

UNIVERSITE L'ARBI BEN M'HIDI- OUM EL BOUAGHI
FACULTE DES SCIENCES DE LA TERRE ET D'ARCHITECTURE
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE



COURS DE MINERALOGIE
Pour les 2^{èmes} années LMD

Mr. AMOKRANE .H

2024/2025

MINERALOGIE

	Page
Sommaire	2
Chapitre I : Notions de Cristalochimie	7
1. Rappels de la structure de l'atome et des liaisons chimiques	7
1.1 Rappels de la structure de l'atome	7
1.1.1 L'atome	7
a. Représentation symbolique de l'atome	7
b. Masse caractéristique de l'atome	7
1.2 Rappels des liaisons chimiques dans les minéraux	8
1.2.1 Généralités	8
1.2.2 Liaison ionique	8
1.2.3 Liaison de covalence	9
1.2.4 Liaison métallique	9
1.2.5 Liaison van der waals	9
1.2.6 Types de cristaux	9
a. Les cristaux ioniques	9
b. Les cristaux de covalence	10
2. Rappels de quelques définitions (Cristal, Minéral etc...)	10
2.1 Introduction	10
2.2 Les propriétés physiques des minéraux	10
2.3 Propriétés géométriques des cristaux	10
2.4 Le système cristallin	11
2.5 Morphologie des minéraux	12
2.5.1 Agrégats	12
2.5.2 Types d'agrégats minéraux	12
a. Agrégat grenu (granulaire)	12
b. Agrégats compacts	12
c. Agrégats terreux	12
d. Agrégats aciculaires, prismatiques	12
e. Agrégats radiés	13
f. Agrégats feuilletés, lamellaires	13
g. Agrégats en écailles	13
h. Agrégats fibreux	13
i. Druses	13
j. Concrétions	13
k. Sécrétions	14
l. Oolithes	14
m. Dendrites	14
n. Les enduites et les agrégats réniformes	14
2.6 Habitus	15
a. Habitus isométrique	15
b. Habitus linéaire	15
c. Habitus bidimensionnel	15
d. Habitus dendritique	15
2.7 Propriétés des minéraux	15
2.7.1 Propriétés optiques des minéraux	15
2.7.1.1 La couleur	16
a. Couleur idiochromatique	16
b. Couleur allochromatique	16
c. Couleur pseudo-chromatique	16

2.7.1.2 Trait (Couleur de la poussière du minéral)	17
2.7.1.3 Effervescence	17
2.7.1.4 Eclat des minéraux	17
a. Eclat métallique	17
b. Eclat non métallique	17
b.1 Eclat vitreux	17
b.2 Eclat Adamantin	17
b.3 Eclat nacré	17
b.4 Eclat soyeux	17
b.5 Eclat gras ou onctueux	17
b.6 Minéraux mats	18
c. Eclat semi-métallique	18
2.7.1.5 Transparence	18
2.7.1.6 Caractères particuliers à certains minéraux	18
2.7.2 Propriétés mécaniques des minéraux	18
2.7.2.1 Cassure	18
a. Cassure conchoïdal	18
b. Cassure esquilleuse (ou écharneuse)	18
c. Cassure terreuse	18
d. Cassure granulaire	18
2.7.2.2 Clivage	19
a. Clivage très parfait	19
b. Clivage parfait	19
c. Clivage moyen	19
d. Clivage imparfait	19
e. Clivage très imparfait	19
f. Clivage inexistant	19
2.7.2.3 Macle	20
a. Macles simples ou géminées	20
a.1 Macle par accolement	20
a.2 Macle par pénétration	20
b. Macles multiples ou poly-géminées	20
b.1 Macle ouverte	20
b.2 Macle fermée	21
b.3 Macles polysynthétiques	21
2.7.2.4 La Dureté	21
2.7.2.5 Densité (La Masse Spécifique)	22
3. Définition de la coordinance, Isotypisme, Isomorphisme et Polymorphisme	23
3.1 Généralités	23
a. Liaison ionique ou hétéropolaire	23
b. Le rayon ionique	23
c. Notion de coordinance ou de coordination	24
3.2 Isotypisme	24
3.3 Isomorphisme	24
a. Conditions des remplacements ou substitutions isomorphiques	25
3.4 Le polymorphisme	25
3.5 Imperfection des cristaux	26
3.5.1 Défauts dans la position des atomes	26
a. Défaut de FRENKEL	26
b. Défaut de SCHOTTKY	26
3.5.2 Défaut dans l'alignement des mailles cristallines	27

a. Dislocation coin	27
Chapitre II : Classification des minéraux (Les neuf groupes)	27
1. Minéraux non silicates	27
1.1 Les éléments natifs	27
1.1.1 Les métaux	27
a. L'Or natif (Au)	27
b. Argent natif (Ag)	27
c. Le cuivre natif (Cu)	28
d. Le platine (Pt)	28
1.1.2 Les sumé métaux	28
a. Le soufre natifs (S)	28
1.1.3 Les non métaux	29
a. Diamant : (C)	29
b. Graphite : (C)	29
1.2 Les Halogenures	29
a. Halite (NaCl)	29
b. Fluorite (CaF ₂)	30
1.3 Les Sulfures et Sulfosels	30
a. La galène (PbS)	30
b. Blende ou sphalérite (ZnS)	30
c. Les cuivres gris : Cu ₃ (As, Sb) S ₃₋₄ (± Ag, Zn)	31
d. Chalcopyrite : CuFeS ₂	31
e. Pyrite (FeS ₂)	31
f. Molybdénite (MOS ₂)	32
g. Stibine (Sb ₂ S ₃)	32
h. Cinabre	32
1.4 Les oxydes et les hydroxydes	32
a. La magnétite (Fe ₃ O ₄ (Oxyde))	33
b. Hématite ou oligiste (Fe ₂ O ₃) (Oxyde)	33
c. Ilménite (FeTiO ₃) (Oxyde)	33
d. Cassitérite (SnO ₂)	33
e. Limonite (FeO _{3.n} H ₂) (Hydroxyde)	33
1.5 Les carbonates	34
a. Calcite (CaCO ₃)	34
b. Dolomie (Ca Mg CO ₃)	34
c. Aragonite (CaCO ₃)	35
d. Azurite (Cu ₃ [(CO ₃) ₂ (OH) ₂])	35
e. Malachite Cu ₂ [CO ₃ (OH) ₂]	35
1.6 Les sulfates et tungstates	35
1.6.1 Sulfates	35
a. Barytine (BaSO ₄)	35
b. Gypse (CaSO ₄ ·2H ₂ O)	36
1.6.2 Tungstates	36
a. Scheelite (CaWO ₄)	36
b. Wolframites (Fe, Mn) WO ₄	36
1.7 Phosphates, Arseniates et Vanadates	37
1.7.1 Les phosphates	37
a. Amblygonite	37
b. Lazurite	37
c. Pyromophilite	37
d. Vivianite	37

e. Atunite	37
f. Apatite	37
1.7.2 Les arséniates	37
a. Adamite	38
b. Annabergite	38
c. Mimérite	38
d. Chnoclase	38
1.7.3 Les vanadates	38
a. Carnotite	38
b. Vanadinite	38
c. Volborthite	38
1.8 Les Borates	38
a. Boracite	38
b. Ascharite	38
c. Borax	38
d. Ulexite	38
1.9 Les Nitrates	38
a. Nitratine NaNO_3	38
2. Les silicates	39
2.1 Généralités	39
2.2 Classification structurale des silicates	40
a. Coordination	40
b. Agencement des polyèdres	40
c. Enchaînement des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$	40
2.3 Les Néso-silicates et Sub Néso-silicates	41
2.3.1 Les Nésosilicates	41
a. Groupe des péridots	41
b. Groupe des grenats	42
2.3.2 Les Sub-Nésosilicates	42
a. Andalousite	42
b. Disthène	43
c. Sillimanite	43
2.4 Les Sorosilicates	43
a. les épidotes	44
b. La zoïsite $(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})\text{Al}_3\text{Ca}_2$	44
c. La pistachite $(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)(\text{OH})\text{Ca}_2\text{FeAl}_2\text{O}$	44
d. La piémontite $(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{SiO}_4)\text{O}(\text{OH})(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_3(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y}^{3+})_2$	44
e. L'allanite ou orthite	44
2.5 Les Cyclosilicates	44
a. Le groupe du béryl	45
b. Le groupe de la tourmaline	46
c. Le groupe de la cordiérite	46
2.6 Ino-silicates	47
2.6.1 Les pyroxènes	49
2.6.1.1 Caractères généraux des pyroxènes	49
a. Les ortho-pyroxènes (OPX)	49
b. Les clino-pyroxènes (CPX)	49
b.1 Les pyroxènes monocliniques calciques	50
b.1.1 L'augite	50
b.2 Les pyroxènes monocliniques sodiques	50

b.2.1 L'aegyrine	50
2.6.2 Les amphiboles	50
2.6.2.1 Caractères généraux des amphiboles	51
a. les amphiboles ferromagnésiennes	51
b. Les amphiboles monocliniques calciques	51
b.1 Actinote-trémolite	51
b.2 La hornblende	51
c. Les amphiboles monocliniques sodiques	52
2.7 Les Phylo-silicates (Tétraèdre en feuillets)	52
2.8 Les Tecto-silicates (Tétraèdres en feuillets)	54
2.8.1 Famille ou groupe de la silice	55
2.8.1.1 polymorphisme de la silice	55
a. Le quartz (SiO ₂)	55
b. la calcédoine et l'opale (SiO ₂) _n H ₂ O	56
c. Tridymite et cristobalite	56
2.8.2 Famille ou groupe des feldspaths	56
a. Les feldspaths alcalins	56
b. Les feldspaths sodiques	57
c. Les feldspaths calco-sodiques : les Plagioclases	57
d. Caractères généraux des feldspaths	57
2.8.3 Les feldspathoïdes	58
a. Groupe de la néphéline	58
b. Groupe de la leucite	58
c. Groupe de la sodalite	59
d. Groupe des zéolites	59
d.1 Les zéolites fibreuses	59
d.2 Les zéolites lamellaires	59
d.3 Les zéolites isométriques	60
e. Groupe des scapolites ou des wernérites	60
Références	60

CHAPITRE I : Notions de Cristallographie

1. Rappels de la structure de l'atome et des liaisons chimiques

1.1 Rappels de la structure de l'atome

1.1.1 L'atome : Les principaux constituants des atomes sont :

- Le noyau est constitué d'un proton et l'électron gravite autour du noyau tout en tournant sur lui-même.
- L'atome est électriquement **neutre** et la masse de l'atome est concentrée dans le noyau (la masse de l'électron est négligeable par rapport à celle du noyau)
- La structure de l'atome est dite «**lacunaire**» puisque l'électron est très loin du noyau. (Rayons : atome $R_a = 5.10^{-2}$ nm et noyau $R_n = 5.10^{-7}$ nm)
- L'électron ne se déplace pas sur une trajectoire fixe et déterminée (probabilité de présence d'occuper une région donnée) → c'est le nuage électronique, qui représente l'ensemble des positions susceptibles d'être occupées par l'électron.

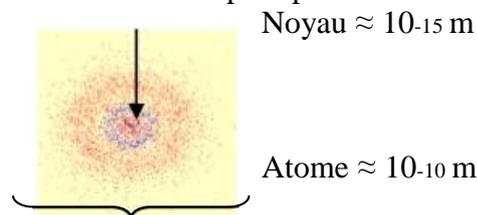


Figure 1 : Coupe transversale d'un atome

a. Représentation symbolique de l'atome

Un atome X peut être représenté symboliquement par A_ZX , où :

- X est le **symbole de l'atome**
- A est appelé **nombre de masse** et représente le **nombre de nucléons** dans le noyau de l'atome.
- Z est appelé **numéro atomique** et représente le **nombre de protons** dans le noyau de l'atome.

La différence **A-Z donne donc le nombre de neutrons** dans le noyau et Z donne aussi le nombre d'électrons que comporte l'atome.

Exemple :

1 - L'atome de carbone est représenté par ${}^{12}_6C$, c'est-à-dire :

- $Z = 6 \rightarrow 6$ protons dans le noyau donc 6 électrons.
- $A = 12 \rightarrow 12$ nucléons donc $12 - 6 = 6$ neutrons dans le noyau.

2 - L'atome de sodium est représenté par ${}^{23}_{11}Na$, c'est-à-dire :

- $Z = 11 \rightarrow 11$ protons dans le noyau donc 11 électrons.
- $A = 23 \rightarrow 23$ nucléons donc $23 - 11 = 12$ neutrons dans le noyau.

b. Masse caractéristique de l'atome

Masse du noyau

Le noyau d'un atome est constitué de nucléons de deux types : Les neutrons et les protons donc pour calculer sa masse, il suffit d'additionner les masses des particules qui le constituent grâce aux valeurs suivantes :

$$m_{\text{noyau}} = m_p \times (\text{nombre de protons}) + m_n \times (\text{nombre de neutrons})$$

$$m_{\text{noyau}} (\text{Fe}) = m_p \times (Z) + m_n \times (A - Z)$$

$$m_{\text{noyau}} (\text{Fe}) = 1,673.10^{-27} \times (26) + 1,675.10^{-27} \times (30) = 9,375.10^{-26} \text{ kg}$$

Masse des électrons

Les électrons possèdent une masse 2000 fois plus faible que celle des nucléons :

Masse de l'atome

On remarque que la masse d'un électron est très petite comparée à celle des nucléons donc la masse de l'atome est concentrée dans son noyau.

Les masses des protons et des neutrons sont quasiment identiques aussi, si on néglige la masse des électrons : $m_{\text{atome}} \approx A \times m_p$

1.2 Rappels des liaisons chimiques dans les minéraux

1.2.1 Généralités

Ces liaisons correspondent à des énergies de liaisons de l'ordre de 50 k.cal/mole.

Ils rapprochent les atomes liés à des distances de 1 à $2A^\circ$.

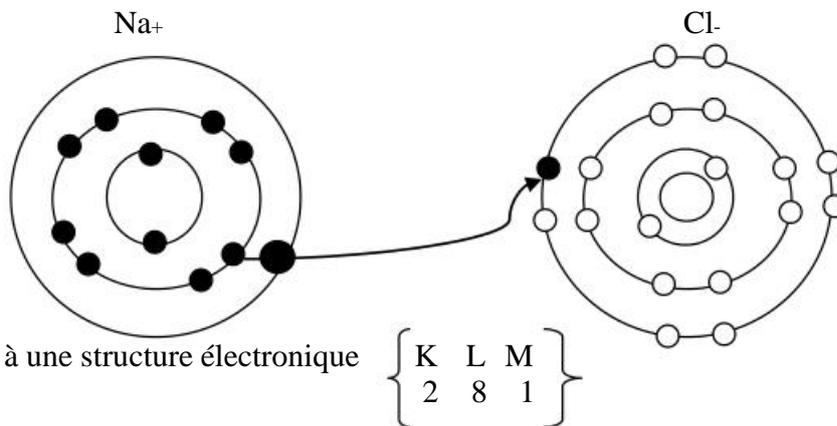
$1A^\circ = 0,1\text{nm} = 10^{-10}\text{m}$

Il existe (03) types de liaisons sont les suivantes :

- Liaison ionique
- Liaison de covalence
- Liaison métallique

1.2.2 Liaison ionique

Se sont des liaisons hétéro polaires, c'est-à-dire ont de signes contraires (Exemple : Na^+ et Cl^-)



Perd facilement l'électron de sa couche M pour donner 1 cation.

C (chlore) à une structure électronique $\left\{ \begin{array}{ccc} \text{K} & \text{L} & \text{M} \\ 2 & 8 & 7 \end{array} \right\}$

Accapare facilement (aisément) un électron qui complète sa couche M en donnant un anion.

Généralement, les atomes chargés positivement sont des cations monovalents (Na^+ , K^+ , ...), divalents (Fe^{2+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} , ...), trivalents (Fe^{3+} , ...), alors que les atomes chargés négativement sont des anions monovalents (Cl^- , Br^- , F^- , ...) ou divalents (O^{2-} , S^{2-} , Te^{2-} , ...).

Les cristaux ayant des liaisons ioniques, la plupart sont des silicates.

1.2.3 Liaison de covalence

Les liaisons de covalence sont appelées des liaisons homopolaires ou atomiques. La liaison de covalence est simple ou multiple selon le nombre d'électron mais en commun par les atomes.

Plus la différence de l'électronégativité est grande entre deux (02) atomes et plus le caractère ionique de leur liaison sera marqué, et deux (02) atomes de même électronégativité ayant une liaison covalente.

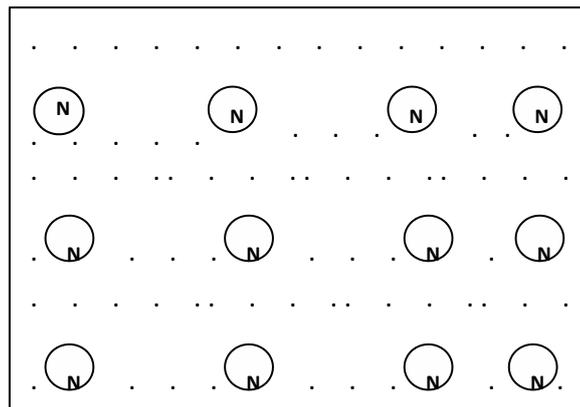
N.B. On peut expliquer, que dans la liaison covalente, deux (02) atomes mettent leurs électrons périphériques, en commun.



Liaison covalente de deux (02) atomes de chlore possédant chacun 7 électrons dans leur couche M.

1.2.4 Liaison métallique

La liaison métallique est connue par le fait que tous les atomes libèrent leurs électrons de valence en devenant des ions positifs, alors que les électrons libres circulent entre ces ions qui forment mers électroniques.



1.2.5 Liaison van der waals

Ce type de liaison est important dans certains minéraux. Il s'agit d'une liaison très faible qui lie des molécules neutres et des unités structurales essentiellement non changées ; La liaison est faite l'intermédiaire de petites charges électroniques. Cette liaison est plus faible que les liaisons ioniques, covalentes et métalliques. (Exemple : Graphite)

1.2.6 Types de cristaux

Les types de cristaux assurent la cohésion des cristaux.

a. Les cristaux ioniques

Ils sont formés par les ions entre eux par le jeu des interactions électroniques, ils sont formés par l'assemblage d'ions de signes contraires.

Il existe des cristaux purement ioniques comme par exemple les Fluorures et les chlorures alcalins (Exemple : Halite)

L'halite est formée d'ions de chlorure (Cl-) et d'ions de sodium (Na+)

Autres exemples :

Blende ZnS
Rutile TiO₂
Fluorine CaF₂
Silice SiO₂

b. Les cristaux de covalence

Les atomes sont liés uniquement par des liaisons de covalence.

Les caractéristiques du diamant et du graphite sont :

Diamant (C)	Graphite (C)
- Très dur	- Malléable (mou)
- Non conducteur de l'électronégativité	- Parallèle aux feuillets
- Non lubrifiant	- Lubrifiant
- Centre chimiquement	- Assez actif

2. Rappels de quelques définitions (Cristal, Minéral etc...)

2.1 Introduction

La minéralogie fait partie des sciences géologiques étudiant l'écorce terrestre, le nom de cette science signifie **l'étude des minéraux**. La **minéralogie** est la science qui étudie les minéraux. Elle est amenée à étudier les minéraux contenus dans les météorites et d'autres parties de l'univers. Le terme minéral vient du mot « minéraux », minerai ou morceau de minerai.

Un minéral est une substance formée naturellement, inorganique, exceptionnellement organique. Un minéral est défini par une formule chimique et un système cristallin, c'est-à-dire par la nature des atomes qui le composent et leur agencement dans l'espace.

Un minéral est un solide naturel, homogène, possédant une **composition chimique** définie et une **structure atomique** ordonnée.

2.2 Les propriétés physiques des minéraux fournissent une aide importante pour les identifier et les caractériser. La plupart des propriétés physiques peuvent être reconnues à l'œil nu ou déterminées en effectuant des tests simples. Les propriétés les plus importantes sont la poussière, la couleur, le clivage, la cassure, la dureté, l'éclat, la densité et la fluorescence.

Les minéraux sont des structures atomiques. Ils peuvent se présenter sous deux états :

Etat amorphe : les atomes sont associés sans aucune régularité.

Etat cristallin : L'arrangement des atomes est régulier. Ils se répartissent suivant des structures bien régulières et bien définies qui sont des caractéristiques de chaque espèce minérale (Le Chlorure de Sodium NaCl où les atomes occupent les sommets de cubes).

Les édifices atomiques sont souvent très complexes et ne seront pas étudiées ici.

Le minéral ainsi constitué forme alors un cristal solide homogène, limité par des surfaces planes faisant entre elles des angles bien définis et qui possède des propriétés géométriques et physiques dont il est intéressant de dire quelques mots.

2.3 Propriétés géométriques des cristaux

Les cristaux ont des formes et des éléments de symétrie caractéristiques Parmi les nombreuses formes cristallines existantes, on a pu choisir un certain nombre de formes simples, dont chacune est le chef de file d'une famille cristalline (ou système). On a défini ainsi sept systèmes cristallins. A titre d'exemple, le cube est le chef de file du système cubique, dans lequel cristallise le chlorure de sodium (NaCl).

