

Histoire d'eau et de poussière

La molécule d'eau, du Big-bang à notre verre

François Sibille – janvier 2013

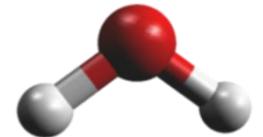


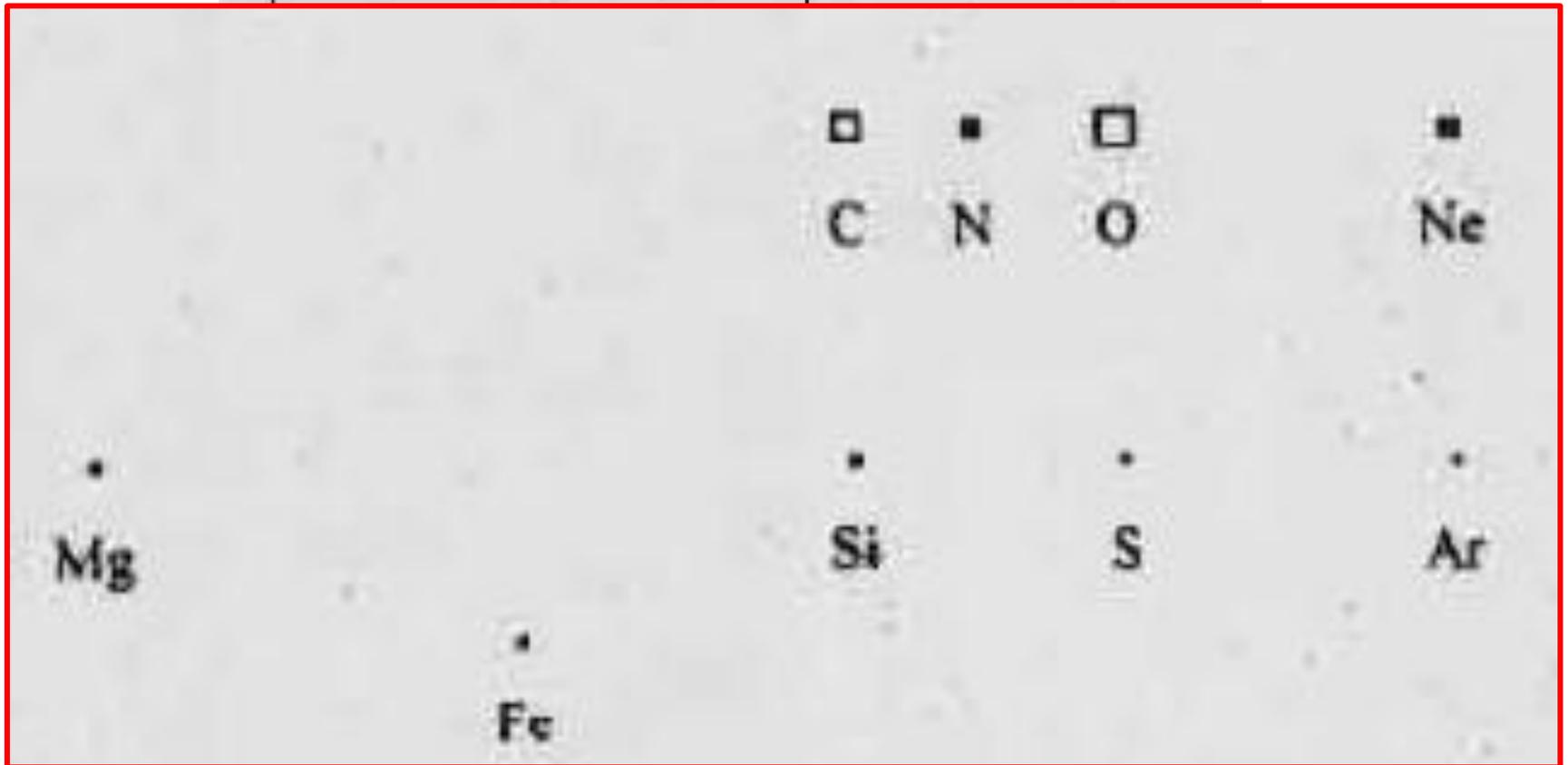
TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1	IA																18	VIIIA																																																																																																																																																																																																																																																																													
1	1,00794																2	4,0026																																																																																																																																																																																																																																																																													
1	H																He																																																																																																																																																																																																																																																																														
Hydrogène																Hélium																																																																																																																																																																																																																																																																															
3	4	14												13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																																																																																																																																																																																										
IIA																IVA																VIA																VIIA																																																																																																																																																																																																																																															
3	4	6												5	6	7	8	9	10	11	12																																																																																																																																																																																																																																																																										
Li																Be																C																B																C																N																O																F																Ne																																																																																																																																																															
Lithium																Béryllium																Carbone																Bore																Carbone																Azote																Oxygène																Fluor																Néon																																																																																																																																																															
11	12	2												13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																																																																																																																																																																																										
IIA																IVA																VIA																VIIA																																																																																																																																																																																																																																															
11	12	2												13	14	15	16	17	18	19	20																																																																																																																																																																																																																																																																										
Na																Mg																Al																Si																P																S																Cl																Ar																																																																																																																																																																															
Sodium																Magnésium																Aluminium																Silicium																Phosphore																Soufre																Chlore																Argon																																																																																																																																																																															
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																																																																																																																																																																																																														
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																																																																																																																																																																																																																																																														
K																Ca																Sc																Ti																V																Cr																Mn																Fe																Co																Ni																Cu																Zn																Ga																Ge																As																Se																Br																Kr															
Potassium																Calcium																Scandium																Titane																Vanadium																Chrome																Manganèse																Fer																Cobalt																Nickel																Cuivre																Zinc																Gallium																Germanium																Arsenic																Sélénium																Brome																Krypton															
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																																																																																																																																																																																																																																														
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																																																																																																																																																																																																																																																														
Rb																Sr																Y																Zr																Nb																Mo																Tc																Ru																Rh																Pd																Ag																Cd																In																Sn																Sb																Te																I																Xe															
Rubidium																Strontium																Yttrium																Zirconium																Niobium																Molybdène																Technétium																Ruthénium																Rhodium																Palladium																Argent																Cadmium																Indium																Étain																Antimoine																Tellure																Iode																Xénon															
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																																																																																																																																																																																																																																															
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																																																																																																																																																																																																																																															
Cs																Ba																Hf																Ta																W																Re																Os																Ir																Pt																Au																Hg																Tl																Pb																Bi																Po																At																Rn																															
Césium																Baryum																Hafnium																Tantale																Tungstène																Rénium																Osmium																Iridium																Platine																Or																Mercure																Thallium																Plomb																Bismuth																Polonium																Astat																Radon																															
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																																																																																																																																																																																																																																															
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																																																																																																																																																																																																																																															
Fr																Ra																Rf																Db																Sg																Bh																Hs																Mt																Ds																Rg																Cn																Uut																Fl																Uup																Lv																Uus																Uuo																															
Francium																Radium																Rutherfordium																Dubnium																Seaborgium																Bohrium																Hassium																Meitnerium																Darmstadtium																Roentgenium																Copernicium																Ununtrium																Flerovium																Ununpentium																Livermorium																Ununseptium																Ununoctium																															
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																																																																																																																																																																																																																																																	
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71																																																																																																																																																																																																																																																																																	
La																Ce																Pr																Nd																Pm																Sm																Eu																Gd																Tb																Dy																Ho																Er																Tm																Yb																Lu																																																															
Lanthane																Cérite																Praseodyme																Néodyme																Prométhium																Samarium																Europium																Gadolinium																Terbium																Dysprosium																Holmium																Erbium																Thulium																Ytterbium																Lutécium																																																															
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																																																																																																																																																																																																																																																	
IIIB																IVB																VB																VIB																VIIB																VIIIB																VIIIIB																IX																X																XI																XII																IIIB																																																																																																															
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103																																																																																																																																																																																																																																																																																	
Ac																Th																Pa																U																Np																Pu																Am																Cm																Bk																Cf																Es																Fm																Md																No																Lr																																																															
Actinium																Thorium																Protactinium																Uranium																Neptunium																Plutonium																Americium																Curium																Berkélium																Californium																Einsteinium																Fermium																Mendelevium																Nébulium																Lawrencium																																																															

... Et après quelques centaines de millions d'années

The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)



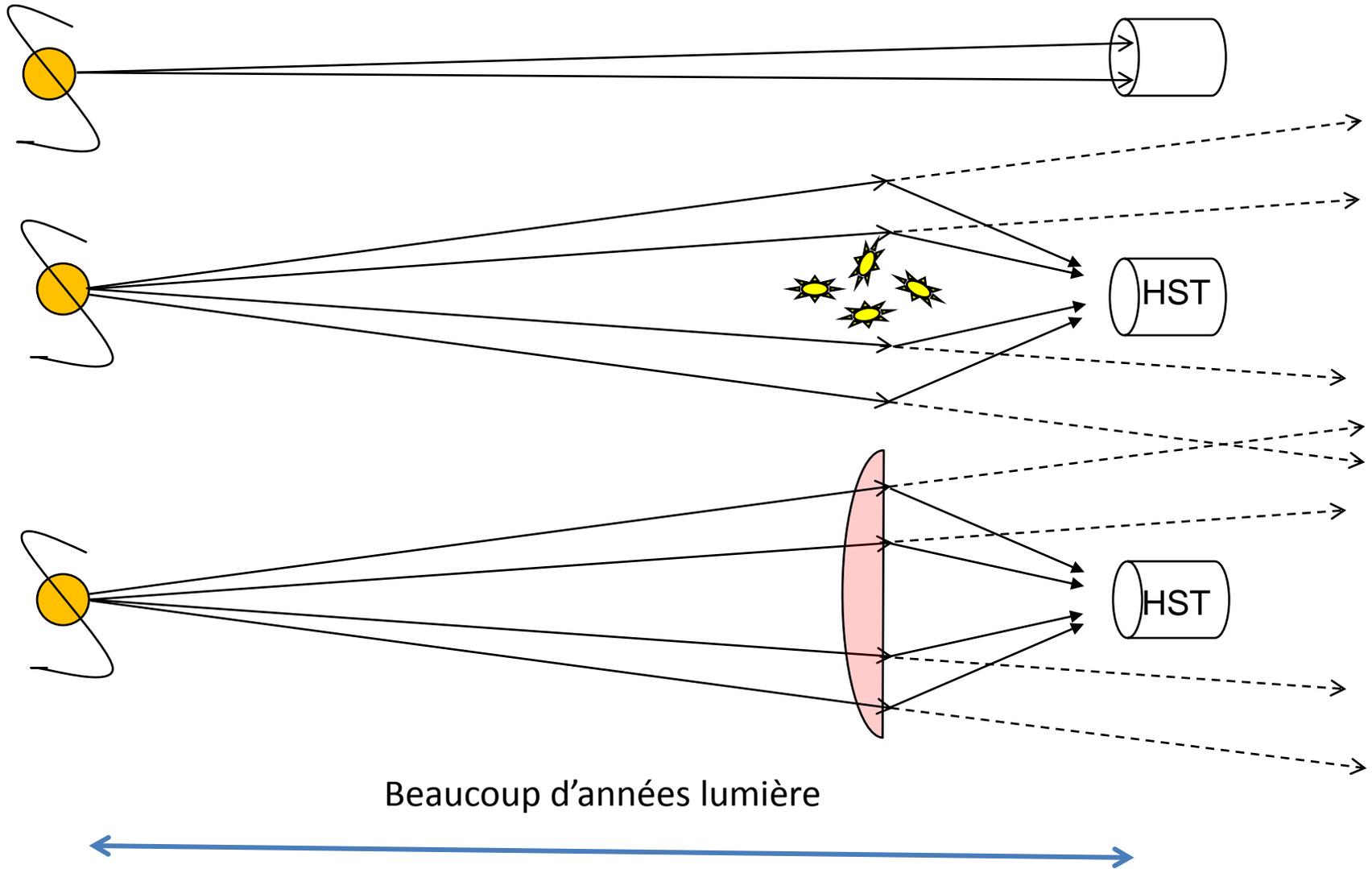
Avec ça on va commencer à pouvoir faire de l'eau

Et même des tas de molécules

De quand datent
les premières trace d'eau dans l'Univers ?

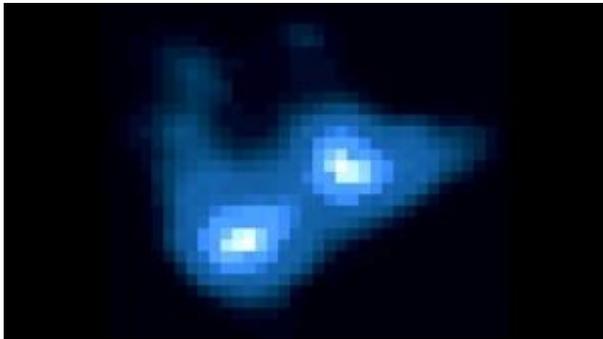
Un cadeau de la nature

Mirage gravitationnel : un télescope géant, naturel et gratuit

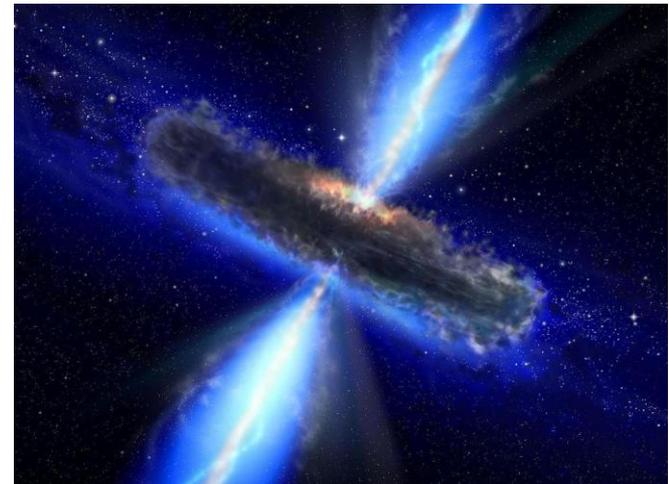


Un « quasar » très humide : APM 08279+5255

Seulement 1,7 milliard d'années après le Big-Bang



Tel qu'il apparaîât en rayons X



Concept « artistique »

Les molécules (fragiles)
ne peuvent pas se former
dans les étoiles (trop chaudes)

Où , alors ?

Entre les étoiles ?

LE MILIEU INTERSTELLAIRE **DIFFUS**

Gaz raréfié : 10 atomes / cm³

Pas très froid : 100K (-173 °C)

75% H

24 % He ,

1% Traces C, N, O etc.

Atomes « lourds »

Fabriqués dans les étoiles

Diffusés dans le milieu

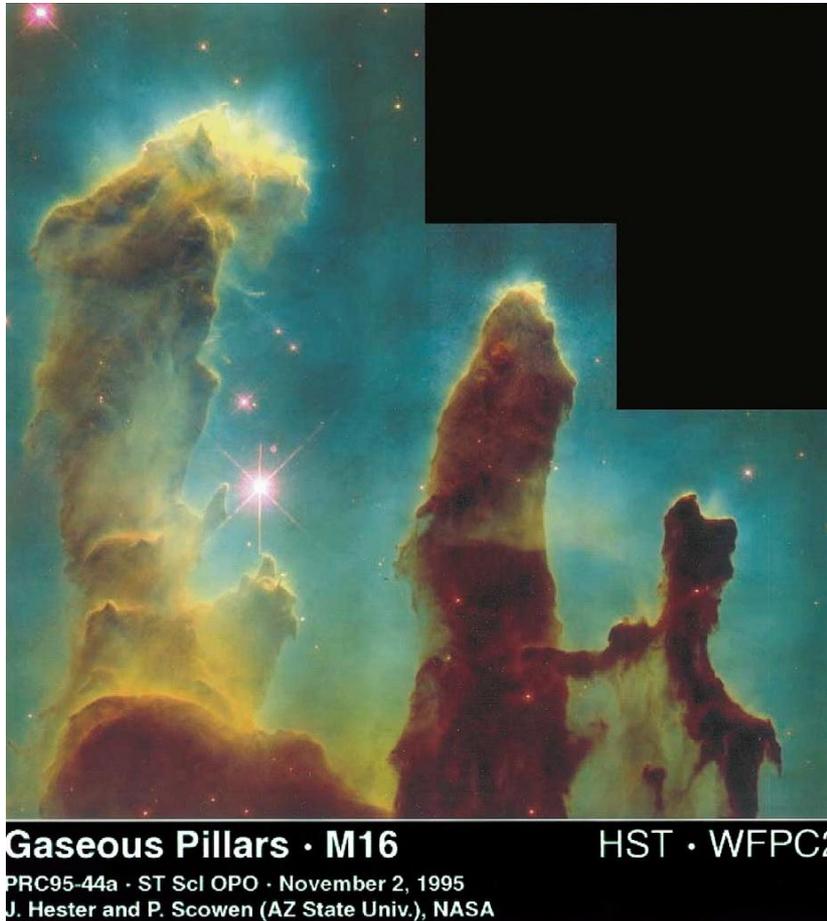


50% de la masse d'une galaxie

Mais **trop dilué pour former des molécules**

Très inhomogène

LE MILIEU INTERSTELLAIRE Dense



1000 à 10 000 atomes/cm³

Rassemblement par la gravité

« Nuages »

10- 100 Années lumière

10 000-100 000 Masse du Soleil

Equilibre hydrostatique



Sir James Hopwood
JEANS(1877 -1946)

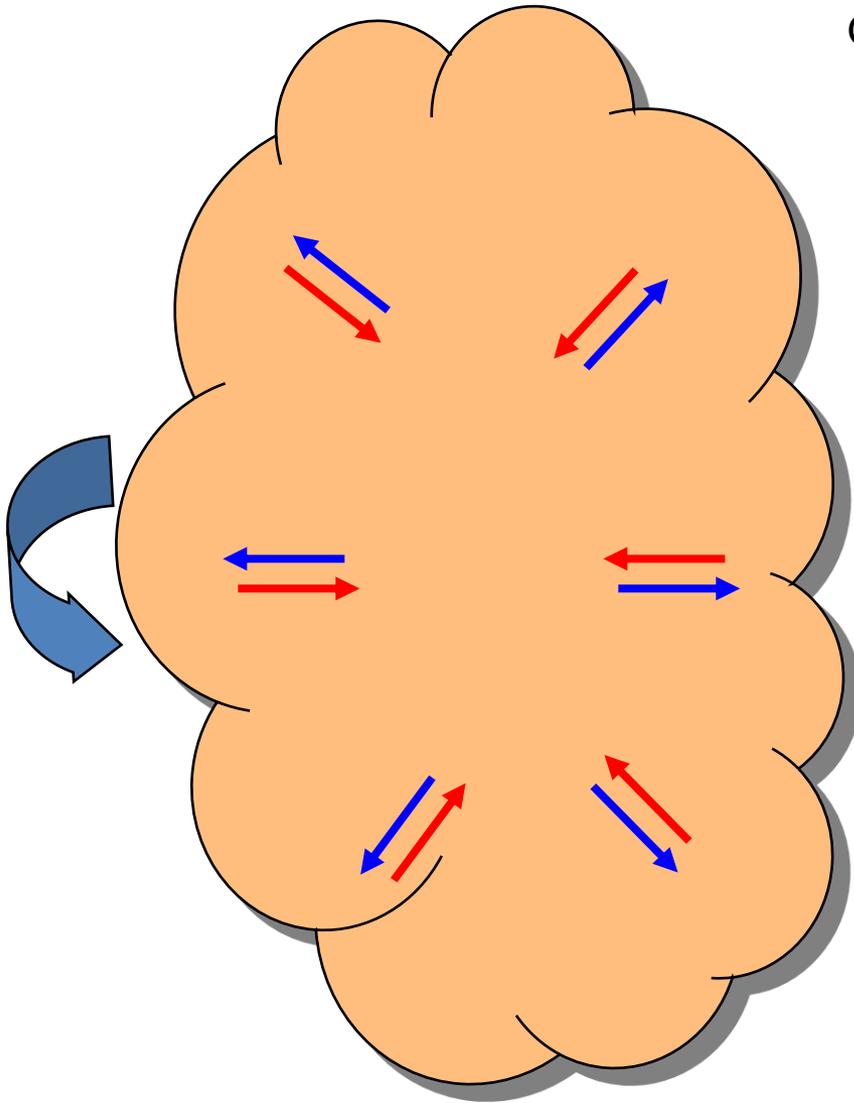
Ne pas confondre ! ce n'est pas un cumulus



Nuage moléculaire : équilibre hydrostatique

Pression du gaz (flèche bleue vers l'extérieur)

Gravité (flèche rouge vers le centre)



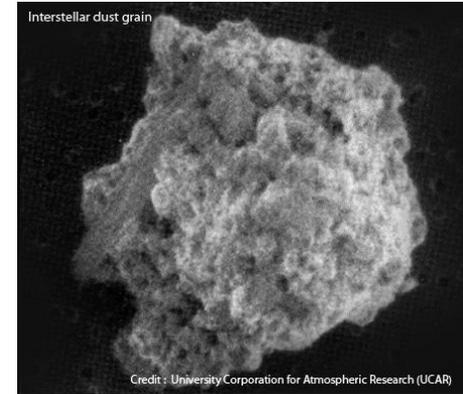
C'est en 3D ce qui se passe en 1D
dans l'atmosphère de la Terre :

La pression atmosphérique équilibre la gravité

Et la poussière !

Petits grains : ~ 1 micron

- Suie (graphite)
- Poussière de roche (Silicate)



Composant mineur : $< 1\%$ de la masse du Milieu interstellaire

1 grain pour 10^{12} atomes

Rôles très importants en Astrophysique

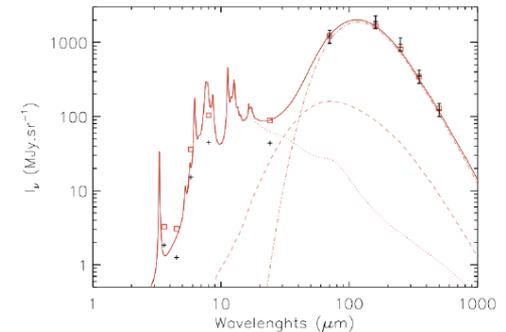
Rôles de la poussière

Rougisement :

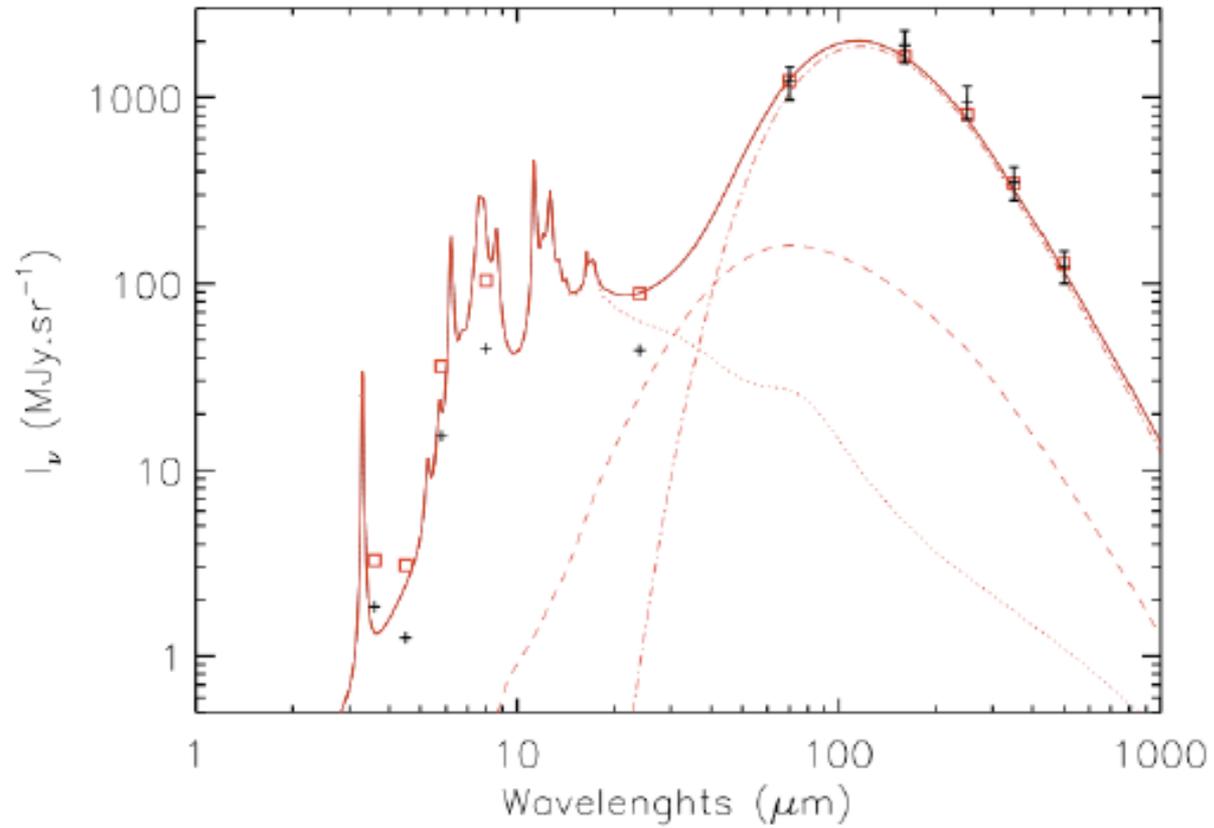
- Absorbe plus le bleu que le rouge
- Transparent à l'infrarouge

