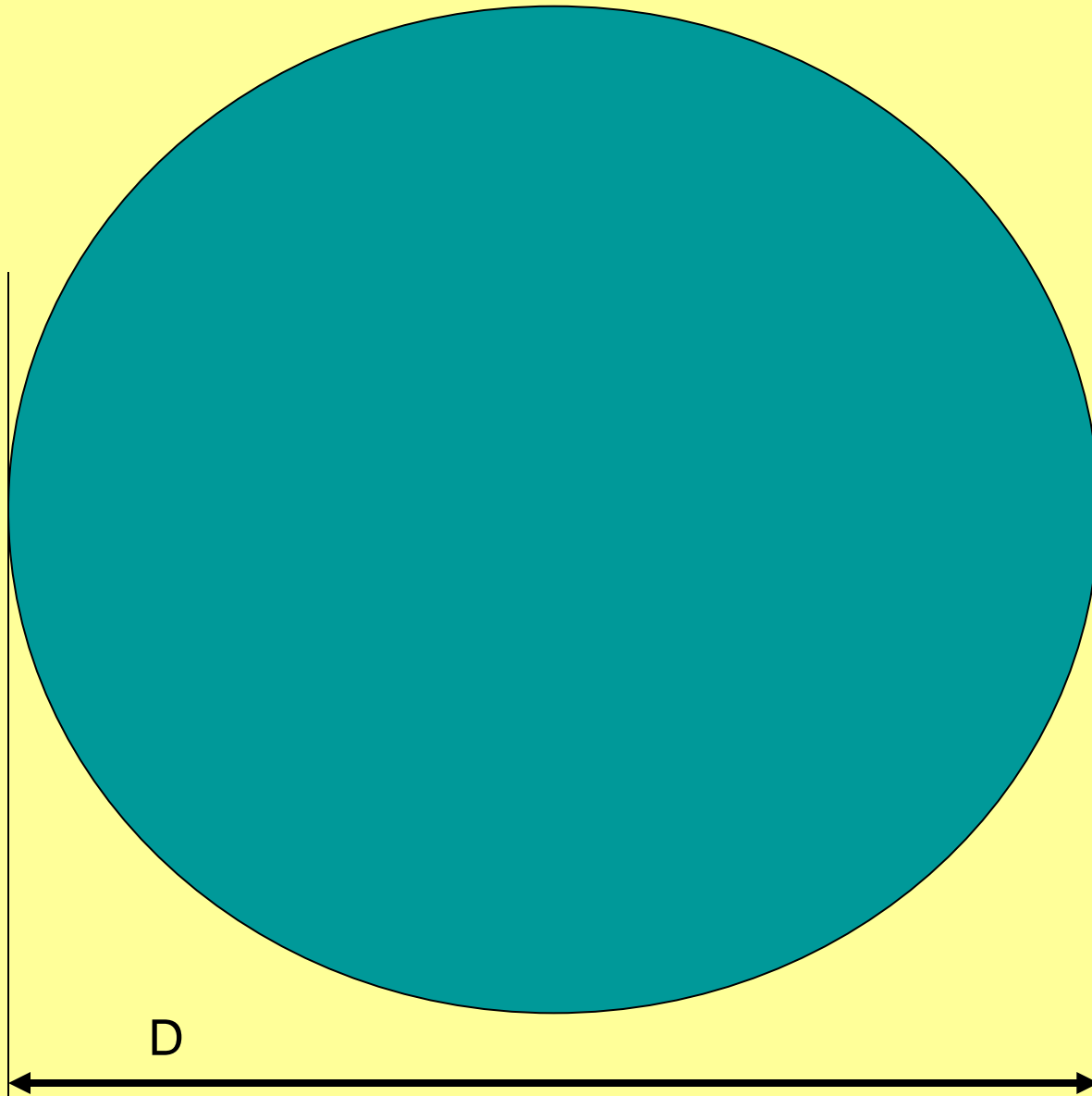
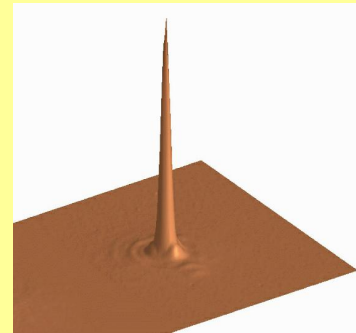
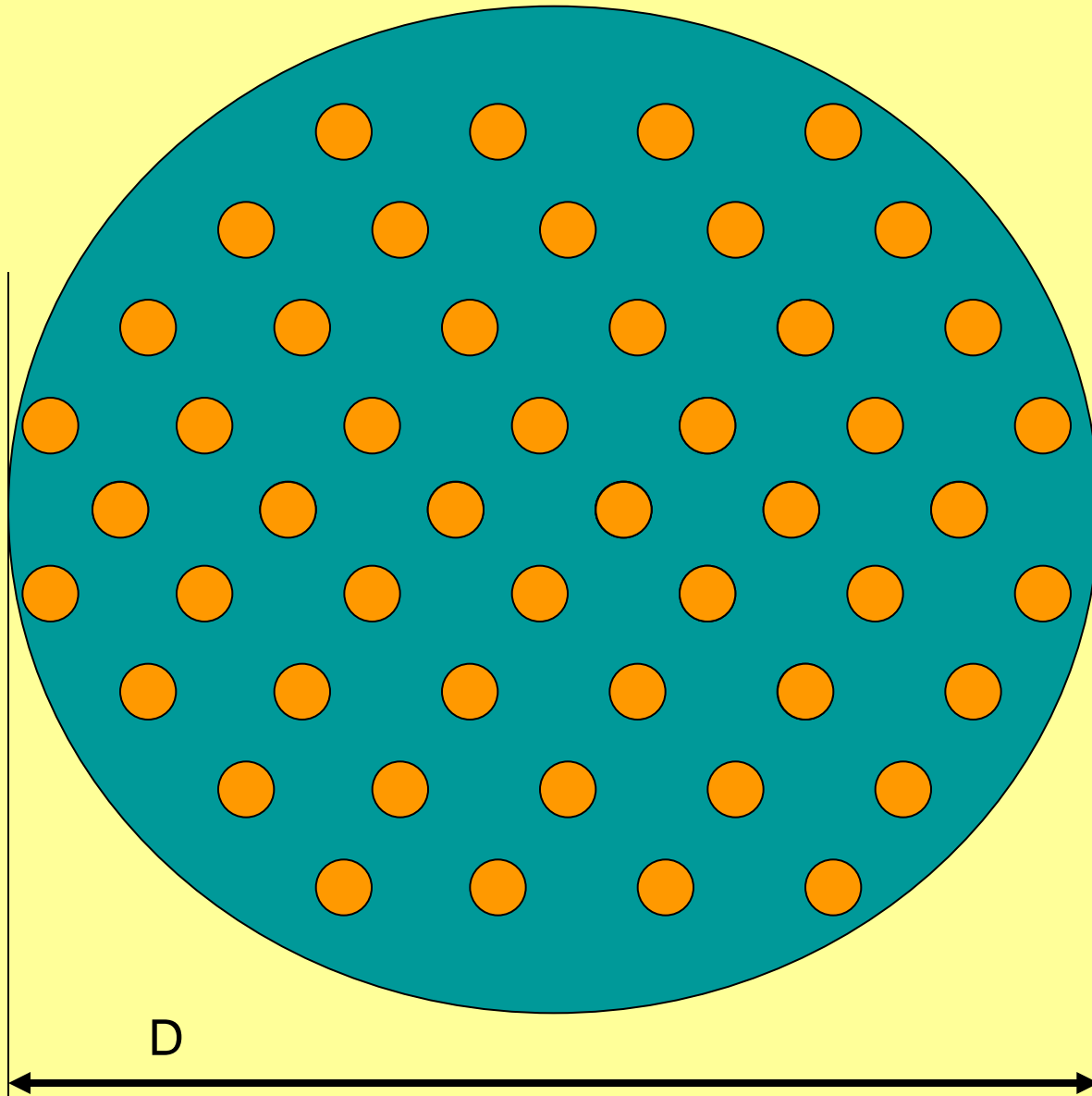


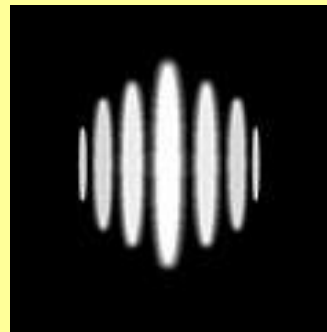
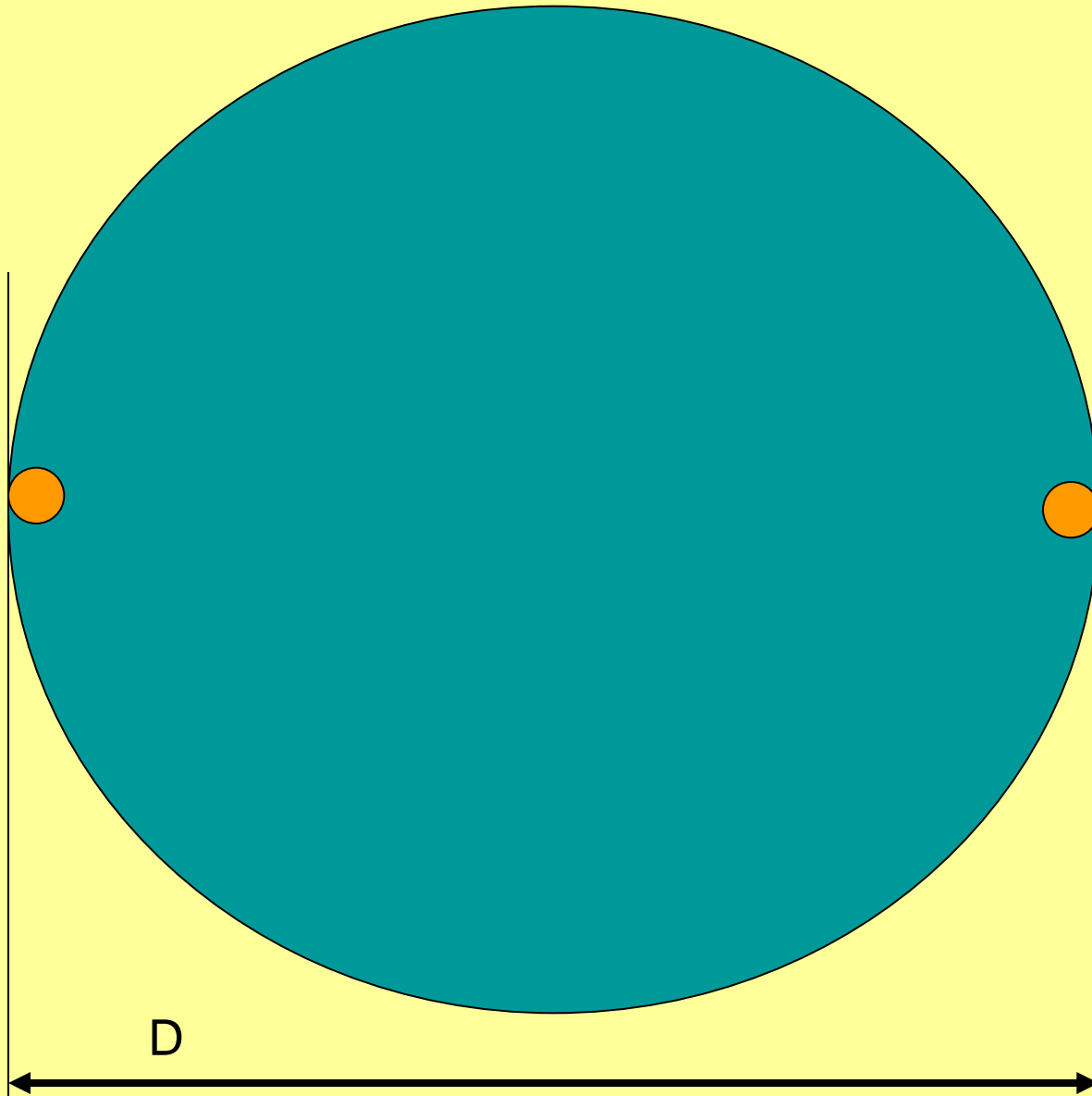
Image donnée par un miroir entier



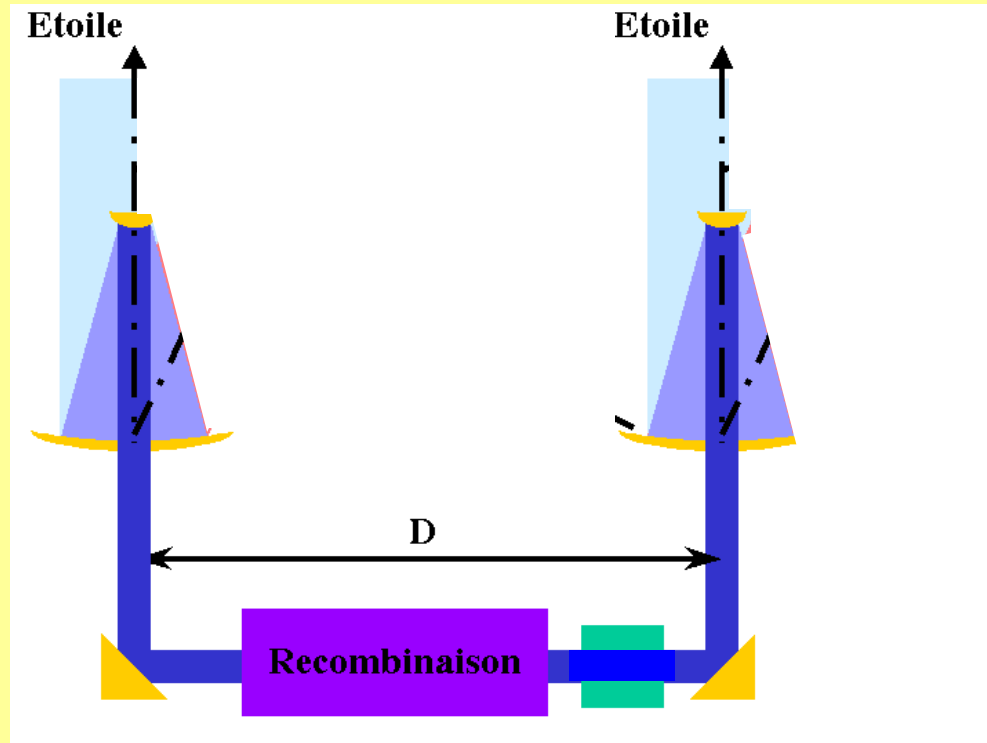
Interférométrie : n'utiliser qu'une partie du miroir



