

**Matière 3 : F413 Géochimie.**

**Crédits : 1**

**Coefficient : 1**

**Objectifs de l'enseignement**

*Le cours de géochimie présente des notions sur les outils qu'offre la chimie pour interpréter les phénomènes géologiques. Il donne à l'étudiant des notions sur les méthodes de datation géochronologiques et sur la géochimie isotopique.*

**Connaissances préalables recommandées**

*Maîtriser les cours de cristallographie et minéralogie.*

**Contenu de la matière :**

**Cours**

I. Introduction

- définitions et généralités
- rappels sur la classification périodique des éléments
- rappels sur les liaisons chimiques
- notion de cristalochimie

II. Lois de répartition des éléments

- éléments majeurs et éléments en traces : règles de substitution
- éléments majeurs
- éléments en traces
- Affinités

**Mode d'évaluation :**

Examen.

**Références bibliographiques :**

Albert Jambon, Alain Thomas. **Géochimie : géodynamique et cycles.** Dunod, 2009, 406 pages.

Claude Allègre. **Géologie isotopique.** Belin, 2005, 496 pages.

Philippe Vidal. **Géochimie.** Dunod, 2003, 190 pages.

# Introduction à la géochimie

## Chapitre I

I.1- définitions et généralités

I.2- rappels sur la classification périodique des éléments

I.3- rappels sur les liaisons chimiques

I.4- notion de cristalochimie

## **I. 1. Définitions et généralités**

**La Géochimie** : discipline de la géologie qui étudie la répartition des éléments chimiques dans les différents grands réservoirs terrestres.

Cette distribution est liée au comportement chimique des éléments ainsi qu'aux différents processus géologiques de transfert ayant lieu sur la terre.

**Enfinement** : La géochimie traite de la distribution et de l'abondance des éléments chimiques dans les différents réservoirs.

**La Géochronologie** : discipline de la géologie qui étudie l'âge des roches (datation absolue) et tente de reconstituer les périodes géologiques de l'évolution du vivant et des orogénèses (datation relative).

**La datation relative** est basée sur les disciplines de la stratigraphie et du paléomagnétisme.

**La datation absolue** est basée sur les disciplines de la géochimie.

Elle utilise les principes de la désintégration des isotopes radioactifs naturels présents dans un minéral ou dans une roche ( $\Sigma$  minéraux).

# I.2- rappels sur la classification périodique des éléments

## CLASSIFICATION PERIODIQUE DES ELEMENTS

- Métaux
  - Semi-conducteurs
  - Non-métaux
  - Gaz nobles
  - Lanthanides et actinides
- Li : Solide à 25°C, sous 1 bar  
He : Gaz à 25°C, sous 1 bar  
Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar  
Tc : Obtenu par synthèse

	I										VIII																							
1	<b>H</b> 1																			<b>He</b> 2														
2	Li 3		Be 4																				B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10						
3	Na 11		Mg 12																				Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18						
4	K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36																
5	Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54																
6	Cs 55	Ba 56	Lu 71	Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86																
7	Fr 87	Ra 88	Lr 103	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Uu 110	Uub 111	Uuq 112																						
			La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70																		
			Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102																		

Série des Lanthanides  
 Série des Actinides

# Tableau périodique des éléments

Groupe → I A 1 II A 2

Période ↓ 1 2 3 4 5 6 7

**Hydrogène**  
1  
H  
1,00795

**Lithium**  
3  
Li  
6,939

**Béryllium**  
4  
Be  
9,0121831

**Sodium**  
11  
Na  
22,98976928

**Magnésium**  
12  
Mg  
24,305

**Potassium**  
19  
K  
39,0983

**Calcium**  
20  
Ca  
40,078

**Rubidium**  
37  
Rb  
85,4678

**Strontium**  
38  
Sr  
87,62

**Césium**  
55  
Cs  
132,905452

**Baryum**  
56  
Ba  
137,327

**Franium**  
87  
Fr  
(223)

**Radium**  
88  
Ra  
(226)

états d'oxydation  
1<sup>ère</sup> énergie d'ionisation (en kJ/mol)  
électronégativité (Pauling)  
configuration électronique  
électrons par niveau d'énergie

**Fe** 26  
Fe  
55,845

nom de l'élément (gaz, liquide ou solide à 0°C et 101,3 kPa)  
numéro atomique  
symbole chimique  
masse atomique relative [ou celle de l'isotope le plus stable]

[ CMAW "Atomic Weights 2013" + rev. 2015 ]

III A 3 IV A 4 V A 5 VI A 6 VII A 7 VIII 8 9 10 I B 11 II B 12

Scandium 21 Sc	Titane 22 Ti	Vanadium 23 V	Chrom 24 Cr	Manganèse 25 Mn	Fer 26 Fe	Cobalt 27 Co	Nickel 28 Ni	Cuivre 29 Cu	Zinc 30 Zn
Yttrium 39 Y	Zirconium 40 Zr	Niobium 41 Nb	Molybdène 42 Mo	Technétium 43 Tc	Ruthénium 44 Ru	Rhodium 45 Rh	Palladium 46 Pd	Argent 47 Ag	Cadmium 48 Cd
Lanthanides 57-71	Hafnium 72 Hf	Tantale 73 Ta	Tungstène 74 W	Rhénium 75 Re	Osmium 76 Os	Iridium 77 Ir	Platine 78 Pt	Or 79 Au	Mercure 80 Hg
Actinides 89-103	Rutherfordium 104 Rf	Dubnium 105 Db	Seaborgium 106 Sg	Bohrium 107 Bh	Hassium 108 Hs	Mélanium 109 Mt	Darmstadtium 110 Ds	Roentgenium 111 Rg	Copernicium 112 Cn

**Bore** 5  
B  
10,811

**Carbone** 6  
C  
12,0106

**Azote** 7  
N  
14,00643

**Oxygène** 8  
O  
15,9994

**Fluor** 9  
F  
18,9984032

**Hélium** 2  
He  
4,002602

**Aluminium** 13  
Al  
26,9815385

**Silicium** 14  
Si  
28,0855

**Phosphore** 15  
P  
30,97376200

**Soufre** 16  
S  
32,065

**Chlore** 17  
Cl  
35,453

**Argon** 18  
Ar  
39,948

**Gallium** 31  
Ga  
69,723

**Germanium** 32  
Ge  
72,630

**Arsenic** 33  
As  
74,921595

**Sélénium** 34  
Se  
78,9718

**Brome** 35  
Br  
79,904

**Krypton** 36  
Kr  
83,798

**Indium** 49  
In  
114,818

**Étain** 50  
Sn  
118,710

**Antimoine** 51  
Sb  
121,760

**Tellure** 52  
Te  
127,603

**Iode** 53  
I  
126,90447

**Xénon** 54  
Xe  
131,293

**Thallium** 81  
Tl  
204,3833

**Plomb** 82  
Pb  
207,2

**Bismuth** 83  
Bi  
208,9804

**Polonium** 84  
Po  
(209)

**Astate** 85  
At  
(210)

**Radon** 86  
Rn  
(222)

**Nihonium** 113  
Nh  
(286)

**Flerovium** 114  
Fl  
(289)

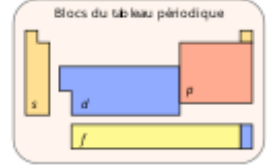
**Moscovium** 115  
Mc  
(289)

