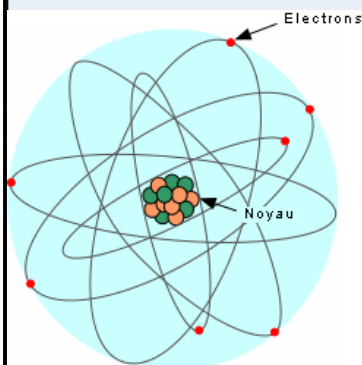


Les Matériaux de la planète

1 : Les Minéraux

2^{ème} Année
Génie Civil

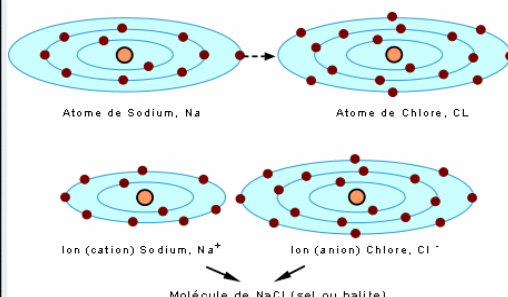
Eléments chimiques



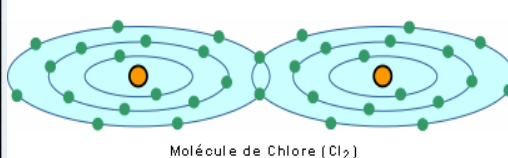
- Les matériaux de notre planète sont constitués d'**éléments chimiques**, comme l'hydrogène, l'oxygène, le fer, le nickel, etc.... Ils sont classés dans le tableau périodique des éléments chimiques nommé : tableau de **Mendeleïev**.
- Ces éléments sont formés par des **atomes**, l'unité de base de la matière. Voici un modèle simplifié de l'atome.
- L'atome consiste en un noyau central composé de **protons** (charges positives) et de **neutrons** (aucune charge), entouré d'**électrons** (charge négative) qui gravitent autour du noyau.
- Toute la masse est concentrée dans le noyau, les électrons ayant une masse négligeable.
- La **masse atomique** d'un atome est donc donnée par la masse du noyau, soit le nombre de protons + le nombre de neutrons.
- Chaque atome possède un **numéro atomique** qui est donné par le nombre de protons.

Les molécules

LIEN IONIQUE



LIEN COVALENT

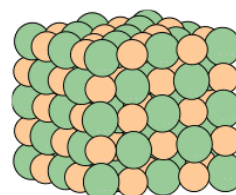
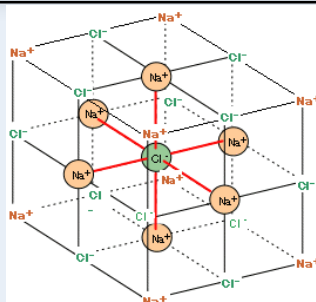


Les **molécules** sont formées d'un assemblage d'atomes qui sont liés entre eux par deux principaux types de liens: les liens ioniques et les liens covalents.

Le **lien ionique** est assuré par un transfert d'électron(s) d'un atome à l'autre. On présente ici l'exemple du NaCl (sel): le transfert d'un électron du sodium (Na) au chlore (Cl) produit une molécule stable, le chlorure de sodium (NaCl), dans lequel les atomes sont sous leur forme ionique (les ions Na^+ et Cl^-).

Dans le **lien covalent**, les atomes s'unissent par partage d'électrons. C'est le cas, par exemple, des gaz hydrogène (H_2), Oxygène (O_2) et chlore (Cl_2).

L'ESPÈCE MINÉRALE



- Encore un cran au-dessus des molécules, on a les **minéraux**.
- Ceux-ci sont constitués d'atomes et de molécules, et se définissent sur **deux critères** indissociables: la composition chimique et la structure atomique.
- En simplifiant, on peut dire que le minéral, c'est la matière ordonnée.
- Le minéral **halite** est un exemple simple qui illustre bien la dualité de la définition de l'espèce minérale. Sa composition chimique est NaCl, le chlorure de sodium (le sel de table!). Le minéral halite possède une **structure atomique** déterminée qu'on dit **cubique**.
- On l'appelle cubique parce que l'**arrangement** des atomes, en alternance régulière entre les Cl et les Na, forme une **trame cubique** comme le montre ce modèle (schéma de gauche).
- En réalité, les ions sont tassés les uns sur les autres, mais conservent toujours la même structure (schéma de droite).