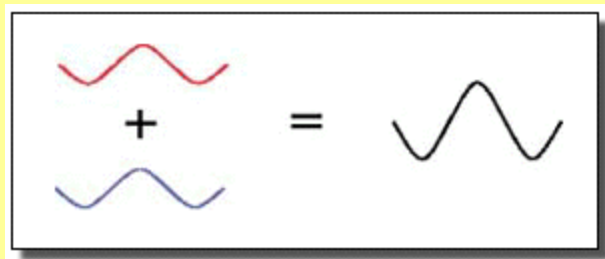
Interférométrie : n'utiliser qu'une partie du miroir = 2 télescopes séparés



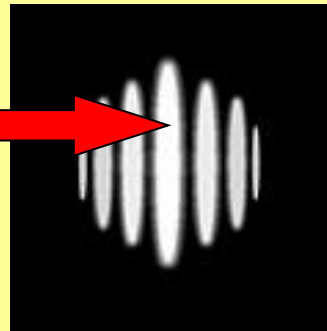
Pour l'éblouissement :



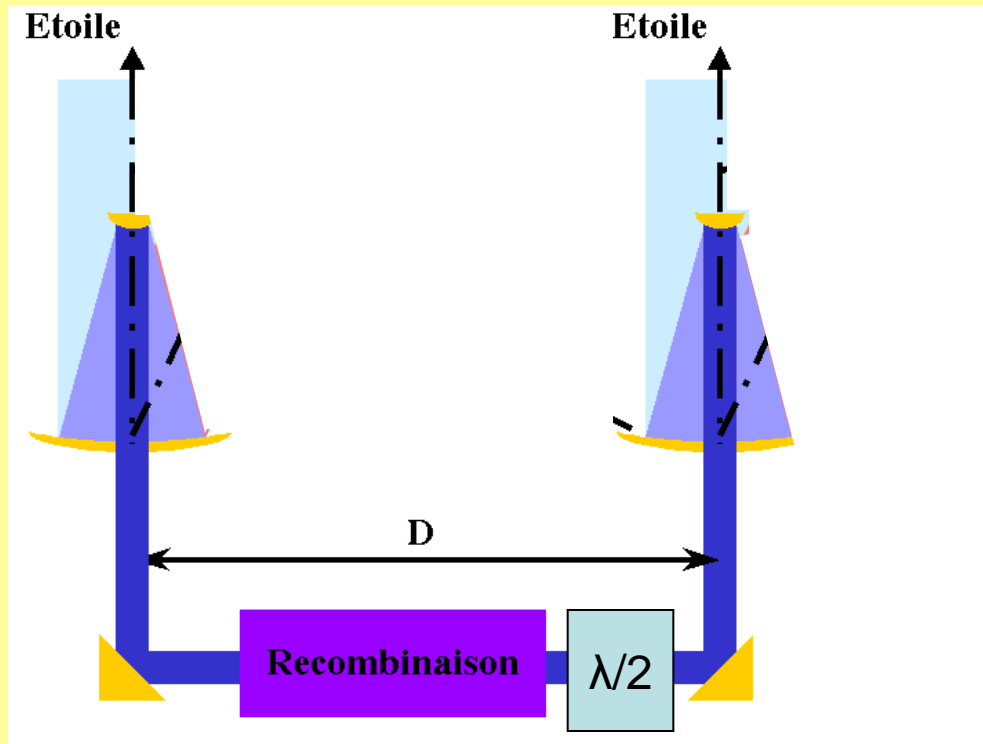
Trajets optiques égaux => Pour l'étoile : **addition**



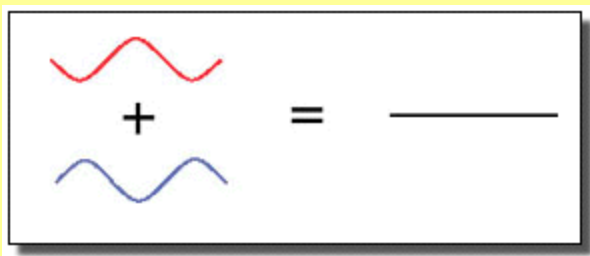
=> Frange brillante



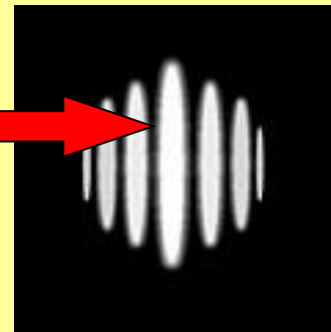
Pour l'éblouissement : Masquer l'étoile



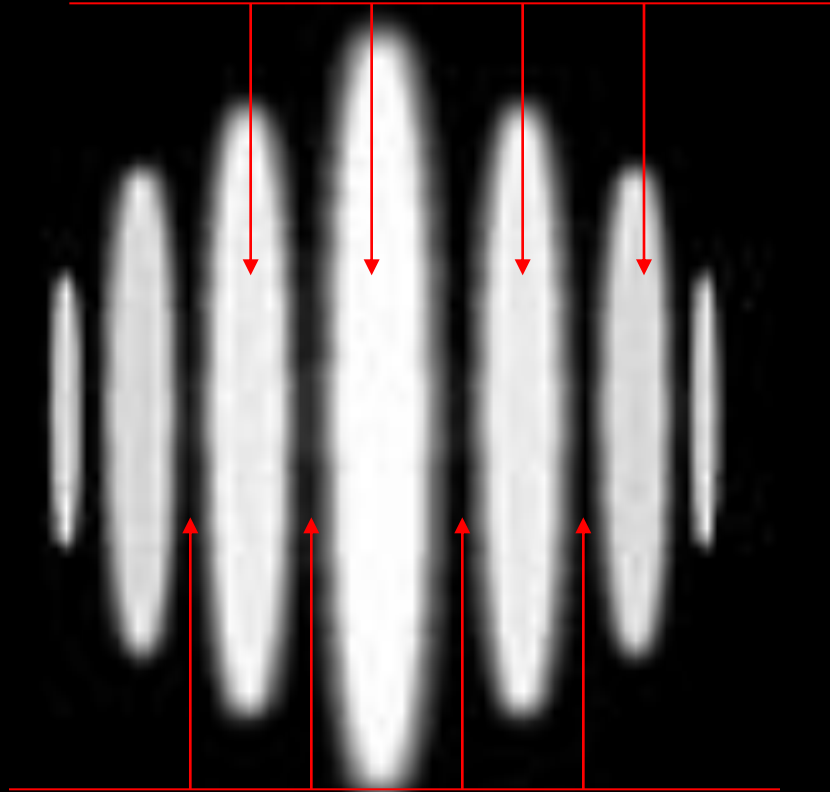
Différence de trajet de $\lambda/2$ => Déphasage de π => Pour l'étoile : soustraction



=> Frange sombre

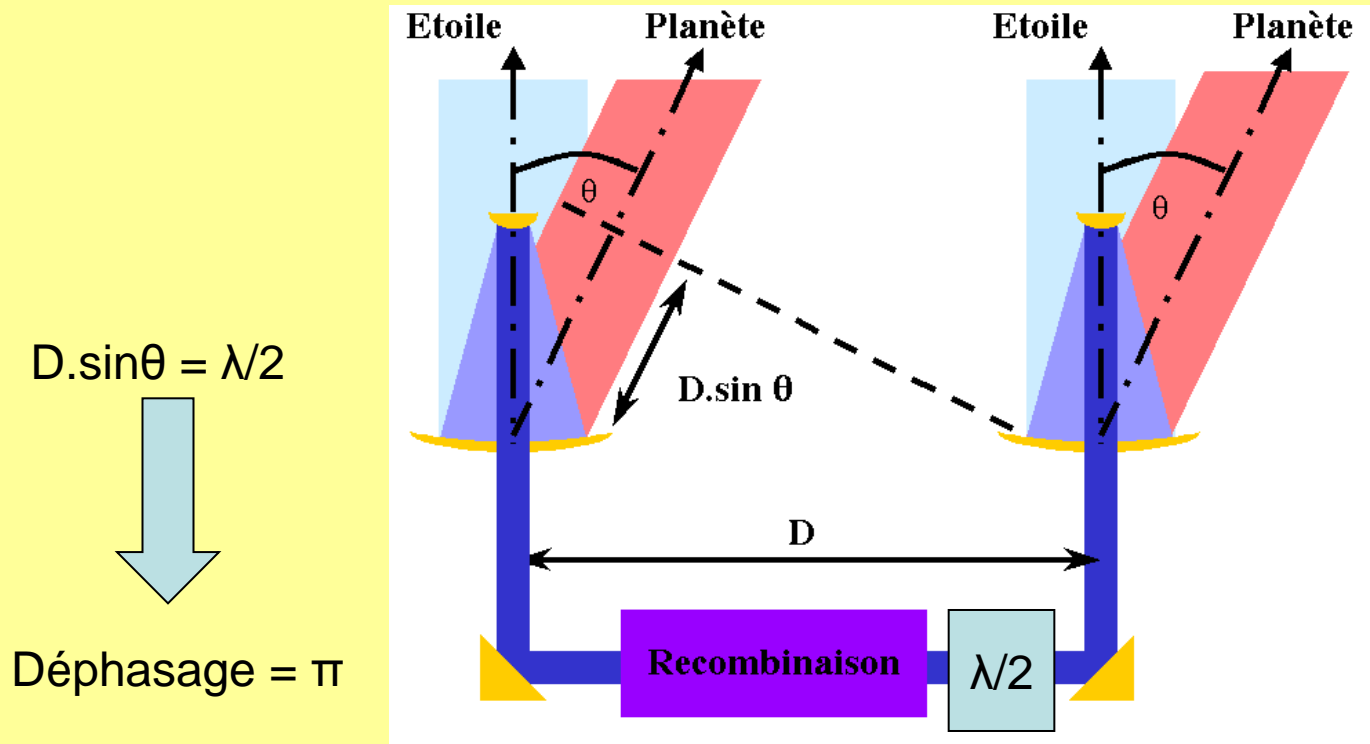


Franges brillantes de l'étoile

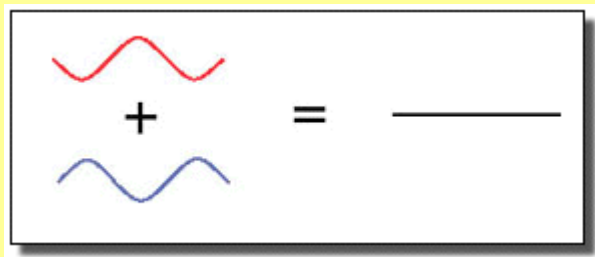


Franges brillantes de la planète

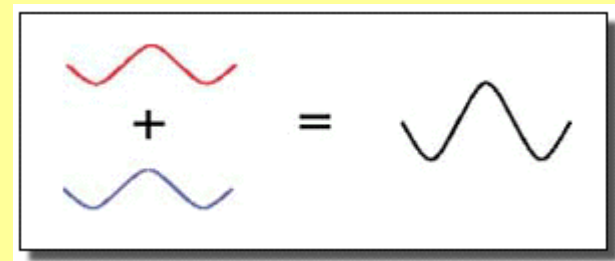
Masquer l'étoile ... mais pas la planète !