**Livermorium** 116  
Lv  
(293)

**Tenneisse** 117  
Ts  
(294)

**Oganeson** 118  
Og  
(294)

<b>Lanthane</b> 57 La 138,90547	<b>Cérium</b> 58 Ce 140,116	<b>Praseodyme</b> 59 Pr 140,90766	<b>Néodyme</b> 60 Nd 144,242	<b>Prométhium</b> 61 Pm (145)	<b>Samarium</b> 62 Sm 150,36	<b>Europium</b> 63 Eu 151,964	<b>Gadolinium</b> 64 Gd 157,25	<b>Terbium</b> 65 Tb 158,92535	<b>Dysprosium</b> 66 Dy 162,500	<b>Hoïmium</b> 67 Ho 164,93033	<b>Erbium</b> 68 Er 167,26	<b>Thulium</b> 69 Tm 168,93422	<b>Ytterbium</b> 70 Yb 173,046	<b>Luécium</b> 71 Lu 174,968
<b>Actinium</b> 89 Ac (227)	<b>Thorium</b> 90 Th 232,0377	<b>Protactinium</b> 91 Pa 231,03688	<b>Uranium</b> 92 U 238,02891	<b>Neptunium</b> 93 Np (237)	<b>Plutonium</b> 94 Pu (244)	<b>Américium</b> 95 Am (243)	<b>Curium</b> 96 Cm (247)	<b>Berkélium</b> 97 Bk (247)	<b>Californium</b> 98 Cf (251)	<b>Einsteinium</b> 99 Es (252)	<b>Fermium</b> 100 Fm (257)	<b>Mélanium</b> 101 Md (258)	<b>Nobélium</b> 102 No (259)	<b>Lawrencium</b> 103 Lr (260)



Métaux Non métaux Origine

Alcalins Alcalino-terreux Lanthanides Actinides Métaux de transition Métaux pauvres Métalloïdes Autres non-métaux Halogènes Gaz nobles Non classés

primordial désintégration d'autres éléments synthétique

# Électronégativité

En chimie, l'**électronégativité** d'un atome est une grandeur physique qui caractérise sa capacité à attirer les électrons lors de la formation d'une liaison chimique avec un autre élément. La différence d'électronégativité entre ces deux éléments détermine la nature de la liaison covalente : liaison apolaire lorsque la différence est nulle ou faible, liaison polaire quand la différence est moyenne, et ionique quand la différence est tellement forte qu'un des atomes a attiré complètement, ou presque, les électrons de la liaison: les atomes sont devenus des ions et portent des charges électriques entières.

**La notion d'électronégativité décrit le comportement des électrons dans une liaison chimique.**

→ Rayon atomique décroît → Énergie d'ionisation s'accroît → Électronégativité s'accroît →

<u>H</u> 2,2																	<u>He</u>	
<u>Li</u> 0,98	<u>Be</u> 1,57										<u>B</u> 2,04	<u>C</u> 2,55	<u>N</u> 3,04	<u>O</u> 3,44	<u>F</u> 3,98		<u>Ne</u>	
<u>Na</u> 0,93	<u>Mg</u> 1,31										<u>Al</u> 1,61	<u>Si</u> 1,9	<u>P</u> 2,19	<u>S</u> 2,58	<u>Cl</u> 3,16		<u>Ar</u>	
<u>K</u> 0,82	<u>Ca</u> 1	<u>Sc</u> 1,36	<u>Ti</u> 1,54	<u>V</u> 1,63	<u>Cr</u> 1,66	<u>Mn</u> 1,55	<u>Fe</u> 1,83	<u>Co</u> 1,88	<u>Ni</u> 1,91	<u>Cu</u> 1,9	<u>Zn</u> 1,65	<u>Ga</u> 1,81	<u>Ge</u> 2,01	<u>As</u> 2,18	<u>Se</u> 2,55	<u>Br</u> 2,96	<u>Kr</u> 3	
<u>Rb</u> 0,82	<u>Sr</u> 0,95	<u>Y</u> 1,22	<u>Zr</u> 1,33	<u>Nb</u> 1,6	<u>Mo</u> 2,16	<u>Tc</u> 1,9	<u>Ru</u> 2,2	<u>Rh</u> 2,28	<u>Pd</u> 2,2	<u>Ag</u> 1,93	<u>Cd</u> 1,69	<u>In</u> 1,78	<u>Sn</u> 1,96	<u>Sb</u> 2,05	<u>Te</u> 2,1	<u>I</u> 2,66	<u>Xe</u> 2,6	
<u>Cs</u> 0,79	<u>Ba</u> 0,89	*	<u>Lu</u> 1,27	<u>Hf</u> 1,3	<u>Ta</u> 1,5	<u>W</u> 2,36	<u>Re</u> 1,9	<u>Os</u> 2,2	<u>Ir</u> 2,2	<u>Pt</u> 2,28	<u>Au</u> 2,54	<u>Hg</u> 2	<u>Tl</u> 1,62	<u>Pb</u> 1,87	<u>Bi</u> 2,02	<u>Po</u> 2	<u>At</u> 2,2	<u>Rn</u> 2,2
<u>Fr</u> 0,7	<u>Ra</u> 0,9	**	<u>Lr</u> 1,3	<u>Rf</u>	<u>Db</u>	<u>Sg</u>	<u>Bh</u>	<u>Hs</u>	<u>Mt</u>	<u>Ds</u>	<u>Rg</u>	<u>Cn</u>	<u>Nh</u>	<u>Fl</u>	<u>Mc</u>	<u>Lv</u>	<u>Ts</u>	<u>Og</u>
		↓																
		*	<u>La</u> 1,1	<u>Ce</u> 1,12	<u>Pr</u> 1,13	<u>Nd</u> 1,14	<u>Pm</u> 1,13	<u>Sm</u> 1,17	<u>Eu</u> 1,2	<u>Gd</u> 1,2	<u>Tb</u> 1,2	<u>Dy</u> 1,22	<u>Ho</u> 1,23	<u>Er</u> 1,24	<u>Tm</u> 1,25	<u>Yb</u> 1,1		
		**	<u>Ac</u> 1,1	<u>Th</u> 1,3	<u>Pa</u> 1,5	<u>U</u> 1,38	<u>Np</u> 1,36	<u>Pu</u> 1,28	<u>Am</u> 1,13	<u>Cm</u> 1,28	<u>Bk</u> 1,3	<u>Cf</u> 1,3	<u>Es</u> 1,3	<u>Fm</u> 1,3	<u>Md</u> 1,3	<u>No</u> 1,3		