La majorité des minéraux apparaissent sous forme cristalline quand les conditions de formation sont favorables. La cristallographie est l'étude de la croissance, de la forme et de l'aspect géométrique des cristaux. L'arrangement des atomes à l'intérieur d'un cristal est déterminé par l'examen de la diffraction des rayons X. La chimie des cristaux est l'étude de la relation entre la composition chimique de minéraux, l'arrangement des atomes qui les composent et les forces qui relient les atomes entre eux. Cette relation détermine les propriétés chimiques et physiques des minéraux. Les cristaux sont organisés dans six classes principales de symétrie : isométrique, hexagonale, tétragonale, orthorhombique, monoclinique et triclinique.

Cristal, solide de matière homogène présentant une structure atomique ordonnée et définie, et une forme extérieure limitée par des surfaces lisses, planes, disposées symétriquement (faces). Un cristal se forme chaque fois qu'un solide se constitue progressivement à partir d'un fluide, que ce soit par congélation d'un liquide, par dépôt (ou précipitation) d'une substance dissoute ou par condensation directe d'un gaz. Les angles, entre faces correspondantes de deux cristaux de la même substance, sont toujours identiques, quelles que soient la taille ou les différences superficielles de forme de ces cristaux.

2.4 Le système cristallin

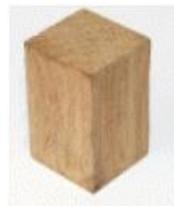
Un système cristallin est un classement des cristaux sur la base de leurs caractéristiques de symétrie, sachant que la priorité donnée à certains critères plutôt qu'à d'autres aboutit à différents systèmes. Les différentes formes des cristaux ont été classées en sept grandes familles appelées système : On distingue 7 systèmes cristallins



système cubique



système hexagonal



modèle quadratique



Modèle orthorhombique



système rhomboédrique



système monoclinique



système triclinique

Système	Longueurs des côtés	Angles	Eléments de symétrie*
Système cubique	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	3A4 4A3 6A2 3M 6M' C
Système hexagonal	$a=b\neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma=120^\circ$	A6 3A'2 3A''2 M 3M' 6M'' C
Système quadratique	$a=b\neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	A4 2A'2 2A''2 2M' 2M'' M C
Système rhomboédrique	$a=b=c$	$\alpha=\beta=\gamma \neq 90^\circ$	A3 3A'2 3M' C
Système orthorhombique	$a\neq b\neq c$	$\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$	A2 A'2 A''2 M M' M'' C
Système monoclinique	$a\neq b\neq c$	$\alpha=\beta=90^\circ$ $\gamma\neq 90^\circ$	A2 M C
Système triclinique	$a\neq b\neq c$	$\alpha\neq\beta\neq\gamma\neq 90^\circ$	C

* gras : éléments de symétrie caractéristiques du système (holoédrie)

On va distinguer trois groupes de systèmes cristallins :

- le système cubique qui possède plus d'un élément d'ordre supérieur
- les systèmes hexagonal, rhomboédrique et quadratique, qui possèdent un seul élément d'ordre supérieur
- les systèmes orthorhombique, monoclinique et triclinique qui ne possèdent aucun élément d'ordre supérieur.

2.5 Morphologie des minéraux

2.5.1 Agrégats : La morphologie des minéraux dépend de croissance de leur formation de grains cristallins accolés portent le nom « d'agrégat minéral ».

2.5.2 Types d'agrégats minéraux

a. Agrégat grenu (granulaire) : composés de grains cristallins, parfois combinés aux cristaux bien formés, ce type d'agrégats est le plus répandu dans l'écorce terrestre.

b. Agrégats compacts : Dans ces agrégats il est impossible de distinguer les contours des grains même à la loupe.

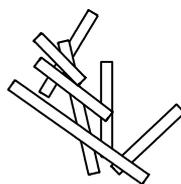
Exemple : Calcédoine (SiO_2)

c. Agrégats terreux : ils ressemblent par leurs aspects au sol friable, on peut les triturer facilement entre les doigts.

Exemple : Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$)

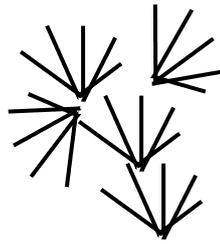
d. Agrégats aciculaires, prismatiques : Les cristaux ont une forme alignée.

Exemple : Actinote (ou Actinolite) $\text{Ca}_2(\text{Mg, Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$



e. Agrégats radiés : Les cristaux sont disposés sous forme de rayons que divergent d'un seul centre ou de plusieurs centres.

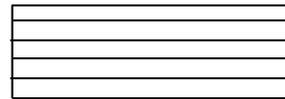
Exemple : Wolframite CaSiO_3



f. Agrégats feuilletés, lamellaires : Avec la pointe du canif on peut détacher facilement des lamelles ; *Exemple : Micas



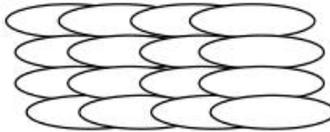
Vue de coté



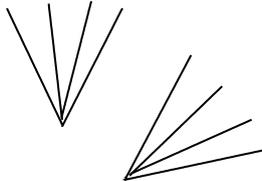
Vue de face

g. Agrégats en écailles : Sont composés d'écailles qu'on détache facilement ;

Exemple : Micas

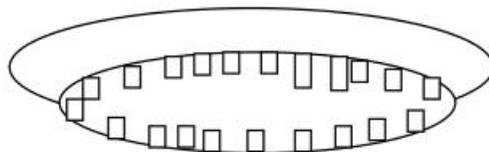


h. Agrégats fibreux : Les cristaux sont composés de fibres



i. Druses : Ce sont des accolements irréguliers de cristaux, on trouve des druses de grandes dimensions.

Exemple : Druse de quartz, de calcite et de pyrite.

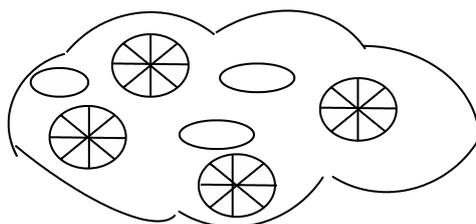


j. Concrétions : Ils ont un aspect de nodules de forme sphéroïdes à structure radiée ou en croûte. Souvent au centre des concrétions on observe des restes organiques au tour desquelles se concentre la substance.

La croissance des cristaux est dirigée du centre vers les périphéries.

Les concrétions se forment c'est habituellement dans les roches sédimentaires meubles.

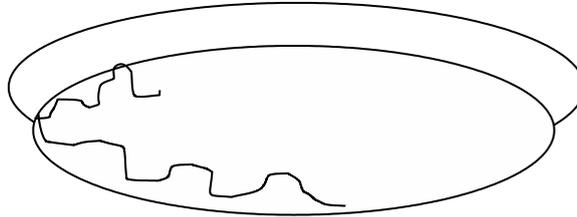
Exemple : Argiles, sables.



k. Sécrétions : Se forment à la suite du dépôt de la substance minérale dans les vides de forme irrégulière, mais habituellement arrondie.

La croissance des minéraux est concentrique, en couches, des parois de la cavité vers le centre.

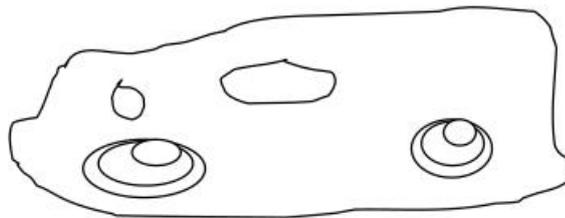
Les petites sécrétions (jusqu'à 10mm de section) s'appellent amygdales, les grandes sécrétions sont dites géodes.



l. Oolithes : Ressemblent beaucoup aux concrétions d'après leur mode de formation. Ce sont des agrégats de forme sphériques de petites dimensions (de 0,05 à 5-10mm). En coupe ils ont une structure concentrique, au centre parfois on trouve un grain de sable ou un fragment de coquille.

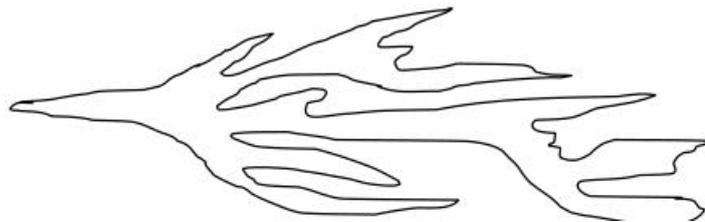
Les oolithes se forment dans des milieux aqueux lorsque la substance dissoute commence à se concentrer au tour des grains de sables, des poussières ou des bulles d'air.

Exemple : Aragonite CaCO_3 , Limonite $\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$



m. Dendrites : Ont une structure ramifiée arborescente et ressemblent aux empreintes de végétation ; elles se forment à la suite du remplissage des fissures par les solutions.

Exemple : Dendrites d'oxydes de manganèse, de cuivre. Ils peuvent être cryptocristallins ou amorphes. Argentite (Argyrite) Ag_2s .

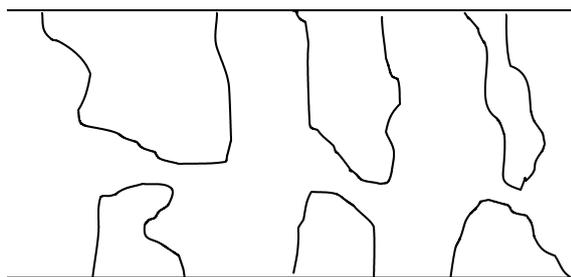


n. Les enduites et les agrégats réniformes : Sont très répandus parmi les formations superficielles. Ils se forment surtout à partir des solutions colloïdales.

Si les enduites croissent du haut vers le bas ils sont dits stalactites, dans le cas contraire ils sont dits stalagmites.

Ces formes caractérisent la calcite, on les trouve dans les karsts calcaires.

Stalactites



Stalagmites

2.6 Habitus

Habitus mot latin signifiant aspect ; C'est la forme prise habituellement par une substance, un objet, un corps.

Exemple : le quartz a pour habitus courant le prisme hexagonal bipyramide.

Exemple : La calcite le rhomboèdre

Il existe plusieurs types d'habitus :

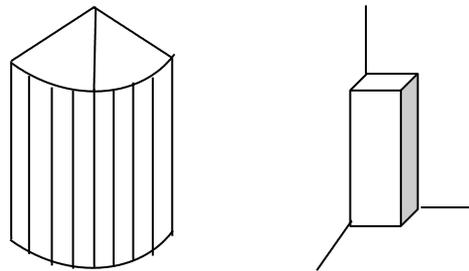
a. Habitus isométrique : Quand on a la croissance du minéral est semblable dans les trois directions. Exemple : Les cristaux cubiques

Exemple : Les cristaux cubiques



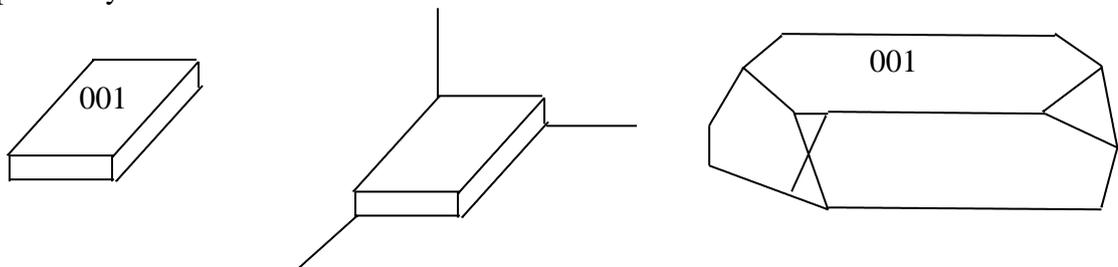
b. Habitus linéaire : Quand les cristaux sont aciculaires filiformes (en files), tabulaires etc....

Exemple : Tourmaline et asbeste



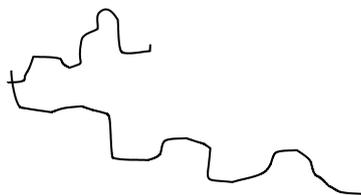
c. Habitus bidimensionnel : Quand les cristaux sont habituellement en feuillets, pelliculaires, tabulaires.

Exemple : Barytine



d. Habitus dendritique : Les cristaux ont souvent une forme squelettique.

Exemple : Or et Argent



2.7 Propriétés des minéraux

Chaque minéral présente son complexe de propriétés physiques (Dureté, densité, clivage, éclat, etc.,...).

2.7.1 Propriétés optiques des minéraux.

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 au 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.

Très importantes en minéralogie, les propriétés optiques d'un minéral sont utilisées sa détermination à l'aide du microscope. Citons l'indice de réfraction, le phénomène de double réfraction.

2.7.1.1 La couleur

Les minéraux ont différentes couleurs, pour certains minéraux c'est une caractéristique stable et constante par exemple : le cinabre (HgS) est toujours rouge, la pyrite (FeS₂) est toujours jaune laiton. Mais pour la plupart des minéraux ce n'est pas le cas, par exemple il existe différents variétés de calcite.

Calcite (CaCO₃) : incolore, jaune, verte, bleue, etc....

La couleur des minéraux n'est pas une caractéristique suffisante lors de la détermination des minéraux.

La couleur du minéral dépend principalement de sa composition chimique et des additions d'autres éléments chimiques colorants dits chromatophores tel que le cobalt, cuivre, nickel, chrome etc,....

Exemple :

Le corindon (Al₂O₃) pur est incolore et transparent, les additions de chrome lui donnent une couleur rouge, donc ça nous donne la rubis ; les additions de Fer et de Titane changent sa couleur en bleue, on a alors un Saphir.

D'après Fersman on distingue trois (03) types de couleurs :

a. Couleur idiochromatique : Caractérisé le minéral. Exemple : le cinabre (HgS) est toujours rouge.

b. Couleur allochromatique : Le minéral peut présenter différentes couleurs selon les importes qu'il contient et leurs éventuelles distorsions (déformation) réticulaires (importés physique).

c. Couleur pseudo-chromatique : est dû à l'interférence de la lumière dans le cristal.

Comme référence de base on peut admettre les couleurs suivantes :

Violet – améthyste (Variété de quartz)

Bleu – azurite Cu₃ (CO₃)₂(OH)₂

Vert – malachite Cu₂ CO₃(OH)₂

Jaune – orpiment As₂S₃

Rouge – cinnabar PbCrO₄ (Chromates)

Brun – limonite FeO(OH).nH₂O (Hydroxydes)

Brun jaune – limonite

Blanc étain – arsénopyrite FeAsS (sulfure)

Gris plomb – molybdénite MoS₂ (sulfure)

Noir fer – magnétite

Rouge cuivre – cuivre natif

Jaune latin – chalcopyrite

Métallique doré - Or

1.7.1.2 Trait (Couleur de la poussière du minéral)

La couleur du trait ou de la poussière du minéral est obtenue en écrasant ou en frottant le minéral sur une surface de porcelaine brute, afin d'obtenir un trait de poudre sur un fond blanc rétiniforme.

La couleur du trait est une particularité plus constante que la couleur du minéral lui-même.

Le trait est une propriété qui a trait à la couleur, mais qui est un peu plus fiable et dont le test est facile à réaliser, c'est le trait. Il s'agit en fait de la couleur de la poudre des minéraux. Cette propriété se détermine sur la trace laissée par le minéral lorsqu'on frotte ce dernier sur une plaque de porcelaine non émaillée (en autant que la dureté de la plaque est supérieure à celle du minéral - voir dureté). Par exemple, l'hématite, un minéral dont on extrait le fer, possède une couleur noire en cassure fraîche mais un trait brun rougeâtre sur la plaque de porcelaine. La pyrite, de couleur jaune or, laisse un trait noir.

Exemple : Hématite Fe_2O_3 peut être grise, jaune-brun, noire, mais toutes les variétés de ce minéral ont le trait rouge vif.

Pyrite FeS_2 est jaune, et son trait est noire.

L'évaluation de la couleur peut être comparative en ce référant à la couleur d'objet où de matière quelconque bien connue.

1.7.1.3 Effervescence

Les minéraux de la classe des carbonates sont décomposés chimiquement par les acides (acides chlorhydrique, muriatique, acétique); cette réaction chimique dégage des bulles de gaz carbonique, un phénomène qu'on qualifie d'effervescence (un bouillonnement). Selon les minéraux carbonatés, cette effervescence se produit, sur la masse minérale même ou sur la poussière, à froid ou à chaud. Un excellent moyen de vérifier l'authenticité des bijoux de rhodochrosite ou de malachite !

1.7.1.4 Eclat des minéraux

L'éclat des minéraux dépend du caractère de la réflexion des rayons de lumière par la surface du cristal ou de l'agrégat minéral ; on distingue les groupes suivants :

a. Eclat métallique : il est caractérisé par un fort pouvoir réflecteur de la surface et une forte observation de la lumière dans le volume du minéral.

Exemple : les minéraux opaques, métaux natifs, sulfures, oxydes.

b. Eclat non métallique : on y distingue les variétés suivantes :

b.1 Eclat vitreux : ressemble à l'éclat du verre.

Exemple : Sel gemme $NaCl$, $CaCO_3$, quartz, Fluorine, sulfates, etc....

b.2 Eclat Adamantin : S'appelle aussi éclat du diamant, est un éclat intense et brillant.

Exemple : Sphalérite ZnS , Soufre natif, diamant.

b.3 Eclat nacré : propre pour certaines variétés de micas.

b.4 Eclat soyeux : est un éclat scintillant propre aux minéraux à structure fibreuse, ressemble à l'éclat des fils de soie.

b.5 Eclat gras ou onctueux : c'est lorsque la surface du minéral semble être recouverte d'une couche de graisse. Exemple : Talc, cassure de quartz.

b.6 Minéraux mats : ce sont les minéraux qui n'ont pas d'éclat leur surface est poreuse ou terreuse.

c. Eclat semi-métallique : ressemble à l'éclat des métaux devenus ternes avec le temps.

Exemple : Le kaolin

2.7.1.5 Transparence

La transparence c'est la propriété de la matière de laisser passer la lumière.

Quand la lumière naturelle traverse un minéral, une partie naturelle traverse un minéral, une partie de celle-ci est réfléchi, une autre absorbée et une troisième de celle-ci est réfléchi, une autre absorbée et une troisième est réfractée. Ces trois (03) processus agissent généralement en même temps, mais même temps, mais si la partie réfléchi est dominante, le minéral apparaîtra opaque et présentera le plus souvent un éclat métallique, c'est le cas des métaux natifs (Or, Argent, Cuivre, Arsenic, Platine) et de nombreux sulfures et de nombreux sulfures et oxyde métalliques.

Chez d'autres minéraux, la plus grande partie de la lumière réfractée, on parle alors de minéraux transparents et incolores chez d'autres minéraux, la plus grande partie de la lumière réfractée, on parle alors de minéraux transparents et incolores ou encore de minéraux translucides et blancs.

Donc selon le degré de transparence on distingue :

- Minéraux transparents : cristal de roche, sel gemme.
- Minéraux translucides : on ne voit que le contact des objets, Exemple : Calcédoine SiO_2 , Opale $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
- Minéraux opaques : ne laissent pas passer la lumière, Exemple : La pyrite.

2.7.1.6 Caractères particuliers à certains minéraux :

- Propriétés magnétiques
- Saveur (sel gemme)
- Odeur (argile mouillée, soufre)
- Fluorescence, thermoluminescence (fluorine, minéraux radio actifs)
- Fusibilité

2.7.2 Propriétés mécaniques des minéraux

2.7.2.1 Cassure

C'est l'aspect de la surface qui se forme lorsqu'on casse le minéral.

a. Cassure conchoïdal : L'aspect de la surface est concave ou concentrique ondulée.

Exemple : Quartz.

b. Cassure esquilleuse (ou écharneuse) : La surface est couverte d'échardes orientées dans la même direction ; Exemple : Gypse $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

c. Cassure terreuse : La surface est mat et rugueux, Exemple : Le kaolin de la limonite.

d. Cassure granulaire : Elle s'observe dans les minéraux à structure granulaire (ou structure grenue) ; Exemple : Apatite.

2.7.2.2 Clivage

Un clivage « est caractérisé par une famille de plan parallèles suivant les quelles les minéraux se débitent ou se brisent plusieurs moins facilement.

On appelle clivage la propriété que possèdent certains minéraux de se casser de se fendre suivant des directions cristallographiques bien déterminées. Il s'agit d'une propriété liée a la structure du réseau cristallin.

Cette caractéristique propre à chaque matière cristalline constitué l'un des indices importants de l'indentification du minéral.

Selon la facilité avec laquelle le minéral se laisser cliver, on distingue en générale :

a. Clivage très parfait : Le cristal se clive (se divise) facilement en feuillets ou en lamelles. Exemple : Les micas.

b. Clivage parfait : Sous un faible coup le minéral se divise en lamelles lisses, en petits cubes, etc,... Exemple :

La cassure de la galène (PbS) donne des petits cubes – cubique

Le clivage de la calcite (CaCO₃) donne des rhomboèdres – Rhomboédrique.

Le clivage de la Fluorine (CaF₂) donne des octaèdres – Octaédrique

c. Clivage moyen : Sur les fragments des minéraux on observe aussi bien des plans de clivage que des cassures inégales. Exemple : Les feldspaths et les amphiboles.

d. Clivage imparfait : Les surfaces à cassures inégales prédominent.

Exemple : Apatite, Soufre natif, Cassitérite (SnO₂), etc,...