Refroidissement :

- Spontané par émission de photons infrarouges

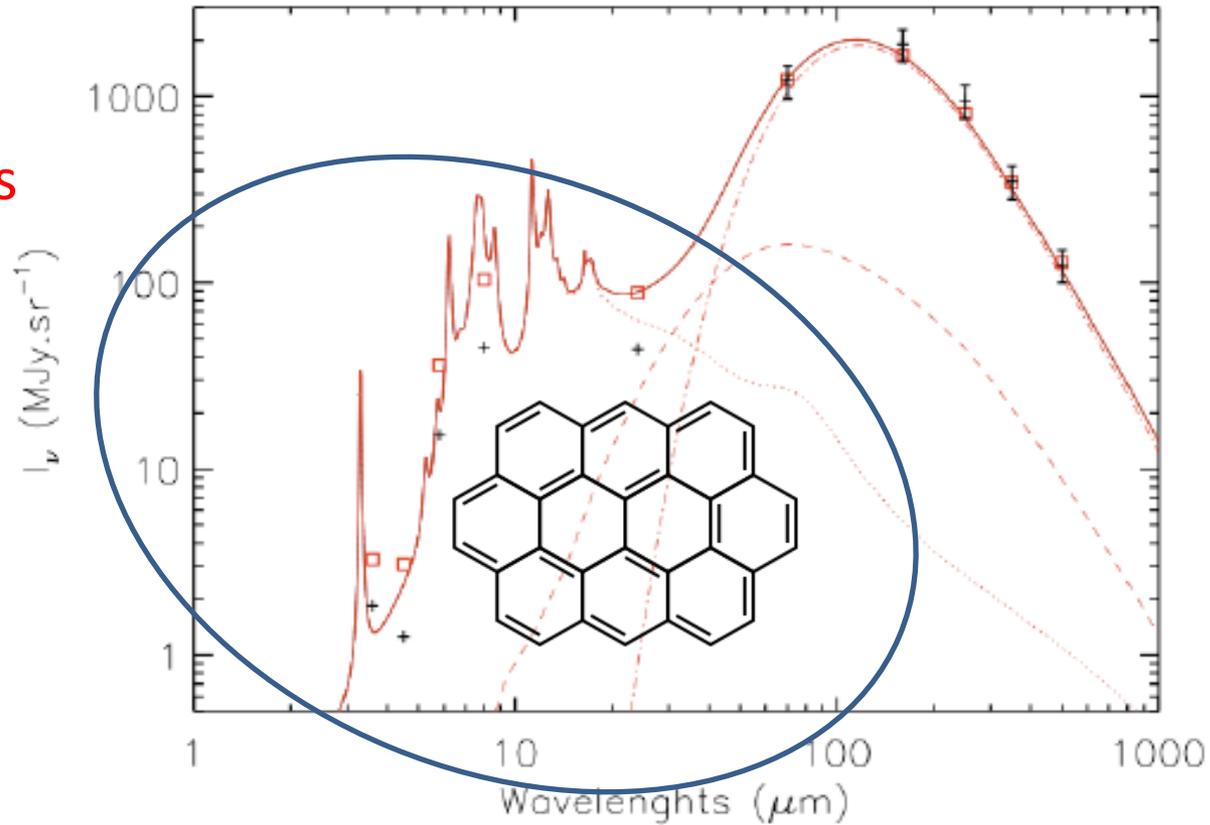


Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge



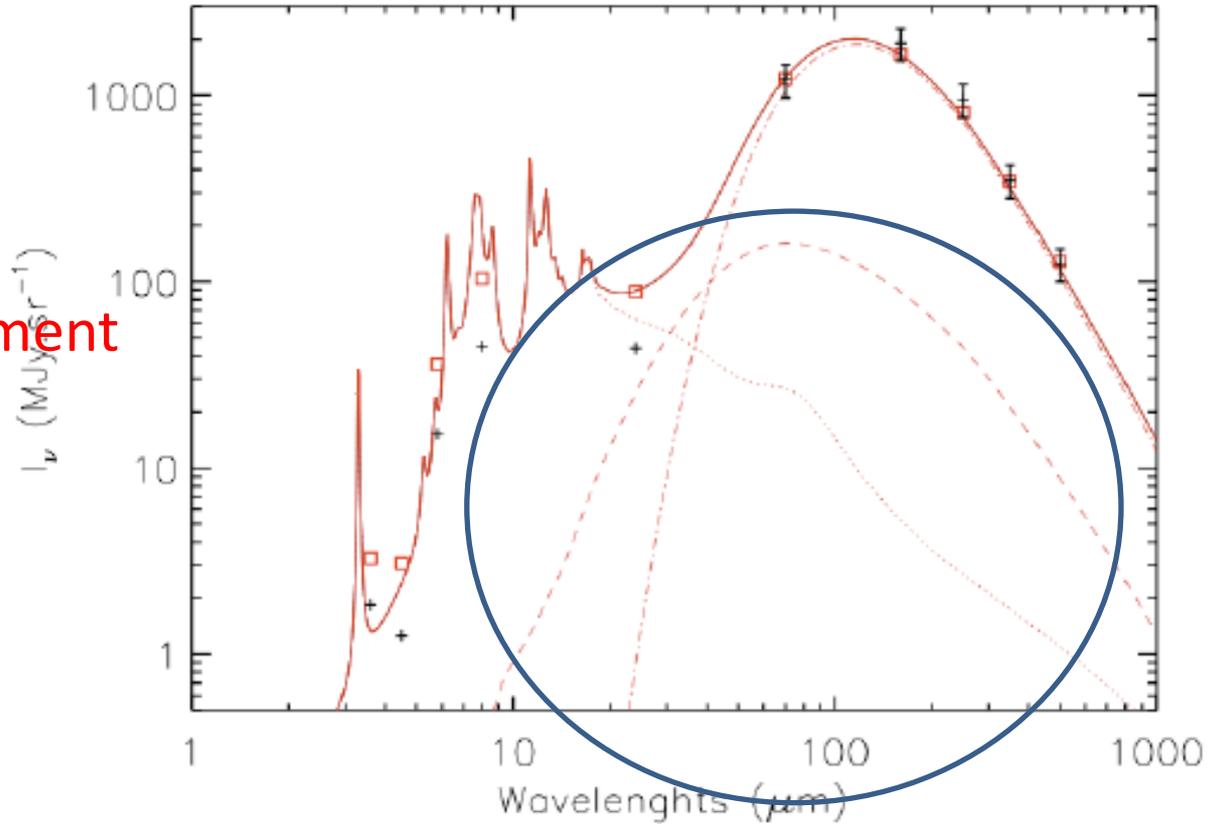
Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

PAH
100 atomes

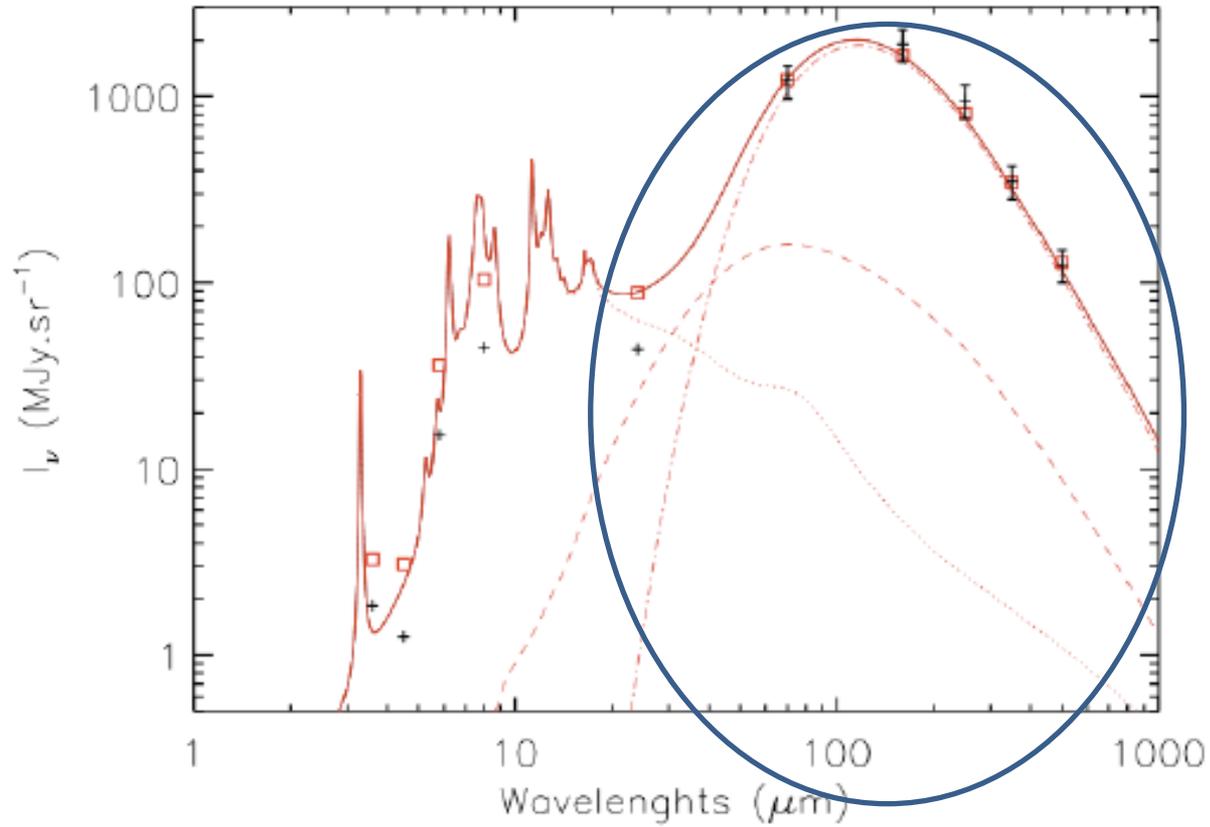


Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

Très petits
grains
chauffés
transitoirement



Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge



Gros
grains
20-30 K

D'où vient la poussière ?

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace

Bételgeuse

Image du disque
par interférométrie au VLT

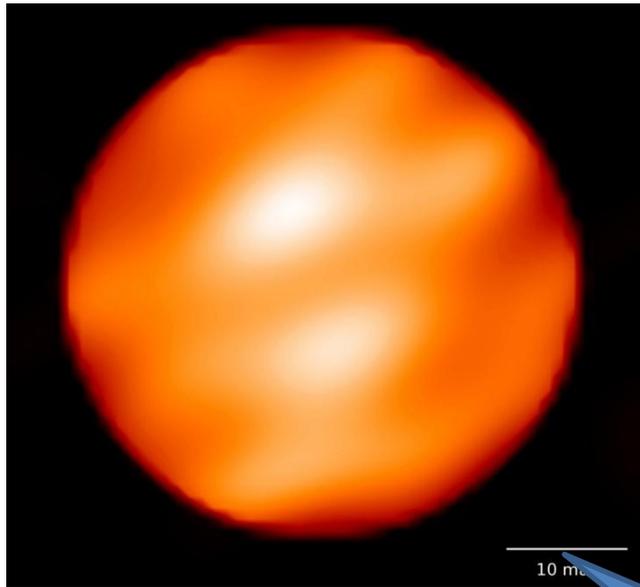


image : Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

Première historique

Première image du disque

D'une étoile autre que le Soleil

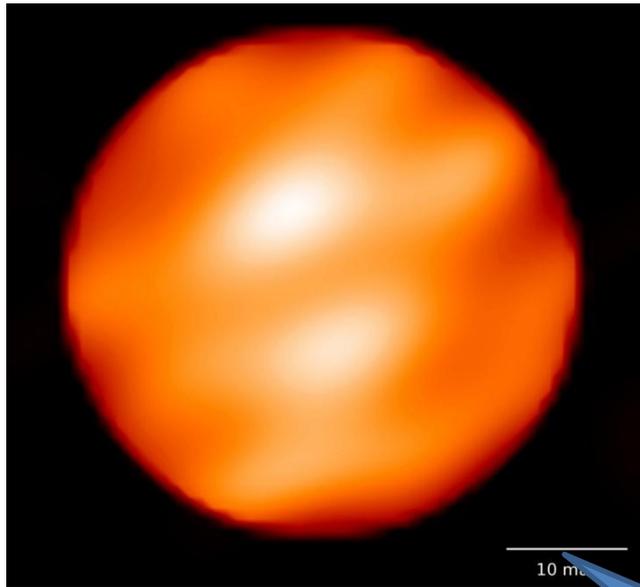
2 cm à 200 km

D'où vient la poussière ?

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace

Bételgeuse
(α Orionis)

Image du disque
Par interférométrie au VLT



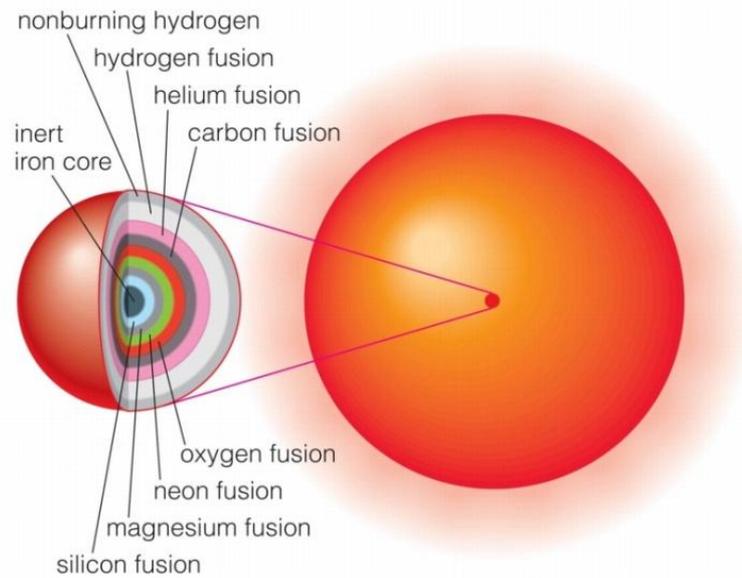
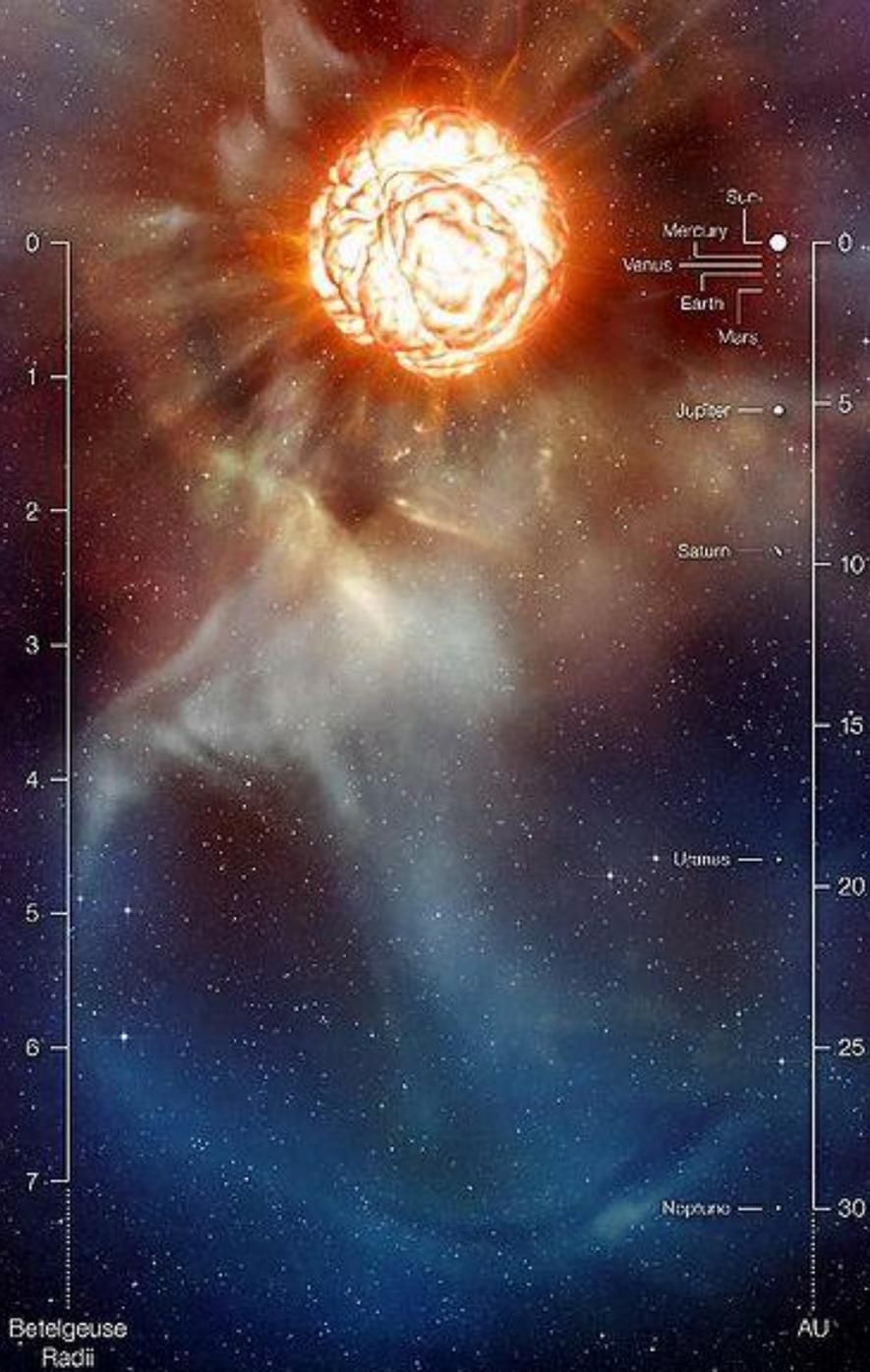
st35gm04n26_l1blm

Voir le site : <http://www.astro.uu.se/~bf/>

image : Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

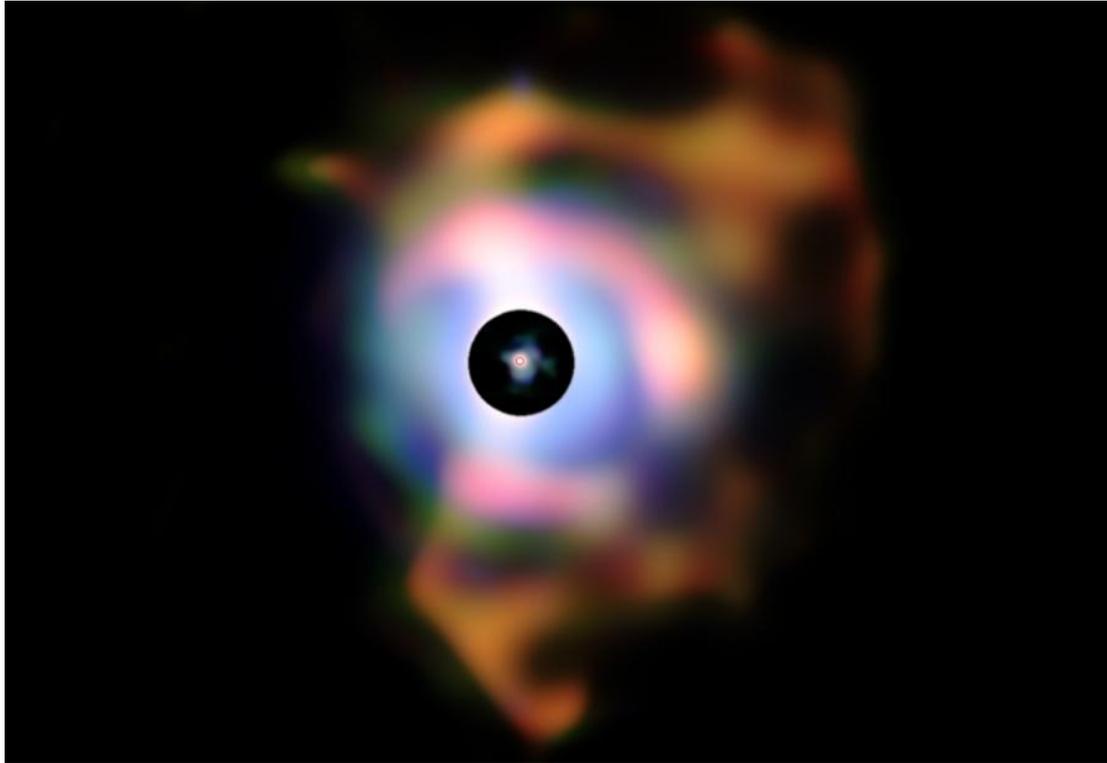
Simulation numériques
par Bernd Freytag (CRAL-ENSL)
très accéléré : épisode de 7 ans

2 cm à 200 km



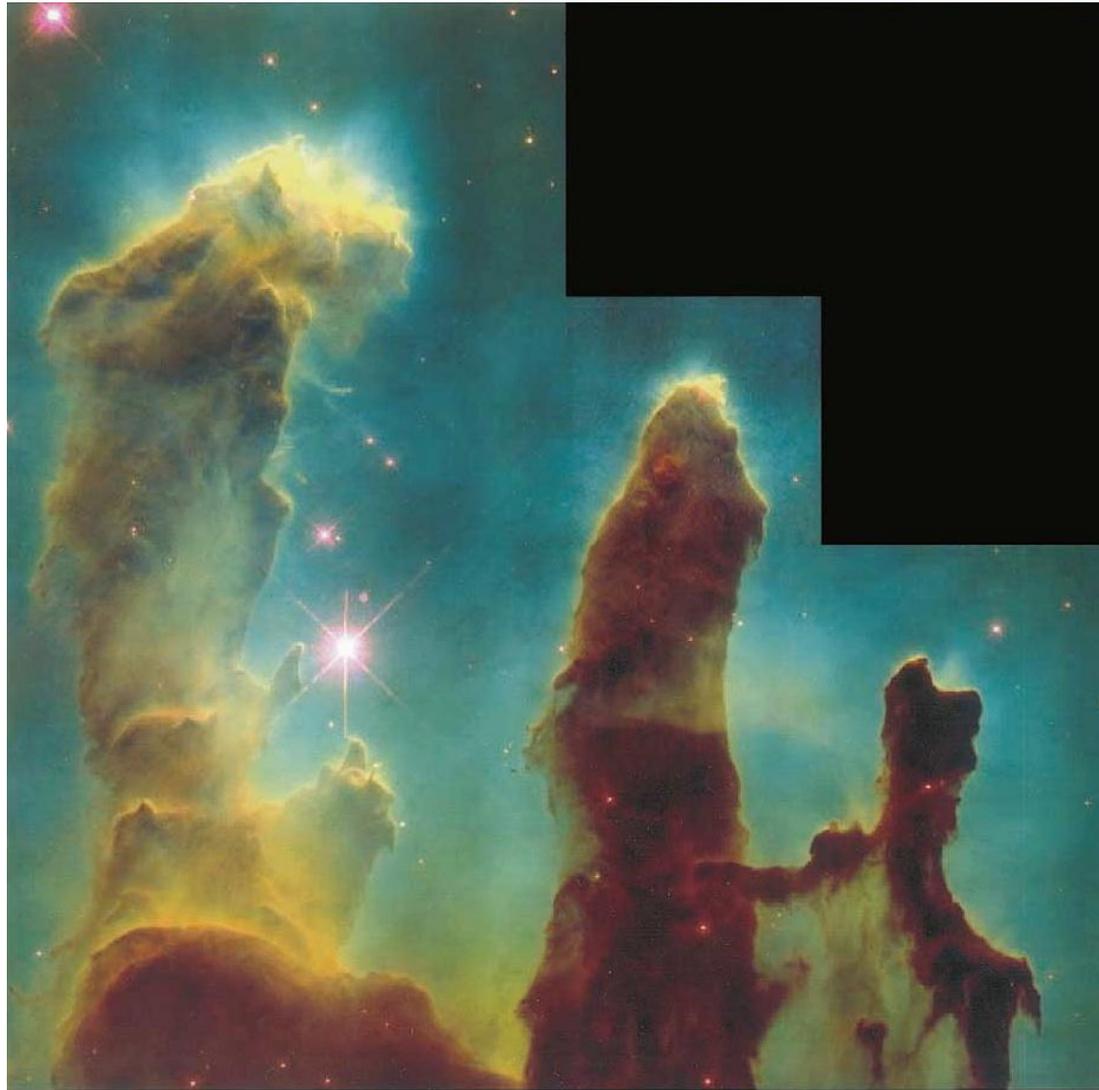
Représentation traditionnelle !

Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace



Environnement de Bételgeuse,
l'étoile masquée par « Coronographie »

RETOUR AU MILIEU INTERSTELLAIRE DENSE

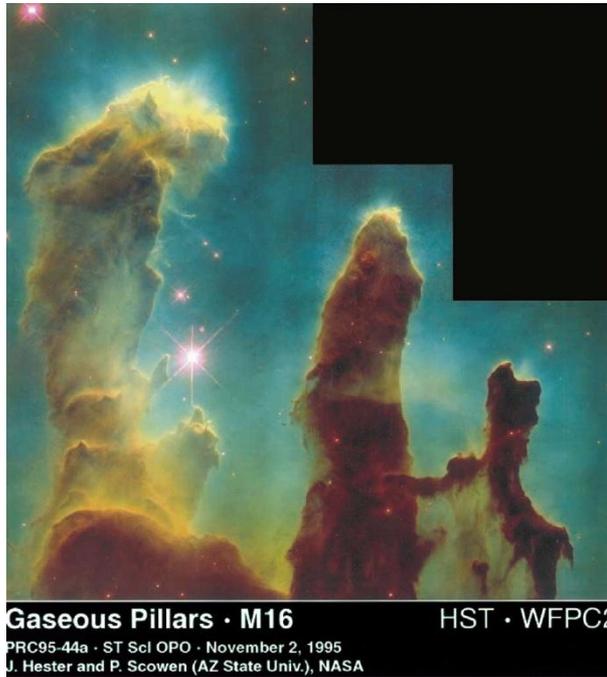


Gaseous Pillars · M16

HST · WFPC2

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

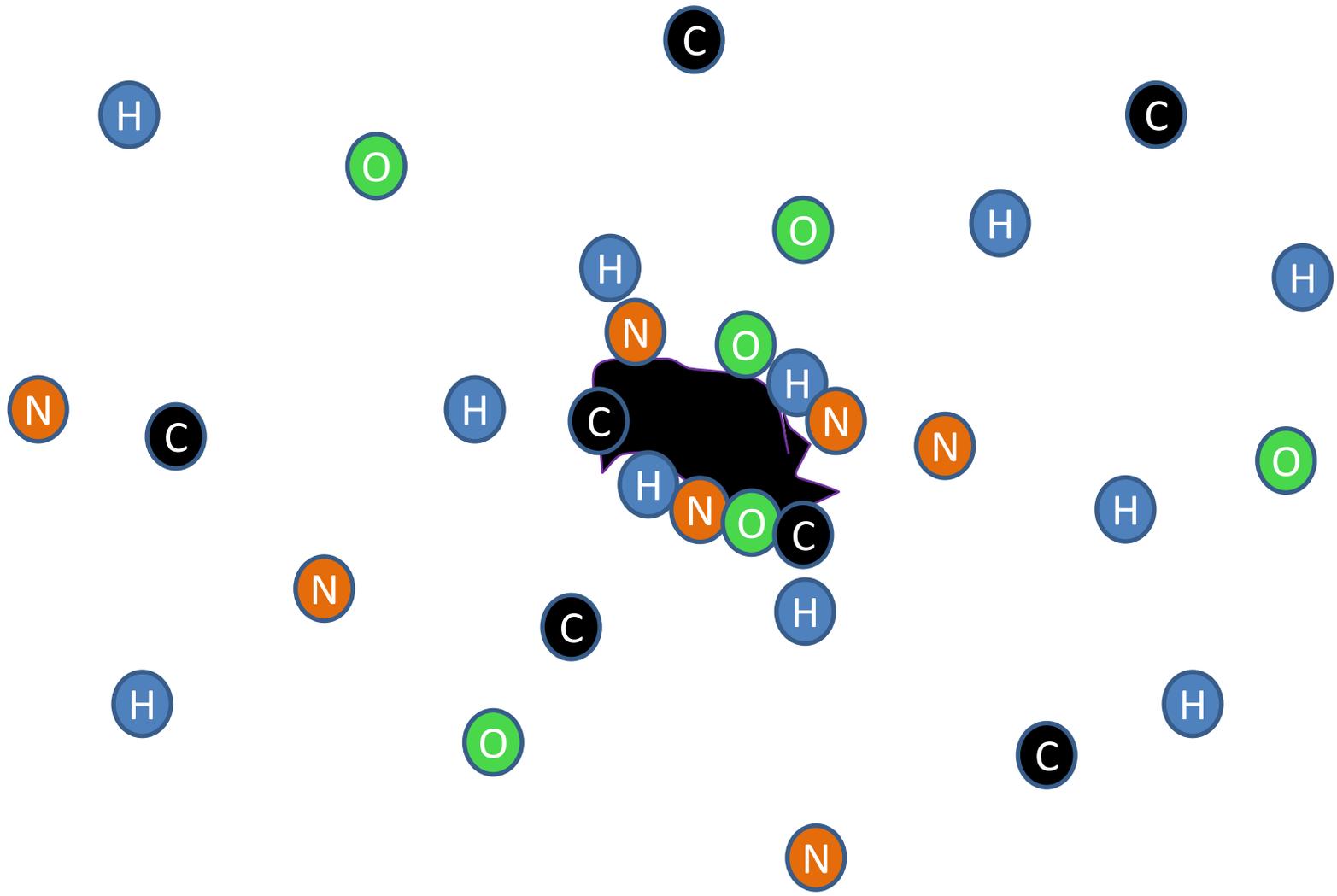
Nuages denses :
Complètement opaques
Très froids : 10K (-263 °C)



Chimie dans les nuages denses :

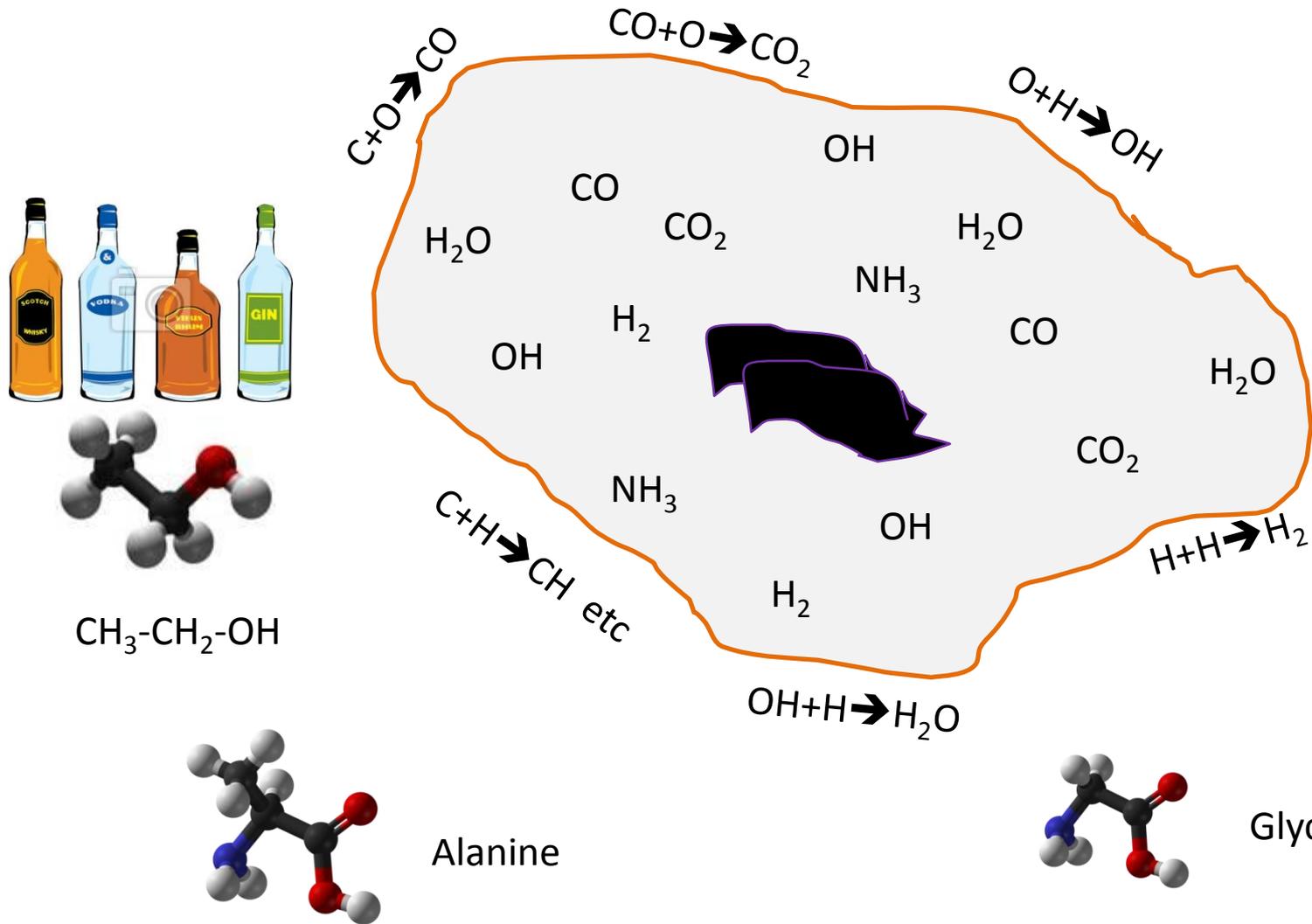
WWW.usine_à_molécules.com

Les atomes du gaz se collent à la surface des grains



Adsorption + Formation de molécules → couche de glace

→ Croissance des grains



Quand un grain sort du nuage ...

Turbulences → Retour du grain au milieu diffus



- Les étoiles le réchauffe
- Sublime la glace
- Photodissociation des molécules :



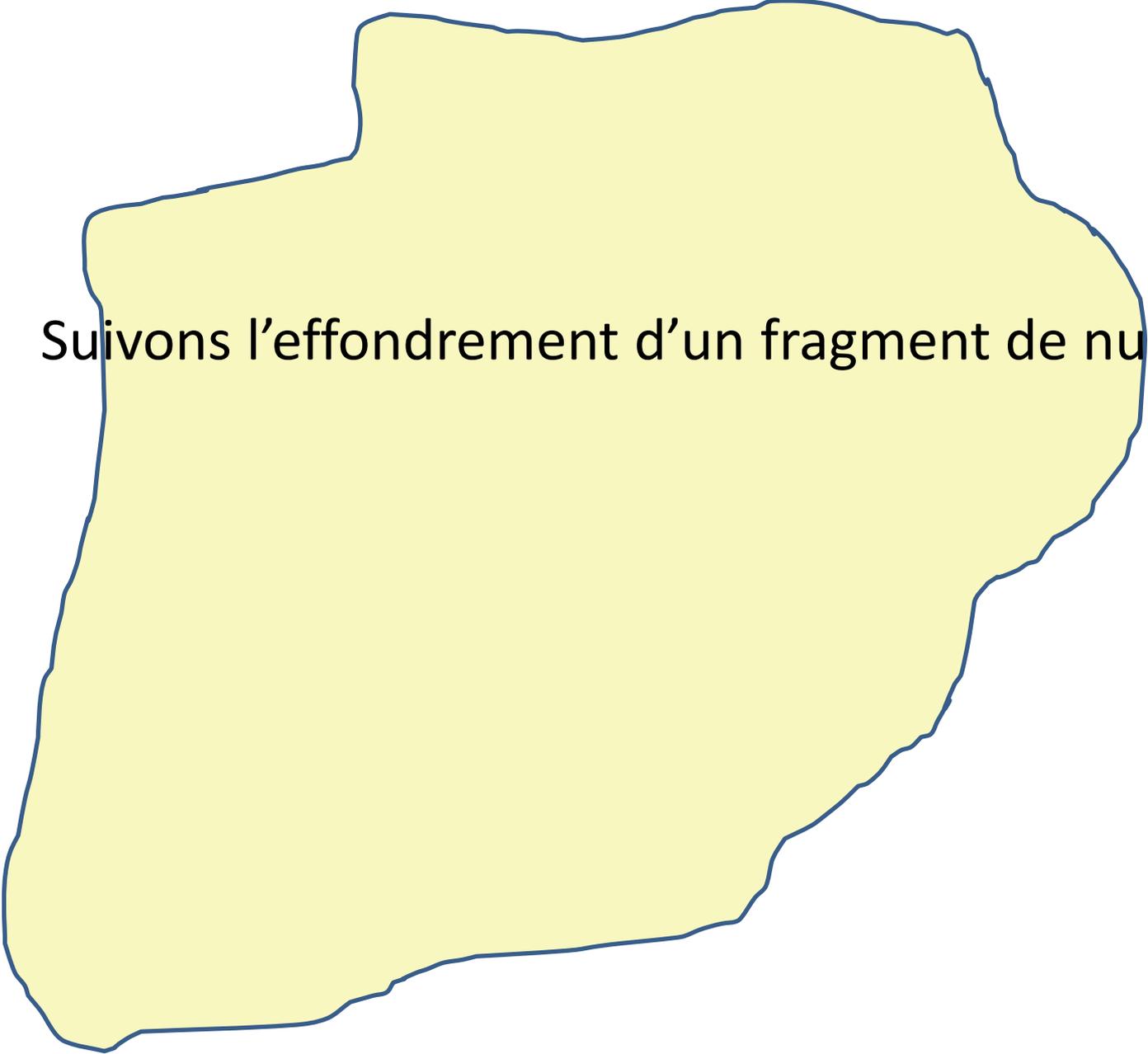
Autre scénario possible ...

Fragmentation du nuage
Collapse des fragments
Formation 'un groupe de nouvelles étoiles



Amas des Pléiades





Suivons l'effondrement d'un fragment de nuage

Intermède grands mécanismes:

Situation d'orbite

Conservation du moment cinétique $\sum m \mathbf{v} \times \mathbf{r}$

Capture et éjections

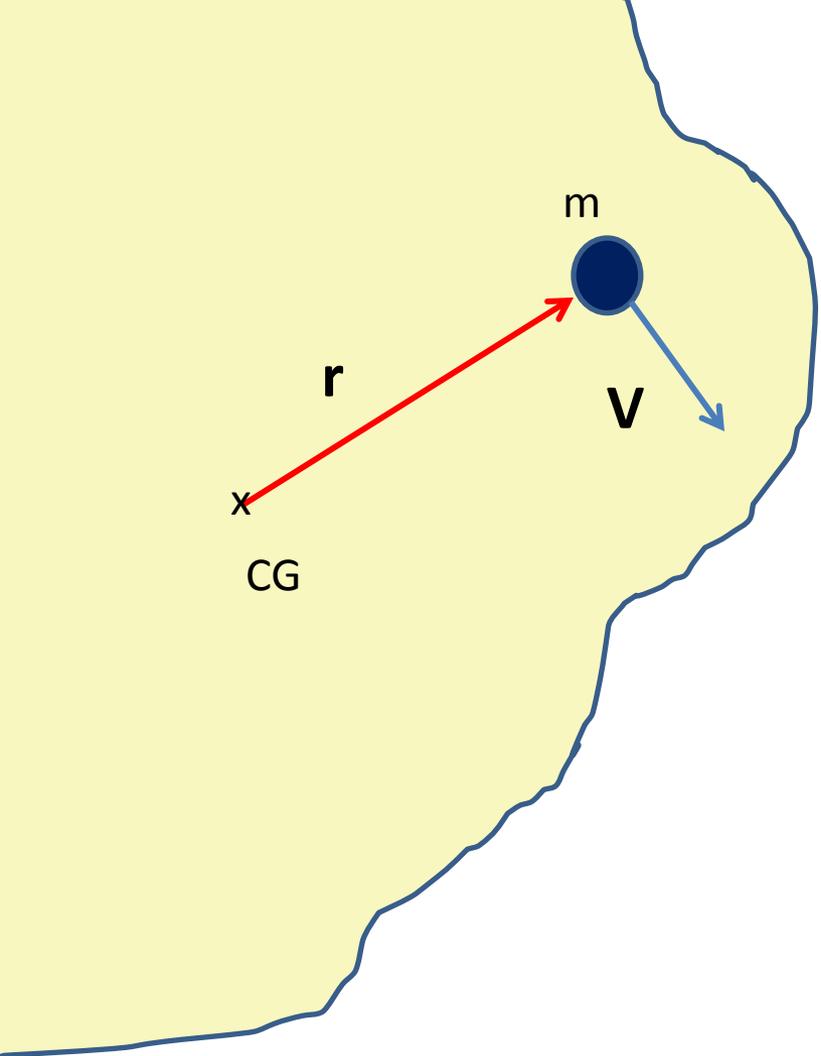
Marées, dissipation d'énergie

Rayonnement

Effet de serre

Effet dynamo

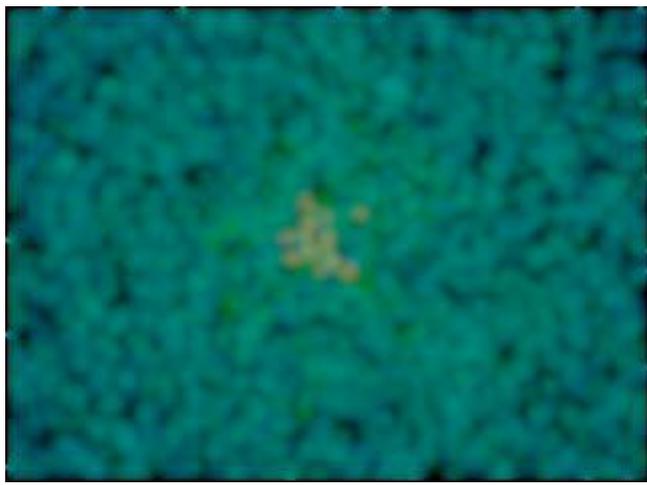
Datation



$m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'une particule

$\sum m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$ Moment cinétique d'un fragment

Conservation de $\sum m \mathbf{V} \times \mathbf{r}$



L'essentiel de la masse va dans l'étoile : nouvel équilibre hydrostatique

Le reste va dans un disque en orbite autour de l'étoile

Le disque «absorbe» le moment cinétique

Le disque refroidit et « coagule » en planètes

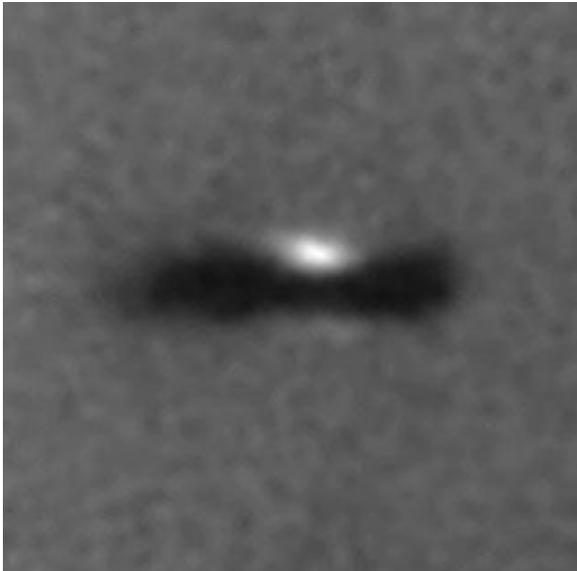
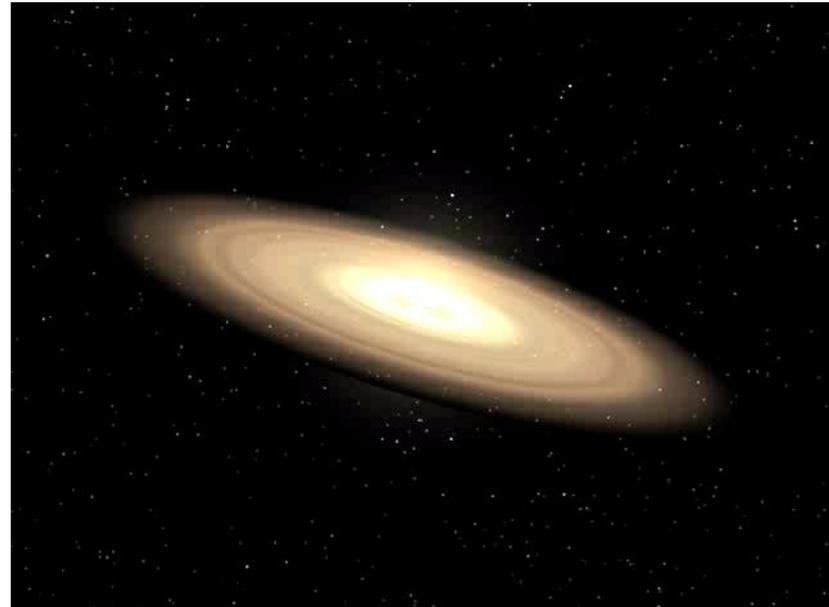
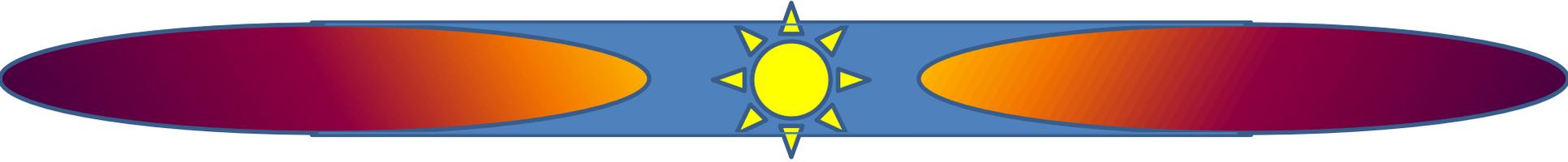


image NASA/ESA



Vidéo JPL/NASA





Intermède grands mécanismes:

Situation d'orbite

Conservation du moment cinétique

Capture et éjections

Marées, dissipation d'énergie

Echanges par rayonnement $L = S \sigma T^4$

Effet de serre

Effet dynamo

Datation

Température d'un grain chauffé par une étoile

T_* = Température de surface de 3000 à 20000 K

$T_{\text{Soleil}} = 5600\text{K}$

L'étoile rayonne une puissance : $L_* \propto \sigma T_*^4$ Loi de Stephan (Watt)

A une distance r de l'étoile : éclairement = $L_*/4\pi r^2$ (Watt/m²)

Un grain de rayon a , à cette distance r de l'étoile reçoit une puissance P_g :
 $P_g = (\text{Section du grain}) \cdot (\text{éclairement}) = (\pi a^2) L_*/4\pi r^2 = L_*(a/2r)^2$ (Watt)

À son tour, le grain se refroidit en rayonnant cette même puissance P_g

$P_g \propto \sigma T_g^4 \rightarrow T_g \propto r^{-1/2}$

Plus on est loin de l'étoile plus un solide éclairé par une étoile est froid :

à la distance de la Terre ($r = 1$ UA Unité Astronomique) $T \sim 280$ K

à la distance de Jupiter ($r = 5,2$ UA) $T \sim 280 \text{ K}/5,2^{1/2} = 122$ K

à la distance de Mercure ($r = 0,4$ UA) $T \sim 440$ K (hors effet de serre)

Toujours à propos de la température des corps chauds:

Vitesse de refroidissement

Dans le vide, la chaleur ne peut être évacuée que par rayonnement (Stephan)

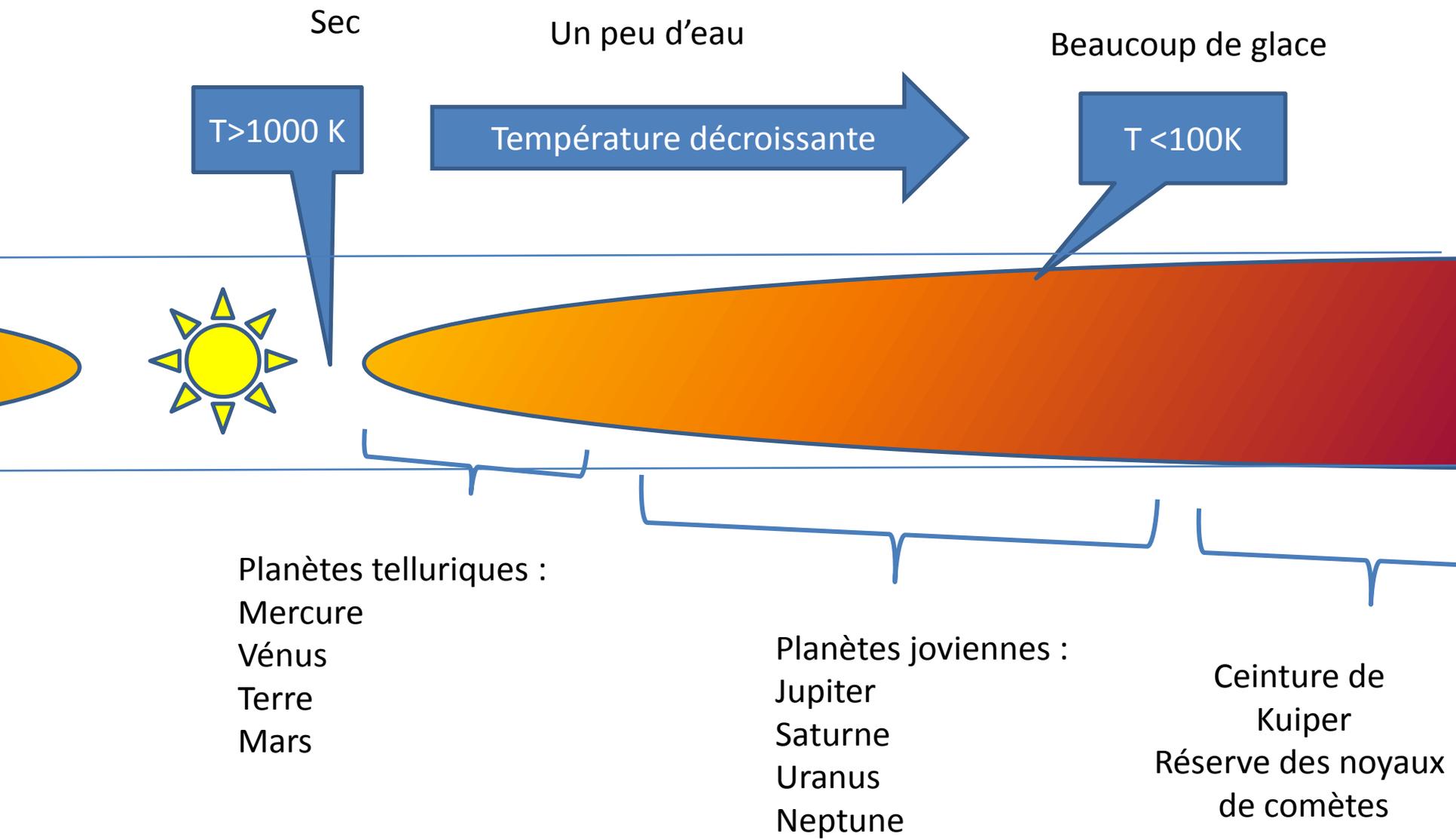
Quantité de chaleur à évacuer : % au volume → % a^3