Tableau périodique des éléments utilisant l'échelle d'électronégativité de Pauling



**LE FLUOR EST L'ÉLÉMENT chimique LE PLUS ELECTRONEGATIF**

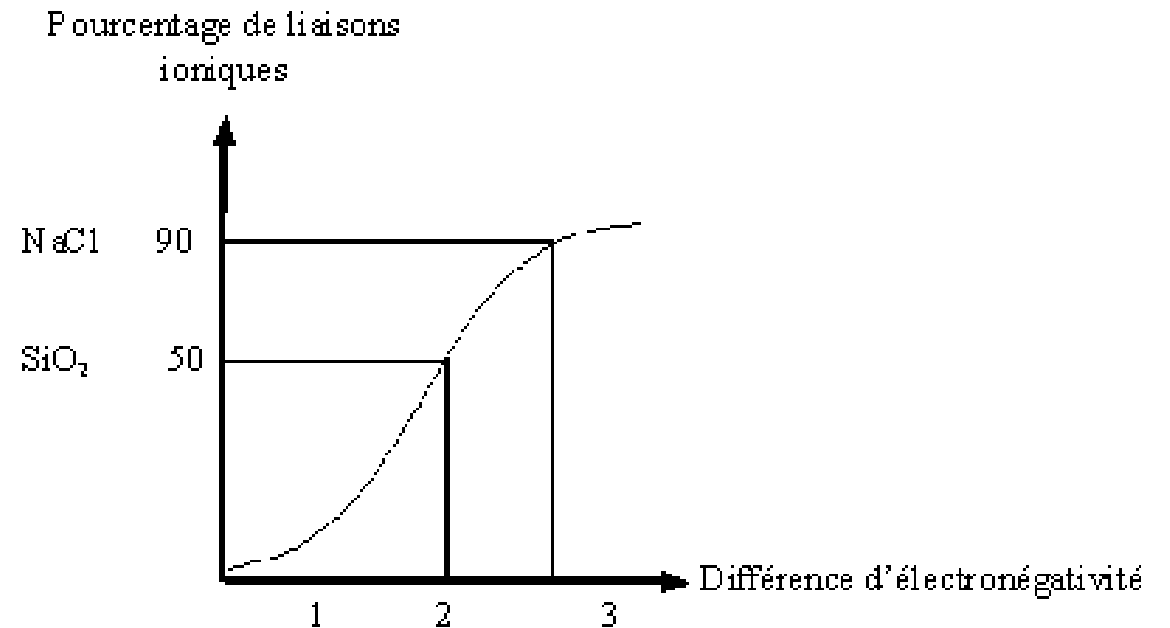
**Le Francium est l'élément chimique le moins électronégatif**

## I.3- rappels sur les liaisons chimiques

### \* Liaisons ioniques (dans les grands minéraux)

Il y a pénétration des environnements électroniques (définie par Pauling). Les minéraux cristallisés qui sont caractérisés par des liaisons ioniques sont de dureté moyenne, ils ont un point d'ébullition élevé et une mauvaise conductivité calorifique (ex : le micas).

On peut apprécier le pourcentage de ces liaisons dans les éléments par différence d'électronégativité.



## \* Liaisons covalentes

Il y a association par paire d'électrons; les cristaux résultants sont durs et indéformables (ex : diamant).

NB : carbone + liaisons covalentes = diamant  
carbone + liaisons ioniques = fusain

## \* Liaisons métalliques

Ils mettent en commun leur nuages d'électrons. Il n'y a pas de règles particulières.

**Il est exceptionnel qu'un édifice chimique soit fait d'un seul type de liaison.**

**La plupart sont à liaisons ioniques accompagnées de liaisons covalentes.**

## Cristallochimie

La **cristallochimie** (du grec « glace » et « chimie ») est l'étude des relations entre composition chimique des matériaux cristallins et leurs structures, ainsi que leurs effets sur les propriétés physiques.

Elle fait ainsi le lien entre la cristallographie, la chimie du solide et la physique de la matière condensée. Une branche voisine de la cristallochimie est la chimie des complexes.

La cristallochimie fut développée à partir de la minéralogie et de la cristallographie

Au début du xx<sup>e</sup> siècle, les premières expériences de [diffraction de rayons X](#) (Walter Friedrich, Paul Knipping et [Max von Laue](#), 1912) constituèrent une étape importante pour l'analyse systématique des structures cristallines.

De 1923 à 1926, [Victor Goldschmidt](#), considéré comme l'un des fondateurs de la cristallographie et de la [géochimie](#), établit ses principes structuraux pour les composés simples.

## Bases de la cristallographie

**Victor Goldschmidt et Fritz Laves** posèrent les postulats de remplissage de l'espace pour une structure cristalline stable (les atomes ou ions sont considérés géométriquement comme des boules dures) :

- 1- principe spatial : les atomes ou ions sont empilés de la façon la plus compacte possible ;
- 2- principe de symétrie : le cristal possède la plus haute symétrie possible ;
- 3- principe d'interaction : chaque atome ou ion est entouré par le plus de voisins possibles.

De plus, le rayon atomique ou ionique (qui peut varier en fonction du type de liaison) a une influence sur la structure. Par exemple, dans certains composés comme l'Olivine  $(\text{Mg, Fe})_2[\text{SiO}_4]$ , la structure cristalline peut être décrite comme un empilement compact hexagonal d'atomes d'oxygène, les autres atomes plus petits occupant les sites octaédriques (atomes de magnésium et de fer) et les sites tétraédriques (atomes de silicium).

La nature des liaisons chimiques dans un cristal peut être homodesmique (un type de liaison prédominant) ou hétérodesmique (groupes d'atomes ou complexes stables et isolés, inclus dans une structure plus grande).

La pyrite  $\text{FeS}_2$  est un exemple de composé hétérodesmique (liaison covalente entre les atomes de soufre, liaison ionique entre le soufre et le fer).



La classification la plus utilisée est celle de **Goldschmidt**.

