

Cycle « Des planètes et des étoiles » : quatre conférences

1 – Le système solaire - description

2 – Formation du système solaire

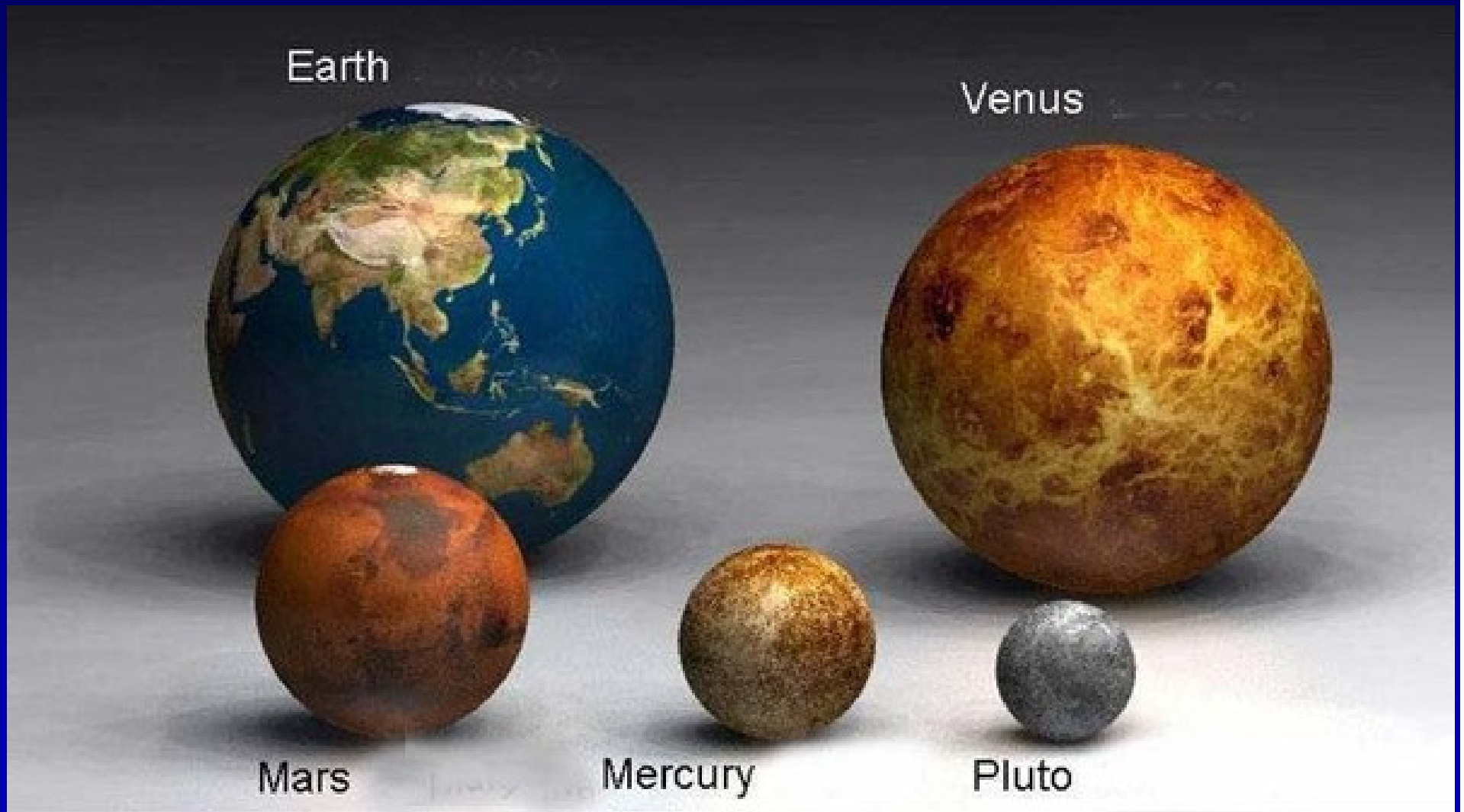
3 – Vie et mort des étoiles

4 – La vie ailleurs

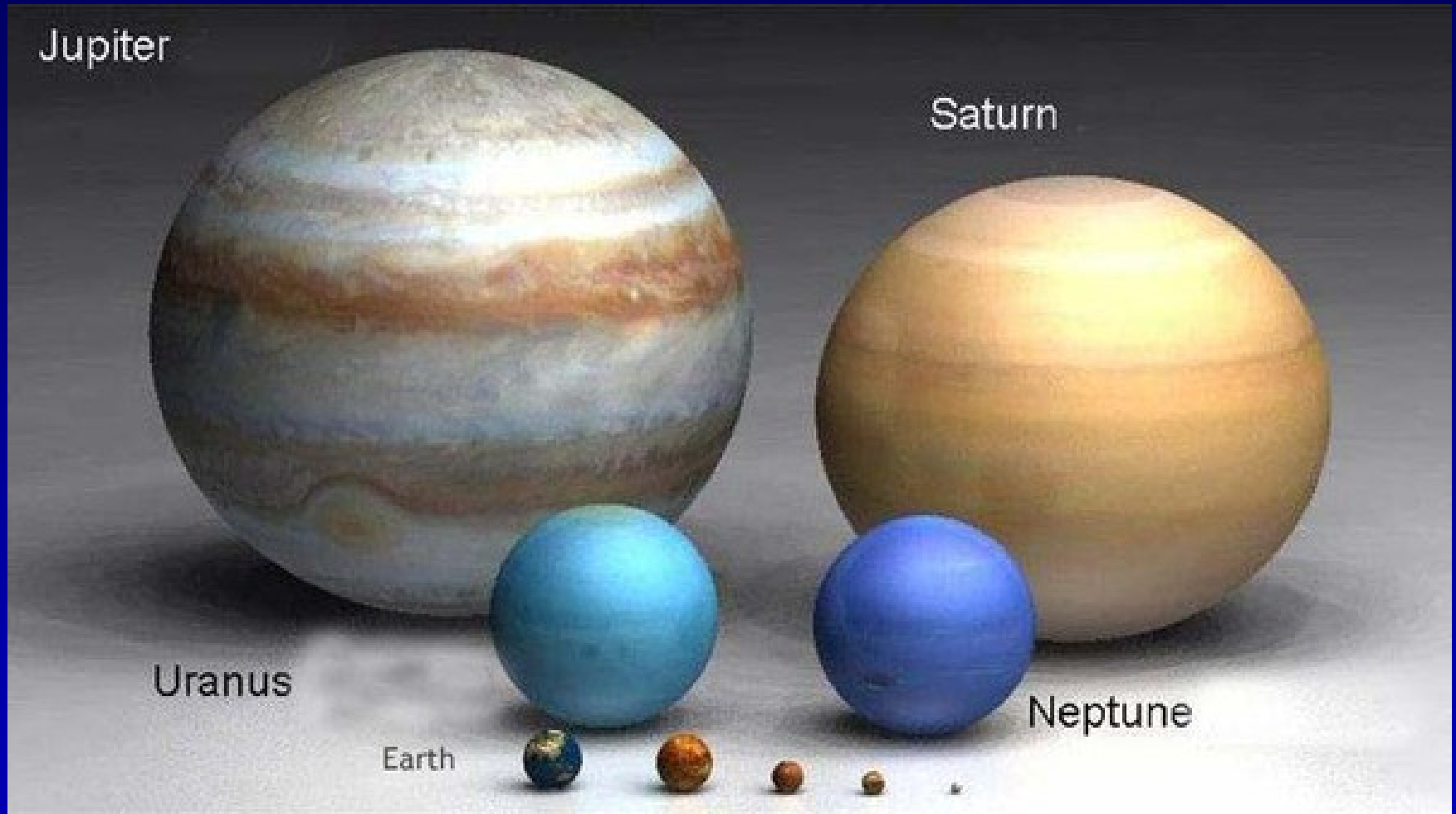
2 – Formation du système solaire

- Rappel des aspects du système solaire.
- Composants du système : éléments légers, éléments lourds.
- Comment les éléments se sont rassemblés, ou volatilisés.
- Conditions privilégiées sur la Terre.

Planètes telluriques



Planètes gazeuses



Familles de planètes

Soleil

1
2
3
4

Astéroïdes



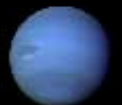
5



6



7



8

9

1-4 planètes telluriques, petites, denses (fer et roche), chaudes ;
- tournent lentement ou pas du tout autour de leur axe,
- peu de satellites,
- pas de champ magnétique.

5-8 planètes gazeuses géantes, enveloppées d'hydrogène (H₂) et d'Hélium (He), froides, peu denses ;
- ont une grande vitesse de rotation, des anneaux et beaucoup de lunes.

9 caillou, Pluton

Tailles et distances

	Diamètres terrestres	Distance du Soleil u.a.
Mercure	0.4	0.4
Venus	0.95	0.7
Terre	1 (= 12.740 km)	1 (= 150 M km)
Mars	0.5	1.5
Jupiter	11	5
Saturne	10	10
Uranus	4	20
Neptune (Pluton)	4 0.2	30 (40)
Lune	0.27	--
Soleil	109	--

Températures

	Diamètres terrestres	Températures (°C)
Mercure	0.4	+430/-180
Venus	0.95	465
Terre	1 (= 12.740 km)	+50/-80
Mars	0.5	0/-80
Jupiter	11	-150
Saturne	10	-170
Uranus	4	-200
Neptune (Pluton)	4 0.2	-210 (-220)
Lune	0.27	+105/-155
Soleil	109	5.600

Une grande diversité...

Mais à l'origine, quels matériaux trouve t-on dans l'espace?

Allons à la pêche avec un grand filet.

Horsehead Nebula



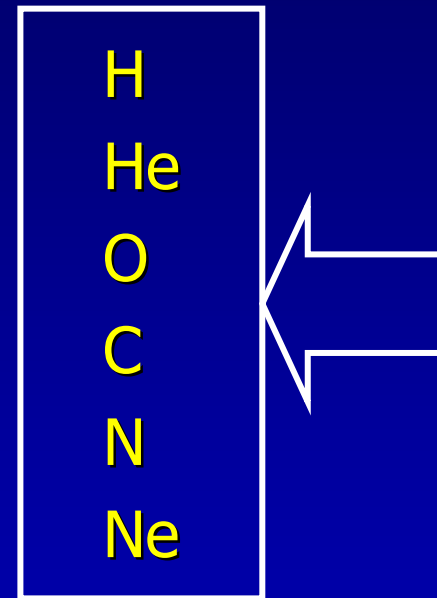
Hubble
Heritage

NASA, NOAO, ESA, and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA) • Hubble Space Telescope WFPC2 • STScI-PRC01-12

On trouve essentiellement 6 éléments :

Sur quelques 12.000 atomes :

10.000 sont d'hydrogène
1.400 sont d'hélium
7 sont d'oxygène
3 sont de carbone
1 est d'azote
~1 est de néon



<< 1 autres éléments (Mg, Si, S, Fe,...)

