

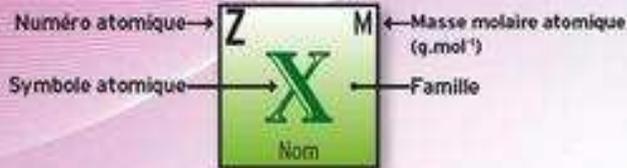
# D'où viennent les métaux du système solaire?

**Jacques Reisse**

Université Libre de Bruxelles  
Académie Royale de Belgique  
[jreisse@ulb.ac.be](mailto:jreisse@ulb.ac.be)

# TABLEAU PÉRIODIQUE DES ÉLÉMENTS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18					
1	H Hydrogène 1,0																		He Hélium 4,0				
2	Li Lithium 6,94	Be Béryllium 9,0																B Bore 10,8	C Carbone 12,0	N Azote 14,0	O Oxygène 16,0	F Fluor 19,0	Ne Néon 20,2
3	Na Sodium 23,0	Mg Magnésium 24,3												Al Aluminium 27,0	Si Silicium 28,1	P Phosphore 31,0	S Soufre 32,1	Cl Chlore 35,5	Ar Argon 39,9				
4	K Potassium 39,1	Ca Calcium 40,1	Sc Scandium 45,0	Ti Titane 47,9	V Vanadium 50,9	Cr Chrome 52,0	Mn Manganèse 54,9	Fe Fer 55,8	Co Cobalt 58,9	Ni Nickel 58,7	Cu Cuivre 63,5	Zn Zinc 65,4	Ga Gallium 69,7	Ge Germanium 72,6	As Arsenic 74,9	Se Sélénium 78,9	Br Brome 79,9	Kr Krypton 83,8					
5	Rb Rubidium 85,5	Sr Strontium 87,6	Y Yttrium 88,9	Zr Zirconium 91,2	Nb Niobium 92,9	Mo Molybdène 95,9	Tc Technétium 98,9	Ru Ruthénium 101,1	Rh Rhodium 102,9	Pd Paladium 106,4	Ag Argent 107,9	Cd Cadmium 112,4	In Indium 114,8	Sn Étain 118,7	Sb Antimoine 121,8	Te Tellure 127,6	I Iode 126,9	Xe Xénon 131,3					
6	Cs Césium 132,9	Ba Baryum 137,3	La Lanthane 138,9	Hf Hafnium 178,5	Ta Tantale 180,9	W Wolfram 183,8	Re Rénium 186,2	Os Osmium 190,2	Ir Iridium 192,2	Pt Platine 195,1	Au Or 197,0	Hg Mercure 200,6	Tl Thallium 204,4	Pb Plomb 207,2	Bi Bismuth 209,0	Po Polonium (209)	At Astato (209)	Rn Radon (222)					
7	Fr Francium (223)	Ra Radium (226)	Ac Actinide (227)	Rf Rutherfordium (261)	Db Dubnium (262)	Sg Seaborgium (266)	Bh Bohrium (264)	Hs Hassium (265)	Mt Meitnerium (268)	Uun Ununium (269)	Uuu Ununium (271)	Uub Unbium (272)	Uuq Unquadium 114	Uuh Unhexium 116	Uuo Unoctium 118								
8				58	59	60	61	(62)	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72					
9				Ce Cérium 140,1	Pr Praseodyme 140,9	Nd Néodyme 144,2	Pm Prométhée (145)	Sm Samarium 150,4	Eu Europium 152,0	Gd Gadolinium 157,3	Tb Terbium 158,9	Dy Dysprosium 162,5	Ho Holmium 164,9	Er Erbium 167,3	Tm Thulium 168,9	Yb Ytterbium 173,0	Lu Lutétium 175,0						
10				90	91	92	(93)	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104					
11				Th Thorium 232,0	Pa Protactinium 231,0	U Uranium 238,0	Np Neptunium (237)	Pu Plutonium (244)	Am Americium (243)	Cm Curium (247)	Bk Berkélium (247)	Cf Californium (251)	Es Einsteinium (252)	Fm Fermium (257)	Md Mendelevium (258)	No Nobelium (259)	Lw Lawrencium (260)						