Elle repose sur le principe qui veut que l'ion préférentiellement incorporé dans une structure est celui qui confère la plus grande stabilité.

## **Stabilité des assemblages ioniques**

Les règles de Pauling s'appliquent aux cristaux ioniques, dans lesquels les liaisons ioniques prédominent.

### **1. Polyèdre de coordination**

On établit les règles expérimentales de Pauling. Par définition, les assemblages ioniques se font autour d'un cation (+) entouré par des anions (-). Ce qui constitue le polyèdre de coordination. Il existe plusieurs formes selon les anions et les cations, cet assemblage n'est pas le fait du hasard, il dépend du rapport des rayons ioniques entre cation et anion :  $C / A$ .

$C / A \leq 0,155$  assemblage linéaire

$C / A \leq 0,225$  assemblage triangulaire

$C / A \leq 0,414$  assemblage tétraédrique

$C / A \leq 0,732$  assemblage octaédrique

$C / A \leq 1$  assemblage cubique.

L'essentiel des assemblages sera des tétraèdres.

**2. Règle d'association** Il faudra donc assembler les polyèdres entre eux pour avoir des minéraux. Dans un minéral, les polyèdres mettent souvent leur sommet en commun, peu d'arêtes et jamais leurs faces.

**3. Règle de parcimonie** Dans un assemblage ionique, le nombre d'éléments différents est le plus réduit possible.

## 4. Règles de substitution

( Ce sont les règles de la diadochie).

Pour que deux ions puissent se substituer dans un assemblage, il ne faut pas que leur rayon ionique dépasse 15%. Pour qu'un minéral se fasse, il faut neutraliser son électronégativité avec le plus souvent  $Mg^{2+}$  ou  $Fe^{2+}$  car les silicates ont une affinité avec ces ions : ils peuvent être ferromagnésiens :

$(SiO_4)Mg_2$  forstérite Ils forment la famille des péridots d'où les roches  
 $(SiO_4)MgFe$  olivine qui en sont constituées s'appellent les péridotites.  
 $(SiO_4)Fe_2$  fayalite (le mélange est, par définition, le plus courant)

Il existe une substitution par l'aluminium pourtant sa charge n'est pas la même que Si mais c'est parce que le rayon ionique est inférieur à 15%.  
La substitution se fait à l'intérieur du tétraèdre.

Lorsque deux ions ont la même charge, celui qui a le plus petit rayon ionique est d'abord incorporé.

Ex : 0,66 pour Mg

0,74 pour Fe

Lorsque deux ions ont le même rayon mais des charges différentes, c'est celui qui a la plus grande charge qui est incorporé de préférence.

Ex : Ca (0,99) mais sa charge est 2+

Na (0,98) avec une charge de 1+

Prenons l'exemple des feldspaths plagioclases :

- l'albite  $\text{Na}(\text{Si}_3\text{AlO}_8)$
  - l'anorthite  $\text{Ca}(\text{Si}_2\text{Al}_2\text{O}_8)$
- l'édifice est donc  
équilibré  
par la présence de  
Na et Ca.

On constate donc qu'il y a eu substitution de Si par Al à l'intérieur du polyèdre et de Na par Ca à l'extérieur

Dans la nature, la forme la plus courante sera la tétraèdre puisque Si et O sont les deux éléments les plus abondants dans la croûte terrestre.

- I. Classifications géochimiques
- II. Comportement des éléments et réservoirs géochimiques
- III. Fractionnement et équilibre géochimiques
- IV. Utilisation du fractionnement élémentaire en géochimie

# I. Classifications géochimiques

Les différents réservoirs terrestres contiennent des éléments chimiques qui s'organisent en « familles géochimiques ».

Une famille géochimique regroupe des d'éléments chimiques aux comportements proches les uns des autres.

Exemples de réservoirs géochimiques :

1. Croûte - Manteau - Noyau
2. océans - eaux de surface - eaux météoriques...
3. ...

Applications pour les éléments chimiques suivants :

1. Si, Al, K, Na
2. H, K, Na
3. Cu, Yb, U



a) classification basée sur l'énergie de formation des oxydes et des sulfures.

b) cette classification distingue plusieurs grandes familles :

- **les éléments lithophiles: Na, K, Si, Al, Ti, Mg, Ca**
- **les éléments sidérophiles: Fe, Co, Ni, Pt, Re, Os**
- **les éléments chalcophiles: Cu, Ag, Zn, Pb, S**
- **les éléments atmophiles: O, N, H, les gaz rares**

### *Remarque...*

la classification périodique garde son importance et il faut souligner la proximité des éléments d'une même colonne sur le plan géochimique :

- éléments alcalins (Li, Na, K, Rb, Cs),
- éléments alcalinoterreux (Be, Mg, Ca, Sr, Ba),
- éléments halogènes (F, Cl, Br, I),

Les éléments atmosphériques (O, N, H, les gaz rares) se concentrent dans l'atmosphère.

## Famille des éléments atmosphériques

	I																	VIII
1	<b>H</b>																	<b>He</b>
2	<b>Li</b>	<b>Be</b>										<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>		<b>Ne</b>
3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>										<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>		<b>Ar</b>
4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>
6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	<b>Lu</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>
7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	<b>Lw</b>	<b>Rf</b>	<b>Db</b>	<b>Sg</b>	<b>Bh</b>	<b>Hs</b>	<b>Mt</b>	<b>Uuu</b>	<b>Uuu</b>	<b>Uub</b>						

Série des Lanthanides

Série des Actinides

<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
<b>Ac</b>	<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102

Les éléments sidérophiles (Fe, Co, Ni, Pt, Re, Os) associés au fer, ils s'accumulent dans le noyau terrestre.