Six éléments

On les retrouve dans la composition

- du Soleil,
- des planètes géantes,
- des comètes,
- du corps humain,
- et des liquides plus répandus.

Les liquides

		Solide → liquide	liquide → gaz
H	H ₂ O	0 °C	100 °C
He			
O	NH ₃	-78 °C	-33 °C
C			
N	CH ₄	-182 °C	-161 °C
Ne	CO ₂	-78 °C →	Gaz
S	H ₂ S	-83 °C	-60 °C
Si	SiO ₂	1710 °C	

Origine des éléments

Quelle est l'origine des éléments chimiques ?

Pour l'hydrogène et l'hélium, on peut invoquer la 'théorie' du Big Bang.

Mais pas pour les autres...

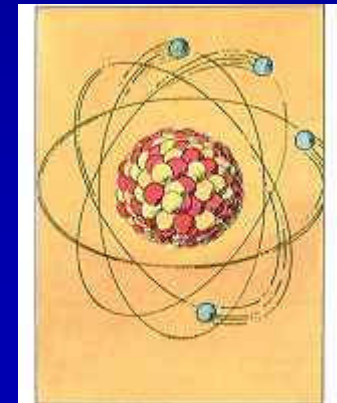
Le Big Bang (- 15.4 milliards d'années)

Après 3 minutes :

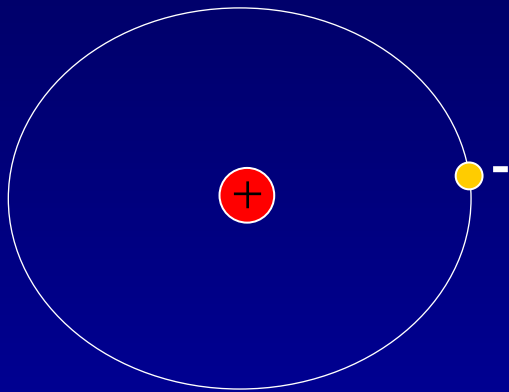
- les protons et neutrons peuvent former des noyaux atomique simples (=> 75% d'Hydrogène, 25% d'Hélium).
- il fait trop froid ($T \sim 1$ million $^{\circ}\text{C}$) pour la formation de noyaux plus complexes, et trop chaud pour que les électrons se fixent aux noyaux.

Après 300.000 ans ($T \sim 3000-4000$ $^{\circ}\text{C}$) :

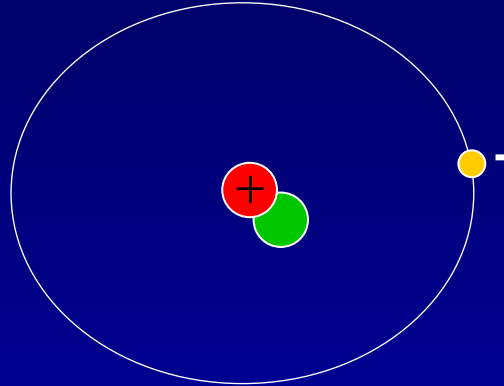
- les électrons complètent les atomes, et la lumière peut se propager dans l'espace (*fiat lux*).



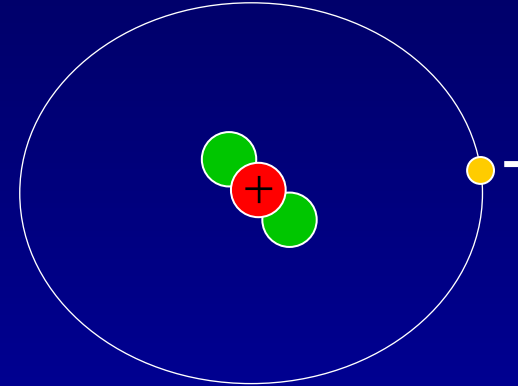
L'atome le plus simple (N = 1)



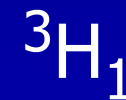
Hydrogène



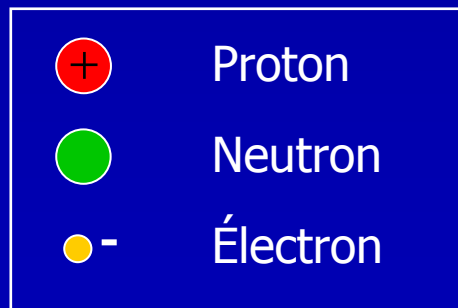
Deutérium



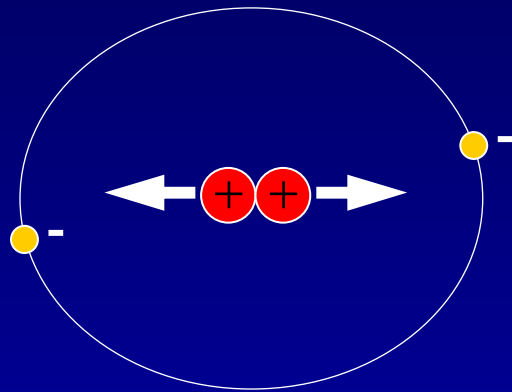
Tritium



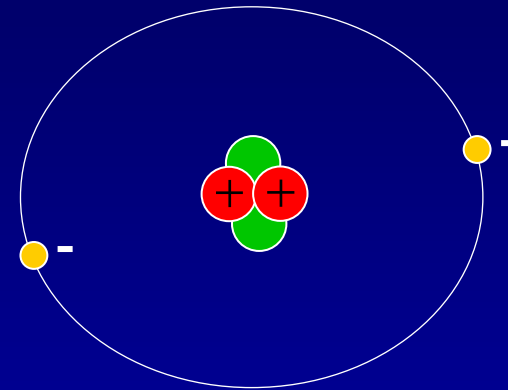
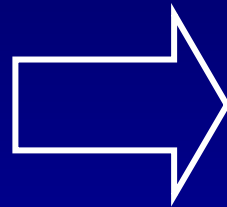
(Isotopes)



Hélium (N = 2)



Hélium...
(ne tient pas !)



Hélium
 ${}^4\text{He}_2$

	Proton
	Neutron
	Électron

Produits du Big Bang :

Hydrogène (75%)

Hélium (25 %)

Big Bang, la suite.

Après ~ 1 milliard d'années,

l'H et l'He se condensent en nébuleuses,

et naissent les étoiles de 1ère génération

Omniprésent : le mouvement de rotation



Taille des étoiles

Masses solaires	Luminosité	Durée de vie (années)
0.1	0.0001	10.000 milliards
0.5	0.04	125 milliards
1 (Soleil)	1	10 milliards
2	20	1 milliard
5	600	80 millions
10	5000	20 millions
50	1 000 000	500.000 ans

La fin des étoiles (après avoir brûlé tout l'hydrogène du noyau)

$M > 8 M_{\odot}$ → Supernova → nébuleuse résiduelle
(avec éléments lourds)

$M < 8 M_{\odot}$ → Géante rouge → naine blanche +
résidus légers

Supernovae : 3 / 100 ans dans notre galaxie,

(=> 240 millions de s-novae en 12 milliards d'années,
de quoi fabriquer des millions de systèmes solaires).



La forge des étoiles



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORS2)



Milky Way =>

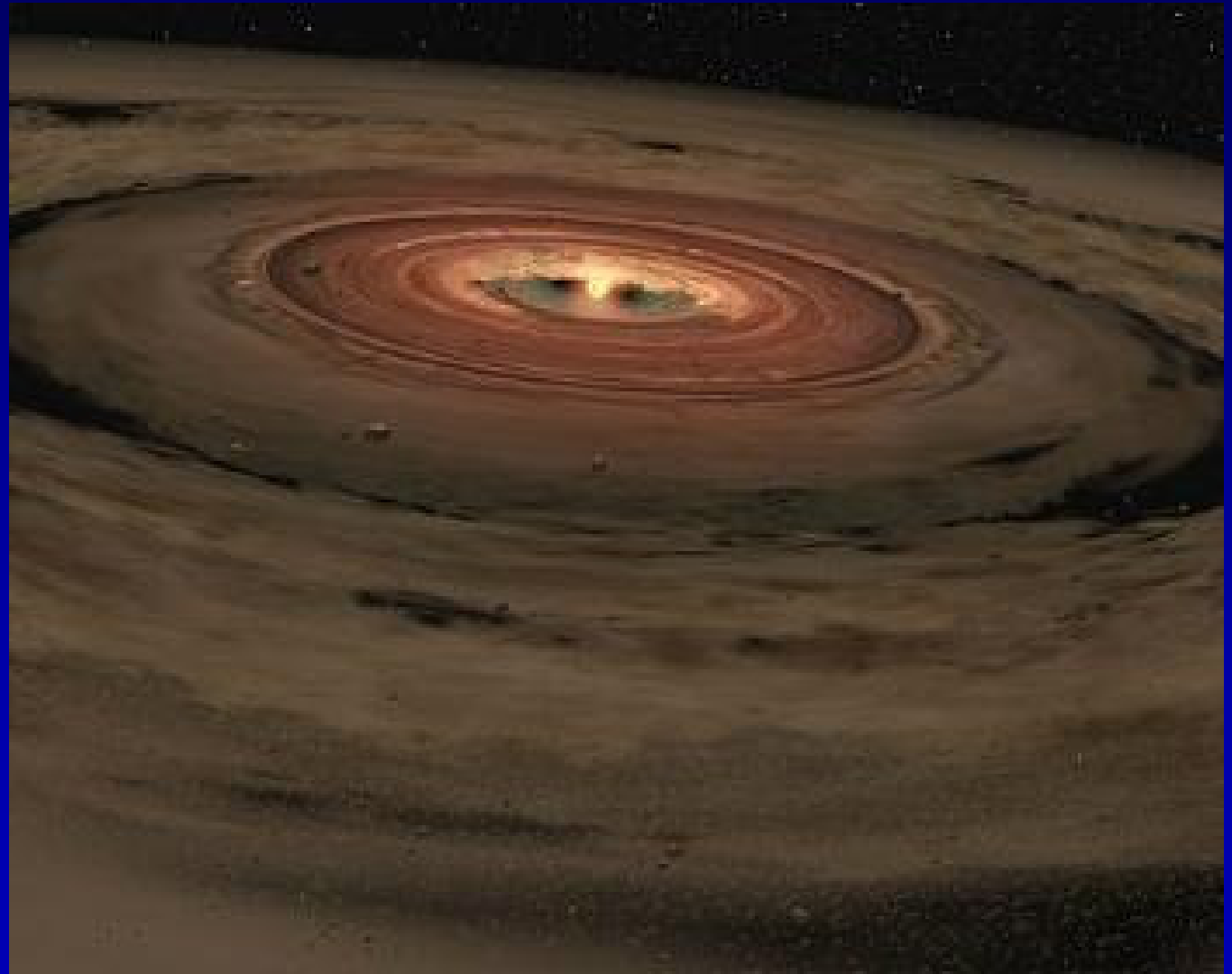


Nuage opaque

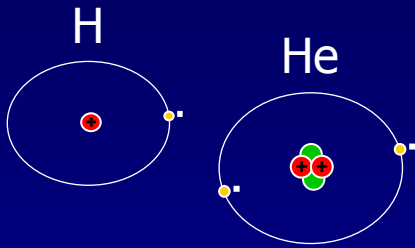


Nouveau carrousel => disque proto-planétaire

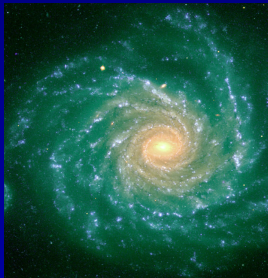
Parfois un nuage de poussière, frappé par l'onde de choc d'une explosion à proximité, se condense à son tour par gravité, en tournant autour d'un centre qui se réchauffe.