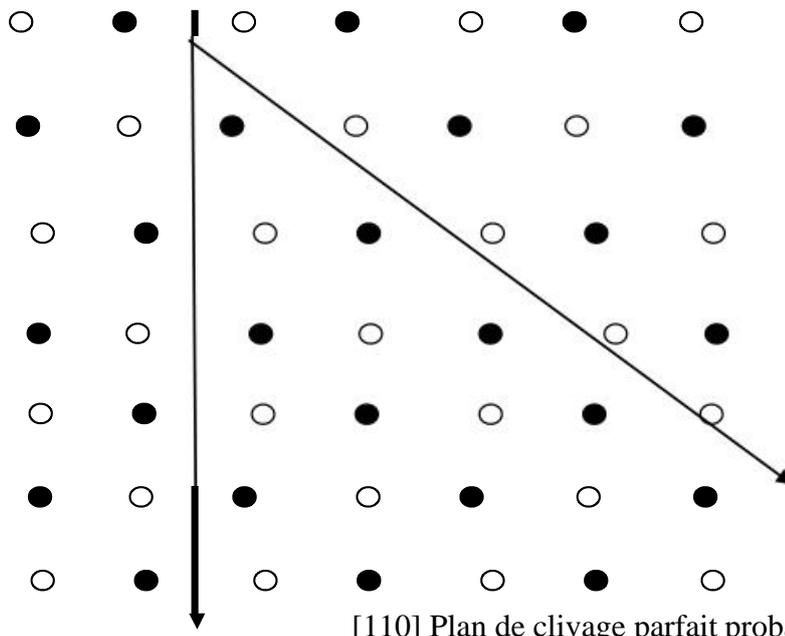
e. Clivage très imparfait : Le clivage est pratiquement inexistant, les cassures ont des surfaces inégales. Exemple : Quartz, Pyrite,...

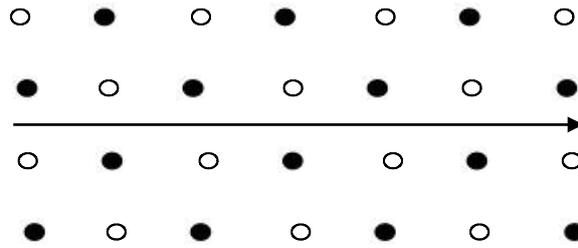
f. Clivage inexistant : Clivage zéro (0).

Remarque : On ne doit pas confondre le clivage avec la surface lisse du minéral, il faut chercher le clivage sur une surface fraîche à la suite d'une cassure provoquée.

Le clivage des minéraux dépend de leur structure cristalline.

Exemple : Minéraux du type – Halite (NaCl) minéraux à structure ionique.





Déplacement d'une Partie du cristal par
autre

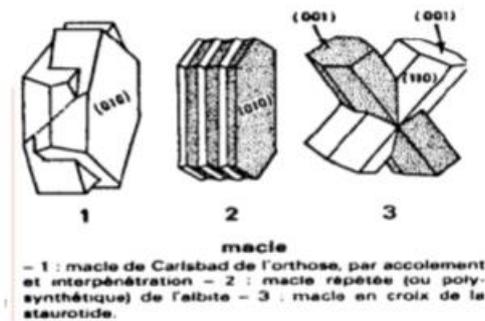
Plan de clivage rapport un

2.7.2.3 Macle

Une « Macle » est un édifice cristallin complexe formé par l'association de deux ou plusieurs cristaux juxtaposés et orientés les uns par rapport les autres d'une façon déterminée. Cet accolement ne se fait n'importe comment ils s'inclut dans la symétrie du cristal.

Ils existent plusieurs types de macles :

a. Macles simples ou géminées : Elles sont formées par l'association de cristaux de types différents ou semblables ;



a.1 Macle par accolement : Les deux cristaux sont accolés suivant une face.

Exemple :

- Macle de la cassitérite SnO_2 , ce type de macle est dit en « bec d'étain »
- Macle en bec d'étain

a.2 Macle par pénétration : les deux cristaux sont interpénétration ;

Exemple : Macle de Carlsbad ou de l'orthose $\text{Al}_2\text{O}_3\text{K}_2\text{O}_6\text{SiO}_2 / \text{KAlSi}_3\text{O}_8$

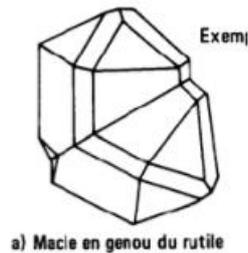


b. Macles multiples ou poly-géminées :

Elles sont formées par plusieurs cristaux de manière cyclique :

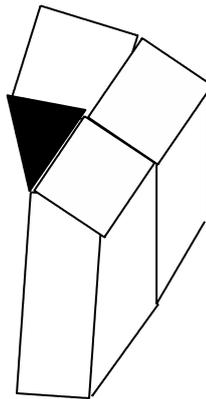
b.1 Macle ouverte : Les cristaux se maclent dans des sens différents ;

Exemple : La macle en genou du rutile TiO_2 .



b.2 Macle fermée : Les cristaux se maclent tous dans le même sens :

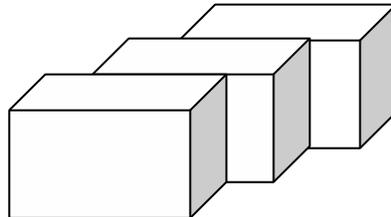
Exemple : Aragonite CaCO_3 , elle se présente souvent sous forme de prismes hexagonaux résultant de l'association de trois (03) prismes orthorhombiques dont l'angle obtus est voisin de 120° .



b.3 Macles polysynthétiques

Le cristal paraît être unique, mais en réalité il est constitué par un grand nombre de fines lamelles maclées.

Exemple : La macle polysynthétique de l'albite $\text{Na}_2\text{OAl}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2$



2.7.2.4 La Dureté : 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, un des principaux constituants de la fameuse "pierre de savon".

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. Cette échelle est toute relative et ne tient pas compte des rapports entre les duretés absolues de minéraux.

Sur cette échelle, on a quelques points de repères. Des minéraux comme le talc et le gypse sont si tendres qu'ils sont rayés par l'ongle. Pas étonnant qu'on utilise le talc dans les poudres pour la peau. La calcite est rayée par une pièce de cuivre de un cent, alors qu'une lame de canif, en acier, saura rayer tous les minéraux de dureté inférieure à 5, mais ne pourra rayer les feldspaths et le quartz. Un morceau de corindon, très dur, un minéral qu'on utilise dans les abrasifs, pourra rayer le quartz, mais sera rayé par un diamant.

Des interprétations diverses, dépendant de l'usage que l'on veut en faire, sont appliquées à ce terme. En minéralogie, la dureté est définie par la capacité pour une

surface minérale à résister aux rayures. Une surface tendre se raye plus facilement qu'une surface dure ; ainsi, un minéral dur, tel que le diamant, peut rayer un minéral tendre tel que le graphite, et le minéral dur ne sera pas rayé par le minéral tendre. La dureté relative des minéraux est déterminée selon l'échelle de dureté de Mohs.

On entend par dureté le degré de résistance qu'oppose un minéral donné à une action externe, en particulier au rayage.

Il est utile de connaître la dureté de quelques objets usuels :

Crayon : 1

Ongle : 2 – 2,5

Aiguille en cuivre : 3 – 3,5

Clés, clou : 4

Verre ; 5 – 5,5

Canif ou aiguille en acier : 6 – 6,5, Acier trempé : 7,5

Il existe une méthode plus rigoureuse pour évaluer la dureté d'une substance, fondée sur la mesure des déformations de l'empreinte laissée par une bille d'acier ou une pointe de diamant pressant sur le solide étudié avec une force connue : Dureté VICKERS.

En générale, les minéraux contenant des métaux lourds comme Ag, Hg, Pb sont tendres avec une dureté inférieure à 3 (≤ 3).

Les sulfures à l'exception de ceux de Fe, Ni ou Co ont une dureté inférieure à 5 (≤ 5).

Les carbonates, sulfates, phosphates ont généralement une dureté à 5,5.

Les oxydes et les silicates anhydres, sauf ceux contenant des métaux lourds, ont une dureté supérieure à 5 (≥ 5).

Il existe une échelle de MOHS (Minéralogiste Autrichien). L'échelle de dureté du moins dur au plus dur.

1- Talc	$Mg_3(OH)_2Si_4O_{10}$
2- Gypse	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
3- Calcite	$CaCO_3$
4- Fluorine	CaF_2
5- Apatite	$Ca_5(F, Cl, OH)(PO_4)_3$
6- Orthose	KSi_3AlO_8
7- Quartz	SiO_2
8- Topaz	$Al_2SiO_4(F, OH)_2$
9- Corindon	Al_2O_3
10- Diamant	C

2.7.2.5 Densité (La Masse Spécifique) : La densité des minéraux est une propriété mesurable ; elle est une constante physique qui caractérise un minéral donné. Beaucoup de minéraux ont une densité qui se situe autour de 2,7 gr/cm³, soit 2,7 fois plus lourd qu'un volume égal d'eau. Mais certains ont une densité relativement faible, comme le sel qui a une densité de 2,1 ; d'autres se situent à l'autre extrême, comme la galène (sulfure de plomb) avec une densité de 7,5 et l'or dont la densité est de 19,3.

La densité est le rapport entre la masse par unité de volume et la masse volumique de l'eau. De façon empirique on peut classer les minéraux de la manière suivante.

Très léger : D = 2	Carnalite	1,6
Léger : D = 2-3	Quartz	2,65
Moyen lourd : D = 3-5	Diamant	3,5
Lourd et très lourd : D = 5-10		

Calcul de la densité

$$D = \frac{M}{V}$$

Masse
Volume

$$D = \frac{Z \times Mg}{N \times V}$$

Masse
Volume

Z : Nombre d'atomes dans la maille élémentaire

Mg : Masse molaire ou moléculaire

N : Constante d'avogadro 0,6023. 10²³

V₀ : Volume de la maille élémentaire

Exemple : Halite NaCl

Z : 4

Mg : (22,9898 (Na) + 35,453 (Cl))

N = 0.6023 x 10²⁴

V = (5.6404)³ x 10⁻²⁴

Calcul de la densité de NaCl :

$$D = \frac{4 (22.9898 + 35.453)}{0.6023 \cdot 10^{24} \cdot 5.6404^3 \cdot 10^{-24}} = 2.163$$

Donc la densité du minéral est : 2.163

3. Définition de la coordinance, Isotypisme, Isomorphisme et Polymorphisme

3.1 Généralités

a. Liaison ionique ou hétéropolaire

Ce sont des liaisons qui s'exercent entre des particules de signes opposés ou ions qui s'attirent selon les lois de l'électrostatique.

Ex : NaCl Na⁺ et Cl⁻

Il y a transfert d'électrons de l'électron électropositif (cation) vers l'électron électronégatif

b. Le rayon ionique

On peut assimiler un ion à une sphère dont le rayon serait alors le rayon ionique. On peut également supposer que le rayon reste constant quelque soit la combinaison ionique dans laquelle il est engagé.

L'analyse aux RX permet de déterminer la distance entre les 2 ions dans un cristal.

Soit A=l'anion et B=le cation on a donc : d_{AM}=R_A+R_M avec R =rayon ionique

La distance d_{AM} est égale à la distance entre les 2 noyaux séparant l'anion du cation.

Tout se passe comme si un cristal ionique était constitué d'un empilement de sphères anioniques et cationiques jointives. Grâce aux RX on peut déterminer d_{AM} avec précision mais les RX ne donnent pas R_A et R_M.

R _M /R _A	Coordinance	Types d'édifices
Entre 0 et 0,155	II	Linéaire
Entre 0,155 et 0,225	III	Triangle
Entre 0,225 et 0,414	IV	Tétraèdre
Entre 0,414 et 0,732	VI	Octaèdre
Entre 0,732 et 1	VIII	Cube
1	X – XII	Cube-octaèdre

En théorie, il suffit de connaître un seul rayon ionique pour en déduire de proche en proche les autres rayons ioniques.

L'intérêt de connaître les rayons ioniques réside dans la possibilité de prévoir pour des composés de structure inconnue la distance des rayons ioniques (d_{AM}), des ions de sphères opposés et leur coordinance.

c. Notion de coordinance ou de coordination

Dans un cristal ionique, les sphères hypothétiques représentant les ions tendent à se les unes des autres le plus possible de façon à constituer une structure compacte. Un cation M sera entouré par n sphères anioniques A et n est appelé nombre de coordination ou coordinance de M dans la structure considérée.

A pression et température donnée la coordinance d'un cation dépend du rapport R_M/R_A , c'est-à-dire rayon ionique du cation / rayon ionique de l'anion qui lui est associé.

Supposons que M soit entouré de 3 anions A le touchant et se touchant entre eux. Les noyaux des anions sont situés aux 3 sommets d'un triangle équilatéral dont le centre est occupé par le rayon du cation R_M . Le calcul géométrique de R_M/R_A égal à 15% ou 0,15 on a alors la coordinance III. Cette valeur est une valeur limite, en effet : Si R_M/R_A est inférieur à 0,155 ($<0,155$) les 3 anions se gênent et ne peuvent plus se rapprocher suffisamment du cation. Le cation ne pourra être rapproché que de 2 anions et on aura alors la coordinance II.

Si R_M/R_A est supérieur à 0,155, les anions ne sont plus jointifs mais la coordinance sera toujours égal à III.

Si maintenant un 4^{ème} anion se met en place on aura un tétraèdre régulier dont le cation occupera le centre et la valeur limite R_M/R_A sera égale à 0,225. La coordinance est imposée par des considérations géométriques simples liées aux possibilités d'assemblage de sphères de rayons différents en tenant compte de la nécessaire neutralité de l'édifice.

La coordinance peut varier en fonction de la température et de la pression pour la combinaison d'un même cation avec un même anion.

Ainsi la coordinance augmente lorsque la pression de formation du cristal augmente et cette coordinance diminue lorsque la température de formation du cristal augmente.

Ex : Dans le cas de $Al^{3+}O_2$ et le rapport $R_{Al}/R_O = 0.57/1.32 = 0.43$ cette valeur est une valeur limite avec 0.414 c'est-à-dire entre la coordinance IV et VI.

A température et pression normale l'ion Al est susceptible de s'entourer de 4 ou 6 Oxygènes mais on note une préférence pour VI.

A haute pression seule la coordinance VI permet des édifices stables.

Mais à haute température, la coordinance IV est favorisée.

Ainsi pression et température jouent en sens inverse.

3.2 Isotypisme

Deux espèces minérales sont isotopes lorsqu'elles ont des compositions chimiques distinctes mais des formules structurales analogues, elles appartiennent au même système cristallin et les polyèdres de coordination impliqués dans les deux structures qui sont identiques ou comparables.

Ex la halite : NaCl ; et la sylvine : KCl

Sont des isotopes et elles appartiennent toutes les deux au groupe cubiques à faces centrées. Na et K sont hexacoordonnés.

3.3 Isomorphisme

Deux espèces minérales sont isomorphes, si elles sont isotopes, constituées de cations et d'anions de rayons ioniques voisins pour envisager leur syn cristallisation en cristaux mixtes. Les deux espèces forment des solutions solides.

Ex : les péridots dont la composition varie depuis un terme magnésien (Mg_2SiO_4) la forstérite à un terme ferrifère (Fe_2SiO_4) la fayalite. Le terme intermédiaire étant l'olivine.

a. Conditions des remplacements ou substitutions isomorphiques

Les substitutions isomorphiques ne seront possibles que si certaines conditions sont réalisées.

- Les rayons ioniques doivent être voisins, la différence entre les rayons ioniques ne doit pas dépasser les 15%. K et Na ne peuvent pas se substituer car le rayon ionique de K = 1.33 et le rayon ionique de Na est de 0.97 (la différence entre les 2 rayons ioniques est supérieure à 15%).
- Les polyèdres de coordination doivent avoir des formes identiques, de même que la coordinence.
- La valence et la structure électronique doivent être semblables. Si les valences sont différentes, l'excès ou le défaut de charges doit être compensé par un autre remplacement rétablissant l'équilibre c'est un remplacement hétéromorphique. Ex l'albite (Si_3AlO_8Na) et l'anorthite ($Si_2Al_2O_8Ca$). $Ca^{2+} - Na^+$ et $Si^{4+} - Al^{3+}$
- La température et la pression jouent un rôle important. Certains remplacements isomorphiques sont complets à haute température et haute pression, mais partiels à basse température et basse pression. Ex les feldspaths alcalins sodipotassiques où la diminution de la température provoque la formation de deux phases : les perthites.

3.4 Le polymorphisme

Deux espèces minérales ou plus sont dites polymorphes si elles ont la même composition chimique mais des structures cristallines différentes. Ce changement de forme est lié aux variations de la température et de la pression.

Ex : $CaCO_3$

S'il cristallise dans le système rhomboédrique, il s'agit de la calcite

S'il cristallise dans le système orthorhombique, il s'agit de l'aragonite

Ex : SiO_2

Si elle cristallise dans le système rhomboédrique, il s'agit du quartz α

Si elle cristallise dans le système hexagonal, il s'agit de la tridymite

Si elle cristallise dans le système quadratique, il s'agit de la cristobalite

Si elle cristallise dans le système monoclinique, il s'agit de la coésite

Ex : $SiAl_2O_5$ (silicates d'alumine)

Triclinique : disthène, orthorhombique : andalousite, quadratique : sillimanite.

Lorsque ces espèces minérales concernent des éléments simples tels que Fe, C, S, etc... elles sont dites allotropes.

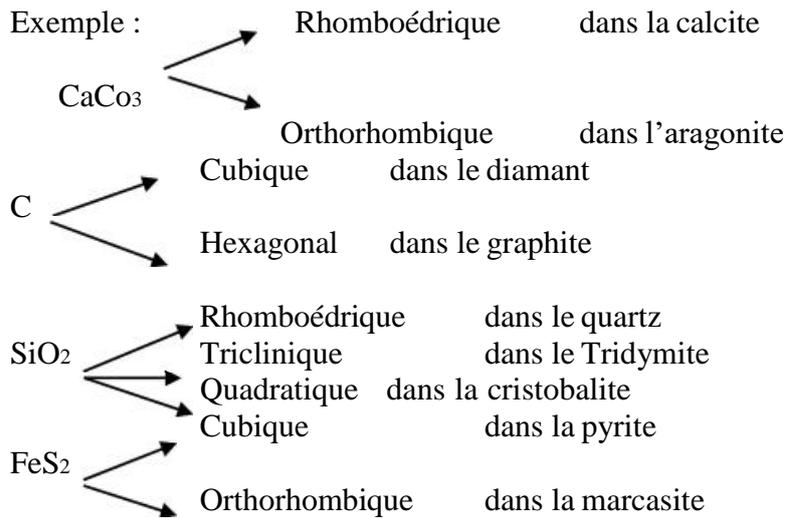
Ex : le carbone C

Quand il cristallise dans le système cubique, il donne le diamant

Et quand il cristallise dans le système hexagonal, il donne le graphite.

Lorsqu'elles concernent des éléments simples tels que le, C, S, etc..., elles sont dites allotropes

Le polymorphisme consiste que la substance ayant la même composition chimique mais présente des formes cristallines différentes.

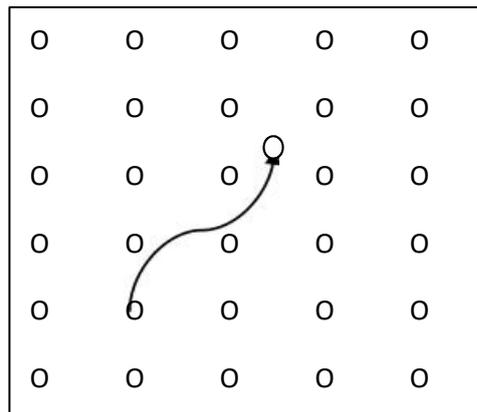


3.5 Imperfection des cristaux

Les édifices cristallins ne sont pas toujours parfaits. Ils présentent des imperfections liées à la position des atomes dans la structure cristalline ou bien à des défauts dans l'alignement des mailles cristallines.

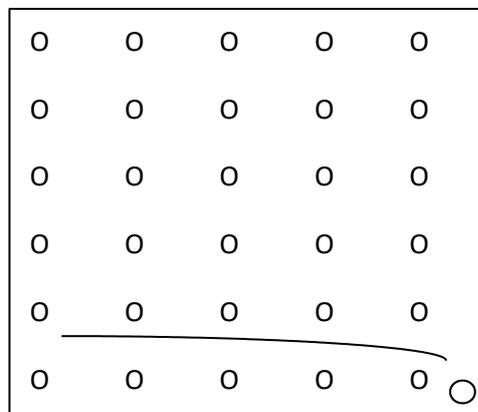
3.5.1 Défauts dans la position des atomes.

a. Défaut de FRENKEL



Explication : Un atome quitte son emplacement et se place en position interstitielle.

b. Défaut de SCHOTTKY



Explication : Ici un atome est expulsé de l'emplacement d'équilibre vers la surface de cristal.

3.5.2 Défaut dans l'alignement des mailles cristallines.

Il existe deux (02) types principaux de dislocations :

a. Dislocation coin

L'effet d'une dislocation – coin sur un réseau revient à insérer (ou à soustraire) partiellement dans ce réseau un plan réticulaire appelé demi-plan. Ce $\frac{1}{2}$ plan s'incère entre deux (02) locations en vis

Au tour d'une ligne de dislocation les plans réticulaires s'enroulent en spirale.

Chapitre II : Classification des minéraux

1. Minéraux non silicates (Les neuf groupes)

Hors les silicates il existe aussi des minéraux non-silicates. On les appelle éléments natifs, les sulfures, les sulfates, les carbonates, les halogénures, les oxydes et les hydroxydes et les phosphates.