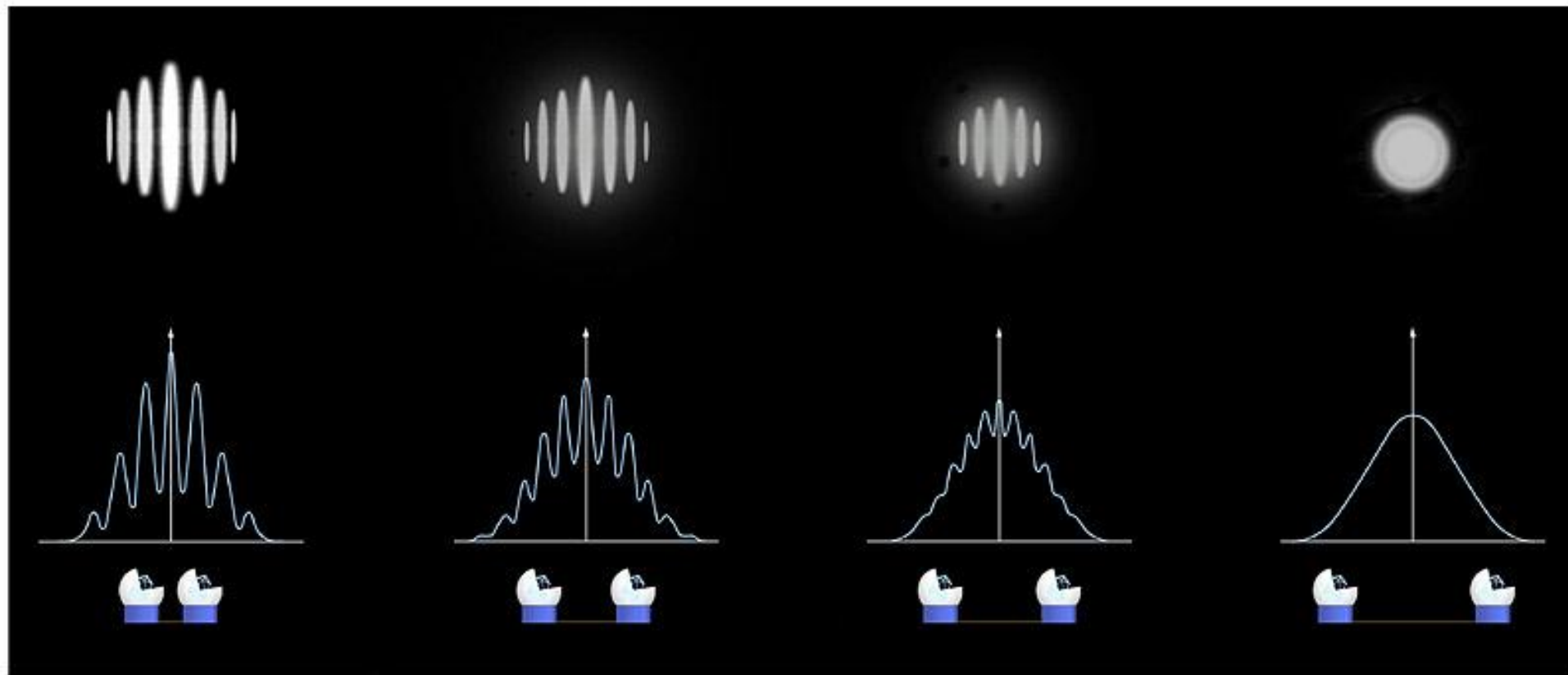


Pour l'étoile : **soustraction**



Pour la planète : **addition**





Interferometric Fringes at Different Telescope Baselines (Simulation)

ESO PR Photo 10e/01 (18 March 2001)

© European Southern Observatory



Le VLT – VLTI

4 télescopes de
8m de diamètre (UT)

Foyers "recombinables"
par train de coudés

3, 4 , ... Télescopes
"auxiliaires" de 1,8 m
mobiles (AT)

Aerial View of Paranal Observing Platform with VLTI Light Paths

L'avenir : E-ELT un télescope de 42 m de diamètre



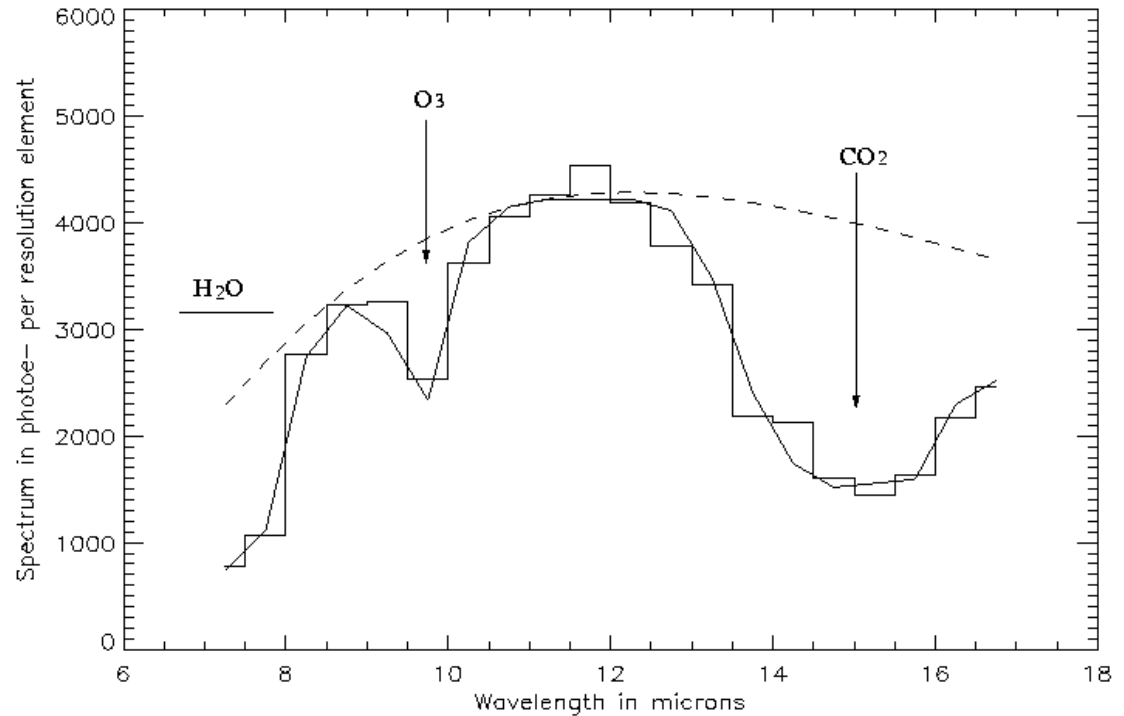
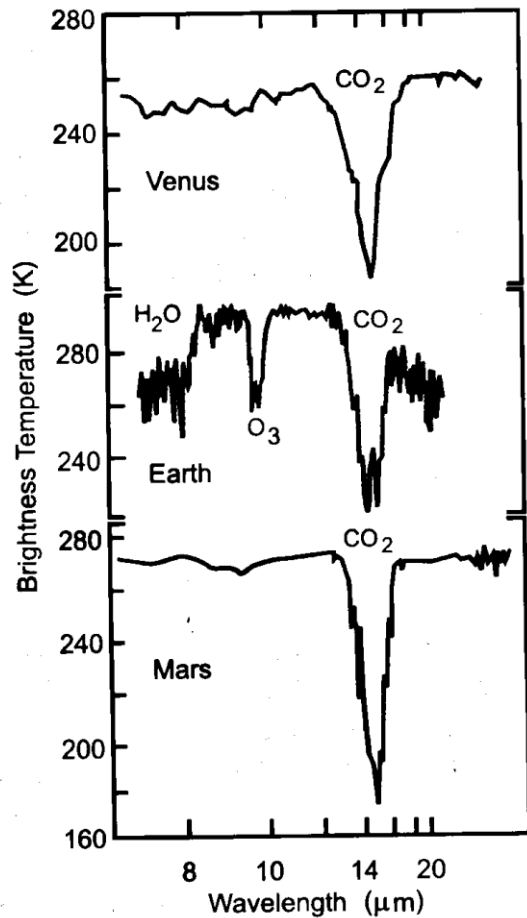
FIN

Merci de votre attention

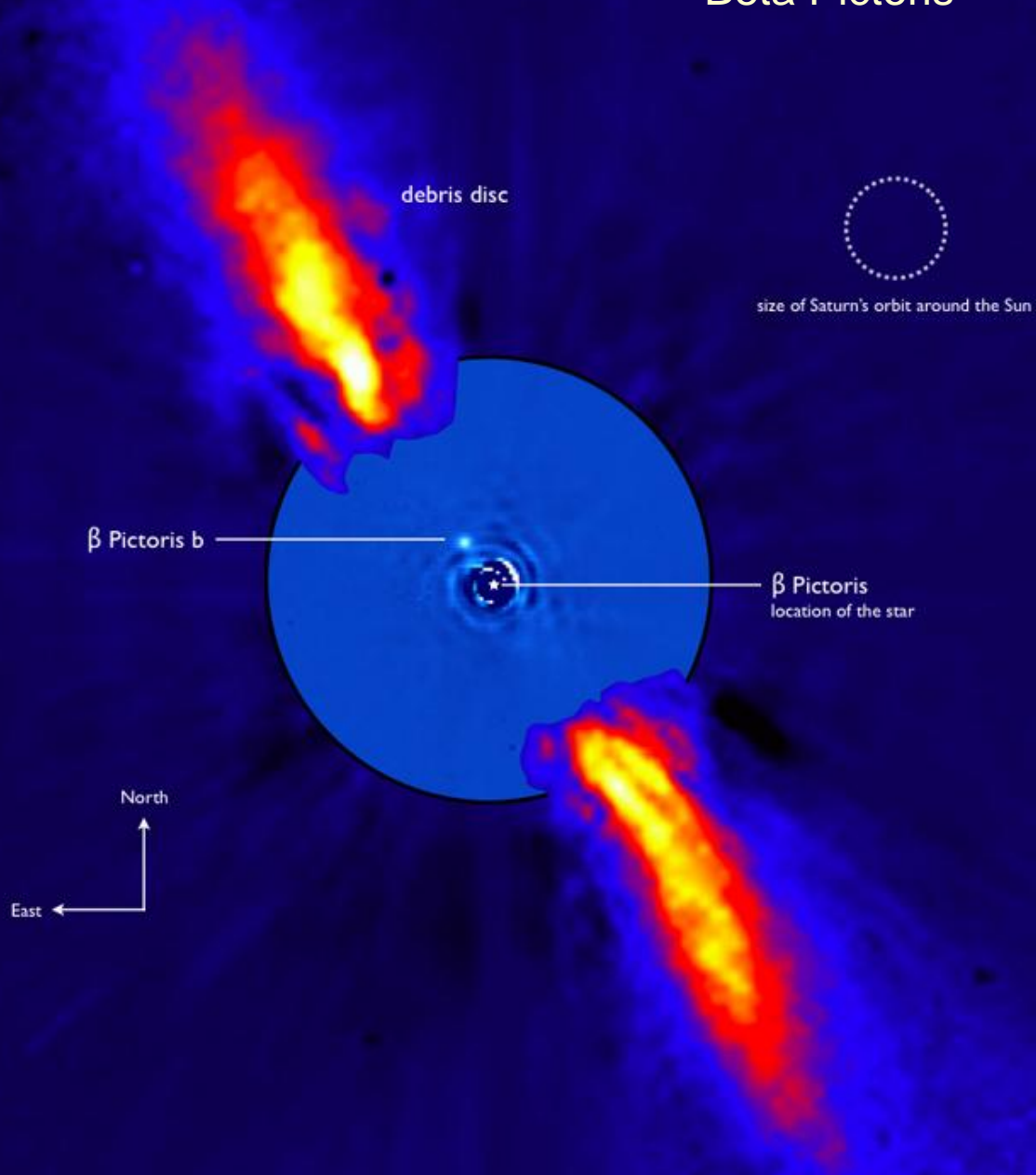
La suite est du bonus

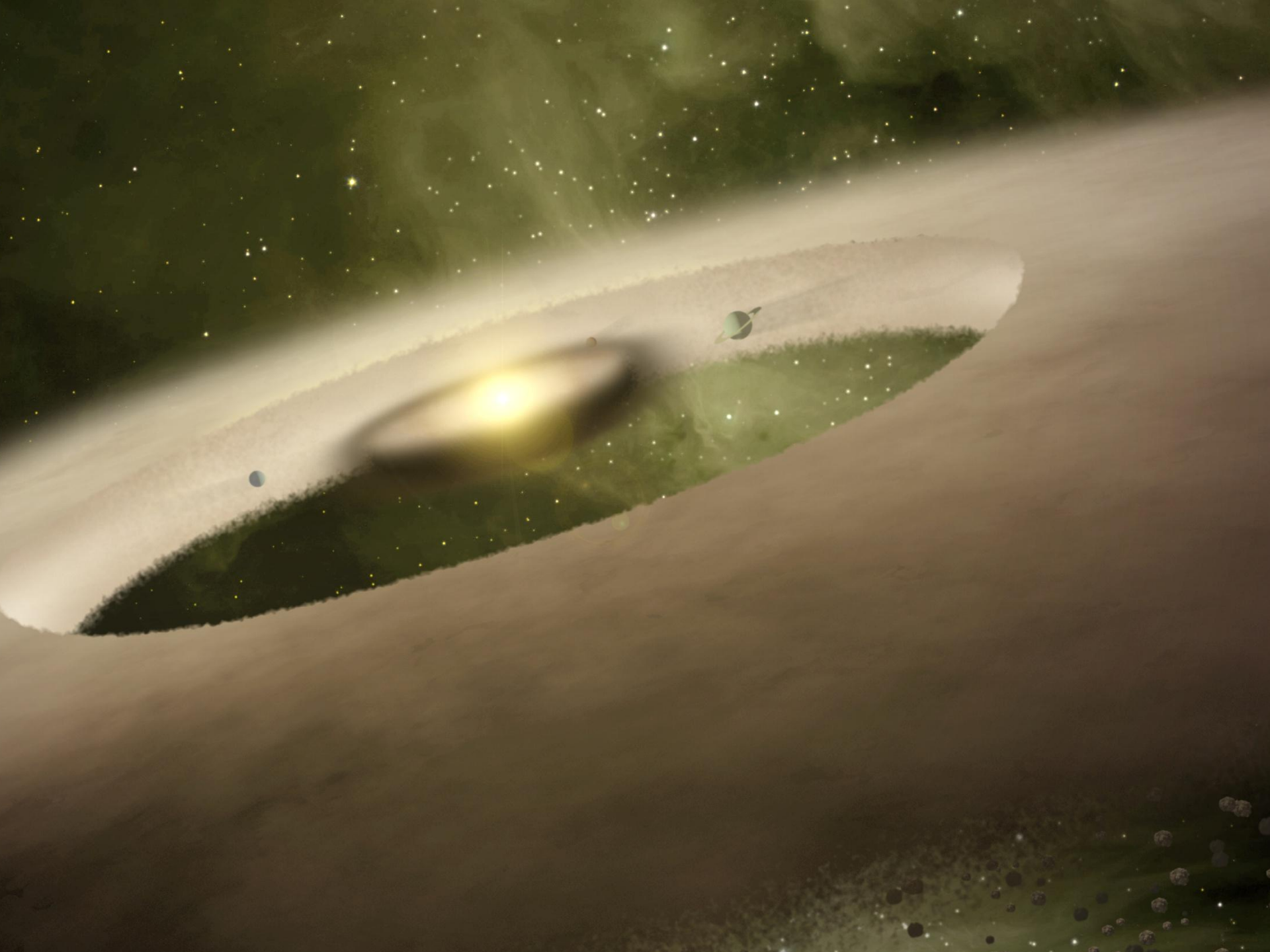
Comment saura-t-on qu'une planète est habitée ?