## Famille des éléments sidérophiles

	I																VIII	
1	<b>H</b>																<b>He</b>	
2	<b>Li</b>	<b>Be</b>										<b>B</b>	<b>C</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>F</b>	<b>Ne</b>	
3	<b>Na</b>	<b>Mg</b>										<b>Al</b>	<b>Si</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Cl</b>	<b>Ar</b>	
4	<b>K</b>	<b>Ca</b>	<b>Sc</b>	<b>Ti</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Ge</b>	<b>As</b>	<b>Se</b>	<b>Br</b>	<b>Kr</b>
5	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Y</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Mo</b>	<b>Tc</b>	<b>Ru</b>	<b>Rh</b>	<b>Pd</b>	<b>Ag</b>	<b>Cd</b>	<b>In</b>	<b>Sn</b>	<b>Sb</b>	<b>Te</b>	<b>I</b>	<b>Xe</b>
6	<b>Cs</b>	<b>Ba</b>	<b>Lu</b>	<b>Hf</b>	<b>Ta</b>	<b>W</b>	<b>Re</b>	<b>Os</b>	<b>Ir</b>	<b>Pt</b>	<b>Au</b>	<b>Hg</b>	<b>Tl</b>	<b>Pb</b>	<b>Bi</b>	<b>Po</b>	<b>At</b>	<b>Rn</b>
7	<b>Fr</b>	<b>Ra</b>	<b>Lw</b>	<b>Rf</b>	<b>Db</b>	<b>Sg</b>	<b>Bh</b>	<b>Hs</b>	<b>Mt</b>	<b>Uun</b>	<b>Uuu</b>	<b>Uub</b>						

Série des  
Lanthanides

Série des  
Actinides

<b>La</b>	<b>Ce</b>	<b>Pr</b>	<b>Nd</b>	<b>Pm</b>	<b>Sm</b>	<b>Eu</b>	<b>Gd</b>	<b>Tb</b>	<b>Dy</b>	<b>Ho</b>	<b>Er</b>	<b>Tm</b>	<b>Yb</b>
57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
<b>Ac</b>	<b>Th</b>	<b>Pa</b>	<b>U</b>	<b>Np</b>	<b>Pu</b>	<b>Am</b>	<b>Cm</b>	<b>Bk</b>	<b>Cf</b>	<b>Es</b>	<b>Fm</b>	<b>Md</b>	<b>No</b>
89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102

Les éléments chalcophiles (Cu, Ag, Zn, Pb, S) forment aisément des sulfures.

## Famille des éléments chalcophiles

	I																	VIII
1	<b>H</b> 1																	<b>He</b> 2
2	<b>Li</b> 3	<b>Be</b> 4										<b>B</b> 5	<b>C</b> 6	<b>N</b> 7	<b>O</b> 8	<b>F</b> 9		<b>Ne</b> 10
3	<b>Na</b> 11	<b>Mg</b> 12										<b>Al</b> 13	<b>Si</b> 14	<b>P</b> 15	<b>S</b> 16	<b>Cl</b> 17		<b>Ar</b> 18
4	<b>K</b> 19	<b>Ca</b> 20	<b>Sc</b> 21	<b>Ti</b> 22	<b>V</b> 23	<b>Cr</b> 24	<b>Mn</b> 25	<b>Fe</b> 26	<b>Co</b> 27	<b>Ni</b> 28	<b>Cu</b> 29	<b>Zn</b> 30	<b>Ga</b> 31	<b>Ge</b> 32	<b>As</b> 33	<b>Se</b> 34	<b>Br</b> 35	<b>Kr</b> 36
5	<b>Rb</b> 37	<b>Sr</b> 38	<b>Y</b> 39	<b>Zr</b> 40	<b>Nb</b> 41	<b>Mo</b> 42	<b>Tc</b> 43	<b>Ru</b> 44	<b>Rh</b> 45	<b>Pd</b> 46	<b>Ag</b> 47	<b>Cd</b> 48	<b>In</b> 49	<b>Sn</b> 50	<b>Sb</b> 51	<b>Te</b> 52	<b>I</b> 53	<b>Xe</b> 54
6	<b>Cs</b> 55	<b>Ba</b> 56	<b>Lu</b> 71	<b>Hf</b> 72	<b>Ta</b> 73	<b>W</b> 74	<b>Re</b> 75	<b>Os</b> 76	<b>Ir</b> 77	<b>Pt</b> 78	<b>Au</b> 79	<b>Hg</b> 80	<b>Tl</b> 81	<b>Pb</b> 82	<b>Bi</b> 83	<b>Po</b> 84	<b>At</b> 85	<b>Rn</b> 86
7	<b>Fr</b> 87	<b>Ra</b> 88	<b>Lw</b> 103	<b>Rf</b> 104	<b>Db</b> 105	<b>Sg</b> 106	<b>Bh</b> 107	<b>Hs</b> 108	<b>Mt</b> 109	<b>Uun</b> 110	<b>Uuu</b> 111	<b>Uub</b> 112						

Série des Lanthanides	<b>La</b> 57	<b>Ce</b> 58	<b>Pr</b> 59	<b>Nd</b> 60	<b>Pm</b> 61	<b>Sm</b> 62	<b>Eu</b> 63	<b>Gd</b> 64	<b>Tb</b> 65	<b>Dy</b> 66	<b>Ho</b> 67	<b>Er</b> 68	<b>Tm</b> 69	<b>Yb</b> 70
Série des Actinides	<b>Ac</b> 89	<b>Th</b> 90	<b>Pa</b> 91	<b>U</b> 92	<b>Np</b> 93	<b>Pu</b> 94	<b>Am</b> 95	<b>Cm</b> 96	<b>Bk</b> 97	<b>Cf</b> 98	<b>Es</b> 99	<b>Fm</b> 100	<b>Md</b> 101	<b>No</b> 102



## **Les éléments lithophiles :**

Deux tendances sont distinguées dans la famille des éléments lithophiles:  
**les éléments volatils et les éléments réfractaires**

Dans les processus de fusion ou de cristallisation (processus géologiques essentiels et majeurs) :

1. les éléments lithophiles volatils se concentrent préférentiellement dans les liquides (fusion) ou les premiers cristaux (cristallisation).  
Exemple : le K ou le Na.

2. les éléments réfractaires se concentrent dans les résidus solides (fusion) ou dans les derniers cristaux (cristallisation). Exemple : le Mg ou le Cr.

Par conséquence, au cours des temps géologiques, des différences géochimiques relativement importantes sont apparues:

1. le manteau et la croûte (refroidissement, convection)
2. la croûte continentale (préservation) et la croûte océanique (recyclage).



## Les autres planètes du système solaire :

1. Les roches extra-terrestres sont classées de la même manière que les roches terrestres.
2. Sur une planète, le manque d'atmosphère (Lune, Mars, ...) et l'absence d'eau limitent les mécanismes de transport et d'érosion. Les phénomènes sédimentaires sont donc de très faibles ampleurs sur les planètes et satellites qui ressemblent à la terre.
3. Il existe 2 types de météorites: les achondrites et les chondrites (85%). Ces roches n'ont pas d'équivalent terrestre car elles correspondent à des témoins très anciens de la formation du système solaire : la phase nébuleuse. Les chondrites sont formées par condensation des gaz de la nébuleuse solaire et de gouttelettes de liquides silicatés. En géochimie, elles représentent « la Terre initiale ».