SUBSTITUTION

ANION (-)	CATIONS (+)		
 O^{2-} $R = 1,40$	Si^{4+}  $R = 0,39$	Al^{3+}  $R = 0,51$	
	Fe^{3+}  $R = 0,64$	Fe^{2+}  $R = 0,74$	Mg^{2+}  $R = 0,66$
	Na^{1+}  $R = 0,97$	Ca^{2+}  $R = 0,99$	K^{1+}  $R = 1,33$

R = rayon ionique en Angstroms ($1\text{\AA} = 10^{-9}\text{ mm}$)

○ Même si chaque minéral possède une composition chimique définie, on admet certaines variations.

○ Ainsi, il peut y avoir substitution de certains ions pour d'autres.

○ Par exemple, le minéral olivine a la composition $(Fe,Mg)_2SiO_2$, ce qui signifie que la proportion entre le fer et le magnésium peut varier.

○ Les substitutions d'ions dans les minéraux sont en grande partie contrôlées par **la taille et la charge des ions**, ce qu'illustre le schéma qui suit.

○ Ainsi, il sera facile de faire des substitutions d'ions de taille et de charge semblables, comme de substituer le fer (Fe) au magnésium (Mg), ou le sodium (Na) au calcium (Ca), mais on pourra difficilement substituer du potassium (K) ou de l'oxygène (O) à l'aluminium (Al).

Identification des minéraux

Les minéraux possèdent des propriétés physiques, chimiques et mécaniques qui permettent de les distinguer entre eux et qui deviennent des critères d'identification.

1. Les propriétés organoleptiques

Ce sont les propriétés détectables par les organes de la perception sensorielle (*les cinq sens sont la vue, le toucher, l'ouïe, le goût et l'odorat*). Elles permettent une détermination rapide des minéraux, mais ne sont pas très efficaces et ne sont surtout utiles que sur le terrain. Ces propriétés sont :

- La couleur,
- La couleur du trait sur porcelaine,
- L'éclat (pouvoir de réflexion de la lumière),
- la densité,
- la dureté,
- la forme cristalline,
- Le clivage (plan de faible cohésion),
- Effervescence (réaction à l'acide).

Variétés de quartz



FIGURE 5.15

Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition
Copyright © W.W. Norton & Company

Améthyste, variété violette de quartz



Couleur



Saphir



Rubis



Corindon

Variétés de corindon: Al_2O_3

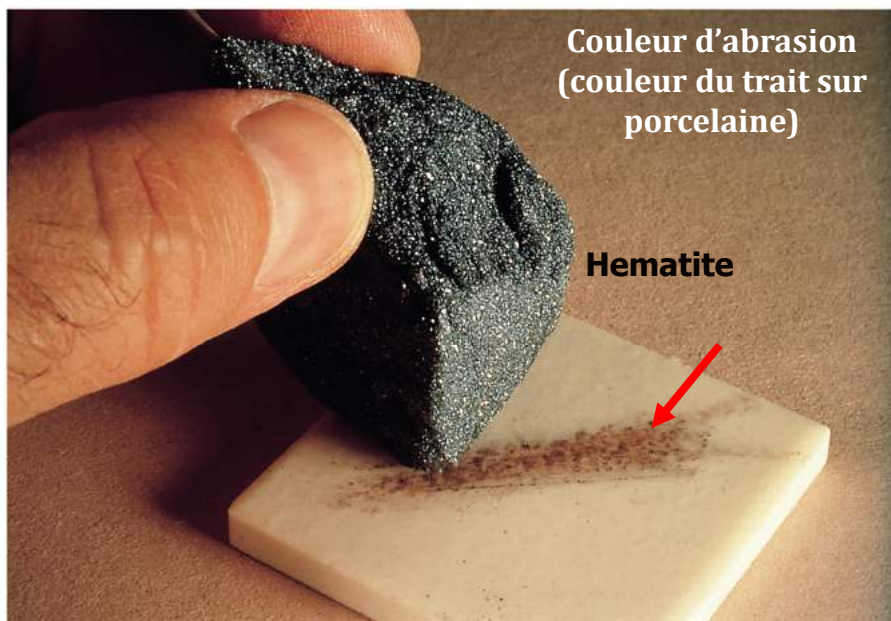


FIGURE 5.16

Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition
Copyright (c) W.W. Norton & Company

Pyrite

(a)

FIGURE 5.17

Eclat métallique*Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition*
Copyright (c) W.W. Norton & Company**Eclat non-métallique****Feldspath**

(b)

FIGURE 5.17

Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition
Copyright (c) W.W. Norton & Company