Résumé – 1ère partie



De l'hydrogène et de l'hélium se forment à un stade précoce du Big Bang.



Par attraction gravitationnelle, les éléments primaires forment des nébuleuses, et à l'intérieur de celles-ci, des étoiles.

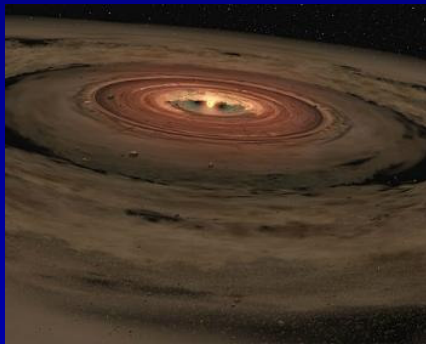


Les étoiles plus grandes, une fois consommé leur combustible (H), collapsent (implosion + explosion), produisant tous les autres éléments chimiques.

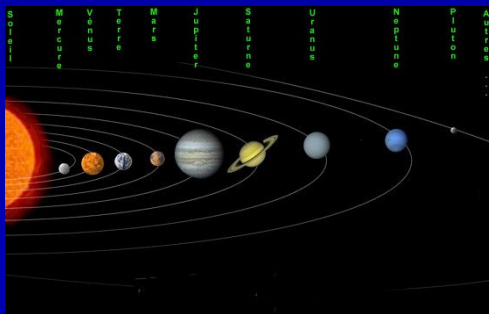
Résumé – 1ère partie



Le produits des explosions, toujours riches en H et He, peuvent se condenser à leur tour,



en produisant un disque proto-planétaire, au centre duquel un, ou deux, soleils commencent à briller.



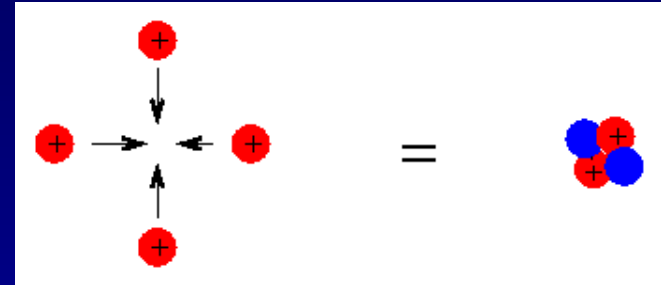
Autour du soleil, de corps de toute taille : astéroïdes, comètes, planètes et satellites.

Il y a 4.8 milliards d'années le Soleil entre en activité.

Le centre du disque atteint le seuil de la fusion nucléaire de l'hydrogène



~ 10 millions de degrés
et 100 million d'atmosphères.

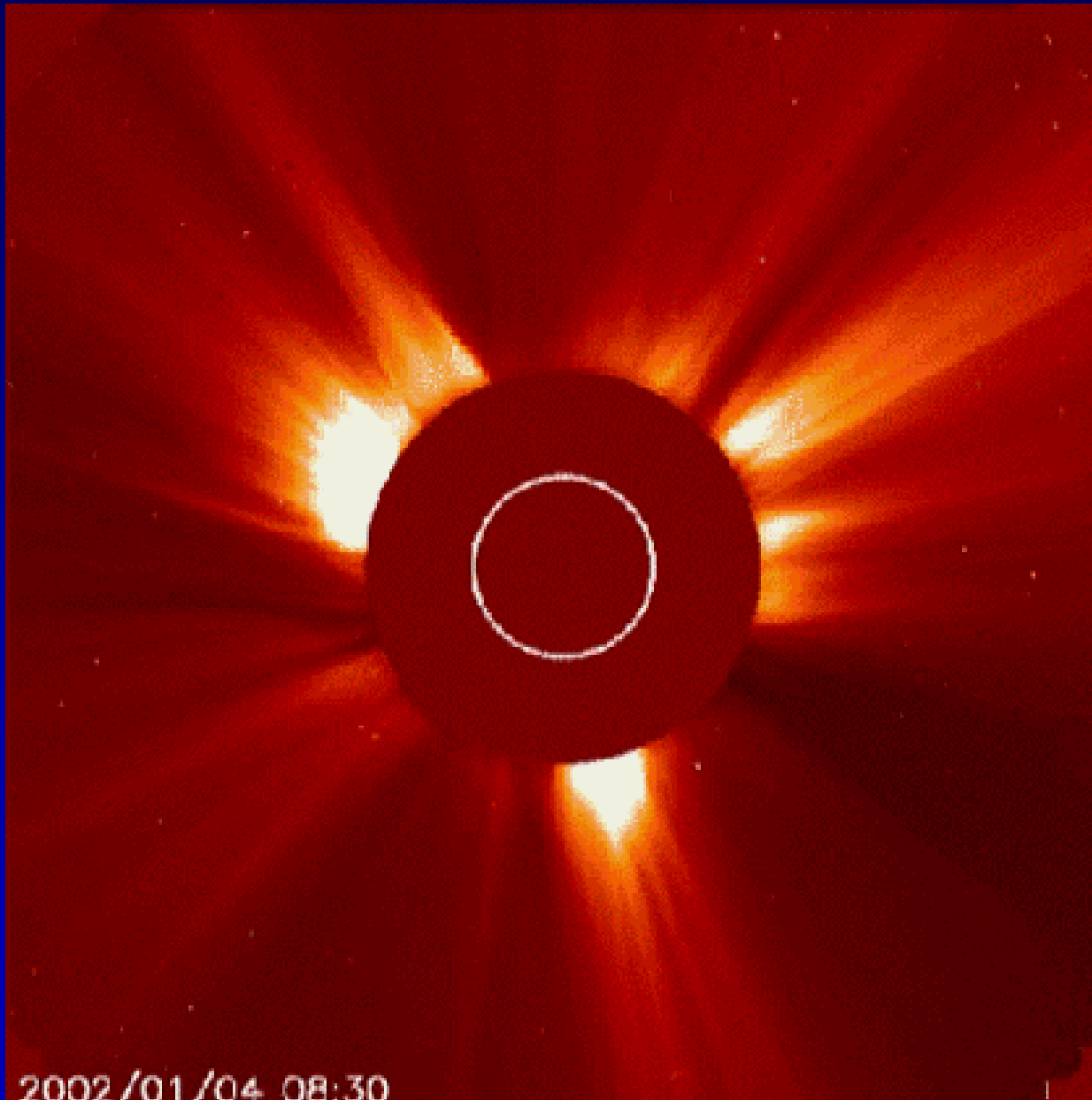


Conséquences

- Les planètes plus proches du Soleil (Mercure, Venus, la Terre et la Lune, Mars), sous l'action de la chaleur *, sont privées des composants plus légers (H, He, H₂O, etc.).
- Le vent solaire commence à repousser le gaz interplanétaire vers la périphérie du système.

* Constante solaire 1.35 kW/m²

Le vent solaire



Conséquences...

Les planètes plus éloignées,
Jupiter, Saturne, Uranus, Neptune :

- ont plus de temps pour accroître leur masse (avant que le gaz interplanétaire ne soit éloigné) ;
- ont des températures beaucoup plus basses, de -150 à -200 °C, et retiennent les composants volatiles (H, He).
- Uranus et Neptune sont plus petites; les collisions sont plus rares; il fait plus froid.

Conséquences...

A un certain moment (après ~ 100 millions d'années ?)
le processus d'accrétion des planètes cesse :

- il n'y a plus de gaz interplanétaire
- il n'y a plus, ou bien moins, d'impacts de météorites et de comètes.

Les restes, des boules de sable et glace, vont s'accumuler à la périphérie du système solaire, à des centaines d'u.a. : ceinture de Kuiper et nuage d'Oort, réservoirs de comètes.