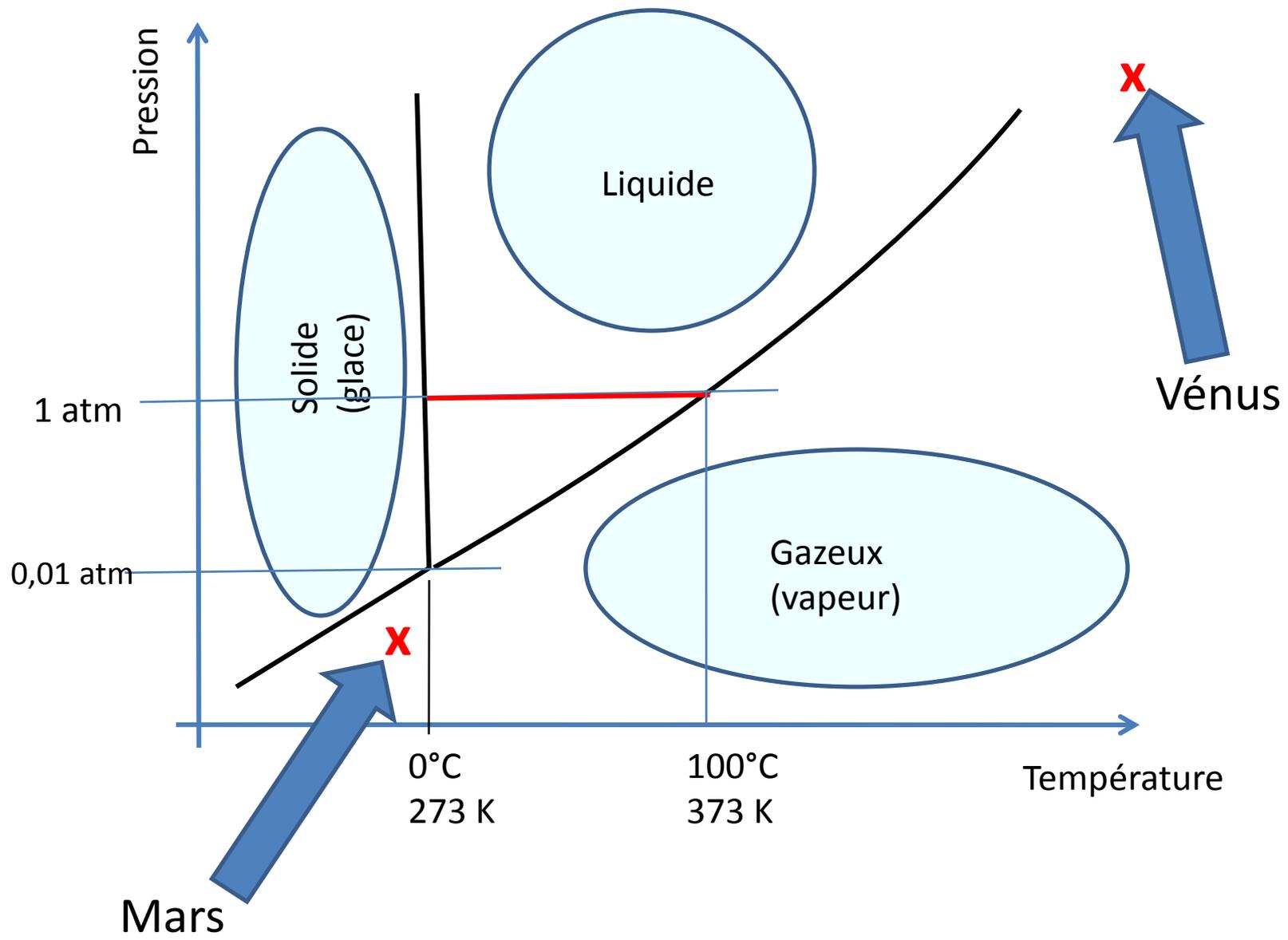
Surface disponible pour rayonner : % à la surface → % a^2

Vitesse de refroidissement % $1/a$

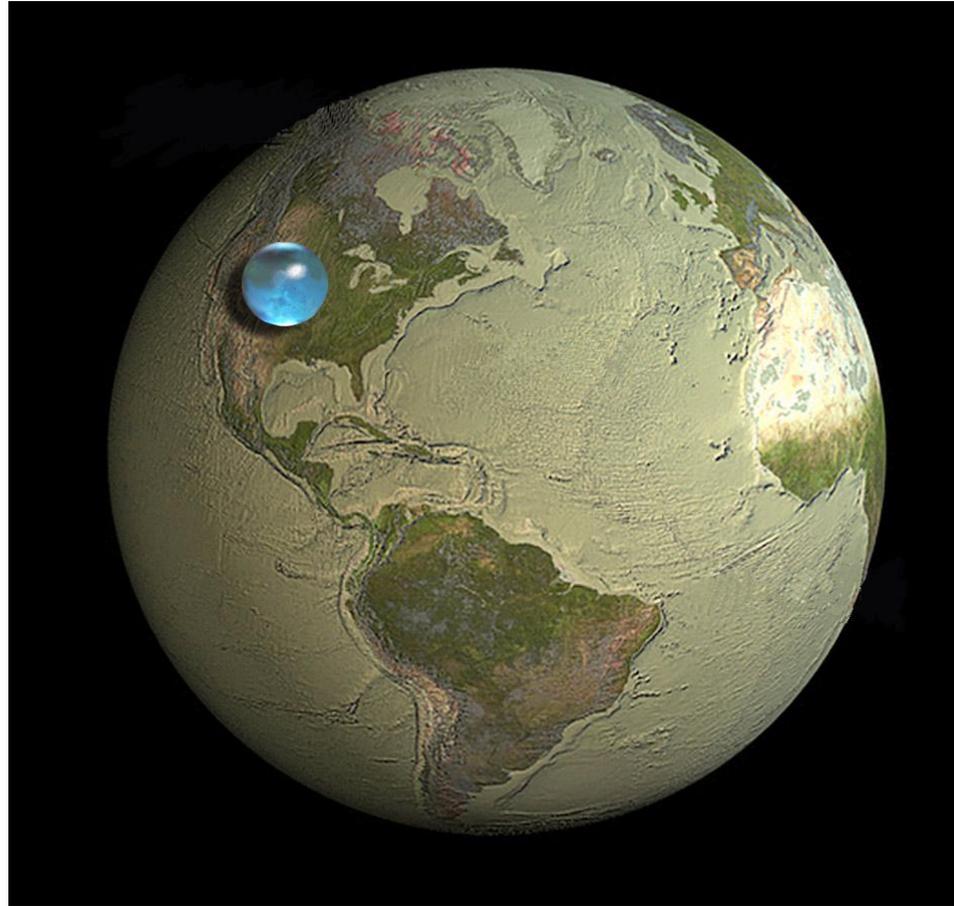
Un corps petit chauffé (par ex. dans un choc) se refroidit plus vite qu'un gros

Une petite planète, chaude lors de sa formation, se refroidit + vite qu'une grosse



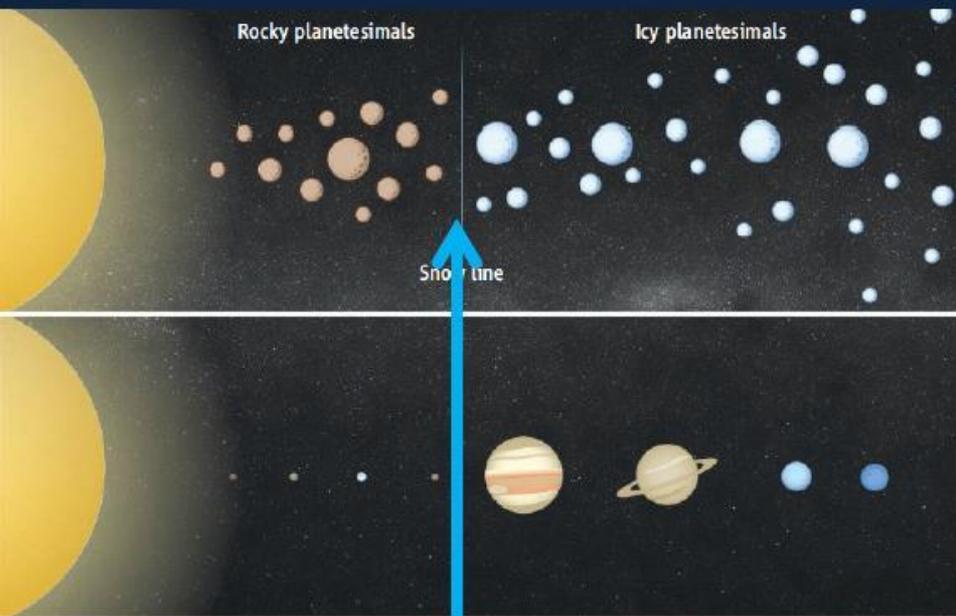


0,02% de la masse de la Terre



Toute cette eau est elle d'origine ?

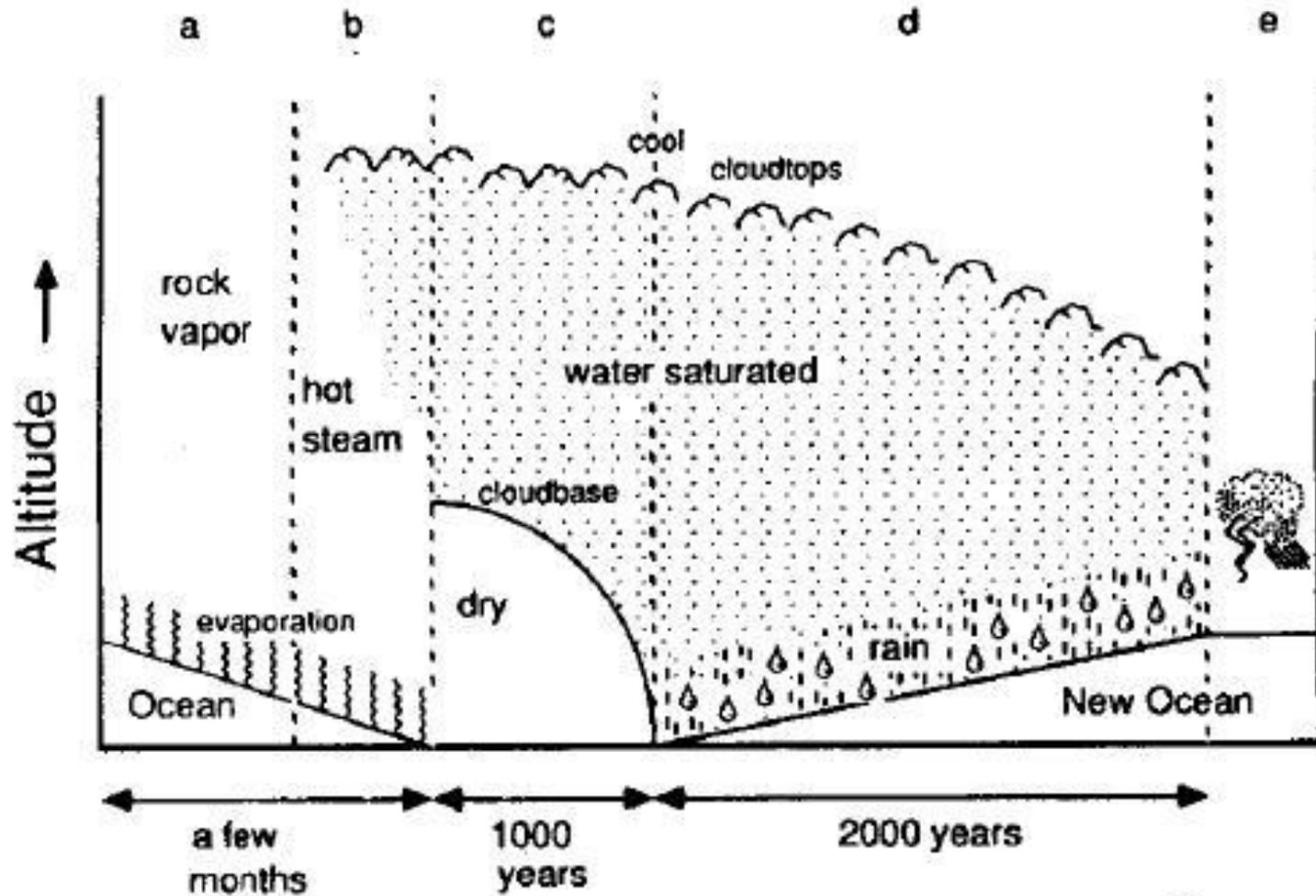
Origine de l'eau des océans



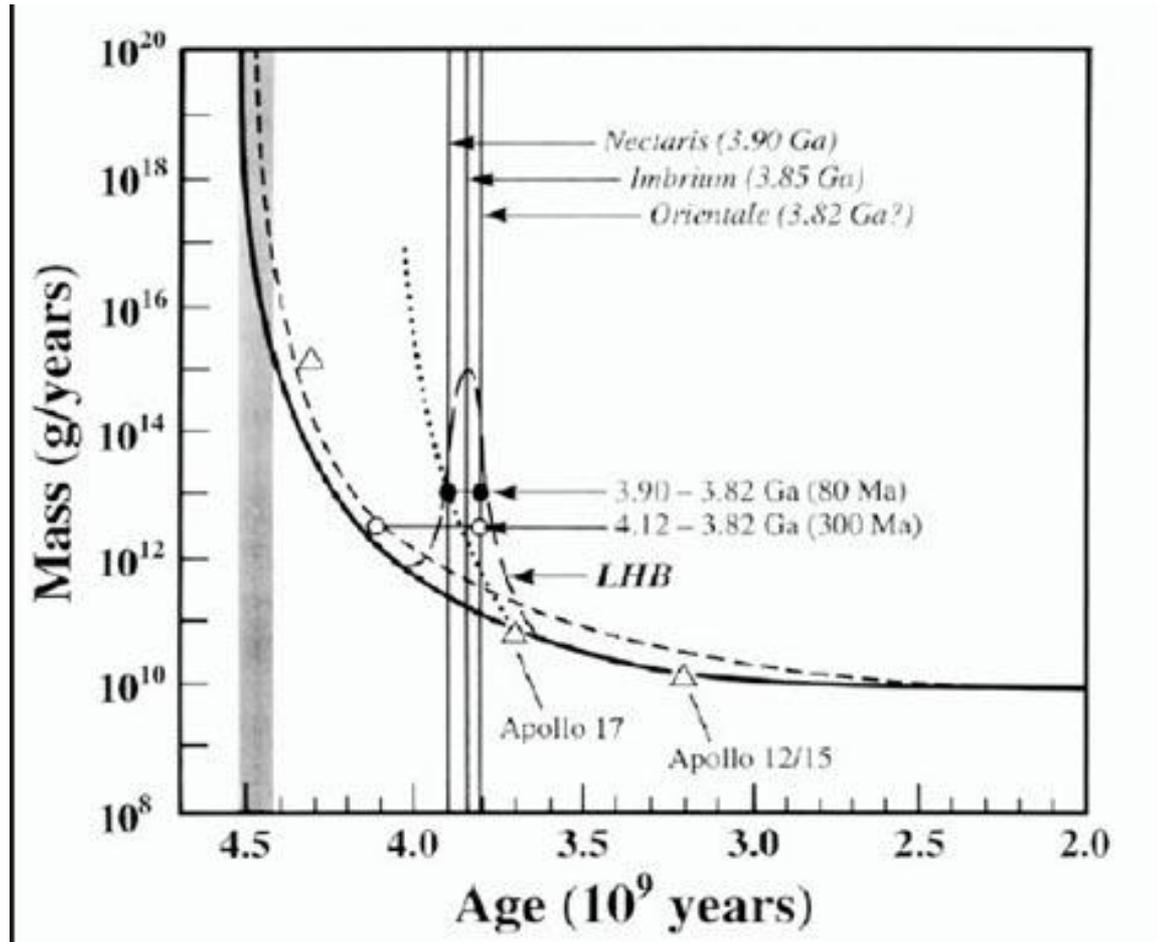
*Ligne des
glaces*

- La température à 1 UA était trop faible pour que la glace se condense (ligne des glaces à 2,7 UA)
- **La Terre s'est formée à partir de matériaux pauvres en eau** (type chondrites à enstatite)
- L'eau, et la matière organique, a une **origine externe**: astéroïdes, comètes ou météorites
- **Théorie du "water-rich late embryos"**
Accrétion de matériaux riches en eau (type chondrites carbonées) dans la dernière phase de formation de la Terre (gros embryons ~ 1000 km)
- Une petite fraction pendant la phase du bombardement tardif (+700 Ma)

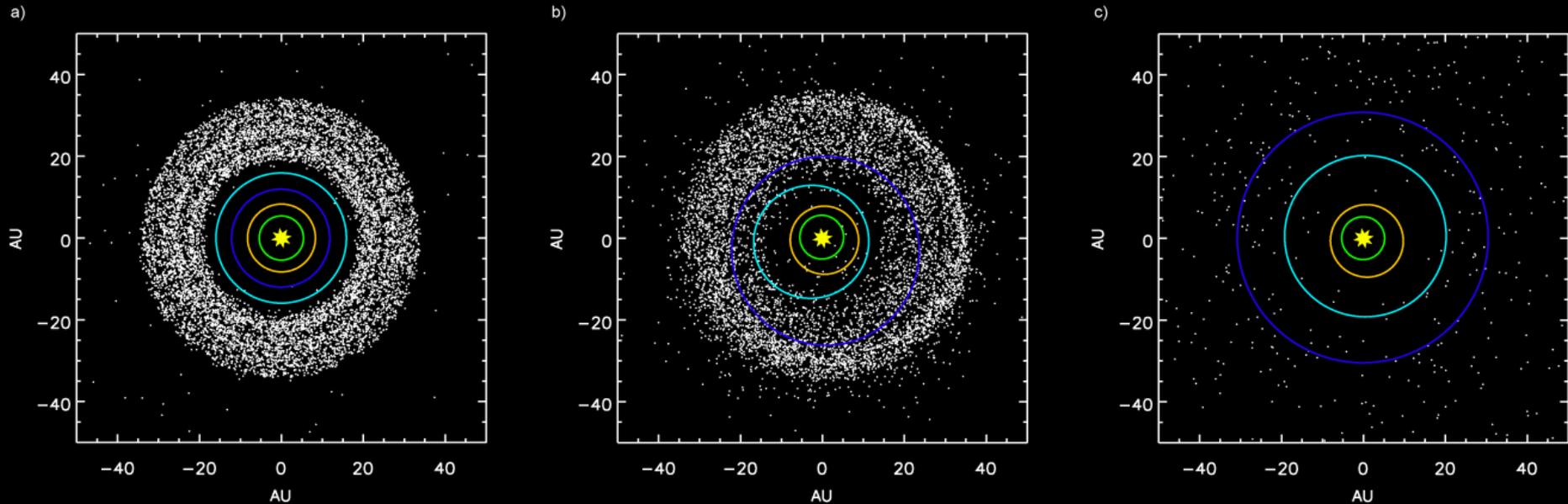
Météo des premiers temps de la Terre, après une collision majeure



Le « Modèle de Nice » ou « Grand Bombardement tardif » (LHB)



Grand Bombardement tardif Restructuration du Système solaire



Neptune passe au-delà d'Uranus

Le nuage des planétésimaux « glaçons » est dispersé

Les planètes sont moins serrées

Pluie de comètes et astéroïdes → Apport d'eau et de molécules

Intermède grands mécanismes:

Situation d'orbite

Conservation du moment cinétique

Capture et éjections

Marées, dissipation d'énergie

Echanges par rayonnement $L = S \sigma T^4$

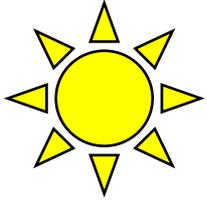
Effet de serre

Effet dynamo

Datation

Effet de serre

Planète sans atmosphère => pas d'effet de serre



Lumière visible + infrarouge

chauffage du sol

Rayonnement infrarouge

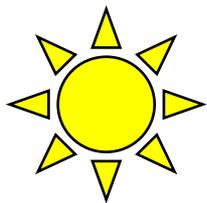
refroidissement du sol

La température du sol est déterminée essentiellement par l'équilibre entre l'énergie reçue du Soleil, et celle perdue par rayonnement vers l'espace
cf : calcul température des grains de poussière

Température d'équilibre

Planète **sans** atmosphère

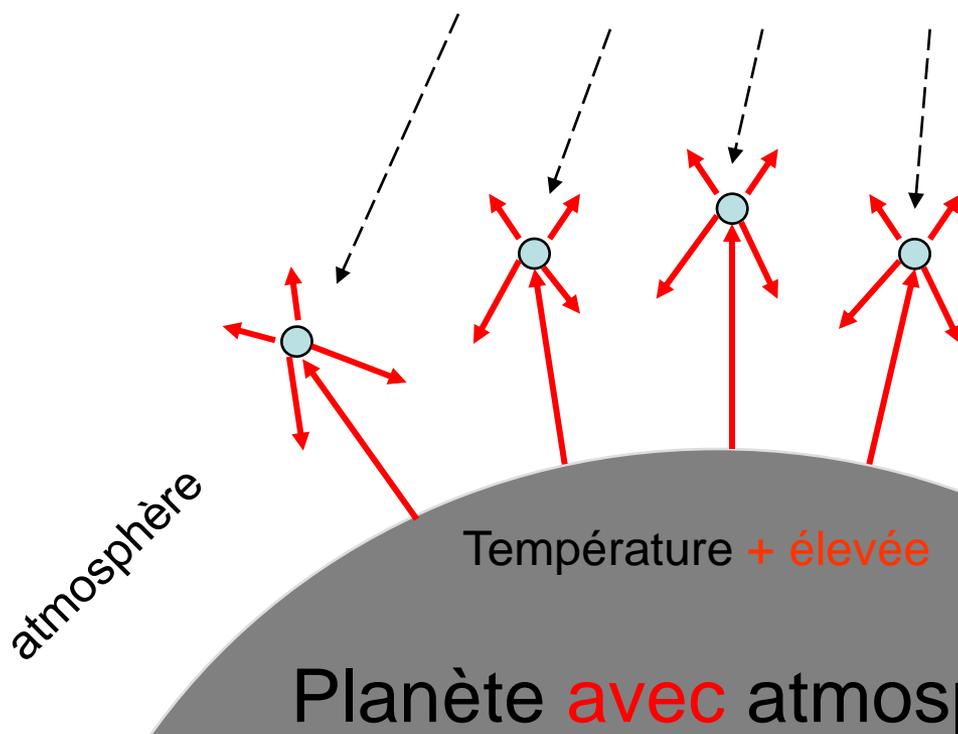
Effet de serre



Dû aux molécules qui absorbent/émettent l'infrarouge

molécules de gaz
à effet de serre :
 CO_2 , H_2O , CH_4 ...