# Abondance des éléments dans le Système Solaire (% en masse)

H	87
He	12
O	0.06
C	0.03
Ne	0.02
N	0.008
Si	0.003
Mg	0.0003
Na	0.0001

# Abondance des éléments dans l'écorce terrestre (% en masse)

O	46.6	(4,6.10 <sup>5</sup> mg/kg)
Si	27.7	
Al	8.1	
Fe	5.0	(5,63.10 <sup>4</sup> mg.kg)
Ca	3.6	
Na	2.8	
K	2.6	
Mg	2.1	
Ti	0.44	
H	0.14	
P	0.12	(1.10 <sup>3</sup> mg/kg)
Mn	0.10	

# Abondance des éléments dans le corps humain (% en masse)

O	65.0
C	18.5
H	9.5
N	3.3
Ca	1.5
P	1.0
K	0.4
S	0.3
Na	0.2
Cl	0.2
Mg	0.1
Fe, Cu, Mo, Zn	< 0.1

# Comparaison des séquences des abondances (en masse)

- Système solaire

H, He, O, C, Ne, N, Si, S

- Corps humain

O, C, H, N, Ca, P, S, Na, Cl

- Ecorce terrestre

O, Si, Al, Fe, Ca, Na, K, Mg

## Georges Lemaître et l'évolution de l'Univers (1931)

*« Notre monde se comprend aujourd'hui comme un monde où il se passe réellement quelque chose; il n'est pas nécessaire que l'histoire du monde ait été inscrite dans le premier quanta comme une mélodie sur le disque d'un phonographe. La totalité de la matière de l'Univers doit avoir été présente dès le commencement mais l'histoire qu'elle nous raconte peut être décrite par étape »*

# L'évolution physico-chimique de l'Univers et de la Terre

- Big Bang + qq s (p, n, électrons)
- Big Bang + 3 minutes (matière baryonique)
- Big Bang + qq  $10^5$  ans ("flamboyance initiale")
- Big Bang + qq  $10^8$  ans (1<sup>ères</sup> étoiles très massives)
- Big Bang +  $8 \cdot 10^9$  ans (accrétion du S.S.)
- 4,5685 Ga BP : formation des CAI's
- 4,56 : formation de la Terre
- 4,5 : formation de Lune
- 4,5 : différenciation de la Terre
- 4,4 : premiers océans
- 3,8 : fin du dernier bombardement intense

“3 minutes après le BB”, il existe des protons, neutrons, électrons et photons

**et des noyaux atomiques “simples”**

1p      soit  $^1\text{H}$

1p + 1n soit  $^2\text{H}$

2p + 1n soit  $^3\text{He}$

2p + 2n soit  $^4\text{He}$

3p + 4n soit  $^7\text{Li}$

**dans un Univers en expansion, qui se refroidit**

# Les quatre interactions fondamentales

- Interactions gravitationnelles  $(10^{-40})$
- Interactions électromagnétiques  $(10^{-2})$
- Interactions fortes intranucléaires  $(1)$
- Interactions faibles intranucléaires  $(10^{-13})$   
*(à  $T$  ordinaire)*

# Rôle déterminant de la gravitation

## **Sans elle, rien ne serait arrivé!**

Pas d'étoiles de premières générations et donc **pas de métaux**, pas de lapin

## **Avec elle seule, rien ne serait arrivé!**

La stabilité des noyaux dépend des interactions électromagnétiques, des interactions fortes et faibles mais pas de la gravitation. La stabilité des atomes, des molécules, **des métaux** et des lapins dépend des **interactions électromagnétiques**

# La nucléosynthèse stellaire: étape majeure de l'histoire de la matière

- Sans interactions gravitationnelles, pas d'étoiles.
- Sans étoiles, pas de nucléosynthèse stellaire
- Sans nucléosynthèse, pas de C, N, O, P, Na, K, Ca, Fe,....