1.1 Les éléments natifs

Ils sont des substances non chimiquement combinées avec des autres matériaux pour former des composées. Ils se classent en deux groupes : Les métaux (Or, argent, cuivre et platine et les métalloïdes (Soufre, graphite et diamant).

1.1.1 Les métaux

Les métaux ont une conductibilité électrique élevée. Leurs structures sont compactes, ils ont une forte densité « d », une faible dureté « D » ; ils sont ductiles et malléables et ne présentent pas de clivage net.

a. L'Or natif (Au) : Un minéral opaque avec un éclat métallique. Il est fréquemment en paillettes, grains irréguliers dans le quartz (SiO_2).

- Cubique holoèdre m3m. Structure cubique à faces centrées (c. f. c)

- D = et malléable à grande pureté.

- d = 19,3, s'abaisse jusqu'à 15,5 avec la teneur en Ag (Jusqu'à 20% électrum).

- Couleur jaune d'or (Pur) à jaune clair (Au-Ag).

Variétés : électrum, or dont la teneur en argent est supérieure à 20%.

Origine : Les gisements d'or sont génétiquement liés aux intrusions acides, l'or se caractérise surtout par son origine hydrothermale dans les filons quartzeux. Il forme aussi des inclusions dans les filons à barytine, à calcite, à fluorine. Se présente en feuillets et en grains dans les roches magmatiques de profondeur et en pépites dans les placers et dans les conglomérats. Les plus grandes pépites trouvées en Australie pèsent 74.6 Kg et 70.8kg.

Gisement : URSS, Australie, Algérie. La teneur en or ne doit pas être inférieure à 4-5 g/t pour les gisements primaires et 0.1 g/t pour les Placers.

Usage : métal précieux, en joaillerie, appareils physiques et chimiques de précision.

b. Argent natif (Ag) : Couleur blanc argenté, s'altère au contact avec l'atmosphère. C'est un minéral opaque avec un éclat métallique. C'est un minéral soluble dans l'acide nitrique, c'est le meilleur conducteur d'électricité et de chaleur.

- Cubique holoèdre m3m, structure cubique à faces centrées (c. f. c).

- D = 3, - d = 10,5

- S'oxyde rapidement

Origine : L'argent natif en tant que minéral hydrothermal est associé aux sulfures dans les filons, exemple avec la galène. Se trouve également dans les zones d'oxydation des gisements de certains poly-métaux où il se forme à partir de l'argentite Ag_2S .

Gisement : Mexique, Bolivie, Norvège.

Usage : joaillerie, monnayage, alliages, réactifs de l'industrie photographique.

c. Le cuivre natif (Cu) : Sa couleur varie du rouge cuivré au rouge rosé clair sur les surfaces fraîches, il s'altère en brun cuivré. C'est un minéral opaque avec un éclat métallique, il est soluble dans l'acide nitrique.

- Cubique holoèdre $m\bar{3}m$, structure à faces centrées (c. f. c).

- $D = 2,5$, malléable et ductile, - $d = 9$

Origine :

**Exogène* : dans la zone d'oxydation des gisements de cuivre en association avec la cuprite (Cu_2O) la limonite, la malachite, la calcite.

Des placers renferment des fragments de cuivre.

Se forme par oxydation des Sulfures : $Cu_2S + 2O_2 \rightarrow CuSO_4 + Cu$ Chalcosine

Ou par réduction des Sulfates : $CuSO_4 + Fe \rightarrow FeSO_4 + Cu$

Ou $Cu_2O + H_2SO_4 \rightarrow CuSO_4 + H_2O + Cu$

**Hydrothermale* de basse température, ce type de gisement est rare.

Gisement : URSS .USA

Usage : électrotechnique, construction mécanique, construction navale etc...

d. Le platine (Pt) : de couleur gris argenté à blanche, il se trouve généralement en sous forme de grains de petites en d'écaillés. Il est légèrement magnétique en présence de d'impuretés de fer, il est soluble dans tous les acides.

1.1.2 Les sumé métaux

a. Le soufre natifs (S)

- Orthorhombique holoèdre mmm

- Fréquemment automorphe

- Cassure conchoïdale

- Couleur jaune soufre à jaune miel.

- $D = 1,5 - 2,5$; très fragile, - $d = 2$ à 3.

- Se brise en bruissant par chauffage modéré à cause de sa très mauvaise conductibilité thermique.

- Produit fréquemment par réduction du gypse $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ par la matière organique dans les dépôts sédimentaires biochimiques, il issu aussi du condensat de fumerolles volcaniques ou de dépôts de sources sulfureuses.

Origine :

* *Sédimentaire, biochimique* grâce à la présence de bactéries sulfureuses. Il est associé au gypse, aux bitumes.

* *Lors de la décomposition* des formations sédimentaires gypseuses.

* *Se forme dans la zone d'oxydation des sulfures*, lors la désagrégation de la pyrite et chalcosine. $FeS_2 + Fe_2(SO_4)_3 \rightarrow 3FeSO_4 + 2S$

* *volcanique* (pneumatolitique).

$2H_2S + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2S$

$2H_2S + SO_2 \rightarrow 2H_2O + 3S$

Gisement : Asie centrale, Italie, Pologne, Japon.

Usage : fabrication de l'acide sulfurique, en agriculture comme insecticide, dans l'industrie pour la fabrication de textiles, caoutchouc et des explosifs.

1.1.3 Les non métaux

Il existe dans la nature deux formes polymorphiques du carbone : le diamant et le graphite.

a. Diamant : (C)

- Cubique holoèdre m3m
- Fréquemment automorphe
- Clivage parfait suivant [111]
- Incolore ou teinté de jaune, rose, bleu.
- $D = 10$; le plus dur de tous les minéraux connus, - $d = 3,5$
- Fragile, (éclat métallique)

Origine Les gisements primaires sont génétiquement liés aux roches éruptives ultrabasiques de profondeur : kimberlites. La désagrégation des roches diamantifères forme des gisements secondaires, les placers.

Minéral de détritique dans les placers diamantifères car inaltérables.

Gisement : RSA, Congo, Ghana, Angola.

Usage : Les variétés transparentes sont utilisées en joaillerie, les diamants techniques sont utilisés en forage, usinage des métaux, comme matière abrasif.

b. Graphite : (C)

- Hexagonal holoèdre 6mm/m
- Cristaux automorphes assez rares.
- Noir ou gris acier
- $D = 1$ à 2, toucher gras, - $d = 2,1$ à 2,3.
- Minéral primaire
- Minéral opaque avec métallique
- Minéral opaque avec métallique terme.
- Frotté sur le papier
- Frotté sur le papier, il laisse une marque grise.

Origine :

* magmatique. Minéral primaire accessoire des roches éruptives acides et dans les schistes cristallins.

* métasomatique de contact : au contact des roches éruptives et des roches sédimentaires carbonatées.

* Sédimentaires : la plus grande masse de graphite provient des sédiments d'origine organique.

1.2 Les Halogénures

a. Halite (NaCl)

- Cubique holoèdre m3m
- Fréquemment automorphe :
- Clivage (100)
- $D = 2$, - $d = 2,1$ à 2,2
- Cassure Sub-conchoïdale
- Minéral commun des roches sédimentaires formées par évaporation (évaporites). Très soluble dans l'eau

Origine : Dépôt chimique des lacs et des mers ; Elle se forme dans les lacs salés desséchants et dans les lagunes peu profondes.

On distingue deux variétés d'Halite : Sel gemme formé au cours des anciennes périodes géologiques, qui se présente en strates et en stocks. Il y'a aussi les dépôts salifères actuels qui continuent à se former au fond des bassins aqueux dans les régions à climat sec et chaud (aride).

Usage : c'est un important produit alimentaire ; matière première pour l'industrie chimique (fabrication de HCl, de NaOH, du sodium métallique...etc).

b. Fluorite (CaF₂)

- Cubique holoèdre m3m, Fréquemment automorphe : cubique (100)
- Egalement en masses clivables
- Macle par pénétration (111) très fréquente
- Transparent à translucide, éclat, vert ou violet, rarement rose
- D = 4. Fragile, - d = 3,1 à 3,2

Origine : hydrothermale, Les gisements industriels sont de moyenne température. Dans les filons quartzeux la fluorine est habituellement accompagnée de la barytine, de la calcite, des sulfures de Pb, Zn, Sb.

Minéral fréquemment dans les gîtes pneu-matolytique à greisen (avec cassitérite SnO₂, topaze, tourmaline etc, et ainsi dans les roches sédimentaires)

Usage : La fluorine est essentiellement utilisée comme fondant en métallurgie.

1.3 Les Sulfures et Sulfosels

De point de vue chimique se sont des dérivés du sulfure d'hydrogène (HgS), la plus part des sulfures se caractérisent par un éclat métallique.

a. La galène (PbS) : Il est de couleur gris plomb, il est soluble dans l'acide chlorhydrique,

- Cubique holoèdre m3m
- Souvent automorphe
- Clivage (100) parfait
- Macle (111) fréquente par accolement et pénétration
- Sections ou clivage frais gris plombé brillant à reflets bleuâtres et surfaces vieilles gris mat
- D = 2,5 à 3. Fragile
- d = 7,2 à 7,6
- Principal minerai de plomb
- Se trouve essentiellement dans les filons méso thermaux en paragenèse BPGC (Blende, pyrite, galène et chalcopryrite).

Origine :

* Hydrothermale : se trouve dans les filons, dans les corps métasomatiques ainsi que dans les skarnes, se caractérise par une association étroite avec la sphalérite et les sulfures d'argent et de cuivre. Se trouve également ensemble avec la pyrite, le quartz et la calcite.

* Sédimentaire : la galène forme de petites inclusions surtout dans les roches carbonatées.

La galène n'est pas stable dans les zones d'oxydations, elle se décompose facilement et forme l'Anglésite PbSO₄ et la cérusite PbCO₃.

Gisement : URSS, Canada, Australie, USA, Pologne. Mexique.

Usage : principal minerai de plomb.

b. Blende ou sphalérite (ZnS)

- Cubique hémioèdre 43m

- Souvent automorphe
- Clivage (110) parfait
- Macles par contact (111) polysynthétiques fréquentes
- Couleur jaune claire (ZnS) à marron-noire (Blende riche en Fe jusqu'à 27% c'est la marmatite), rouge au vert, gris et blanc, peut être aussi incolore.
- Principal minerai de zinc
- Altération en zone oxydée en smithsonite $ZnCO_3$ et hémi-morphilite $Zn_4 [(OH)_2 \cdot Si_2O_7] \cdot H_2O$.

c. Les cuivres gris : $Cu_3(As, Sb)S_{3-4} (\pm Ag, Zn)$:

Sont des sulfosels constituant une solution solide continue entre la tétraédrite (Sb) et la tennantite (As).

- Souvent automorphe
- Couleur gris acier à noir de fer
- Eclat métallique
- $D = 3(Sb)$ à 4,5 (As). Assez fragile
- $d = 4,6$ (As) à 5,1 (Sb)
- Les cuivres gris antimoniés s'altèrent en malachite, azurite.

d. Chalcopyrite : $CuFeS_2$

- Assez rarement automorphe
- Pas de clivage, cassure irrégulière
- Macle (111) assez comme, polysynthétique
- Sur cassure fraîche, couleur jaune laiton métallique.
- $D = 3,5$. Fragile
- $d = 4,1$ à 4,3
- Minéral opaque dans les roches éruptives acides ou basiques.

Caractères distinctifs : se distingue de la pyrite par la couleur plus sombre, par la dureté (ne raye pas le verre) et par l'absence de cristaux cubiques

Origine :

- * skarnien, en association avec la magnétite.
- * magmatique : en association avec la pyrite, les sulfures de Pb, Zn, Cu etc..
- * exogène : dans les roches sédimentaires.

Gisement: Algérie, URSS, USA, Canada, Chili, Congo.

Usage : important minerai de cuivre.

e. Pyrite (FeS_2)

- Fréquemment automorphe
- Pas de clivage
- Cassure sub-conchoïdale
- Couleur jaune laiton métallique
- $D = 6$ à 6,5. Fragile
- $d = 4,8$ à 4,9
- Minéral de basse Température dans certains gisements épithermaux mais surtout dans les roches sédimentaires (Craies et argiles)
- Il s'altère très facilement à l'air humide en sulfate de Fer.

Origine : Ces gisements industriels de pyrite sont d'origine hydrothermales, la pyrite n'est pas stable dans la zone d'oxydation, elle s'y transforme presque toujours en oxydes bruns de fer (limonite, hématite).

Caractère distinctif = Couleur, forme des cristaux, dureté élevée (raye le verre), au choc par un fer, la pyrite donne des étincelles et une odeur de soufre.

Gisement = URSS, Norvège, Espagne, Allemagne.

Usage : Matière de première importance pour la fabrication de l'acide sulfurique.

f. Molybdénite (MoS_2)

- Hexagonal holoèdre 6mm/m
- Assez souvent automorphe mais déformée
- Clivage (001) très facile (entre les couches de soufre)
- Couleur gris de plomb bleuâtre
- Principal minerai de molybdène
- Dans les gîtes pegmatitiques, pneu-matolytiques et hypo-thermaux à SnO_2 et FeWO_4 .

g. Stibine (Sb_2S_3)

- Orthorhombique holoèdre mmm
- Fréquemment automorphe en cristaux très allongés
- Clivage parfait selon (010)
- Cassure fraîche et section gris d'acier à vif éclat métallique qui bleuit en début d'altération.
- $D = 2$, $d = 4,6$ à $4,7$
- Minéral de basse température. Essentiellement dans les gîtes à gangue de barytine BaSO_4 , quartz ou calcite.
- Souvent associé au cinabre HgS , au réalgar AsS et à l'orpiment As_2S_3 .

h. Cinabre HgS Hg : 86,2 %

La désignation du minéral vient du mot grec "Kinnabaris" qui signifie "sang de dragon". Le cinabre renferme parfois des additions de fer, des substances organiques et d'argile.

Se présente en cristaux tabulaires, plus souvent en grains irréguliers disséminés, ainsi qu'en masse compactes et pulvérulentes.

- Système : trigonal, se présente en cristaux tabulaires, plus souvent en grains irréguliers disséminés, ainsi qu'en masse compactes et pulvérulentes.
- Couleur : rouge foncé,
- Eclat : adamantin.
- Dureté : 2-2.5.
- Densité : 8.09 - 8.2.
- Caractères distinctifs : la couleur ; la faible dureté, la densité élevée.

Origine : Le cinabre est caractéristique des gîtes hydrothermaux de basse température, d'habitude il est associé à l'antimonite, la pyrite et rarement aux minéraux non métalliques : quartz, la calcite, la fluorine etc...Le cinabre se trouve dans les roches carbonatées, parfois dans les grés et les schistes en y formant une dissémination irrégulière et des veinules.

Gisement : URSS, Chine, USA, Espagne (75%), Italie et Algérie.

Usage : Unique minerai de mercure, il est utilisé comme peinture naturelle, comme absorbant de chaleur dans les batteries nucléaires, dans l'amalgamation de l'Or.

1.4 Les oxydes et les hydroxydes

C'est des minéraux où le radical est (O_2^- Oxyde ; OH^- hydroxyde), ils sont formés dans les conditions superficielles (altération atmosphérique, sédimentation). Ils sont généralement mous, mal cristallisés, avec des couleurs brunes, ocre, rouges ou noires.

a. La magnétite (Fe_3O_4) (Oxyde)

C'est un important minéral de fer, elle est fortement magnétique, elle attire la grenaille de fer et dévie l'aiguille d'une boussole.

- Cubique holoèdre $m\bar{3}m$, elle est fréquemment automorphe
- Macle par contact ou pénétration (111) ès fréquente
- Couleur noire opaque à éclat semi-métallique
- $D = 5,5$ à $5,6$, $d = 5,2$
- Cassure quelconque

Minéral très fréquent : opaque accessoires des roches éruptives acides et sur tout basiques.

Dans les gîtes de ségrégation magmatique mais aussi dans les gîtes pyro-métasomatiques (skarns minéralisés, Rare dans les roches sédimentaires)

Il s'altère en hématite FeO_3 et limonite.

Origine : C'est un minéral commun dans les roches de contact et localement métamorphosées. Sa masse volumique relativement élevée est quelque fois la cause de son accumulation sous forme de dépôts ayant une valeur économique.

b. Hématite ou oligiste (Fe_2O_3) (Oxyde)

Il est connu sous le nom de « minerai – rien », il peut de venir magmatique lorsqu'elle est chauffée.

- Rhomboédrique holoèdre $3m$
- Couramment automorphe
- Couleur gris acier à noir de fer pour les cristaux massifs
- Eclat métallique très vif.
- $D = 6,5$
- Cassure inégale (Pas de clivage facile)
- $d = 5,2$ à $5,3$
- Minéral fréquent : Opaque accessoire dans nombre de roches éruptives et de schistes cristallins (quartzites à hématite). Il s'altère en limonite

Origine : C'est le minerai de fer le plus important ; il existe dans les roches ignées et dans les veines hydrothermales ; dans les roches sédimentaires il peut être d'origine primaire sous forme d'oolithes ou ciment.

Usage : En plus de son usage comme minerai, il est employé comme pigment et poudre à polir.

c. Ilménite (FeTiO_3) (Oxyde)

Elle est de couleur noir de fer, minéral opaque, avec un éclat métallique à terme. Elle est soluble dans l'acide chlorhydrique concentré, elle faiblement magnétique.

d. Cassitérite (SnO_2)

- Quadratique holoèdre $4/m\bar{2}mm$, assez souvent automorphe
- Brun rougeâtre ou noirâtre, éclat adamantin
- $D = 6$ à 7 . 6 à 7 .
- Cassure irrégulière
- $d = 6,8$ à $7,1$
- Principal minerai d'étain. Typiquement de haute température. Lié essentiellement aux gîtes pegmatitiques, pneu-matolytiques et hypo-thermaux dans les roches éruptives acides (granites). Pratiquement inaltérable.

e. Limonite ($\text{FeO}_3 \cdot n\text{H}_2$) (Hydroxyde)

De couleur jaune brunâtre, brun ou noir, se dissout très lentement dans l'acide.

Le terme de limonite désigne des produits mal définis, mélange de minéraux, en général des hydroxydes de fer, le principal constituant est la goethite, avec parfois de la lépidocrocite.

Contient H₂O jusqu'à 12 à 14%. On trouve souvent la limonite avec des impuretés mécaniques de matière argileuse et de silice. Elle forme des croûtes rouillées, des enduits divers, des masses ocreuses et terreuses, des concrétions et des oolithes. la limonite forme des pseudomorphoses sur la pyrite, la siderite et la marcassite.

Les propriétés physiques de la limonite varient suivant la composition ;

- Dureté : 1 pour les variétés friables et terreuses ; 4 pour les variétés compactes.
- Couleur : du brun sombre au brun jaune clair ;
- Densité 3,3 si on chauffe dans un tube fermé elle dégage de l'eau.

Origine : typiquement exogène : elle se forme par altération des minéraux de fer. Les formations chimiques et biochimiques sédimentaires qui se déposent au fond des lacs et dans les zones littorale de la mer sont parfois importants économiquement.

Usage : La limonite est un important minerai de fer.

1.5 Les carbonates

Ils sont des sels de l'acide carbonique, ils ont une couleur clair : blanche, rose, grise, à l'exception des carbonates de cuivre qui ont une couleur verte ou bleue. Un caractère distinctif important est la réaction des carbonates avec HCl, HNO₃, qui provoque différentes effervescences.

Parmi les carbonates sont :

a. Calcite (CaCO₃)

Elle est très fréquemment automorphe : les faciès de la calcite sont extrêmement divers et engagent une très grande diversité de formes.

- Incolore (Spath d'Islande) ou blanchâtre (inclusions fluides), elle se colore aussi en jaune, rougeâtre, brun, noir à cause d'inclusions solides d'oxyde

S métalliques.

- Minéral extrêmement commun dans le calcaires, marbres, cipolins mais aussi est un minéral de gangue des gîtes hydrothermaux, dans les cavités et vacuoles des laves basaltiques ;

- Effervescence avec HCl.

Origine : Les calcaires sont des sédiments marins chimiques et organiques (biochimiques) ; le marbre est un calcaire recristallisé (métamorphisme de contact et régional). La calcite se trouve également comme minéral superficiel dans l'écorce d'altération ainsi que dans les filons métallifères comme minéral hydrothermal de basse température.

Utilisation : Le calcaire est utilisé dans la construction, dans l'industrie chimique (chaux, ciment, verre), en métallurgie ; Le spath d'Island est utilisé dans les appareils optiques.

b. Dolomite (Ca Mg CO₃)

Elle est de couleur blanche, gris brun, parfaits à nuance jaunâtre, grisâtre, verdâtre, fragile. Il se dissout lentement dans l'acide chlorhydrique dilué à froid. Il réagit avec HCl moins que la calcite (Faible effervescence).

- Couleur blanche, gris brun, parfois à nuance jaunâtre, grisâtre, verdâtre ;
- Dureté 3.5-4, fragile ;
- Clivage parfait, densité : 1.8-2.9 ; réagit avec l'acide chlorhydrique faiblement sans effervescence.

Origine : elle est généralement sédimentaire ; elle se forme aussi à la suite de la transformation des calcaires par les solutions magnésiennes ; parfois elle peut être d'origine hydrothermale.