La température du sol est plus élevée que celle qui résulterait de l'équilibre entre l'énergie reçue du Soleil, et celle perdue par rayonnement vers l'espace



ΔT dû à l'effet de serre :

Mars : +5°

Terre : +35°

Vénus : +500°

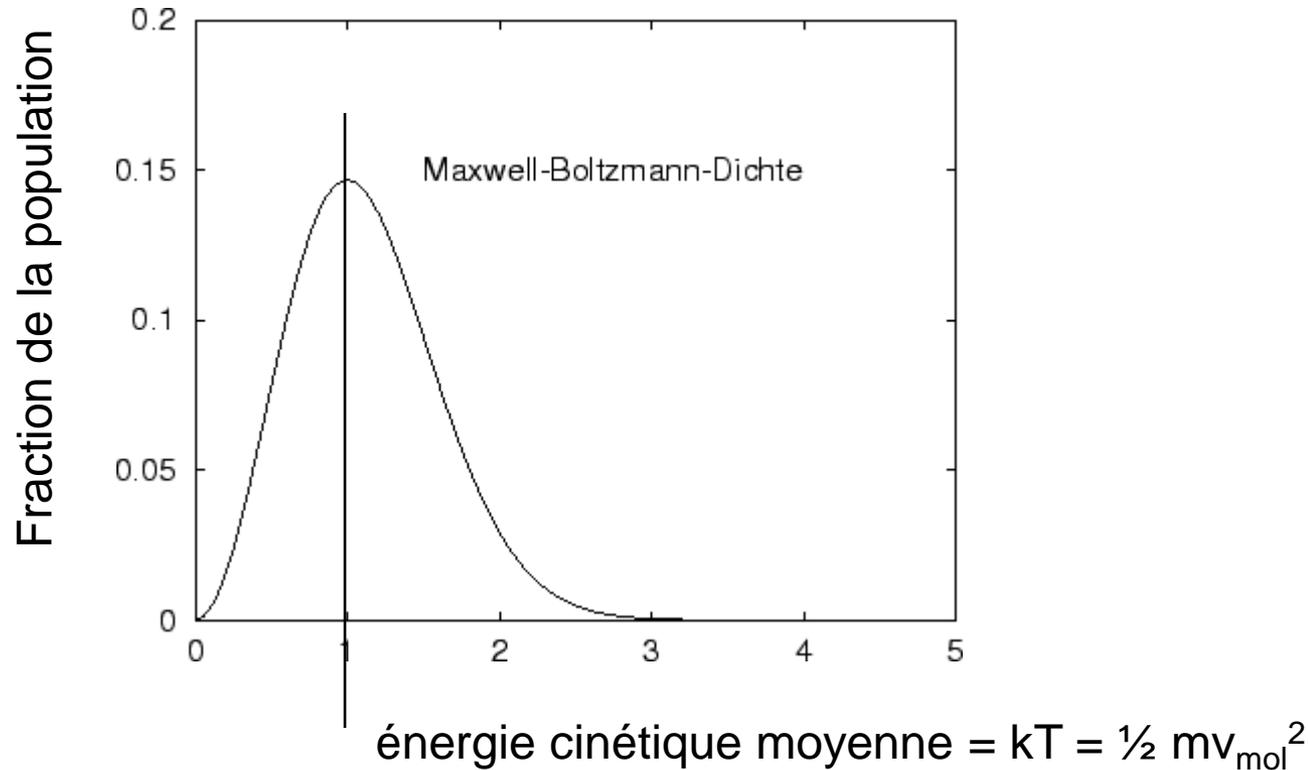
Perte des molécules des atmosphère

Compétition entre :

Gravité de la planète qui retient l'atmosphère (→ la pression atmosphérique)

Agitation thermique des molécules, dont la vitesse dirigée vers le haut peut atteindre et dépasser la vitesse de libération

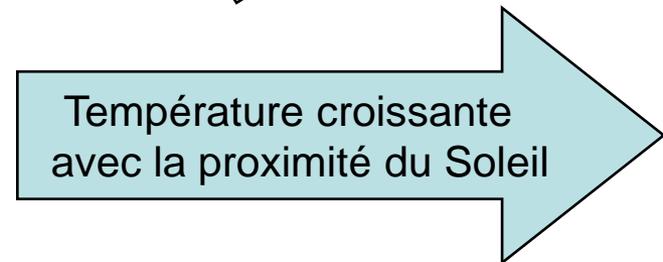
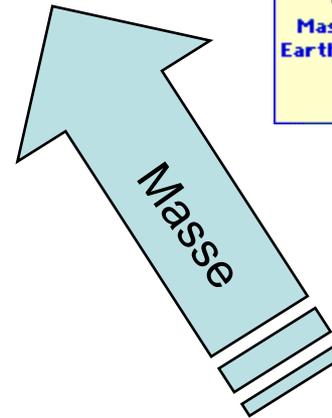
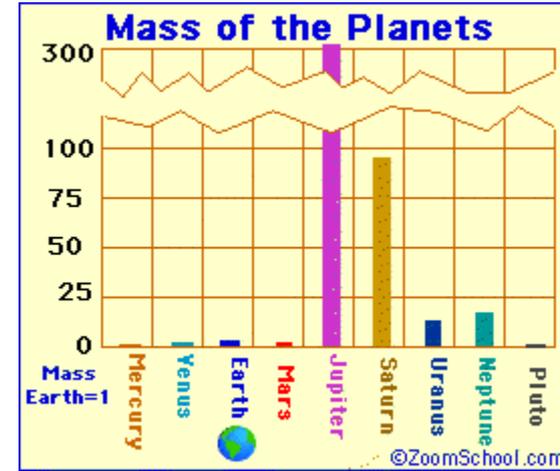
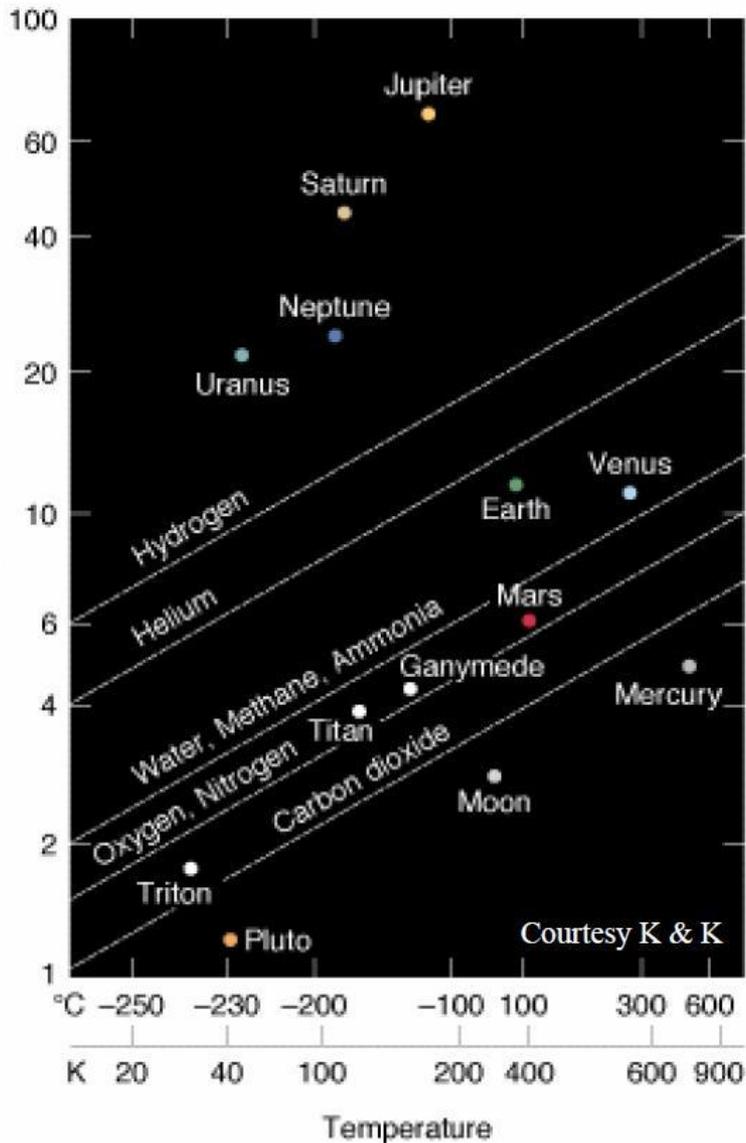
Vitesse moyenne des molécules à la température T : distribution de Boltzmann



Vitesse de libération : $v_{\text{ech}} = (2GM/(a+h))^{1/2}$

Si $v_{\text{mol}} > v_{\text{ech}}$ une molécule de mouvement dirigé vers le haut peut s'échapper dans l'espace

Vitesse d'échappement (km/sec)



Pour une molécule donnée :
L'évaporation sera d'autant plus rapide que

{ T est + élevée (+près du Soleil)
g est + petit (petite planète)
m est plus petit (gaz léger, H, He)

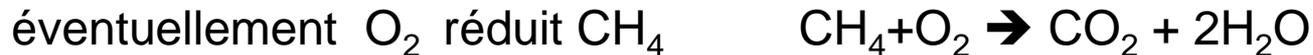
Sort particulier pour H₂O : Perte par photodissociation

Dans la haute atmosphère : UV solaire → photodissociation de molécules



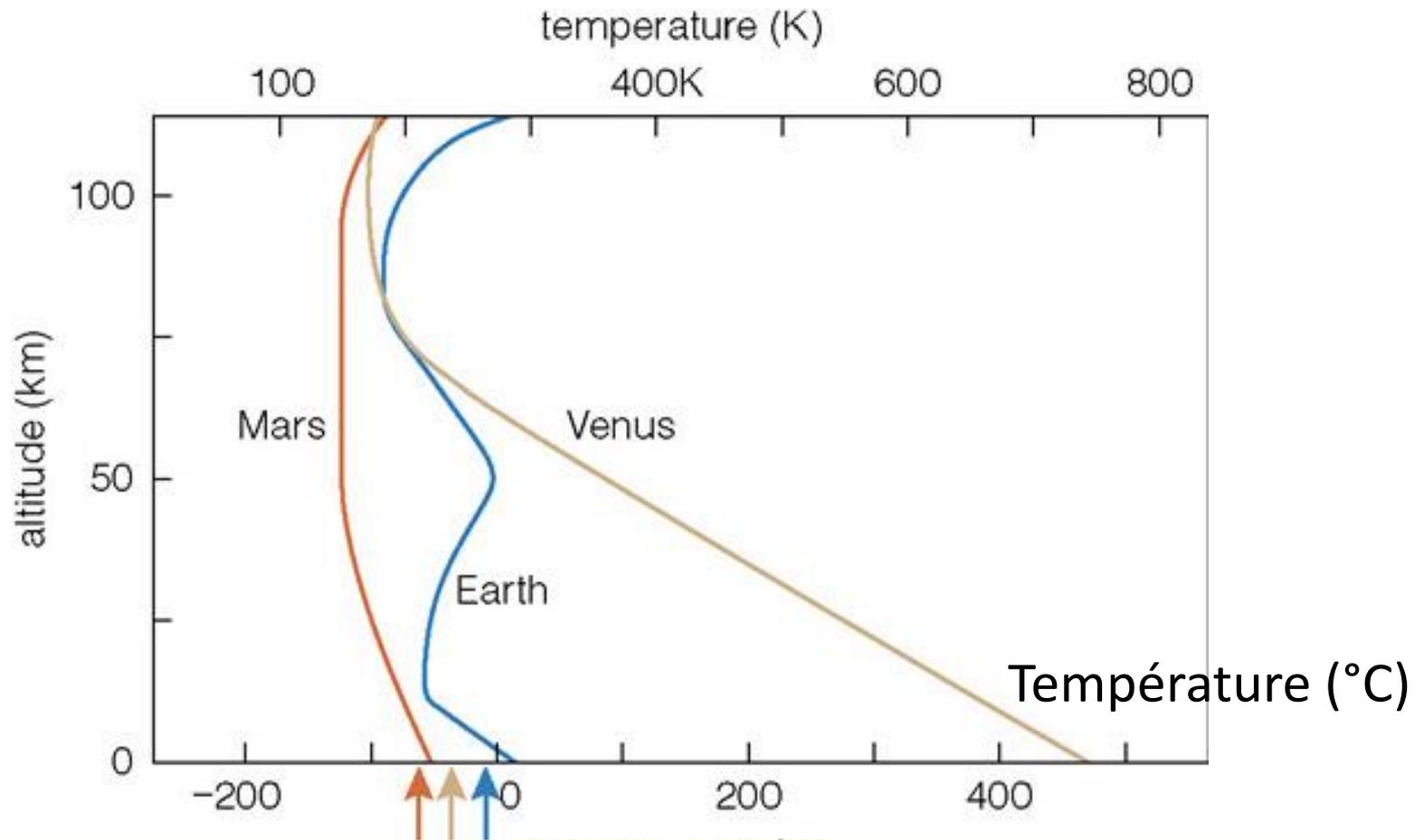
Les H s'échappent très facilement

(en moins d'1 heure pour la Terre !)



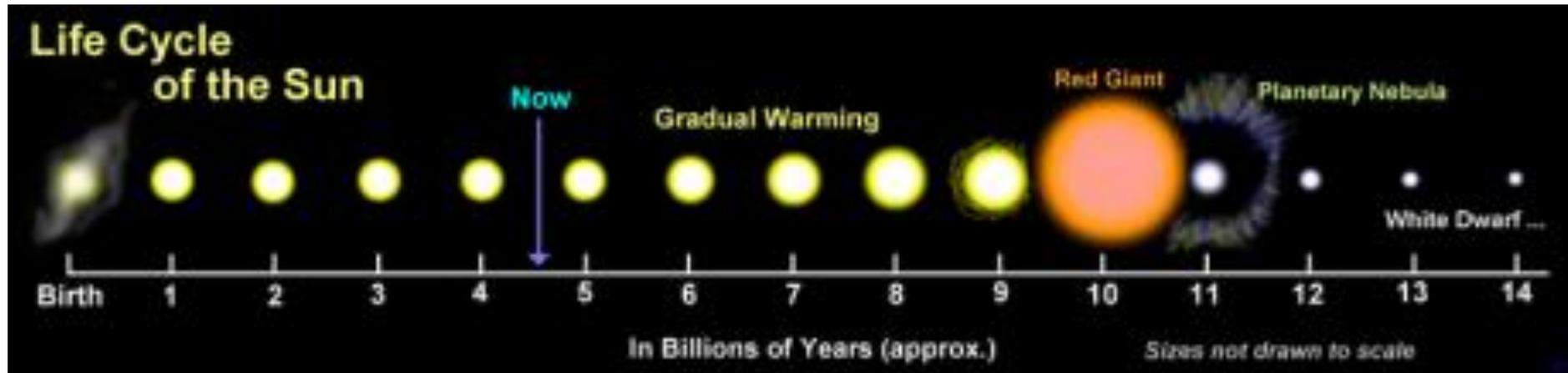
Résultat :

-Toute molécule d'eau qui atteint la haute atmosphère est perdue



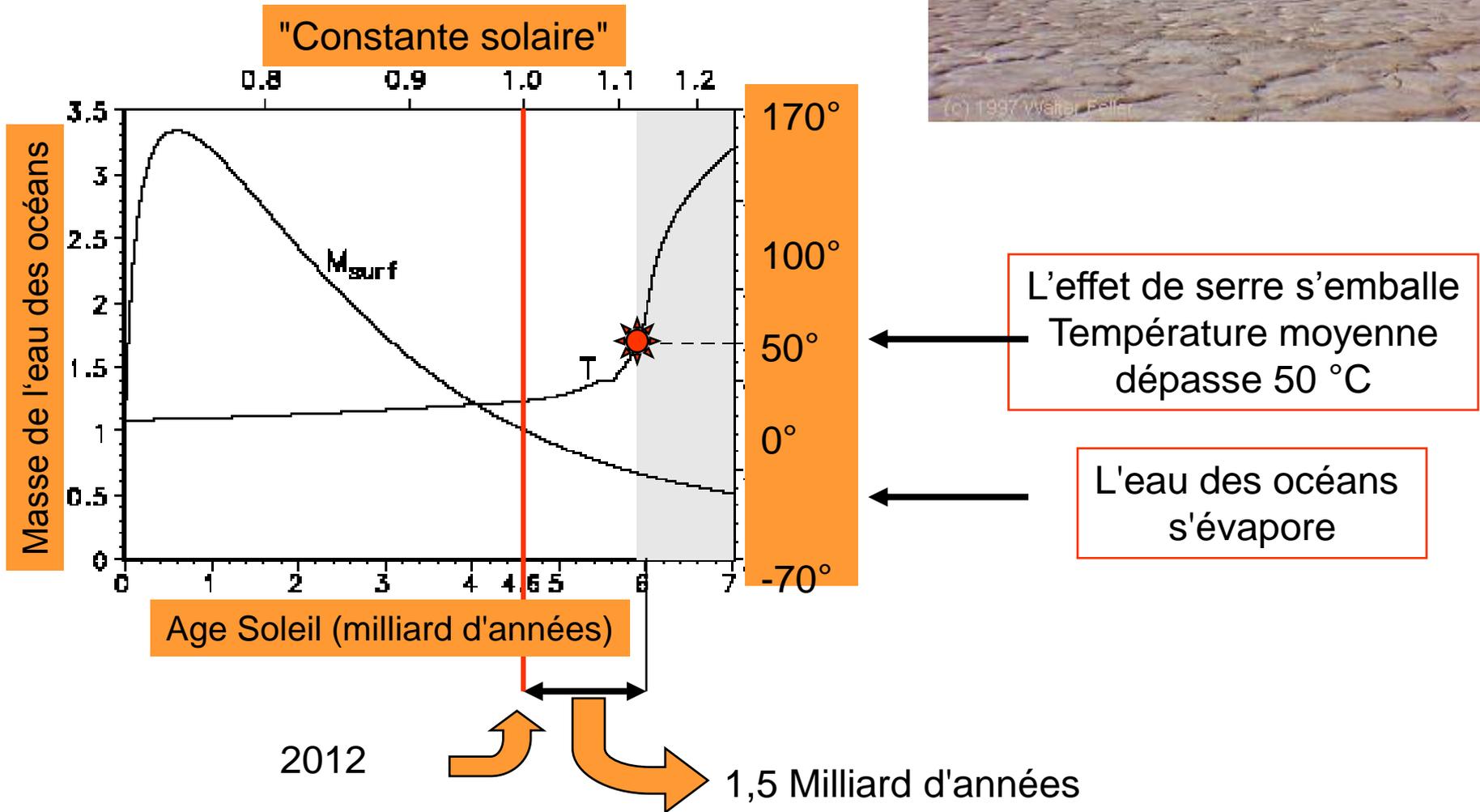
La Terre retient bien son eau
Barrière froide à 15 km d'altitude

Facteur temps : Evolution du Soleil



Mais ça ne durera pas toujours

Croissance de la « Constante solaire »
Le Soleil chauffe de plus en plus !



Intermède grands mécanismes:

Situation d'orbite

Conservation du moment cinétique

Capture et éjections

Marées, dissipation d'énergie

Rayonnement

Effet de serre

Effet dynamo

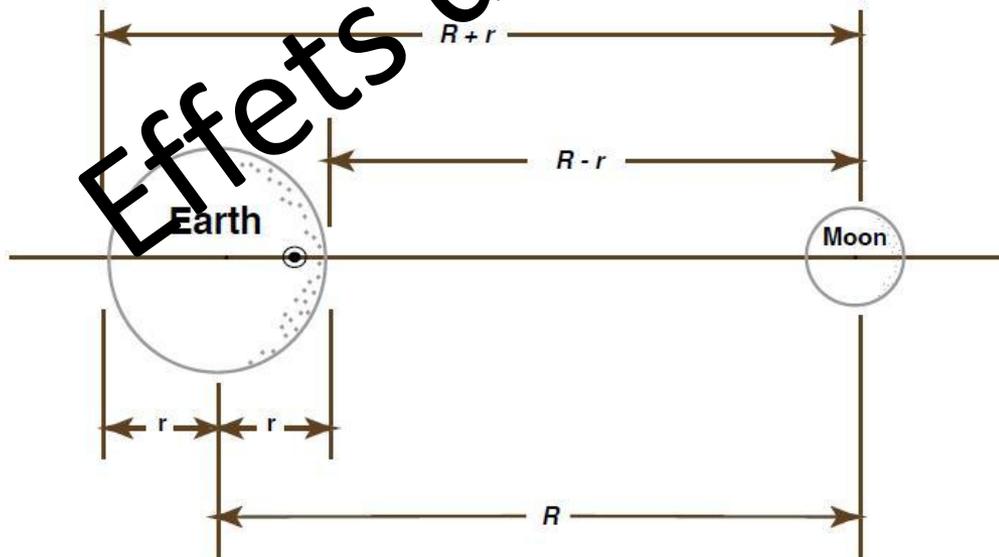
Datation

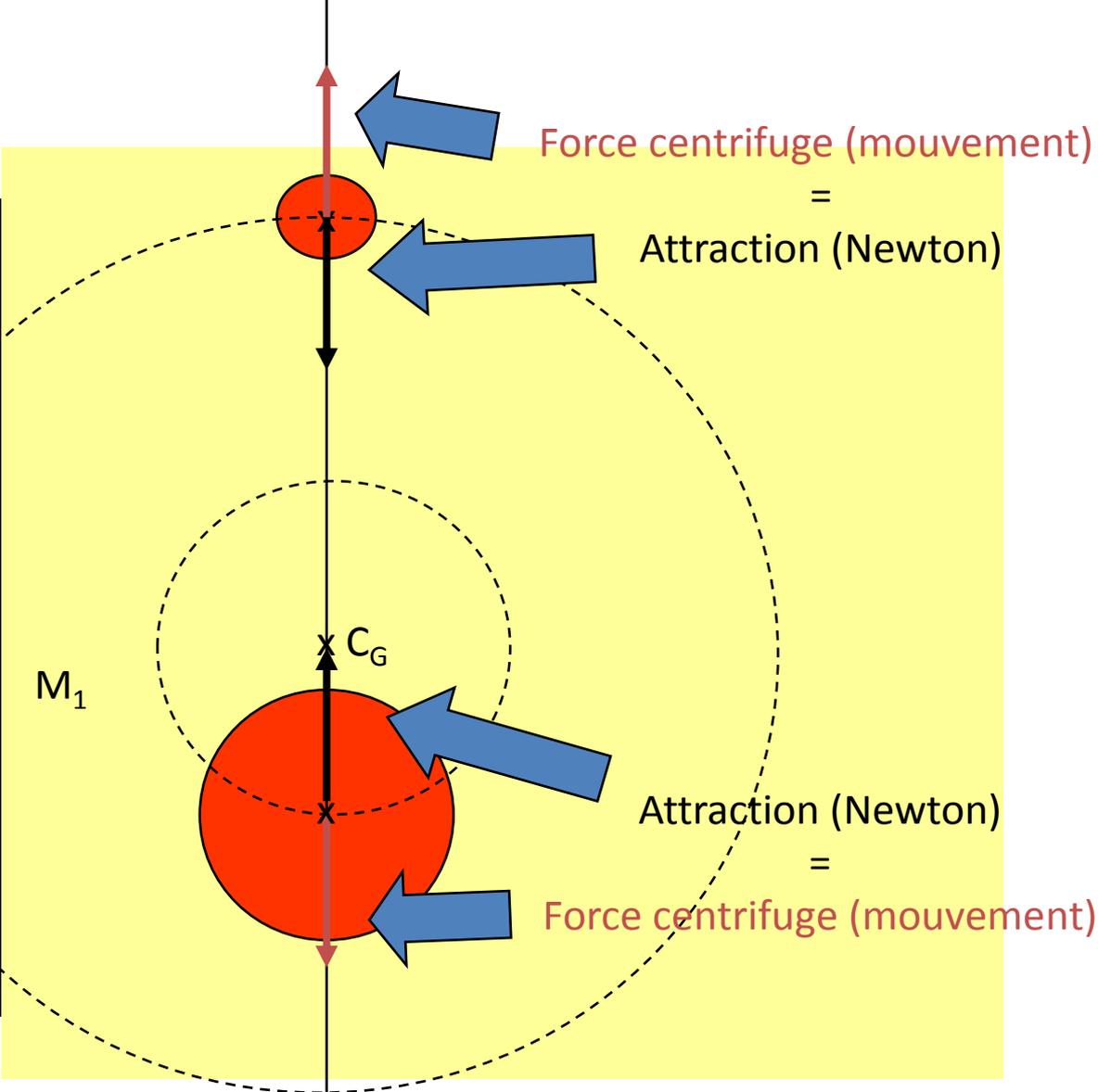
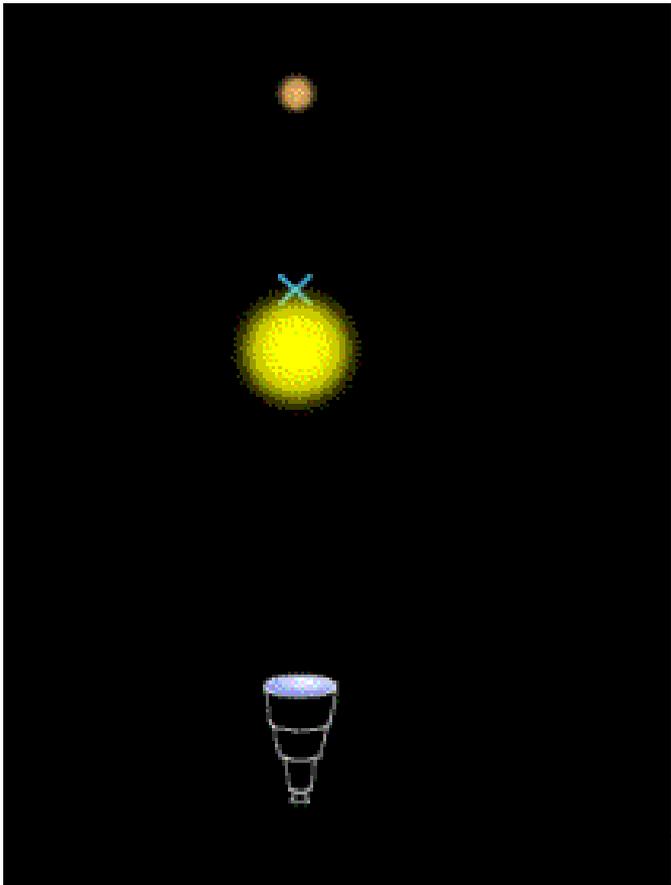
$$\begin{aligned}
 F_T &= -\frac{Gm}{R^2} + \frac{Gm}{(R+r)^2} \\
 &= Gm \left[\frac{-(R+r)^2 + R^2}{R^2(R+r)^2} \right] \\
 &= Gm \left[\frac{-2rR - r^2}{R^2(R^2 + 2rR + r^2)} \right] \\
 &= Gm \left[\frac{-2rR}{R^2(R^2)} \right] \\
 &= -\frac{2Gmr}{R^3}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 F_T &= -\frac{Gm}{R^2} + \frac{Gm}{(R-r)^2} \\
 &= \frac{-Gm(R-r)^2 + GmR^2}{R^2(R-r)^2} \\
 &= Gm \left[\frac{R^2 - (R-r)^2}{R^2(R-r)^2} \right] \\
 &= Gm \left[\frac{2rR - r^2}{R^2(R^2 - 2rR + r^2)} \right] \tag{3}
 \end{aligned}$$

