



كلية العلوم
FACULTÉ DES SCIENCES
DEPARTEMENT DE GEOLOGIE

Pr. Aissa MASROUR



جامعة مولاي إسماعيل
UNIVERSITÉ MOULAY ISMAÏL

Filière **STU** Session **VI**

Option

Minéraux industriels & Géologie des phosphates

MINERAUX INDUSTRIELS



MINÉRAUX INDUSTRIELS

INTRODUCTION

Les minéraux industriels se trouvent en concentrations variables dans divers types de roches.

Les minéraux industriels (quartz, talc, feldspath, argile, chaux, calcaire, dolomie, gypse, ...) sont des matières premières minérales naturelles indispensables à la fabrication des produits de la vie quotidienne (bâtiment, véhicule, informatique, médicaments, papier, peinture, plastique, verre, etc.).

DEFINITION

Le terme « minéral industriel » désigne généralement les roches ou les minéraux dont les propriétés physiques ou chimiques sont mises à contribution dans divers usages, produits ou procédés industriels.

Sont inclus dans les minéraux industriels :

- les pierres industrielles (calcaire, dolomie, marbre, silice)
- la plupart des minéraux non métalliques;
- certains minéraux métalliques (chromite, ilménite, magnétite, hématite) utilisés sous forme de composés chimiques;
- les argiles;
- les pierres gemmes;
- les saumures.

Sont exclus des minéraux industriels:

- la plupart des minéraux métalliques;
- les combustibles;
- les eaux minérales.

Applications industrielles :

- Il y a une grande variété de substances pour des applications très variées.
- Certaines substances peuvent se substituer à d'autres.
- La définition des paramètres « économiques » est souvent complexe.

- Certaines caractéristiques physiques (couleur, absorption, résistance, etc.) peuvent prendre beaucoup d'importance pour la définition économique du gisement.
- Plusieurs minéraux sont difficiles à identifier sur le terrain.
- Les schémas de classification/identification varient d'un pays à l'autre, du milieu géologique au milieu minier et selon leur mise en marché.

Il n'existe pas de consensus sur une classification universelle des minéraux industriels. Le critère peut être axé sur la ressource, son usage, son importance en volume ou sa valeur unitaire.

Considérations spécifiques

Les gîtes de minéraux industriels sont associés à des contextes ou à des environnements géologiques particuliers. Ceux-ci peuvent être mis en évidence lors de travaux de cartographie géologique ou de prospection. Des travaux d'**exploration** plus avancés tels les forages, les analyses chimiques et même les essais de concentration sont généralement nécessaires pour évaluer le potentiel d'un gisement.

L'exploitation des minéraux industriels fait souvent appel à des procédés d'exploitation et de traitement relativement complexes, ce qui influence grandement l'exploitabilité d'un gisement. Le marché est une autre contrainte importante dont il faut tenir compte. Pour certaines substances le marché est très morcelé, leur vente et leur distribution deviennent donc très complexes. Pour d'autres, le marché est contrôlé par une ou plusieurs entreprises importantes, ce qui laisse peu de place à de nouvelles exploitations. Pour certaines substances très abondantes, c'est la proximité des clients potentiels qui devient le critère le plus important.

Une maison contient jusqu'à 150 tonnes de minéraux, présents dans le ciment (argile, carbonate de calcium), le plâtre (gypse), le verre, la peinture, la céramique, les tuiles et briques (argiles),...

Une voiture contient jusqu'à 150 kilos de minéraux dans les pneumatiques (talc, carbonate de calcium), dans les composants plastiques (talc, carbonate de calcium, kaolin).

Le papier est constitué jusqu'à 50% de minéraux (carbonate de calcium, talc, kaolin, bentonite).

Les peintures sont composées de 50% de minéraux (carbonate de calcium, talc, silice, argile plastique, bentonite, mica).

Les produits céramiques (carrelage) sont constitués de 100% de minéraux (feldspath, argile, kaolin, talc, silice).

Le verre contient 100% de minéraux (silice, feldspath, borate, dolomie, chaux).

On trouve également des minéraux industriels dans d'autres domaines tels que l'aéronautique, le pharmaceutique, la cosmétique, l'électronique, les travaux publics, le traitement de l'eau, l'agriculture, les énergies renouvelables, etc.

On distingue 7 familles de minéraux industriels : **Les silicates, les carbonates, les sulfates, les sulfures, les halogénures, les argiles et les oxydes.**

I/ LES SILICATES

8 éléments chimiques à la base de la composition de la croûte continentale ; Oxygène, Silicium, Calcium, Aluminium, Fer, Sodium, Potassium, Magnésium. Les silicates constituent 95% en masse.