## **I. 3. Comportement des éléments et réservoirs géochimiques**

Du point de vue géochimique, les principaux réservoirs terrestres sont :

- 1. les roches ignées ou endogènes (basalte, granite, gabbro, ...)**
- 2. les roches sédimentaires (pélite, calcaire, grès, ...)**
- 3. les roches métamorphiques (schiste, marbre, gneiss, ...)**

**Les roches ignées ou endogènes** sont issues de processus magmatiques : la fusion partielle et la cristallisation fractionnée.

**Les roches sédimentaires** se forment par l'accumulation de particules détritiques et biologiques ou par précipitation chimique majoritairement au fond des océans mais également sur les continents.

**Les roches métamorphiques** résultent de la transformation à l'état solide de roches pré-existantes. Il s'agit d'une « cuisson » à haute température, sous pression et en présence de fluides aqueux.

### I. 3. a - les éléments majeurs

Les éléments majeurs constituent les minéraux primaires ou cardinaux

**O : l'oxygène** est présent dans tous les réservoirs terrestres.

**Si : le silicium** associé à 4 atomes d'oxygène constitue un tétraèdre qui est l'élément de base de la famille minéralogique principale et prédominante dans la croûte et le manteau: les silicates.

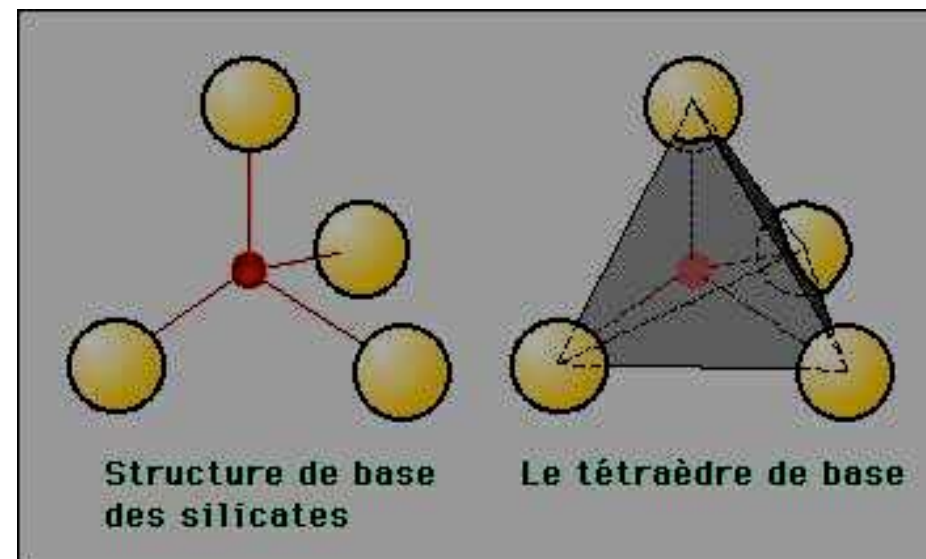
1. la teneur en silicium des minéraux est à la base de la classification des roches endogènes ou ignées.

2. l'acidité minérale (% en Si) est :

- faible dans les minéraux du Manteau (olivines, pyroxènes, amphiboles)
- forte dans les minéraux de la Croûte Continentale (micas, feldspaths, quartz).

<b>Oxygène (O)</b>	<b>46,6 %</b>	<b>~75 %</b>
<b>Silicium (Si)</b>	<b>27,7</b>	
Aluminium (Al)	8,1	
Fer (Fe)	5,0	
Calcium (Ca)	3,6	
Sodium (Na)	2,8	
Potassium (K)	2,6	
Magnésium (Mg)	2,1	
... les autres	1,5	

<b>Le bilan des charges</b>		
Oxygène (O <sup>2-</sup> )	:	4 x - 2 = - 8
Silicium (Si <sup>4+</sup> )	:	1 x + 4 = <u>+ 4</u>
		excès - 4



**Mg et Fe**, particulièrement abondants dans les roches du Manteau et les roches métamorphiques.

**Ca**, surtout présent dans les roches magmatiques (fusion continentale et manteau) et les carbonates sédimentaires.

**Al**, fréquent ou se concentre dans :

- les nombreux minéraux primaires ou cardinaux car il entre en substitution avec le silicium (Si) dans le tétraèdre de base des silicates ( $\text{SiO}_4$ ).
- les minéraux argileux des roches sédimentaires et dans les micas des roches métamorphiques (biotite, muscovite).

**K et Na**, concentrés dans les liquides magmatiques initiaux. On les retrouve donc dans les premiers cristaux issus de la cristallisation fractionnée.



Les lois du fractionnement géochimique conduisent à l'apparition des différents réservoirs terrestres dans lesquels les éléments chimiques se répartissent différemment.

Trois (3) processus géologiques majeurs ont permis de constituer ces réservoirs terrestres et contrôlent leur évolution dans le temps.

PG1 : fusion des roches (magmatisme mantellique et métamorphisme)

PG2 : cristallisation des magmas (magmatisme et métamorphisme)

PG3 : érosion et sédimentation

PG1 + PG2 : géodynamique interne, énergie de la Terre  
(chaleur interne et radioactivité).

PG3 : géodynamique externe, énergie du Soleil.

*Sur la durée des temps géologiques, les conséquences sont:*

**1. Le manteau** montre un enrichissement en éléments réfractaires (Mg et Cr), et un appauvrissement en éléments fusibles (Na, K, Al, Ca, et Si). Le manteau est un réservoir à caractère résiduel.

**2. La croûte continentale** montre un enrichissement en éléments fusibles ou volatils, présents dans les feldspaths, le quartz et les minéraux micacés.

**3. Les océans** sont enrichis en cations solubles (Na, K, Ca) et en anions solubles (Cl, SO<sub>4</sub>).

**4. Les roches sédimentaires détritiques** concentrent les éléments insolubles et fusibles (Si, Fe et Al) représentés par le quartz et les minéraux argileux.

### **I. 3. b - les éléments mineurs ou en traces**

Lorsqu'un élément chimique donné se trouve en faible ou très faible quantité dans un milieu géologique son comportement dans les édifices cristallins des minéraux est particulier, il peut :

- participer à la structure en se substituant (substitution ionique)
- être piégé dans les interstices, les défauts du réseau cristallin (incorporation)

Parmi, les éléments chimiques souvent trouvés sur la forme de traces, 2 catégories d'éléments traces sont distingués :

- les éléments LILE ou « Large-Ion Lithophile Elements »
- les éléments HFSE ou « High Field-Strength Elements »


**Les éléments LILE** sont des ions de grande taille à faible charge ( $K^+$ ,  $Rb^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Ba^+$ , ces éléments :

- pénètrent difficilement dans les minéraux essentiels ou cardinaux.
- se concentrent dans les liquides résiduels magmatiques (cristallisation fractionnée de Bowen).