This looks formidable, but since $r \ll R$, then $r^2 \ll rR$ and $rR \ll R^2$, so to a very close approximation

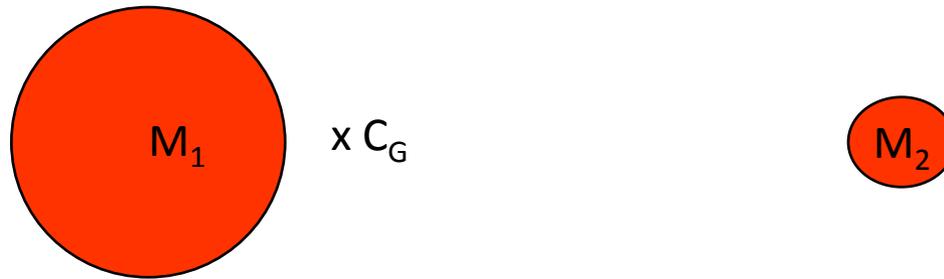
$$\begin{aligned}
 F_T &= Gm \left[\frac{2rR}{R^2(R^2)} \right] \\
 &= \frac{2Gmr}{R^3} \tag{4}
 \end{aligned}$$





2 objets en orbite

Effets de marée : 2 objets sont en orbite par rapport à leur centre de gravité C_G



Le mouvement orbital résulte (Kepler) de l'équilibre des forces :

- Appliquées au centre de gravité de M_1 :
force centrifuge du mouvement de M_1 = -(Attraction newtonienne de M_2 sur M_1)

et

- Appliquées au centre de gravité de M_2 :
force centrifuge du mouvement de M_2 = -(Attraction newtonienne de M_1 sur M_2)

Mais la situation est plus compliquée pour la matière du volume qui entoure le centre de gravité → Les effets de marée

Effets de marée

Par rapport à la force centrifuge f_c :

La gravité de la Lune f_G

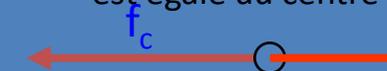
est plus faible

loin de la Lune



La gravité de la Lune

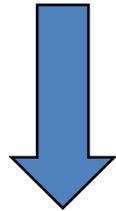
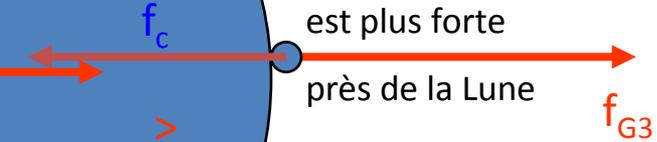
est égale au centre



La gravité de la Lune

est plus forte

près de la Lune

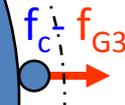


Résultantes des forces

et déformation



$$f_c - f_{G3} = 0$$



Résultantes des forces

et déformation

La déformation a lieu, que la planète tourne, ou pas

Marée solide sur la croûte terrestre : à Paris 30 cm

Marée solide de Jupiter sur Io : 100m

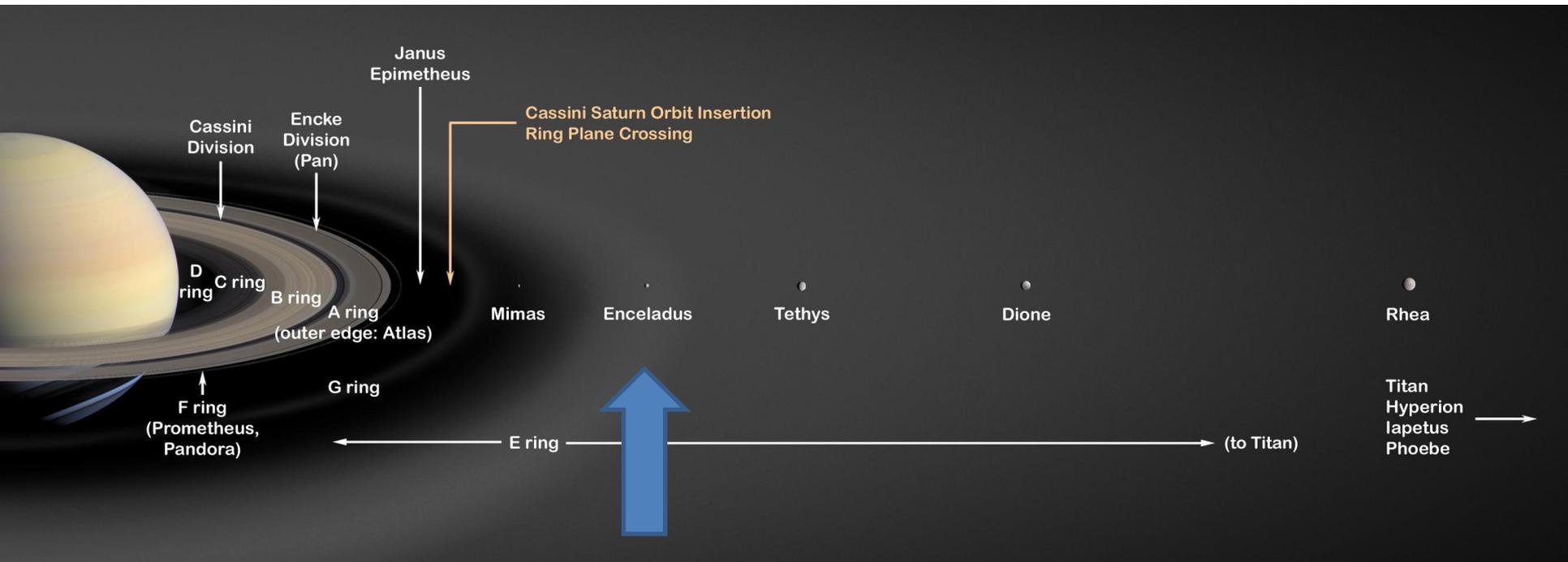
- Dissipation d'énergie,
- Échauffement de l'intérieur
- Transfert de moment cinétique:
- Le plus petit ralentit sa rotation ex : Mercure
- Jusqu'à présenter toujours la même face au plus gros
ne fait alors plus qu'un tour sur lui-même par période orbitale
ex : Io % Jupiter et Lune % Terre

→ Terre-Lune : le jour de Terre s'allonge = perte de moment cinétique de la Terre qui est transféré à la Lune dont l'orbite s'allonge
Distance Terre-Lune augmente de qq cm/an (donc l'énergie orbitale de la Lune, proportionnelle au $1/2$ grand axe a , augmente.
Cette énergie est prélevée sur l'énergie de rotation de la Terre)

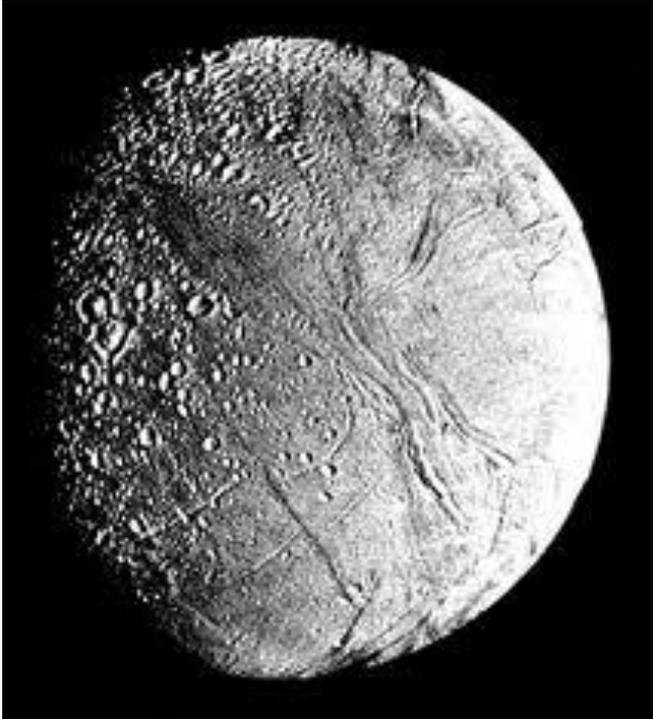
Dans beaucoup de temps : durée de la rotation de la Terre aura diminué jusqu'à être égale à la période orbitale de la Lune
Les 2 objets se présenteront mutuellement en permanence la même face
La durée du jour terrestre sera alors > 29 jours de 24h (des h d'aujourd'hui !)
(cf. Mercure-Soleil)



Encelade : une lune gelée de saturne, assez proche

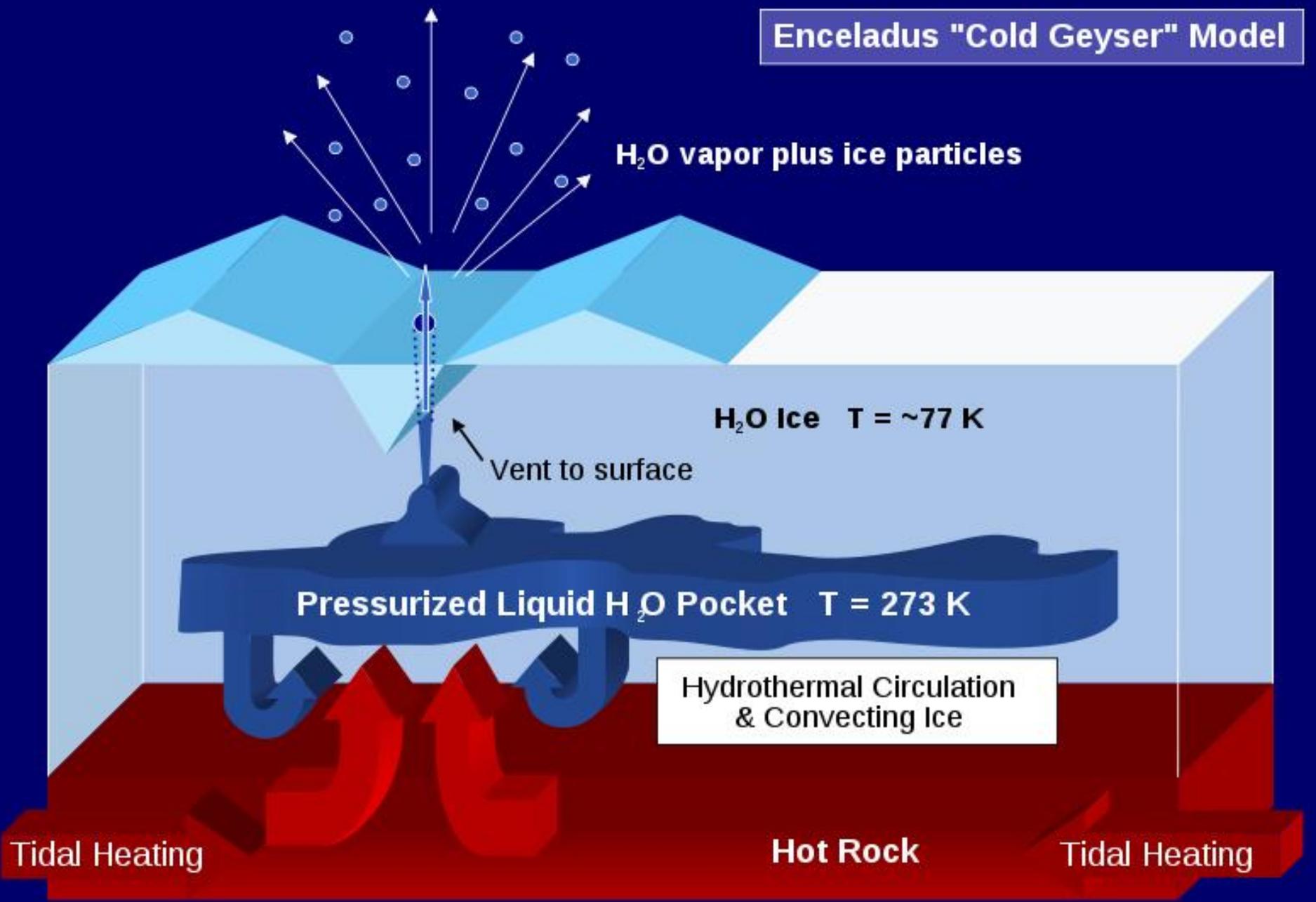


Encelade (Saturne)

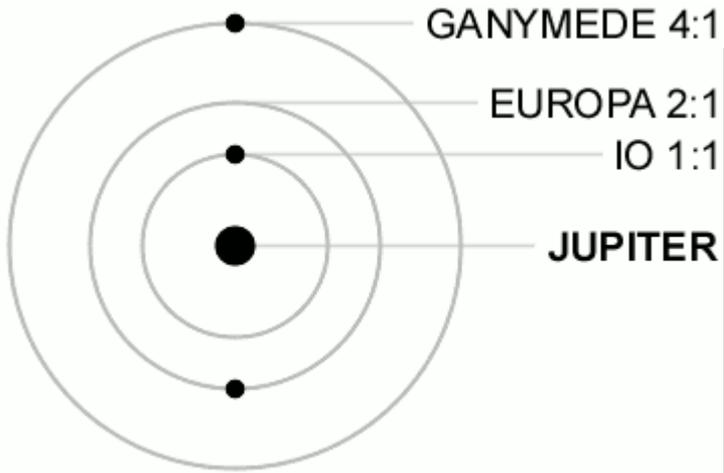


Geysers d'Encelade

Enceladus "Cold Geyser" Model

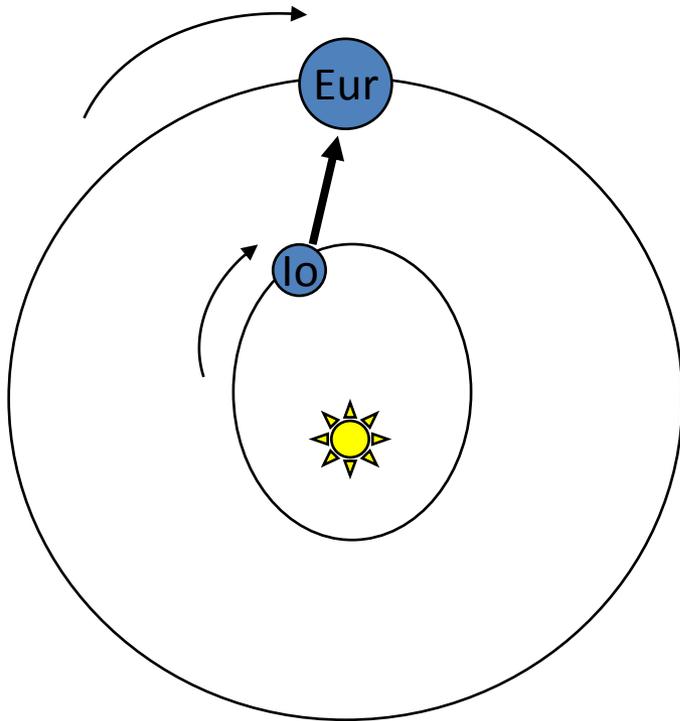


Jupiter et ses 4 satellites « galiléens »

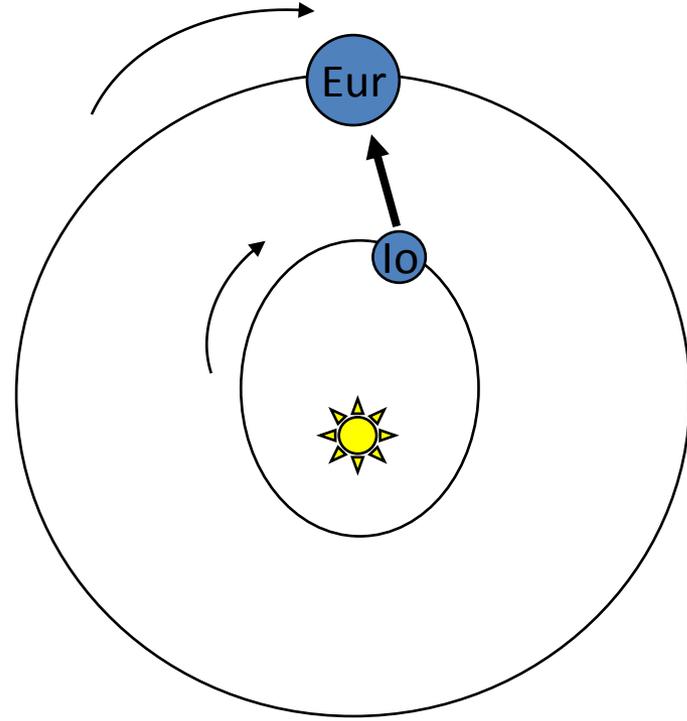


Petites perturbations qui amènent les orbites en résonance

La période orbitale d'Europa = 24 h,
Période orbitale de Io voisine de 12 h
Toutes les 24h Io passe au plus près d'Europa



Europa en avance sur Io, et l'accélère



Europa en retard sur Io, et le freine

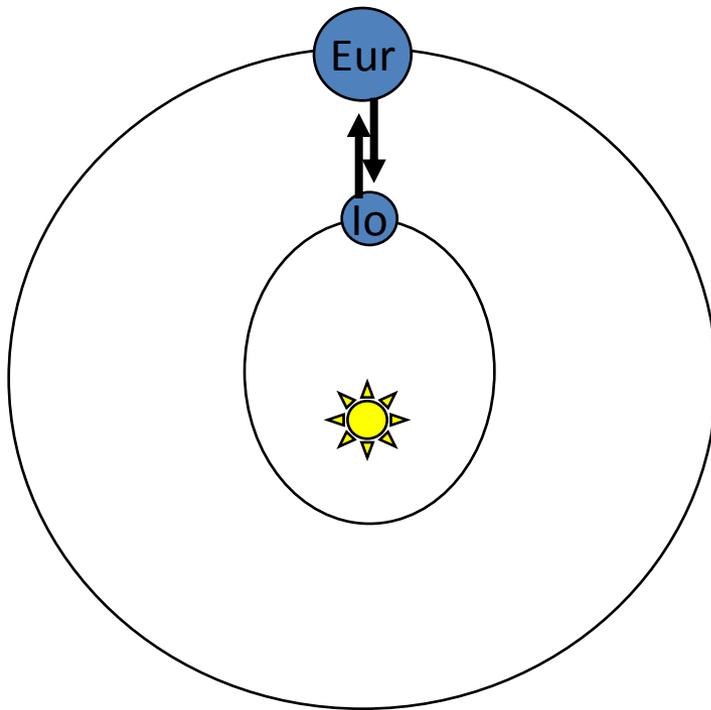
A la longue, les orbites s'ajustent pour atteindre la **résonance exacte 1:2**

Accumulation de petites perturbations → modifier une orbite

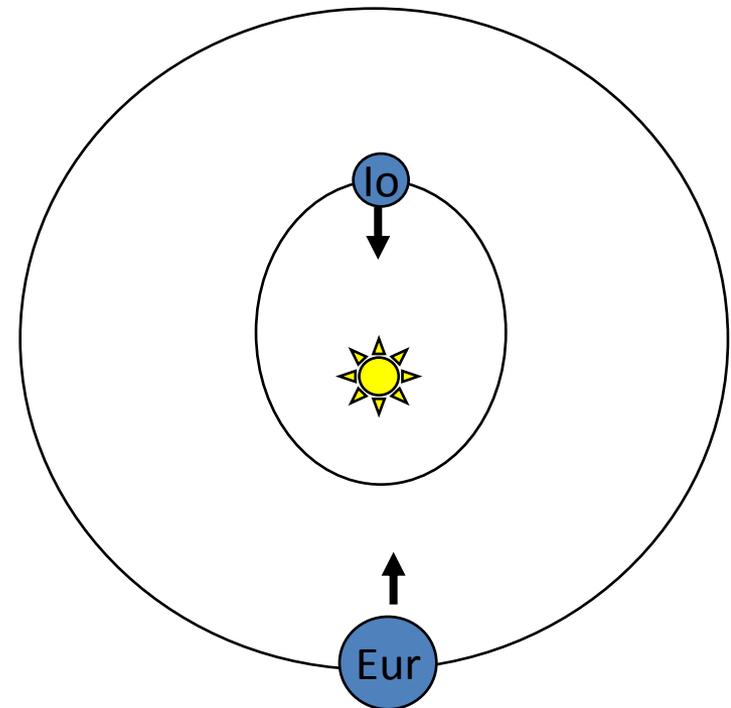
Exemple :

Io et Europa en résonance 1:2

Tous les 2 tours Io passe près d'Europa



Au départ : attraction max



1 tour de Io plus tard : attraction min

A la longue, l'orbite de Io s'allonge

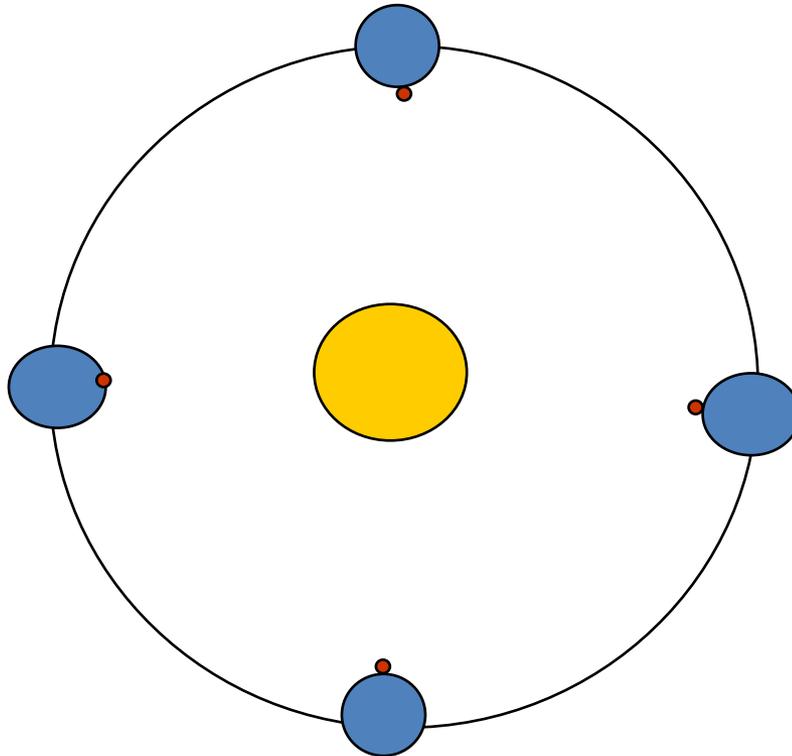
Io, Europa, Ganymède : 3 satellites en « résonance »

	Io	Europa	Ganymède
Les rayons des orbites	a = 1	1,58	2,52
3 ^{eme} loi de Kepler : $T^2 \propto a^3$			
Périodes orbitales T $\propto a^{3/2}$	T = 1	1,98 ~2	4

- Le système Io-Europa se met d'abord en résonance 1:2
- Puis se calle en résonance 1:2:4 avec Ganymède