Composition moyenne de la Croûte continentale

Elément	% Poids
Oxygène (O)	46.6
Silicium (Si)	27.7
Aluminium (Al).....	8.1
Fer (Fe).....	5.0
Calcium (Ca).....	3.6
Sodium (Na).....	2.8
Potassium (K).....	2.6
Magnésium (Mg).....	2.1
Total	98.5

Les principaux minéraux silicatés

a) Minéraux silico-alumineux

Quartz	SiO_2
Feldspath K	KAlSi_3O_8 <i>orthose</i>
plagioclases	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
	<i>Albite</i> <i>Anorthite</i>
Muscovite (mica)	$\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$

b) Minéraux ferro-magnésiens

Biotite (mica)	$\text{K}(\text{Mg}, \text{Fe})_3 \text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
Amphiboles	$(\text{Mg}, \text{Fe}...)_5 \text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$
	$(\text{Ca}, \text{Na}...)_2$
Pyroxènes	$(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$ $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$
Olivines	$(\text{Mg}, \text{Fe})_2\text{SiO}_4$
Grenats	$\text{Mg}_3\text{Al}_2(\text{SiO}_4)_3$

❖ LES MINÉRAUX SILICO-ALUMINEUX

❖ Quartz SiO_2

Le quartz est le polymorphe de SiO_2 le plus répandu. Les autres polymorphes sont la tridymite, la cristobalite, la coesite et la stishovite ; ils forment la famille de la silice ; famille à laquelle on rattache l'opale.

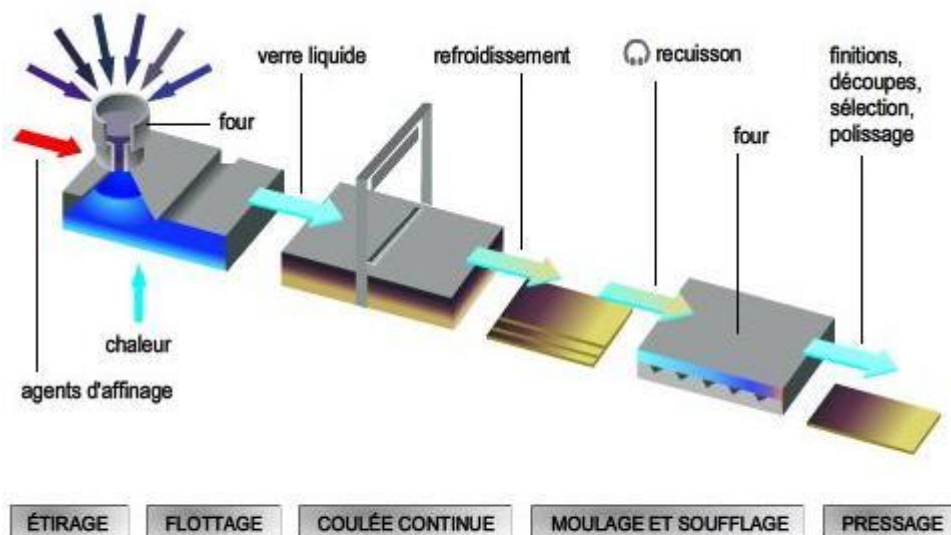
Utilisations

➤ *Peintures et plastiques, polymères, caoutchouc, mastics et colles:*

La silice cristalline, sous forme de quartz et de cristobalite, est utilisée à l'état le plus finement divisé comme charge de renforcement dans tous ces produits. La poudre de silice apporte une résistance à l'abrasion et à l'attaque chimique. Les revêtements autonettoyants pour murs extérieurs et les peintures de haute résistance pour des applications maritimes ou des installations off-shore en sont des exemples typiques. Les propriétés intrinsèques de la poudre de silice la rendent utile dans les plastiques d'enrobage de composants électroniques.

➤ *Céramiques:* Les produits de la vie quotidienne tels que la vaisselle, les sanitaires, les objets décoratifs, les carrelages, les céramiques à haute technologie contiennent de la poudre de silice finement broyée. Cette poudre est un constituant important des émaux céramiques mais également des briques réfractaires, des revêtements de creuset et des flux.

➤ *Verre:* La silice est le composant principal de presque tous les types de verres pour les récipients (bouteilles et pots), le verre plat (vitres, miroirs, pare-brise), la vaisselle



Procédé de fabrication du verre

(verres, récipients, carafes), le verre d'éclairage (ampoules, tubes fluorescents), les écrans de TV et d'ordinateurs (y compris les écrans plats), le verre de décoration, le verre optique, etc. Les fibres de verre, utilisées surtout pour renforcer les matériaux composites ou dans les tissus décoratifs sont fabriqués à partir de poudre finement broyée. Quant à la laine de verre, elle est utilisée pour l'isolation.