Spectres dans l'infrarouge



Beta Pictoris





Exoplanètes et vie extraterrestre

Apport de l'Astrobiologie

La Vie que nous connaissons = chimie organique (ou du carbone)



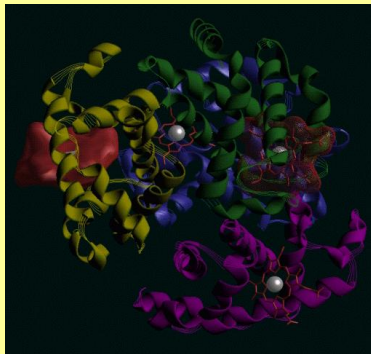
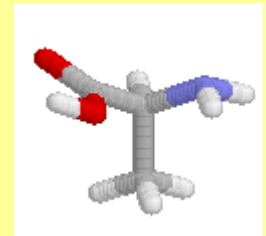
Principaux
atomes constituants
des molécules
"organiques"

H : Hydrogène
C : Carbone
O : Oxygène
N : Azote
P : Phosphore

Chimie du Carbone

Acides aminés

Chaînes d'acides aminés
codées par l'ADN ...



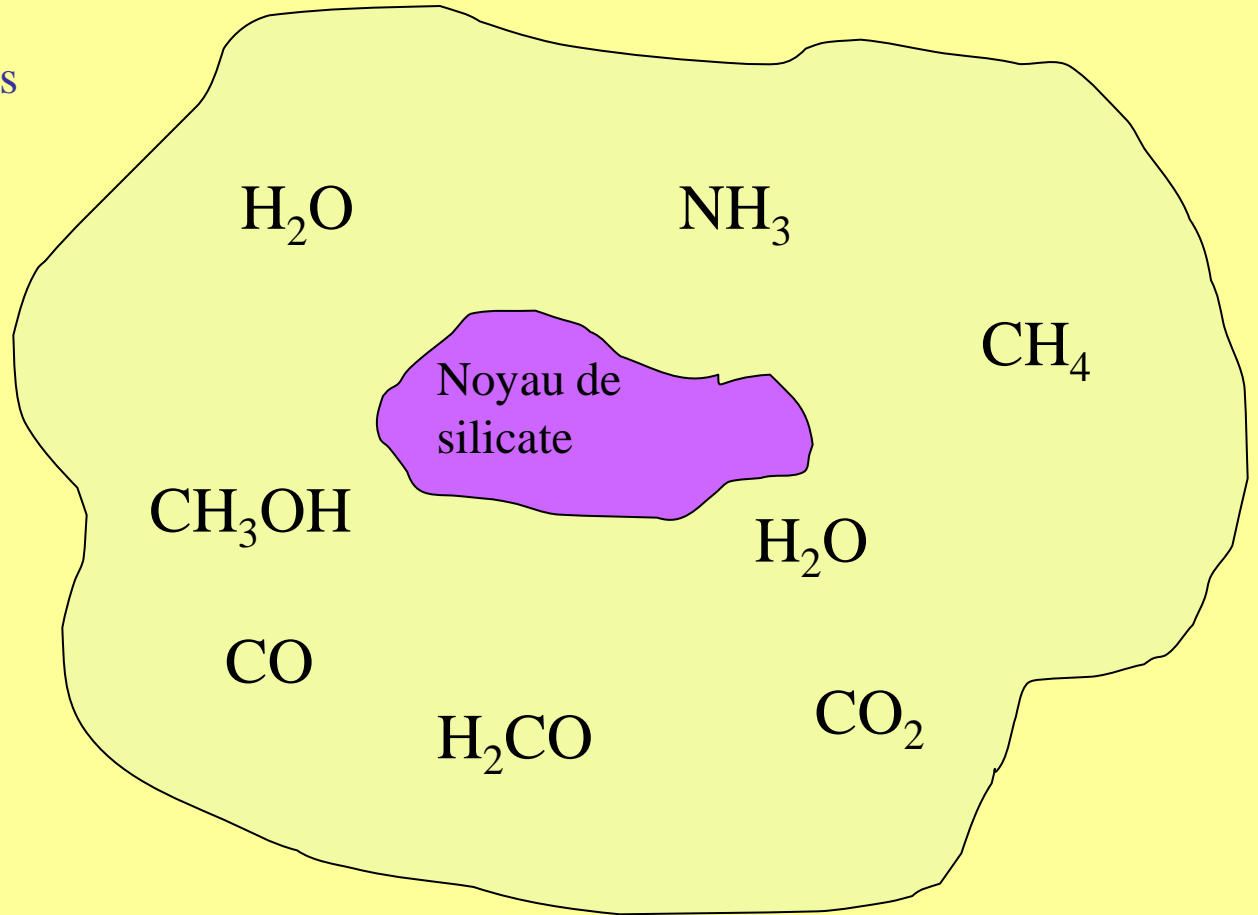
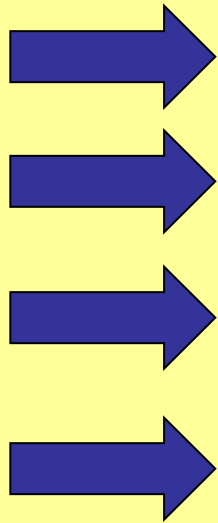
Protéines



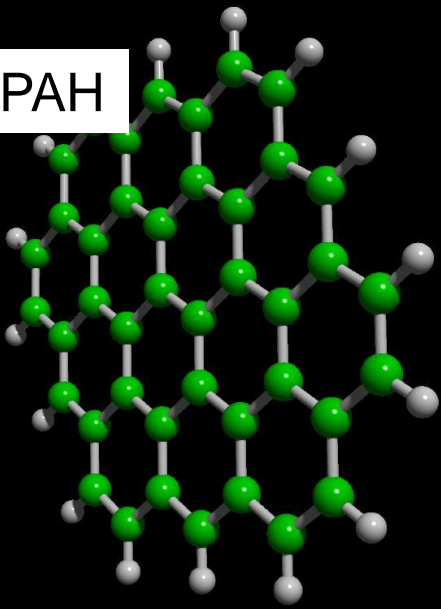
Chimie complexe dans les nuages moléculaires

Sur les grains, se forment des molécules organiques

Rayonnement UV des étoiles

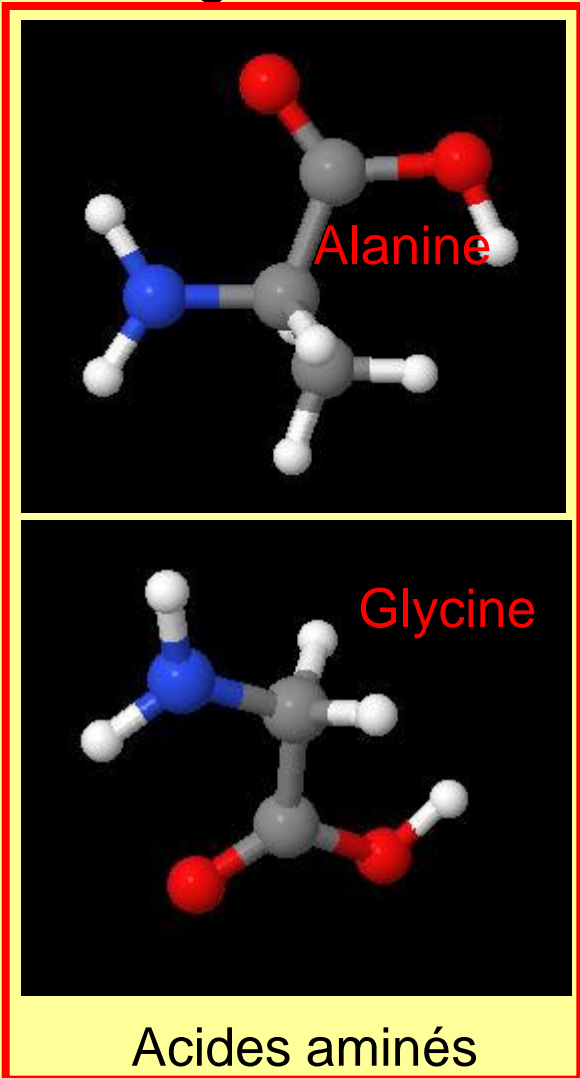
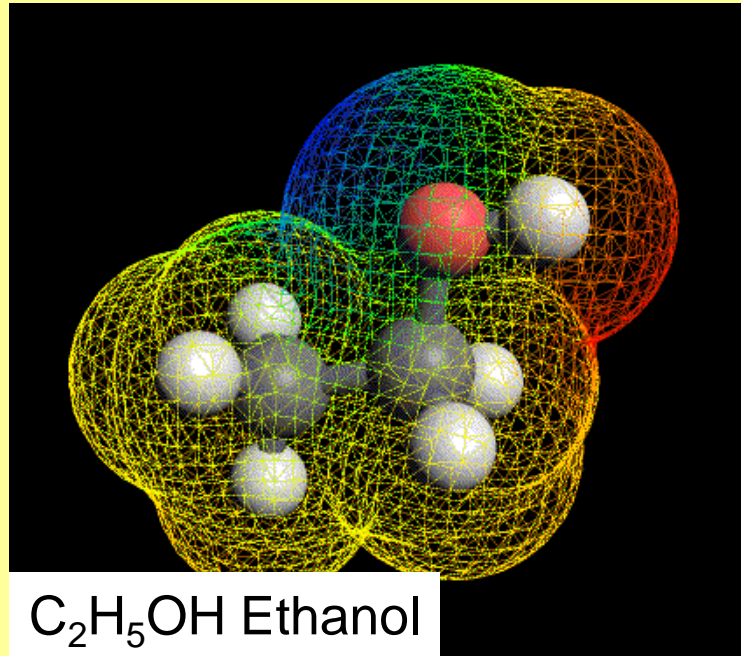
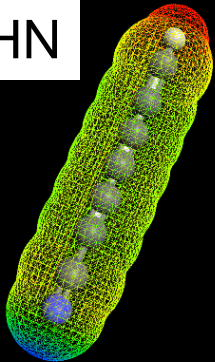


PAH



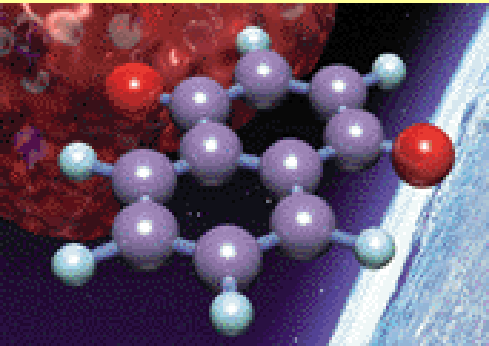
La Radioastronomie a permis
d'identifier plus d'une centaine de molécules
organiques dans les nuages

C_7HN



Naphtoquinone $C_{10}H_6O_2$

Chlorophyle !



Astrobiologie

Les grands nuages interstellaires contiennent des molécules organiques

Radioastronomie

Effondrement du nuage ...

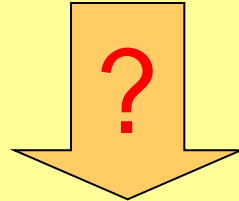
Formation Etoile + Planètes + comètes ...

Refroidissement des planètes ...

Pluie de comètes ...

Théorie de la
formation
stellaire

Apport de l'eau + molécules organiques (acides aminés)



Apparition de formes de vie

Des idées nouvelles à partir de l'étude de l'évolution

ROSPARS J.P., CONWAY MORRIS (Life's Solution)

- 1 - **Constat** : Des espèces qui se sont séparées très tôt dans l'arbre de l'évolution développent des solutions analogues : l'œil etc.
- 2 - **Question** : Les lois de l'évolution auraient-elles leurs racines dans celles de la Physique ?
- 3 - **Consensus fort** : Les lois de la Physique sont universelles
- 4 - **Hypothèse hardie** : Les lois de l'évolution pourraient bien, aussi, être universelles

Et si des exoplanètes étaient habitées par des êtres intelligents ?

Pourrions nous communiquer avec eux ?