Perte d'un gaz de la part d'une planète

Vitesse de libération = vitesse minimale pour qu'un objet puisse quitter le champ gravitationnel d'un astre :

Perte d'un gaz de la part d'une planète

Vitesse de libération = vitesse minimale pour qu'un objet puisse quitter le champ gravitationnel d'un astre :

Mercure	4.2	km/s
Venus	10.3	km/s
Terre	11.2	km/s
Mars	5	km/s
Lune	2.4	km/s

Jupiter	59.5	km/s
Saturne	35.5	km/s
Uranus	21.3	km/s
Neptune	23.7	km/s
Soleil	620	km/s

Vitesse moyenne $\langle v \rangle$ des
molécules d'un gaz à 25 °C :

Vitesse moyenne $\langle v \rangle$ des molécules d'un gaz à 25 °C :

	$\langle v \rangle$	
H ₂ (2)	1.8	km/s
He (4)	0.7	km/s
N ₂ (28)	0.47	km/s
O ₂ (32)	0.35	km/s

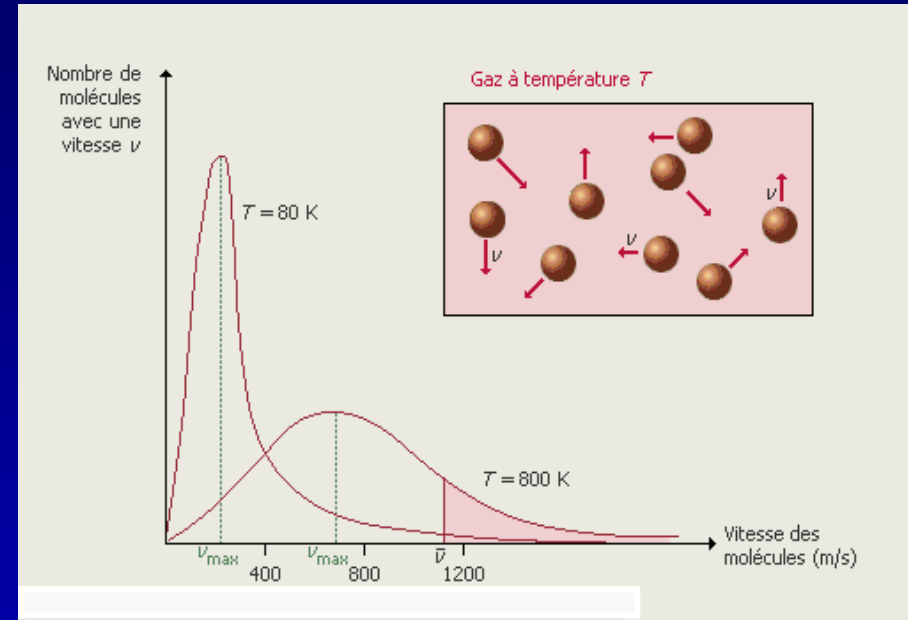
	$\langle v \rangle$	
H ₂ O (18)	0.59	km/s
CO ₂ (12+32)	0.4	km/s
CO (28)	0.47	km/s
CH ₄ (16)	0.6	km/s

Quand 6 x vitesse moyenne dépasse la vitesse de libération (pour une planète donnée), le gaz finit par s'échapper de la planète;

et le liquide correspondant s'évapore et s'échappe aussi.

Exemple de l'hydrogène

1. H à 6000 degrés (Soleil)
 $\langle v \rangle = 11.5 \text{ km/s}$
 $v_e = 600 \text{ km/s}$
2. H₂ à 1000 °C (ionosphère)
 $\langle v \rangle = 5.4 \text{ km/s}$
 $v_e = 11.2 \text{ km/s}$
3. H₂ à -100 °C (Saturne)
 $\langle v \rangle = 1.1 \text{ km/s}$
 $v_e = 35.5 \text{ km/s}$



{ Un gaz quitte une planète quand $\sqrt{6} \langle v \rangle$ excède v_e } :

l'hydrogène peut quitter la Terre, mais non Saturne ni le Soleil.

Résumé – 2ème partie

Le Soleil « s'allume », tandis que les proto-planètes s'agrègent pour former des planètes.

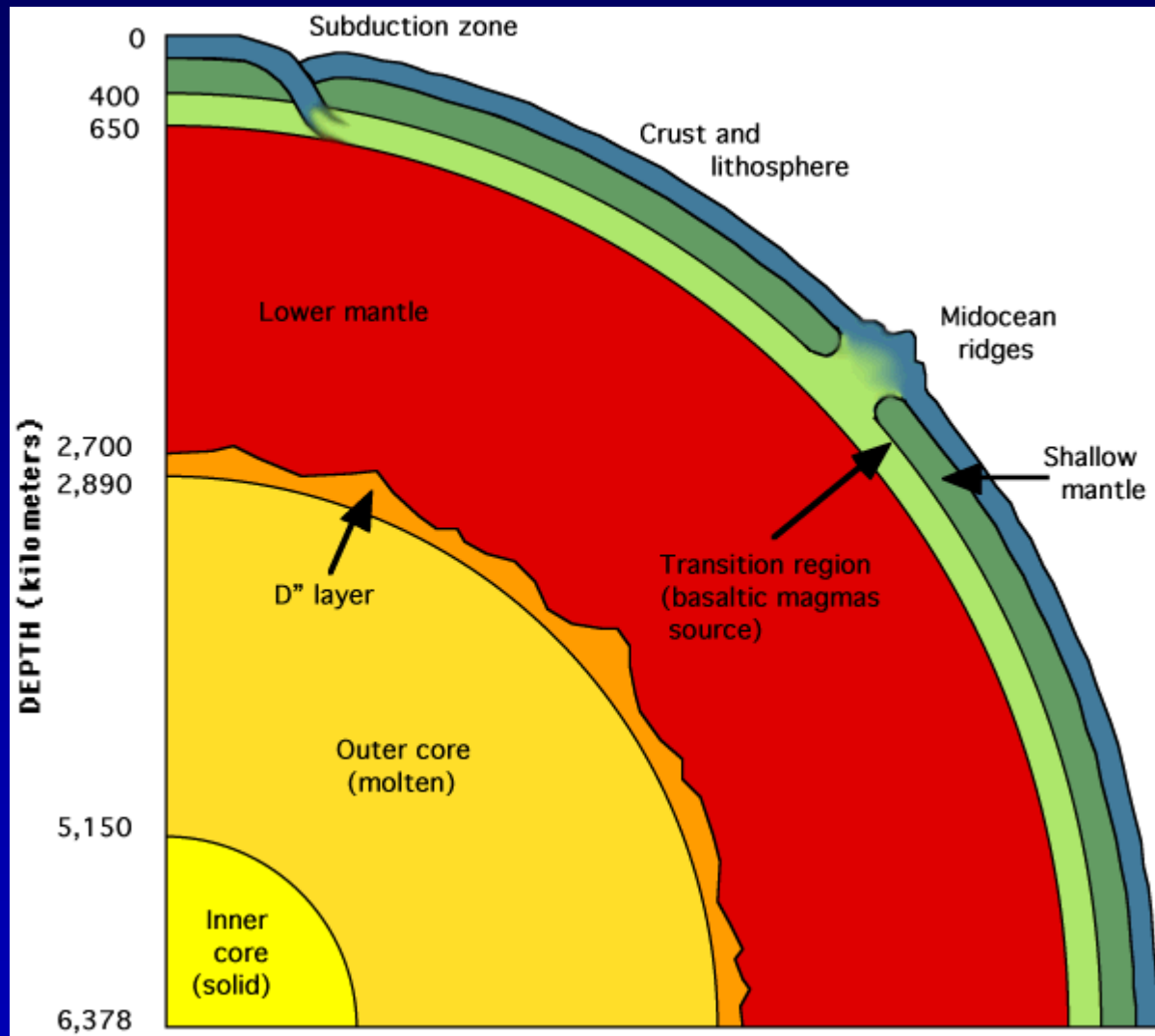
Le vent solaire commence à éloigner le nuage de gaz.

La pluie de météorites diminue.

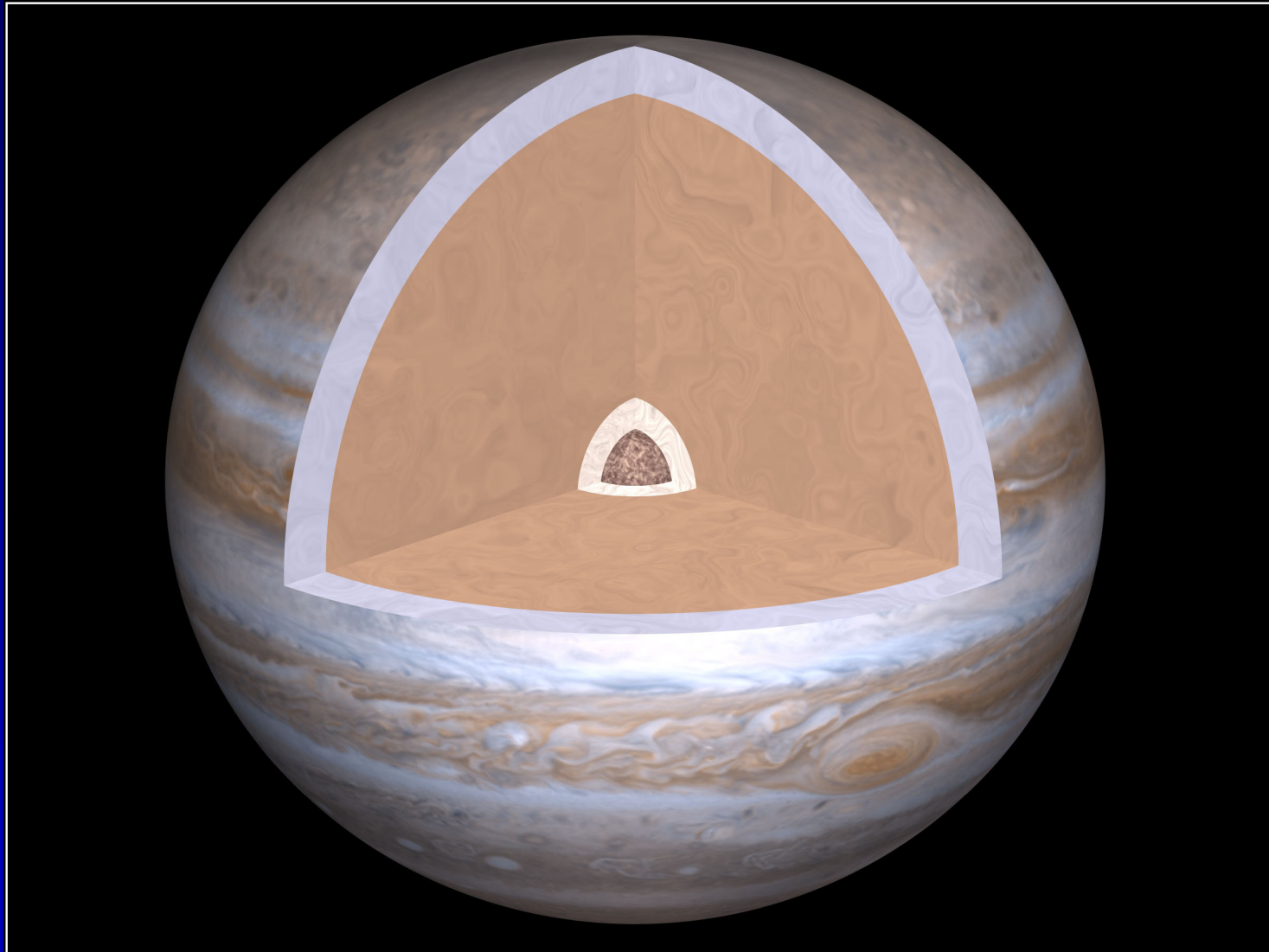
Les planètes se refroidissent.

Les planètes plus grandes et plus froides retiennent l'H et l'He, tandis que les planètes plus chaudes et plus petites en sont privées.