La dolomite sert souvent comme matériaux de construction.

c. Aragonite (CaCO_3)

- Orthorhombique holoèdre mmm
- Très rarement automorphe
- Incolore, gris ou violacée plus souvent
- Minéral assez fréquent : Essentiellement dans les fissures des roches volcaniques dans les dépôts évaporitiques salifères (avec gypse)
- In stable en conditions ordinaires si elle est exempte de Sr, se transforme en calcite, forme stable.

d. Azurite ($\text{Cu}_3 [(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2]$)

- Monoclinique holoèdre 2/m, fréquemment automorphe. Faciès très riche de forme
- Couleur bleu très foncé. Translucide à éclat vitreux ; il est soluble avec effervescence dans HCl
- $D = 3,5$ à 4
- Cassure conchoïdale
- $d = 3,7$ à 3,9

Origine : elle se forme dans les zones d'oxydation des gisements cuprifères et autres gisements contenant des sulfures de cuivre dans les minerais primaires. Elle est un indice pour la recherche du cuivre.

S'altère en malachite et en cuivre malachite et en cuivre natif.

Utilisation : fabrication de la peinture bleue.

e. Malachite $\text{Cu}_2 [\text{CO}_3(\text{OH})_2]$

Elle est de forme fibreuse ont un éclat soyeux avec une couleur verte. Il est soluble avec effervescence dans l'acide chlorhydrique dilué.

- Monoclinique holoèdre 2/m
- Cristaux automorphes isolés rares
- Clivage (001) parfait
- Translucide à éclat vitreux
- $D = 4$
- Cassure irrégulière
- $d = 4$

Origine : elle se forme dans les zones d'oxydation des gisements cuprifères et autres gisements contenant des sulfures de cuivre dans les minerais primaires, Les enduits et les croûtes d'un vert vif de la malachite représentent un important indice pour la recherche des minéraux de cuivre.

Utilisation : les amas des enduits de la malachite sont des matériaux précieux d'ornement, elle est considérée aussi comme minerai de cuivre.

1.6 Les sulfates et tungstates

1.6.1 Sulfates

Se sont des sels de l'acide sulfurique. Ils ont une couleur claire, une faible dans l'eau.

a. Barytine (BaSO_4)

- Orthorhombique holoèdre mmm, souvent automorphe
- Clivage parfait (001) et (110)

- Couleur : incolore, blanchâtre, jaune miel à brun ou rougeâtre
- Eclat vitreux à nacré
- $D = 3$ à $3,5$, fracture de clivage
- $d = 4,48$

Origine :

* hydrothermale : dans les filons en association avec la galène, la sphalérite, le cinabre. Minéral fréquent dans les filons méso-à épithermaux (associé souvent ou quartz, à la galène, à la fluorite, aux gangues carbonatés, ect,...) et comme ciment.
* sédimentaire : en conpressions.

Usage : La barytine est utilisée dans l'industrie à l'état pur ou sous forme de combinaisons chimiques du baryum.

Utilisation : pour la fabrication des peintures blanches de haute qualité, dans l'industrie du caoutchouc, et en tant que matériaux alourdissant la boue de forage.

b. Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)

- Monoclinique holoèdre $2/m$, fréquemment automorphe, clivage (010) parfait (à travers les couches d'eau moléculaire)
- Couleur : incolore parfaitement limpide, blanc grisâtre
- Eclat nacré sur le clivage (010)
- $D = 1,5$ à 2μ - Cassure lamellaire
- $d = 2,3$

Origine : Son origine et sa répartition dans la nature sont liés à l'anhydrite. C'est un dépôt typiquement marin, se forme aussi par hydratation de l'anhydrite.

Minéral très commun : dans les roches sédimentaires évaporitiques et les marnes salées sous climat aride où il cristallise par évaporation rapide de saumures

Egalement dans la zone d'oxydation des gîtes sulfurés à partir eu encaissants carbonaté.

Usage : dans la fabrication des ciments ; de la peinture ; en papeterie comme engrais...etc.

1.6.2 Tungstates

a. Scheelite (CaWO_4)

Il est quadratique hémihèdre $4/m$, il est assez rare automorphe

- Il est souvent en masses grenues
- Clivage (111) difficile
- Couleur : incolore, le plus souvent translucide blanc laiteux à grisâtre ou jaunâtre
- Eclat pierreux à gras
- $D = 4,5$ à 5
- Cassure irrégulier
- $d = 5,9$ à $6,1$
- Important minerais de tungstène. Se trouve essentiellement dans les gîtes pyro-méta somatiques de contact entre roches éruptives acides et roches carbonatées (Skarns)

b. Wolframites (Fe, Mn) WO_4

Il est monoclinique holoèdre $2/m$, assez souvent automorphe avec de nombreuses formes

- Se trouve en lames épaisses incluses dans le quartz
- Clivage (010) parfait
- Couleurs : la ferbélite (FeWO_4) est noire de charbon à éclat sub-métallique, l'hubnérite (MnWO_4) est translucide brun-jaune à brun-rouge avec réflexions internes
- $D = 4,5$
- Cassure irrégulière sauf le long du plan du clivage

- $d = 7,1$ (hubnérite) et $7,5$ (forbéríte)
- Principal minéral de tungstène : dans les gîtes pneu-matolytiques (greisens) et pegmatitiques ainsi que dans les gîtes hypo-thermaux.

1.7 Phosphates, Arseniates et Vanadates

1.7.1 Les phosphates Ce groupe comprend les minéraux dont les couleurs sont brillantes et avec formes cristallines fines. Les phosphates, où le radical anionique $(\text{PO}_4)_3^-$, tétraèdre au sein duquel le phosphore peut être remplacé par le vanadium $(\text{VO}_4)_3^-$ et l'arsenic $(\text{AsO}_4)_3^-$.

Les phosphates sont rares.

Les minéraux des phosphates sont :

a. Amblygonite $(\text{Li, Na}) \text{AlPO}_4 (\text{F, OH})$, dureté 5,5-6, P. S- 3,08 ; clivage parfait, couleur blanche à blanche grisâtre

b. Lazurite $(\text{Mg, Fe})\text{Al}_2(\text{PO}_4)_2(\text{OH})_2$, dureté 5,5-6, P. S- 3,1 clivage indistinct, couleur bleue

c. Pyromophillite $\text{Pb}_5(\text{PO}_4)_3\text{Cl}$, dureté 3,5-4 ; P. S. 6,5-7,2. Clivage pratiquement absent (verte, orange, grise, brune).

d. Vivianite $\text{Fe}_3 (\text{PO}_4)_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, dureté 1,5-2, P. S- 2,68. Clivage parfait (Incolore lorsqu'elle est fraîche)

e. Atunite $\text{Ca} (\text{UO}_2)_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 10-12\text{H}_2\text{O}$, dureté 2-2,5; P. S 3-3,2. Clivage base (parfait (couleur jaune à verte)).

f. Apatite $\text{Ca}_5(\text{PO}_4) (\text{F, Cl, OH})$, dureté 5 ; P. 5 – 3,18-3,2. Cassure inégale, fragile.

Le nom provient du grec "apatao" car on la confondait avec d'autres minéraux.

Cristallise dans le système hexagonal ; Les cristaux sont prismatiques ; aciculaires, parfois en baguettes courtes et tabulaires, L'Apatite se caractérise par des masses grenues et saccharoïdes.

- Couleur : vert jaunâtre, blanche, bleue et parfois incolore.
- Trait clair,
- Eclat vitreux ;
- Clivage imparfait ;
- Cassure inégale ou conchoïdale.
- Dureté 5, fragile ;
- Densité 3,2.

Origine :

*Magmatique : elle se trouve dans les roches éruptives acides en tant que minéral accessoire. Dans les roches alcalines elle se rencontre en association avec la néphéline.

* Dans les filons pegmatitiques avec la muscovite.

Usage : source de phosphore et matière première pour la fabrication des engrais phosphatés.

1.7.2 Les arséniates

Les arséniates contiennent de l'arsenic, du soufre et de l'oxygène (AsSO_4) . Les arséniates ont un poids spécifique de 3-5, Sauf la numétite qui, à cause du plomb, à un poids spécifique de 7,0- 7,3.

Les minéraux des arséniates sont :

a. Adamite $Zn_2AsO_4(OH)$, $d = 3,5$, P.S. 4,3-4,4, de couleur jaune verte (ou verte jaune).

b. Annabergite $Ni_3(AsO_4)_2 \cdot 8H_2O$, $d = 1,5-2,5$, P. S. 3,07, clivage parfait de couleur blanche, grise, vert pôle ou vert jaune.

c. Mimétite $Pb_5(AsO_4)_3Cl$, $d = 3,5-4$, P.S. 7-7,3. Aucun clivage (Couleur jaune, orange, brun jusqu'au blanc)

d. Chnoclase $Cu_3(AsO_4)(OH)_3$, $d = 2,5-3$; P.S. 4,33. Clivage parfait, de couleur bleue verdâtre sombre à noir verdâtre.

1.7.3 Les vanadates

Les vanadates forment un autre groupe rare, ils contiennent du vanadium et de l'oxygène (VO_4)

La vanadite est probablement la plus connue, sa couleur est rouge.

a. Carnotite $K_2(UO_2)_2V_2O_8 \cdot 3H_2O$, $d = 2$, P. S. 4,75. Clivage basal parfait, de couleur jaune brillant ou jaune verdâtre.

b. Vanadinite $Pb_5(VO_4)_3Cl$, $d = 3$, P. S. 6,8, aucun clivage, de couleur rouge brillant au brun rouge brunâtre.

c. Volborthite $Cu_3V_2O_7(OH)_2 \cdot 2H_2O$, $d = 3,5$, P. S. 3,42. Clivage basal parfait, de couleur verte, jaune ou brun.

1.8 Les Borates

Tous les borates renferment des cations Al^{3+} , Fe^{3+} et Mn^{3+} . Le Bore appartient au nombre des éléments assez mobile dans les solutions aqueuses contenant des composants tels que Cl, OH et surtout F pour lequel il a une grande affinité chimique. La concentration et la formation des composés boriques s'opère dans les produits, résiduels de divers processus géologiques, en partie dans les pegmatites et les formations hydrothermales (ortho borates, borosilicates) mais principalement dans les bassins salins en voie d'assèchement enrichis en bore.

Il a été constaté qu'à basse température B_2O_3 est susceptible d'être éliminé par CO_2 . Au cours de l'altération il y a remplacement des borates par les carbonates.

Exemple :

a. Boracite $Mg_3B_7O_{13}Cl$

Borates anhydres

b. Ascharite $MgHBO_3$

Exemple :

c. Borax $Na_2B_4O_7 \cdot 10H_2O$

Borates hydratés

d. Ulexite $NaCaB_5O_9 \cdot 8H_2O$

1.9 Les Nitrates : Dans la croûte terrestre l'azote existe sous forme d'ions complexes : $[NO_3]$, $[NH_4]^+$. Il se trouve à l'état gazeux dans l'atmosphère. Les nitrates, sels de l'acide fort NHO_3 (acide nitrique) très soluble, ils sont répandus dans les formations actuelles de pays désertiques chaudes.

Les plus importants sont les nitrates des métaux alcalins K et Na. Les nitrates des métaux alcaline terreux Mg, Ca, et Ba sont les moins répandus. Exemple : **a. Nitratine** $NaNO_3$

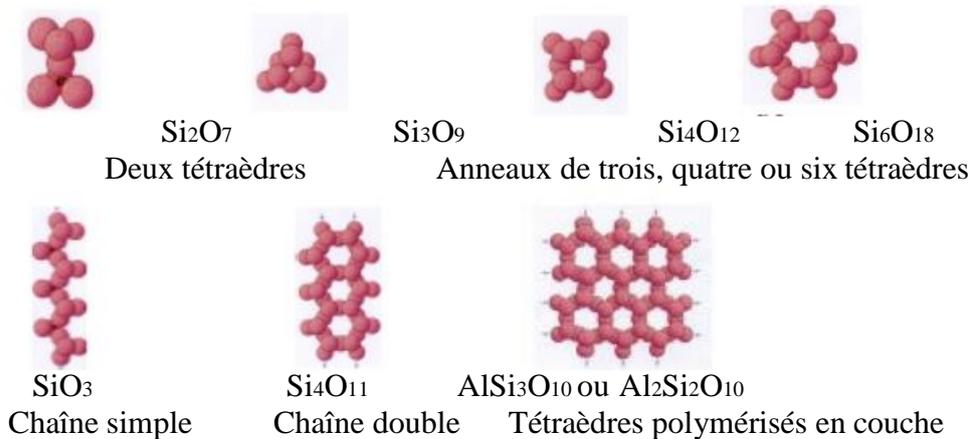
2. Les silicates

2.1 Généralités

Les silicates sont les principaux constituants des roches éruptives et métamorphiques. A eux seuls ils constituent 80% de la croûte terrestre. Si on ajoute encore le quartz, il faut porter ce chiffre à 92%.

Le groupe anionique **[SiO₄]** est constitué d'un petit atome de silicium entouré de quatre gros atomes d'oxygène qui occupent les sommets d'un tétraèdre imaginaire. On l'appelle habituellement le tétraèdre SiO₄. Ce groupe est très difficile à dissocier. En outre, il possède la particularité de pouvoir constituer des polymères en mettant en commun certains atomes d'oxygène. En d'autres termes, ils peuvent s'associer soit en groupes de 2 tétraèdres, soit en anneaux de 3, 4 ou 6 tétraèdres, soit encore en chaînes de longueur indéfinie, en couches et même en charpentes tridimensionnelles.

La classification est donc basée sur le degré de polymérisation des tétraèdres.



Polymérisation des tétraèdres SiO ₄	
nésosilicates :	tétraèdres isolés les uns des autres.
sorosilicates :	groupes de 2 tétraèdres.
cyclosilicates :	anneaux de 3, 4 ou 6 tétraèdres.
inosilicates :	polymérisation en chaînes.
phyllosilicates :	polymérisation en couches.
tectosilicates :	charpente à 3 dimensions.

Dans les silicates fortement polymérisés (chaînes, couches, charpentes), les atomes de silicium sont souvent partiellement remplacés par l'aluminium. On rencontre alors une certaine proportion de tétraèdres [AlO₄] parmi les tétraèdres [SiO₄]. On parle alors d'alumino-silicates.

Les éléments chimiques principaux qui font de la composition chimique des silicates sont : O, Si, Al, Fe, Mn, Mg, Ca, K, ainsi que Li, Be, B, Ti, En et H sous forme de (OH) ou H₂O.

2.2 Classification structurale des silicates

Jusqu'en 1920 la chimie des silicates étaient limitée à la connaissance de la formule brute, formule qui ne permettait pas de prévoir les propriétés d'un minéral.

La diffraction des RX pour l'établissement des formules structurales devait être fondamentale (travaux de Bragg, Pauling, Mauguin, etc...).

Actuellement nul ne peut ignorer la classification des silicates. Celle ci permet d'établir des corrélations entre la structure et les propriétés des minéraux.

Le Silicium et l'oxygène étant les éléments chimiques les plus abondants de la croûte terrestre (ils comptent à eux deux les $\frac{3}{4}$ de l'ensemble des matériaux), il n'est pas donc surprenant qu'un groupe de minéraux, composés de 2 de ces éléments (Si et O) plus un certain nombre d'ions, nommés silicates composent à eux seuls 95% du volume de la croûte terrestre.

Tous les silicates possèdent une structure de base composée des ions Si^{4+} et O^{2-} . Les ions Si^{4+} étant logés au centre d'un tétraèdre dont les sommets sont occupés par O^{2-} . C'est le tétraèdre $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Les anions O^{2-} sont groupés autour du silicium sous forme de tétraèdres réguliers $[\text{SiO}_4]^{4-}$ car $R_i(\text{Si}^{4+}) / R_i(\text{O}^{2-}) = 0.30$ ce qui implique que la coordinence du Si est de IV.

On peut classer les silicates en fonction des différents modes d'enchaînements des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Nous allons tout d'abord revenir sur la coordination des ions avant d'aborder l'agencement des polyèdres et de leur enchaînement.

a. Coordination

Puisque les ions oxygènes forment des empilements compacts dans la structure des silicates, on définira donc la coordination par rapport à l'oxygène.

Ainsi l'ion Si^{4+} vu son rayon ionique admet une coordinence de IV (tétraédrique), l'ion Al^{3+} , une coordinence de IV ou de VI, quant aux ions Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ti^{4+} avec des rayons ioniques assez voisins, ils admettent un entourage de 6 oxygènes. Les alcalins K et Na possèdent des coordinences supérieures à VI.

b. Agencement des polyèdres

Dans le « trame silicatée » où les tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$ n'ont que les sommets en commun, Al peut être soit au sein des tétraèdres en substitution de Si (cas des alumino-silicates), soit au centre d'octaèdres AlO_6 (silicates d'alumine).

Par contre Mg, Fe, Ti, Na, Ca, K sont au centre d'octaèdres (XO_6) qui auront des sommets et des arêtes en commun pour (AlO_6 , FeO_6 , MgO_6 , TiO_6), voire même des faces en commun pour (NaO_6 , CaO_6 , KO_6). Ces caractéristiques, mise en commun d'un certain nombre de sommets, d'arêtes ou de faces sont imposées par les règles de Pauling.

Les principaux cations qui vont former la charpente des groupements afin d'assurer la cohésion et l'électro-neutralité de l'édifice cristallin sont :

Li^+ , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Mn^{2+} , Al^{3+} , Cr^{3+} , Ti^{4+} , tous de coordinence VI

Na^+ , K^+ , Rb^+ , Cs^+ , Ca^{2+} , Sr^{2+} , Ba^{2+} de coordinence VIII.

c. Enchaînement des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$.

On définit les classes structurales des silicates sur la base de l'enchaînement des sommets des tétraèdres $[\text{SiO}_4]^{4-}$. Le nombre d'oxygènes ou de sommets que le tétraèdre (SiO_4) partage avec ses voisins traduit l'état de polymérisation de la charpente silicatée. Cet état confère aux silicates leur morphologie, leur faciès, les propriétés physiques (clivage, biréfringence et stabilité). On distingue ainsi :

2.3 Les Néso-silicates et Sub Néso-silicates

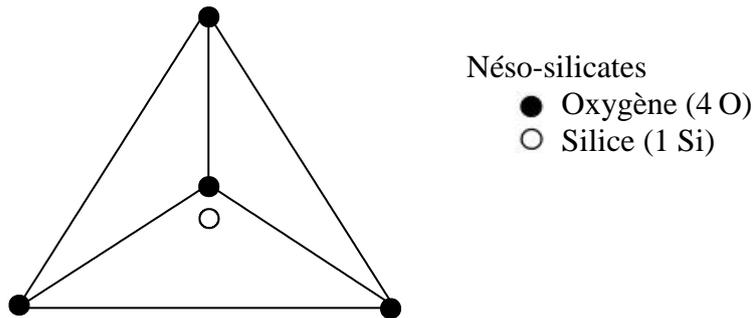
On classe ces silicates à tétraèdres isolés en 2 sous groupes :

- Les néso-silicates vrais
- Les subnéso-silicates qui comportent des polyèdres anioniques supplémentaires

2.3.1 Les Néosilicates (Les silicates à tétraèdres isolés)

C'est une charpente silicatée monomérique formée de tétraèdres indépendants. Les ions $[\text{SiO}_4]^{4-}$ sont liés entre eux par des cations (Fe, Mg, Ca etc...).

Les néso-silicates Ions (tétraèdres) isolés : $[\text{SiO}_4]^{4-}$ appartiennent à des systèmes cristallins de symétrie élevée, ont des morphologies isométriques, des indices de réfraction élevés et des propriétés de clivage peu prononcées.



Les neso-silicates vrais Ils sont classés en fonction de la taille des cations qui relient les tétraèdres entre eux en :

- Néso-silicates à petits cations : la phénacite $(\text{SiO}_4) \text{Be}_2$
- Néso-silicates à cations moyens : l'olivine $(\text{SiO}_4) (\text{FeMg})_2$ les grenats $(\text{SiO}_4)_3(\text{Al}, \text{Fe}, \text{Cr})_2(\text{Ca}, \text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn})_3$
- Néso-silicates à gros cations : le zircon $(\text{SiO}_4) \text{Zr}$

Seuls les néso-silicates à cations moyens les subnéso-silicates seront étudiés.

a. Groupe des péridots

Les péridots sont des minéraux ferromagnésiens formant une solution solide continue entre un pôle Mg qui est la forstérite de formule $(\text{SiO}_4) \text{Mg}_2$ et un pôle Fe qui est la fayalite de formule $(\text{SiO}_4) \text{Fe}_2$ le terme intermédiaire étant l'olivine : $(\text{SiO}_4)(\text{FeMg})_2$, minéral bien connu en pétrographie.

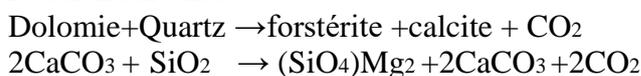
L'olivine cristallise dans le système orthorhombique (mmm).

Elle est rarement automorphe et se présente souvent en masse grenue nodulaire. Elle est de couleur jaune vert à vert olive, de dureté comprise entre 6.5 et 7 et de densité comprise entre 3.25 et 4.

Au microscope l'olivine présente une réfringence et une biréfringence moyenne à forte, cette dernière croît avec la teneur en fer.

Origine : l'olivine est un minéral fréquent dans les roches magmatiques basiques (basaltes et gabbros) et ultrabasiques péridotites (dunites).