La dureté d'un minéral correspond à sa résistance à se laisser rayer. Elle est variable d'un minéral à l'autre. Certains minéraux sont très durs, comme le diamant, d'autre plutôt tendres, comme le talc. Les minéralogistes ont une échelle relative de dureté qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur, de 1 à 10. Cette échelle a été construite par le minéralogiste autrichien Friedrich Mohs et se nomme par conséquent **l'échelle de Mohs**

DURETÉ		
Rayés par l'ongle	1	Talc
Rayés par une pièce en cuivre de un cent	2	Gypse
	3	Calcite
Rayés par la lame d'acier d'un canif	4	Fluorite
	5	Apatite
Rayent le verre	6	K-feldspath
	7	Quartz
	8	Topaze
	9	Corindon
	10	Diamant

La forme des cristaux

Automorphe :

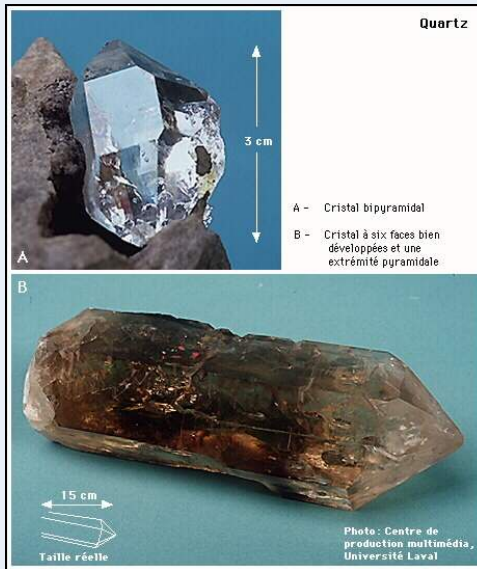
lorsque le cristal a pu se former en se développant librement, il est limité par des surfaces planes, souvent brillantes, aux orientations caractéristiques.



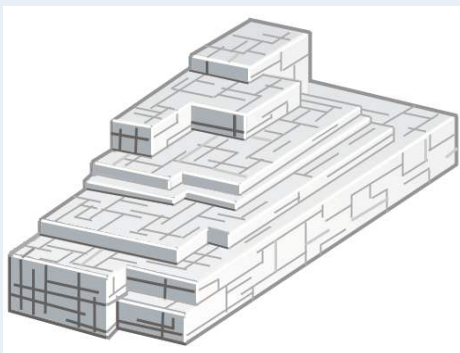
Xénomorphe :

lorsque le cristal se développe dans les interstices résiduels d'une roche.

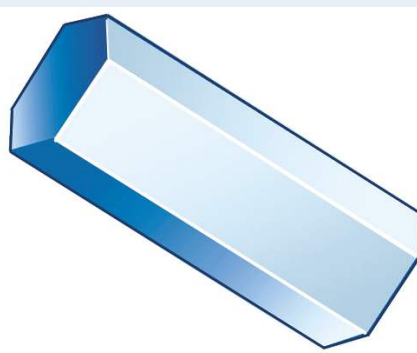
Forme cristalline de quartz, calcite et halite



Plans de clivage dans un cristal



Clivage



Surface d'un cristal

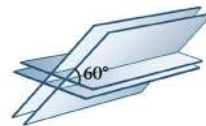
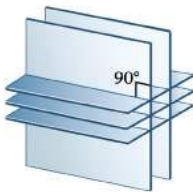
Clivage de calcite et absence de clivage chez le quartz



Plans de clivage de la calcite



Clivage



(a)



(b)

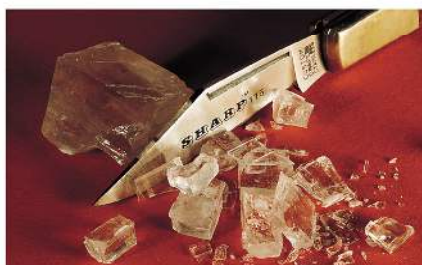
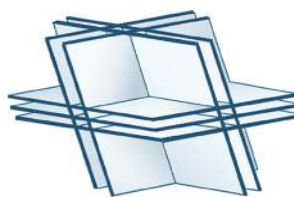
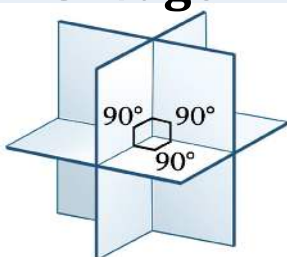


(c)

FIGURE 5.19

Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition
Copyright (c) W.W. Norton & Company

Clivage



(d)