SETI

(**S**earch for **E**xtra **T**errestrial **I**ntelligence)

Le concept de "planète habitable"

Consensus :

Eau (H₂O) **liquide** = Un ingrédient essentiel pour la vie



Photo
Apollo17

3 états de l'eau

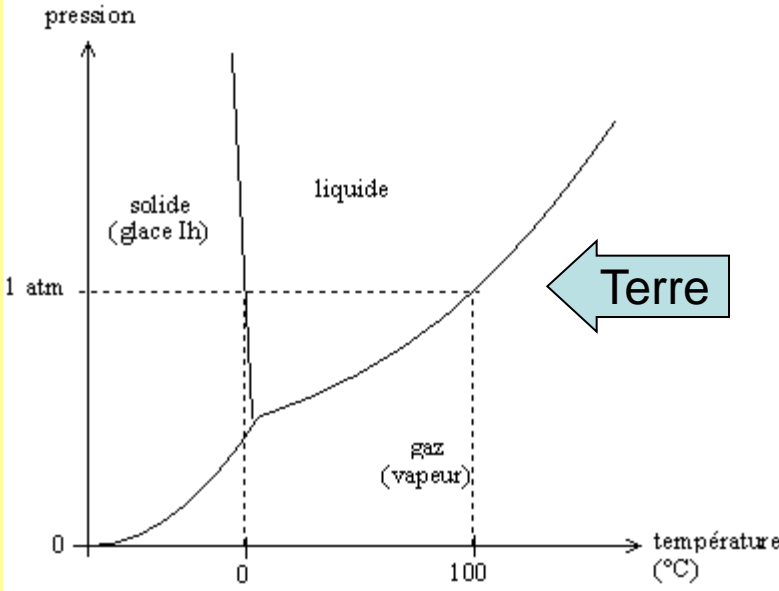


Liquide

Solide



Vapeur



3 états de l'eau

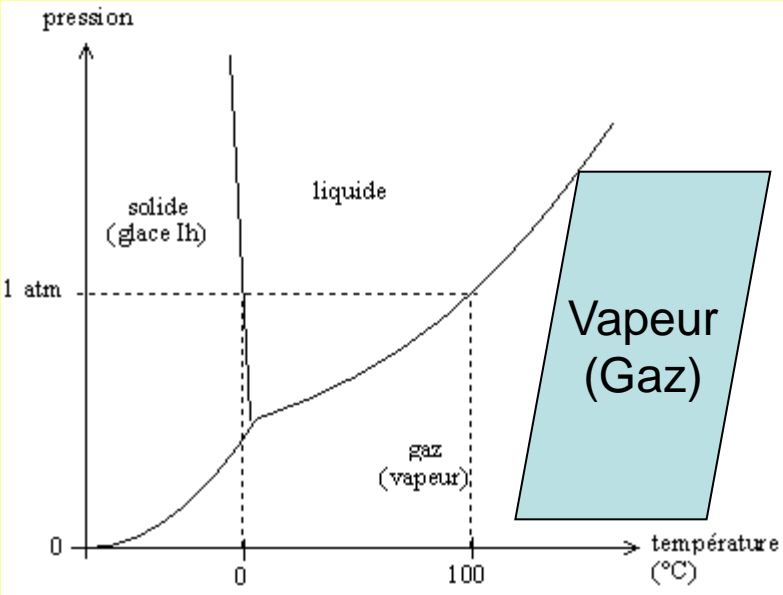


Liquide

Solide



Vapeur



3 états de l'eau

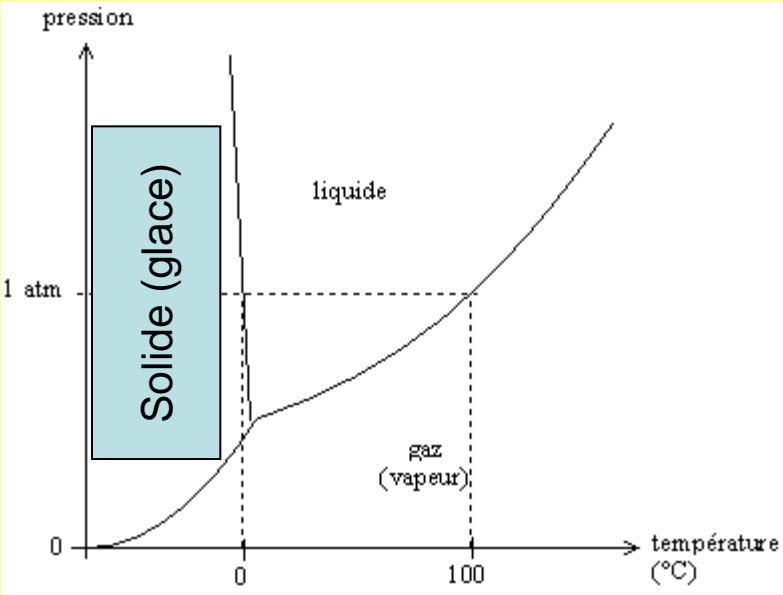


Liquide

Solide



Vapeur



3 états de l'eau

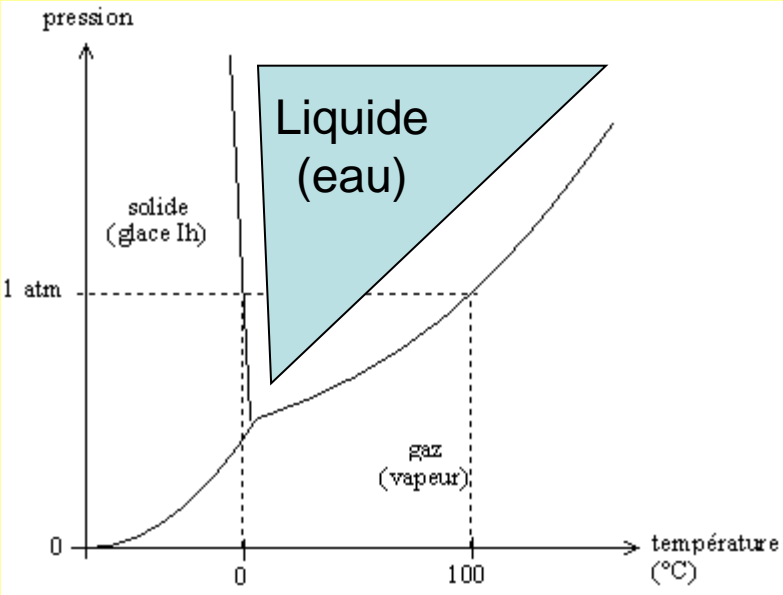


Liquide

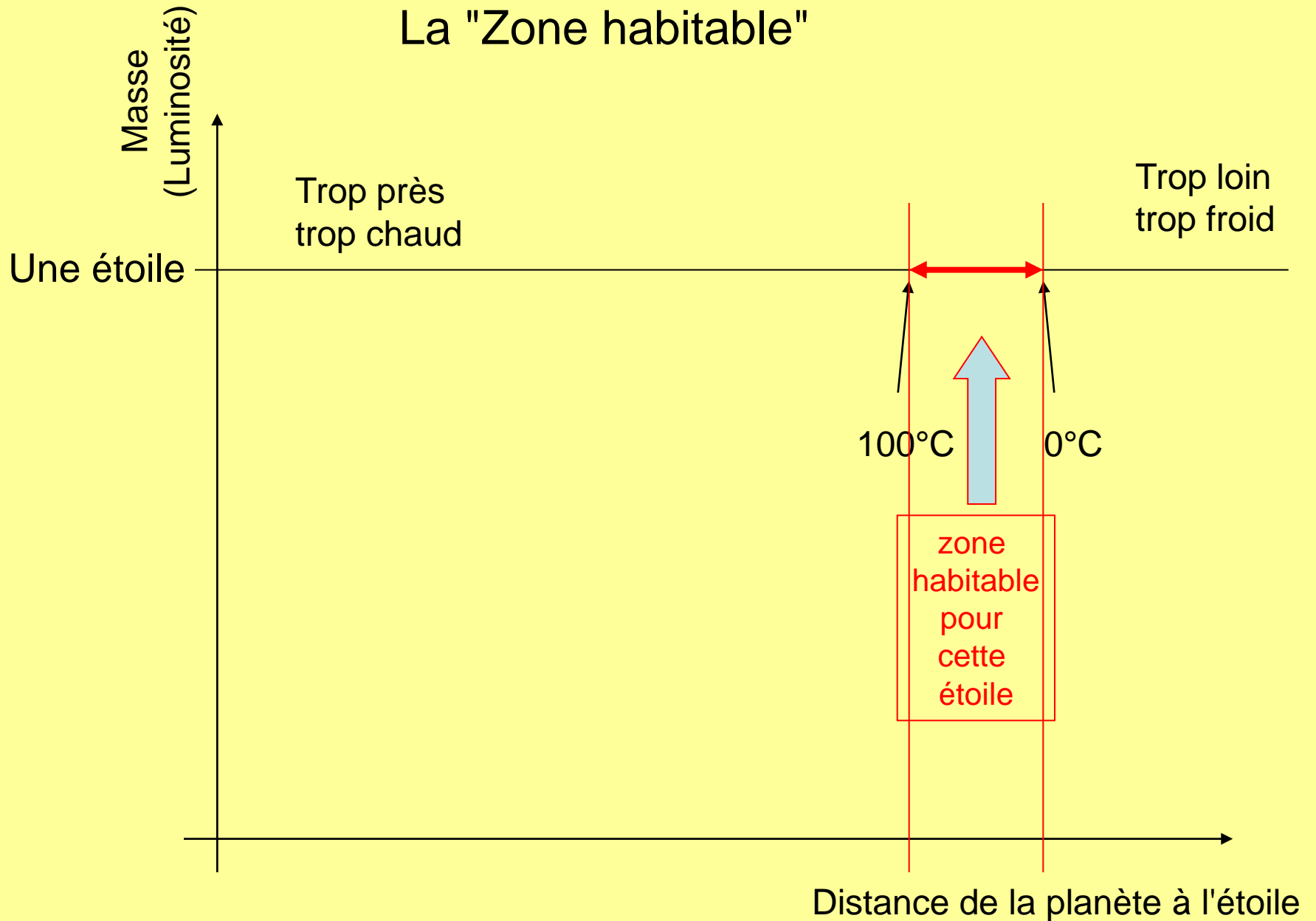
Solide



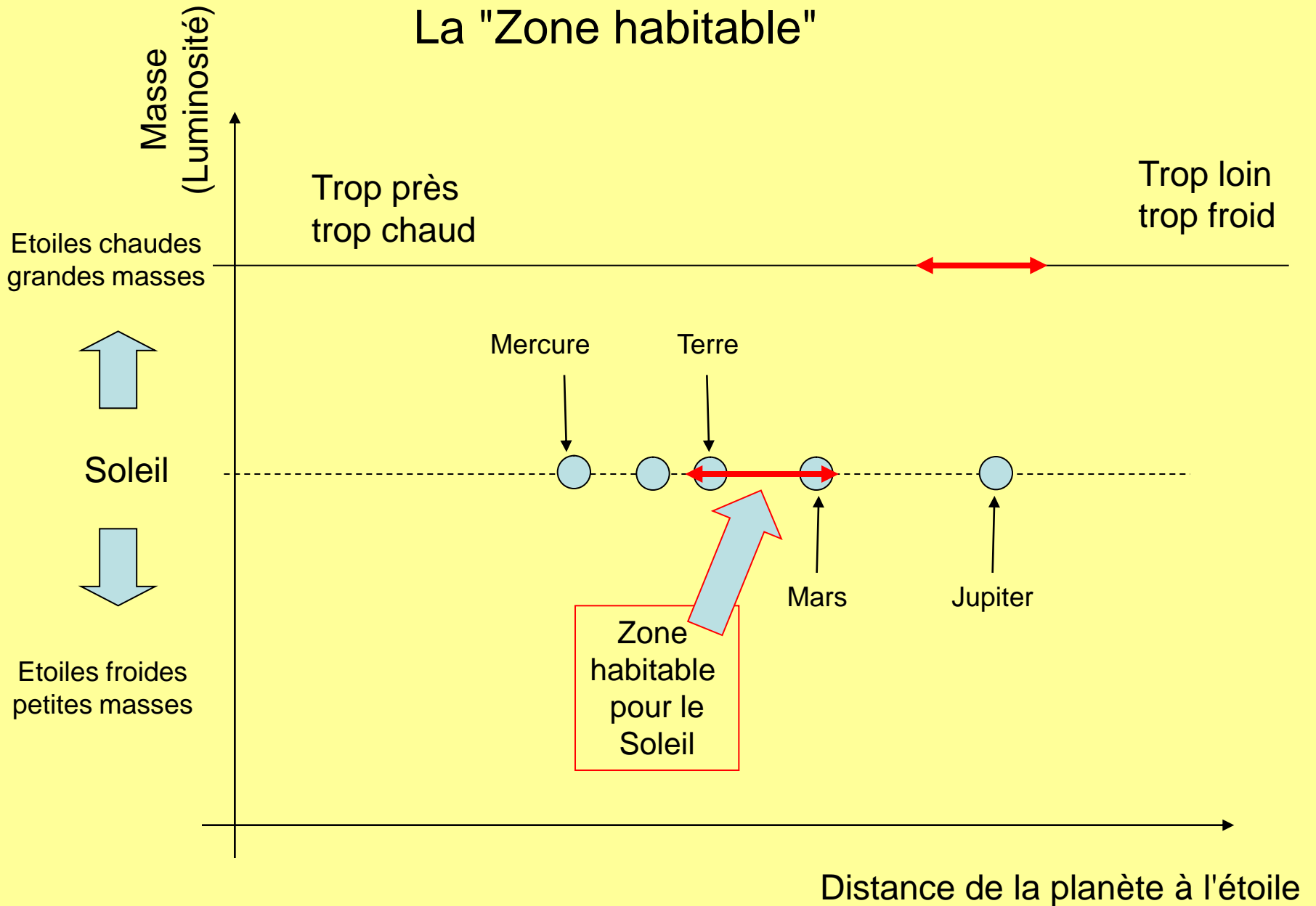
Vapeur



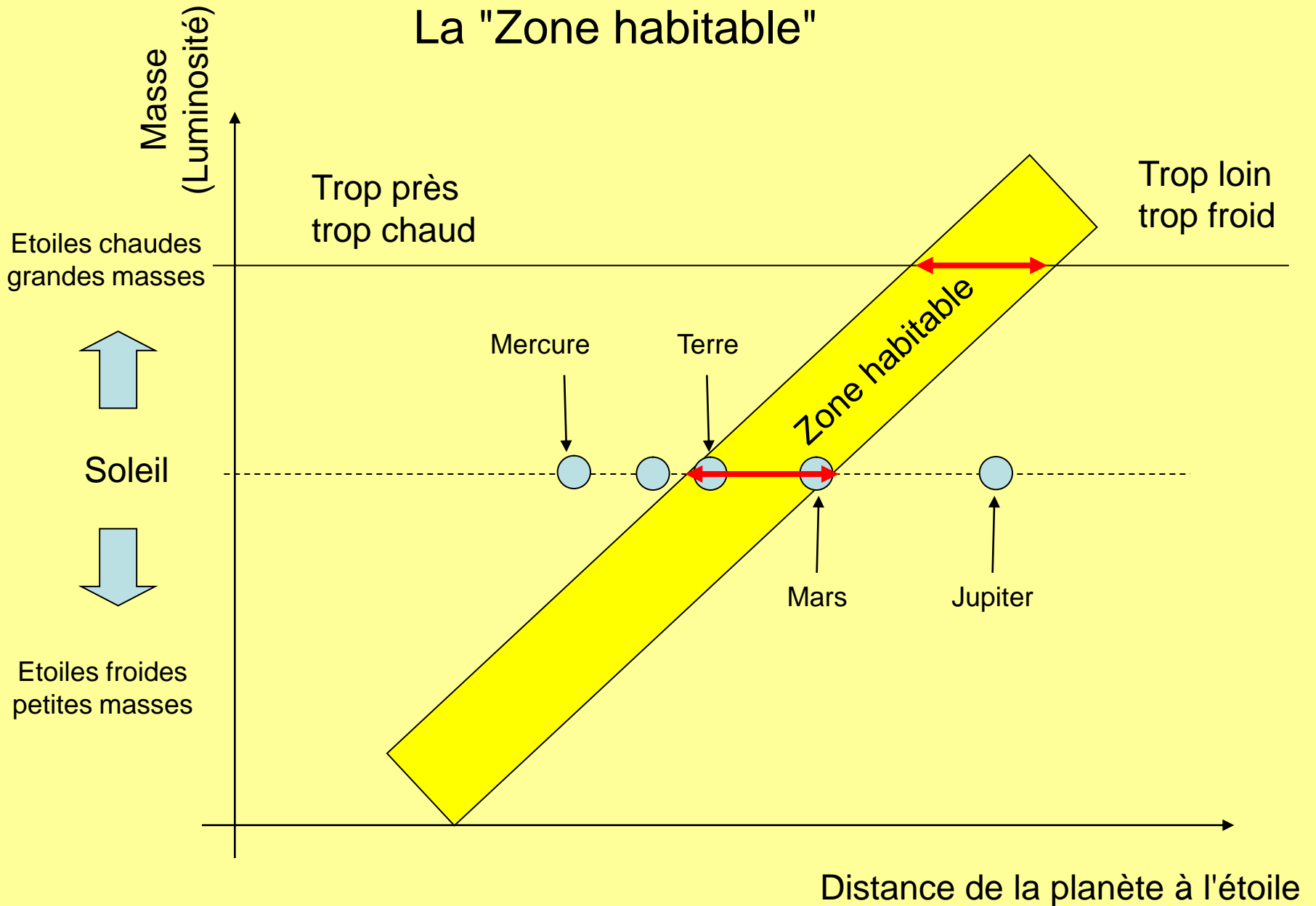
La "Zone habitable"



