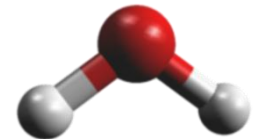


# Histoire d'eau et de poussière

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

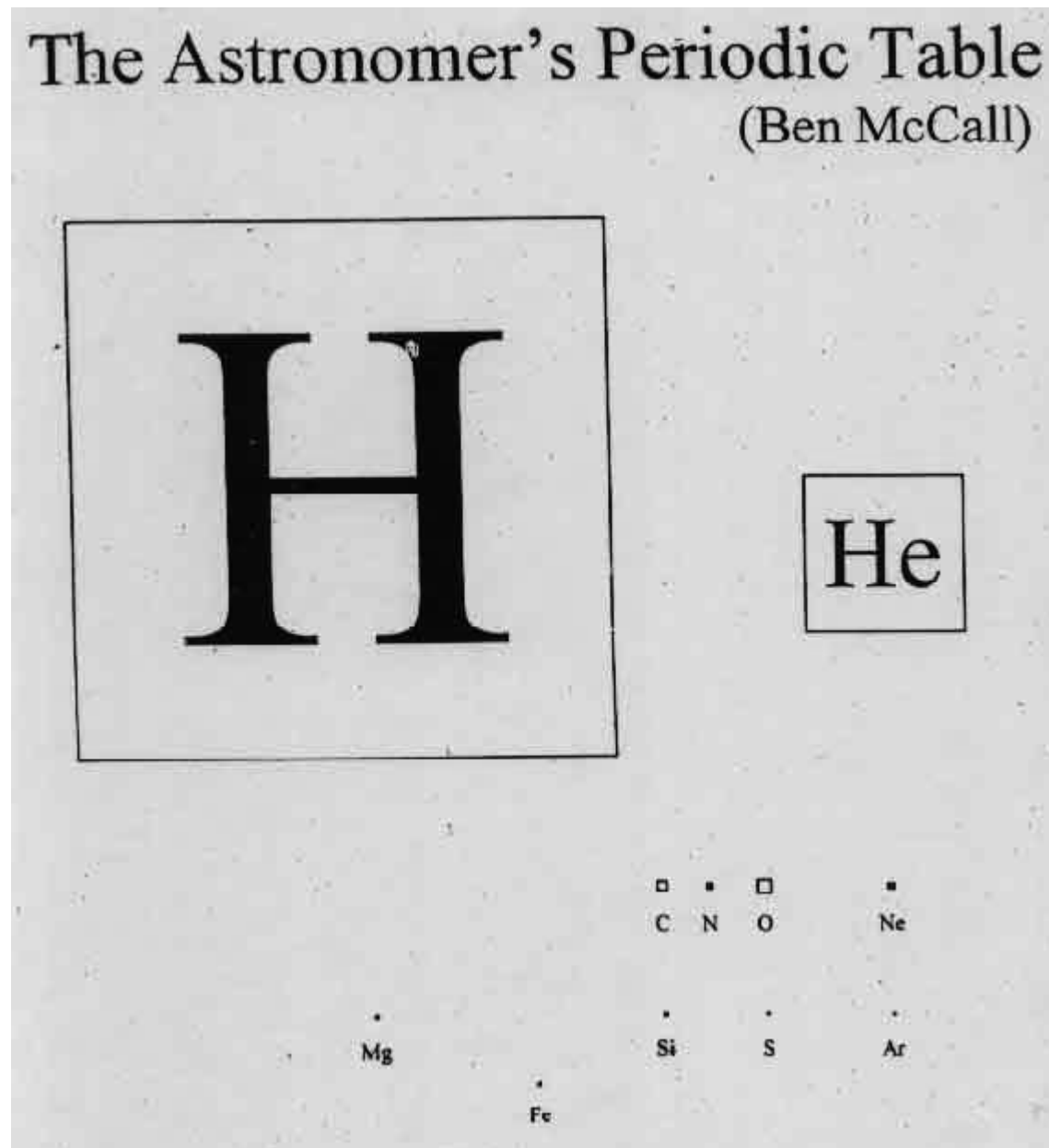
François Sibille – janvier 2013



# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS CHIMIQUES

1	IA																18	VIIIA																		
1	1,00794																2	4,0026																		
1	H																	He																		
	Hydrogène																	Hélium																		
2	IIA		14 IVA										13 IIIA				14 IVA		15 VA		16 VIA		17 VIIA													
3	6,941	4	9,01218	6 12,0107										5	10,811	6	12,0107	7	14,0067	8	15,9994	9	18,9984	10	20,1797											
2	Li	Be	C										B	C	N	O	F	Ne																		
	Lithium	Béryllium	SYMBOLE : C NOM DE L'ÉLÉMENT : CARBONE NUMÉRO ATOMIQUE : 6 MASSE ATOMIQUE : 12,0107 GROUPE : 14 (IUPAC) - IVA (CAS) PÉRIODE : 2										Bore	Carbone	Azote	Oxygène	Fluor	Neon																		
11	22,9898	12	24,305											13	26,9815	14	28,0855	15	30,9738	16	32,065	17	35,453	18	39,948											
3	Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar																		
	Sodium	Magnésium											Aluminium	Silicium	Phosphore	Soufre	Chlore	Argon																		
4	K		Ca		Sc		Ti		V		Cr		Mn		Fe		Co		Ni		Cu		Zn		Ga		Ge		As		Se		Br		Kr	
19	39,0983	20	40,078	21	44,9559	22	47,867	23	50,9415	24	51,9961	25	54,9380	26	55,845	27	58,9332	28	58,6934	29	63,546	30	65,38	31	69,723	32	72,63	33	74,9216	34	78,96	35	79,904	36	83,798	
4	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																		
5	Rb		Sr		Y		Zr		Nb		Mo		Tc		Ru		Rh		Pd		Ag		Cd		In		Sn		Sb		Te		I		Xe	
37	85,4678	38	87,62	39	88,9058	40	91,224	41	92,9064	42	95,96	43	(98)	44	101,07	45	102,905	46	106,42	47	107,868	48	112,411	49	114,818	50	118,71	51	121,76	52	127,6	53	126,905	54	131,293	
5	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																		
6	Cs		Ba		Hf		Ta		W		Re		Os		Ir		Pt		Au		Hg		Tl		Pb		Bi		Po		At		Rn			
55	132,905	56	137,327	72	178,49	73	180,948	74	183,84	75	186,207	76	190,23	77	192,217	78	195,084	79	196,967	80	200,59	81	204,383	82	207,2	83	208,98	84	(209)	85	(210)	86	(222)			
6	Cs	Ba	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn																			
	Césium	Baryum	Hafnium	Tantale	Tungstène	Rhénium	Osmium	Iridium	Platine	Or	Mercure	Thallium	Plomb	Bismuth	Polonium	Astato	Radon																			
7	Fr		Ra		Rf		Db		Sg		Bh		Hs		Mt		Ds		Rg		Cn		Uut		Fl		Uup		Lv		Uus		Uuo			
87	(223)	88	(226)	104	(266)	105	(268)	106	(269)	107	(270)	108	(269)	109	(278)	110	(279)	111	(281)	112	(285)	113	(284)	114	(289)	115	(288)	116	(293)	117	(294)	118	(294)			
7	Fr	Ra	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn	Uut	Fl	Uup	Lv	Uus	Uuo																			
	Francium	Radium	Rutherfordium	Dubnium	Seaborgium	Böhmium	Hassium	Moscovium	Darmstadtium	Röntgenium	Copernicium	Ununtrium	Flerovium	Ununpentium	Livermorium	Ununseptium	Ununoctium																			
6	La		Ce		Pr		Nd		Pm		Sm		Eu		Gd		Tb		Dy		Ho		Er		Tm		Yb		Lu							
57	138,906	58	140,116	59	140,908	60	144,242	61	(145)	62	150,36	63	151,964	64	157,25	65	158,925	66	162,5	67	164,930	68	167,259	69	168,934	70	173,054	71	174,967							
6	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu																					
	Lanthane	Cerium	Praséodyme	Néodyme	Prométhium	Samarium	Europium	Gadolinium	Terbium	Dysprosium	Holmium	Erbium	Thulium	Ytterbium	Lutécium																					
7	Ac		Th		Pa		U		Np		Pu		Am		Cm		Bk		Cf		Es		Fm		Md		No		Lr							
89	(227)	90	232,038	91	231,036	92	238,029	93	(237)	94	(244)	95	(243)	96	(247)	97	(247)	98	(251)	99	(252)	100	(257)	101	(258)	102	(259)	103	(262)							
7	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	Nobelium	Lavrencium																					

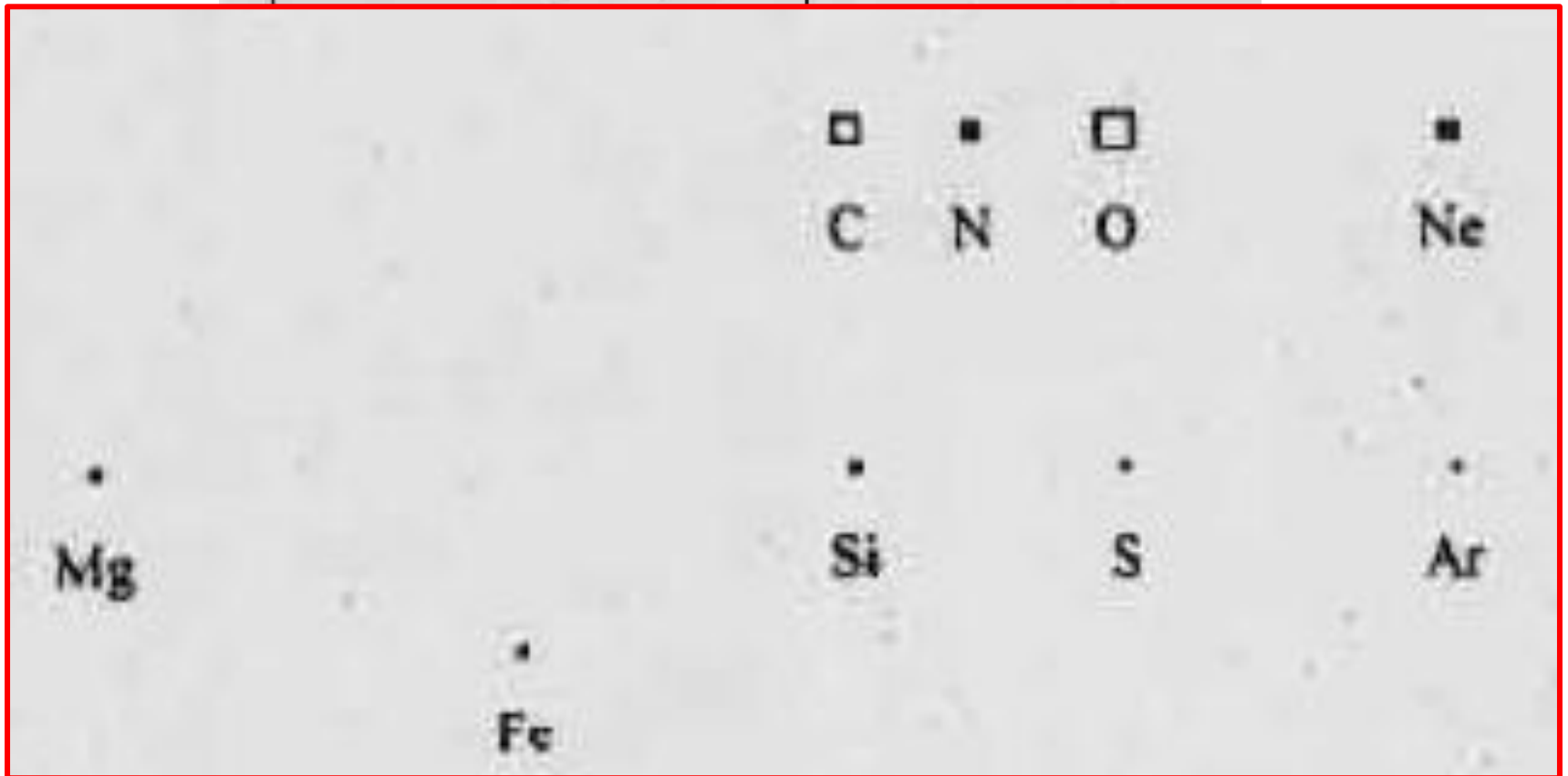
... Et après quelques dizaines de millions d'années



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

# The Astronomer's Periodic Table

(Ben McCall)



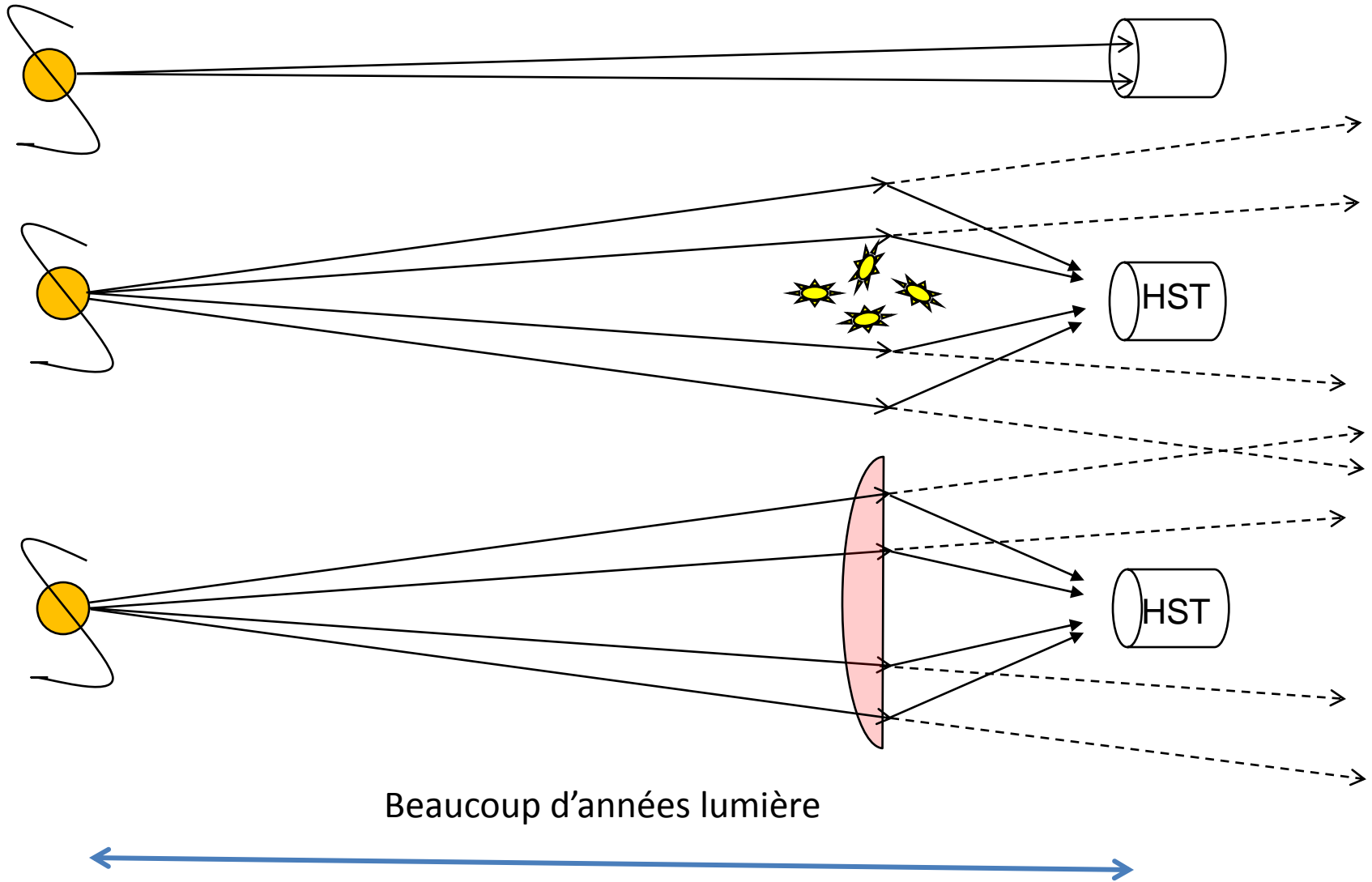
Avec ça on va commencer à pouvoir faire de l'eau

Et même des tas de molécules

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

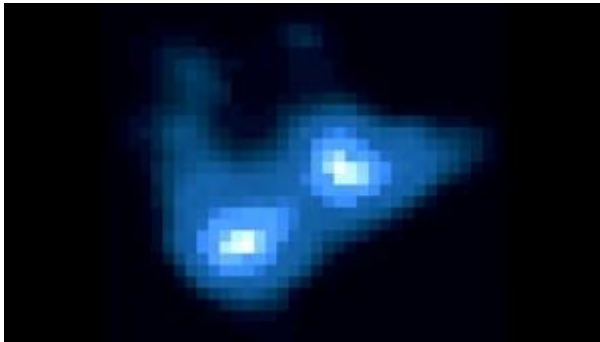
Un cadeau de la nature

# Mirage gravitationnel : un télescope géant, naturel et gratuit

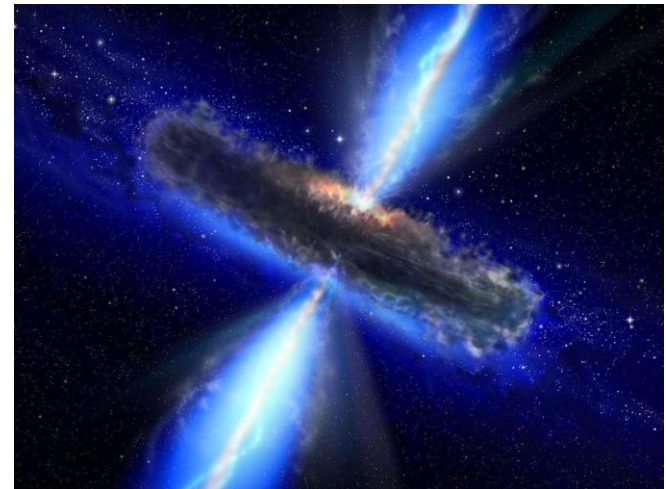


Un « quasar » très humide : APM 08279+5255

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 / cm<sup>3</sup>

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

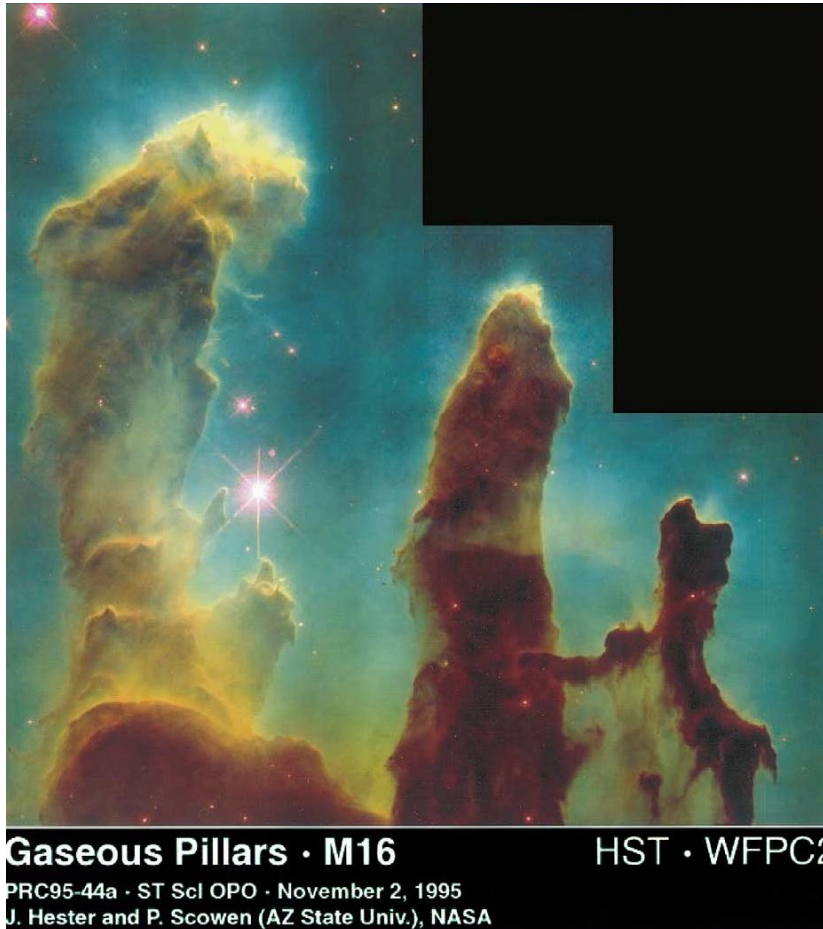


50% de la masse d'une galaxie

Mais **trop dilué pour former des molécules**

Très inhomogène

# LE MILIEU INTERSTELLAIRE Dense



1000 à 10 000 atomes/cm<sup>3</sup>

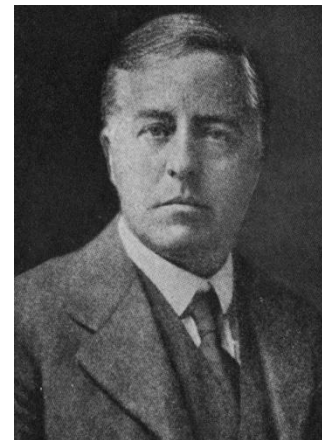
Rassemblement par la gravité

« Nuages »

10- 100 Années lumière

10 000-100 000 Masse du Soleil

## Equilibre hydrostatique



Sir James Hopwood  
JEANS(1877 -1946)

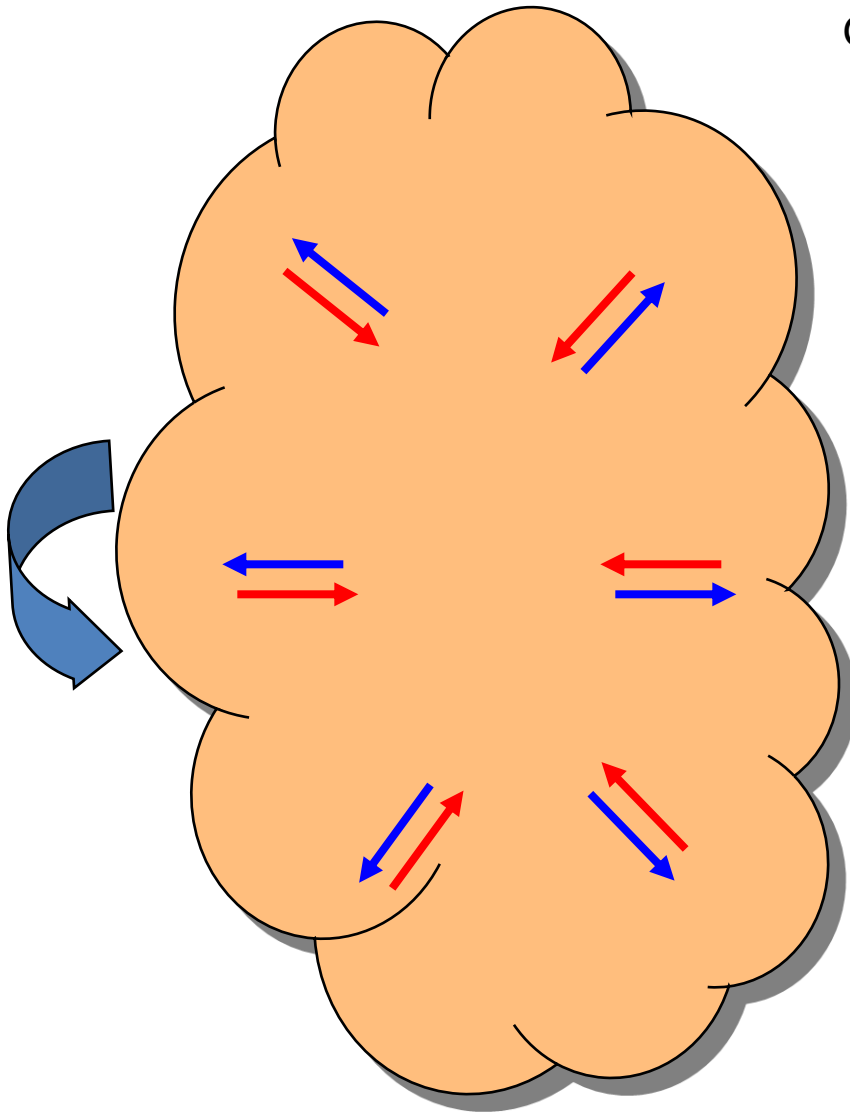
Ne pas confondre ! ce n'est pas un cumulus



# Nuage moléculaire : équilibre hydrostatique

Pression du gaz (flèche bleue vers l'extérieur)

Gravité (flèche rouge vers le centre)



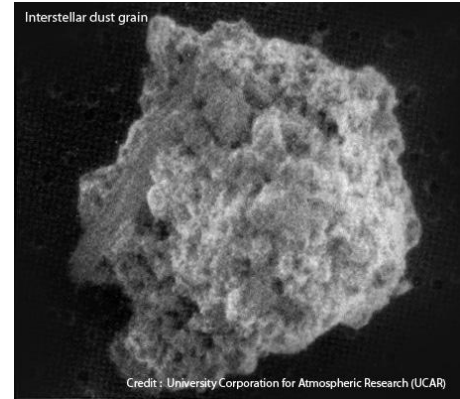
C'est en 3D ce qui se passe en 1D  
dans l'atmosphère de la Terre :