La forstérite, rare dans les roches magmatiques est plutôt un minéral des roches métamorphiques qui apparaît lorsque des sédiments placés dans des conditions de pression et de température élevées se transforment en calcaire cristallin d'après la réaction suivante :

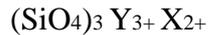


La fayalite est un péridot qui cristallise dans les milieux très différenciés enrichis à la fois en Fe et en Na. La fayalite se rencontre dans quelques phonolites, trachytes et leurs équivalents grenus.

Altération : les olivines sont souvent transformées soit en serpentine ou en iddingsite de couleur rougeâtre correspondant à un mélange d'oxydes de fer, Mg et de goethite (FeO,OH). Les agents d'altération sont soit des gaz tardimagmatiques soit des liquides.

b. Groupe des grenats

Ils forment des solutions solides complexes de formule générale :



Avec $\text{Y}_{3+} = \text{Al}^{3+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr}^{3+}$

Et $\text{X}_{2+} = \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Ca}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$

Espèces	Couleurs	Dureté	Densité
Almandin	Rose à rouge-brun	7	4.25
Pyrope	Grenat	7 à 7.5	3.51
Grossulaire	Incolore, rosâtre à vert-jaune	6.5	3.53
Spessartine	Jaune à rouge-brun	7 à 7.5	4.18
Andradite	Vert à brun-noir	7	3.75
Ouvarovite	Vert émeraude	7	3.77

Les noms des différentes espèces sont regroupés dans le tableau suivant :

	Al ³⁺	Fe ³⁺	Cr ³⁺
Fe ²⁺	Almandin		
Mg ²⁺	Pyrope		Hanleite
Ca ²⁺	Grossulaire	Andradite	Ouvarovite
Mn ²⁺	Spessartine	Caldérite	Mn ²⁺

Les grenats alumineux et l'andradite sont les plus répandus.

Les grenats cristallisent tous dans le système cubique holoèdre m3m. Ils sont fréquemment automorphes et présentent un faciès isométrique constitué par la forme rhombododécaèdre (110) ? Ils peuvent également se présenter en grains arrondis.

Leur couleur, leurs indices de réfraction, leur dureté et leur densité varient avec leur composition. Tous les grenats ont un éclat vitreux, ils sont transparents à translucides.

Origine : Les grenats sont des minéraux communs des roches métamorphiques et certaines roches magmatiques. Ainsi on trouve :

L'almandin dans les gneiss et les micaschistes.

Le pyrope dans les péridotites et les kimberlites.

Le grossulaire dans les skarns.

La spessartine dans les granites et les pegmatites granitiques.

L'andradite dans les roches du métamorphisme de contact.

L'ouvarovite dans les serpentinites chromifères.

2.3.2 Les Sub-Nésosilicates

Ce sont des silicates d'alumine correspondant aux minéraux du métamorphisme, il s'agit de l'andalousite, de la sillimanite et du disthène.

Ce sont des minéraux polymorphes répondant à la composition globale : SiAl₂O₅

a. Andalousite

Elle cristallise dans le système orthorhombique holoèdre mmm.

Très fréquemment automorphe : cristaux prismatique pseudo-quadratique allongés selon Oz et combinant les formes (110), (100), (010) et (001). L'andalousite peut également se présenter en agrégats radiés. Elle renferme souvent des inclusions charbonneuses à la limite des secteurs (110), c'est la variété chialolite.

Couleur : blanc sale, gris à marron clair. Elle possède un clivage 010 très facile.

Elle est translucide à éclat gras. Elle présente une cassure irrégulière.

Dureté = 7.5 et densité : 3.1 à 3.2.

Origine : l'andalousite est un minéral du métamorphisme de contact entre le granite et les schistes pour donner des cornéennes. C'est aussi un minéral du métamorphisme général ou régional, où elle représente un minéral typique des pressions modérées à basses (< 5 Kbars) on la trouve alors dans les gneiss.

L'andalousite s'altère en muscovite et séricite.

b. Disthène

Il cristallise dans le système triclinique holoèdre (1). Ils possèdent 2 clivages, un clivage 100 facile et un clivage 010 plus difficile.

Le disthène est fréquemment automorphe et il présente alors un faciès prismatique allongé selon Oz et aplati selon (100). Il se présente souvent en agrégats radiés.

Couleur : incolore à bleu ciel ou brunâtre.

Le disthène est transparent à translucide et présente un éclat gras sur les clivages.

Dureté : 4 à 7, densité : 3.5 à 3.7 c'est la variété la plus dense des silicates d'alumine.

Origine : le disthène est un minéral que l'on trouve presque exclusivement dans les gneiss et les micaschistes où il coexiste avec le grenat.

Le disthène s'altère en muscovite.

c. Sillimanite

Elle cristallise dans le système orthorhombique holoèdre mmm, et présente des clivages 010 très facile.

La sillimanite est rarement automorphe, elle présente un faciès aciculaire à fibreux allongé selon Oz avec les formes (010) et (110) quelquefois visible. Elle peut aussi se présenter en agrégats capillaires flexueux.

Couleur : blanchâtre à brun clair.

Elle est transparente à translucide avec un éclat gras et une cassure esquilleuse.

Dureté 6 à 7, densité=3.3.

Origine : La sillimanite est un minéral du métamorphisme général de la catazone (haute température supérieure à 550°C et haute pression). Elle est présente dans les gneiss à sillimanite. Pas d'altération connue.

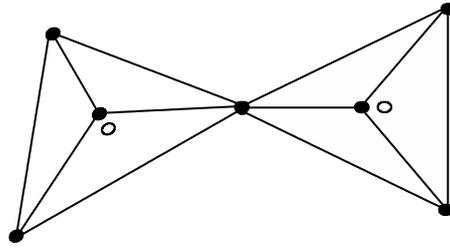
N. B. Les trois (03) polymorphes : Andalousite, disthène et sillimanite n'existent que dans les roches où l'aluminium est en excès par rapport à la plupart des autres éléments.

L'Andalousite la moins dense se forme par métamorphisme sous basse pression et le disthène qui est le plus dense et se forme sous haute pression.

2.4 Les Sorosilicates (Les silicates à tétraèdres associés par paires)

Les soro-silicates comportent des groupements $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$ formés par 2 tétraèdres liés entre eux. La charpente est dimérique. Les soro-silicates vrais sont rares, alors que les soro-silicates complexes contenant à la fois $[\text{SiO}_4]$ et $[\text{Si}_2\text{O}_7]$ sont plus fréquents. Les soro-silicates ont les mêmes propriétés que les néosilicates.

Ions provenant de la réunion de deux tétraèdres SiO_4 : $[\text{SiO}_2\text{O}_7]^{6-}$.



Les sorosilicates ont en commun la combinaison de dimère de tétraèdres silicates : $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$, les sorosilicates se classent en trois (03) groupes :

Les sorosilicates sont des silicates (Si_2O_7) isolés. On distingue :

- Les sorosilicates vrais : groupe des mélilites
 - Les subsorosilicates : groupe des épidotes et de l'idocrase
 - Les subsorosilicates à ions d'oxygènes supplémentaires : groupe de la lawsonite
- Seules les subsorosilicates avec le groupe des épidotes feront l'objet de notre étude.

a. les épidotes

Les minéraux de ce groupe présentent à la fois des fonctions (Si_2O_7) et (SiO_4) ainsi que des ions oxygènes supplémentaires non liés au silicium. On distingue :

b. La zoïsite $(\text{Si}_2\text{O}_7) (\text{SiO}_4) \text{O} (\text{OH}) \text{Al}_3\text{Ca}_2$

Elle se présente sous 2 formes : orthorhombique et monoclinique (clino-zoïsite)

c. La pistachite $(\text{Si}_2\text{O}_7) (\text{SiO}_4) (\text{OH}) \text{Ca}_2 \text{Fe Al}_2\text{O}$

C'est une épidote qui renferme 10% de molécule de Fe_2O_3 , elle cristallise dans le système monoclinique.

d. La piémontite $(\text{Si}_2\text{O}_7) (\text{SiO}_4) \text{O} (\text{OH}) (\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}^{2+})_3(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La}, \text{Y}^{3+})_2$

C'est une variété qui contient du manganèse et qui cristallise dans le système monoclinique.

e. L'allanite ou orthite $(\text{Si}_2\text{O}_7) (\text{SiO}_4) \text{O} (\text{OH}) (\text{Fe}^{3+}, \text{Fe}^{2+})_3(\text{Ca}, \text{Ce}, \text{La},)_2\text{Al}_2\text{O}(\text{OH})$

En général les épidotes se présentent sous forme de cristaux prismatiques pouvant atteindre une trentaine de cm, parfois aciculaires, avec aplatissement fréquent. Elles peuvent se présenter en groupes fibro-radiés ou en masses grenue.

Couleur : vert bouteille à vert pistache tirant vers le jaune ou le noir. La piémontite est de couleur brun violacé

Cassure irrégulière, parfois lamellaire. Clivage parallèle à l'allongement.

Translucide à opaque, avec un éclat vitreux.

Dureté comprise entre 6 et 7, et de densité = 3,4

Origine : les épidotes se rencontrent dans les roches de faible métamorphisme régional. L'allanite se trouve dans les roches éruptives acides : granites, granodiorites et pegmatites.

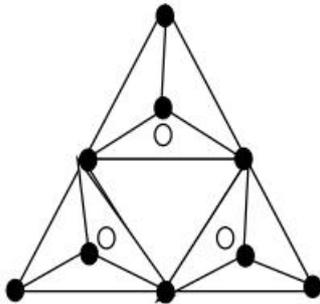
Produit d'altération hydrothermale des silicates alumino-calciques (feldspath, hornblende)

2.5 Les Cyclosilicates (Les silicates à tétraèdres associés en anneaux)

Les anneaux comportent 3, 4 ou 6 tétraèdres d'où les formules structurales :

$[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$, $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$, $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$, les anneaux de tétraèdres constituent l'ossature des cyclo-silicates. Les espèces correspondantes appartiennent au système : rhomboédrique, quadratique, hexagonal.

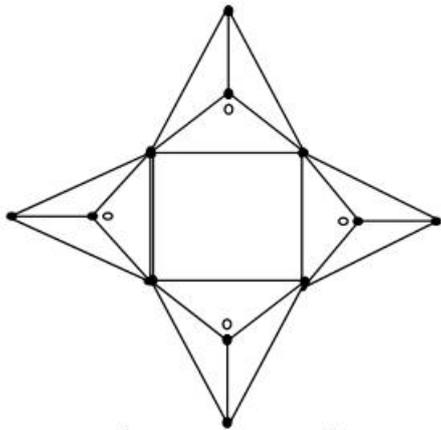
Anions constitués de tétraèdres de manière à former des cycles - ci peuvent comporter trois (03) $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$, quatre $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$ ou six tétraèdres $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$ se sont les cyclo-silicates.



Cyclo-silicates

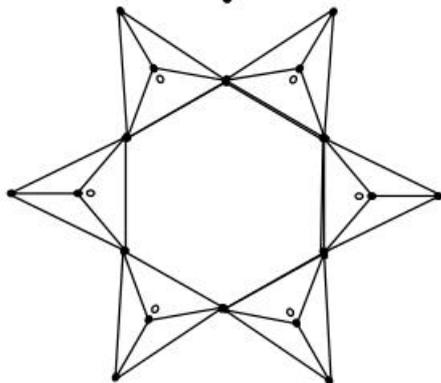
A- Système rhomboédrique $[\text{Si}_3\text{O}_9]^{6-}$

- Oxygène (9 O)
- Silice (3 Si)



B- Système quadratique $[\text{Si}_4\text{O}_{12}]^{8-}$

- Oxygène (12 O)
- Silice (4 Si)



C- Système hexagonal $[\text{Si}_6\text{O}_{18}]^{12-}$

- Oxygène (18 O)
- Silice (6 Si)

Les cyclo-silicates comme nous l'avons dit en introduction les cyclosilicates se distinguent par les traits particuliers à savoir que les mailles cristallines contiennent des groupes isolés de tétraèdres SiO_4 associés en anneaux, c'est-à-dire caractérisés par les radicaux complexes : $(\text{Si}_4\text{O}_{12})$ et $(\text{Si}_6\text{O}_{18})$.

Nous distinguons 2 groupes :

Un groupe à 4 tétraèdres associés en anneaux : l'axinite

Un groupe à 6 tétraèdres associés en anneaux : le béryl, la tourmaline et la cordiérite.

Les minéraux du 2^{ème} groupe sont les plus importants.

a. Le groupe du béryl

C'est le minéral le plus répandu des minéraux renfermant du beryllium.

Le béryl de formule $(\text{Si}_6\text{O}_{18}) \text{Be}_3 \text{Al}_2$ cristallise dans le système hexagonal.

Le béryl a un faciès prismatique. Il se rencontre généralement sous forme de cristaux isolés, quelque fois groupés en druses.

Couleur : variée : souvent blanc verdâtre, jaune vert, bleu clair, vert vif, quelque fois rose. Suivant la couleur on distingue :

- l'émeraude : béryl de couleur vert vif. Les variétés translucides sans fissures sont des gemmes très recherchés (coloration due au Cr^{3+}).
- L'aigue marine : variété de béryl transparent de couleur bleue.

Densité : entre 2,6 et 2,9, Dureté : comprise entre 7,5 et 8.

Origine : minéral commun des pegmatites, des granites et des syénites néphéliniques.

Le béryl peut prendre naissance par métasomatose dans un contexte métamorphique (ex des émeraudes de Sibérie), soit sédimentaire (ex des émeraudes de Colombie).

Gisement important au Brésil, en Inde et en Afrique du Sud.

Le béryl est utilisé en industrie aéronautique car le Be est un des métaux les plus légers. Il est par ailleurs utilisé en médecine comme sels de Be.

b. Le groupe de la tourmaline

Sa formule est la suivante : $[(\text{Si}_6\text{O}_{18}) (\text{BO}_3)_3 (\text{OH}, \text{F})_4] \text{Al}_6 \text{Y}_3 \text{Na}$.

Dans laquelle $\text{Y} = \text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn}, \text{Li}, \text{Al}$

Quand $\text{Y} = \text{Mg}$, la tourmaline est dite magnésienne, c'est la dravite de couleur jaune brun.

Quand $\text{Y} = (\text{Fe}, \text{Mn})$ la tourmaline est dite ferreuse, c'est le schörl de couleur noire.

Quand $\text{Y} = (\text{Al}, \text{Li})$, il s'agit d'une tourmaline alcaline, l'elbaïte de couleur rose ou bleue. La couleur de la tourmaline est donc fonction de sa composition chimique.

La tourmaline cristallise dans le système rhomboédrique, elle se présente sous forme de longs cristaux striés suivant l'allongement (faciès colonnaire) à section triangulaire souvent courbe. Elle peut se présenter en agrégats aciculaires ou fibreux

Cassure conchoïdale, pas de clivage

Transparente à opaque, et à éclat vitreux

Densité comprise entre 2,9 et 3,2.

Dureté = 7 à 7,5

Origine : la tourmaline est un minéral typique des milieux pneumatolitiques.

On la rencontre :

Dans les pegmatites où elle coexiste avec le quartz et l'orthose et avec la muscovite.

Dans les granites et les greisens avec la cassitérite, la topaze et le wolframite.

Dans les gisements aurifères de haute température.

Dans les schistes cristallins.

c. Le groupe de la cordiérite

De formule : $(\text{Si}_5\text{AlO}_{18}) (\text{Mg}, \text{Fe})_2 \text{Al}_3$ elle cristallise dans le système orthorhombique, de structure cristalline comparable à celle du béryl avec des ions aluminium à la place du Be. Les cristaux sont rares, elle se présente en grains ou en masse compacte

Couleur : elle peut être incolore mais souvent colorée : gris, bleu, bleu violet, rarement en blanc jaunâtre ou en brun. Son éclat est vitreux, transparente à translucide

Cassure irrégulière à conchoïdale. Clivage net suivant 010

Dureté entre 7 et 7,5, Densité entre 2,60 et 2,66

La cordiérite s'altère en pinité

Origine : la cordiérite est fréquente dans les roches du métamorphisme général (les gneiss, les granulites, les migmatites) dans les roches du métamorphisme de contact (schistes et cornéennes) mais également dans les roches ignées (pegmatites et granites d'anatexie).

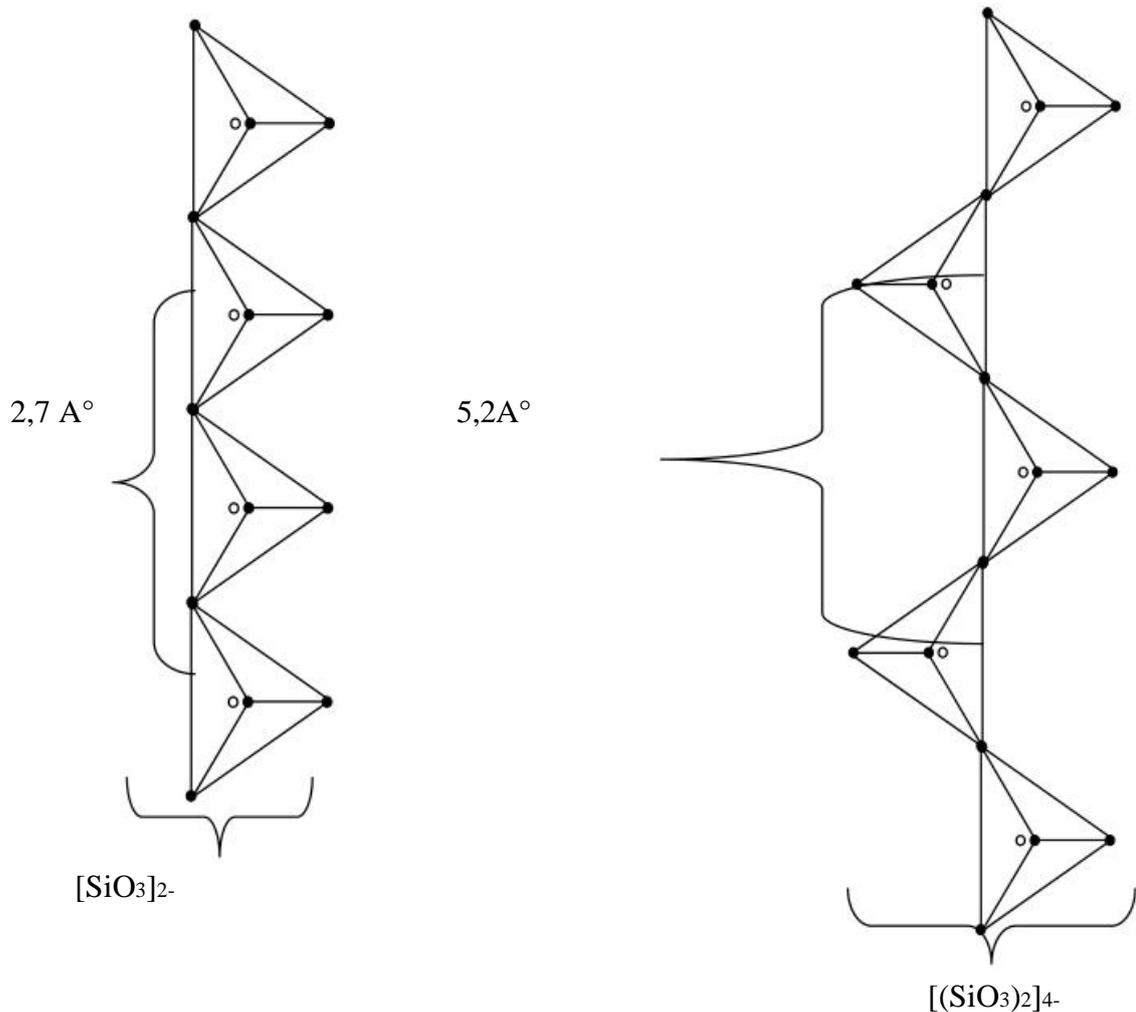
2.6 Ino-silicates (Silicates à tétraèdres en chaînes)

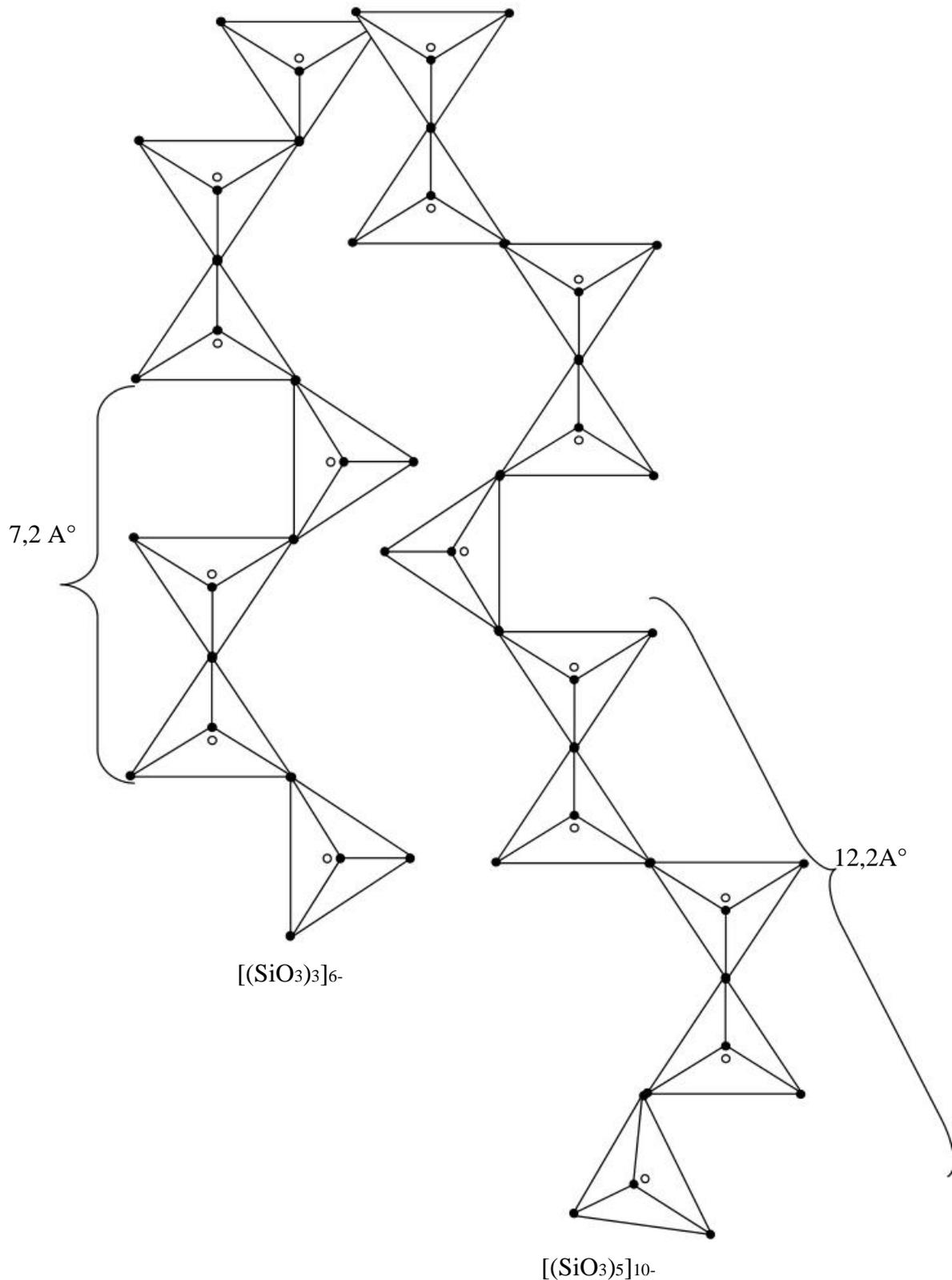
Lorsque chaque tétraèdre partage un oxygène on obtient une chaîne simple de tétraèdres. Il en résulte que pour chaque tétraèdre 2 charges négatives ont été neutralisé. La formule est $[\text{Si}_2\text{O}_6]_4^-$ (pyroxènes).