**“Nous sommes des enfants des étoiles”  
....mais aussi du Big Bang pour l'hydrogène**

# Transformation élémentaire et lois de conservation



énergie, charges électriques, leptoniques  
et baryonique sont conservées

mais

$$M(\text{neutron}) > M(\text{proton}) + M(\text{électron})$$

# Nucléosynthèse solaire et lois de conservation

- Mécanisme “pp-neutrino”



- Conservation

de la charge électrique

de la charge baryonique

de la charge leptonique (celle du neutrino  
compense celle du positron)

- $p^+ \rightarrow n + e^+ + \text{neutrino}$

dépend des interactions faibles

# Nucléosynthèse solaire de $^4\text{He}$



- La réaction 1 est lente d'où la vie longue du Soleil (et ses conséquences!)
- 1, 2, 3 se déroulent à  $10^7$  K (mode froid de synthèse de  $^4\text{He}$ )

# Lorsque notre Soleil deviendra une géante rouge...

- La fusion de  ${}^4\text{He}$  va s'enclancher:

Processus triple  $\alpha$  ( $\alpha = {}^4\text{He}$ ) donne  ${}^{12}\text{C}$



- ${}^{12}\text{C} + \text{p}^+ \rightarrow {}^{13}\text{N} + \gamma$  ( ${}^{13}\text{N}$  instable)

- ${}^{13}\text{N} \rightarrow {}^{13}\text{C} + \text{e}^+ + \gamma + \text{neutrino}$

- ${}^{13}\text{C} + {}^4\text{He} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \text{n}$

**(rôle important de n pour les réactions de capture de neutrons)**

# Si les conditions de T, P et concentrations le permettent...



possible seulement si  $T > 2 \cdot 10^8 \text{K}$  dans des étoiles de masses initiales  $> 10 M_{\odot}$

Par fusion , obtention de tous les éléments jusqu'au groupe Fe, Ni, Co

A partir de  $^{56}\text{Fe}$ , la fusion devient endothermique; la capture de neutrons devient dominante

# Pourquoi la fusion est-elle endothermique à partir de Fe-56?

- La répulsion coulombienne n'est plus compensée par les interactions fortes à très courte portée  
(int. P – P = int. N – N = int. P – N)
- La capture de neutrons suivie de l'éjection d'un électron permet la nucléosynthèse des éléments plus lourds

# Nucléosynthèse par capture de neutrons



A et (A + 1) sont des isotopes



synthèse de l'élément de nombre atomique supérieur

- Deux types de capture de neutrons connus:

processus "s" (slow)

processus "r" (rapide) accumulation possible de plusieurs neutrons avant l'éjection de  $e^-$

# Spallation et fission comme autres processus de nucléosynthèse

- Des ions accélérés (rayonnement cosmique galactique) peuvent provoquer des arrachements de nucléons de  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{14}\text{N}$  présents dans les nuages interstellaires; synthèse de  $^3\text{Li}$ ,  $^4\text{Be}$ ,  $^5\text{B}$
- Les neutrons peuvent induire des fissions d'éléments "lourds":  
nucléosynthèse "descendante"

# La “mort” des étoiles

- Durée de vie d'autant plus courte et “mort” d'autant plus violente que la masse initiale est grande
- Ejection de matière dans l'espace; l'objet résiduel est une naine blanche, une étoile à neutrons, un trou noir selon la masse initiale de l'étoile
- La matière éjectée forme les nuages interstellaires qui peuvent devenir des nuages protostellaires, sièges de nouvelles accrétions

# Accrétion d'un nouveau système stellaire



# L'accrétion du système solaire

- Au départ d'une protonébuleuse contenant déjà tous les éléments de la classification périodique
- Le Soleil n'est pas une étoile de première génération (heureusement pour nous!)
- Sa métallicité est élevée

# Définition d'un métal pour l'astrophysicien

- Tout élément à l'exclusion de H et He
- Tout élément qui n'est pas formé immédiatement après le BB
- Métallicité d'une étoile: proportion (en masse) des éléments de nombre atomique supérieur à 2 (He)

# Métallicité: Z

- Proportion de H: X
- Proportion de He: Y
- Proportion des “métaux”: Z
- $X + Y + Z = 1$

*Exemple: Soleil*

$$X = 0,8 \quad Y = 0,18 \quad Z = 0,02$$

- Etoile de métallicité “élevée”: Pop. I
- Etoile de métallicité “basse”: Pop. II

# Accrétion du Système Solaire

- Formation du Soleil
- $t_0$ : formation des CAI's (il y a 4.568 Ga)
- $t_0 + 1-8$  Ma: formation de Jupiter
- $t_0 + 10$ Ma: disparition du disque
- $t_0 + 10-15$  Ma: formation de Mars
- $t_0 + 10-70$  Ma: formation de la Terre
- $t_0 + 10-100$  Ma: formation de la Lune
- il y a 4.404 Ga: formation de la croûte
- Il y a 4,40 Ga: premiers proto-océans