La pression atmosphérique équilibre la gravité

# Et la poussière !

Petits grains :  $\sim 1$  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

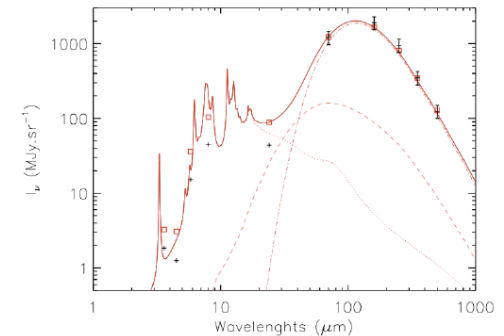
# Rôles de la poussière

## Rougisement :

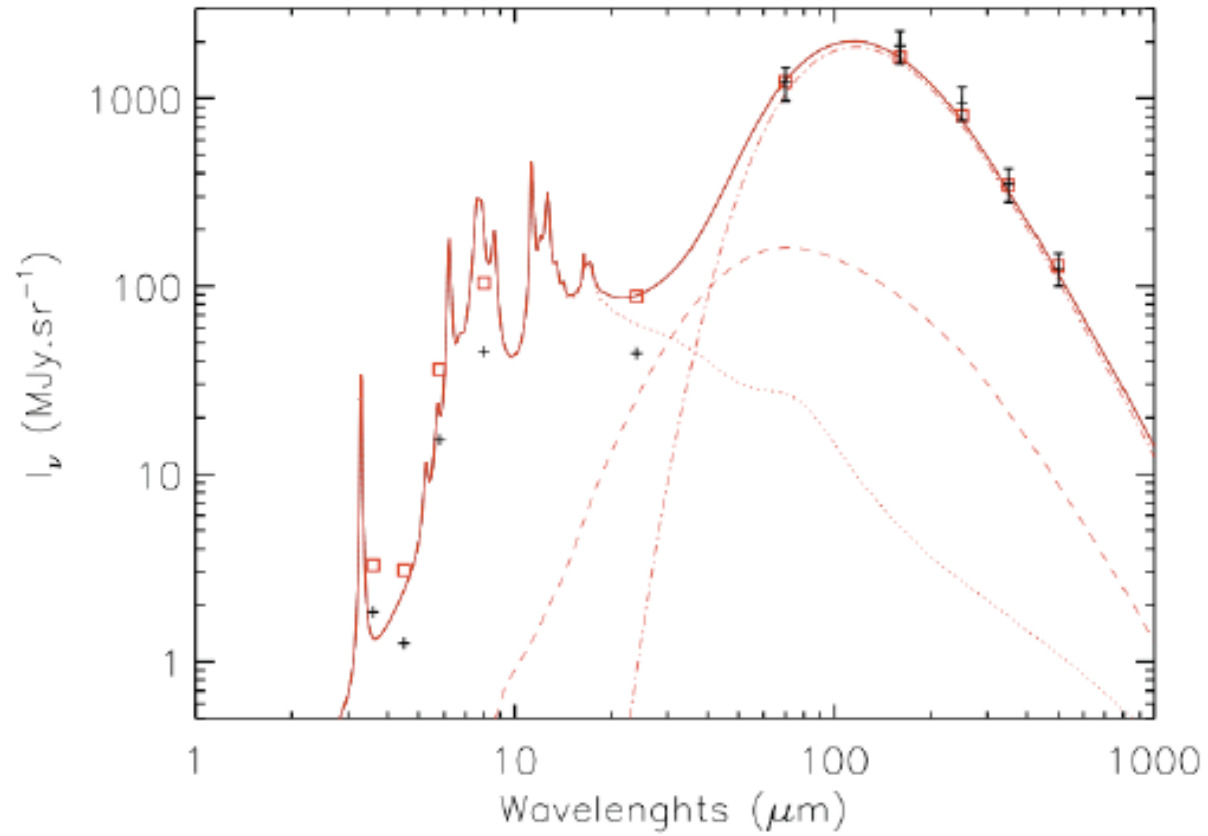
- Absorbe plus le bleu que le rouge
- Transparent à l'infrarouge

## Refroidissement :

- Spontané par émission de photons infrarouges

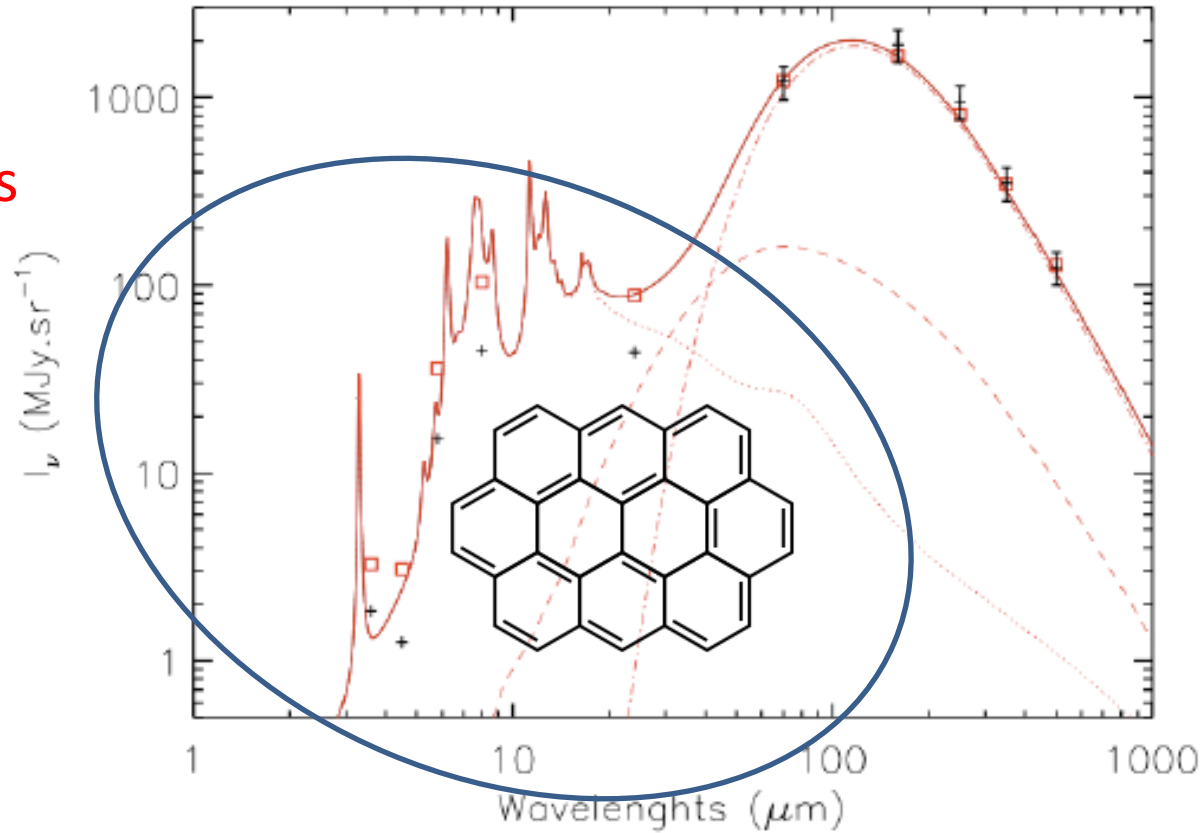


# Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge



# Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

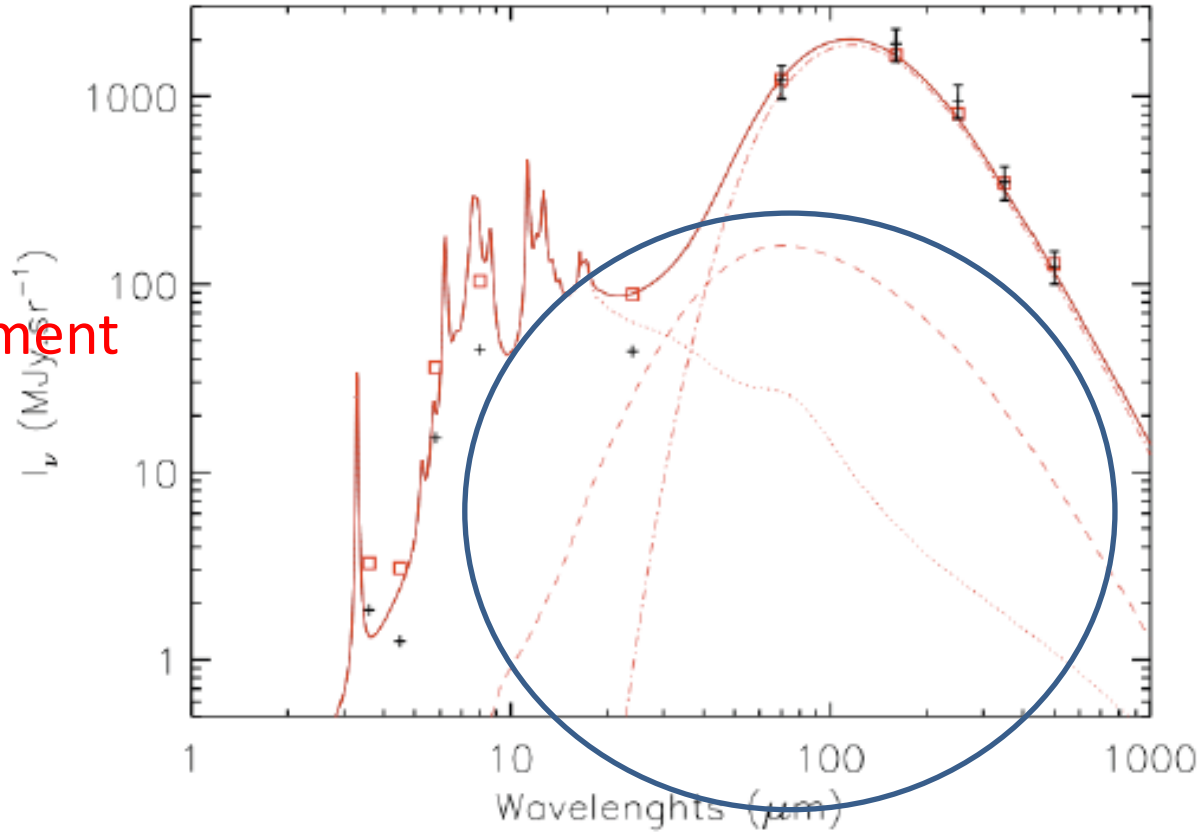
PAH  
100 atomes



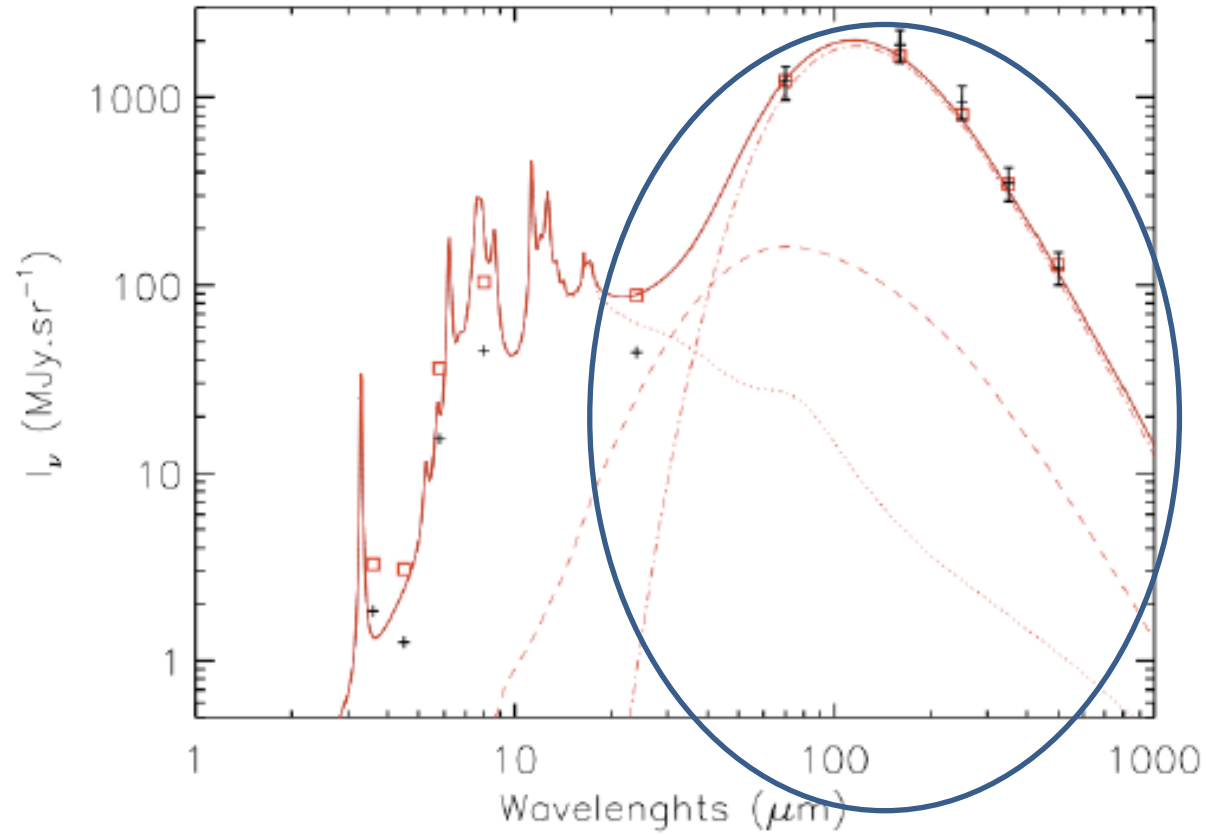


# Rayonnement de la poussière dans l'infrarouge

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

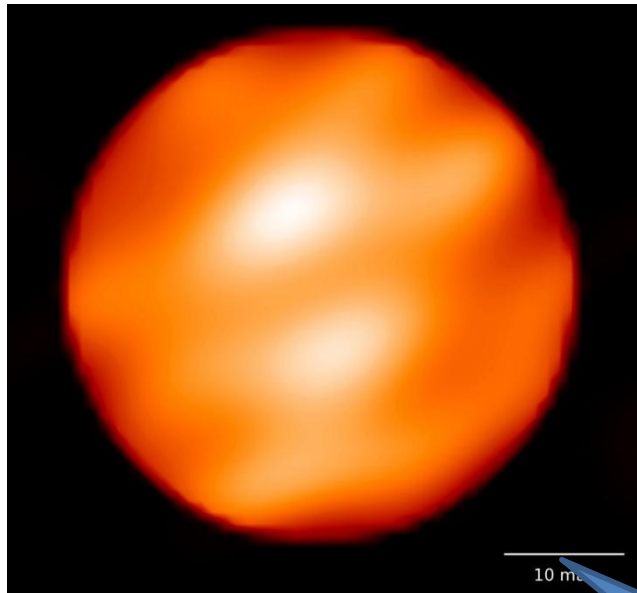


image : Xavier Haubois (Observatoire de Paris) et al.

Première historique

Première image du disque

D'une étoile autre que le Soleil

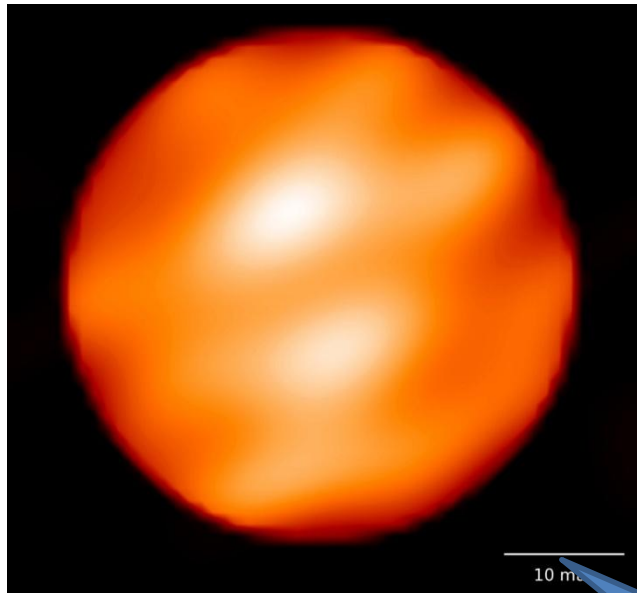
2 cm à 200 km

# D'où vient la poussière ?

## Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace

Bételgeuse  
( $\alpha$  Orionis)

Image du disque  
Par interférométrie au VLT



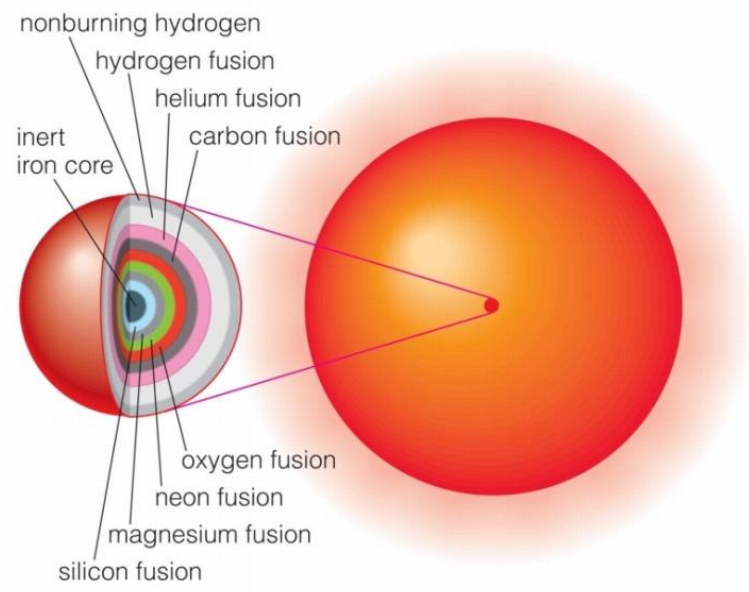
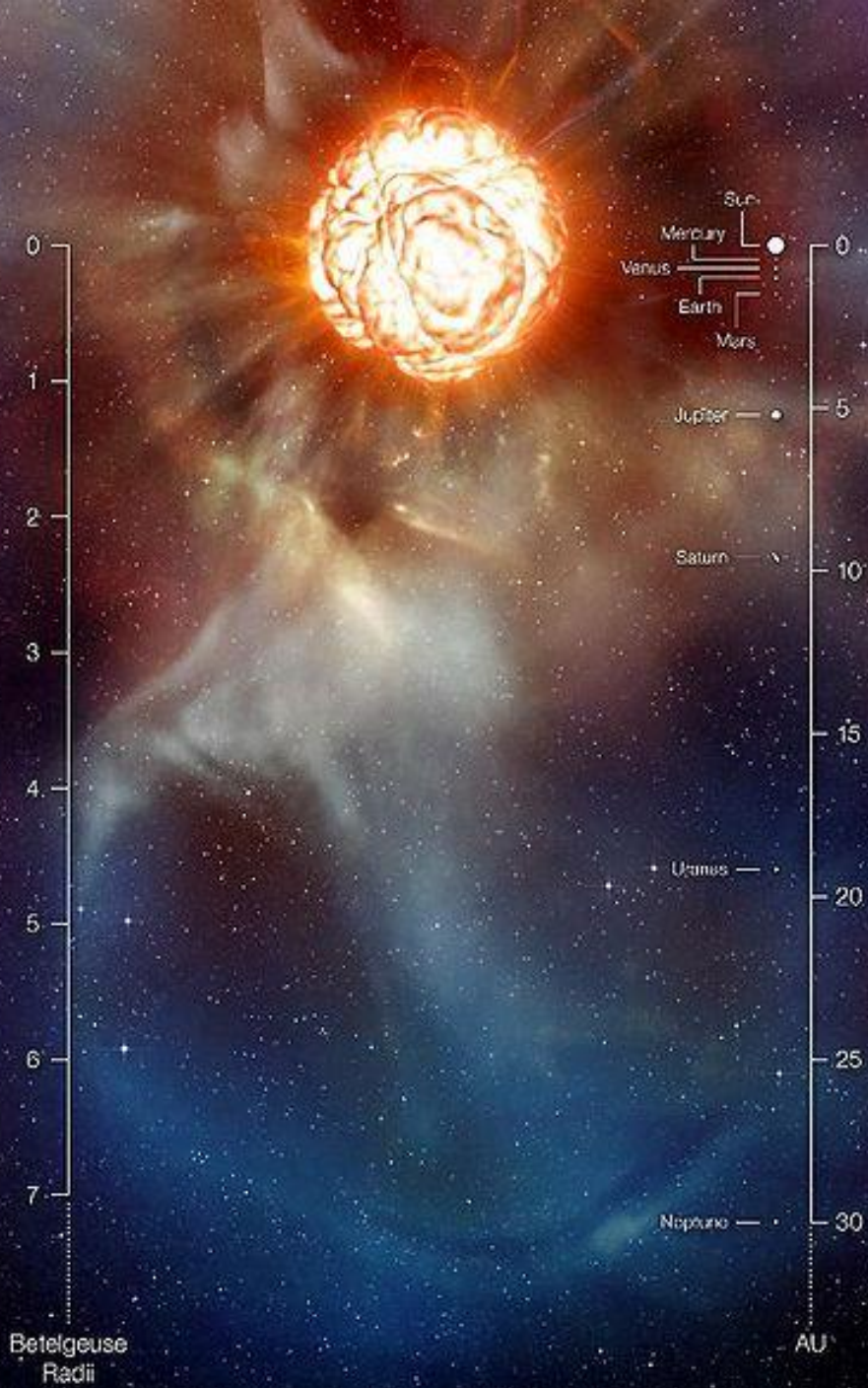
st35gm04n26\_l1blm

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

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

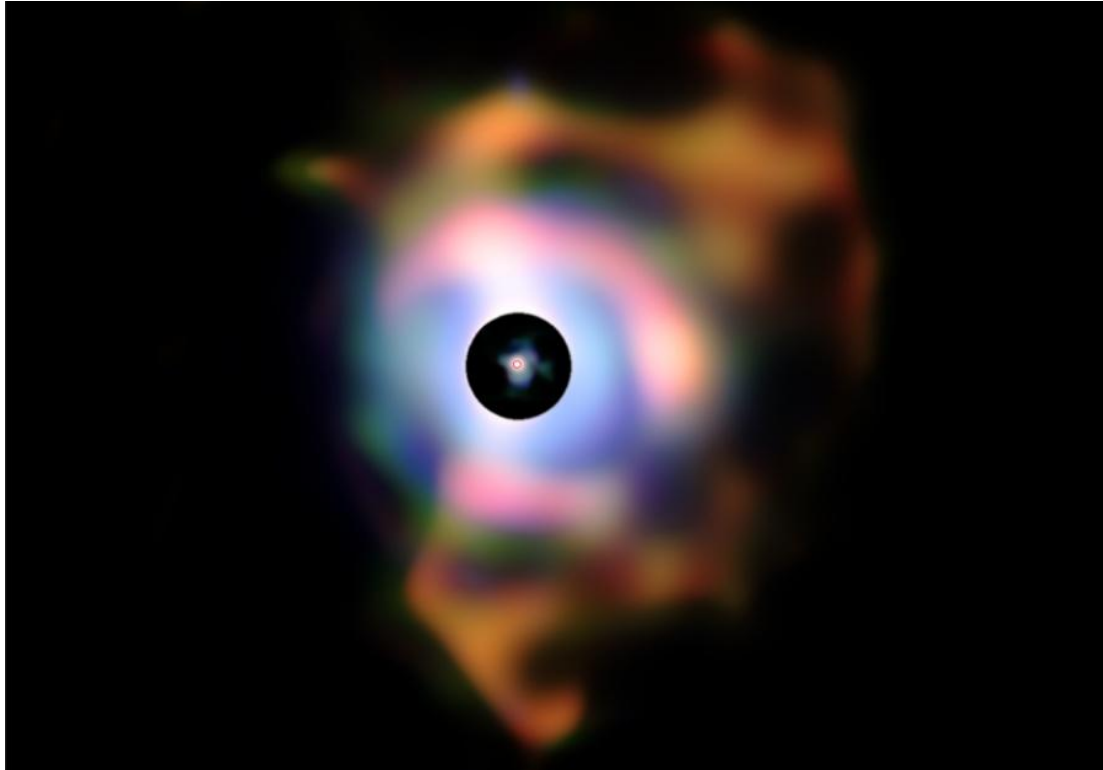
Simulation numériques  
par Bernd Freytag (CRAL-ENSL)  
très accéléré : épisode de 7 ans

2 cm à 200 km



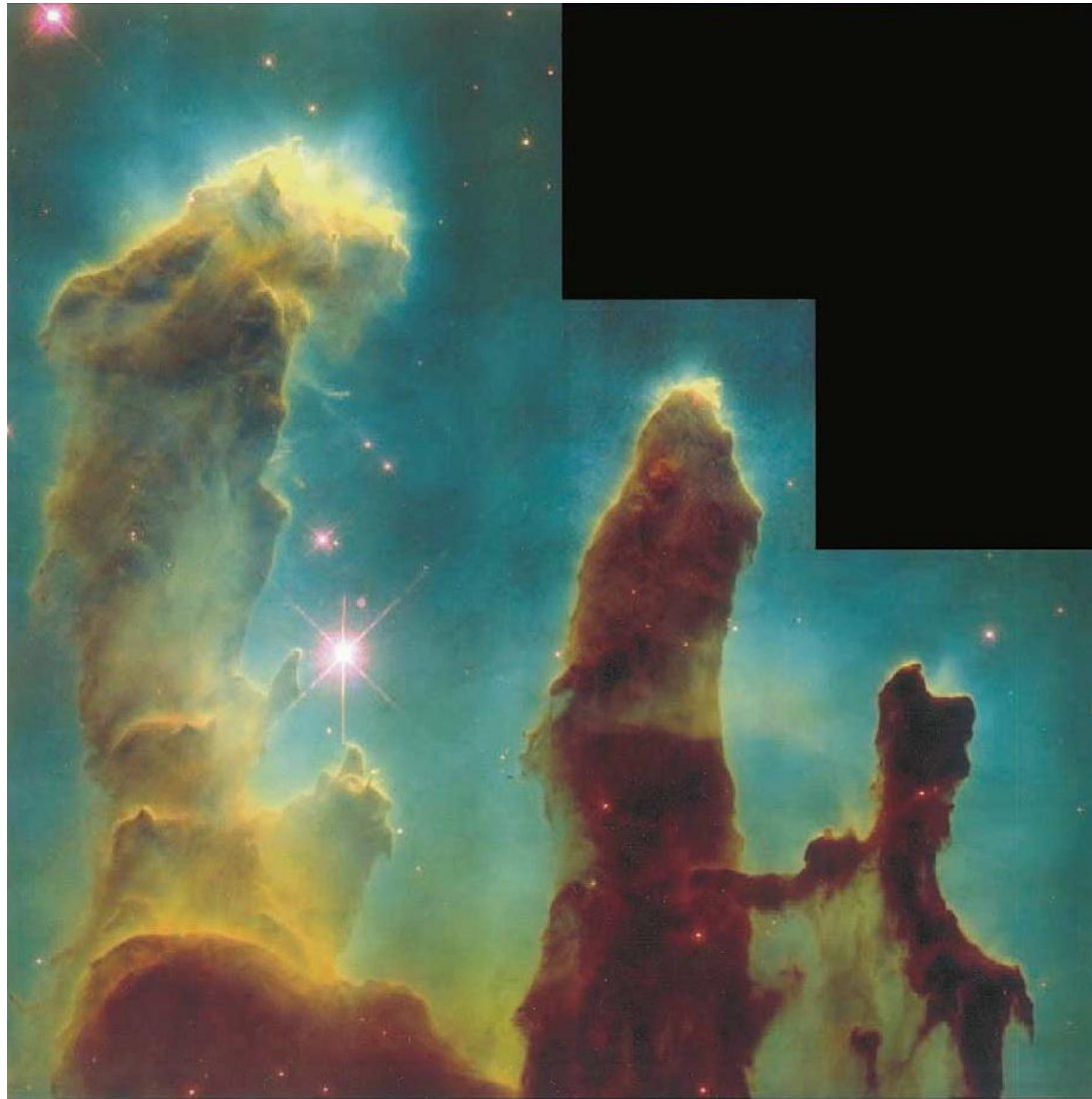
Représentation traditionnelle !