**Les éléments HFSE** sont des ions de très petite taille à très forte charge ( $Zr^{4+}$ ,  $Nb^{4+}$ ,  $Th^{4+}$ ,  $U^{4+}$ ), ces éléments :

- développent un fort champ électrostatique impropre à la substitution avec les éléments majeurs dans les minéraux ordinaires.

Exemple de l'incorporation de l'Ytterbium (Terres Rares) lors de la précipitation d'un calcaire marin:  $Yb^{3+}$  (0.99 Å)  $\approx$   $Ca^{2+}$  (1.00 Å).

La substitution n'est possible que paire à paire : ( $Ca^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ )  ( $Yb^{3+}$ ,  $Na^+$ )

**De manière contradictoire, les éléments LILE ou HFSE sont des éléments qui s'accumulent dans la croûte continentale terrestre.**

Contrairement aux trois autres planètes internes (auxquelles on peut ajouter la Lune) la Terre est très active aussi bien au niveau de ses enveloppes externes (océan et atmosphère) qu'internes (croûte, manteau, noyau).

L'observation montre qu'il s'agit d'un objet différencié en **réservoirs** plus ou moins concentriques : le noyau métallique, le manteau et la croûte silicatés, l'océan et l'atmosphère. Les géochimistes considérant que cette structure n'est pas le résultat du hasard, cherchent à en comprendre la logique : comment ces différentes enveloppes se sont-elles mises en place, comment interagissent-elles et leurs compositions évoluent-elles ?

Depuis que l'action de l'Homme sur son environnement est devenue sensible, il est important de comprendre comment le système terrestre réagit aux contraintes qui lui sont imposées.

Une difficulté dans la présentation pédagogique vient du fait que les réservoirs externes sont l'objet de processus à courte échelle de temps contrairement aux processus internes beaucoup plus lents. Cette dualité est une caractéristique fondamentale du fonctionnement de la planète.



L'évolution chimique de la Terre procède par des mécanismes souvent complexes pouvant être décomposés en **processus unitaires**.

Le principe fondamental en est le **bilan de masse** que l'on appliquera à quelques processus de différenciation terrestre simples mais fondamentaux : **mélange, fusion et cristallisation**.

## **1.1 MÉLANGES GÉOCHIMIQUES**

Les séparations de phases (cristallisation des carbonates marins, explosion volcanique...) et les mélanges (exutoire d'un fleuve dans l'océan, dépôt d'un sédiment...) constituent des cas de figure extrêmement commun dans la nature.

La géochimie permet souvent d'analyser ces processus de façon quantitative. Nous allons rappeler ici comment le mélange de deux composés quelconques en proportions quelconques, peut être abordé de façon quantitative.

## 1.2 SÉPARATIONS DE PHASES ET FRACTIONNEMENT

La différenciation terrestre est le résultat d'une séparation des éléments chimiques les uns des autres, ce que l'on appelle le **fractionnement**. Parmi les processus de fractionnement, les séparations de phases sont les plus efficaces ; il est donc important de comprendre leur logique si l'on veut modéliser la différenciation terrestre.

Il existe de nombreux cas possibles de séparation de phases impliquant solide, liquide et gaz. Nous n'envisagerons pas de façon systématique toutes les possibilités mais choisirons de décrire trois modèles typiques.

### 1.2.1 Fusion partielle

La fusion partielle d'une roche (de la croûte ou du manteau) est une autre application du principe de bilan de masse. On la modélise généralement en supposant que le liquide formé est en équilibre avec le résidu solide. On peut écrire, si  $C_{so}$  est la concentration d'un élément dans le solide initial,  $C_s$  celle du solide final en équilibre avec le liquide de concentration  $C$  et de fraction  $F$  :

### 1.2.2 Cristallisation fractionnée

La cristallisation fractionnée est un processus très classique en pétrologie magmatique.

Lorsqu'un magma cristallise, le solide n'ayant pas la même composition que le liquide, ce dernier voit sa composition évoluer progressivement : cette évolution dépend de la nature et la proportion des phases qui cristallisent (voir § 2.1).

Prenons l'exemple de l'île de Terceira (Açores) où l'on rencontre des laves dont la composition varie depuis des basaltes typiques jusqu'à des trachytes.

### 1.2.3 Un processus complexe : assimilation-cristallisation fractionnée

Le lecteur perspicace aura relevé que les exemples précédents correspondent à des îles océaniques. Dans ce contexte, la contamination par la croûte continentale est exclue, ce qui simplifie l'interprétation.

Dans le volcanisme d'arc et plus précisément celui lié aux marges continentales (Andes, par exemple), un modèle de cristallisation fractionnée simple n'est pas compatible, en général, avec les observations. La chimie des éléments majeurs indique pourtant que la cristallisation fractionnée est un phénomène important. Les isotopes radiogéniques (par exemple, le Sr) montrent que la fusion simple de la croûte est exclue, mais qu'une légère participation de celle-ci est toutefois nécessaire puisque les rapports isotopiques sont toujours plus élevés que les valeurs mantelliques et que le processus de cristallisation fractionnée ne peut en aucun cas faire varier ces rapports isotopiques.

## **L'évolution de la croûte continentale.**

La croûte terrestre est donc composée de deux types d'entités : les océans et les continents. On a vu que l'évolution des océans est essentiellement régie par la croissance aux dorsales océaniques et par la destruction dans les zones de subduction, et que la vie d'un océan ne dépasse pas 200 Ma.

Les continents ont une histoire plus complexe et plus longue puisque des roches continentales peuvent avoir des âges aussi anciens que 3,8 Ga et que des granites devaient déjà exister à 4,364 Ga (voir chapitre 1).

Cette différence importante entre les deux types de croûte résulte du caractère cyclique de l'évolution des continents : le matériau continental, une fois formé, évolue et se transforme à l'intérieur de la croûte continentale. Il n'a que très peu tendance à disparaître par subduction comme le fait la croûte océanique.

Quelles sont les modalités de ce cycle géologique ?

Pour décrire ce cycle, on peut regarder notre environnement et observer ce qui s'y passe. Si nous comprenons les phénomènes qui se produisent à l'heure actuelle et si nous admettons que les mêmes causes engendrent les mêmes effets quelle que soit l'époque où les phénomènes se déroulent (principe de *l'uniformitarisme*), nous pourrions facilement projeter nos connaissances dans le passé et reconstruire l'évolution dans le temps de la croûte continentale.