Le résultat - Structure de la Terre



Composition de Jupiter, hydrogène gazeux, liquide, métallique || glace, noyau.

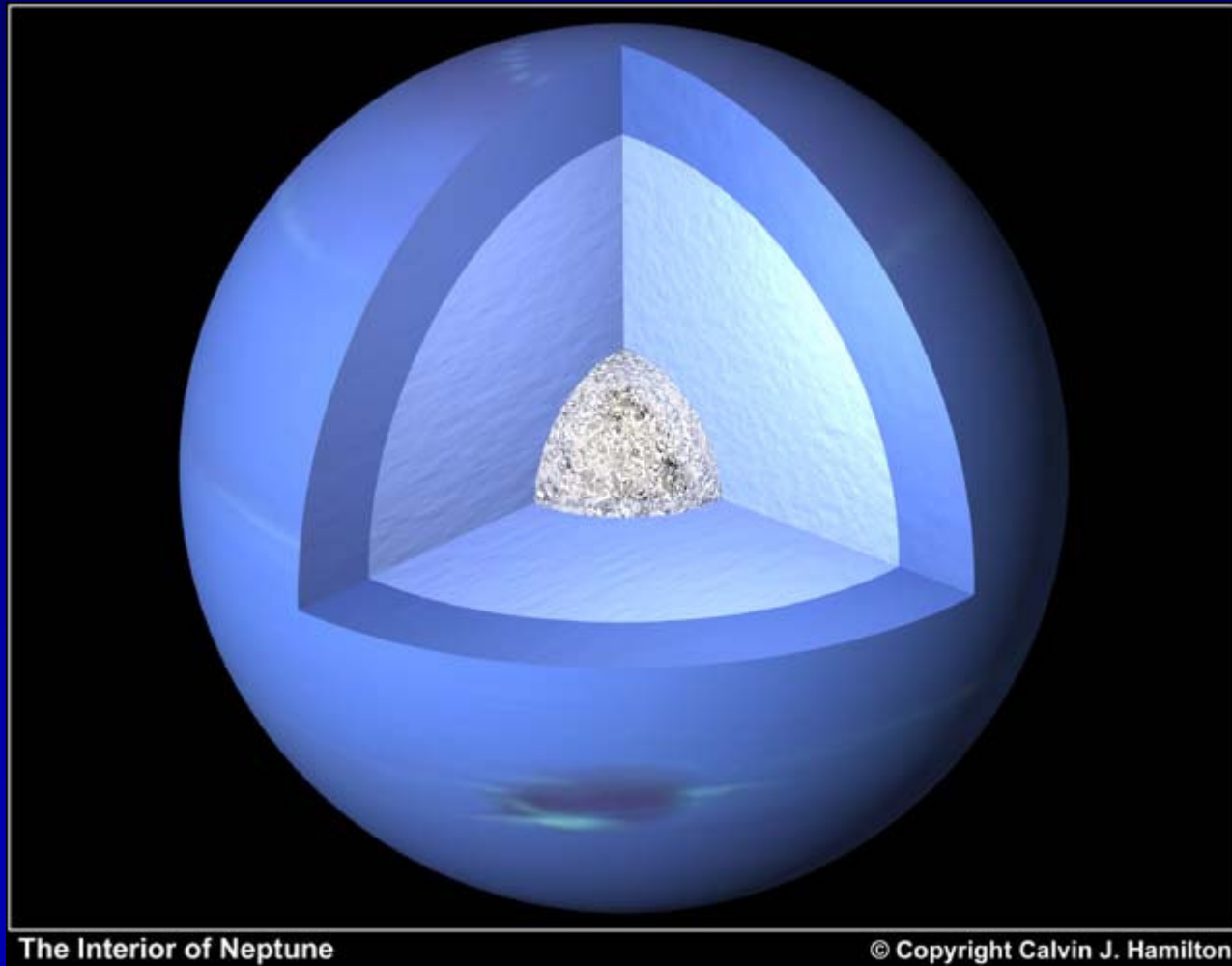


The Interior of Jupiter

© Copyright Calvin J. Hamilton

Composition de Neptune,

hydrogène, hélium, méthane || eau, ammoniac, méthane || noyau



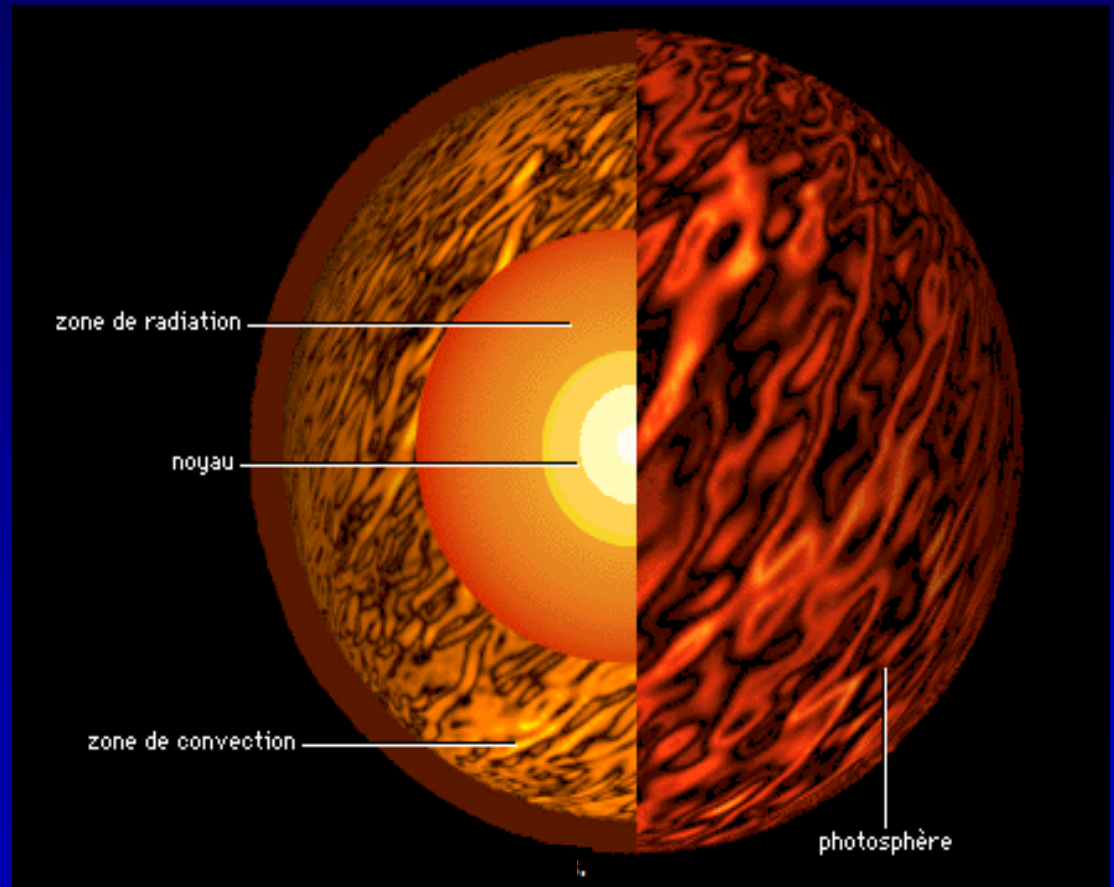
Le Soleil, 98% de la masse du système.

Noyau ($\sim 10\%$ de l'H)
densité = 150 (eau=1)
T = 16 millions °C
P = 100 M atmosphères

zone de radiation
densité = 1
T = 2,5 millions °C

zone de convection
T = 2 millions °C

photosphère
T = 5700°C



Caractéristiques du Soleil



Consommation d'hydrogène: 100 millions de tonnes/sec

Quantité d'hydrogène dans le noyau => 10 milliards
d'années de consommation

Puissance émise : $4 \cdot 10^{26}$ Watt (26 zeros)

Vers la Terre : $2 \cdot 10^{17}$ W (dont 60% réfléchis
vers l'espace).

(A l'origine : - 10%)

(Dans un milliard d'années : + 30%)

La Terre : un endroit bien particulier

La Terre se trouve juste dans la "zone habitable" du système,

là où **des températures entre 0 et 100 °C** consentent la présence d'eau à l'état liquide, de glace ou de vapeur.

Mars et la Lune sont trop petits (et légers),

Mercure et Venus sont trop chauds.

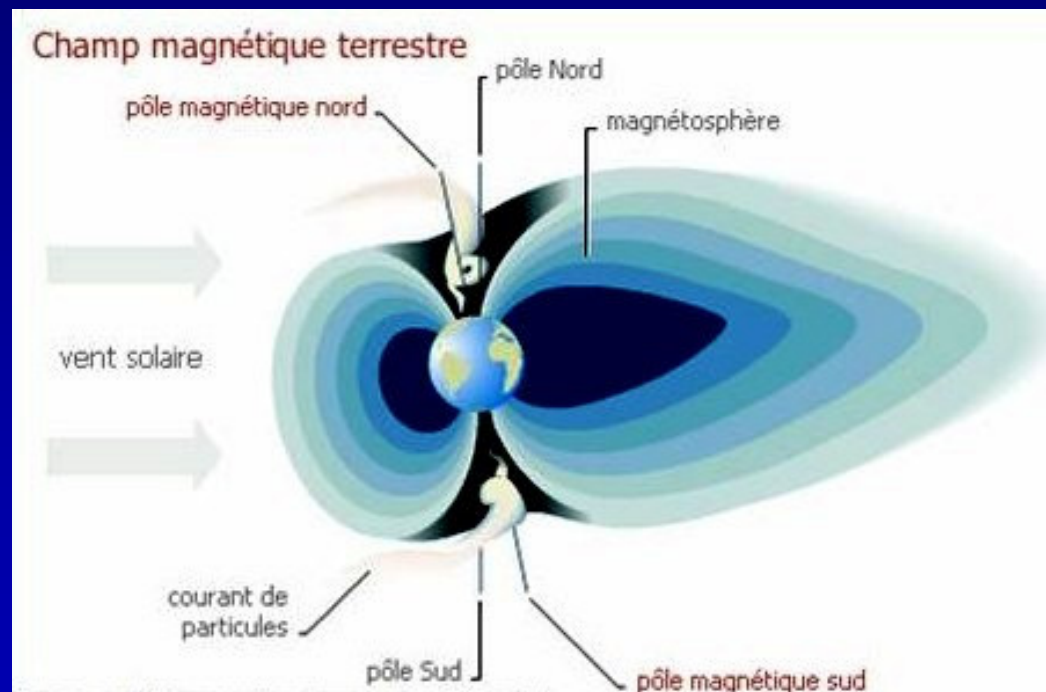


La biosphère : air, eau, sol
(quelques km d'épaisseur)



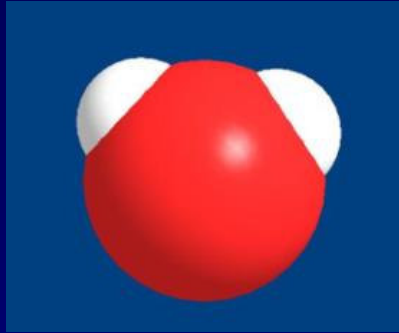
La Terre : un endroit très particulier

Grand noyau de fer solide et en fusion :	→ - champ magnétique, - chaleur interne, - tectonique des plaques, - volcans et éruptions
Températures entre 0 - 100 °C (« zone habitable »)	→ Eau à l'état liquide, solide et de vapeur
Axe de rotation incliné, stabilisé par la Lune	→ Saisons, stabilité climatique
Atmosphère, avec oxygène	→ - Couche d'ozone (15-30 km) - Chimie de la vie (avec C et H)



La Terre : une planète vivante : rien n'est statique, mais tout tourne en équilibre

70% de mers, 30% de terres	→ - Diversité biologique, - Climat mitigé
Cycles de toutes les substances essentielles	→ Eau, oxygène, carbone, CO ₂ ...
Présence de vie	→ Production et maintien de l'O ₂ atmosphérique (aucune autre planète...)
?	