# Les étoiles vieillissantes empoussièrent l'espace



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

# RETOUR AU MILIEU INTERSTELLAIRE DENSE

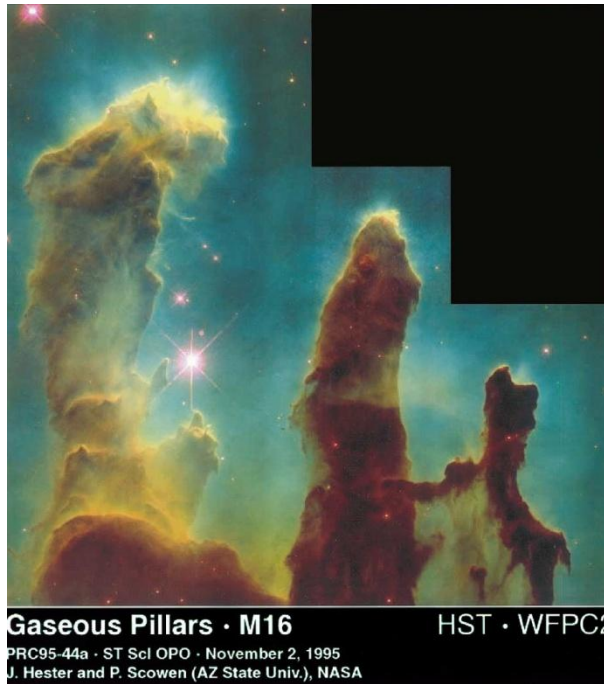


**Gaseous Pillars · M16**

**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)

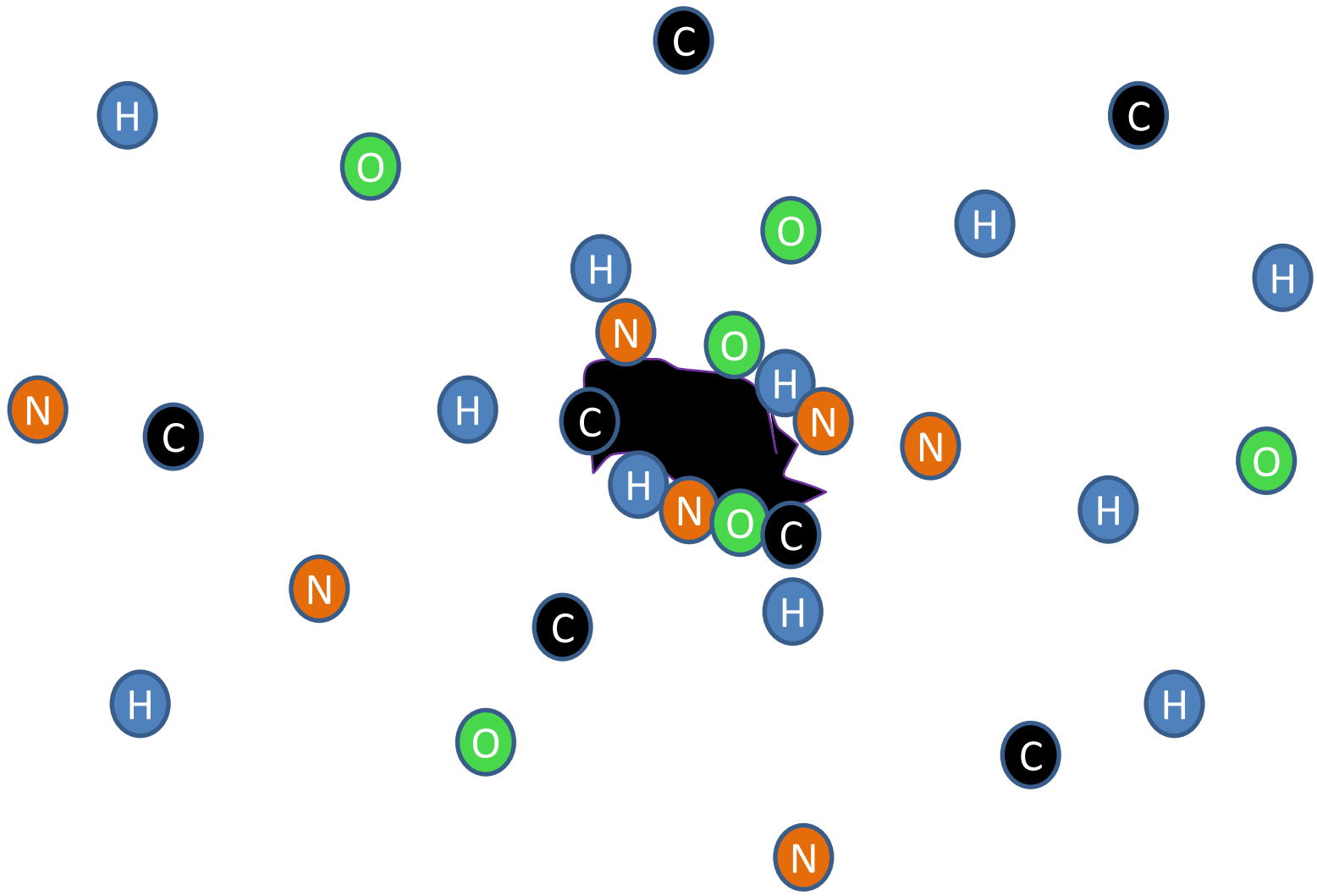


Chimie dans les nuages denses :

[WWW.usine\\_à\\_molécules.com](http://WWW.usine_à_molécules.com)

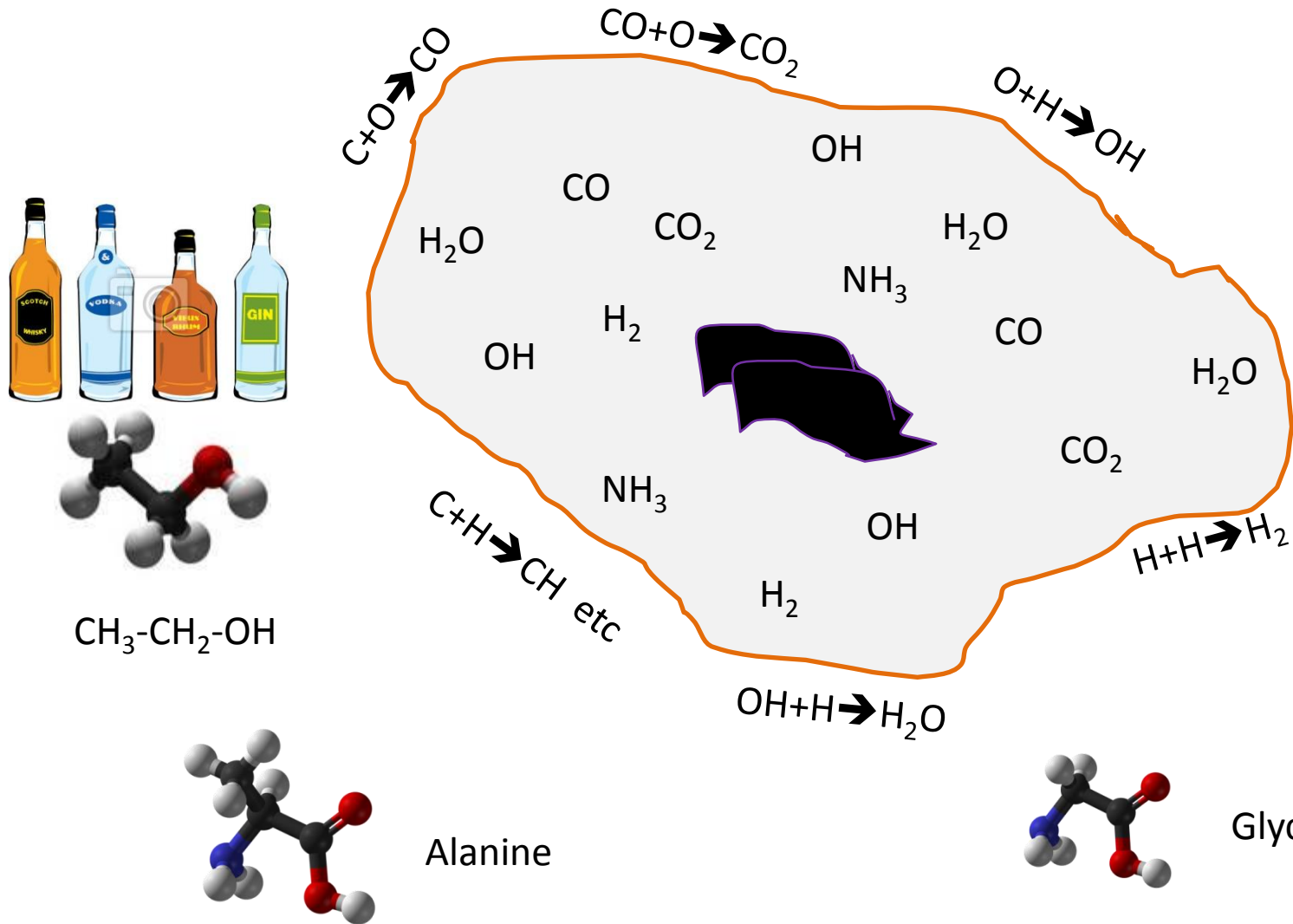


Les atomes du gaz se collent à la surface des grains



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 :



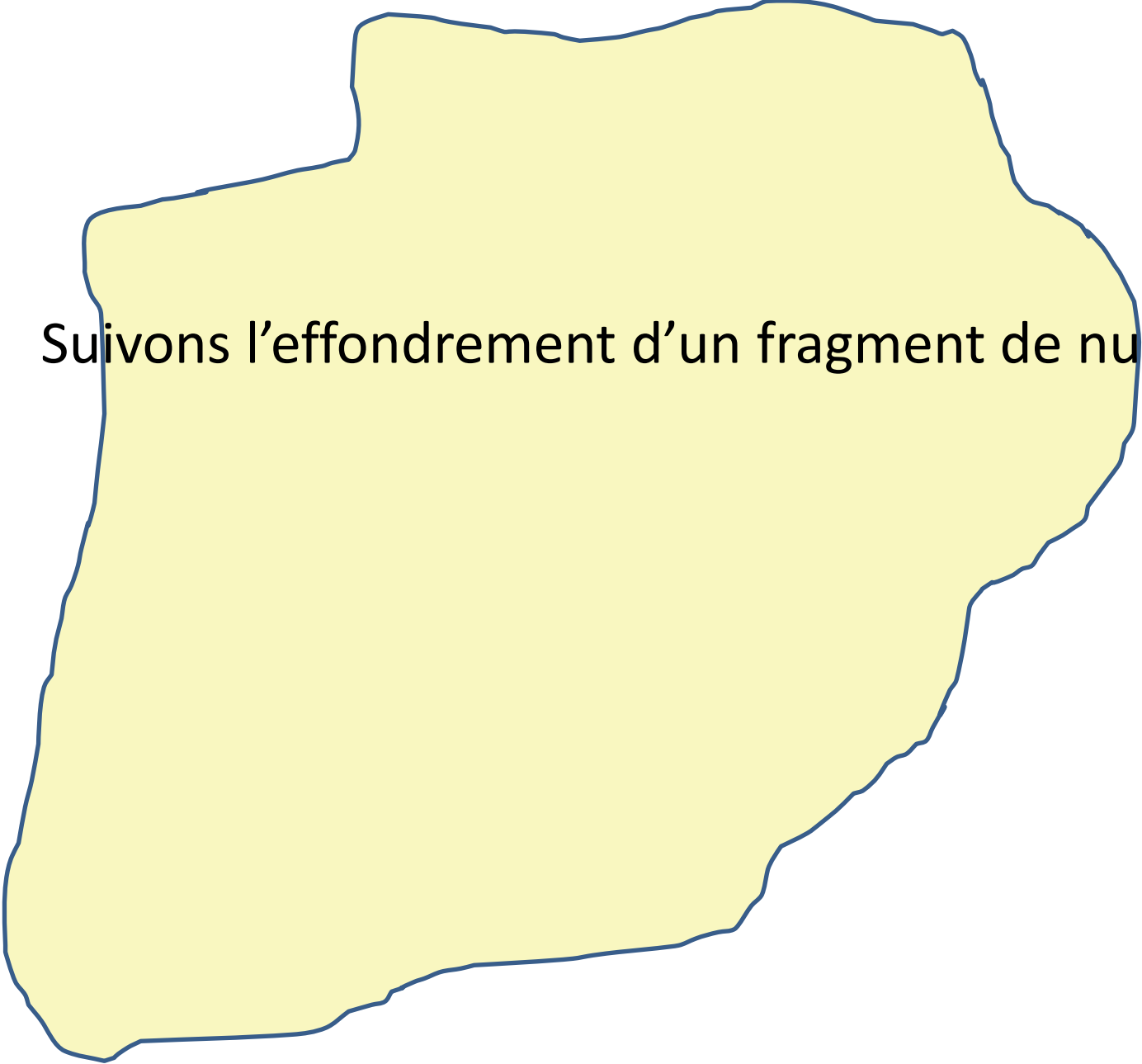
**Autre scénario possible ...**

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

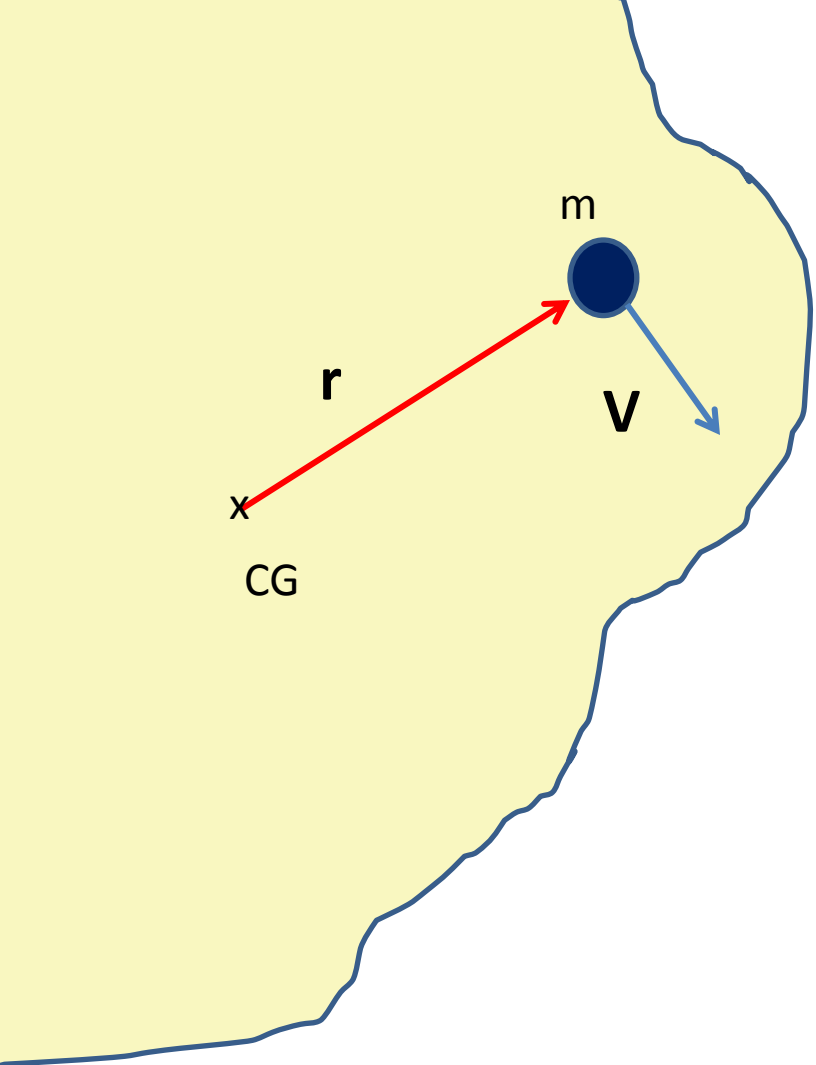
Marées, dissipation d'énergie

Rayonnement

Effet de serre

Effet dynamo

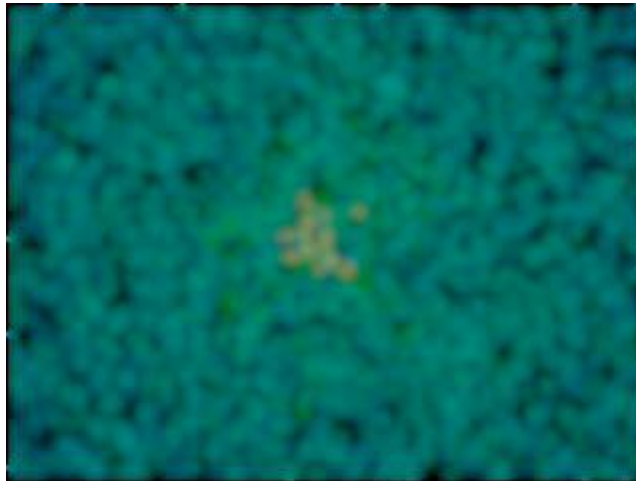
Datation



$m \mathbf{V} \times \mathbf{r} =$  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

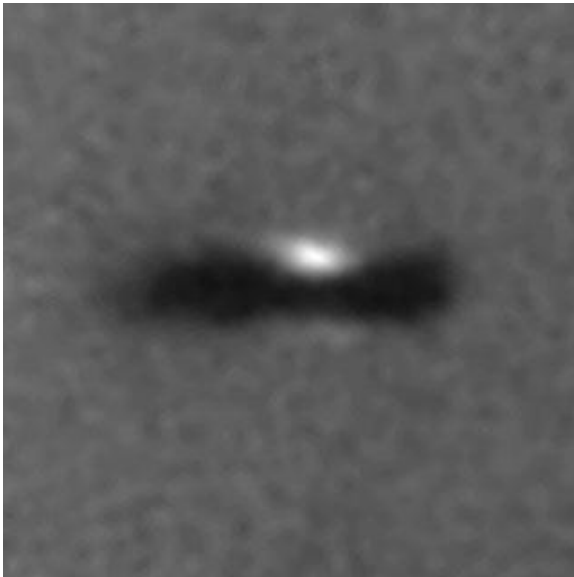
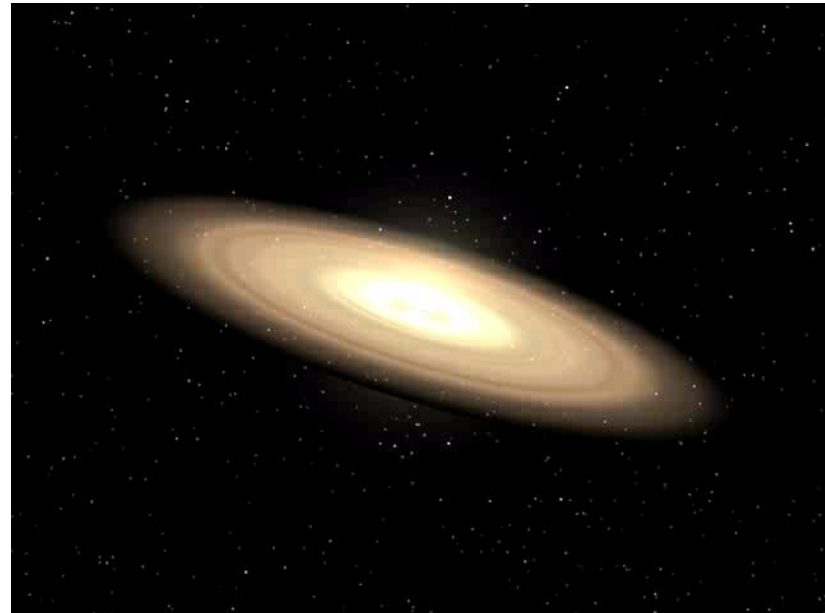
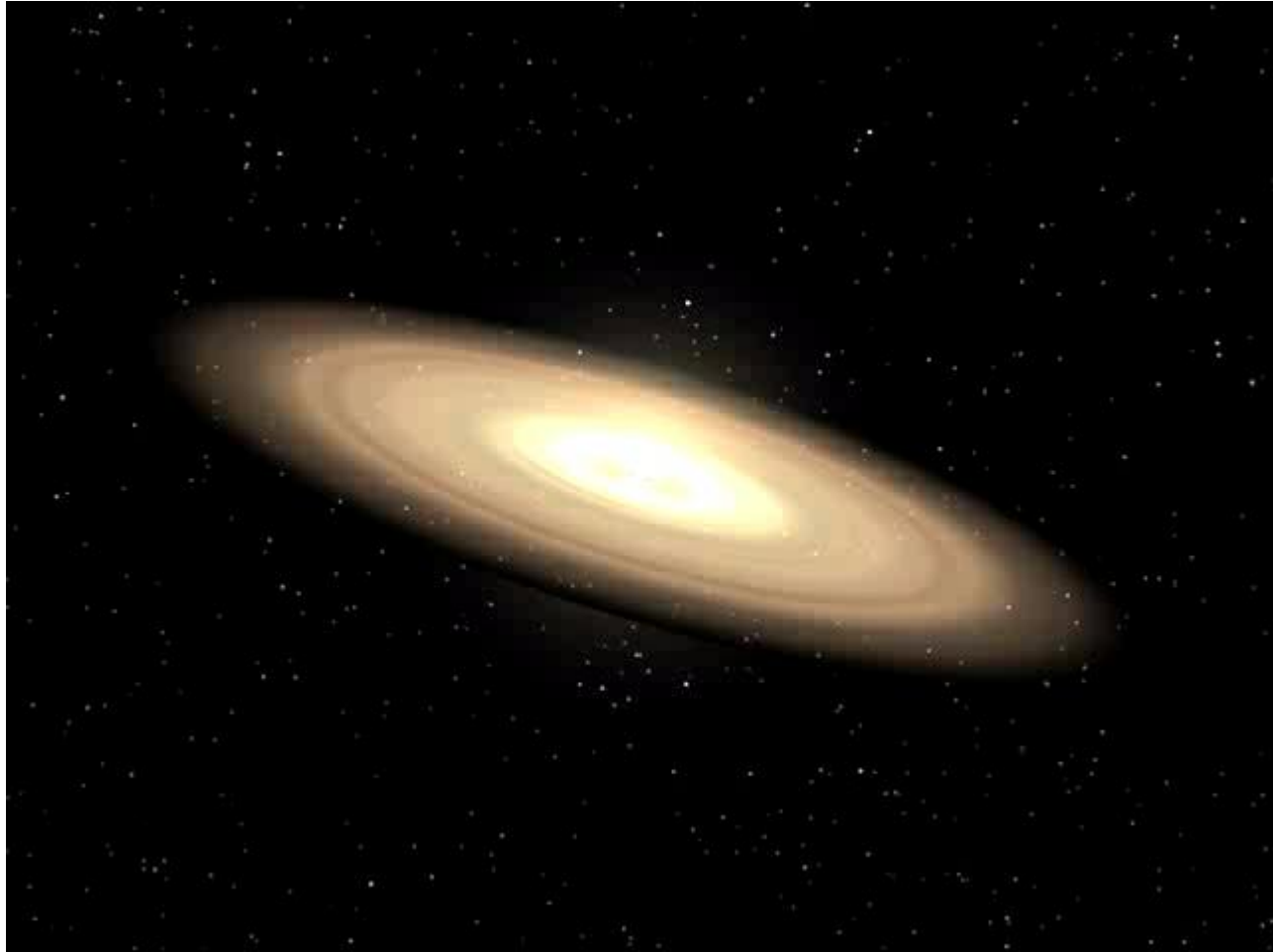
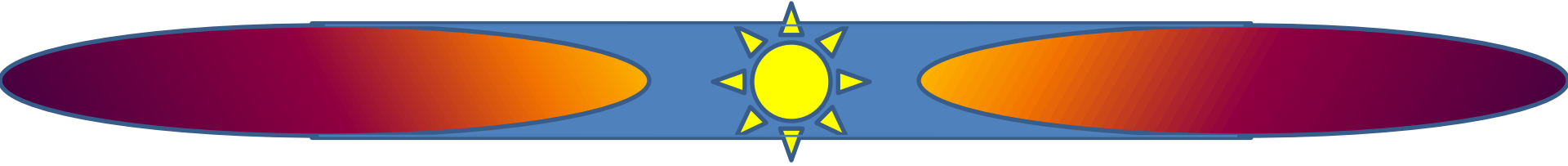


image NASA/ESA



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/m<sup>2</sup>)