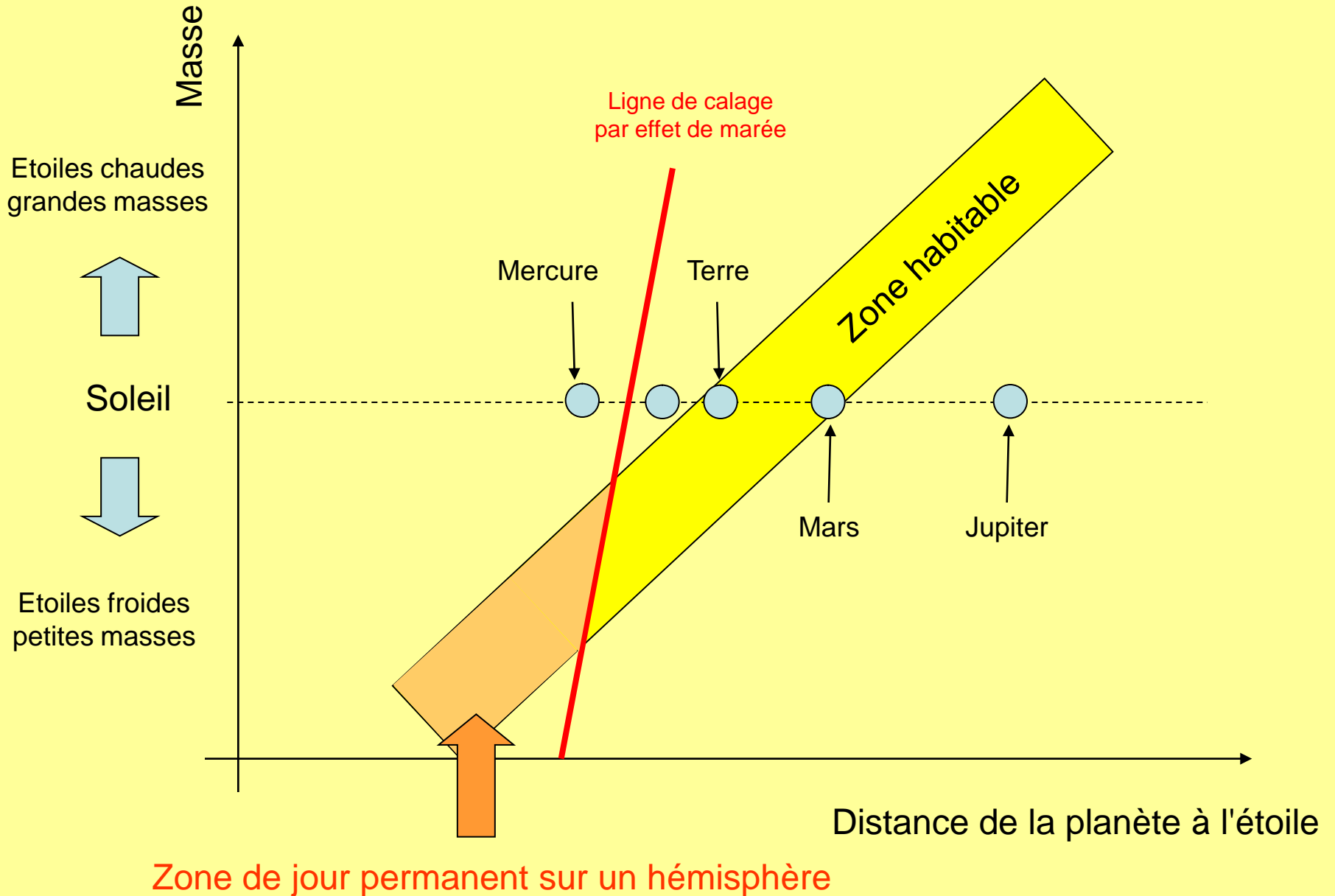
La "Zone habitable"



La "Zone habitable"



La "Zone habitable"



Autre consensus :

Pour se développer, la vie a besoin de temps ...

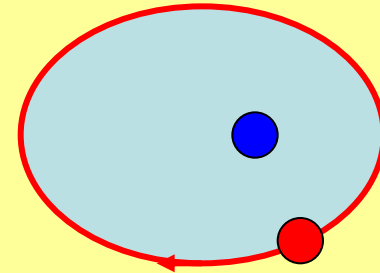
... donc de stabilité

Ordre et chaos : les lois de la mécanique

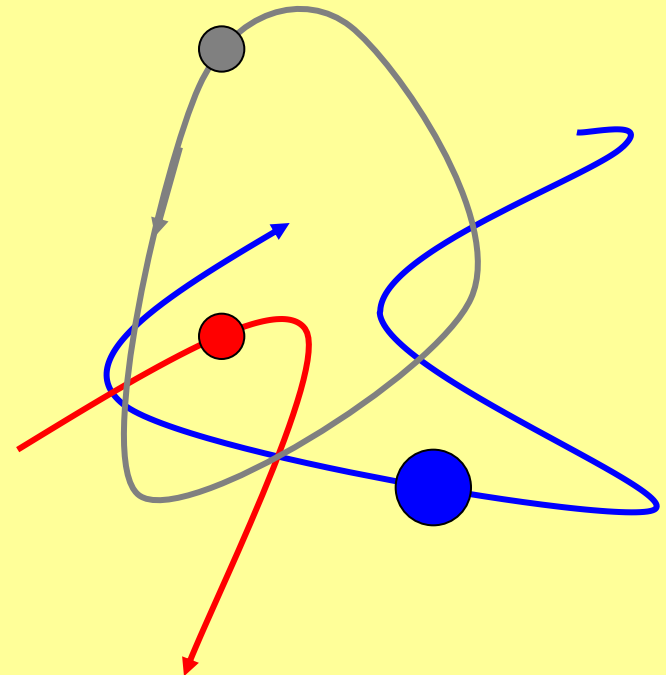
1 corps : mouvement rectiligne uniforme



2 corps :
Mouvement bien régulier
3 lois de Kepler
orbites elliptiques (ou circulaires)

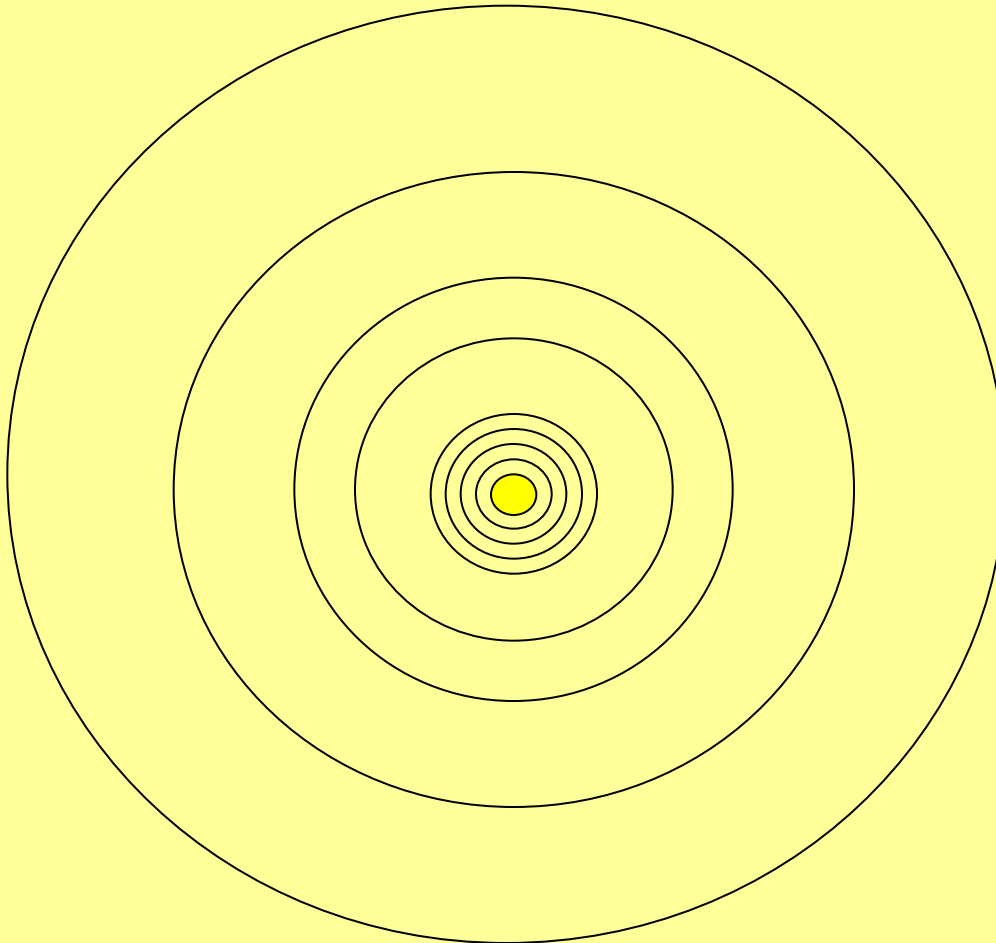


3 corps et plus :
Comportement chaotique !



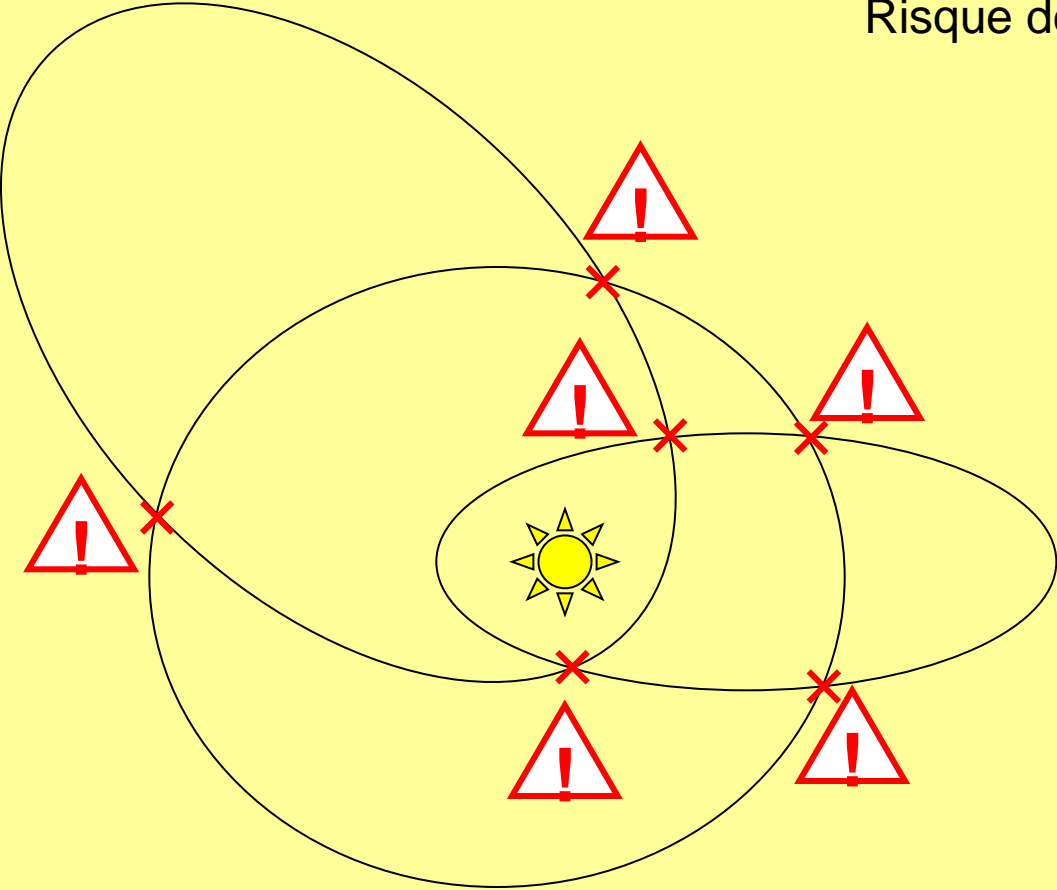
Le système solaire : 9 corps (principaux!) : Soleil + 8 planètes
Théoriquement chaotique
Pourtant **presque parfaitement régulier !**