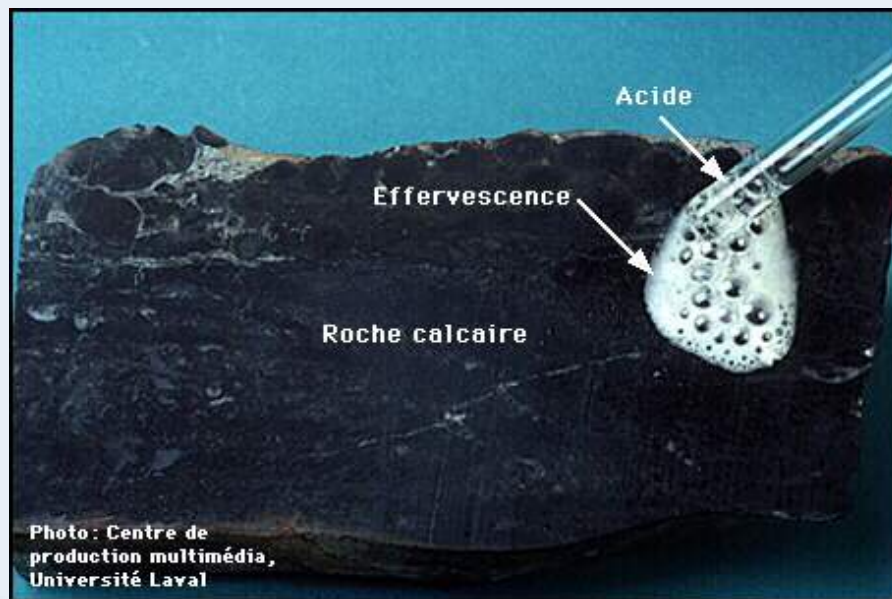


(e)

FIGURE 5.19

Earth: Portrait of a Planet, 2nd Edition
Copyright (c) W.W. Norton & Company

Effervescence de la calcite



Identification des minéraux

2. Propriétés optiques

Les propriétés optiques constituent un élément diagnostique fondamental dans l'identification d'un minéral. Mais la détermination de ces propriétés relève plutôt du spécialiste.

En géologie, les moyens techniques permettent d'amincir des tranches de minéraux collées sur des lamelles de verre si minces (30 micromètres) qu'elles deviennent tout à fait transparentes.

On peut alors étudier ces minéraux aux microscope, comme font les biologistes avec des tissus ou des microorganismes.

Chaque groupe de minéraux possède ses propriétés optiques, c'est à dire qu'ils transmettent différemment la lumière et qu'ils produisent des couleurs caractéristiques lorsqu'ils sont observés en lumière polarisée, ce qui, en bout de ligne, permet de les identifier.

Identification des minéraux

3. Diffraction des rayons X

c'est la méthode la plus précise qu'utilise les géologues. Elle consiste :

- la séparation de la phase minérale
- le broyage
- le bombardement de l'échantillon par des rayons X
- l'enregistrement des raies de diffraction X
- le dépouillement du spectre et la recherche du nom du minéral dans les fichiers ASTM

Remarque: une variété de la méthode permet la détermination des paramètres de la maille du minéral (cristal tournant)

Identification des minéraux

4. Analyse chimique

L'analyse chimique constitue aussi un moyen efficace pour l'identification des minéraux et pour la détermination des conditions de formation.

Les méthodes analytiques sont multiples : (classique, spectrométrie des rayonnements électromagnétiques, spectrométrie des rayonnements nucléaires).

On y voit que deux éléments seulement, Si et O, comptent pour près des trois quarts (74,3%) de l'ensemble des matériaux.

Il n'est donc pas surprenant qu'un groupe de minéraux composés fondamentalement de Si et O avec un certain nombre d'autres ions et nommés **silicates**, compose à lui seul 95% du volume de la croûte terrestre.

A noter que cette répartition n'est applicable qu'à la croûte terrestre. On considère que le noyau est composé presque uniquement de fer et de nickel, ce qui est bien différent de ce qu'on présente ici.

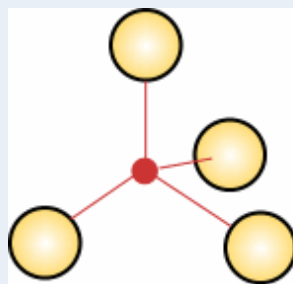
Lors de la formation de la terre, les éléments légers, comme l'oxygène et le silicium ont migré vers l'extérieur, alors que les éléments plus lourds, comme le fer, se sont concentrés au centre.

Proportion des éléments chimiques dans la croûte terrestre.