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)

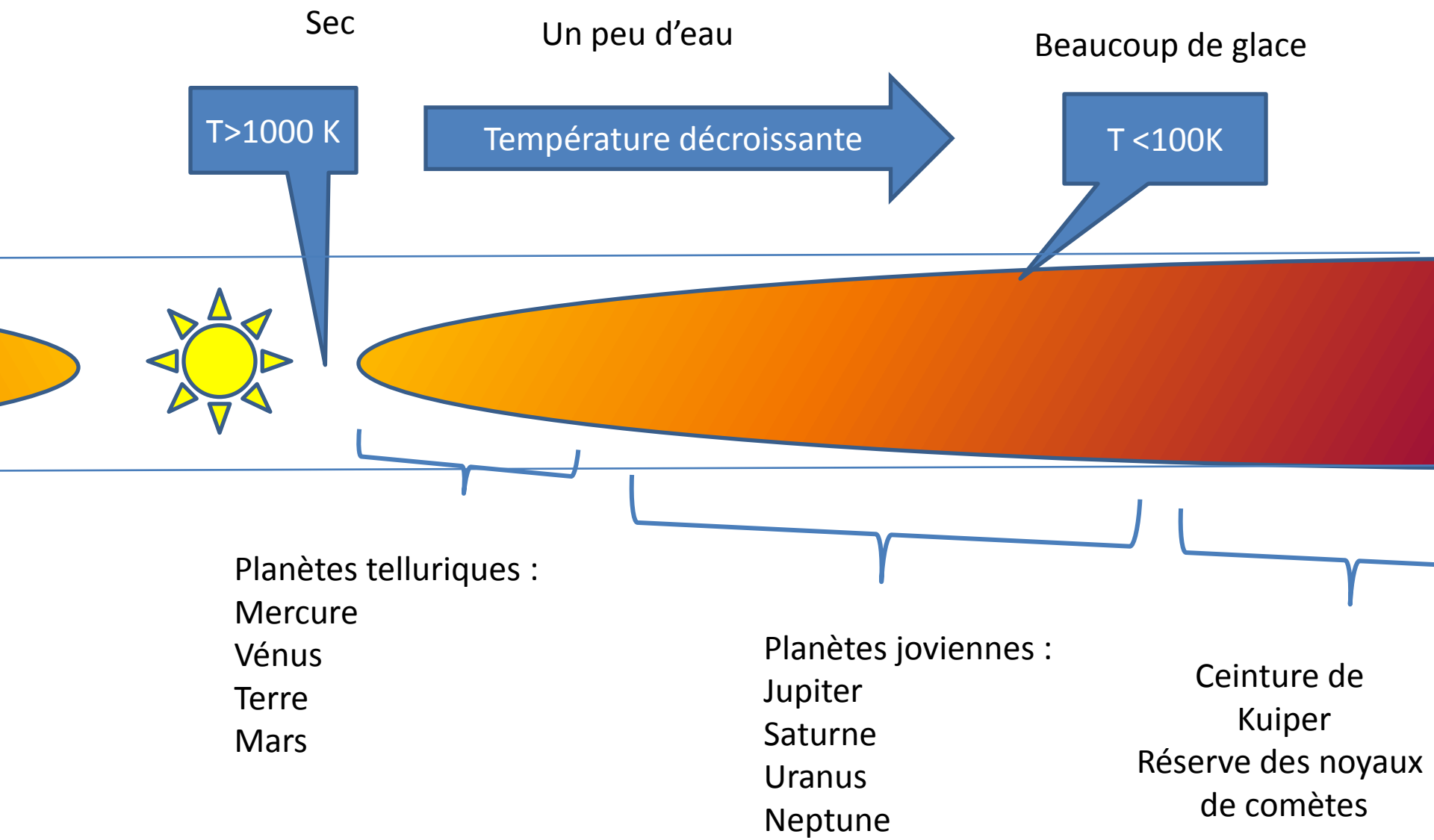
Quantité de chaleur à évacuer : % au volume → %  $a^3$

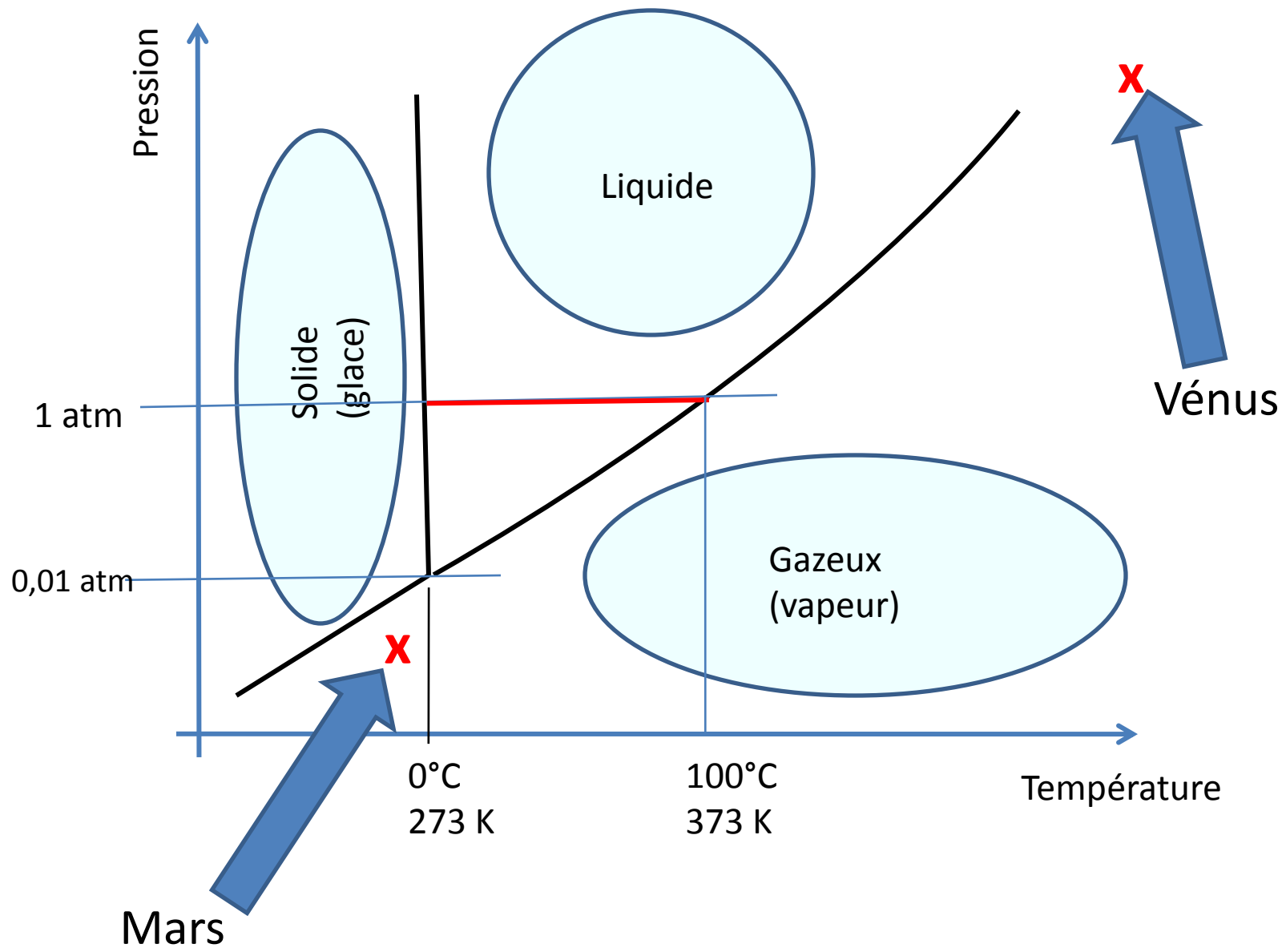
Surface disponible pour rayonner : % à la surface → %  $a^2$

Vitesse de refroidissement %  $1/a$

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

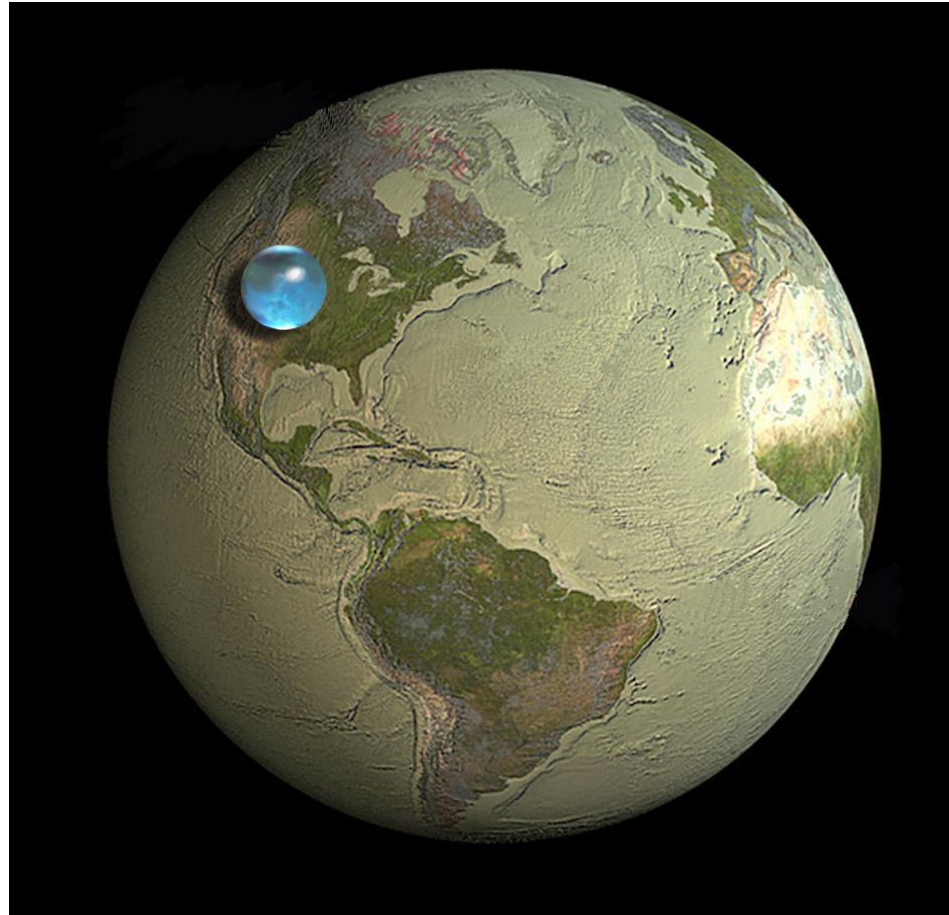
Une petite planète, chaude lors de sa formation, se refroidit + vite qu'une grosse





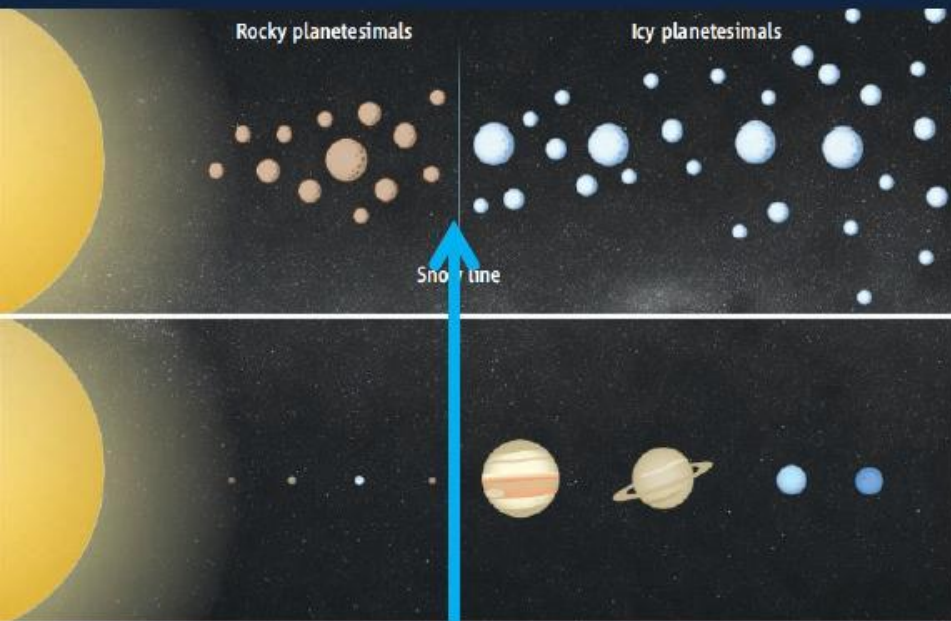


0,02% de la masse de la Terre



Toute cette eau est elle d'origine ?

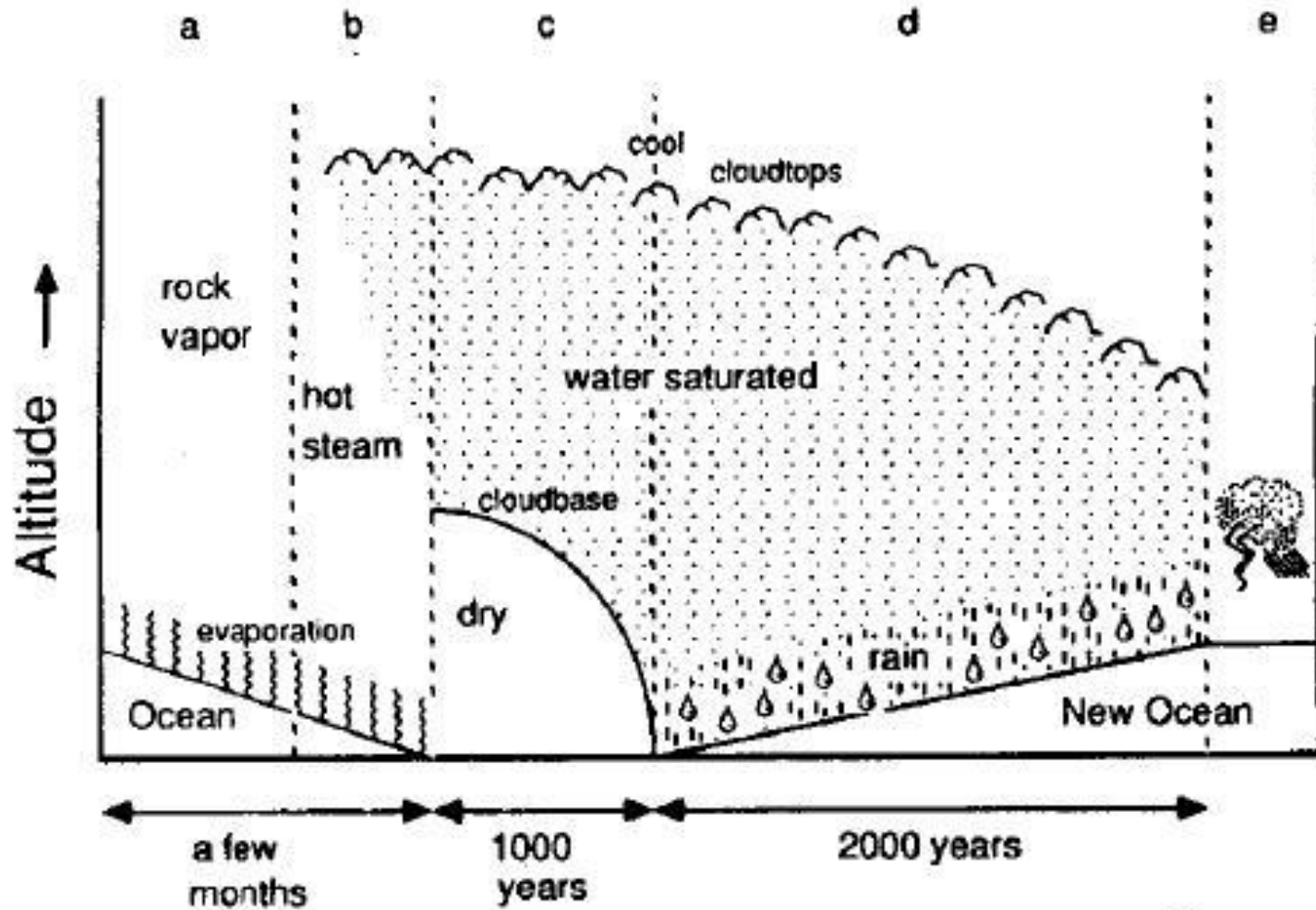
# Origine de l'eau des océans



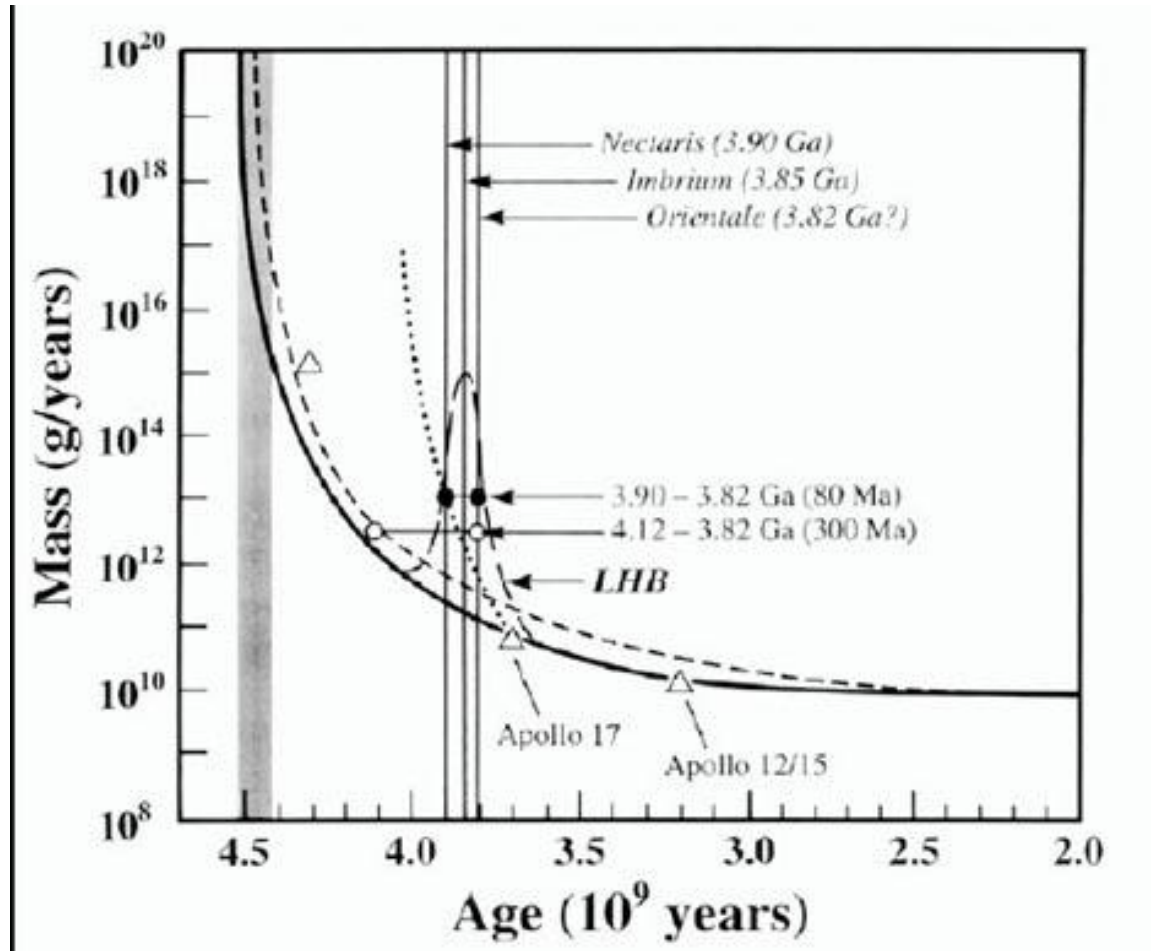
*Ligne des  
glaces*

- 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 embryos ~ 1000 km)
- Une petite fraction pendant la phase du bombardement tardif (+700 Ma)

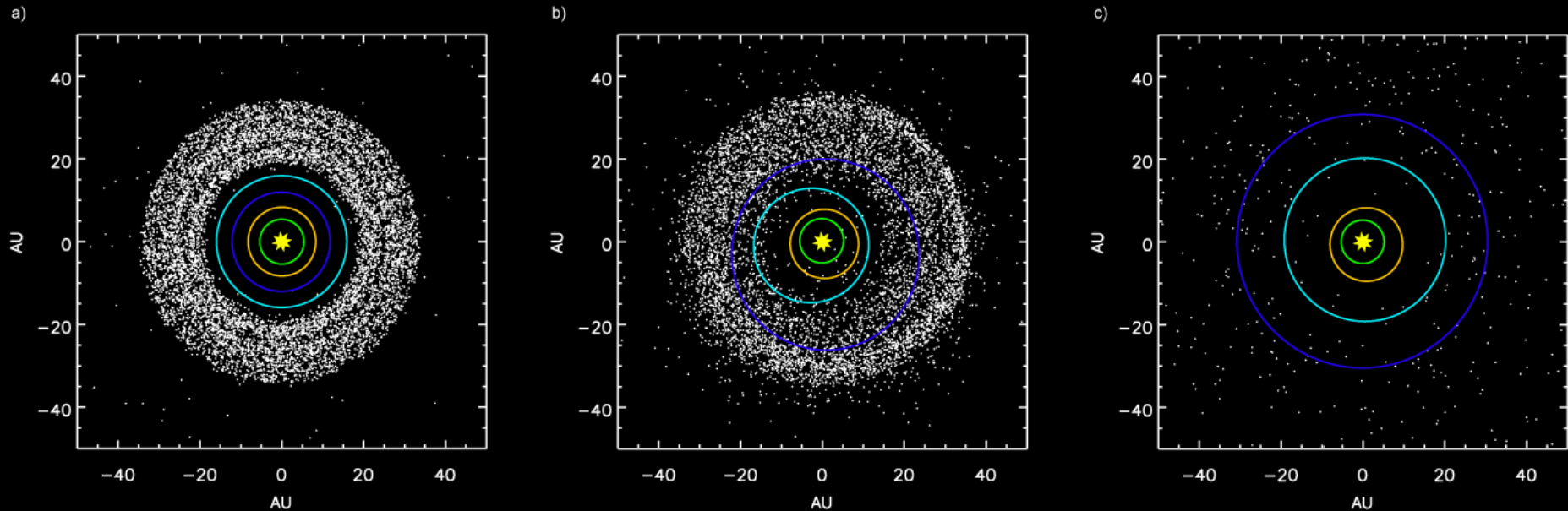
# Météo des premiers temps de la Terre, après une collision majeure



# 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  $L = S \sigma T^4$

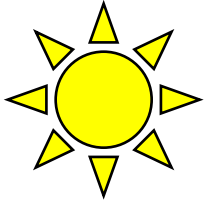
Effet de serre

Effet dynamo

Datation

# Effet de serre

Planète sans atmosphère => pas d'effet de serre



Lumière visible + infrarouge

chauffage du sol

Rayonnement infrarouge

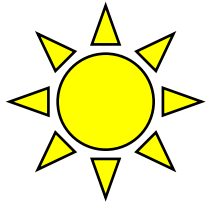
refroidissement du sol

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

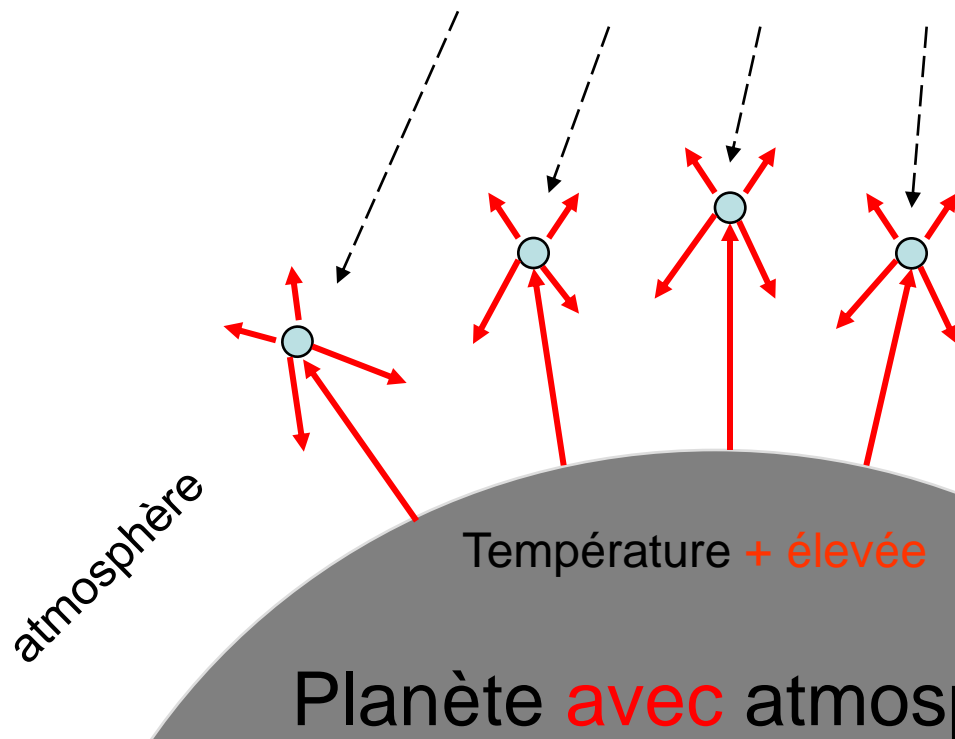
# Effet de serre



Dû aux molécules qui absorbent/émettent l'infrarouge

molécules de gaz  
à effet de serre :  
 $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CH}_4$  ...