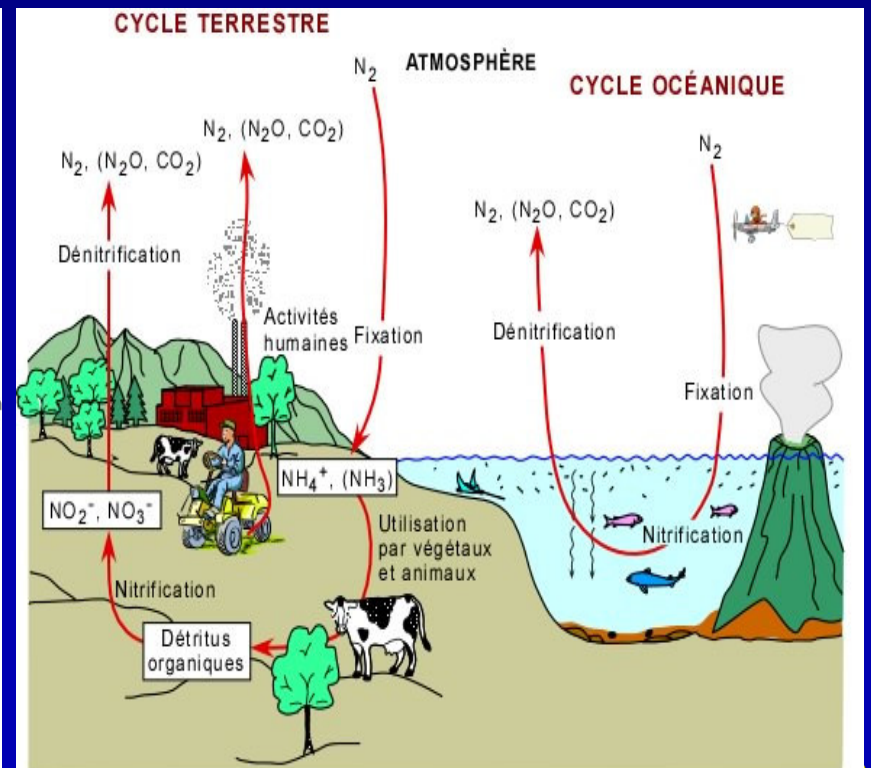
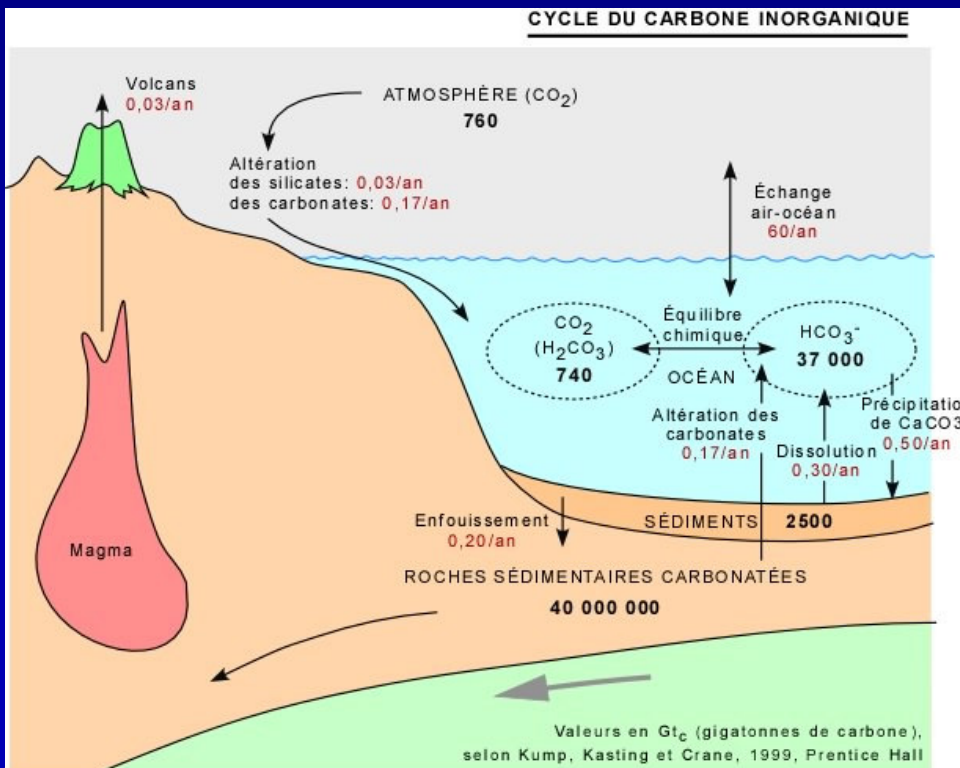
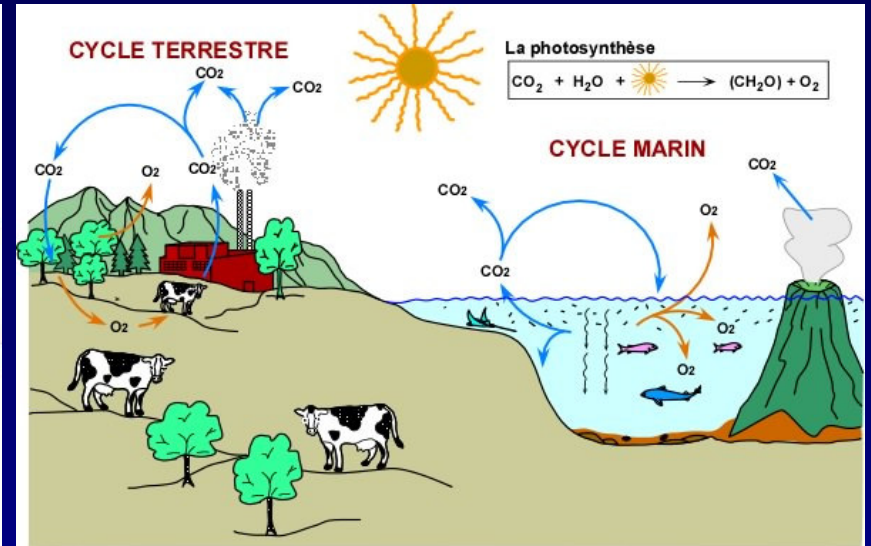
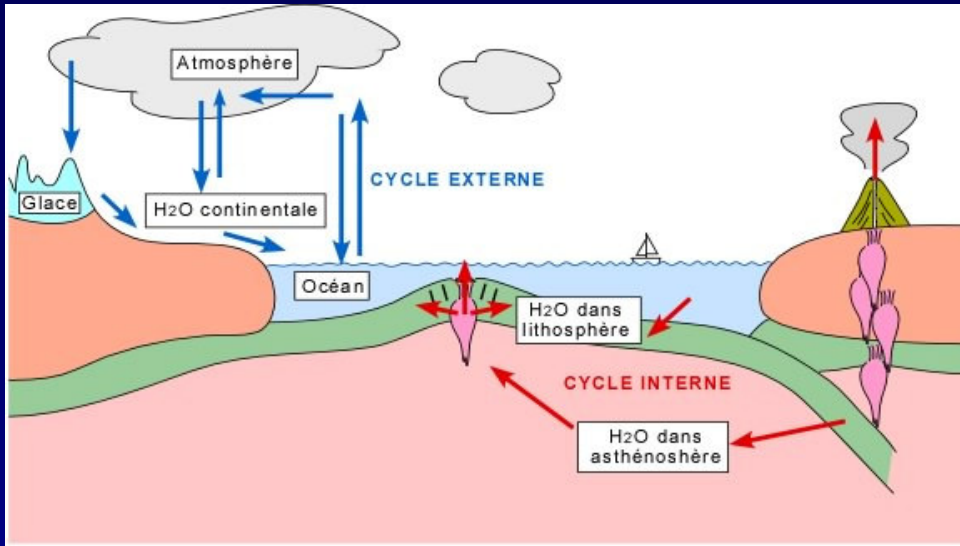


L'eau, magique.