Lorsque deux chaînes simples s'unissent par leurs oxygènes pour former des chaînes doubles, on obtient une structure de formule générale : $[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_6^-$ avec présence de OH (amphiboles)

Les Ino-silicates Sont les silicates caractérisés par des structures dans les quelles les anions sont constitués de chaînes infinies simples ou de chaînes doubles.

- Cette catégorie des silicates est constituée par des chaînes ouvertes de tétraèdres. Ces chaînes peuvent être simples (proxènes) ou double (amphiboles)





Rappel : Les ino-silicates ce sont des silicates à tétraèdres associés en chaîne qui peut être simple, tel est le cas des Pyroxènes de formule générale $(\text{Si}_2\text{O}_6)^{4-}$, ou chaîne double cas des amphiboles de formule générale $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$ OH.

2.6.1 Les pyroxènes

Dans les pyroxènes, les chaînes sont allongés suivant l'axe c et leur période est de 2 tétraèdres d'où leur formule $(\text{Si}_2\text{O}_6)_n$.

La formule générale des pyroxènes s'écrit de la façon suivante :



Dans laquelle :

W = Ca ou Na cations de grande taille

X = Fe²⁺, Mg, Mn, Li, Ni cations de taille moyenne

Y = Fe³⁺, Al, Ti cations de petite taille

Les chaînes de tétraèdres sont reliées entre elles latéralement par les cations Ca, Na, Mg, Fe, Al etc. Ces cations occupent 2 sortes de sites différents : M₁ et M₂.

Les sites M₁, situés entre les petites bases de 2 trapèzes, sont octaédriques. Tandis que les sites M₂, sont situés entre les grandes bases et ont une coordination comprise entre VI et VIII

Et donc moins régulière que la précédente.

La symétrie des pyroxènes dépendra en fait de la taille des cations qui occupent ce site M₂.

Si les cations présents dans ce site M₂ sont de dimension moyenne (Fe, Mg..) la symétrie sera généralement orthorhombique, et il s'agira d'ortho-pyroxènes.

Si au contraire les cations présents dans le site M₂ sont volumineux (Ca, Na) la symétrie sera monoclinique et il s'agira de clino-pyroxènes.

La substitution de Si par Al dans les tétraèdres est généralement très faible.

2.6.1.1 Caractères généraux des pyroxènes

Les pyroxènes se distinguent surtout par leur forme et leur clivage.

Forme : les pyroxènes sont généralement trapus, cependant les faciès allongés souvent aciculaires sont d'autant plus fréquent que la teneur en Na est plus élevée.

Clivages : ils sont caractéristiques suivant 110. Les traces de ces clivages font entre elles un angle voisin de 90°. Par ailleurs ces clivages sont grossiers et discontinus.

a. Les ortho-pyroxènes (OPX)

Les OPX forment une solution solide depuis un terme magnésien l'enstatite de formule $\text{Si}_2\text{O}_6\text{Mg}_2$ jusqu'au terme ferrifère l'orth-ferrosillite de formule $\text{Si}_2\text{O}_6\text{Fe}_2$.

Le terme intermédiaire le plus commun est : l'hypersthène

Les cristaux nets d'OPX sont rares. Le plus souvent ces pyroxènes se présentent en masses fibreuses, lamellaires ou compactes.

Couleur : les termes magnésiens sont de couleur claire, gris, vert pâle, blanc jaunâtre, parfois brun clair. Au microscope, ils sont pratiquement incolores en LN.

Les termes extrêmes ferrifères sont noirs verdâtres ou brunâtres. Ce sont les termes intermédiaires que l'on rencontre le plus souvent dans les roches.

La dureté est comprise entre 5 et 6 et la densité varie de 3.1 à 3.5

Altération : les OPX s'altèrent en serpentine ou en talc pour les termes magnésiens.

Origine : Les OPX sont fréquents dans les roches basiques et ultrabasiques (gabbros, norites, pyroxénolites, péridotites). Ils sont plus rares dans les roches métamorphiques. Ils sont associés à l'olivine, la serpentine et la magnétite.

b. Les clino-pyroxènes (CPX)

Dans les CPX le site W sera occupé par Ca ou Na (gros cations). Les pyroxènes sont alors calciques ou sodiques et ils cristallisent dans le système monoclinique.

b.1 Les pyroxènes monocliniques calciques

Ces pyroxènes contiennent toujours un peu de Fe et de Mg et sont de ce fait classés en fonction des valeurs relatives en Ca, Mg, et Fe dans le diagramme triangulaire de Poldervaart et Hess (1951). On distingue ainsi :

Le diopside $\text{Si}_2\text{O}_6 \text{CaMg}$,

L'hédenbergite $\text{Si}_2\text{O}_6 \text{CaFe}$

L'augite $\text{Si}_2\text{O}_6 \text{Ca} (\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Al}, \text{Ti})$

b.1.1 L'augite

L'augite est le minéral le plus répandu, elle peut être ferrique, titanifère et même contenir un peu de sodium (Na), on dit alors qu'il s'agit de l'augite aegyrique.

Généralement bien cristallisé en prismes trapus de sections octogonales.

Sa couleur est variable du brun vert à noir.

Cassure conchoïdale. Clivages nets. Translucide à opaque. Eclat vitreux.

Les augites d'origine volcanique montrent souvent en LM une mâcle en sablier.

Le diallage est une variété d'augite avec un clivage supplémentaire 110.

Dureté = 5 à 6 et Densité = 3 à 3,6

Origine : l'augite est le minéral le plus fréquent dans les roches basiques plutoniques (gabbros) et volcaniques (dolérites et basaltes), mais également dans les roches ultrabasiques (péridotites)

Altération : l'augite s'altère en ouralite. L'ouralitisation est la transformation des pyroxènes en hornblende verte en association avec la pistachite et la chlorite quand le degré d'altération est poussé.

b.2 Les pyroxènes monocliniques sodiques

On distingue : la jadéite $\text{Si}_2\text{O}_6 \text{Na Al}$ et L'aegyrique $\text{Si}_2\text{O}_6 \text{Na Fe}$.

Cependant la plus répandue est l'aegyrique.

b.2.1 L'aegyrique

Elle se présente en cristaux allongés, en aiguilles forme aciculaire, parfois striée ou cannelée.

Couleur : noir verdâtre

Transparente à opaque, éclat vitreux

Dureté = 7, densité = 2,5 à 3,6

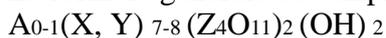
Origine : l'aegyrique est un minéral présent dans les granites alcalins et dans les syénites néphéliniques.

2.6.2 Les amphiboles

Les amphiboles présentent des structures en chaîne double (rubans) de tétraèdres SiO_4 .

L'unité structurale est donc le ruban (Si_4O_{11}) (OH) dirigé suivant l'axe c.

La formule générale des amphiboles est la suivante :



Avec :

A= Ca, Na, K

X =Mg, Fe, Mn,

Y=Al, Fe³⁺, Ti, Cr, Li

Z= Si, Al

Dans les amphiboles la substitution tétraédrique Si ↔Al est plus prononcée que dans les pyroxènes.

Entre les couches de formule : $[(\text{SiAl})_4\text{O}_{11}\text{OH},\text{F}]$, on distingue 5 types de sites de cations.

Site A : situé au milieu des grandes bases de trapèzes. Ce site peut être occupé par les gros cations Ca, Na, K de coordinance 8 à 10, ou inoccupé c'est-à-dire vacant.

Site M4 : situé en bordure des grandes bases des trapèzes. Ce site contient des cations en coordinance 6 à 8.

Sites M1, M2, M3 : ce sont de petits sites qui abritent des cations en coordinance octaédrique.

Ces sites accueillent les cations X et Y qui vont déterminer la symétrie orthorhombique ou monoclinique des amphiboles. Ainsi :

Si en X il y a Fe et Mg les amphiboles sont ferromagnésiennes et cristallisent dans le système orthorhombique.

Si X= Ca, les amphiboles sont calciques monocliniques

Si X=Na, les amphiboles sont sodiques et monocliniques.

2.6.2.1 Caractères généraux des amphiboles

Les amphiboles présentent de grandes analogies avec les pyroxènes tant par leur forme que par leur composition chimique. Elles se distinguent des pyroxènes par la structure, l'habitus prismatique en général plus allongé et à section hexagonale, l'angle des clivages proche de 120°, la densité plus faible (2,5 à 3,6) et un radical hydroxyle qui n'existe pas chez les pyroxènes.

a. les amphiboles ferromagnésiennes

Elles cristallisent dans le système orthorhombique car le site X renferme Fe, Mg. On distingue parmi elles l'anthophyllite de formule : $[(Si_4O_{11}) OH]_2 (FeMg)_7$

Les cristaux à faciès prismatique sont rares. Elle se présente souvent en masse compacte, fibroradiée, fibreuse.

Couleur : grise, brunâtre, vert brunâtre, à brun rougeâtre.

Clivage suivant le prisme (110) avec un clivage de 120°. Eclat vitreux

Dureté=5,5 à 6 et densité=2,8 à 3,2

Origine : c'est un minéral essentiel des schistes cristallins.

b. Les amphiboles monocliniques calciques

Dans ce cas le site X renferme du Ca, les amphiboles appartenant à cette classe sont :

Le groupe actinote-trémolite et la hornblende.

b.1 Actinote-trémolite

Elle forme une solution solide depuis :

Un terme magnésien, la trémolite : $[(Si_4O_{11}) OH]_2 Ca_2 Mg_5$ vers un terme ferrifère, la ferroactinote : $[(Si_4O_{11}) OH]_2 Ca_2 Fe_5$, le terme intermédiaire étant l'actinote de formule $[(Si_4O_{11}) OH]_2 Ca_2 (Mg, Fe)_5$,

Les cristaux sont rares chez la trémolite, cependant ils sont plus fréquents chez l'actinote ; prismes plus ou moins allongés, parfois lamellaires. Généralement en agrégats aciculaires à fibreux.

Couleur blanc à gris foncé. Eclat vitreux à soyeux ; cassure inégale

Dureté=5 à 6 et densité =2,9 à 3,2

L'asbeste à longues fibres est une variété fibreuse de la trémolite.

Origine : la trémolite se rencontre surtout dans les calcaires cristallins et les dolomies.

L'actinote dans les schistes cristallins, chloriteux ou talqueux.

b.2 La hornblende

Sa formule est : $[(Si_3AlO_{11}) OH]_2 (Ca, Na, K)_{2-3}(Mg, Fe^{2+}, Fe^{3+}, Al)_5$

On distingue la hornblende verte et la hornblende brune ou hornblende basaltique qui est plus riche en fer.

La hornblende basaltique est généralement bien cristallisée : cristaux prismatiques allongés à section hexagonale. La hornblende verte en cristaux libres peu nets, en agrégats allongés aplatis, fibreux, parfois massif.

Couleur Hb verte : vert, vert bleuâtre, brun clair, vert noirâtre.

Hb brune : brun à noir brillant.

Translucide. Cassure subconchoïdale.

Dureté = 5 à 6 et densité = 3 à 3,4

Altération en épidote, serpentine, chlorite.

Origine : la Hb brune ou Hb basaltique est plus fréquente dans les roches volcaniques (basaltes, trachytes). La Hb verte se rencontre dans les granites, les syénites, les diorites mais également dans les roches du métamorphisme de contact et dans les schistes cristallins (amphibolites).

c. Les amphiboles monocliniques sodiques

Le site X renferme du Na.

Nous citerons parmi les plus importants la riébékite de formule : $[\text{Si}_4\text{O}_{11}(\text{OH})]_2\text{Na}_2\text{Fe}_{3+4}$

Elle se présente en cristaux prismatiques irréguliers ou fibreux et en agrégats lamellaire ou asbestiforme.

Couleur : bleu noir à noir

Eclat vitreux mais parfois soyeux à chatoyant

Clivage parfait selon le prisme vertical

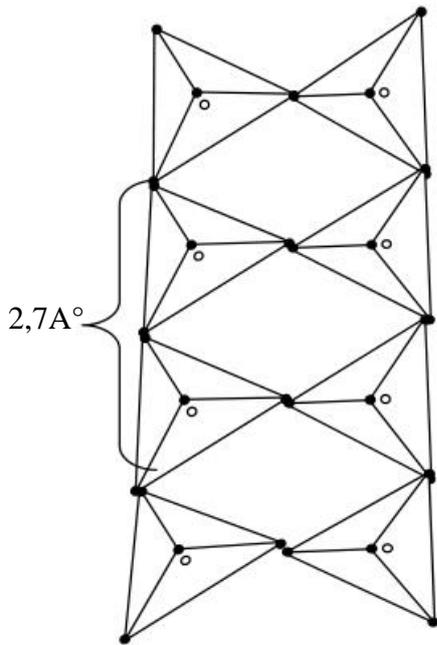
Dureté = 5,5 à 6 et densité = 3,02 à 3,42.

Origine : on rencontre la riébékite dans les roches du métamorphisme de basse température et de basse et moyenne pression, mais également dans les roches magmatiques alcalines : dans les granites et les syénites.

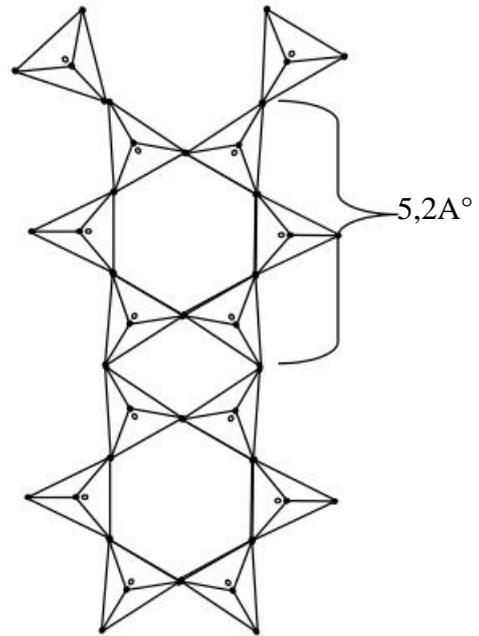
2.7 Les Phyllo-silicates (Tétraèdre en feuillets)

Si l'on étend indéfiniment dans 2 directions des rubans de tétraèdres on obtient des feuillets structuraux où tous les tétraèdres sont liés par 3 de leurs sommets. La trame aura une symétrie pseudo-hexagonale et un clivage basal excellent. Le groupe anionique sera $[\text{Si}_4\text{O}_{10}]^{4-}$. Dans ce groupe, Al tétra coordonné peut remplacer jusqu'à 2 des 4 atomes de Si.

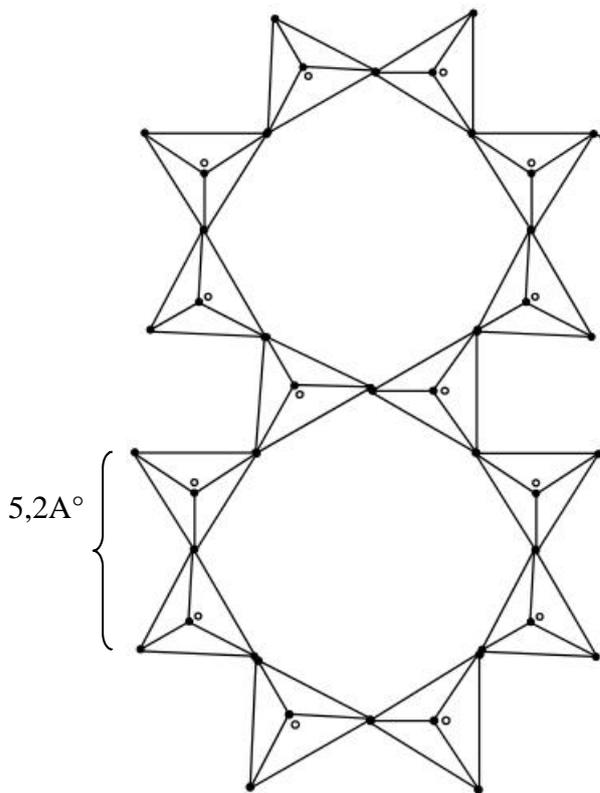
Exemples de phyllo-silicates : les micas, le talc, minéraux des argiles.



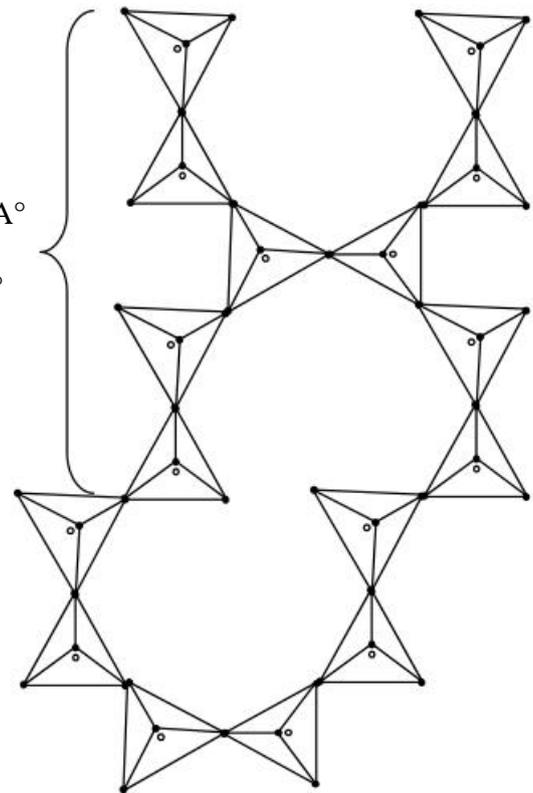
Contenant de chaînes à période simple doubles



Jumelage de deux (02) chaînes à périodes



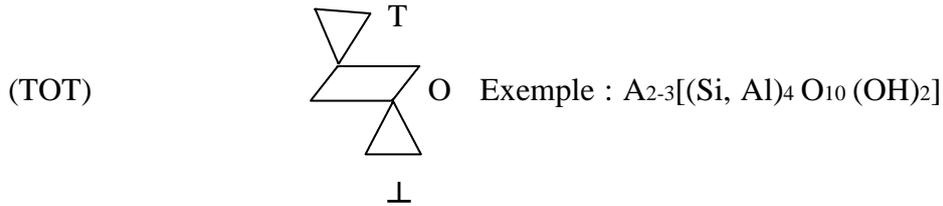
Jumelage de deux chaînes à périodes triple



Jumelage de deux chaînes à périodes quintuple

Les phyllo-silicates leur appartiennent les minéraux suivants :
Muscovite, Biotite, c'est-à-dire les micas, les chlorites et les minéraux des argiles.

a- Formule générale des phyllo-silicates du type



b- Formule générale des phyllo-silicates du type



Exemple : $A_{2-3}[(Si, Al)_2 O_5 (OH)_2]$

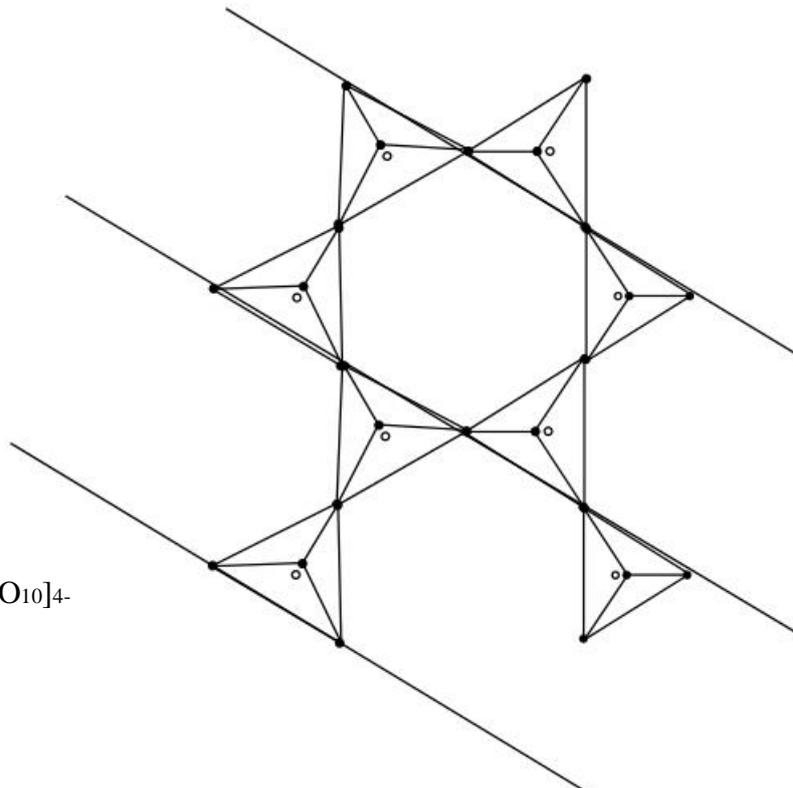
Il existe plusieurs groupes de phyllo-silicates :

- 1- Phyllo-silicates du type talc
- 2- Groupe des micas : biotite, muscovite, glauconie, phlogopite, lépidolite etc,....
- 3- Groupe des chlorites : clino-chlore
- 4- Groupe des argiles : Kaolin, montmorillonite
- 5- Groupe des serpentines : serpentine, chrysolite.