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





$\Delta T$  dû à l'effet de serre :

Mars : +5°

Terre : +35°

Vénus : +500°

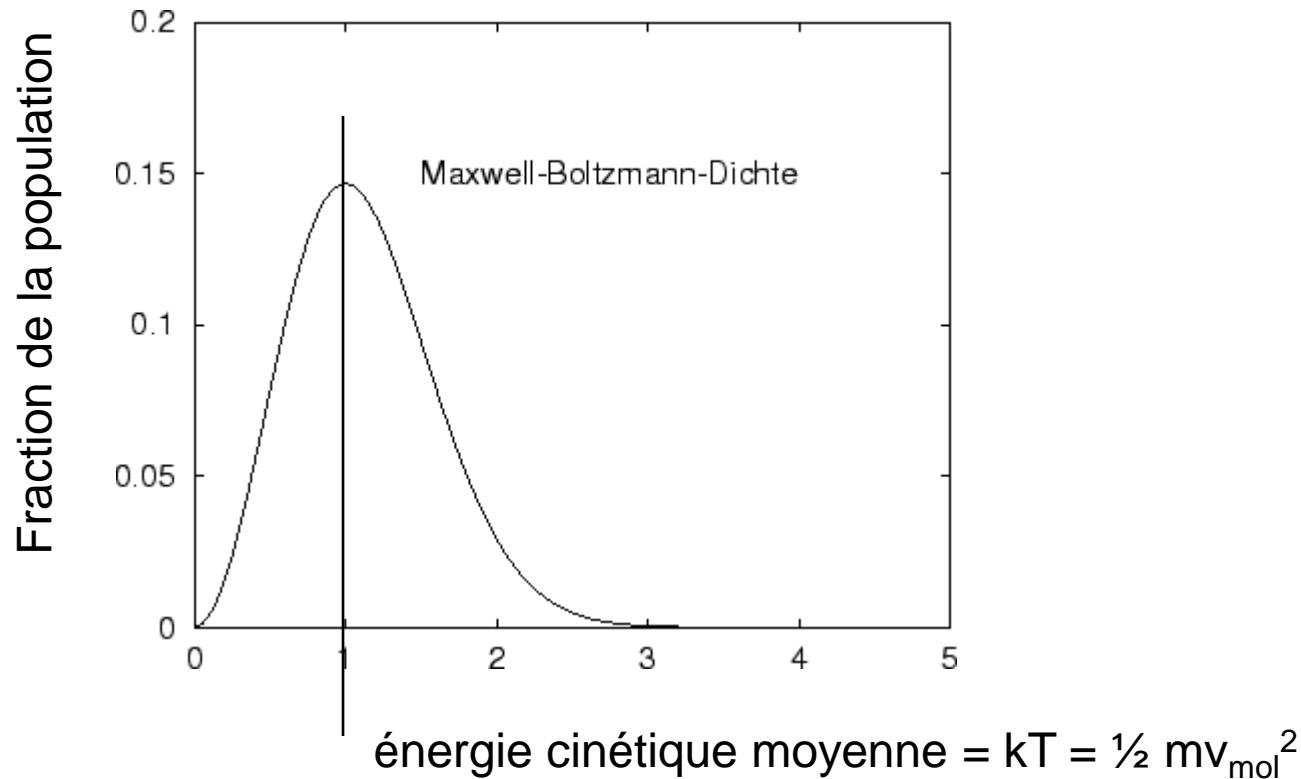
# Perte des molécules des atmosphère

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

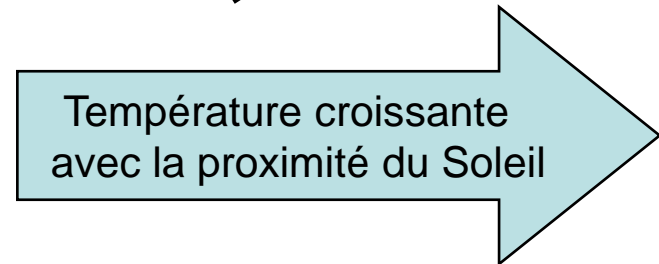
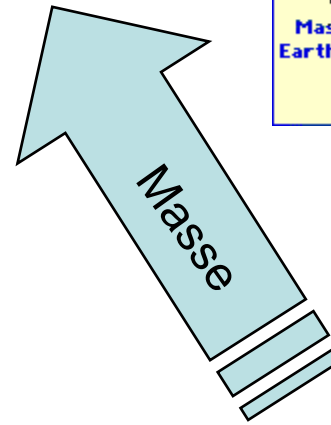
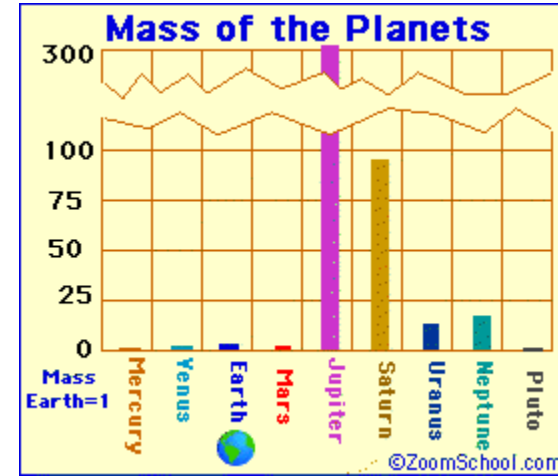
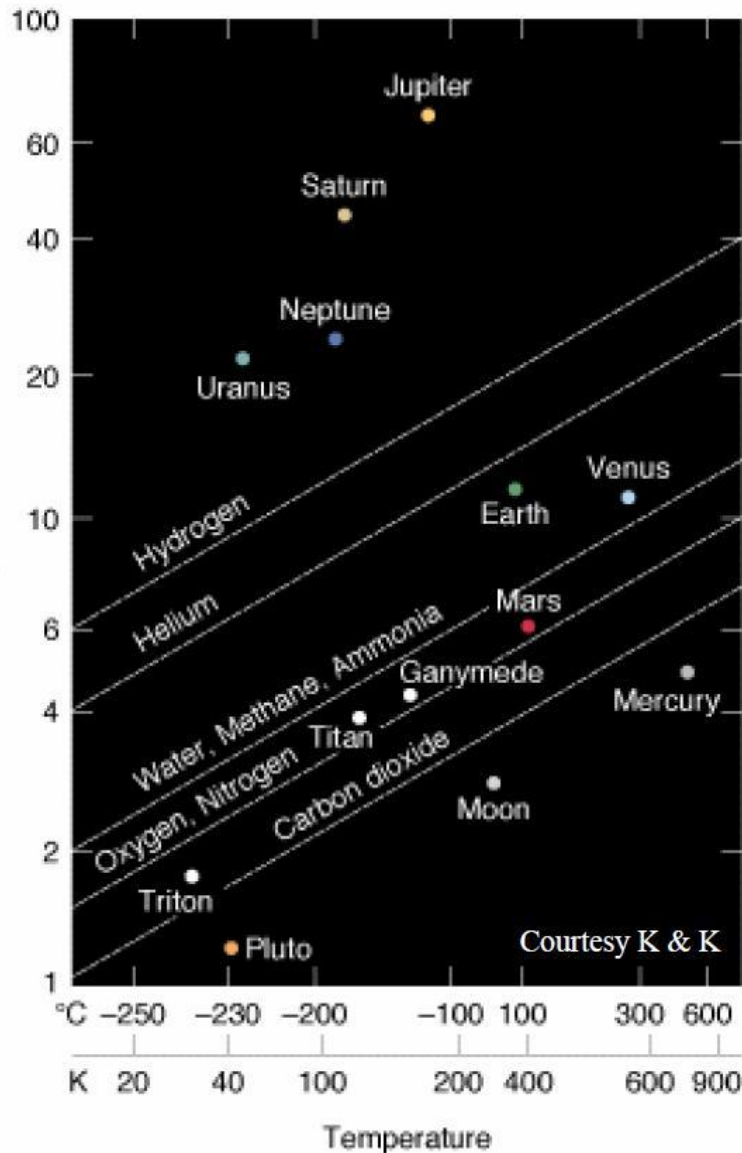
# Vitesse moyenne des molécules à la température T : distribution de Boltzmann



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)

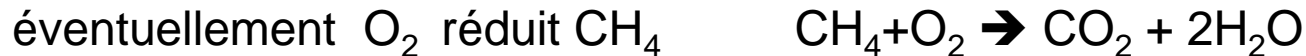
# Sort particulier pour H<sub>2</sub>O : Perte par photodissociation

Dans la haute atmosphère : UV solaire → photodissociation de molécules



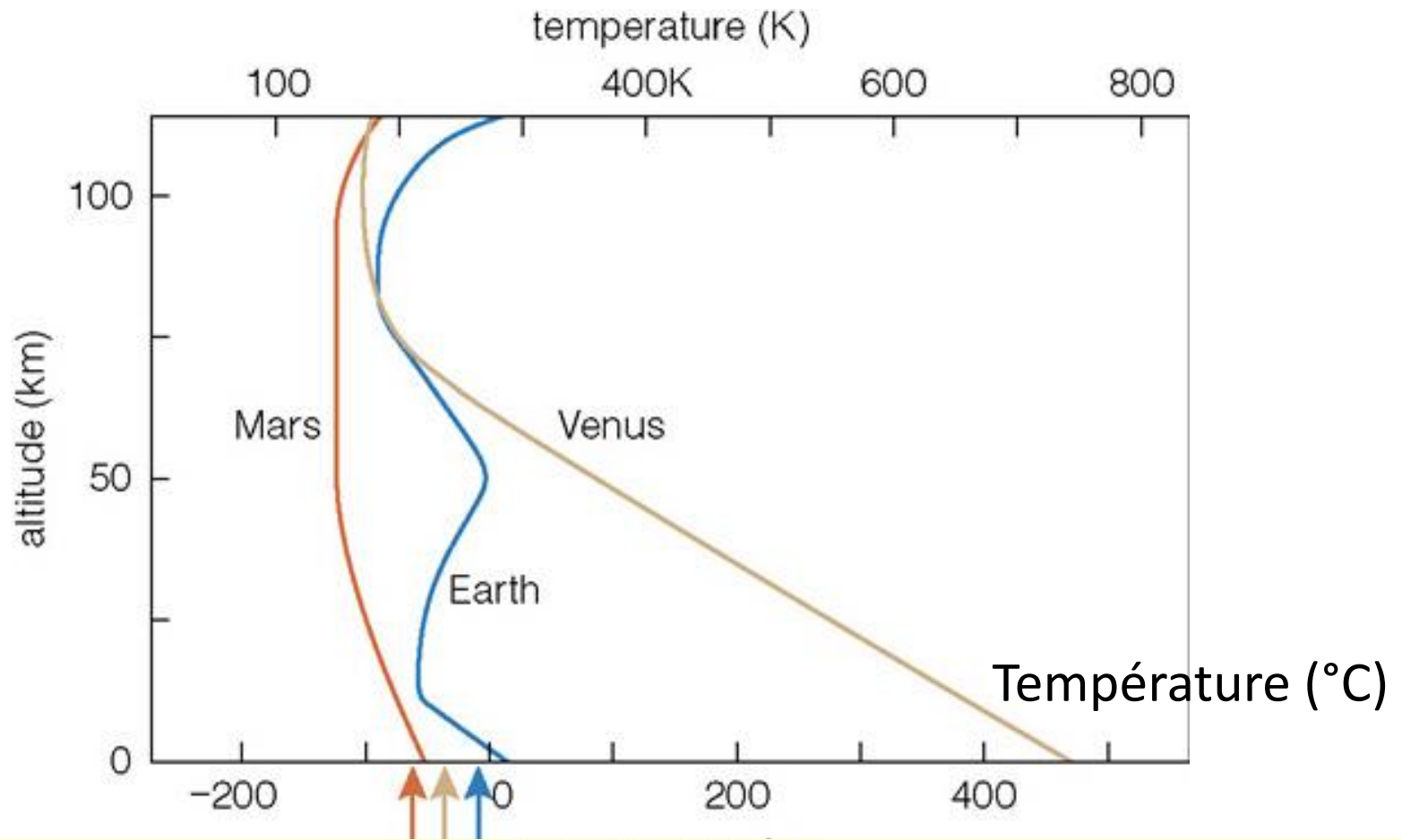
Les H s'échappent très facilement

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



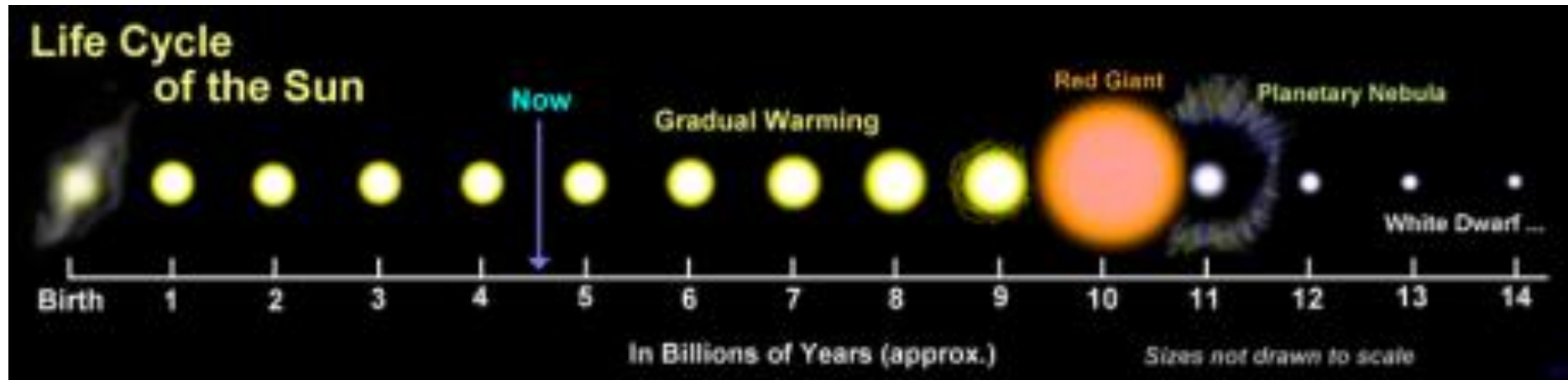
Résultat :

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



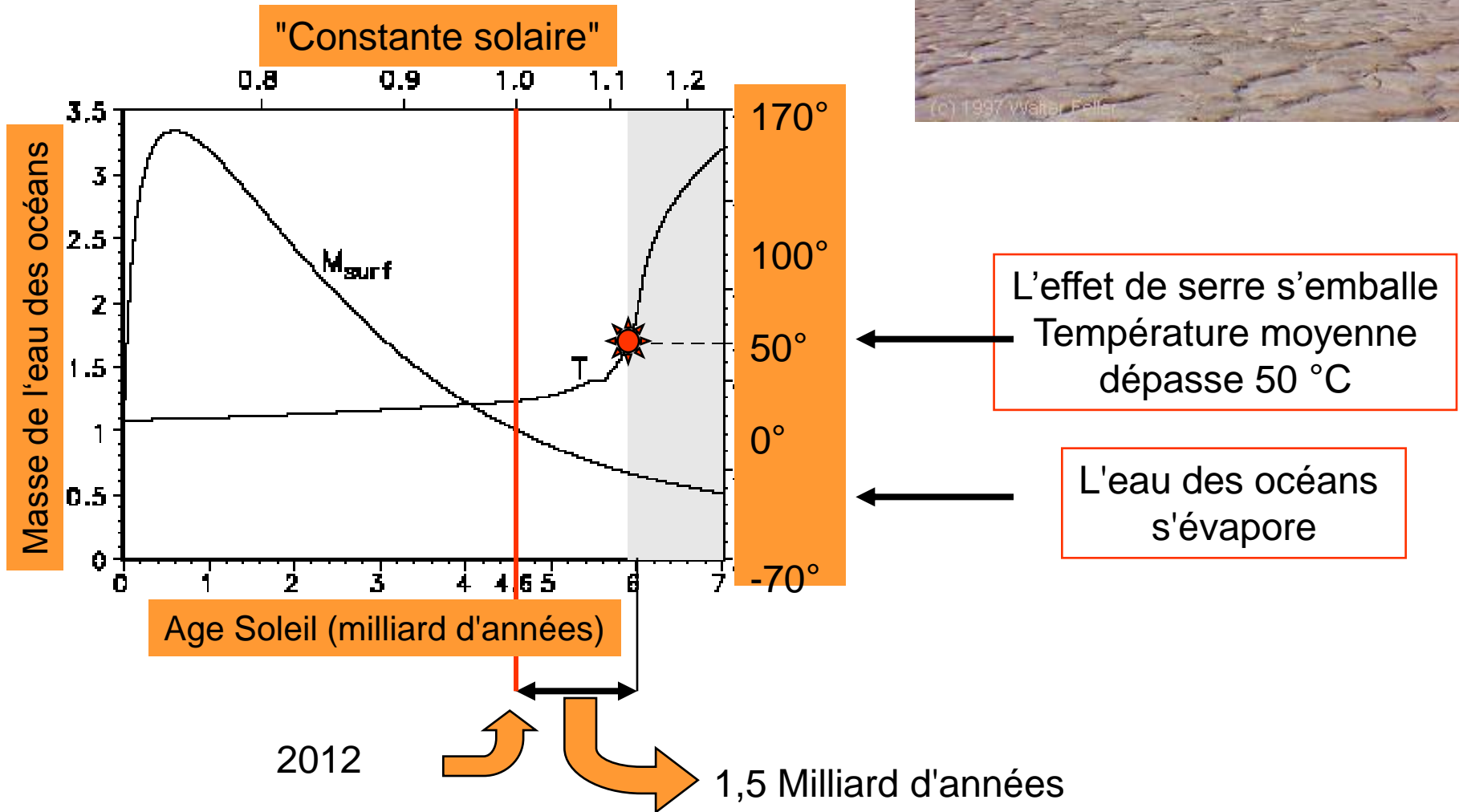
La Terre retient bien son eau  
Barrière froide à 15 km d'altitude

# 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

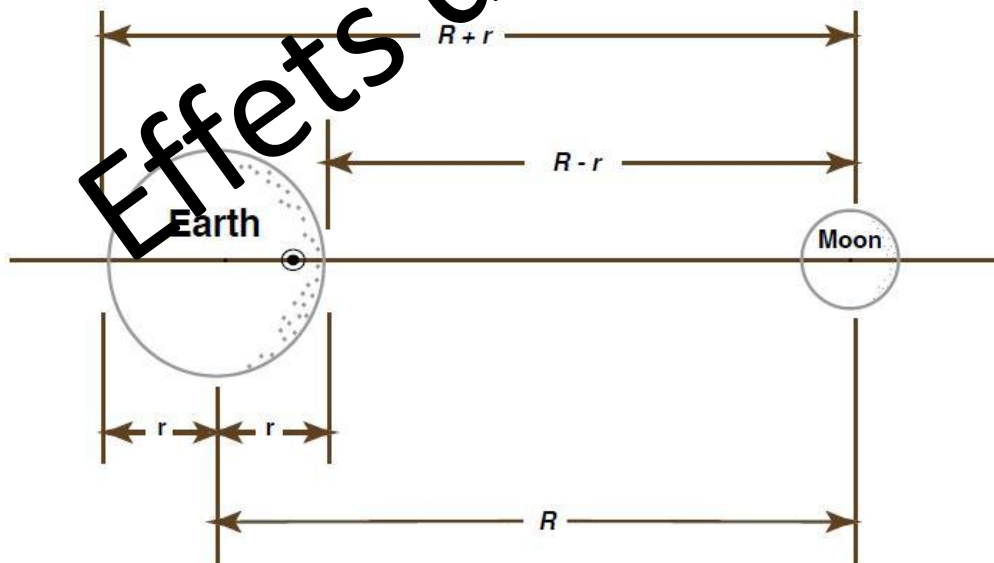
Datation

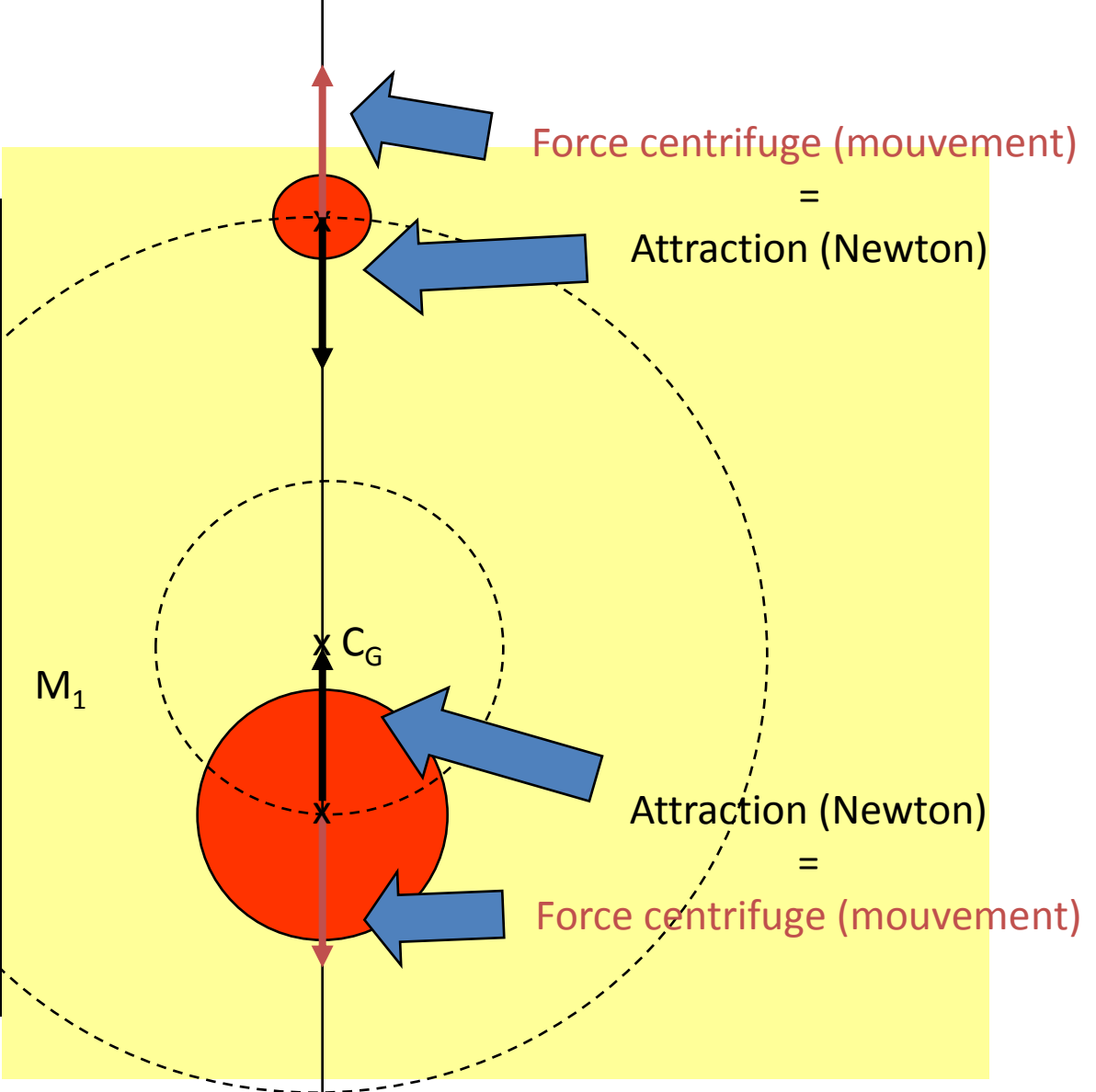
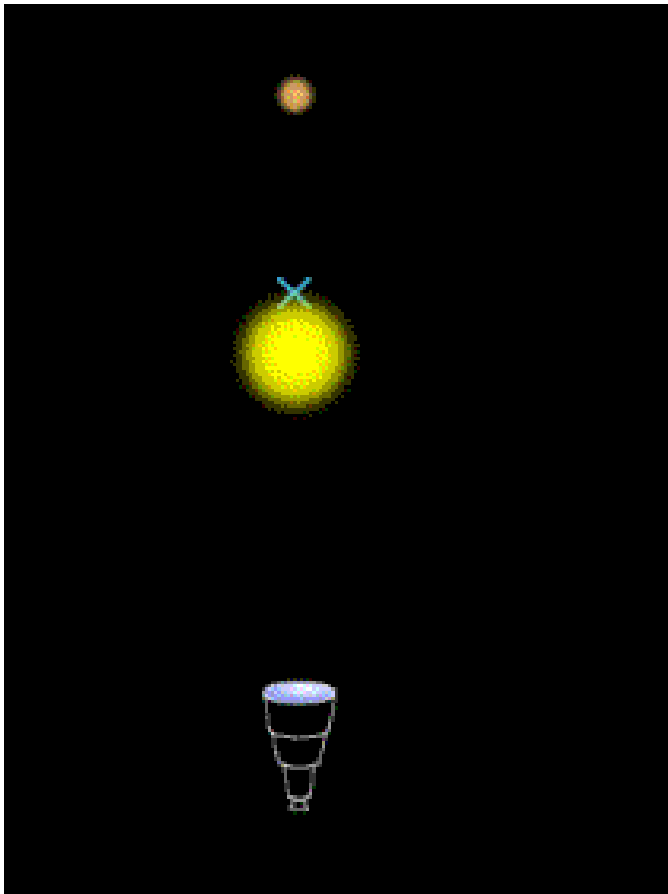
$$\begin{aligned}
 F_T &= -\frac{Gm}{R^2} + \frac{Gm}{(R+r)^2} \\
 &= Gm \left[ \frac{-(R+r)^2 + R^2}{R^2(R+r)^2} \right] \\
 &= Gm \left[ \frac{-2rR - r^2}{R^2(R^2 + 2rR + r^2)} \right] \\
 &= Gm \left[ \frac{-2rR}{R^2(R^2)} \right] \\
 &= -\frac{2Gmr}{R^3}
 \end{aligned}$$