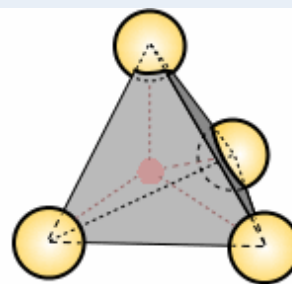
Oxygène (O)	46,6 *	~75 %
Silicium (Si)	27,7	

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

Structure de base des silicates



Structure de base des silicates



Le tétraèdre de base

Tous les silicates possèdent une structure de base composée des ions Si^{4+} et O^{2-} (schéma de gauche).

Si on relie les centres des oxygènes, on obtient un volume qui forme un tétraèdre, le **tétraèdre de base** (schéma de droite).

Le silicium occupe le centre du tétraèdre.

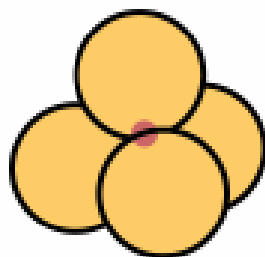
Charges électriques

Le bilan des charges

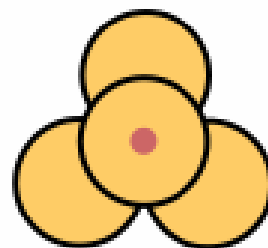
Oxygène (O^{2-})	:	$4 \times -2 = -8$
Silicium (Si^{4+})	:	$1 \times +4 = +4$
		excès -4

Le calcul des charges électriques montre qu'un tétraèdre est chargé négativement.

Représentation du tétraèdre de base



Vue de côté



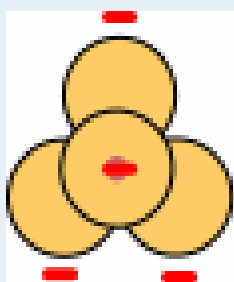
Vue du haut

A des fins de simplification dans la construction de modèles, on représente ainsi le tétraèdre de base.

Principales caractéristiques des silicates

MINÉRAL		FORMULE CHIMIQUE IDÉALISÉE	CLIVAGE	RÉSEAU CRISTALLIN
OLIVINE		$(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$	Aucun	Tétraèdre isolé (B)
Groupe des PYROXÈNES		$(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$	2 plans à angle droit	Chaîne simple (C)
Groupe des AMPHIBOLES		$(\text{Mg,Fe})_7\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$	2 plans (60° et 120°)	Chaîne double (D)
Micas	MUSCOVITE	$\text{KAl}_2(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$	1 plan	Couche planaire (E)
	BIOTITE	$\text{K}(\text{Mg,Fe})_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$		
FELDSPATH	ORTHOCLASE	KAlSi_3O_8	2 plans à 90°	Réseau en 3 dimensions
	PLAGIOCLASE	$(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$		
QUARTZ		SiO_2	Aucun	

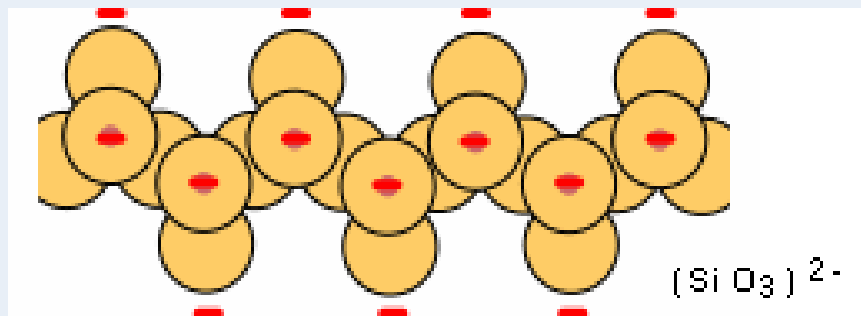
Tétraèdres isolés (B)



Dans les minéraux, les charges doivent être neutres. Il y a deux façons de neutraliser les charges: *lier ensemble les tétraèdres par leurs oxygènes (liens tétraèdre à tétraèdre)*, ou *ajouter des ions positifs*, comme des fer, des magnésium, ou des potassium (**liens métalliques**).