Si l'on considère la plus petite unité possible qui rend compte de l'architecture du minéral, on constate que, dans l'édifice chaque tétraèdre n'a qu'un seul oxygène non saturé.

2.8 Les Tecto-silicates (Tétraèdres en feuillets)

Les tétraèdres ont tous leurs oxygènes en commun, ils sont liés par tous leurs sommets. Les tétraèdres forment une charpente tridimensionnelle. La formule structurale est **SiO₂**. Les oxygènes de la charpente ne forment pas un empilement compact, des cations de taille variable occupent les lacunes. On distingue dans les tectosilicates les familles de la silice, des feldspaths, feldspathoïdes.



Formule : $[Si_4O_{10}]_4-$

Rappel

Les tecto-silicates sont des silicates à tétraèdres en édifices à 3 dimensions ou tecto-silicates, c'est à dire tétraèdres disposés en charpente ou toit.

Les tétraèdres SiO_4 sont soudés les uns aux autres par leur 4 sommets. De ce fait chaque atome d' O_2 appartient à 2 tétraèdres voisins.

Lorsque les tétraèdres sont dépourvus d'Al la charpente atteint la neutralité électrique et la formule structurale de l'édifice est $\text{SiO}_4/2$ ce qui donne SiO_2 , c'est le groupe de la silice.

Lorsque les tétraèdres contiennent de l'Al les charges négatives excédentaires de la charpente sont compensées par de gros cations alcalins ou alcalino-terreux qui viennent se loger dans les cavités, la formule structurale devient alors $[(\text{Si Al})\text{O}_2]_n$, c'est le groupe des feldspaths, des feldspathoïdes et des zéolites.

Les tecto-silicates se subdivisent ainsi en 5 groupes ou familles :

- groupe de la silice
- groupe des feldspaths
- groupe des feldspathoïdes
- groupe des zéolites
- groupe des scapolites

2.8.1 Famille ou groupe de la silice

2.8.1.1 polymorphisme de la silice

La silice se présente sous la forme de nombreuses variétés polymorphiques, variétés dont le champ de stabilité est donné dans le diagramme d'équilibre P-T (voir tirage)

Il existe plusieurs variétés de silice :

- cristallisé avec comme exemple le quartz
- à structure fibreuse exemple la calcédoine
- amorphe exemple l'opale

a. Le quartz (SiO_2)

Il cristallise dans le système rhomboédrique pseudo hexagonal, il présente souvent la forme bi pyramidée.

Couleur : bien que normalement incolore (cristal de roche ou quartz hyalin), le quartz peut présenter de nombreuses colorations (phénomène d'allochromatisme). On distingue ainsi :

Le quartz rose, couleur due à des traces de Mn ou des inclusions d'hématite.

Le quartz jaune ou citrine couleur due à des traces d'hydroxydes ferriques colloïdales.

Le quartz violet ou améthyste couleur due à des traces de Re^{3+} .

Le quartz noir ou enfumé

Le quartz blanc laiteux

Dans ces 2 derniers cas la coloration serait liée à une distribution électronique particulière.

Œil de tigre : variété de silice à reflets chatoyants.

Dureté : 7

Cassure conchoïdale, éclat gras à vitreux.

Pas de clivage, mais présence de macles par pénétration ou accolement.

Gisement : Il peut être présent dans tous types de roches aussi bien magmatiques, que métamorphiques et sédimentaires.

Dans les roches magmatiques, il intervient dans la classification des roches en tant que minéral cardinal au même titre que les feldspaths et feldspathoïdes. Il caractérise les

roches sursaturées. On le trouve dans les granites, les granodiorites, les diorites quartziques et leur équivalents effusifs.

Dans les roches métamorphiques, il est présent aussi bien dans les roches du métamorphisme de contact que celles du métamorphisme général.

Dans les roches sédimentaires, ils caractérisent les grés.

b. la calcédoine et l'opale (SiO₂)_n H₂O

Ce sont des produits de concrétionnement de la silice dans un contexte sédimentaire (silex, chert) ou igné (nodules d'agate, remplissage de vacuoles).

La calcédoine peut être subdivisée en calcédoine au sens strict à coloration uniforme, et en agate diversement colorée selon des bandes parallèles ou concentriques. Elles peuvent être blanches, rouges, brunes ou vertes.

Les opales sont appelées hyalite quand elles sont incolore et transparente à éclat gras, et opale noble quand elles sont translucides mais réfléchissant la lumière.

c. Tridymite et cristobalite

La tridymite se rencontre sous 2 formes :

- de haute température, cristallisant dans le système hexagonal
- de basse température cristallisant dans le système orthorhombique

Elle se présente généralement en minces plaquettes hexagonales maclées 2 par 2 ou 3 par 3.

Elle se présente également en rosettes de cristaux blancs.

Origine : la tridymite est un minéral de roches volcaniques acides : trachytes, andésites et tufs rhyolitiques.

La cristobalite se rencontre également sous 2 formes :

- de haute température, cristallisant dans le système cubique
- de basse température cristallisant dans le système quadratique

Elle se présente sous forme de cristaux octaédriques, parfois macles sur(111), ou en masses sphérolitiques.

Origine : elle est associée à la tridymite.

2.8.2 Famille ou groupe des feldspaths

Les feldspaths sont de loin les minéraux les plus importants de l'écorce terrestre. La composition des feldspaths usuels est décrite comme solution solide ternaire entre 3 pôles stœchiométriques :

Orthose Si₃Al O₈ K (3/1)

Albite Si₃Al O₈ Na (3/1)

Anorthite Si₂Al₂ O₈ Ca (1/1)

Il existe 2 groupes fondamentaux de feldspaths :

Les feldspaths alcalins : orthose- albite

Les feldspaths calco-sodiques : les plagioclases

a. Les feldspaths alcalins

On distingue les feldspaths potassiques et les feldspaths sodiques.

- les feldspaths potassiques

Ils sont polymorphes de formules Si₃Al O₈ K, on a :

L'orthose cristallisant dans le système monoclinique

Le microcline cristallisant dans le système triclinique

La sanidine cristallisant dans le système monoclinique

On peut considérer que la phase microcline possède une structure entièrement ordonnée du point de vue des positions des tétraèdres de Si et des cations Al. Alors que la phase

orthose admet un désordre partiel entre Si et Al. Le désordre devient total dans la sanidine monoclinique.

Les phases ordonnées réalisées lors de refroidissement lent sont dites de basse température, alors que les phases désordonnées cristallisant rapidement sont dites de haute température.

b. Les feldspaths sodiques

Ils sont représentés par l'albite de formule $\text{Si}_3\text{AlO}_8\text{Na}$.

Dans les feldspaths alcalins, il peut y avoir une solution solide parfaite depuis les feldspaths sodiques jusqu'au feldspath potassiques mais à haute température seulement, comme dans les laves (voir planche diagramme)

Par contre à basse température, il y a immiscibilité entre les termes extrêmes (les ions K et Na ont des rayons ioniques qui diffèrent de plus de 15%), et le milieu qui possède, par exemple, une composition de 60% d'Orthose et 40% d'albite se consolide en un cristal hétérogène : la perthite. Le feldspath dominant constitue la matrice de l'édifice dans laquelle l'autre est dispersé sous forme de facules ayant l'aspect de veines, fuseaux, lacets taches etc...

visible à l'œil nu et au microscope.

L'apparition de la série continue de haute température ou celle de basse température est fonction de 2 facteurs :

- la température initiale de consolidation
- la vitesse de refroidissement qui doit être rapide pour que puisse subsister la série de haute température. (diagramme)

c. Les feldspaths calco-sodiques : les Plagioclases

C'est le type parfait d'une série isomorphe complète allant de l'albite à l'anorthite.

On distingue

Albite de 0 à 10% d'An

Oligoclase 10 à 30% d'An

Andésine 30 à 50% d'An

Labrador 50 à 70 %

Bytownite 70 à 90%

Anorthite 90 à 100 %

Les plagioclases cristallisent dans le système triclinique.

d. Caractères généraux des feldspaths

Les feldspaths possèdent un grand nombre de caractères communs, quelque soit l'espèce à laquelle ils appartiennent. Lorsqu'ils ne sont pas altérés, ils sont d'un blanc de porcelaine ou plus rarement incolores.

Ils cristallisent dans les systèmes monoclinique ou triclinique.

Les clivages (001) parfaits et (010) imparfaits sont communs à tous les feldspaths.

Les feldspaths sont très souvent maclés :

Macule de Carlsbad : simple, accollement de 2 individus est caractéristique des feldspaths potassiques (orthose et sanidine).

Macule de l'albite : polysynthétique par accollement de plusieurs individus caractéristique des plagioclases.

Macule du péricline : il s'agit de macule polysynthétique de l'albite et du microcline.

Le quadrillage observé en LM du microcline correspond à la combinaison des macles de l'albite et du péricline.

Les feldspaths sont souvent automorphes.

Les feldspaths sont rarement transparents, ils sont généralement translucides.

Couleur : Les feldspaths sont blanc laiteux, grisâtre ou rosâtre (orthose) ou vert clair notamment le microcline qui prend le nom d'amazonite.

L'éclat des feldspaths est vitreux et parfois nacré à irisé.

Leur dureté est de 6 et leur densité est comprise entre 2.5 et 2.7.

Origine : Les feldspaths sont les minéraux cardinaux des roches ignées, sursaturées, saturées et même sous saturées en silice, grenues, microgrenues ou microlitiques.

Les feldspaths alcalins sont plus communs dans les roches acides, et les pegmatites potassiques alors que les plagioclases sont plus abondants dans les roches basiques (diorites, gabbros).

Dans les roches métamorphiques, le microcline est le principal représentant des feldspaths.

Dans les roches sédimentaires détritiques le feldspath orthose apparaît dans les grés feldspathiques ou arkose.

Altération des feldspaths : Les feldspaths potassiques s'altèrent en kaolinite par lessivage des alcalins, ou en damourite, séricite ou en saussurite (épidote par hydratation des plagioclases basiques).

2.8.3 Les feldspathoïdes

Ce sont des minéraux déficitaires en silicium, ils sont symptomatiques (indiquent) des roches sous saturées dans la classification des roches magmatiques.

D'après leur structure on distingue 3 groupes de feldspathoïdes :

- groupe de la néphéline caractérisée par le squelette de la tridymite
- groupe de la leucite caractérisée par le squelette de la cristobalite
- groupe de la sodalite caractérisé par un squelette en cage.

a. Groupe de la néphéline

Dans ce groupe on distingue la néphéline et la cancrinite.

La néphéline (Ne) de formule : $(\text{SiAlO}_4)_4 \text{Na}_3 \text{K}$, cristallise dans le système hexagonal. Elle est stable jusqu'à 900°C et à 1250°C elle se charge en carnegieite cubique.

La Ne est rarement bien cristallisé en prisme trapus, elle est souvent grenue ou massive. Sa cassure est subconchoïdale, elle est incolore, blanc jaunâtre, parfois verdâtre, ou rougeâtre.

L'éclat de la néphéline est vitreux à gras. Elle s'altère en sodalite, pinite ou zéolites.

Origine : La Ne est le feldspathoïde le plus commun, elle se rencontre dans toutes les roches sous saturées, plutoniques ou volcaniques (syénites néphéliniques, phonolites, basanites).

Le minéral prend également naissance par voie métasomatique dans les roches métamorphiques telles que les calcaires néphéliniques.

La cancrinite de formule $(\text{SiAlO}_4)_3 (\text{Na,Ca})_4 \text{CO}_3 (\text{H}_2\text{O})_{0-3}$

1 cancrinite équivaut à 3 Ne + CaCO_3

Elle se présente rarement en cristaux prismatiques mais plutôt en masses compactes dans les syénites néphéliniques.

b. groupe de la leucite

Dans ce groupe on distingue la leucite et l'analcime.

La leucite de formule : $(\text{Si}_2 \text{Al O}_6) \text{K}$ cristallise, dans le système quadratique, en cristaux pseudocubiques inclus, atteignant parfois 5 cm, montrant des faces trapézoédres, faces souvent striées. Elle est parfois grenue ou massive, à cassure conchoïdale, de couleur blanc laiteux à gris, opaque parfois translucide, à éclat vitreux.

Origine : La leucite se rencontre essentiellement dans les laves : basaltes à leucite, phonolites, et leucitites.

L'analcime de formule $(\text{Si}_2 \text{ Al O}_6) \text{ Na H}_2\text{O}$ est parfois classée dans les zéolites parce qu'elle contient de H_2O . Elle cristallise dans le système cubique avec des cristaux libres atteignant parfois jusqu'à 15 cm dans les géodes. Elle se présente très rarement en cubes plutôt en masses compactes terreuses de couleur blanc jaune ou rosé et à éclat vitreux.

Origine : L'analcime se rencontre dans les basaltes, les tufs basaltiques, les trachytes et les phonolites, dans les roches sédimentaires où elle résulte de l'altération de la leucite.

c. Groupe de la sodalite

Dans ce groupe on distingue :

La sodalite de formule : $(\text{Si AlO}_4)_6 (\text{Na}_8 \text{ Cl}_2)$

Le noséane de formule : $(\text{Si AlO}_4)_6 (\text{Na}_2 \text{ SO}_4)$

L'haüyne de formule : $(\text{Si AlO}_4)_6 (\text{Na, Ca})_{4-8} (\text{SO}_4)_{1-2}$

La sodalite cristallise dans le système cubique, elle se présente rarement en cristaux mais souvent en masses compactes et en grains. Elle peut être incolore, blanche, grise, verdâtre, parfois même bleue lavande. Elle est transparente à translucide et son éclat est vitreux.

L'haüyne se présente le plus souvent en grains arrondis de couleur blanche à bleu ciel à clivage net transparente à translucide.

Origine : Dans les roches plutoniques et volcaniques sous saturées où ces minéraux coexistent avec la leucite et la néphéline, dans les syénites néphéliniques et dans les phonolites.

d. Groupe des zéolites

Ce sont des tecto-silicates caractérisés par de larges canaux qui contiennent des molécules d'eau lâchement liées (eau zéolitique). Cette eau peut être sorbée ou résorbée de façon réversible, en réponse à des variations de pression partielle de vapeur d'eau ou de chauffage (

A température modérée, le squelette silicaté reste rigide.

L'eau zéolitique expulsée peut être réversiblement remplacée par différents atomes ou molécules gazeux (H_2S , NH_3 , CCl_4 , Ar, Xe, Ne...) ou des métaux (Hg), d'où leur utilisation comme piège moléculaire dans les pompes à vide, et comme pièges sélectifs de petites molécules dans un mélange (tamis moléculaire).

Ce sont des alumino-silicates hydratés dont les charges négatives de la charpente sont compensées par Ca, Na, et K et plus rarement par Ba, Sr, et Mg.

Les formules chimiques des zéolites répondent à la relation :



Ces cations qui eux aussi logés dans les canaux sont peu liés, ils sont facilement échangeables entre eux 2Na Ca d'où leur utilisation dans l'adoucissement des eaux dures.

D'après leur structure et leur faciès, on distingue 3 familles :

d.1 Les zéolites fibreuses : faciès allongé, aciculaire à fibreux, elles forment des groupements fibroradiés.

- **Natrolite** : $\text{Na}_2(\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}) 2 \text{ H}_2\text{O}$, qui cristallise dans le système orthorhombique.

- **Thomsonite**

- **Mesolite** : $\text{Na}_2 \text{ Ca}_2 (\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10})8\text{H}_2\text{O}$ qui cristallise dans le système monoclinique.

d.2 Les zéolites lamellaires : faciès aplatis, clivage facile selon 010.

- **Heulandite** : $(\text{Ca, Na}_2) (\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) 6 \text{ H}_2\text{O}$, cristallise dans le système monoclinique.

- **stilbite** : $(\text{Ca, Na}_2, \text{K}_2) (\text{Al}_2\text{Si}_7\text{O}_{18}) 7\text{H}_2\text{O}$, cristallise dans le système monoclinique.

d.3 Les zéolites isométriques : ce sont d'excellents tamis moléculaires leur symétrie est pseudo cubique ou cubique.

- **Chabazite** : $(Ca, Na_2)(Al_2Si_4O_{12}) 6 H_2O$ cristallise dans le système rhomboédrique.

- **Pargasite** : $(Ca, Na_2)(Al_2Si_4O_{12}) 16 H_2O$ cristallise dans le système cubique.

Las zéolites sont incolores ou blanches à reflets jaunâtres, verdâtres ou rougeâtres.

Eclat vitreux à soyeux.

Dureté comprise entre 4 et 5,5, densité 2 à 2,5 Les zéolites se distinguent les unes des autres par une étude aux RX

Origine : Elles sont généralement présentes en association avec la calcite dans les vacuoles des roches effusives (basaltes) et dans les pegmatites.

e. Groupe des scapolites ou des wernérites

Ces minéraux présentent la même trame silicatée que les feldspaths, mais dans les grosses lacunes de la trame sont insérés de gros cations. La symétrie est quadratique.

Les scapolites forment une série isomorphe entre

La marialite $(Si_3AlO_8)_6 (Cl_2, SO_4, Ca_3) Na_8$ et

La Méïonite $(Si_3AlO_8)_6 (Cl_2, SO_4, Ca_3) Ca_8$

Le dipyre étant le terme moyen de la série.

On peut dire que : la marialite équivaut à 3 albites + 2 NaCl et la méïonite équivaut à 3 anorthites + $CaCO_3$.

Ce qui a fait penser que les wernérites étaient des sortes de plagioclases à tendance pneumatolitique.

Origine : On trouve les wernérites dans les roches métamorphiques enrichies localement ou régionalement en Cl_2 , CO_3 , SO_3 . Elles s'altèrent en mica, épidote, albite ou kaolin.

REFERENCES

1. « Roches et Minéraux », Chris Pellant, Éditions Bordas, ISBN 2-04-019781-8
2. « Handbook of rocks, minerals and gemstones », Walter Schumann, Editions Houghton Mifflin, ISBN 0-395-51137-2
3. « La grande encyclopédie des minéraux », Rudolf Dud'a et Lubos Rejl, Éditions Gründ, ISBN 2-7000-2500-8
4. « Roches et Minéraux », Nicolas Cipriani, Éditions Gründ, ISBN 2-7000-1907-5
5. « Roches et Minéraux », Michael O'Donoghue, Éditions Fontaine, ISBN 2-84270-019-8
6. « Minéraux », Pierre Bariand et Nelly Bariand, Édition Bordas, ISBN 2-04-019596-3
7. Site Alain Abréal : <http://perso.numericable.fr/~alabreal/index.htm>
8. Site de Jacques Deferne et Nora Engel : <http://www.kasuku.ch/pdf2.html>
9. Jacques Deferne. 2010. Extrait de «Ma première collection de minéraux»
10. Éléments de minéralogie Naftogaz. 2006
11. Jacques Deferne. 2010. La classification des minéraux
12. Madeleine Klingshirn Octobre 2011. Musée d'histoire naturelle de Fribourg
13. Bauer. J 1985. Guide des minéraux
14. Bernhad Pracejus 2008. The Ore Minerals under the Microscope. An Optical Guide
15. Claude Guillemin, Guy Aubert, Roland Pierrot. Précis de minéralogie. Edition Droz 1960. 224 pages.
16. Michel Demange. Les minéraux des roches (caractères optiques, composition chimique, gisement). Presse des Mines, 2009, 194 pages.