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

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

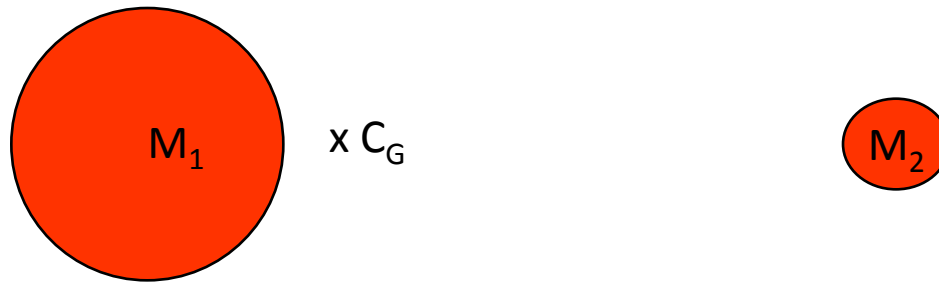
$$\begin{aligned}
 F_T &= Gm \left[ \frac{2rR}{R^2(R^2)} \right] \\
 &= \frac{2Gmr}{R^3} \tag{4}
 \end{aligned}$$





**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



$f_c$

$f_{G1}$

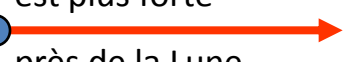


$f_c$

$f_{G2}$



$f_c$



$f_{G3}$

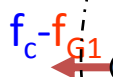
>

>



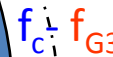
Résultantes des forces

et déformation

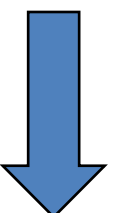


$f_c - f_{G1}$

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



$f_c - f_{G3}$



Résultantes des forces

et déformation

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

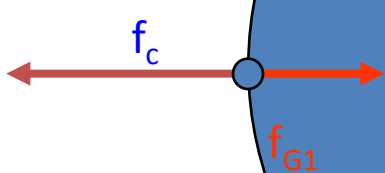
# Effets de marée

Par rapport à la **force centrifuge**  $f_c$  :

La **gravité de la Lune**  $f_G$

est plus faible

loin de la Lune

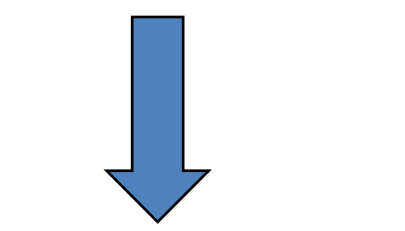
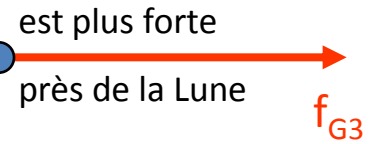


La **gravité de la Lune**  
est égale au centre

La **gravité de la Lune**

est plus forte

près de la Lune



6 heure

Résultantes des forces

et déformation

12 heure



Résultantes des forces

et déformation

0 heure

Si l'objet tourne sur lui-même en « un jour de 24 h planétaires »  
Chaque point du globe subit deux « marées hautes » par jour!

18 heure

Vers la Lune

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

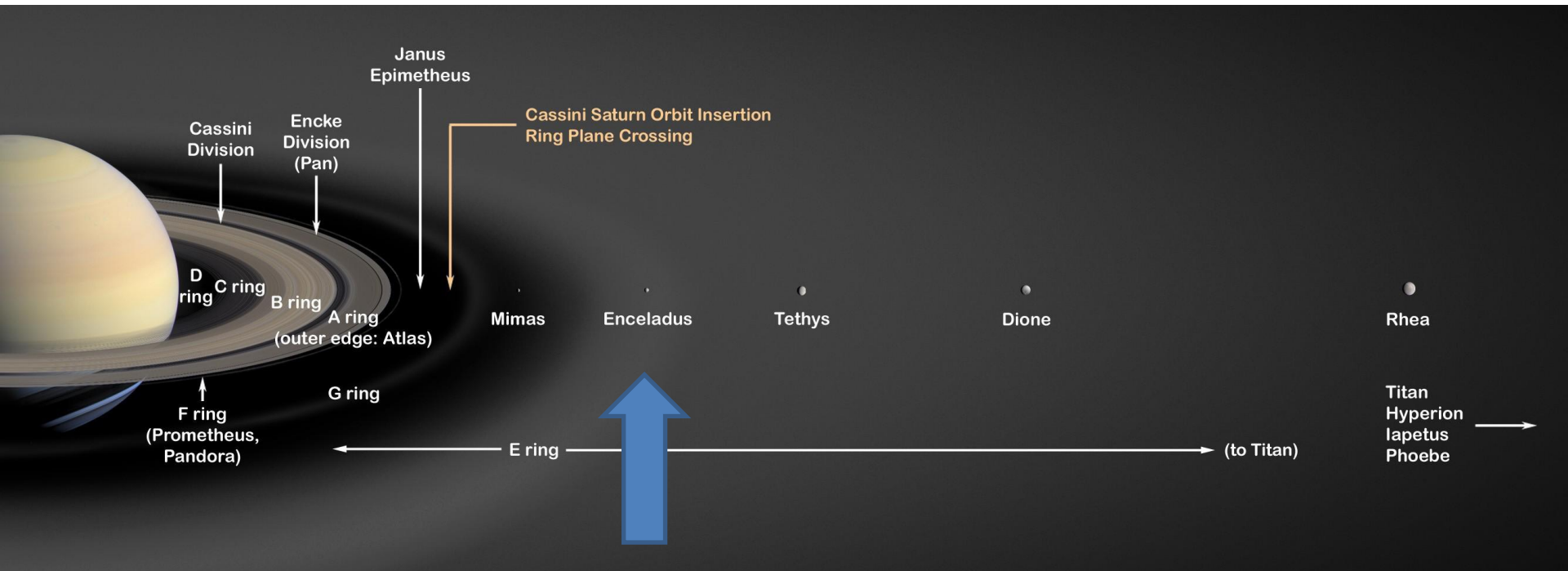
→ Terre-Lune : le jour de Terre s'allonge = perte de moment cinétique de la Terre qui est transféré à la Lune dont l'orbite s'allonge  
Distance Terre-Lune augmente de qq cm/an (donc l'énergie orbitale de la Lune, proportionnelle au  $1/2$  grand axe  $a$ , augmente.  
Cette énergie est prélevée sur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

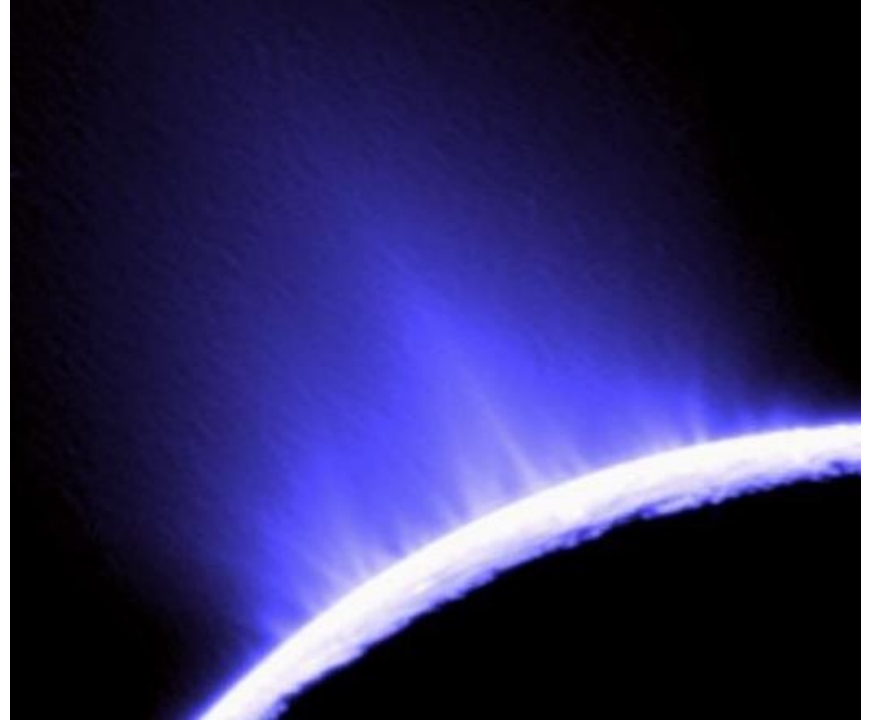
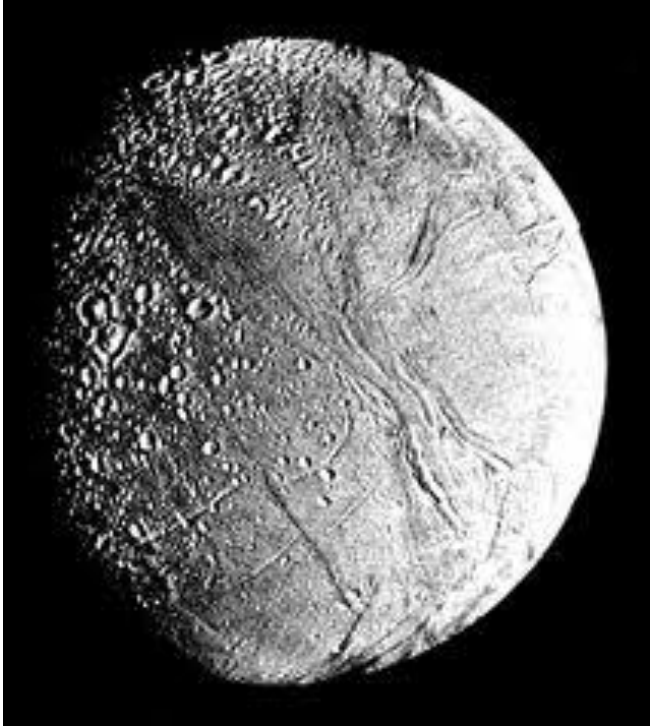


# Encelade : une lune gelée de saturne, assez proche



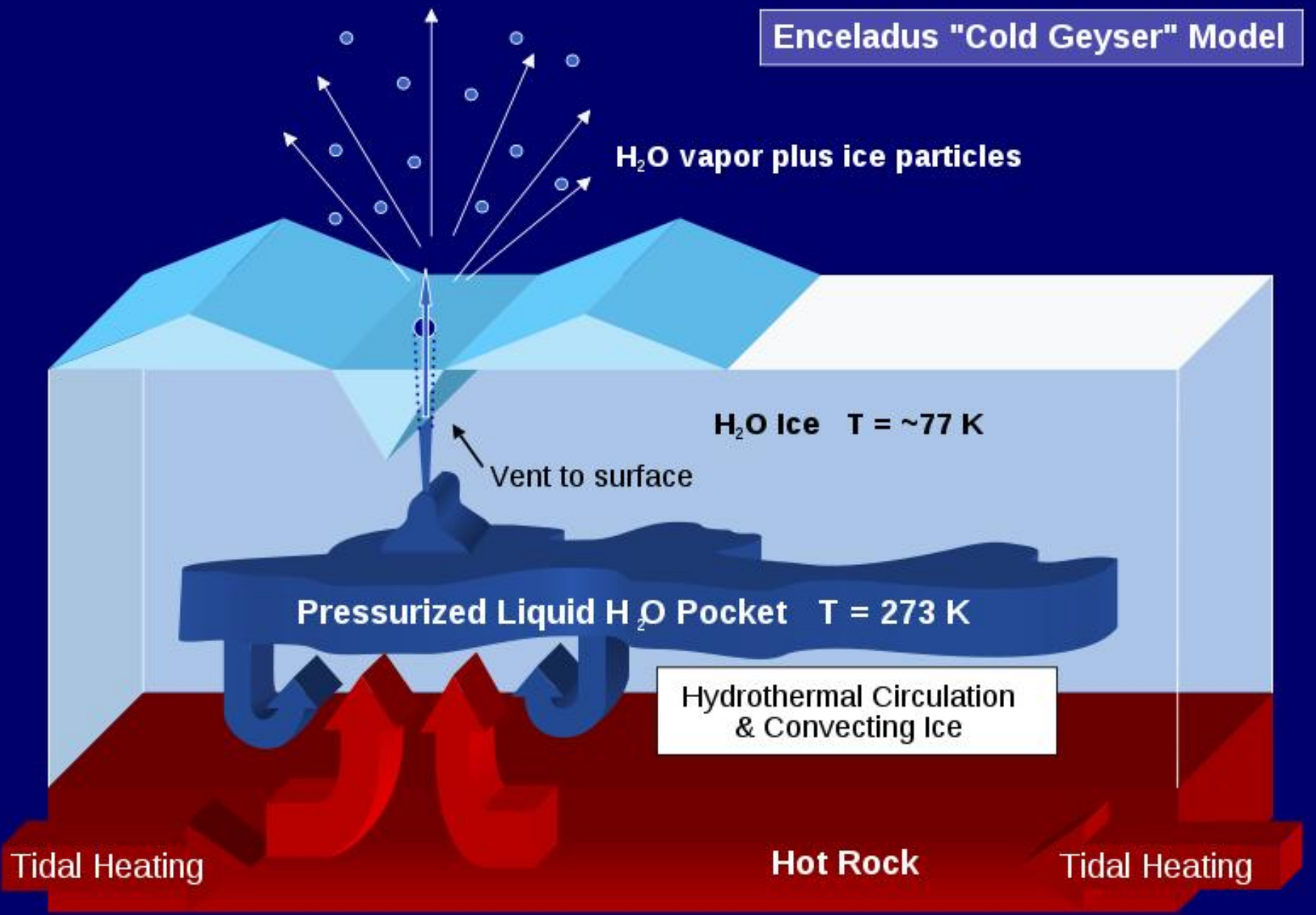


# Encelade (Saturne)

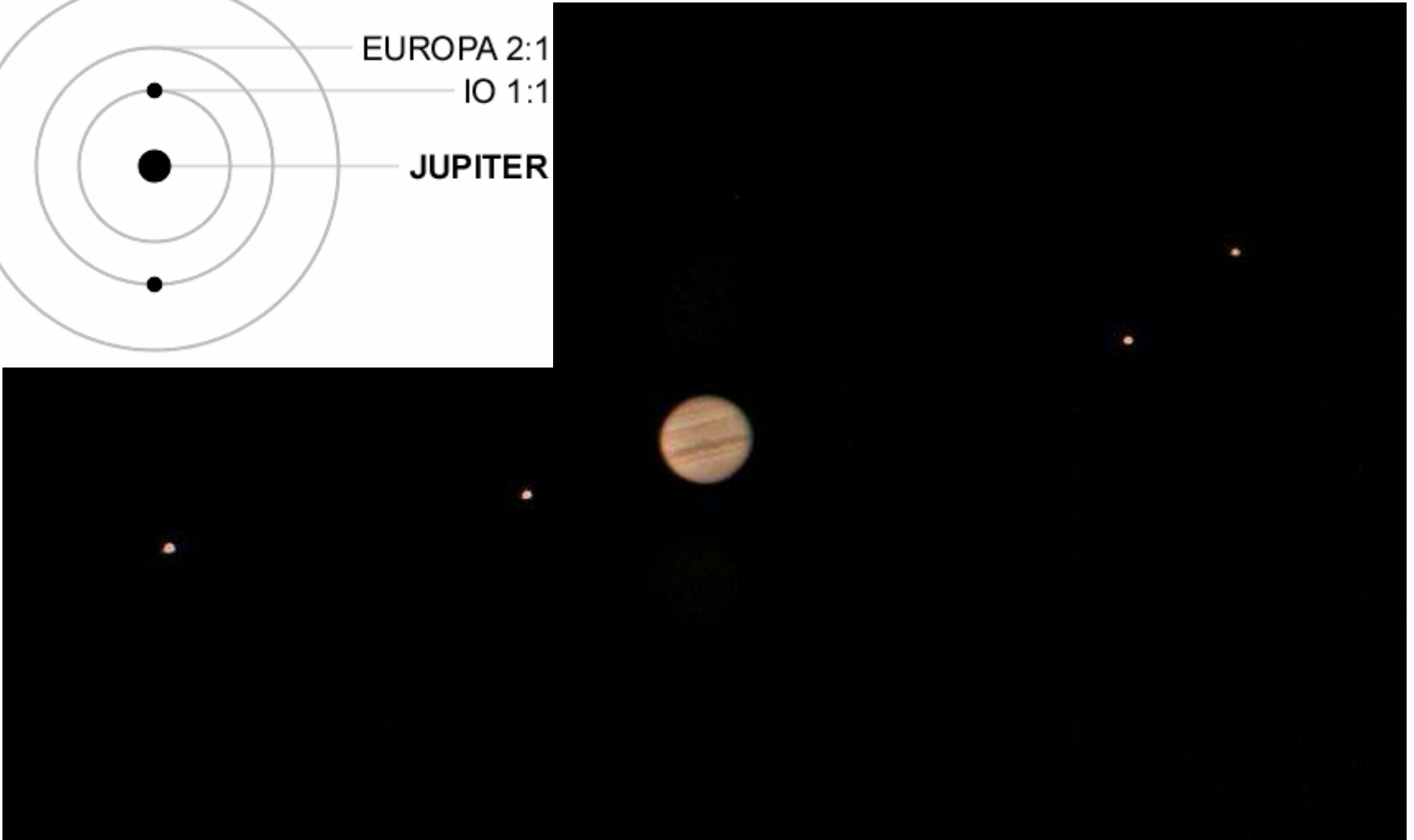
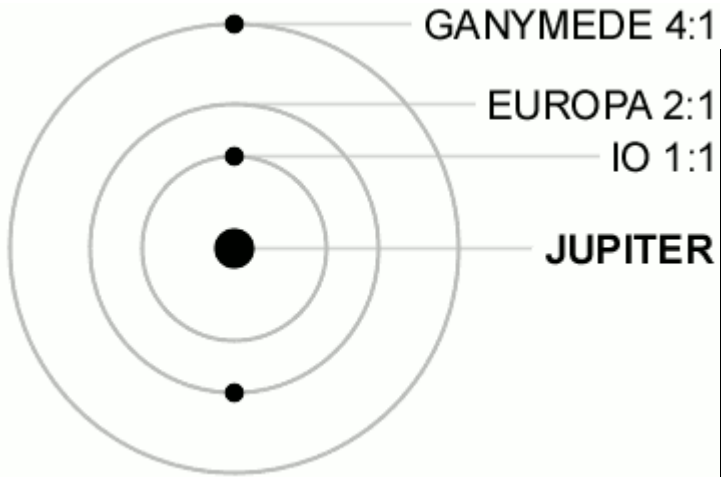


Geysers d'Encelade

# Enceladus "Cold Geyser" Model

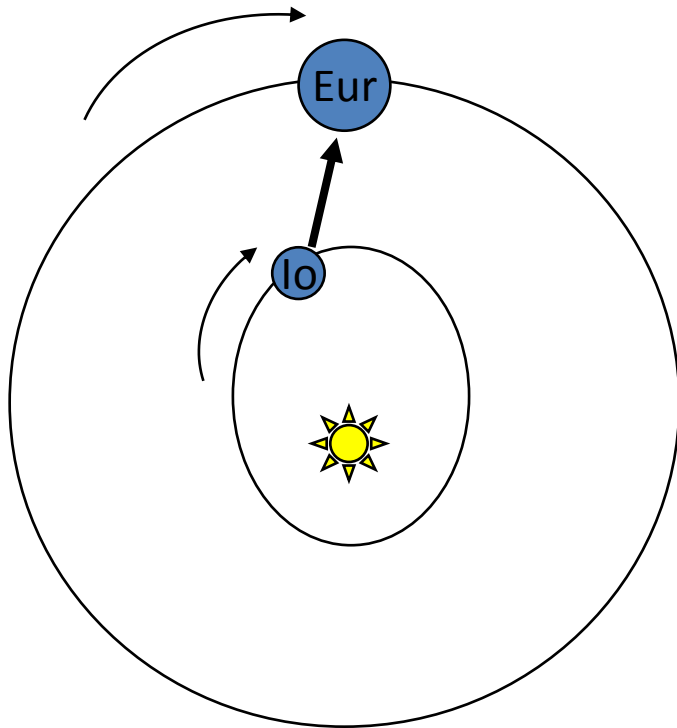


# Jupiter et ses 4 satellites « galiléens »

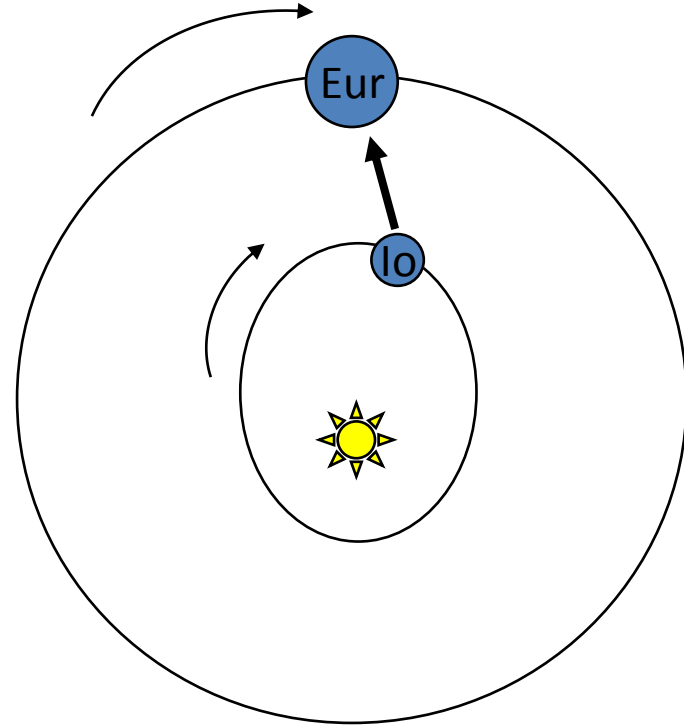


# Petites perturbations qui amènent les orbites en résonance

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

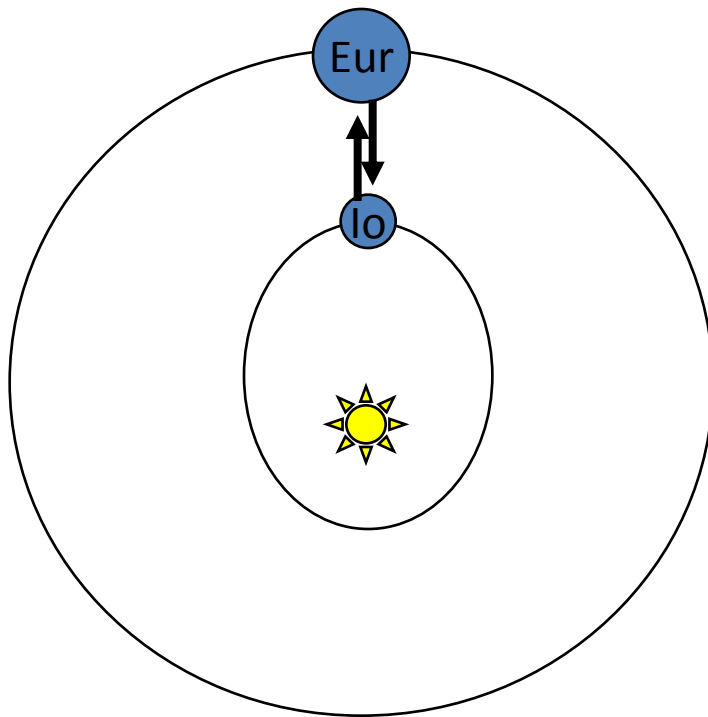
A la longue, les orbites s'ajustent pour atteindre la **résonance exacte 1:2**