Io est en « rotation synchrone » avec Jupiter

Présente toujours la même face à Jupiter



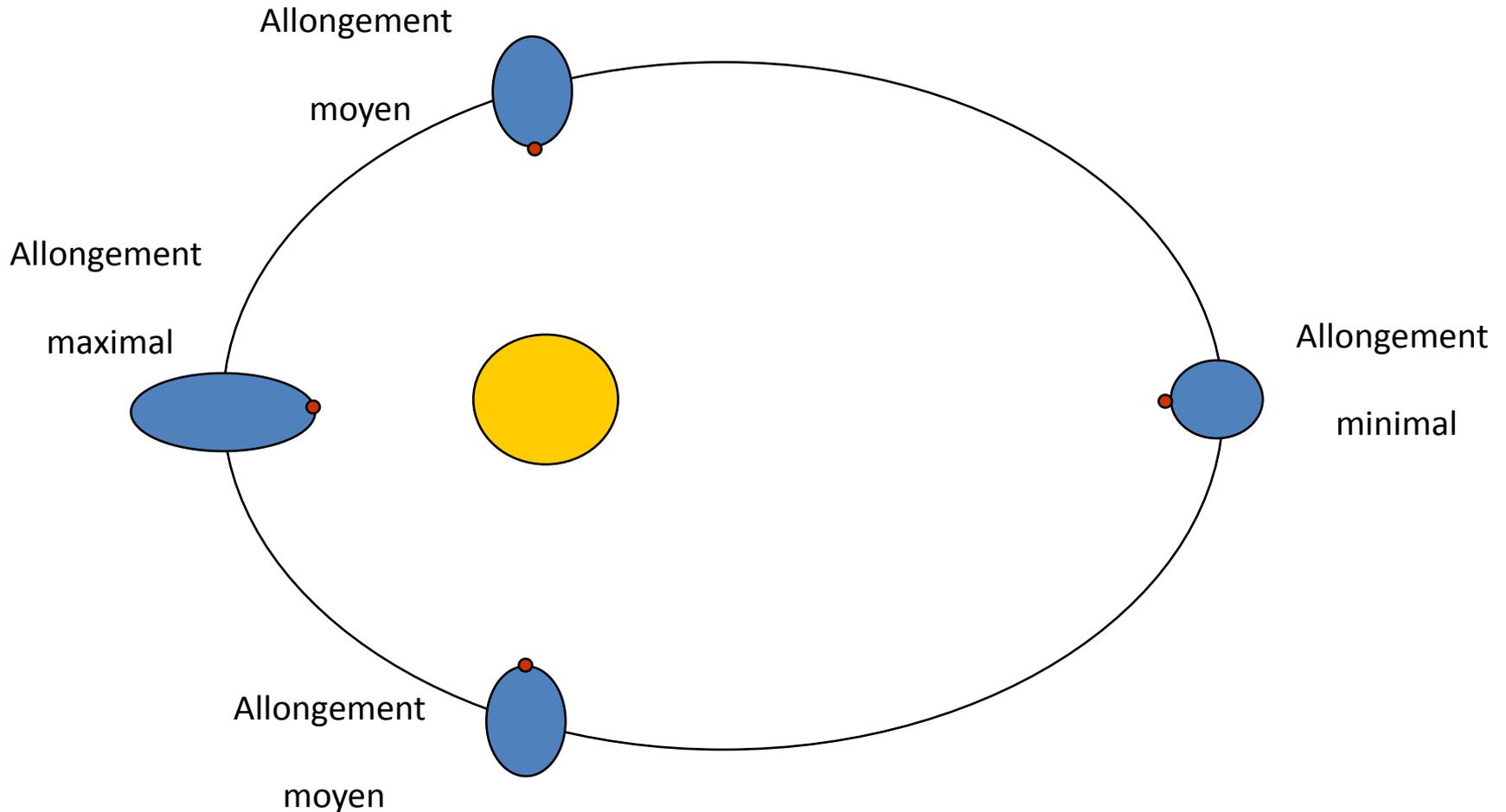
Comme la Lune
Et la Terre

Période de rotation d'un satellite sur lui-même
=
Période orbitale autour de Jupiter

Io et ses volcans

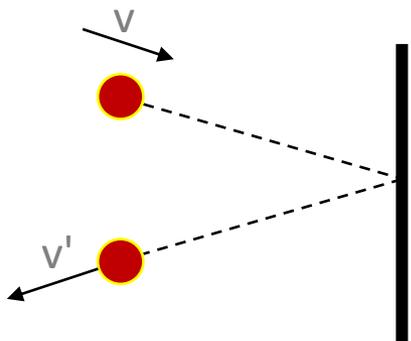
L'orbite de Io est légèrement elliptique → Effet de marée sur la croûte

Amplitude ~ 100 m → Chaleur et volcans



Perturbation d'une orbite lors d'un passage proche

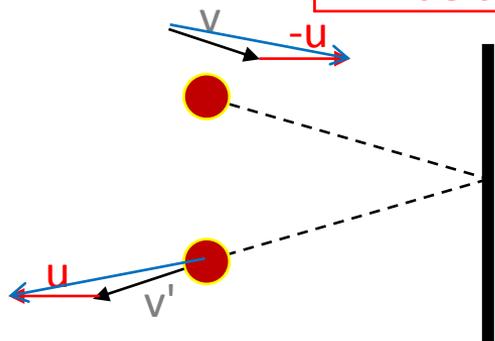
Assistance gravitationnelle



Raquette immobile

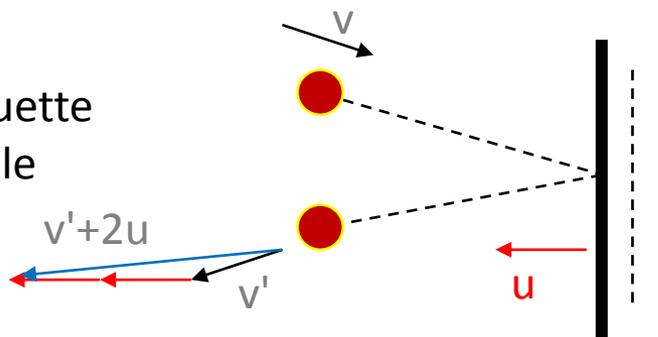
Dans un « rebond élastique » la vitesse change juste de signe

Avec une raquette de tennis



Raquette qui avance sur la balle à la vitesse u
 Pour l'observateur du rebond (fixé sur la raquette) la balle arrive avec la vitesse $V+u$, et repart avec sa vitesse changée de signe $V' = -(V+u)$

L'observateur situé dans la salle (l'arbitre) voit la balle arriver avec la vitesse V , la raquette avancer vers la balle à la vitesse u , et la balle repartir avec la vitesse $V'+2u$

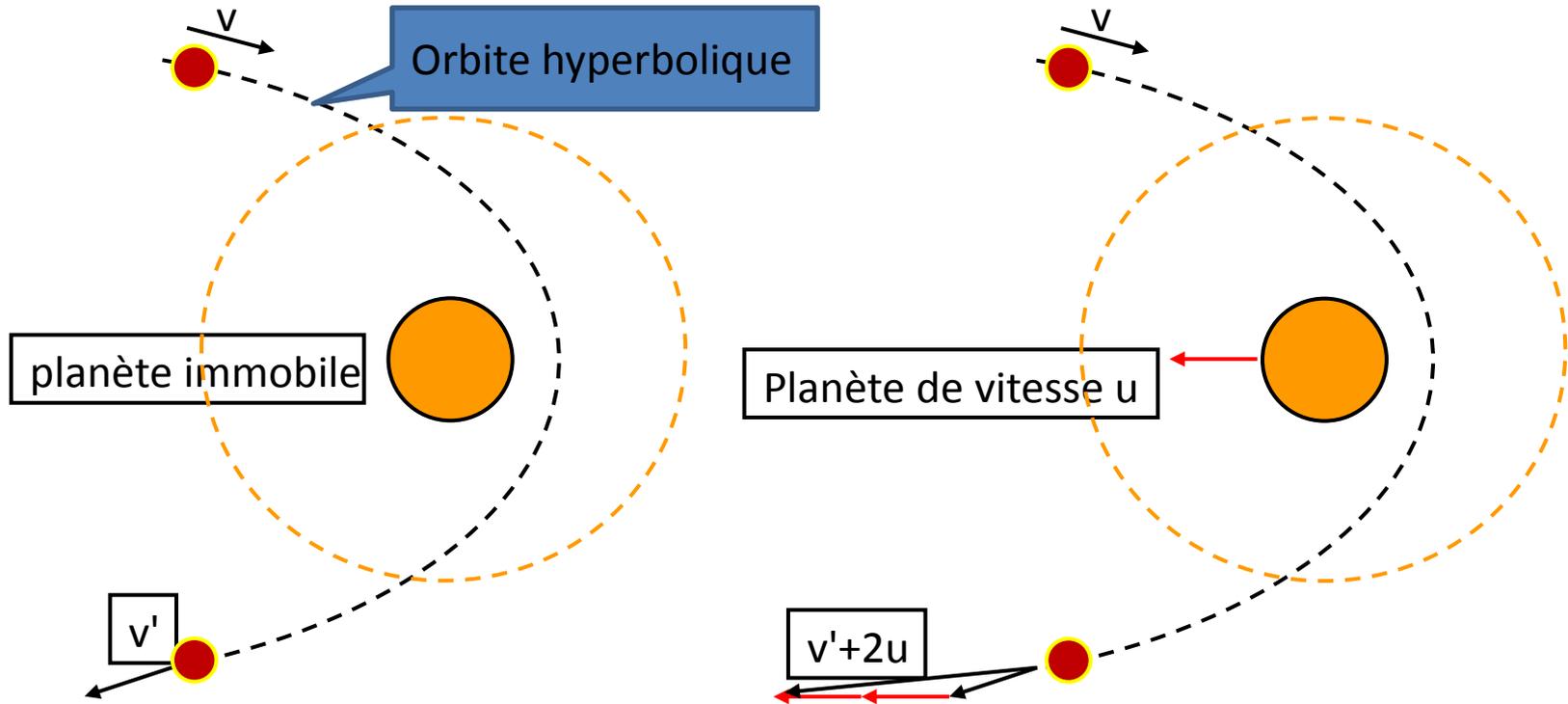


Raquette de vitesse u

NB si $u = -v/2$, la balle est arrêtée

Assistance gravitationnelle

Au passage près d'une planète : C'est (presque !) pareil !



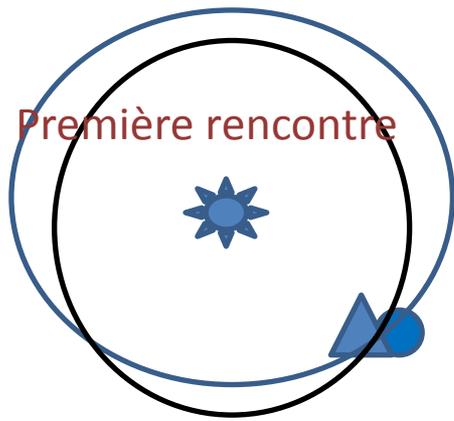
La différence : au lieu d'une collision, on a une orbite képlérienne dans la sphère d'influence gravitationnelle de la planète

Chute d'un astéroïde « stérilisateur »

La Terre et l'astéroïde « Apophis »

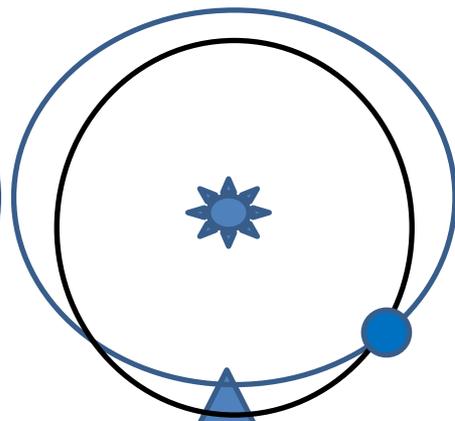
Etablissement hypothétique d'une résonance 7/6 après le passage de 2029 ?

- 6 révolutions d'Apophis $426,125 * 6 = 2557$ jours
- 7 révolutions de la Terre $365,25 * 7 = 2557$ jours

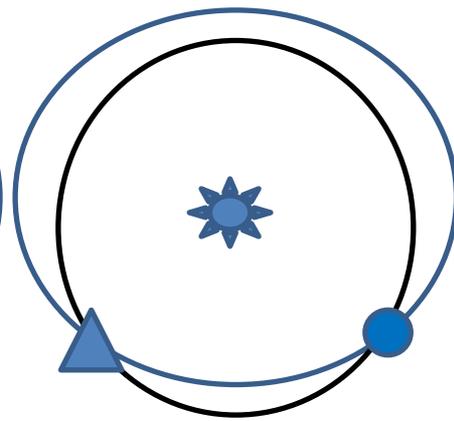


Première rencontre

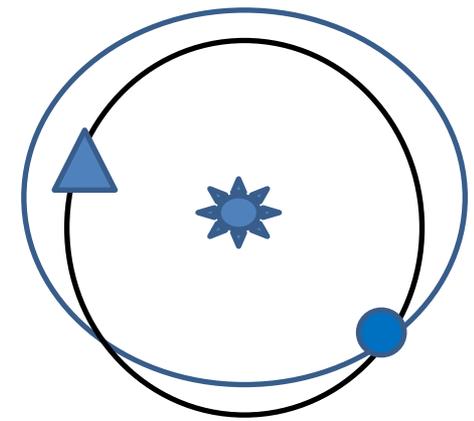
13 avril 2029



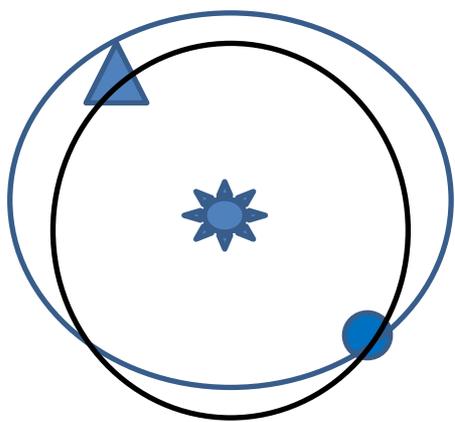
13 avril 2030



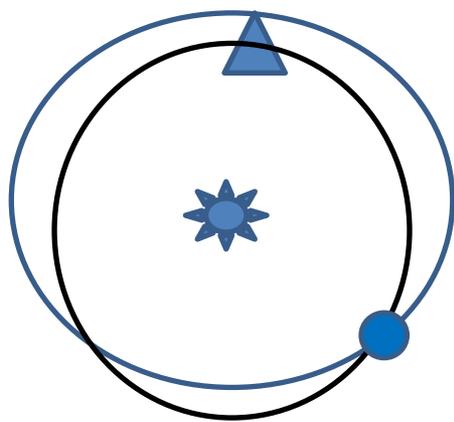
13 avril 2031



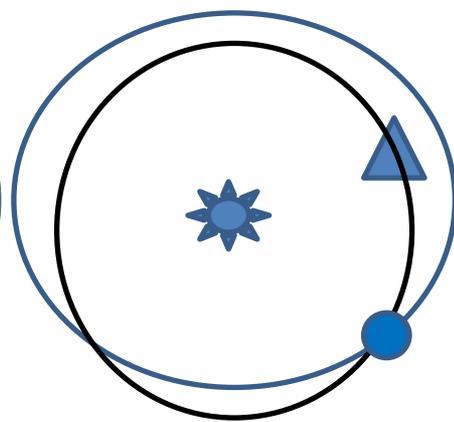
13 avril 2032



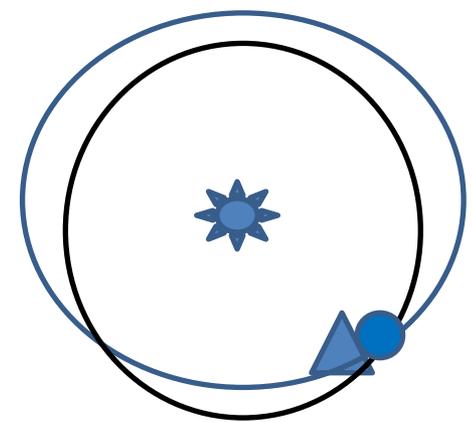
13 avril 2033



13 avril 2034



13 avril 2035



7 ans plus tard

13 avril 2036

Habitabilité

Des ingrédients indispensables :

Source d'énergie disponible : étoile, radioactivité, effets de marée

Eau liquide : combinaison de température et de pression (diagramme de l'eau)

Des facteurs qui peuvent évoluer :

Atmosphère suffisante, donc masse suffisante pour la conserver.

Durée et Stabilité : Système de corps non chaotique (Pb des étoiles doubles)

 Migrations

 Stabilité climatique (axe de rotation)

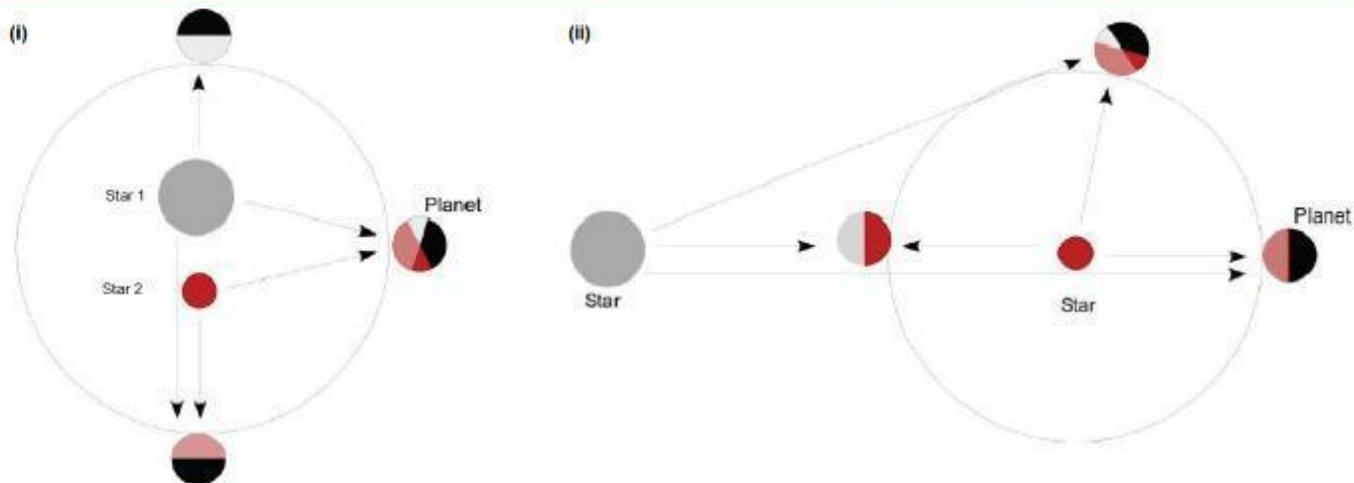
Protection des radiations : bouclier électromagnétique, magmas fluide

Effets de marée : source d'énergie,

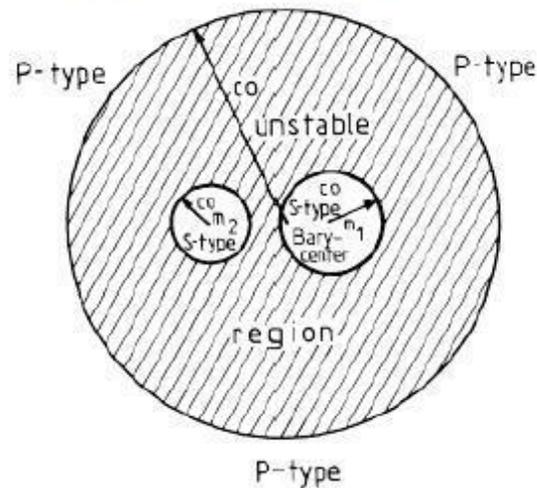
 tendance à la rotation synchrone

 alternance de plages sèches ou inondées

Systemes étoiles binaires: *la majorité des étoiles sont doubles*



Planetary orbits in (i) close binary and (ii) wide binary systems. The shaded regions on the planet represent the area illuminated by each star at different points in the orbit.

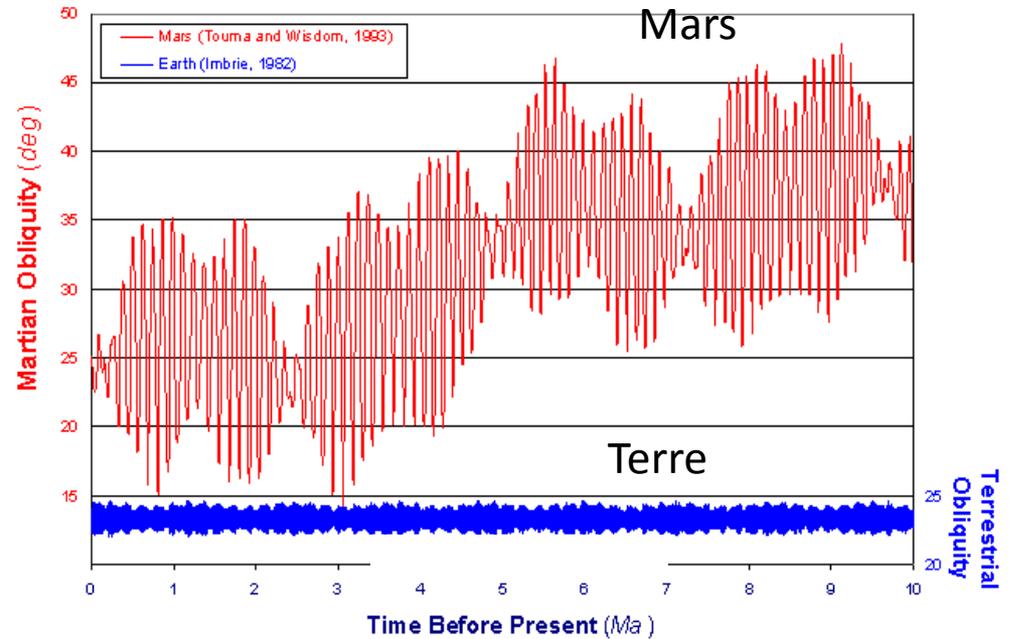
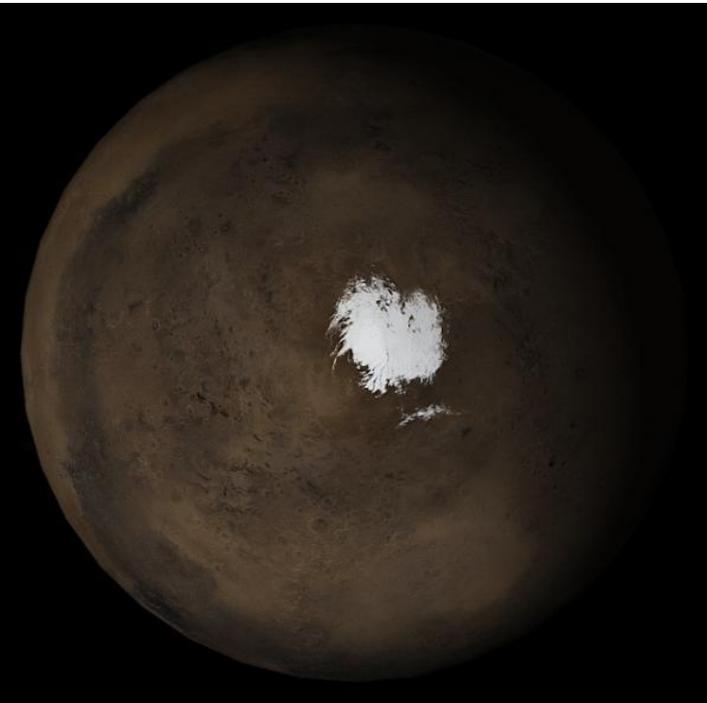


Stabilité
des orbites

Fig. 1. P- and S-type orbits in binaries. This is a schematic picture of stable and unstable regions for the S-type orbits and the P-types in double stars. The radius CO is the stability limit. Around the two primaries there are stable regions for the S-types, farther outside there is the stable region for the P-types

Stabilité du climat ... et obliquité de l'axe des pôles :

Instabilité à long terme de l'obliquité de Mars

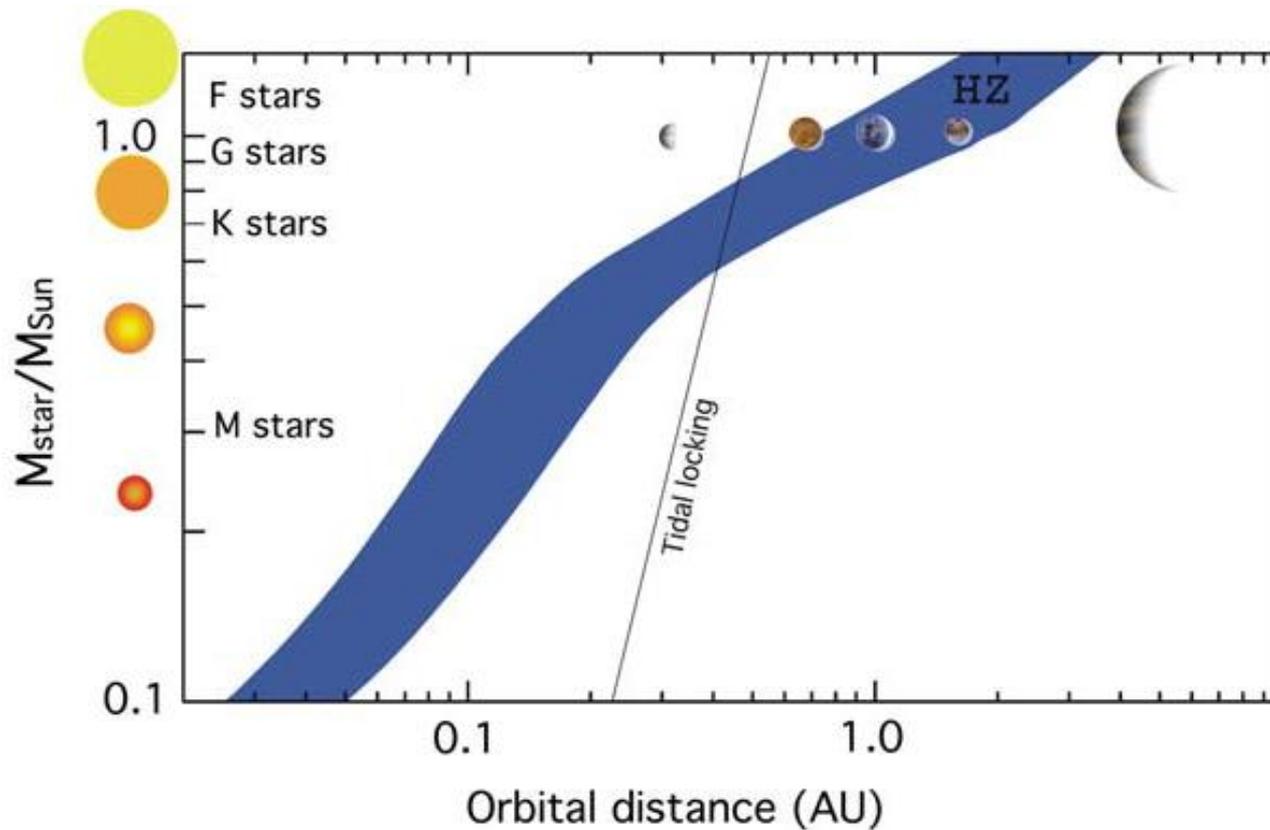


Aujourd'hui

Il y a 10 000 000 ans

4 classes de mondes habitables

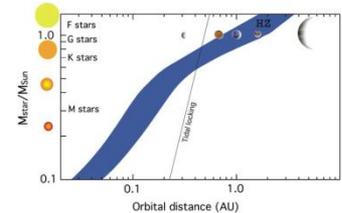
I : Comme la Terre : bien placée dans la zone habitable de l'étoile