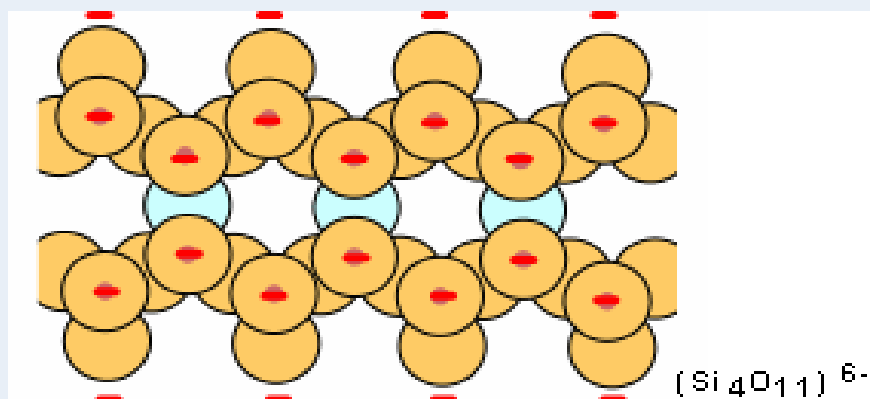
Dans le cas de tétraèdres isolés, la structure est chargée à 4-, comme on l'a vu plus haut dans le calcul des charges; les traits rouges illustrent ici les pôles négatifs correspondant aux 4 oxygènes.

Chaîne simple de tétraèdres (C)



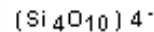
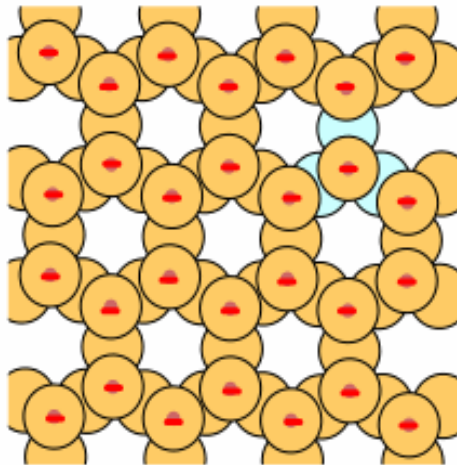
- Lorsque chaque tétraèdre partage un oxygène, on obtient une chaîne simple de tétraèdres.
- Il en résulte que pour chaque tétraèdre deux charges négatives ont été neutralisées et qu'il en reste deux autres à neutraliser (les traits rouges); la structure est chargée à 2-.

Chaînes doubles (D)



- Lorsque deux chaînes simples s'unissent par leurs oxygènes (en bleu sur le schéma) pour former des chaînes doubles, on obtient une structure de formule générale Si_4O_{11} , chargée à 6-.

Structure en couche (E)

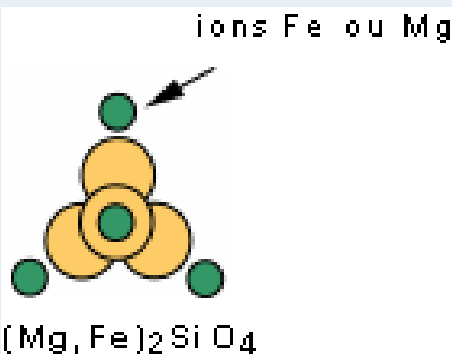


○ Lorsque des chaînes doubles s'unissent, chaque tétraèdre partage trois oxygènes (en bleu sur le schéma);

○ la formule générale est Si_4O_{10} avec une charge de 4-.

○ On aura une structure en couche.

Lien métallique (olivine)



C'est à partir de ces quatre structures de base, tétraèdre isolé, chaîne simple, chaîne double et couche, que seront formés les silicates.

Les groupes des olivines, pyroxènes, amphiboles et micas seront formés par l'addition d'ions métalliques positifs comme le fer, le magnésium, le calcium, le potassium, etc., qui viendront neutraliser la structure (lien métallique).

Cas 1 : Liaisons de **tétraèdres isolés** par des ions métalliques : l'**olivine**. Plusieurs tétraèdres isolés sont unis par leurs quatre pôles négatifs grâce à des ions positifs Fe ou Mg; c'est le minéral olivine. La proportion de fer et de magnésium peut varier

Cas 2 : Liaison de **chaînes simples** par des ions métalliques: les **pyroxènes**.

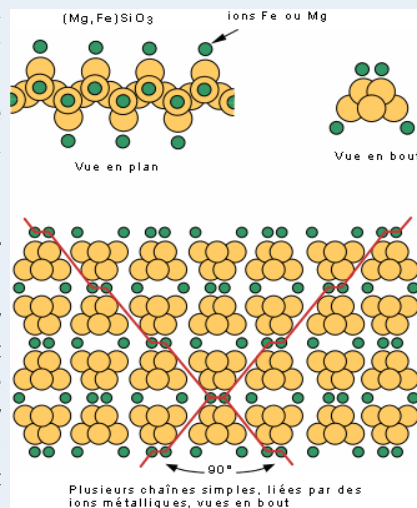
Autour d'une chaîne simple, les positions disponibles pour les ions fer et magnésium se trouvent en périphérie et au sommet de la chaîne.