# Accumulation de petites perturbations → modifier une orbite

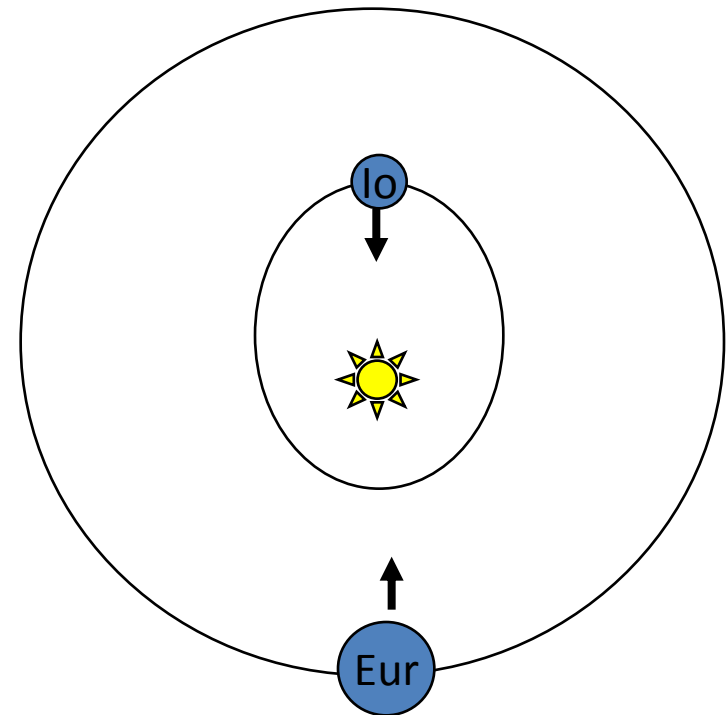
Exemple :

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

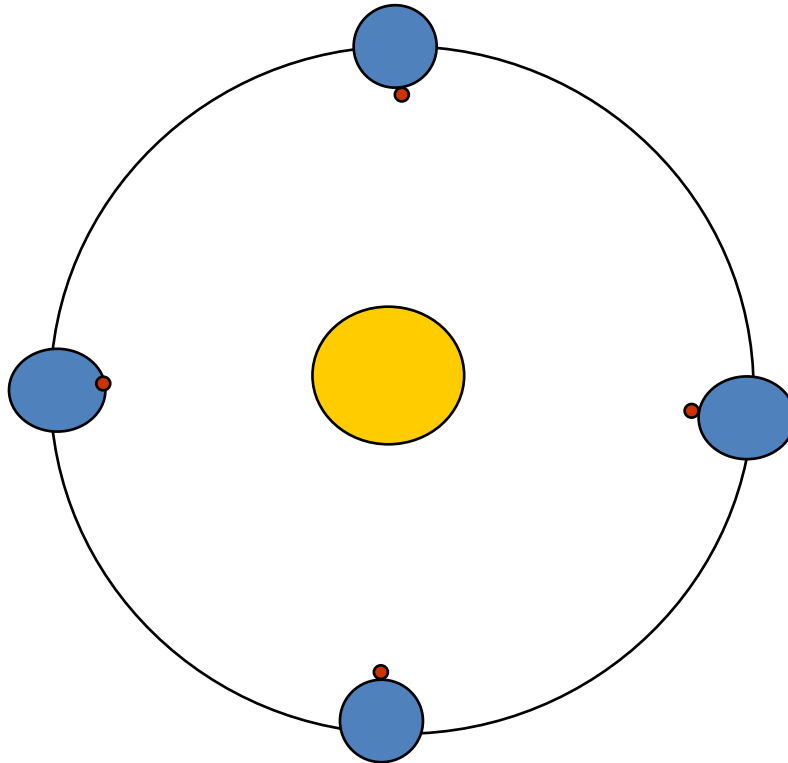
# Io, Europa, Ganymède : 3 satellites en « résonance »

	<b>Io</b>	<b>Europa</b>	<b>Ganymède</b>
Les rayons des orbites	a = 1	1,58	2,52
3 <sup>eme</sup> 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



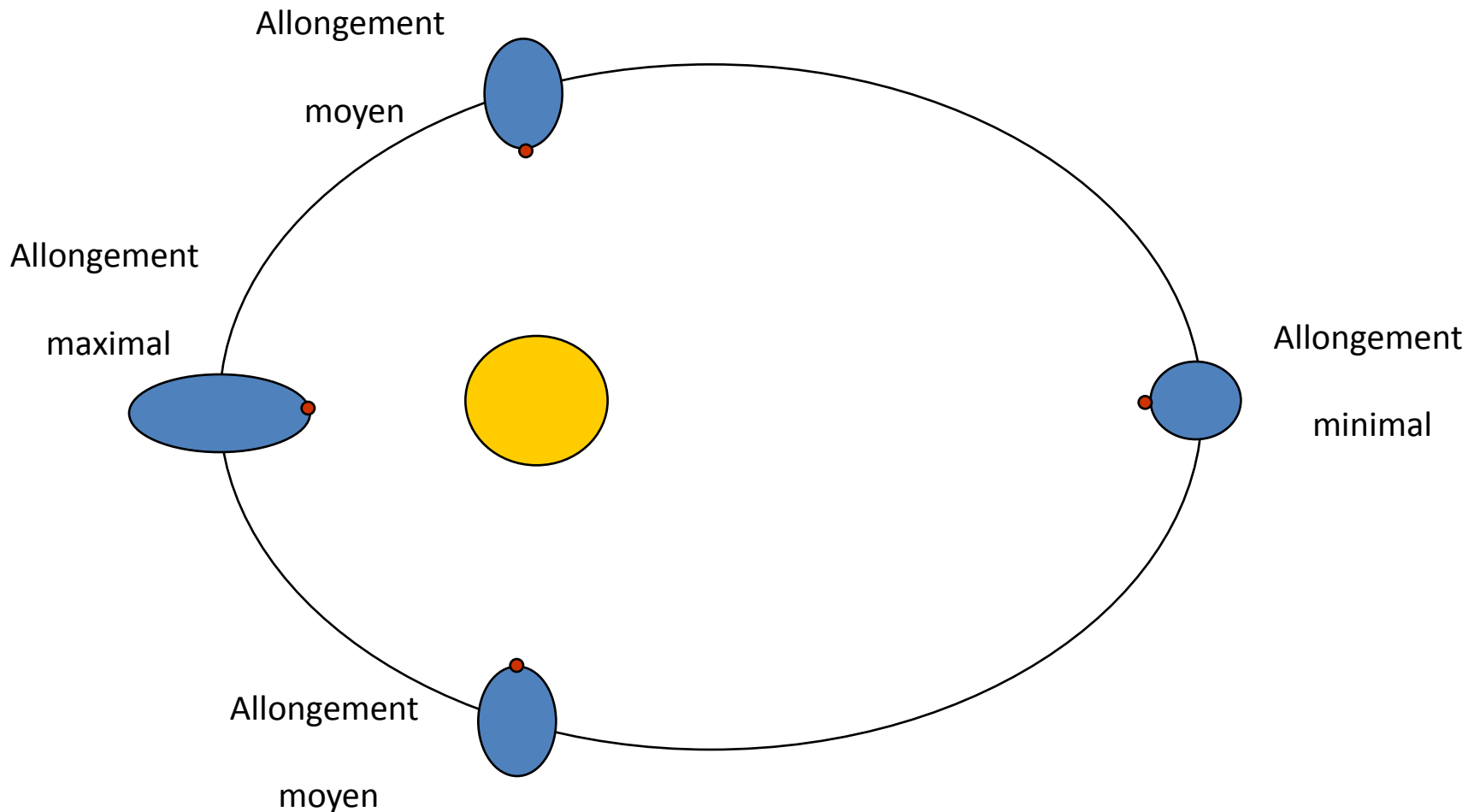
Comme la Lune  
Et la Terre

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

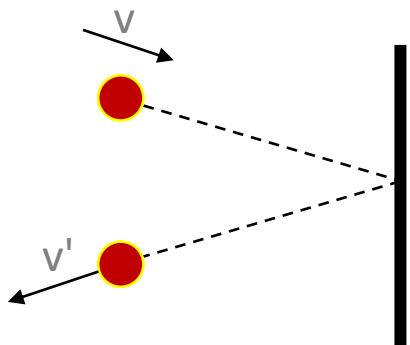
Amplitude ~ 100 m → Chaleur et volcans





Perturbation d'une orbite lors d'un passage proche

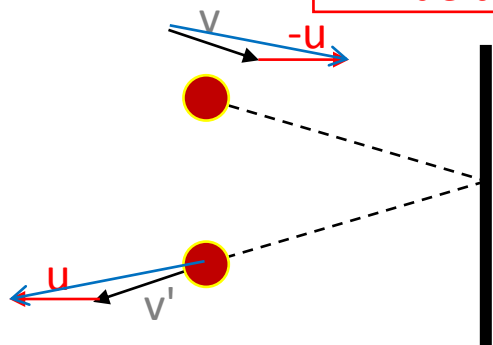
## Assistance gravitationnelle



Raquette immobile

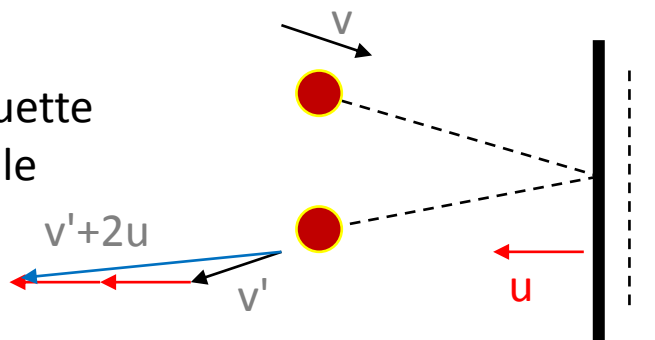
Dans un « rebond élastique » la vitesse change juste de signe

## 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  $V'+2u$

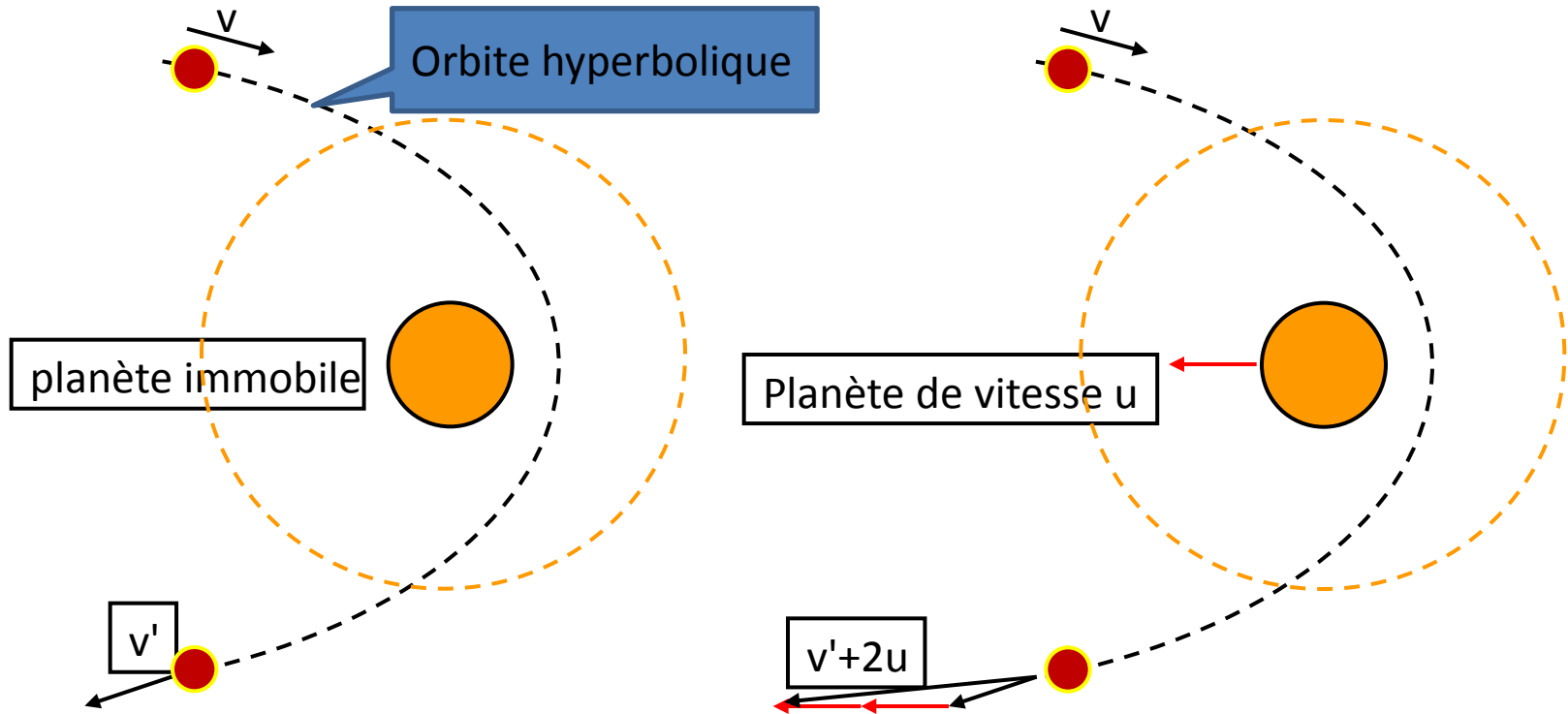


Raquette de vitesse  $u$

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

## Assistance gravitationnelle

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



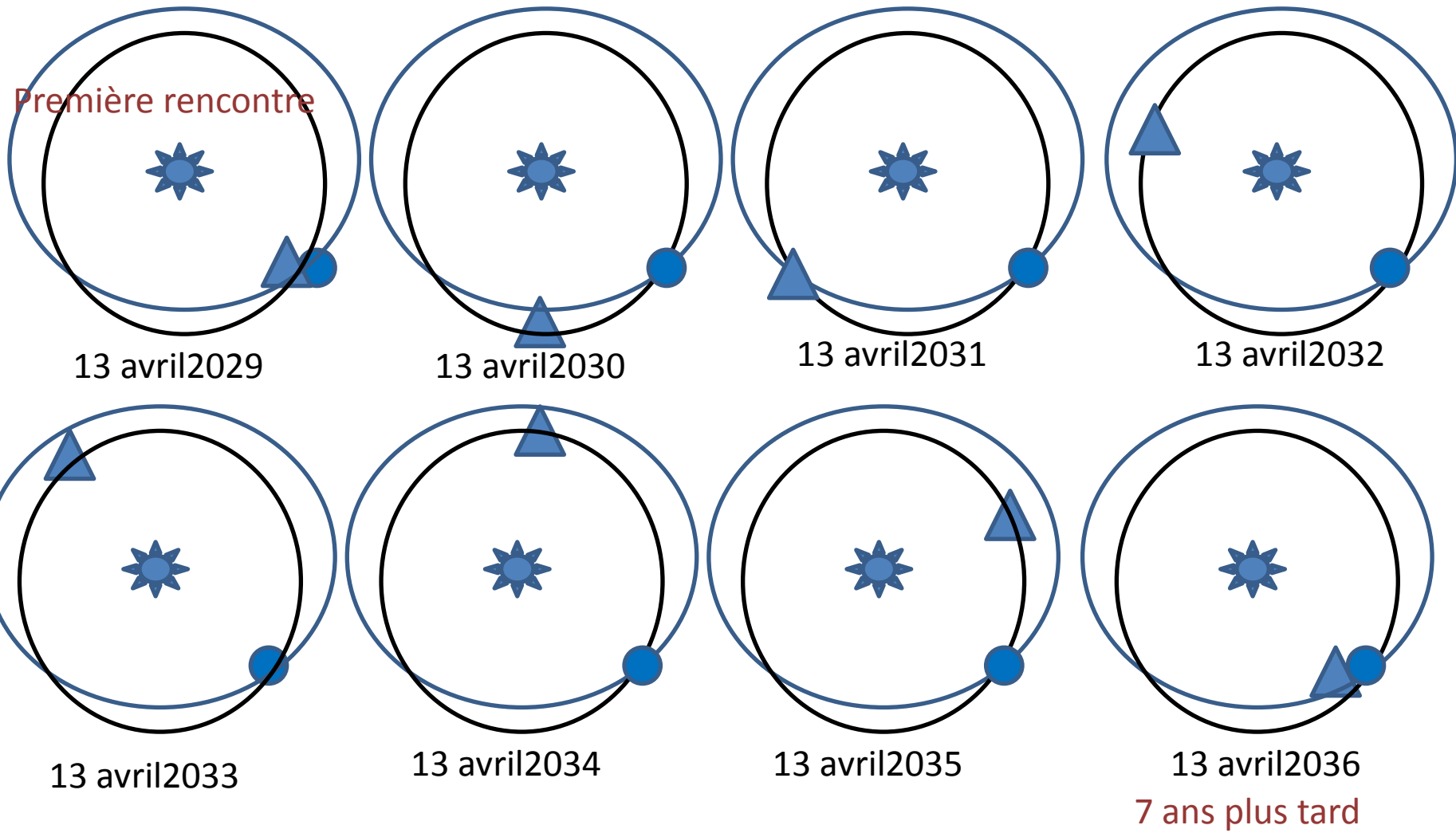
La différence : au lieu d'une collision, on a une orbite képlérienne dans la sphère d'influence gravitationnelle de la planète

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



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)

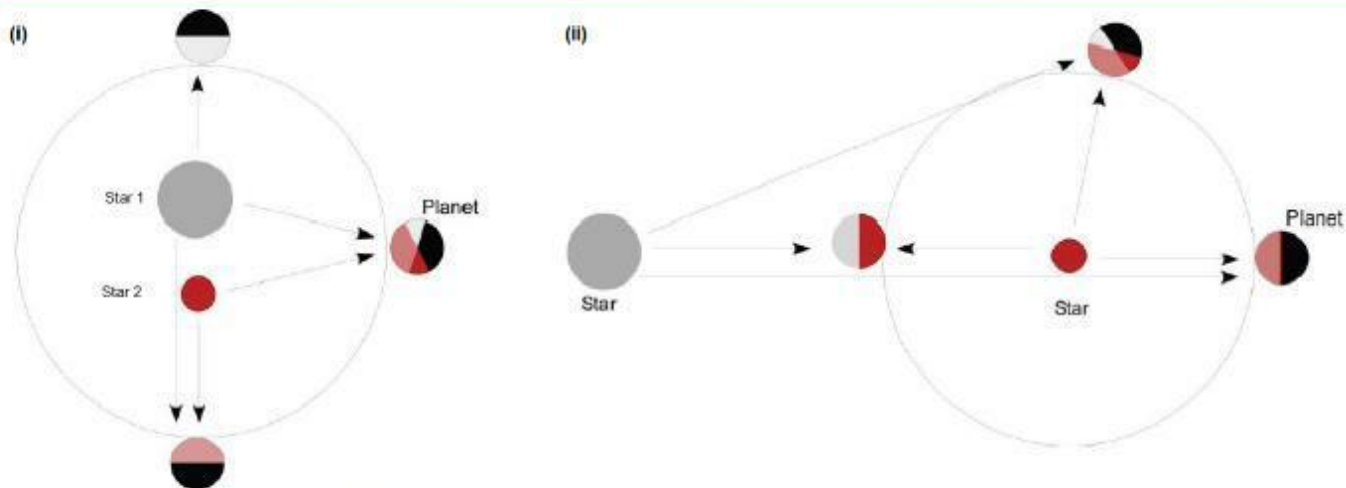
Protection des radiations : bouclier électromagnétique, magmas fluide

Effets de marée : source d'énergie,

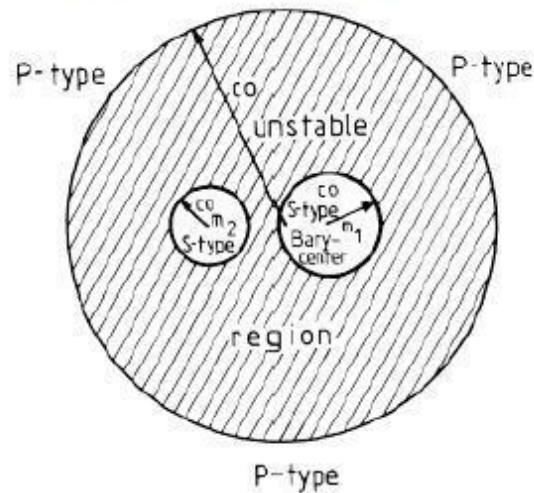
    tendance à la rotation synchrone

    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.



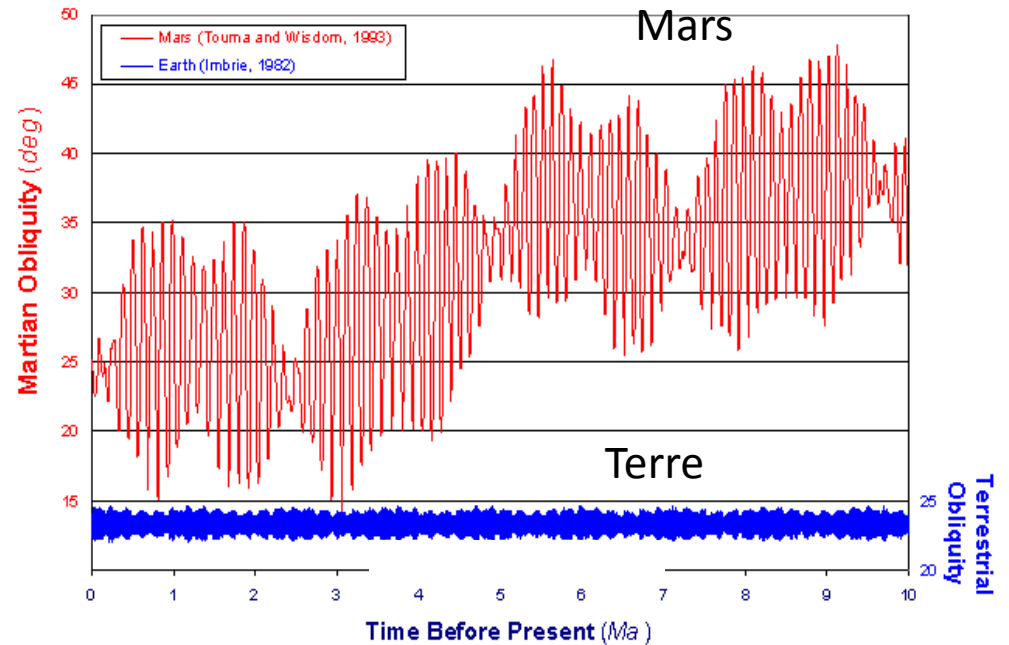
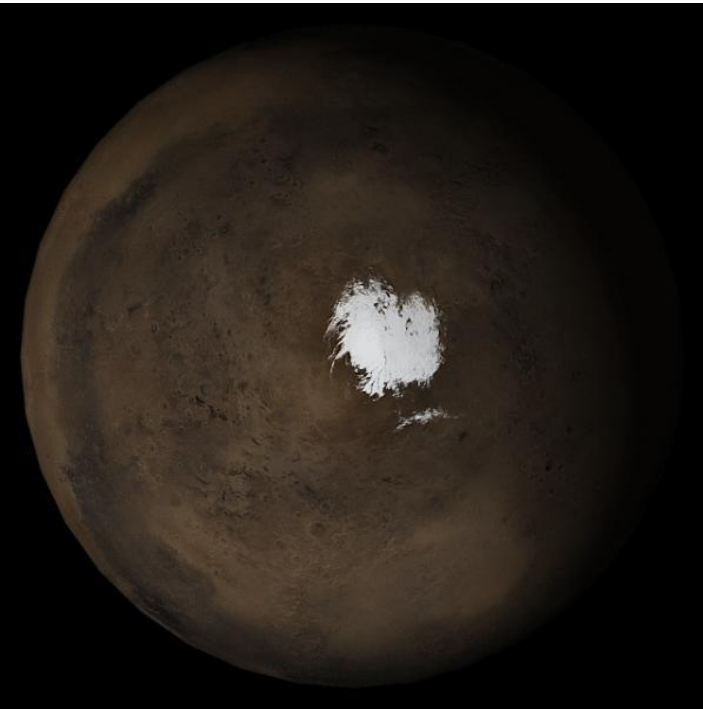
Stabilité  
des orbites