4 classes de mondes habitables

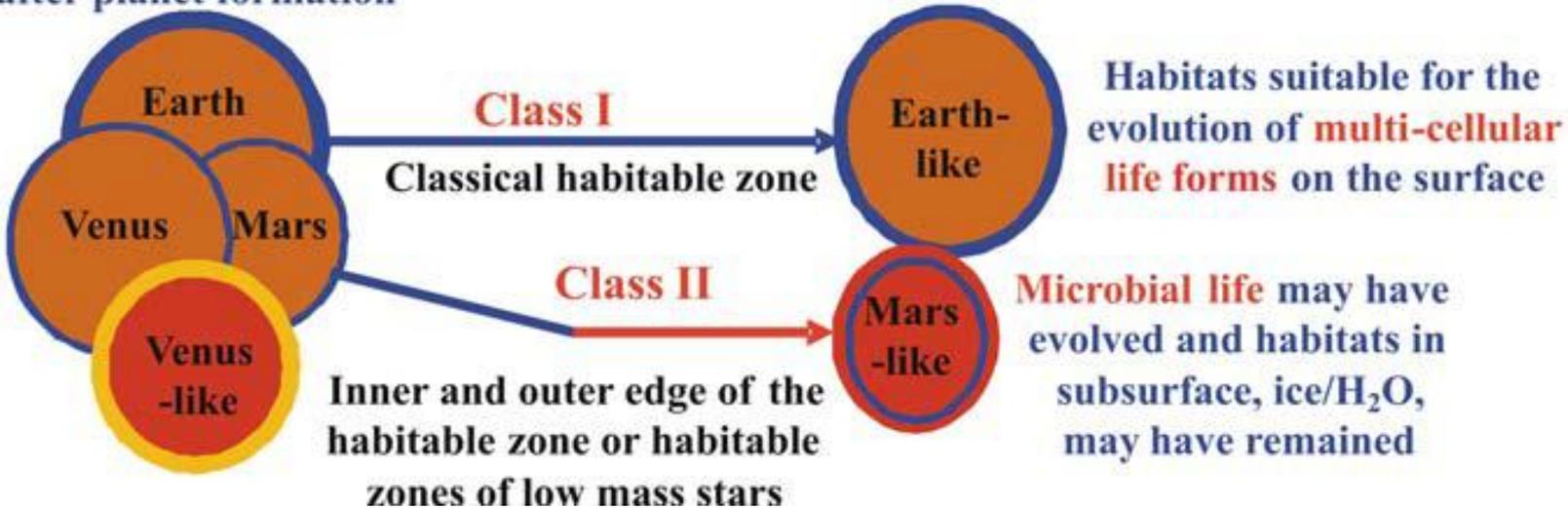
I : Terre : bien placé dans la zone habitable de l'étoile

II : Etaient bien placées, mais ont évolué. Ex : Mars

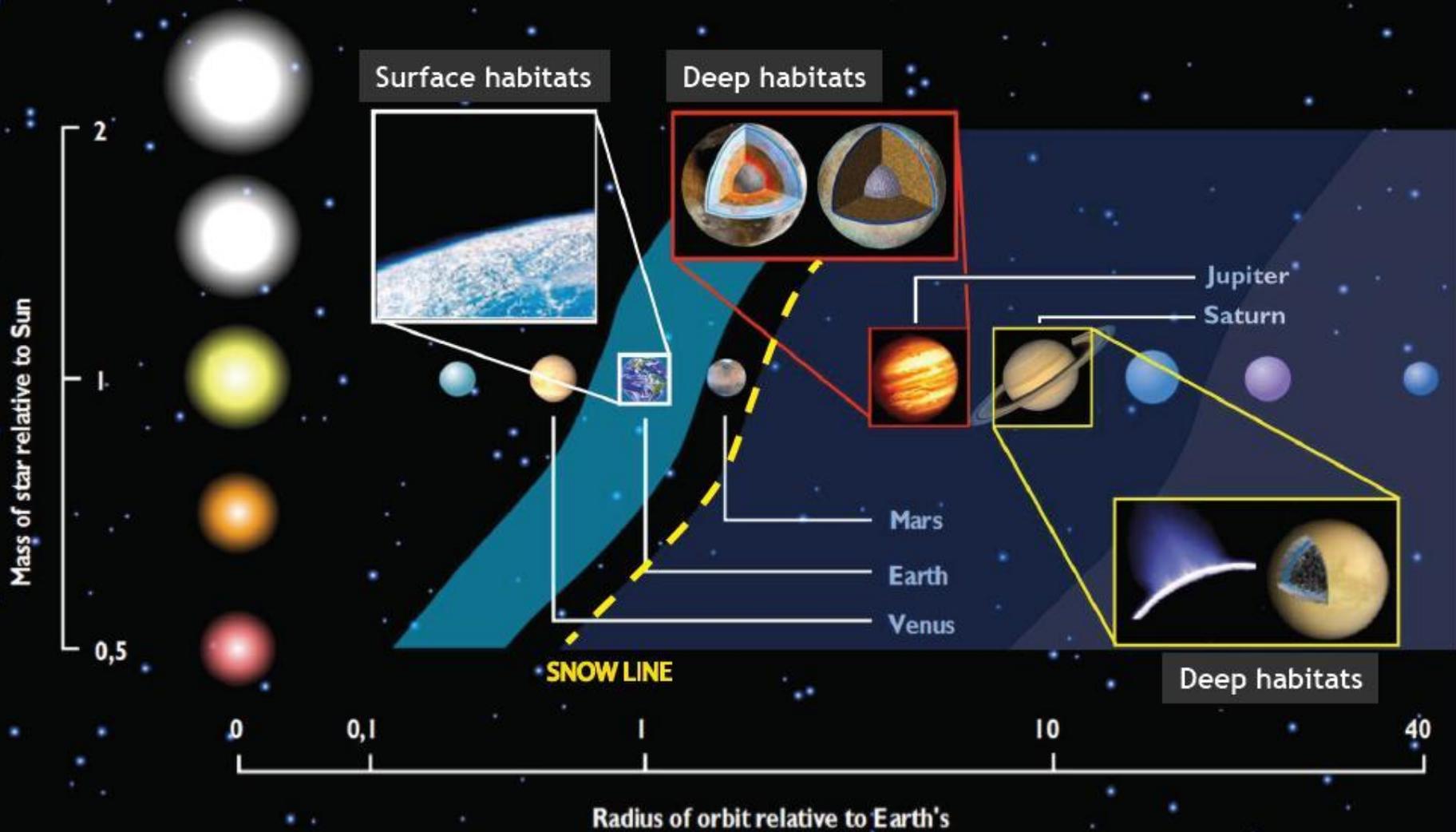


Evolutionary time line

Water-rich bodies
after planet formation



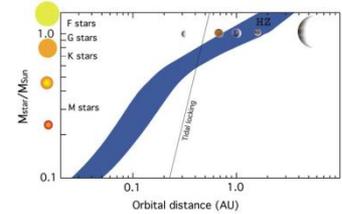
Après les habitats de surface : les habitats profonds des mondes glacés



INTERET CROISSANT POU LES « EXO-MOON »

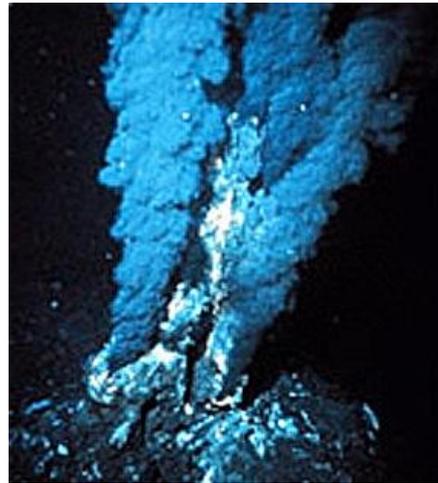
4 classes de mondes habitables

I : Terre : bien placé dans la zone habitable de l'étoile

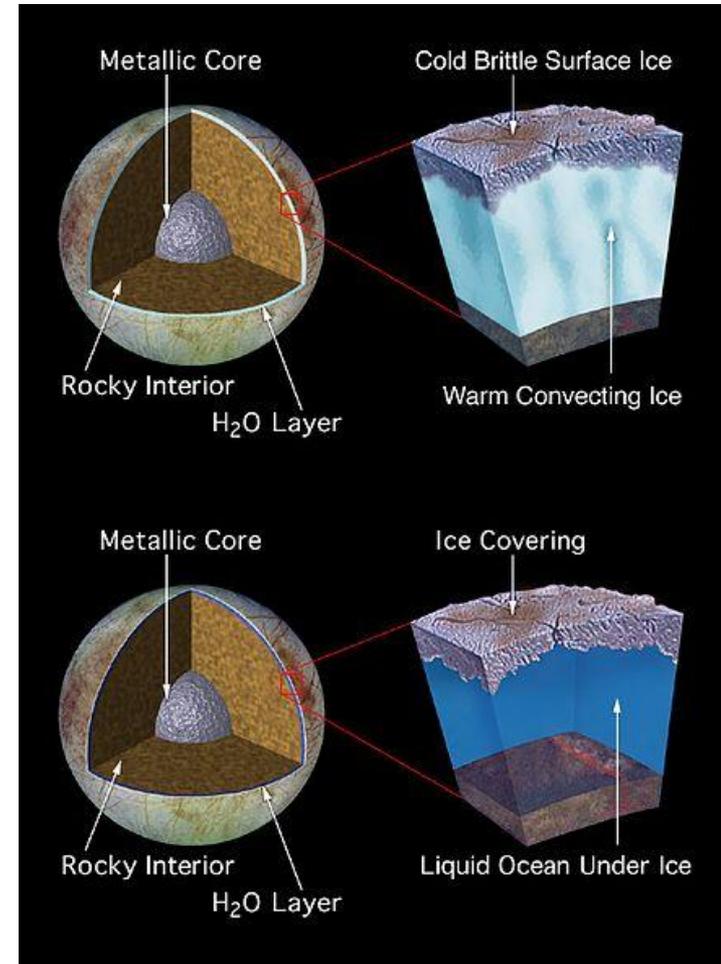
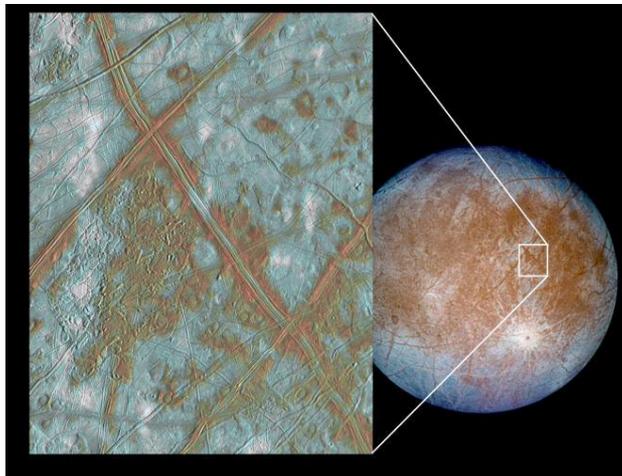


II : Etaient bien placées, mais ont évolué. Ex : Mars

III : Océans de subsurface en contact avec les silicates : Europe
Epaisseur de la couche liquide ?



Source d'énergie



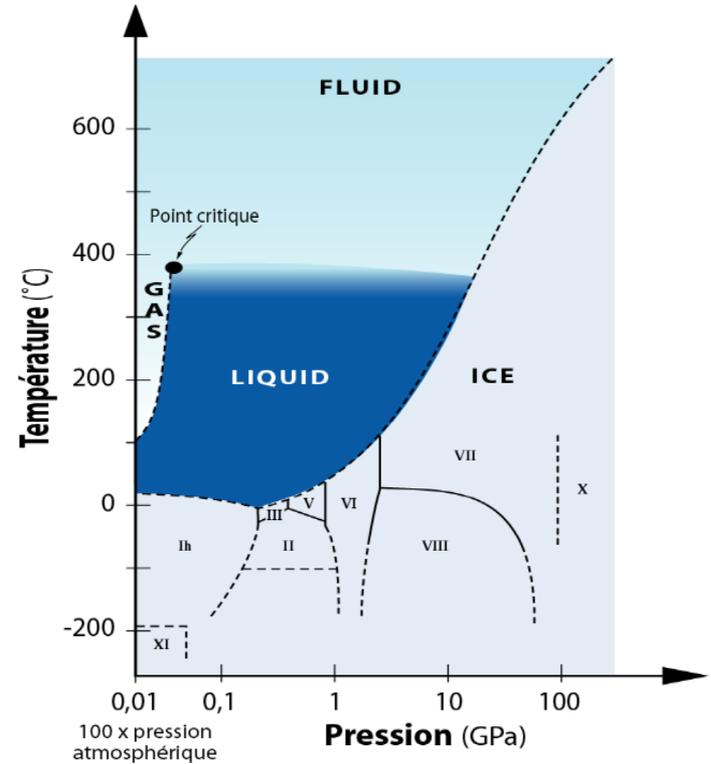
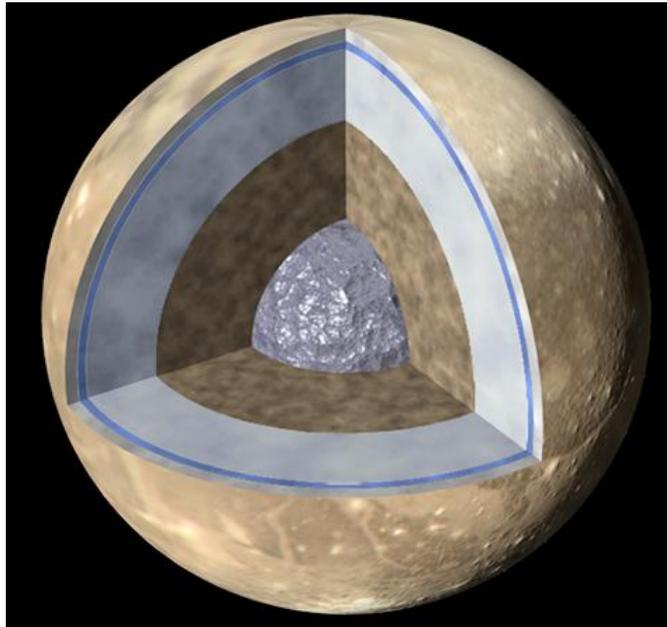
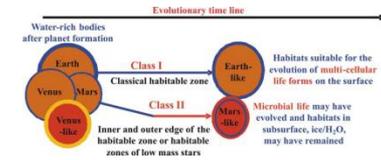
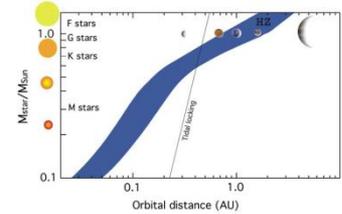
4 classes de mondes habitables

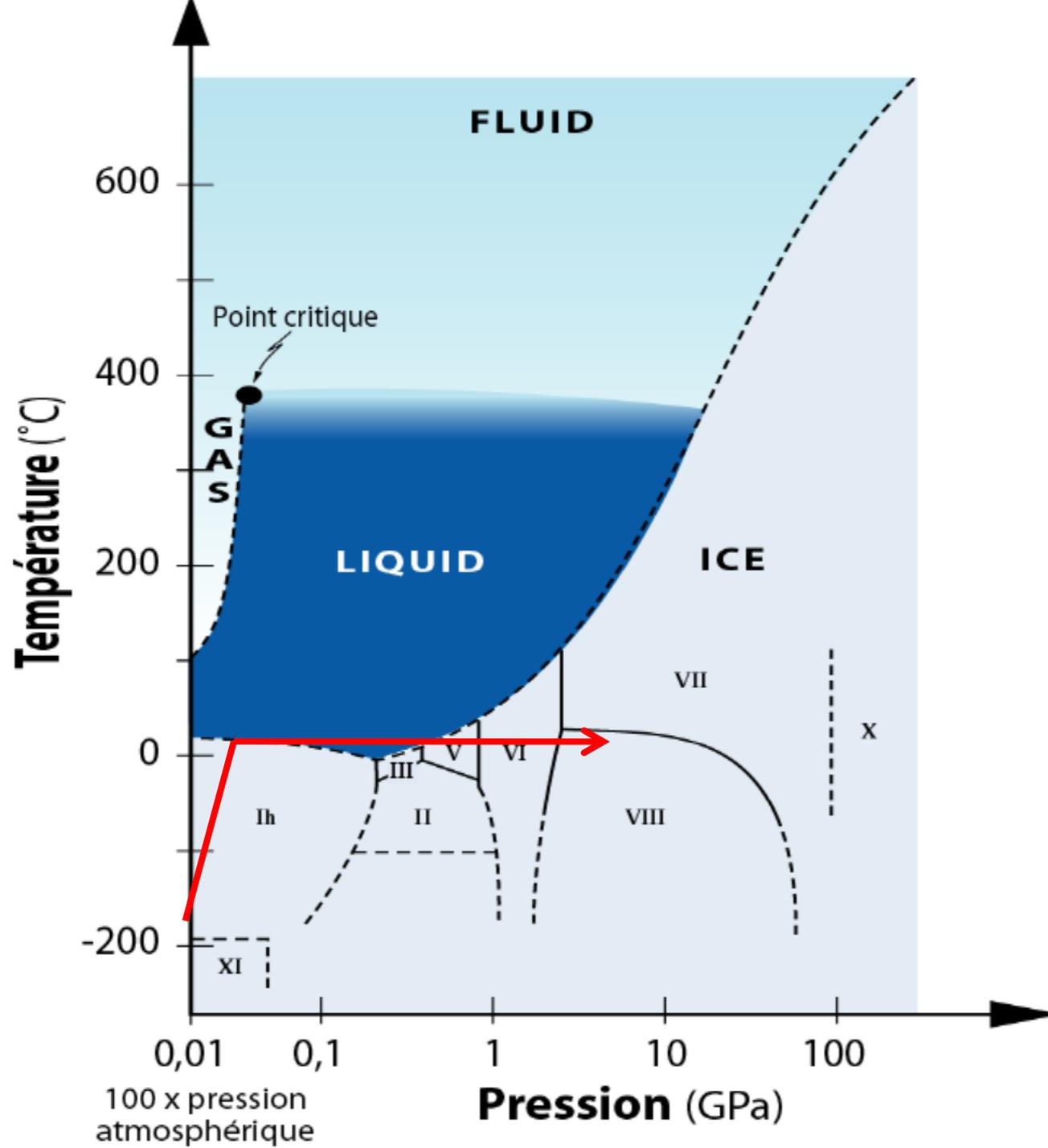
I : Terre : bien placé dans la zone habitable de l'étoile

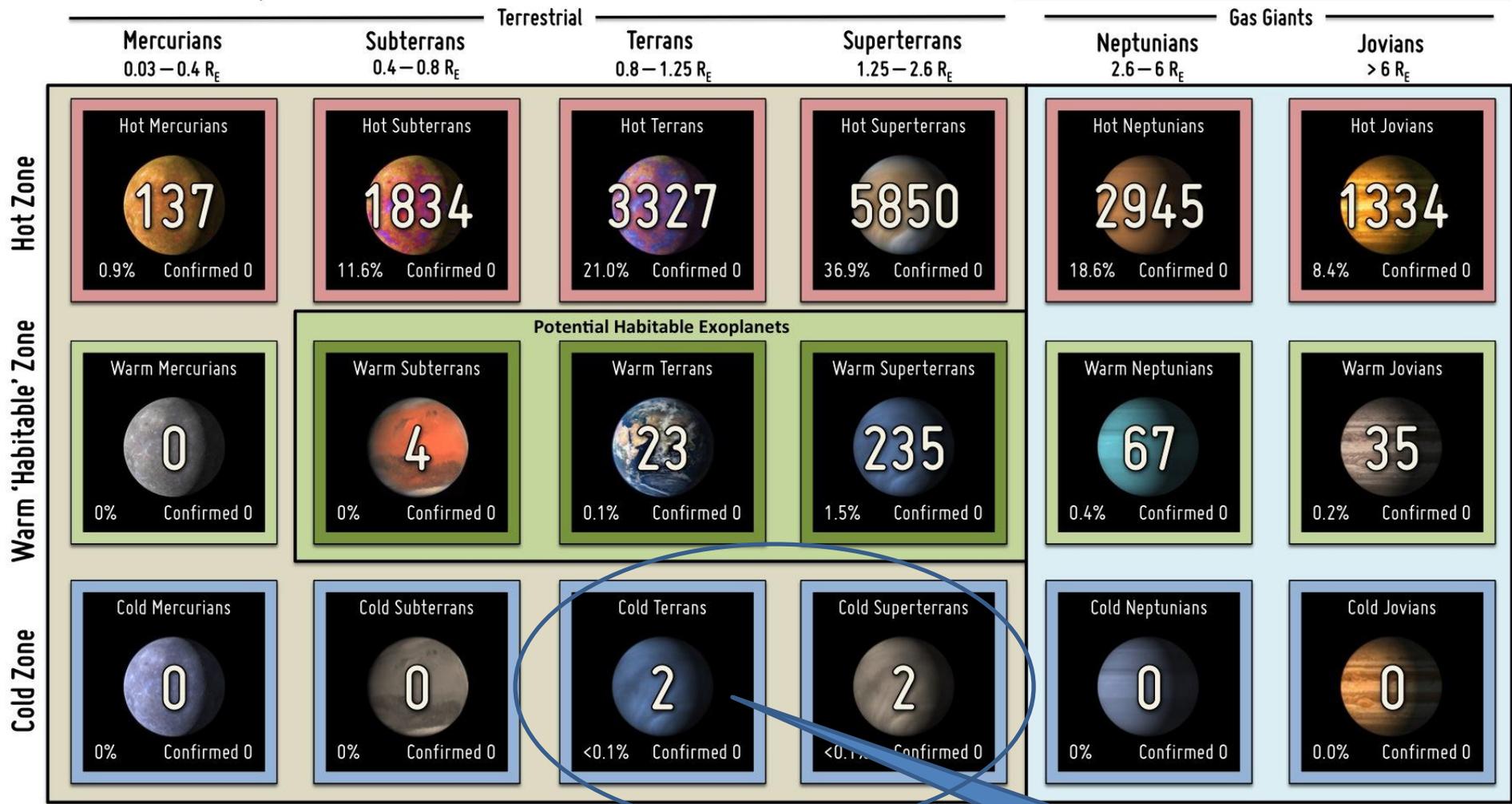
II : Etaient bien placées, mais ont évolué. Ex : Mars

III : Océans de subsurface
en contact avec les silicates : Europe
Epaisseur de la couche liquide ?

IV Classe IV : océans de subsurface
sans contact avec les silicates : Ganymède







*there are stellar system with more than 6 planets that are not listed here

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Jan 2013

Kepler : plus de 3 transits

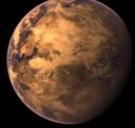
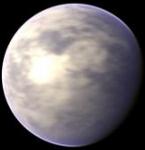
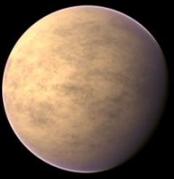
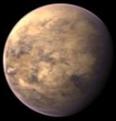
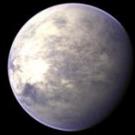
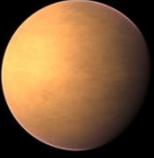
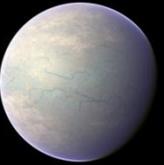
Biais : les plus grosses, les plus proches de l'étoile

Pourraient être très abondantes

Current Potential Habitable Exoplanets

Compared with Earth and Mars and Ranked in Order of Similarity to Earth

ESI	
1.00	0.66
	
Earth	Mars

#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9
Earth Similarity Index (ESI)								
0.92	0.85	0.81	0.79	0.77	0.77	0.72	0.72	0.71
								
Gliese 581 g*	Gliese 667C c	Kepler-22 b	HD 40307 g*	HD 85512 b	Tau Ceti e*	Gliese 163 c	Gliese 581 d	Tau Ceti f*
Discovery Date								
Sep 2010	Nov 2011	Dec 2011	Nov 2012	Sep 2011	Dec 2012	Sep 2012	Apr 2007	Dec 2012

*planet candidates

CREDIT: PHL @ UPR Arcibo (phl.upr.edu) Dec 19, 2012