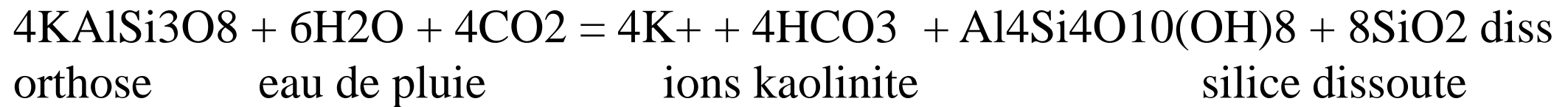
## *L'altération*

Commençons la description de ce cycle par l'altération des roches qui résulte de leur interaction avec l'atmosphère et l'hydrosphère\*. Cette altération détermine une modification chimique et physique des roches, car celles-ci sont des assemblages de minéraux en général formés dans des conditions de température et pression différentes de celles qui règnent à la surface. Ces minéraux sont donc instables dans ces nouvelles conditions. Cette altération est cependant lente pour des raisons de cinétique chimique. Des différences de température comme celles que l'on remarque d'un climat à l'autre sont suffisantes pour que les effets de l'altération soient très différents. En climat froid, l'altération est faible ; en climat équatorial, la température élevée jointe à l'abondance des pluies engendre une altération profonde et plus rapide. A l'altération chimique s'ajoute aussi l'altération mécanique. Dans tous les cas, les roches se fragmentent sous l'action de la gravité et des variations de température.

Les matériaux les plus sensibles à l'altération chimique sont les roches magmatiques et les roches métamorphiques parce qu'elles se sont formées dans des conditions de pression et de température très différentes des conditions atmosphériques.

Prenons l'exemple d'un granite constitué de quartz, orthose, plagioclase et d'un peu de mica (cfr Tableau 2.1) et examinons le devenir de ses minéraux.

L'équation qui exprime l'altération de l'orthose est la suivante :



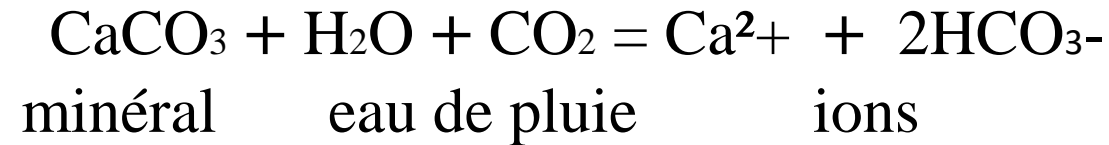


L'eau de pluie dissout un peu de  $\text{CO}_2$  présent dans l'air, ce qui forme de l'acide carbonique  $\text{H}_2\text{CO}_3$ , acide faible qui donne des ions  $\text{HCO}_3^-$  dans les produits de la réaction.

Cet acide libère le potassium de l'orthose en transformant le tectosilicate en un phyllosilicate avec dissolution de  $\text{SiO}_2$  dans l'eau.

Des équations similaires peuvent être écrites pour le plagioclase et la biotite et, plus généralement, pour n'importe quel silicate (autre que le quartz). Elles conduisent toutes à la formation de phyllosilicates (appelés aussi minéraux argileux), à la mise en solution des cations\*, à la formation de  $\text{HCO}_3^-$  - et à la dissolution de  $\text{SiO}_2$ . Dans les conditions normales de l'altération, le quartz ne sera pratiquement pas affecté chimiquement. Il sera seulement fragmenté sous l'action des agents physiques.

Une autre équation intéressante est celle qui a trait à la dissolution des carbonates, minéraux essentiels dans les roches sédimentaires (cfr plus loin) :



Le transport par l'eau, par le vent ou la glace est concomitant ou postérieur à l'altération chimique. La combinaison des processus engendre l'*érosion* qui nivelle petit à petit les reliefs et ne s'arrête en principe que lorsque l'altitude est sensiblement ramenée au niveau de la mer.

C'est donc dans la mer qu'aboutissent finalement les produits de l'altération, en l'occurrence les minéraux très résistants chimiquement (comme le quartz), les minéraux argileux (comme la kaolinite) et les substances dissoutes (ions, molécules dissoutes).

En plus de ces dépôts ou sédiments terrigènes, on trouve aussi dans le bassin sédimentaire des matériaux d'origine *biochimique* et des matériaux de *précipitation chimique* directe. Les premiers font intervenir des organismes fixant le  $\text{CaCO}_3$  par exemple dans leur coquille ou leur test\* (foraminifère par exemple) ou construisant directement des récifs (coraux, algues, etc.). Ils donnent naissance ainsi à des matériaux carbonatés (calcaires construits, boue calcareuse formée par des organismes et/ou des détritiques d'organismes). Certains organismes provoquent la précipitation de silice pour former des boues à radiolaires (radiolarites).

D'autres enfin créent localement des conditions qui favorisent la précipitation de certains minéraux. Dans des endroits de faible circulation de l'eau de mer (mers fermées, fjords, lagunes), le manque d'oxygène permet la prolifération dans le sédiment de bactéries anaérobies qui, quand les conditions deviennent suffisamment réductrices, catalysent la réduction du  $\text{SO}_4^{2-}$  de l'eau de mer en  $\text{S}^{2-}$ , lequel se combine à des cations métalliques et précipitent des sulfures ( $\text{FeS}_2$  par exemple).

Quoique de tels environnements – dits euxiniques\* – soient exceptionnels, ils jouent cependant un rôle capital pour débarrasser l'eau de mer de certains éléments toxiques.

Les principaux matériaux de précipitation chimique directe sont le sel (halite NaCl), le gypse ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), et la calcite  $\text{CaCO}_3$ . Ces minéraux se forment par évaporation progressive de l'eau de mer dans des lagunes isolées de la mer, l'évaporation amenant la saturation de l'eau de mer en ces sels et leur précipitation. Une place particulière est faite aux sédiments organiques, formés par l'accumulation de débris de végétaux, pratiquement à l'endroit où ceux-ci poussaient. Un enfouissement rapide sous d'autres matériaux leur permet d'échapper à l'oxydation totale et l'évolution ultérieure les transforme en charbon. Dans cet ordre d'idée, mentionnons que la plupart des sédiments contiennent un peu de matières organiques (algues, débris de plantes ou de tissus mous d'animaux) qui vont évoluer pour donner des produits pétroliers (huile et/ou gaz).

## 2.1 ÉLÉMENTS-TRACES

Un élément-trace se définit par opposition à un élément majeur. De par sa faible concentration **il ne sera pas à l'origine de la disparition ou apparition de phases minérales**. Son comportement sera imposé par l'évolution du système lui-même.

En général, un élément-trace sera un traceur potentiel d'un processus qu'il servira à révéler. Son comportement aura des similitudes avec celui des isotopes.