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

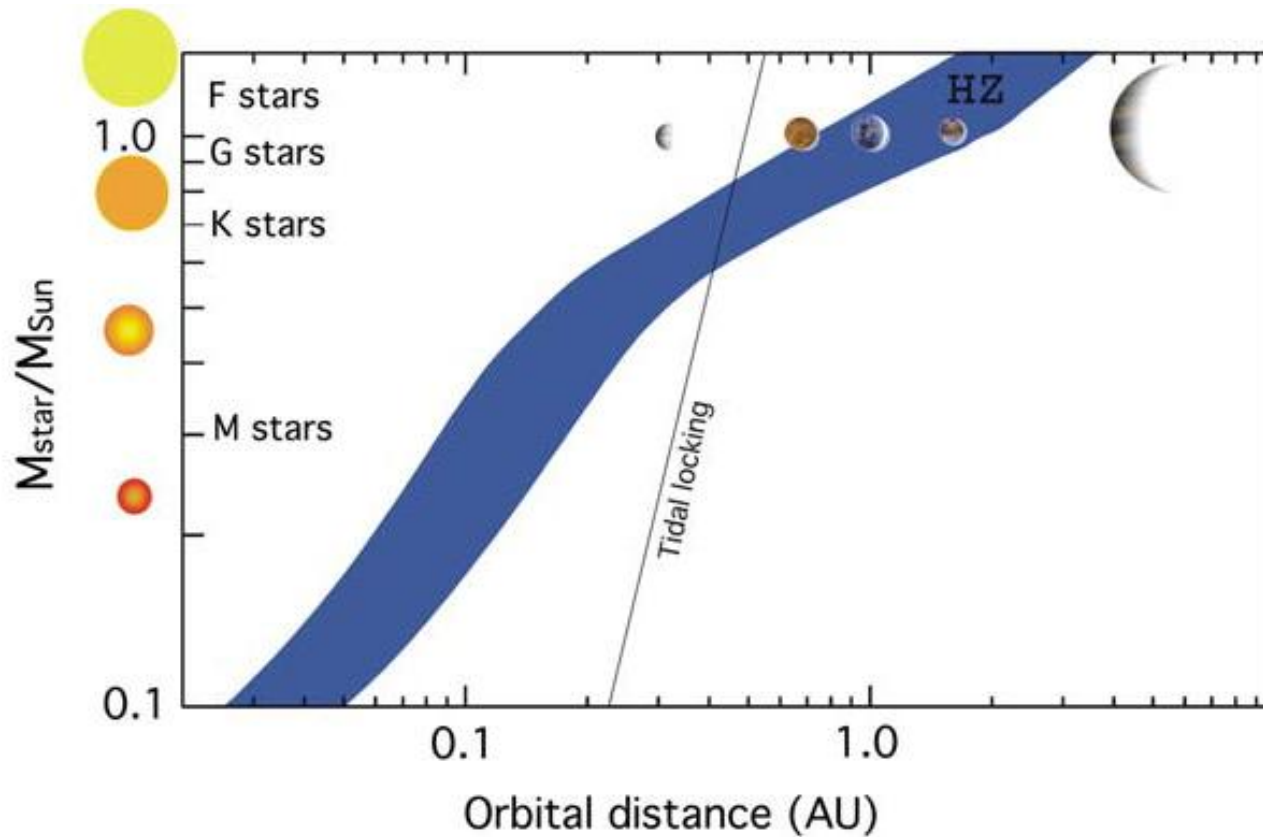


Aujourd'hui

Il y a 10 000 000 ans

# 4 classes de mondes habitables

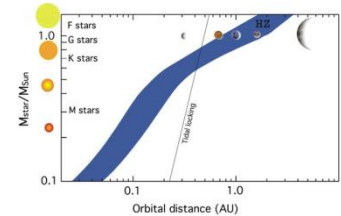
I : Comme la Terre : bien placée dans la zone habitable de l'étoile



# 4 classes de mondes habitables

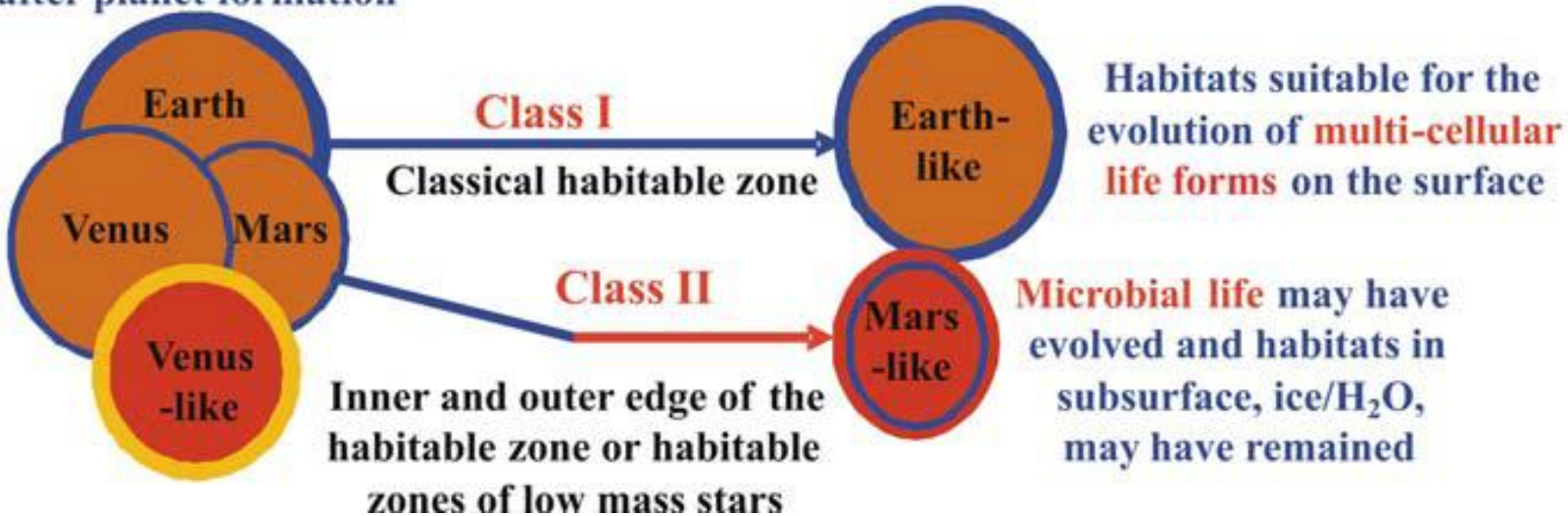
I : Terre : bien placé dans la zone habitable de l'étoile

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

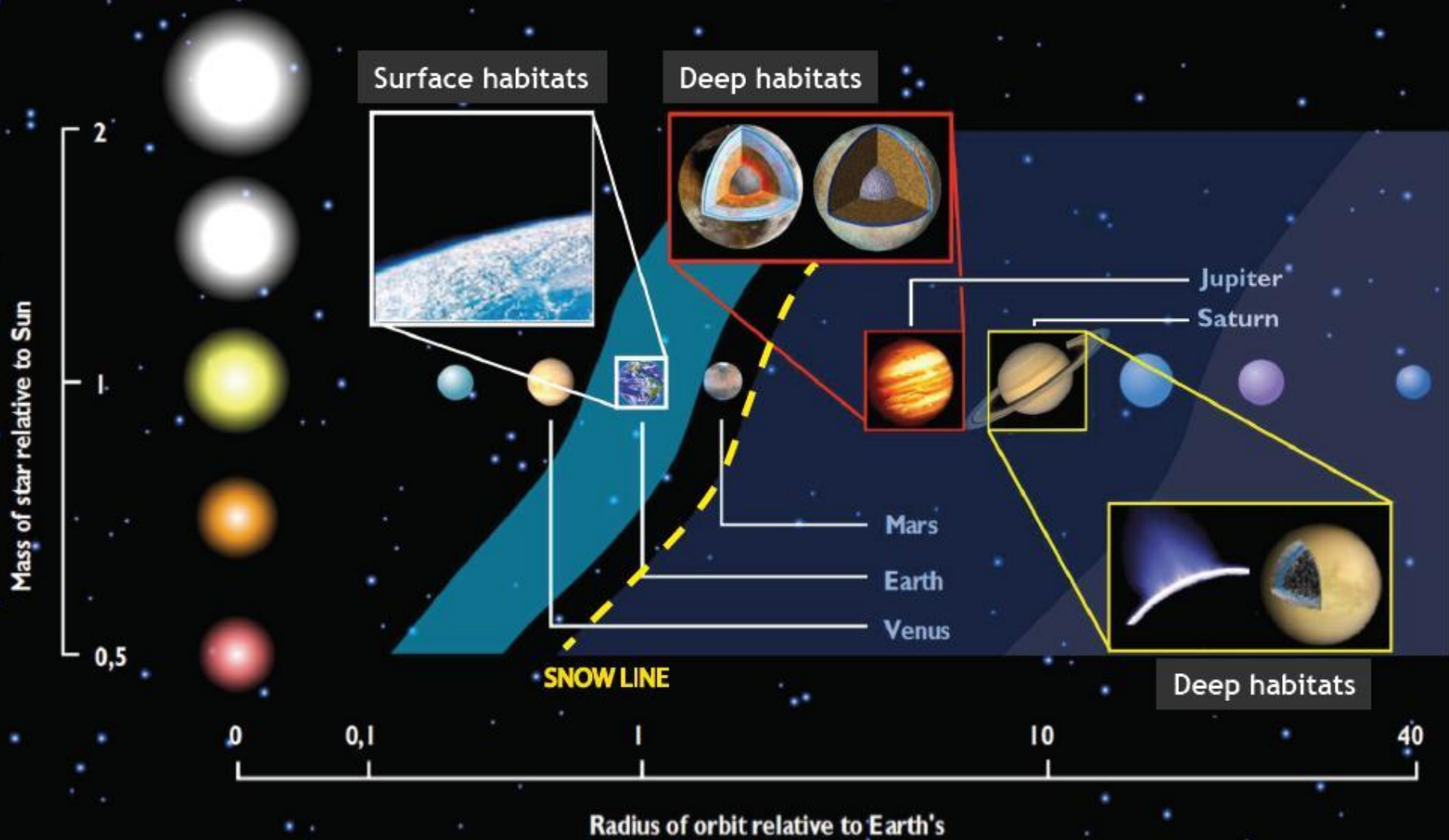


## Evolutionary time line

Water-rich bodies  
after planet formation



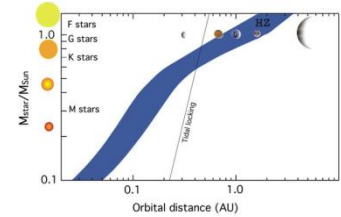
# Après les habitats de surface : les habitats profonds des mondes glacés



**INTERET CROISSANT POU LES « EXO-MOON »**

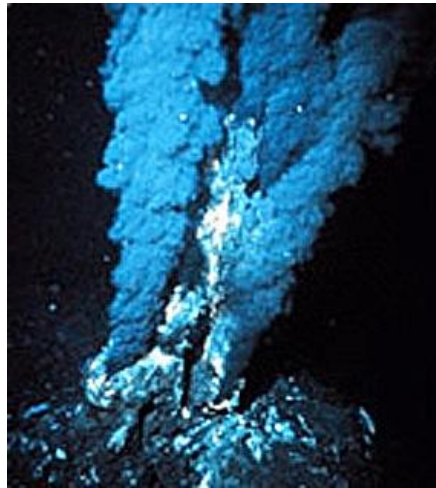
# 4 classes de mondes habitables

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

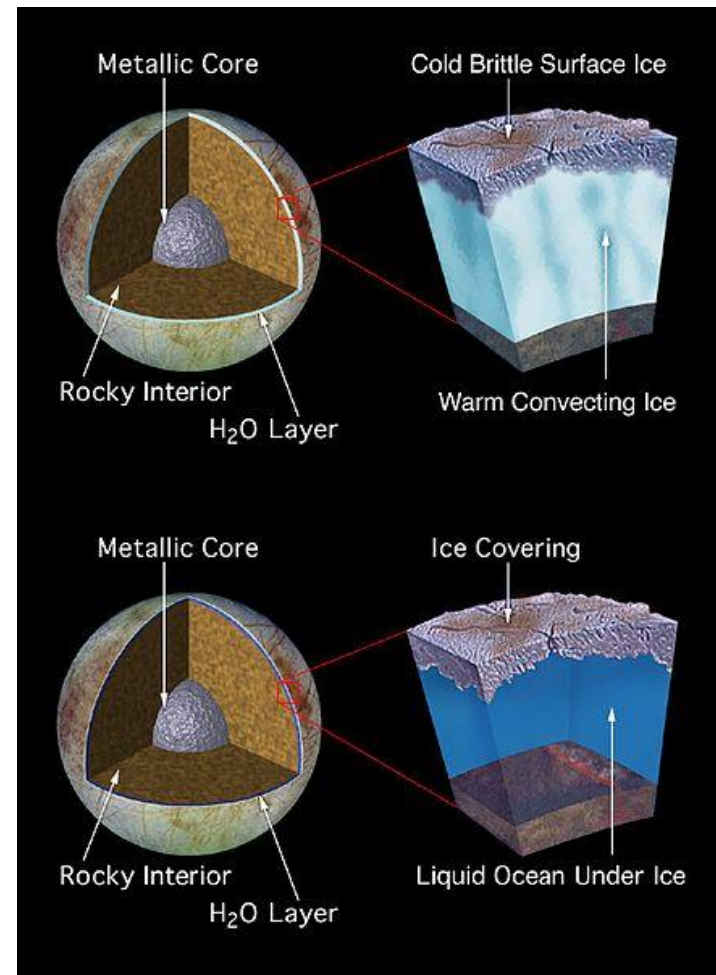
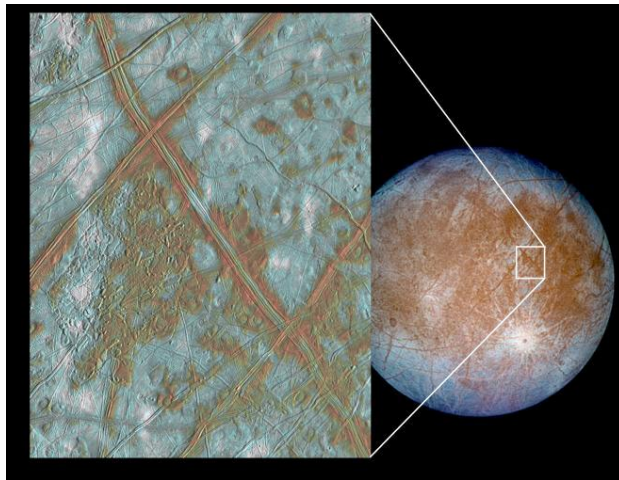


II : Etaient bien placées, mais ont évolué. Ex : Mars

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



Source d'énergie



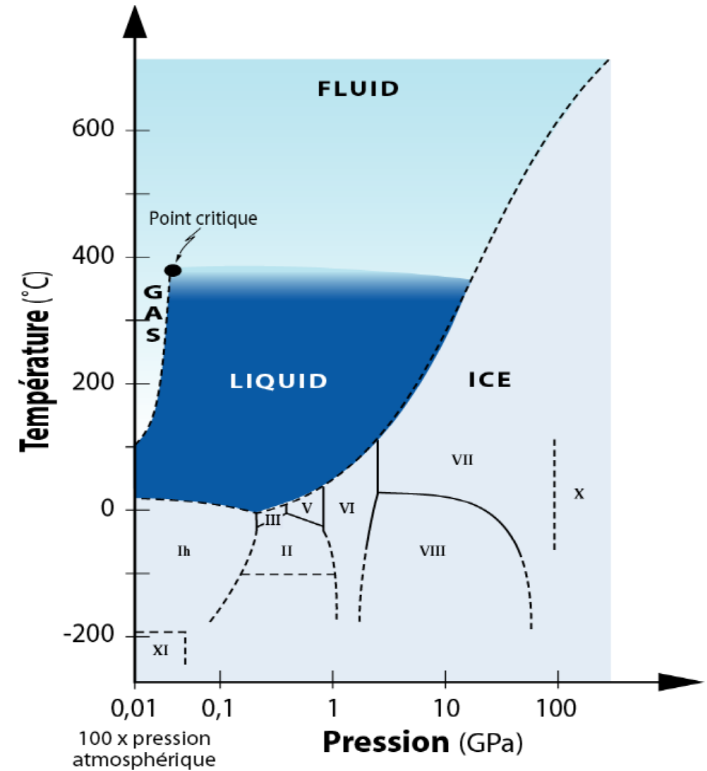
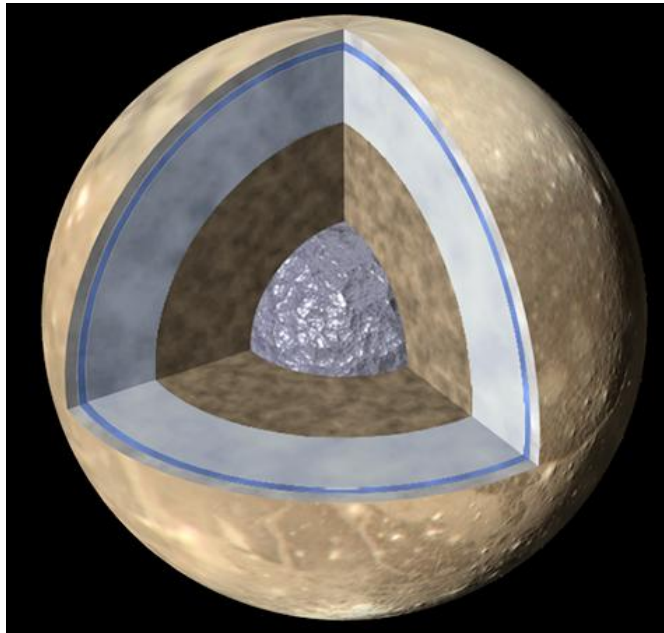
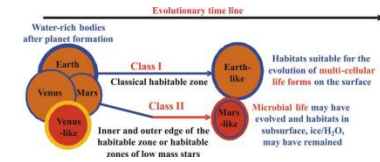
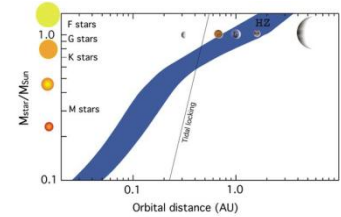
# 4 classes de mondes habitables

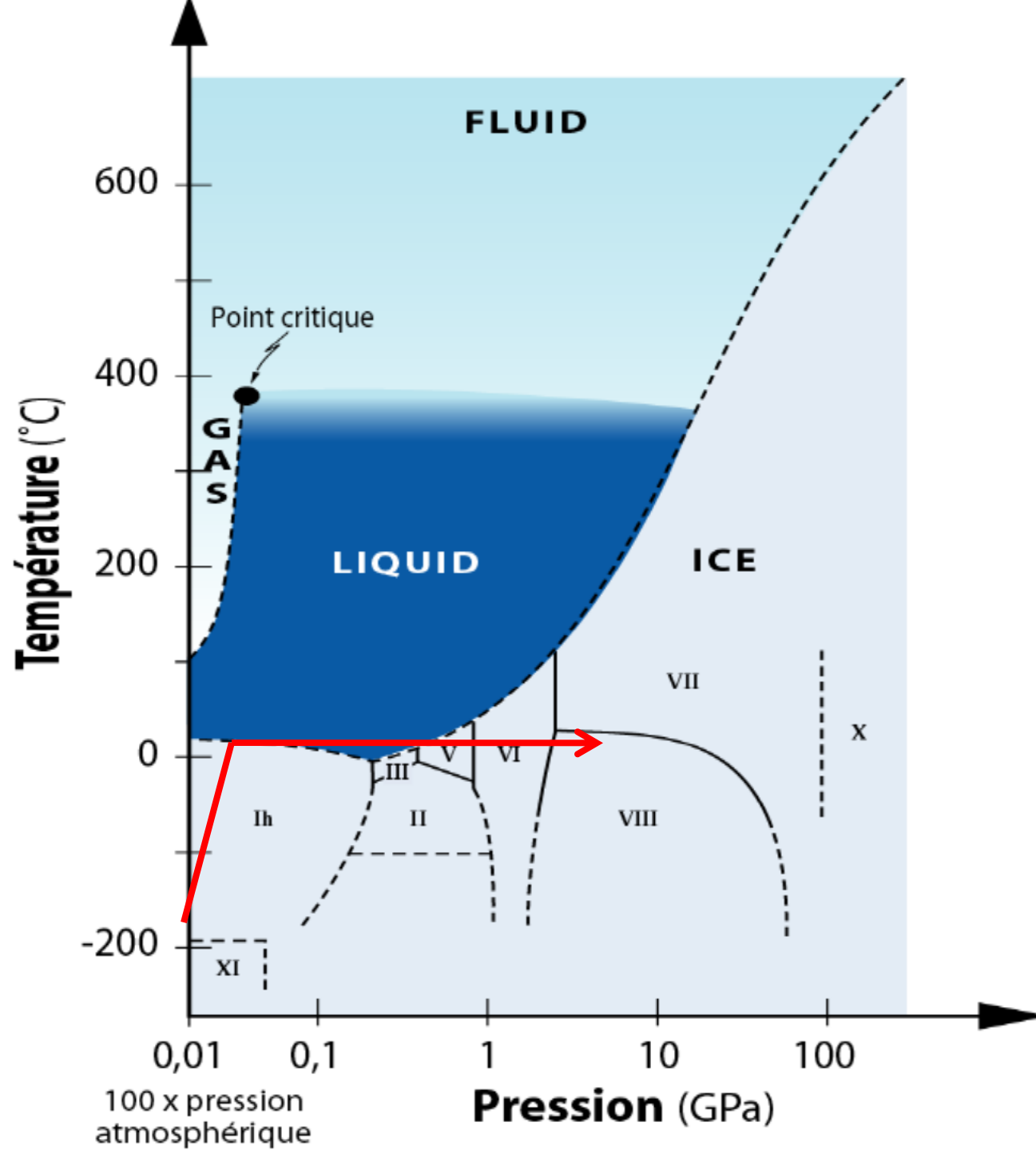
I : Terre : bien placé dans la zone habitable de l'étoile

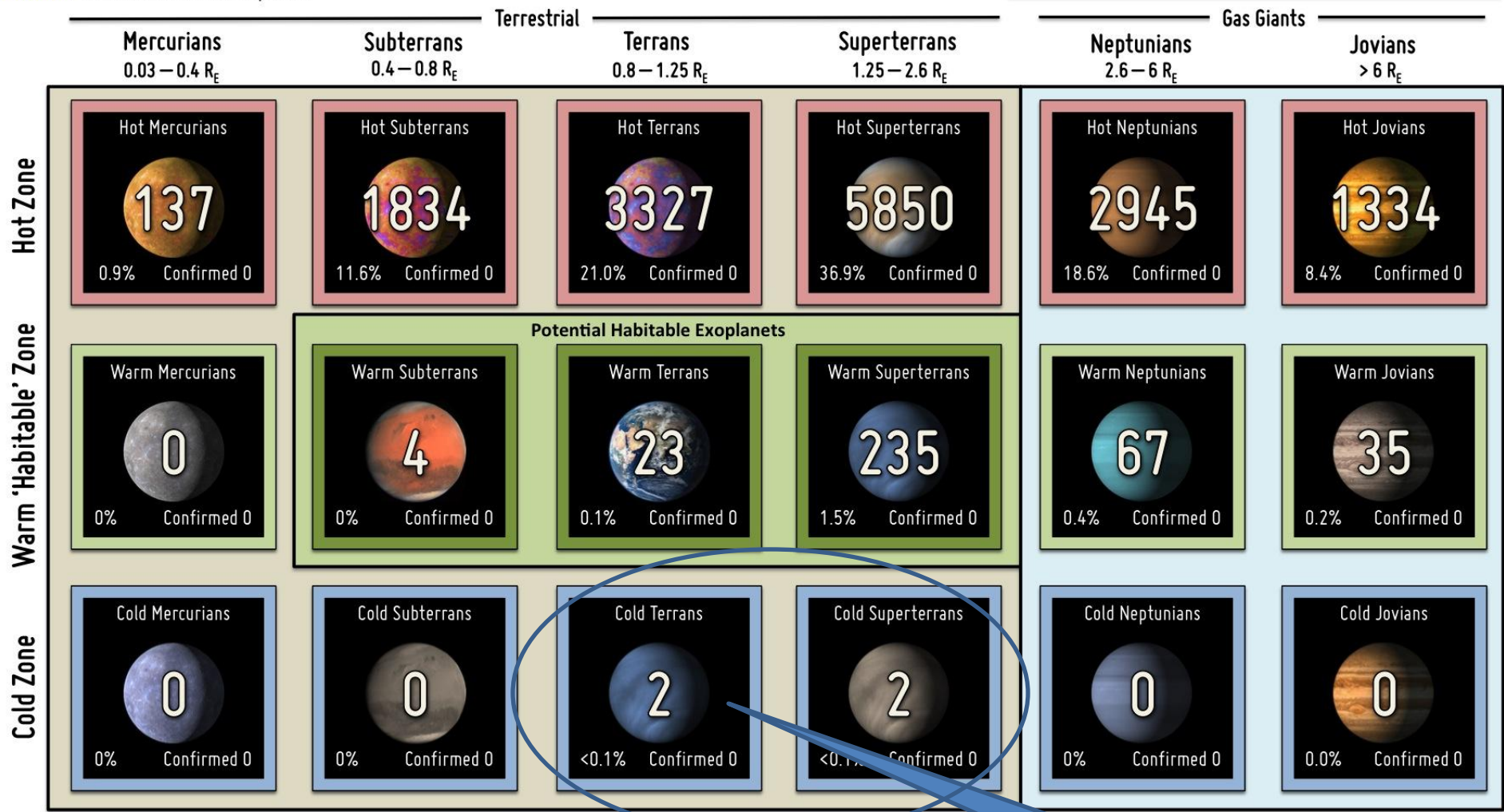
II : Etaient bien placées, mais ont évolué. Ex : Mars

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



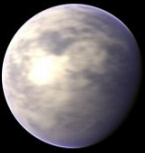
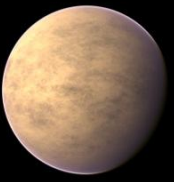
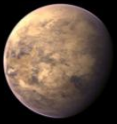
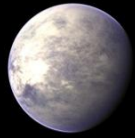
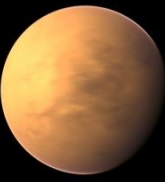
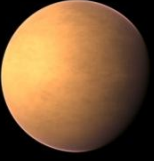
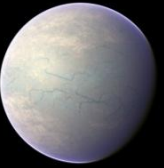
Pourraient être très abondantes



# 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