# La Terre est un corps différencié

- Accumulation des éléments “lourds” dans le noyau (Fe, Ni associés à S)
- Ségrégation sur base de la densité des éléments et de leurs composés (sulfures, oxydes essentiellement)
- Rôle des apports post-accrétionnels
- Recyclage permanent au niveau de l'écorce et du manteau supérieur (associé à la tectonique des plaques)

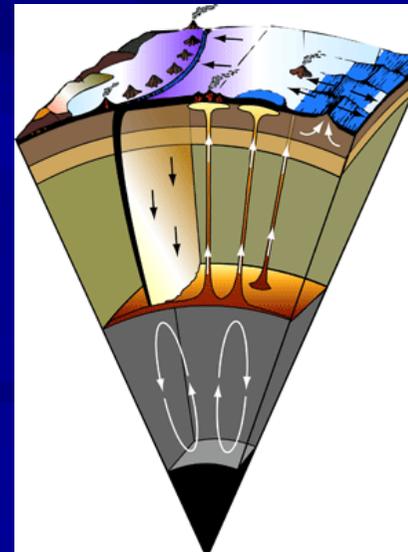
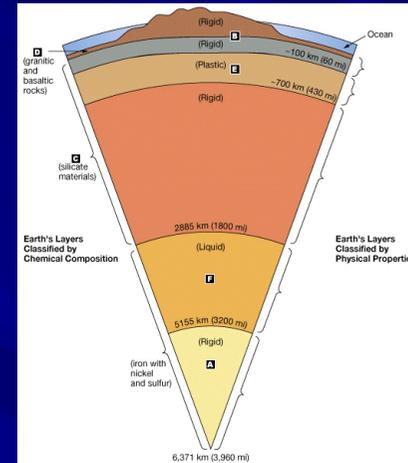
# La structure interne de la Terre

Convection dans le  
coeur liquide

Tectonique des plaques

Chimie des silicates à  
hautes P et T

Rôle de l'interaction  
silicates-eau dans les  
zones de subduction



# L'évolution de l'atmosphère

- Atmosphère initialement non oxydante:  
(sulfures plutôt que sulfates, fer ferreux plutôt que ferrique,...)
- Acidité des océans à 3.5 Ga ?
- Température des océans à 3.5 Ga ?
- Démarrage précoce de la photosynthèse oxygénique ?
- Certitude: photosynthèse oxygénique à 2.7-2.8 Ga
- Atmosphère oxydante (0.5 – 5% PAL) à 2.2 Ga
- 5-20% PAL à 0.7 Ga
- Ensuite: fluctuations entre 50% PAL et 150% PAL

# Abondance des éléments dans la croûte terrestre (en mg/kg)

■ Ni	84
■ Cu	60
■ Co	25
■ Zn	70
■ Cr	100
■ C	200
■ Au	$4 \cdot 10^{-3}$
■ Pt	$5 \cdot 10^{-3}$

**Accumulation indispensable pour obtenir un minerai**

# Formation des minerais métalliques

- Nécessité de processus naturels d'enrichissement local
  - au niveau du magma
  - par des processus hydrothermaux dans la croûte terrestre (souvent associés à la tectonique)
  - par des processus associés au métamorphisme

# Composition chimique des minerais

- Souvent oxydes, sulfures, sulfates, chlorures
- Parfois sous forme native (or)
- Parfois d'origine extraterrestre  
(météorites "Fe/Ni")
- Souvent en mélange (mélange de sulfures de Pt, Ni, Cr, Co par exemple)

# Rôle de l'homme dans l'histoire des métaux

- Invention de la métallurgie (il y a 6 à 8 mille ans)
- Obtention des métaux dont les oxydes et sulfures sont les plus aisés à réduire
- Réduction par C à "haute température"
- Invention récente de l'hydrométallurgie à basse température (électrochimie)

# Les métaux dans la biosphère

- Sans C,H,O,N,S,P,X pas de vie  
Sans eau liquide pas de vie mais:  
**sans cations métalliques, pas de vie!**
- Capacité des autotrophes à « fixer » les métaux
- Autotrophes: source de métaux pour les hétérotrophes

**Merci pour votre attention!**