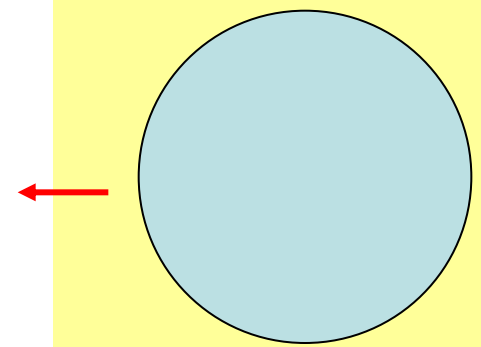
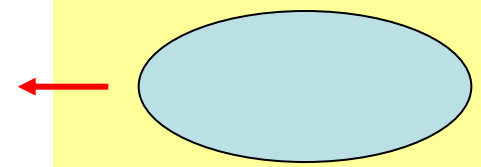
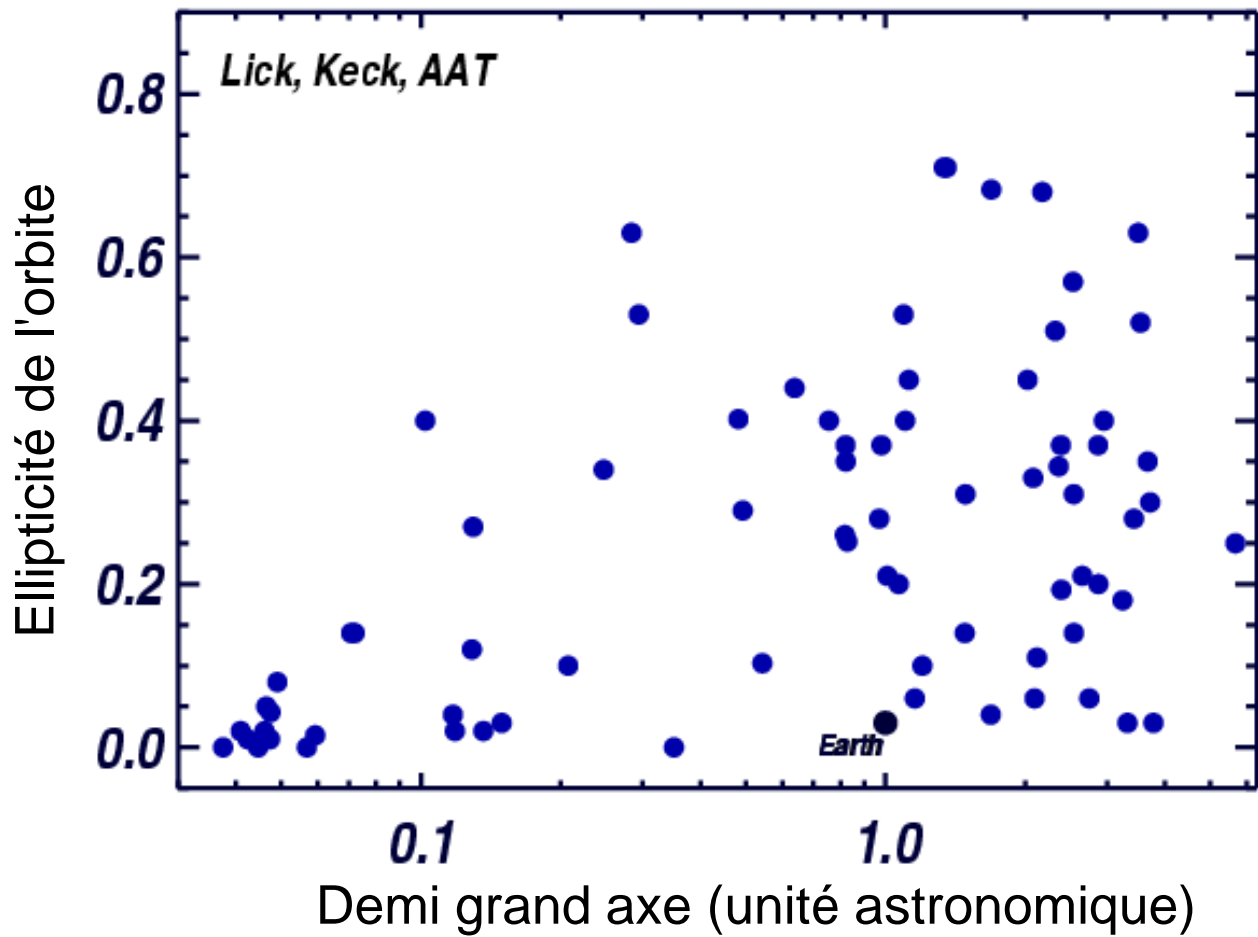
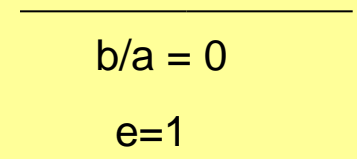
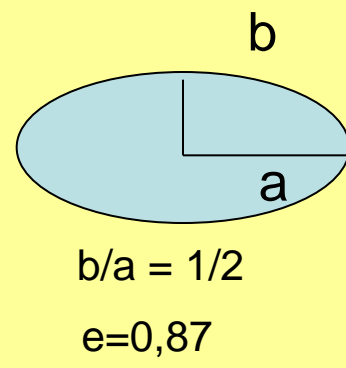
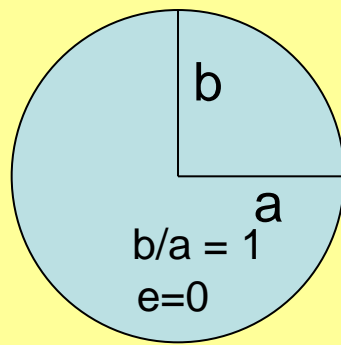
Orbites presque circulaires et presque dans le même plan



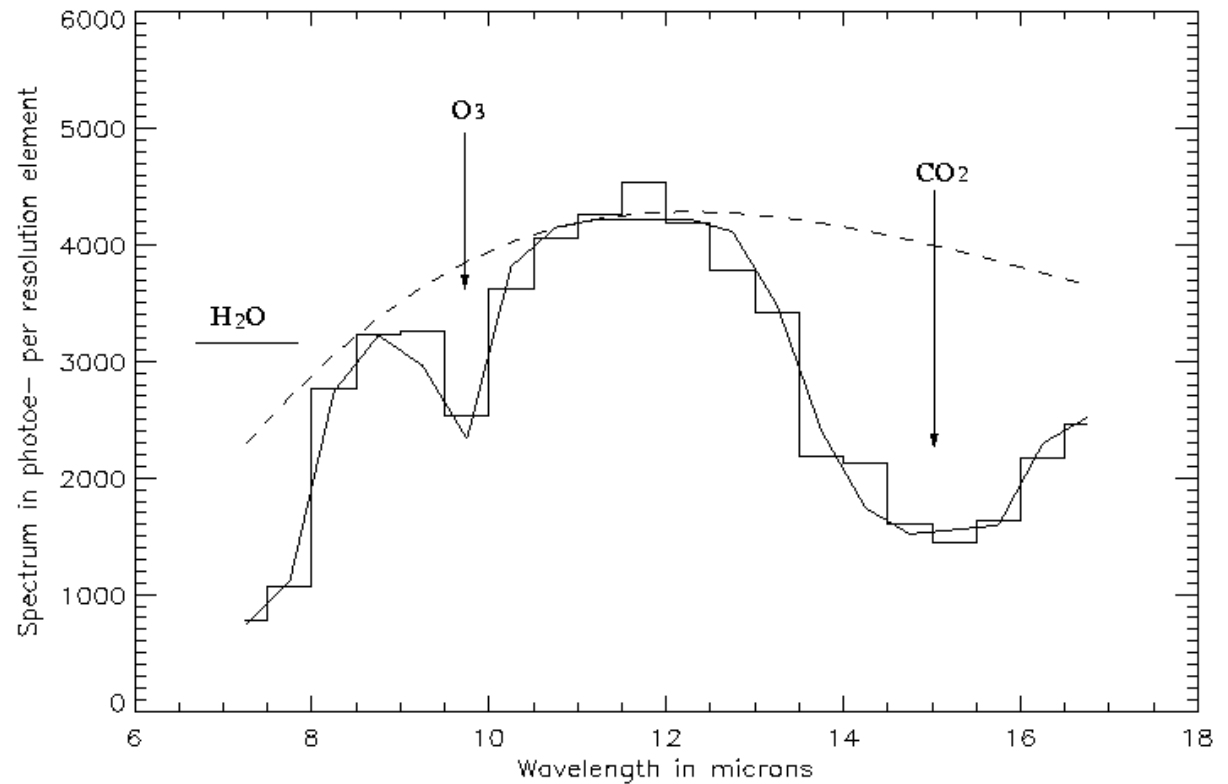
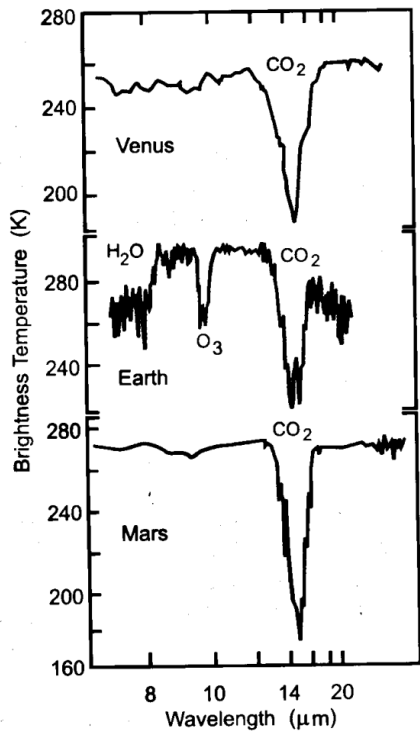
Danger des orbites fortement elliptiques

Risque de carambolages !



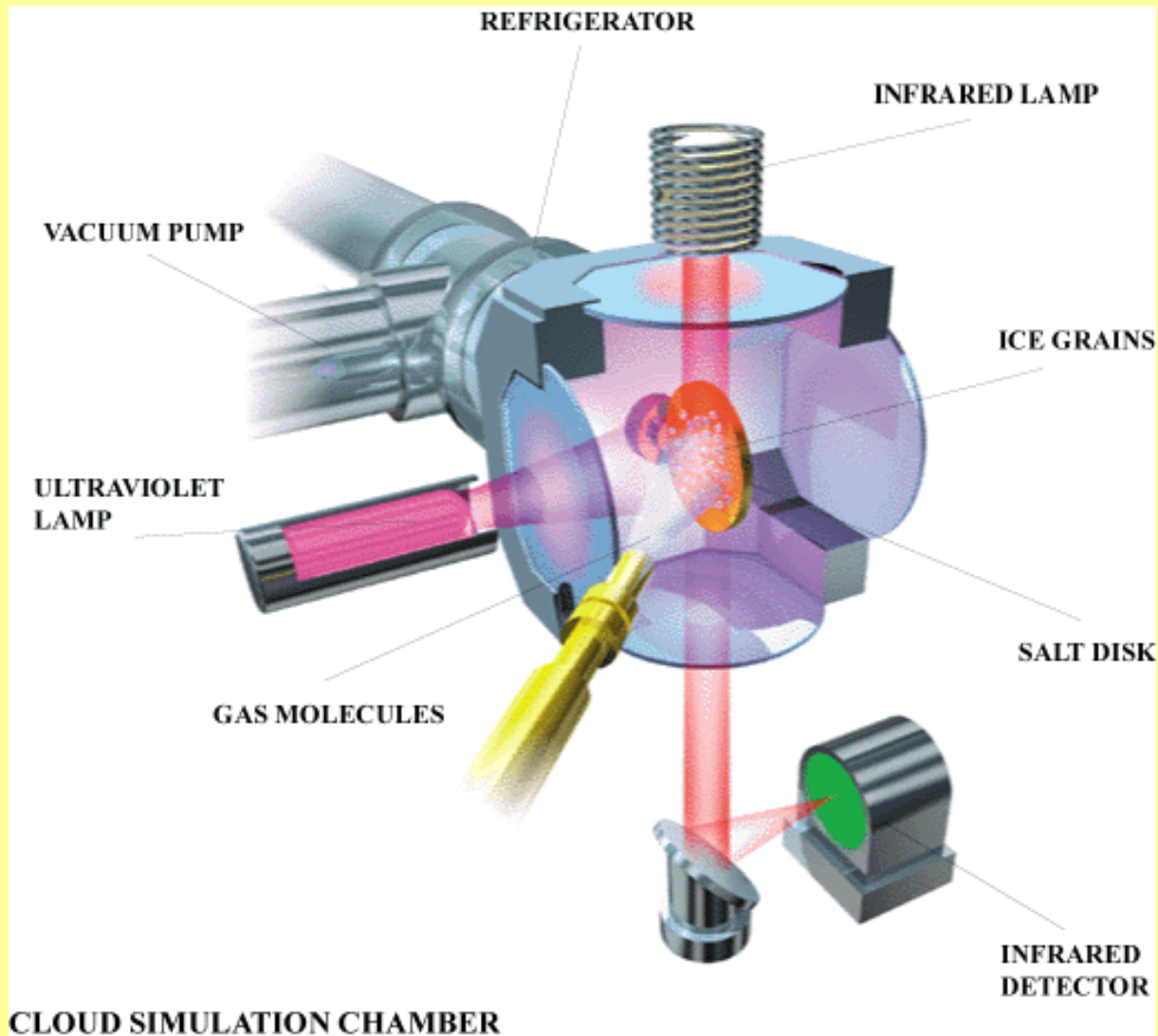


Comment saura-t-on qu'une planète est habitée ?