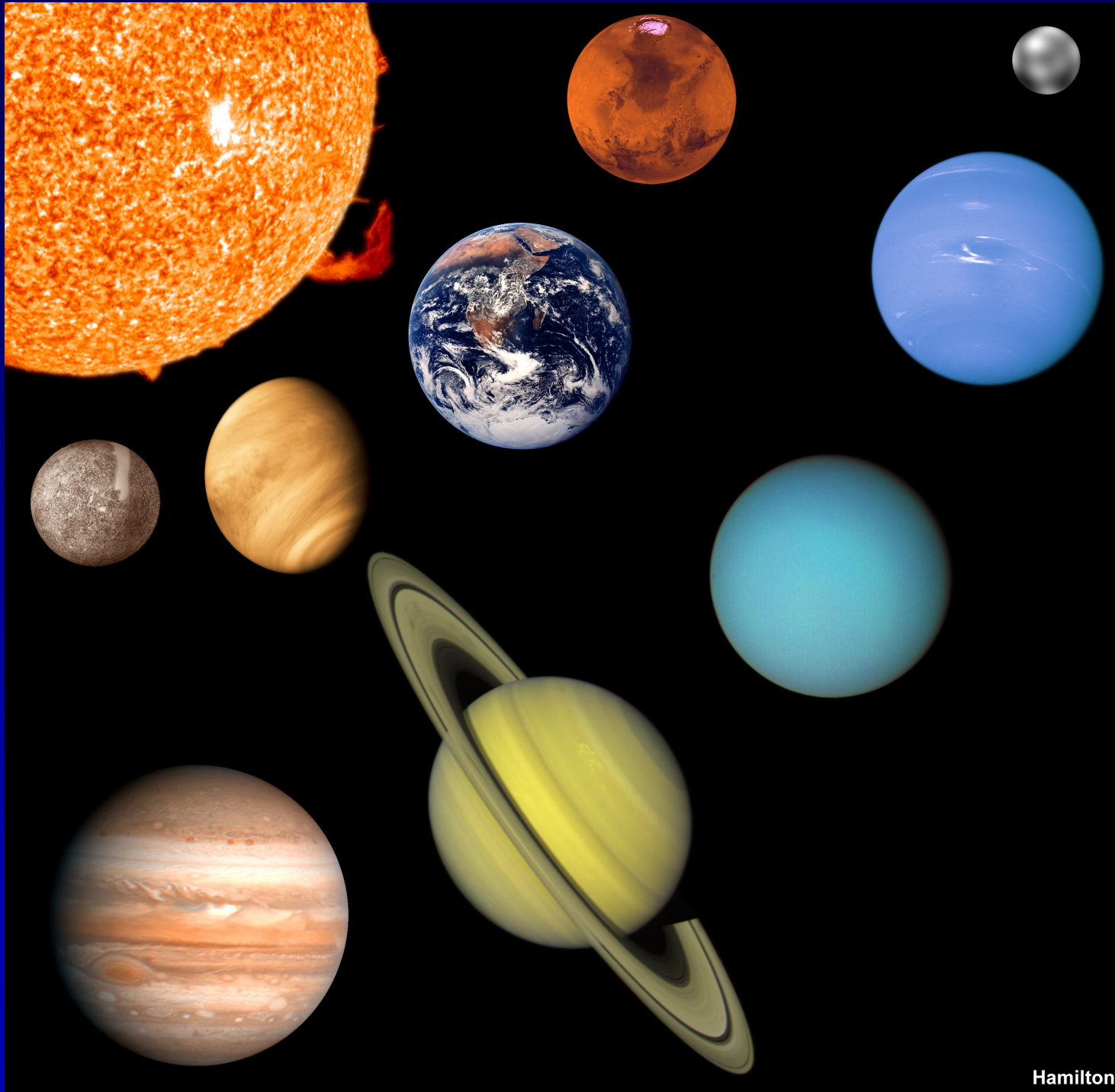


- Une grande abondance
- Une grande transparence
- Une énorme capacité thermique
- Une tension superficielle suffisante à la faire remonter en haut de plus grands arbres par capillarité
- Une glace 10% plus légère que le liquide
- Le meilleur pouvoir solvant
- Siège de toutes les réactions biochimiques (70% d'eau dans nos cellules)