La vue en bout d'une chaîne simple montre la position qu'occupent les ions fer et/ou magnésium, au sommet et en périphérie.

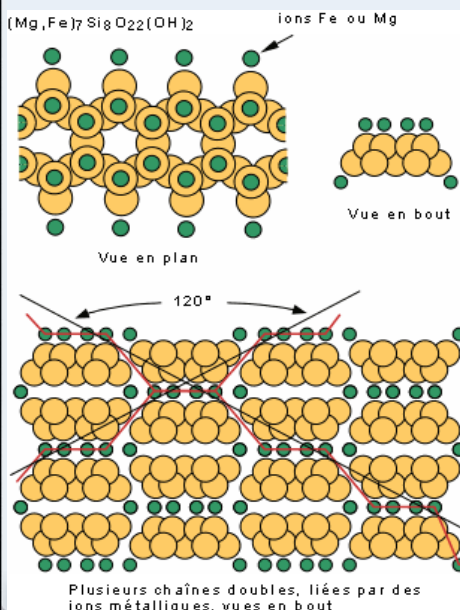
Ces ions unissent ensemble plusieurs chaînes, montrées ici encore en bout, pour former les pyroxènes.

Les liens assurés par les ions métalliques sont plus faibles. C'est ce qui est responsable de l'existence de deux plans de faiblesses (lignes rouges) à angle droit. **Ces plans de faiblesses correspondent au clivage.** Les pyroxènes se caractérisent donc par deux plans de clivage, à 90° l'un de l'autre.

Lien métallique (pyroxènes)



Lien métallique (amphiboles)



Cas 3 : Liaison de **chaînes doubles** par des ions métalliques: les **amphiboles**.

Dans le cas des amphiboles, on a toujours l'unité de base silicium-oxygène, mais ici une certaine quantité d'atomes d'oxygène est remplacée par des radicaux hydroxyles (non illustrés sur le modèle).

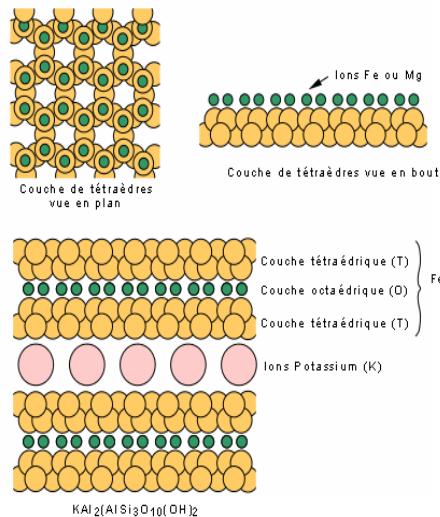
A la différence des pyroxènes, on a ici des chaînes doubles.

Les positions disponibles pour les ions fer et magnésium se trouvent en périphérie et au sommet de la double chaîne.

La vue en bout d'une chaîne double montre la position qu'occupent les ions fer et/ou magnésium au sommet et en périphérie.

Ces ions unissent plusieurs chaînes pour former les amphiboles.

Lien métallique (micas)



Liaison de **couches de tétraèdres** par des ions métalliques: les **micas**.

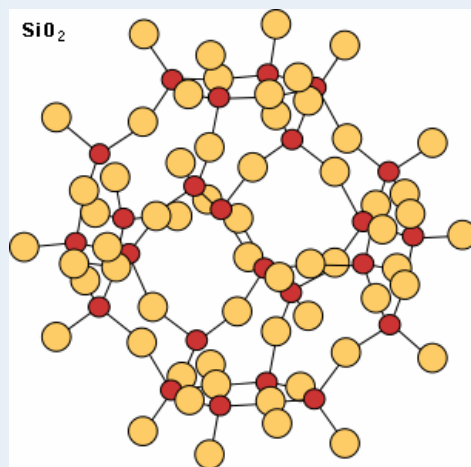
Dans le cas des micas, dont la structure de base est formée de couches planaires de tétraèdres, les positions disponibles pour les ions fer et magnésium se trouvent au sommet de la couche, comme le montre la vue en bout d'une couche.

Chez les micas il y a deux types de couches planaires: la couche tétraédrique, notée **T** et formée des tétraèdres silicium-oxygène (une certaine quantité d'aluminium peut se substituer au silicium), et la couche octaédrique, notée **O** et formée des ions Fe-Mg et des oxygènes.

Ces deux types de couches forment des feuillets, lesquels sont unis par de gros ions, comme le potassium dans le cas de la muscovite.

Les micas possèdent un plan de clivage, parallèle aux couches.