Apport de l'Astrobiologie

On a aussi reproduit des synthèses en laboratoire
En reproduisant les conditions du milieu du nuage



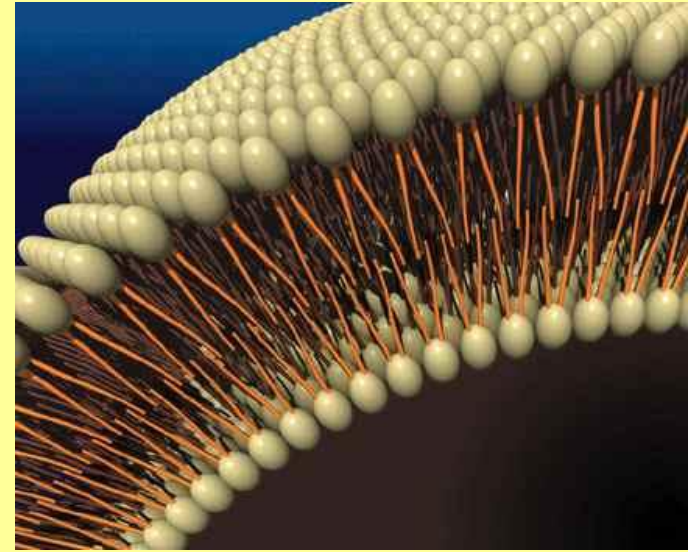
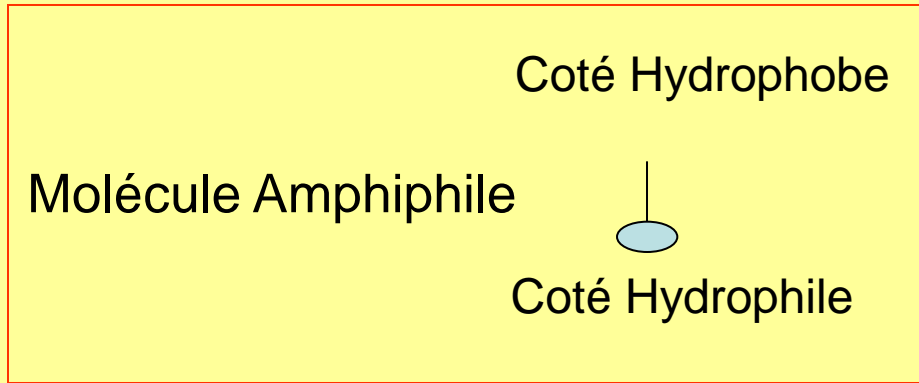
Résultat : synthèse d'acides aminés

Expérience américaine :

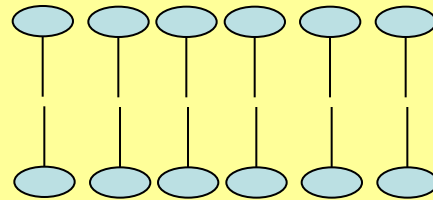
- glycine,
- serine
- alanine

Expérience européenne : 16 acides aminés

On met les produits obtenus dans de l'eau ...



Association =>



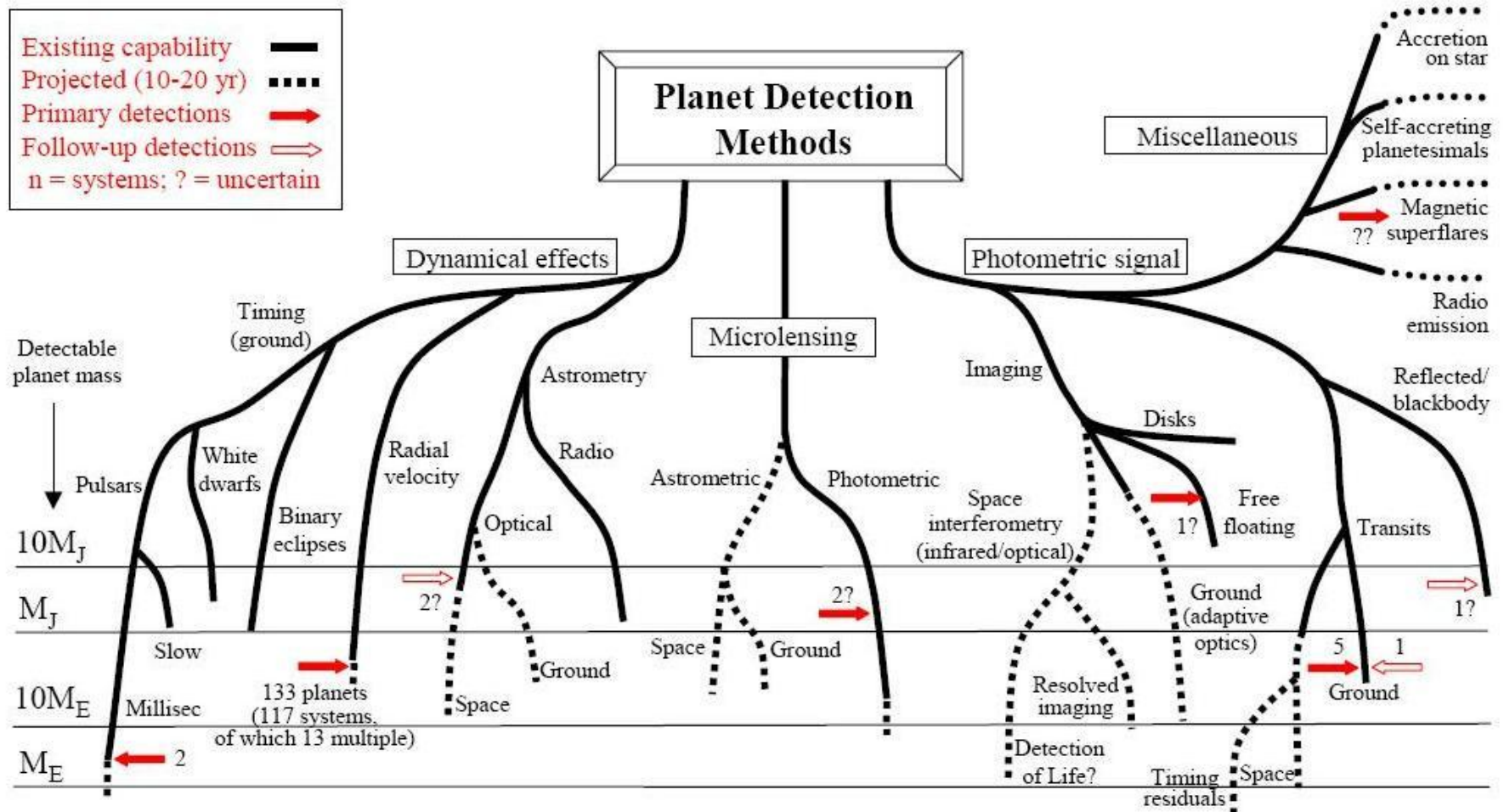
... et on obtient des membranes analogues à celle des cellules !

Abri pour le développement des premiers organismes vivants ?

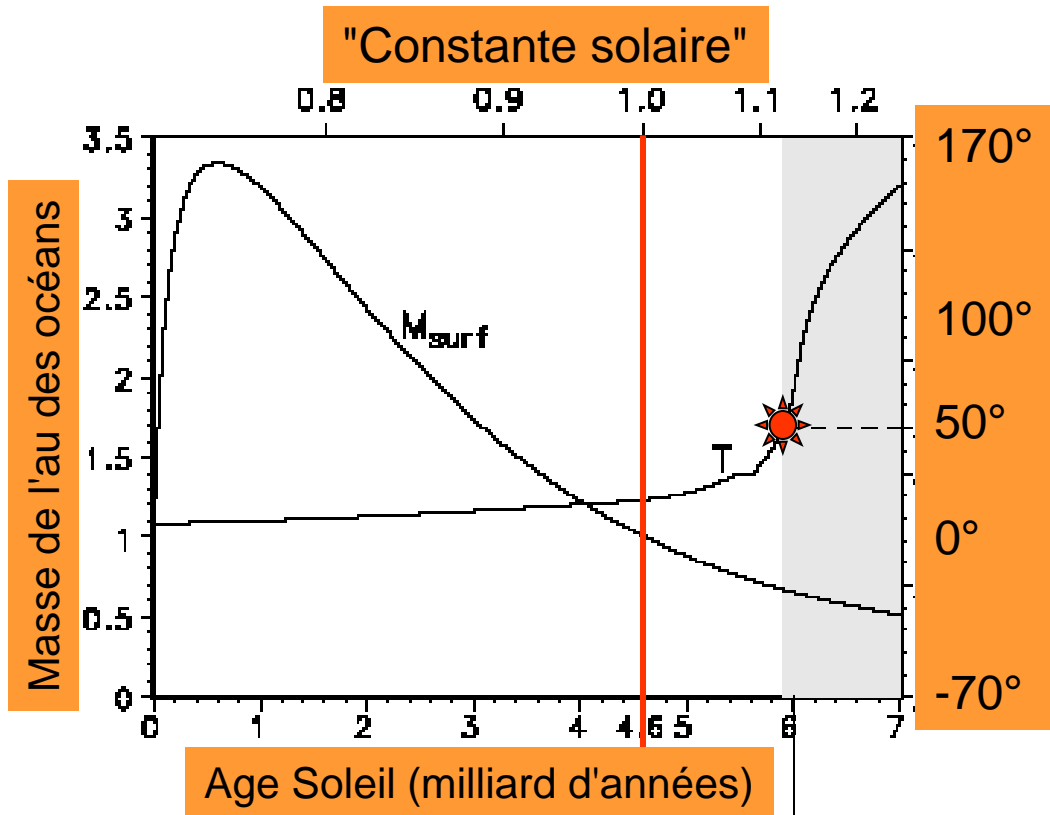
Planet Detection Methods

Michael Perryman, Rep. Prog. Phys., 2000, 63, 1209 (updated November 2004)

[corrections or suggestions please to michael.perryman@esa.int]



Le Soleil chauffera de plus en plus !



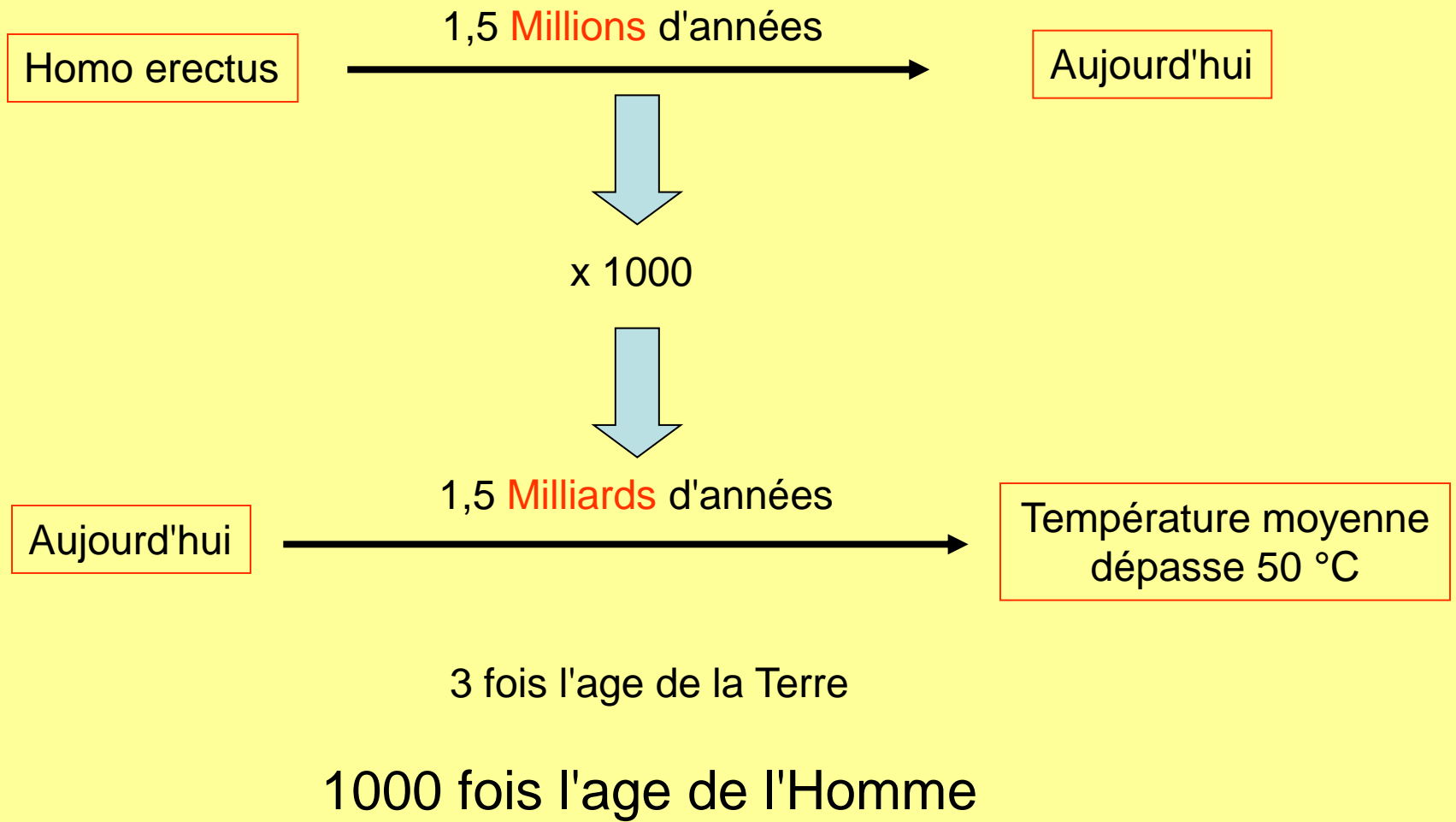
Température moyenne dépasse 50 °C

L'eau des océans s'évapore

2005



1,5 Milliard d'années



Ca fait encore très très très longtemps !