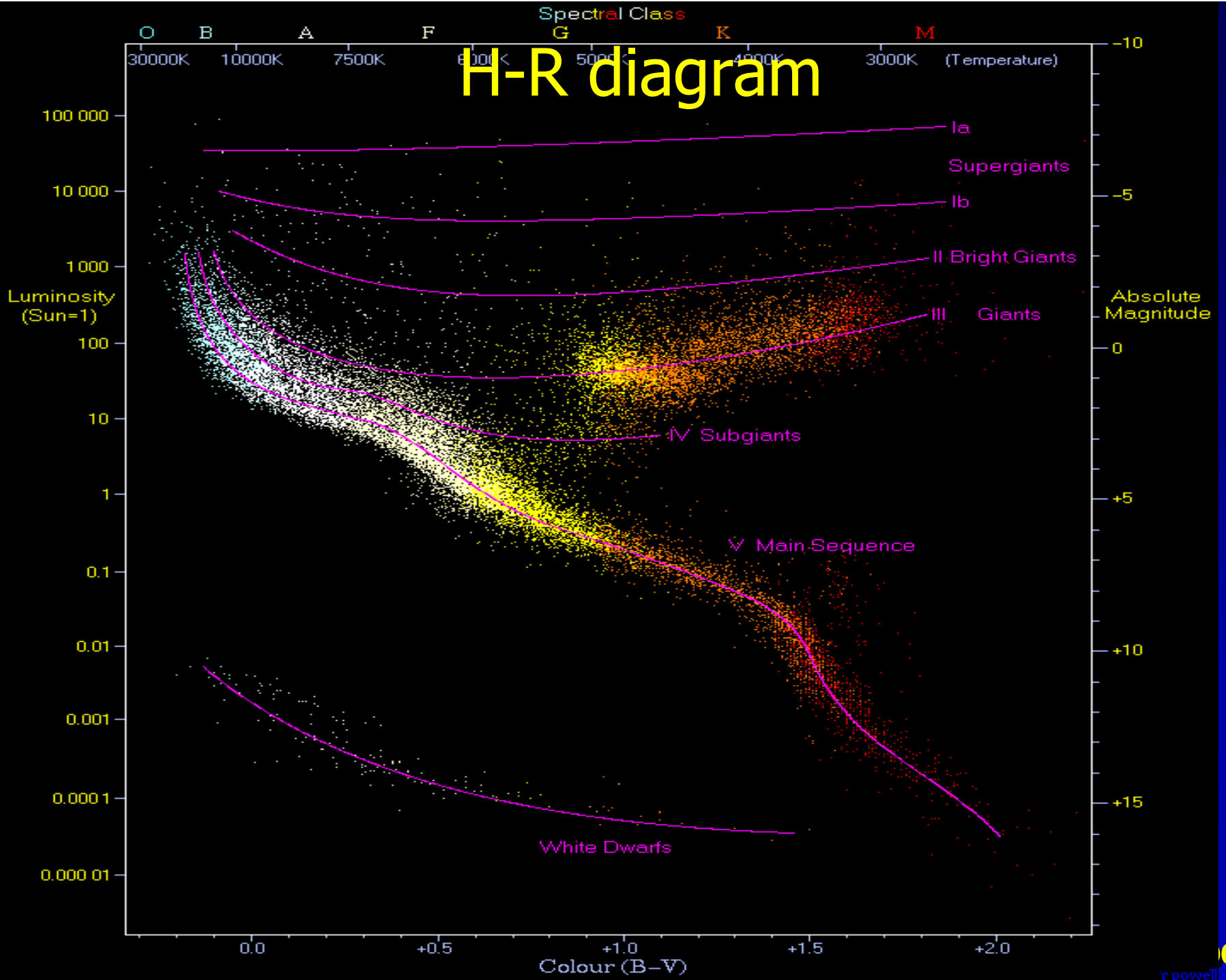
FIN



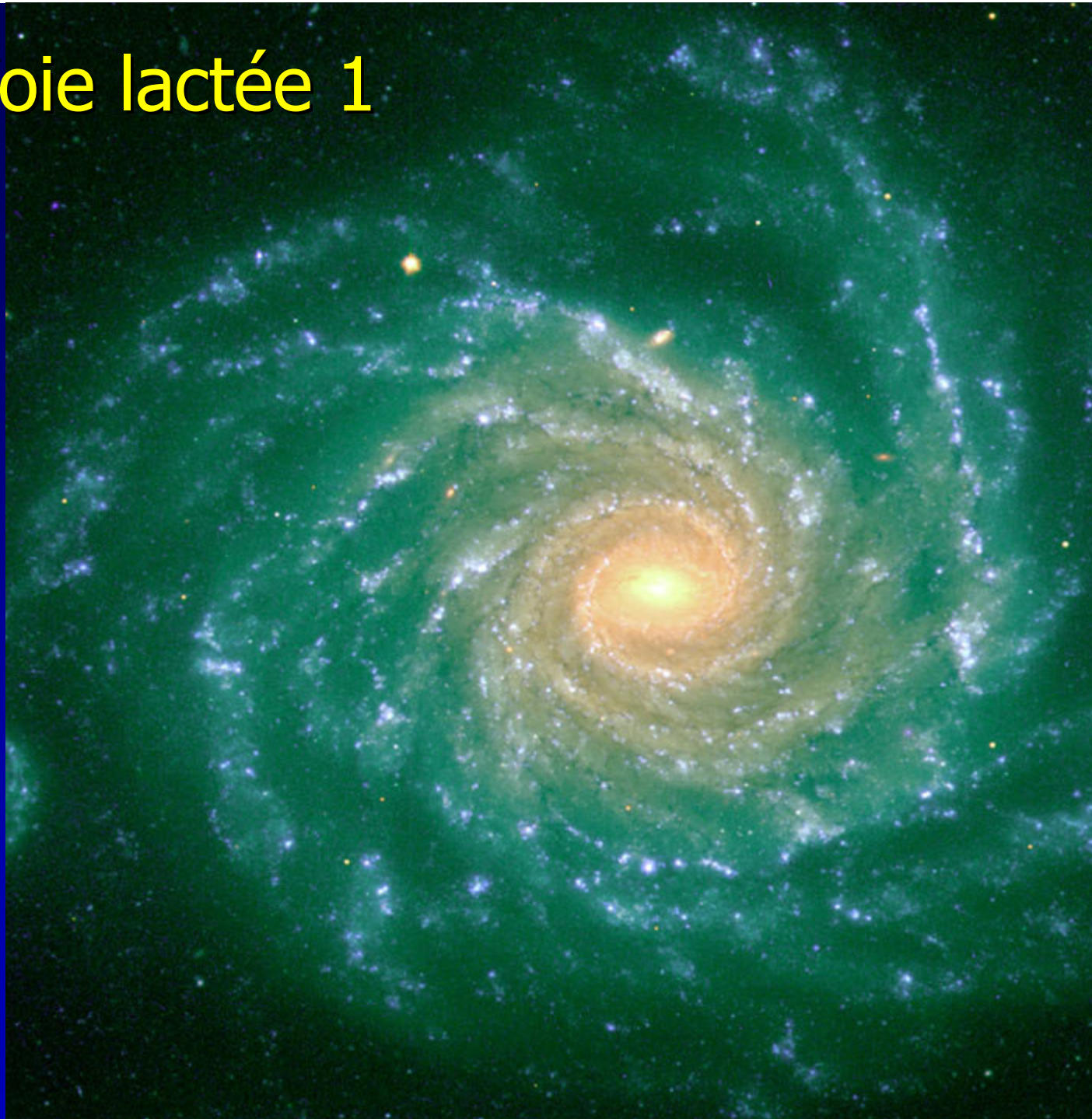
L'aspect des planètes



H-R diagram



Voie lactée 1







La nébuleuse en
Tête de Cheval



Tabella periodica degli elementi

IA																						VIII B
1 H 1.0079																					2 He 4.0026	
IIA												III B	IV B	VB	VIB	VII B	VIII B					
3 Li 6.940	4 Be 9.02											5 B 10.81	6 C 12.011	7 N 14.0067	8 O 15.9994	9 F 18.9984	10 Ne 20.17					
11 Na 22.991	12 Mg 24.32	IIIA	IVA	VA	VIA	VIIA	VIII A			IB	IIB	13 Al 26.9815	14 Si 28.0855	15 P 30.9737	16 S 32.06	17 Cl 35.453	18 Ar 39.948					
19 K 39.100	20 Ca 40.08	21 Sc 44.9559	22 Ti 47.90	23 V 50.9415	24 Cr 51.996	25 Mn 54.9380	26 Fe 55.847	27 Co 58.9332	28 Ni 58.71	29 Cu 63.546	30 Zn 65.38	31 Ga 69.723	32 Ge 72.59	33 As 74.9216	34 Se 78.96	35 Br 79.904	36 Kr 83.80					
37 Rb 85.48	38 Sr 87.63	39 Y 88.9059	40 Zr 91.22	41 Nb 92.9064	42 Mo 95.94	43 Tc 98.9062	44 Ru 101.07	45 Rh 102.905	46 Pd 106.4	47 Ag 107.868	48 Cd 112.41	49 In 114.82	50 Sn 118.69	51 Sb 121.75	52 Te 127.60	53 I 126.904	54 Xe 131.30					
55 Cs 132.91	56 Ba 137.36	57 La 138.905	72 Hf 178.49	73 Ta 180.947	74 W 183.85	75 Re 186.207	76 Os 190.2	77 Ir 192.22	78 Pt 195.09	79 Au 196.967	80 Hg 200.59	81 Tl 204.37	82 Pb 207.2	83 Bi 208.980	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)					
87 Fr 223	88 Ra 226.05	89 Ac (227)																				

Lantanidi

58 Ce 140.12	59 Pr 140.907	60 Nd 144.24	61 Pm (145)	62 Sm 150.4	63 Eu 151.96	64 Gd 157.25	65 Tb 158.925	66 Dy 162.50	67 Ho 164.930	68 Er 167.26	69 Tm 168.934	70 Yb 173.04	71 Lu 174.96
---------------------------	----------------------------	---------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	---------------------------	---------------------------

Attinidi

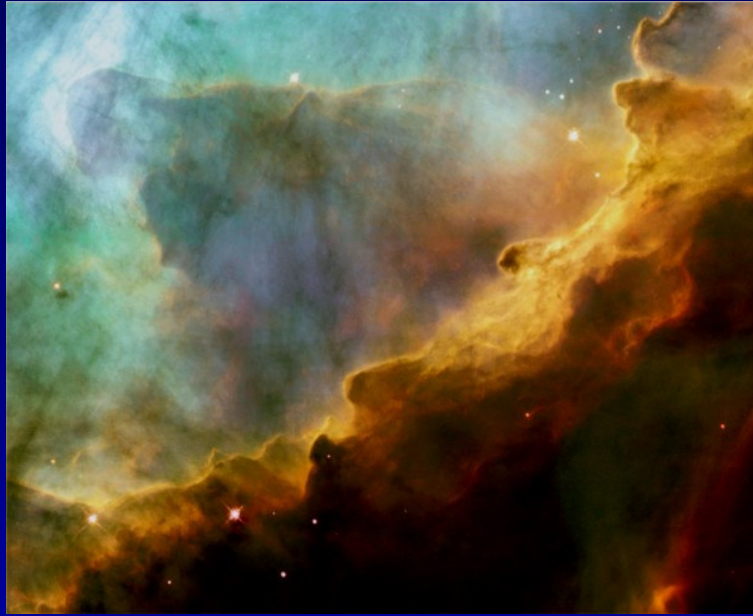
90 Th 232.038	91 Pa 231.036	92 U 238.029	93 Np 237.048	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (251)	99 Es (254)	100 Fm (257)	101 Md (258)	102 No (259)	103 Lr (260)
----------------------------	----------------------------	---------------------------	----------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	--------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------	---------------------------

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> Metalli alcalini Metalli alcalino-terrosi Metalli Metalli di transizione | <ul style="list-style-type: none"> Terre rare Non metalli Alogeni Gas nobili |
|--|---|

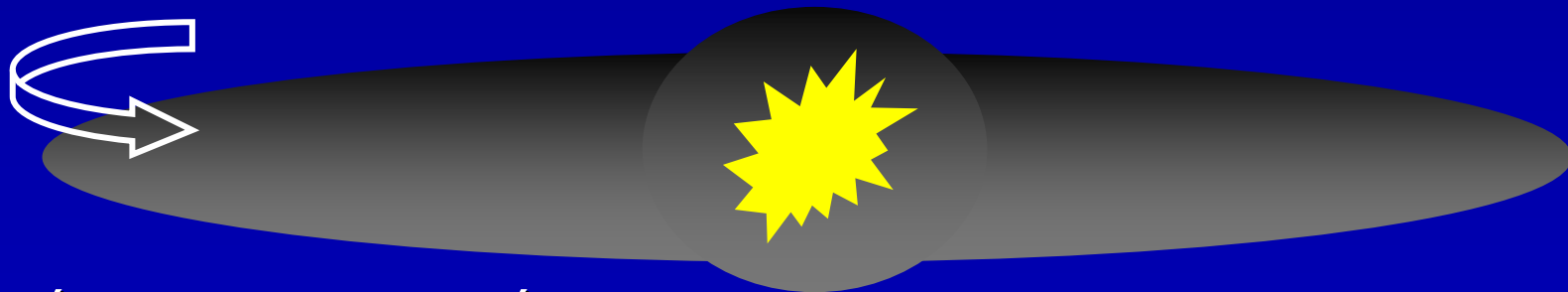
Système solaire

	Température (°C)	Atmosphère
Mercure	+430/-180	--
Venus	465	CO ₂ (90 atm)
Terre	+50/-80	78% N ₂ + 21% O ₂
Mars	0/-80	CO ₂ (0.01 atm)
Jupiter	-150	H ₂ + He
Saturne	-170	H ₂ + He
Uranus	-200	H ₂ + He
Neptune (Pluton)	-210 -220	H ₂ + He CH ₄
Lune	+105/-155	--
Soleil	5600	75% H ₂ + 25% He

Condensation



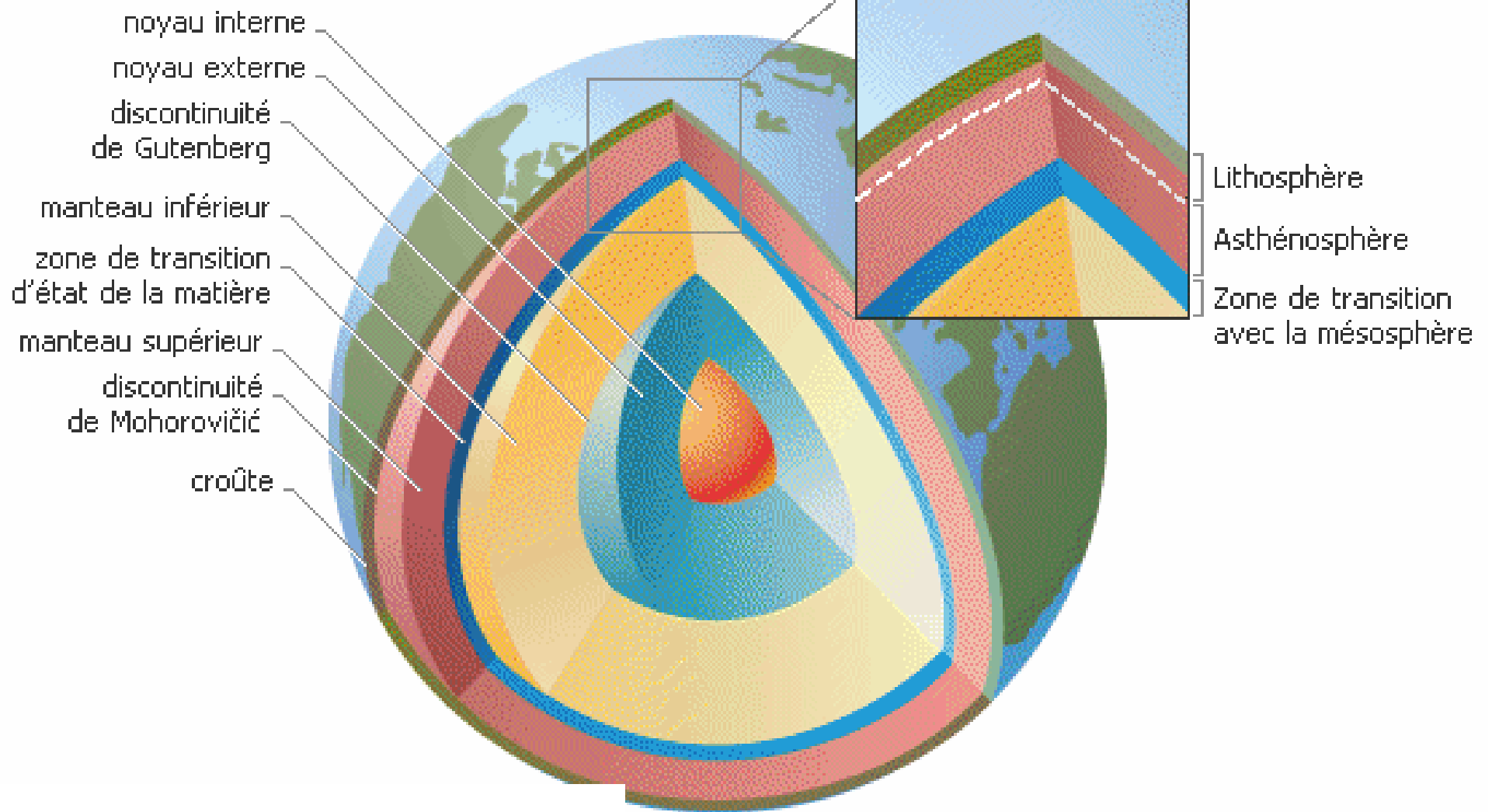
Bêta - Pictoris



Nébuleuse proto-planétaire

Disque protoplanétaire





Le vent solaire (vu par Soho)