Liaison tétraèdre à tétraèdre (Quartz)



◊ Dans le cas du quartz, il n'y a pas d'ions métalliques puisque tous les coins des tétraèdres sont liés entre eux par leurs oxygènes pour former un réseau tridimensionnel. *Il n'y a pas de plans de faiblesse, donc pas de clivage.*

◊ Chez les feldspaths, la structure est plus complexe. Les tétraèdres sont de deux sortes : des tétraèdres SiO_4 et des tétraèdres AlO_4 . Ceux-ci forment un réseau tridimensionnel où les coins des tétraèdres sont liés par les oxygènes, avec des ions positifs Na, K, Ca se situant dans les interstices du réseau chargé négativement.

Les Minéraux non silicatés

Il s'agit de minéraux accessoires, avec pour l'essentiel des minéraux sédimentaires dont les plus répandus :

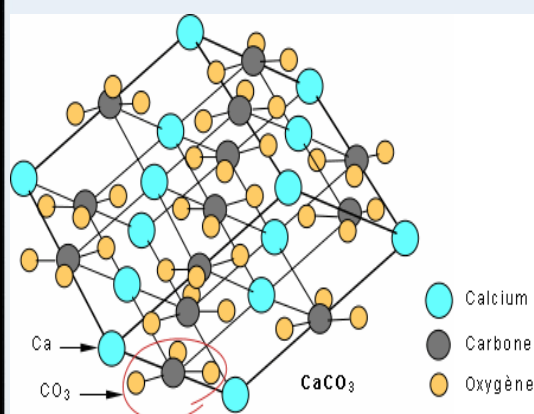
◦ Les halogénures :

Formés essentiellement par évaporation en milieu marin ou lacustre. Le plus commun est le sel gemme

◦ Les Sulfures :

Minéraux de minerais... Ex Pyrite (FeS), Galène (PbS).

Les carbonates



◦ Ils forment un groupe de minéraux qu'on retrouve fréquemment à la surface du globe, les carbonates.

◦ Ils sont un des principaux constituants des roches sédimentaires (exemple : les calcaires).

◦ Leur structure est relativement simple comparée à celle des silicates: des complexes négatifs $(\text{CO}_3)^{2-}$, liés par des ions positifs tels Ca, Mg, Fe.

◦ Chez la **Calcite**, CaCO_3 , les $(\text{CO}_3)^{2-}$ sont liés par des Ca^{2+} pour former une structure rhomboédrique (système cristallin) typique de ce minéral.

Le tableau qui
suit présente
les minéraux
les plus
communs
dans les
principaux
groupes
(classes) et
leurs usages

GROUPE	MINÉRAL	FORMULE	USAGE
ÉLÉMENTS NATIFS	Or Argent Cuivre Diamant Graphite Soufre Platine	Au Ag Cu C C S Pt	échange, joaillerie joaillerie, photographie conducteurs électriques gemmes, abrasifs mines à crayons, lubrifiants médicaments, produits chimiques catalyseurs, alliages
OXYDES	Hématite Magnétite Corindon	Fe ₂ O ₃ Fe ₃ O ₄ Al ₂ O ₃	minerai de fer minerai de fer gemme, abrasif
SULFURES	Galène Sphalérite Pyrite Chalcoppyrite Bornite Cinabre	PbS ZnS FeS ₂ CuFeS ₂ Cu ₅ FeS ₄ HgS	minerai de plomb minerai de zinc "or des fous" minerai de cuivre minerai de cuivre minerai de mercure
SULFATES	Gypse Anhydrite Barite	CaSO ₄ .H ₂ O CaSO ₄ BaSO ₄	plâtre et panneaux plâtre et panneaux boue de forage
CARBONATES	Calcite Dolomite Malachite Azurite Rhodochrosite	CaCO ₃ CaMg(CO ₃) ₂ Cu ₂ (OH) ₂ CO ₃ Cu ₃ (OH) ₂ (CO ₃) ₂ MnCO ₃	ciment Portland ciment Portland minerai de cuivre, joaillerie minerai de cuivre, joaillerie joaillerie
SILICATES	quartz talc amiante kaolinite	SiO ₂ Mg ₃ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₂ Mg ₆ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈ Al ₄ Si ₄ O ₁₀ (OH) ₈	verre, horlogerie, calculatrices poudre pour bébés isolant céramique
HALOGÉNURES	Halite Fluorite Sylvite	NaCl CaF ₂ KCl	sel commun fabrication des aciers fertilisants
HYDROXYDES	Limonite Bauxite	FeO(OH).nH ₂ O Al(OH) ₃ .nH ₂ O	minerai de fer, pigment minerai d'aluminium

Merci pour votre attention