- **Pièces de fonderie:** La silice cristalline possède un point de fusion supérieur à celui du fer, du cuivre et de l'aluminium. Cette propriété permet de réaliser des pièces moulées par coulage de métal en fusion dans des moules constitués de sable de silice et d'un liant. Les pièces coulées sont utilisées dans les industries mécaniques et les industries de fabrication. Les poudres de quartz et de cristobalite sont les principaux composants utilisés en moulage de précision pour la réalisation de produits dans divers secteurs tels que la joaillerie, les prothèses dentaires, les turbines d'avions et les clubs de golf.
- **Filtration:** Le sable de silice préparé avec un faible écart granulométrique est utilisé comme filtre dans le traitement des eaux usées pour séparer les matières solides.
- **Produits de construction et matières premières:** Le sable et les poudres de silice sont les matériaux de base du secteur de la construction. Parmi les nombreuses applications on peut citer la fabrication du ciment, les enduits, les produits de ragréage, les blocs de silice et de béton cellulaire, les colles pour les revêtements de toiture et de sol, les mortiers pour la pose de carrelage et de gobetis, les marquages routiers, le carton bitumé et les systèmes d'injection de ciment et de résines.
- **Sports et loisirs :** Le sable de silice est utilisé pour les terrains d'équitation, ainsi que pour l'aménagement de champs de courses résistant aux conditions climatiques. Il est également utilisé pour la réalisation de couches d'enracinement et comme matériau de drainage pour les terrains de sports professionnels (football, rugby ...) et pour les terrains de golf.
- **Application dans l'exploitation pétrolière:** Le sable de silice à granularité élevée et à grains sphériques est injecté dans les puits de pétrole pour améliorer la perméabilité et la récupération du pétrole dans les champs pétrolifères.
- **Agriculture:** La silice est utilisée dans l'agriculture, les cultures maraîchères, l'horticulture et la sylviculture pour l'amendement des sols ou le mottage d'engrais, mais aussi comme additifs en alimentation animale.
- **Secteur chimique:** Le sable de cristobalite et le quartz de pureté élevée sont utilisés pour fabriquer des produits chimiques à base de silicium, comme le silicate de sodium, le gel de silice, les silicones, le tétrachlorure de silicium, les silanes et le silicium pur. Le silicium pur est utilisé pour les puces électroniques qui constituent le cœur de l'informatique. Les produits à base de silicium sont employés dans la production de détergents, de produits pharmaceutiques et de cosmétiques.
- **Industrie métallurgique:** Le quartz est utilisé comme matière première dans la production de silicium métal et de ferrosilicium. Le silicium métal sert à fabriquer des alliages à base d'aluminium, de cuivre et de nickel. Le ferrosilicium est l'un des composants des alliages de fer et d'acier.

Gîtes et gisements

Le quartz se présente rarement sous forme de monocristaux en quantité suffisante pour une exploitation industrielle (cas des filons plutoniques ou des géodes). La forme la plus commune se présente en petits cristaux dans divers types de roches ou dans les sables siliceux.

❖ **Feldspath potassique** $(K,Na)AlSi_3O_8$

Le feldspath potassique se subdivise en trois polymorphes, selon la température de formation. Les espèces de haute et moyenne températures (sanidine, orthose) cristallisent dans le système monoclinique tandis que celle de basse température (microcline) cristallise dans le système triclinique.

Microcline	$KAlSi_3O_8$	feldspath potassique qui se forme à basse température (pegmatite, filon hydrothermaux)
Orthose	$KAlSi_3O_8$	feldspath potassique qui se forme à température intermédiaire (roches ignées intrusives)
Sanidine	$(K,Na)AlSi_3O_8$	feldspath potassique qui se forme à haute température (phénocristaux dans une roche volcanique)

Utilisations

Les feldspaths, en raison de leur réaction à la cuisson (ils jouent le rôle de fondant) sont utilisés en céramique, en particulier pour la fabrication de carrelages. Ils entrent aussi dans la composition des verres plats ou creux utilisés pour l'emballage (bouteilles) ainsi que les fibres de verre (laine de verre) .et dans la faïence. Le marché destiné à l'industrie céramique est essentiel, de la fabrication des frites et des émaux, jusqu'à son introduction dans les pâtes céramiques pour les sanitaires et les porcelaines.

Ils sont aussi utilisés pour l'amendement des sols, en agriculture.

Gîtes et gisements

Le feldspath potassique est minéral commun dans les roches ignées, métamorphiques et sédimentaires détritiques. Le feldspath potassique est un minéral constituant de la plupart des roches intrusives felsiques ⁽¹⁾ comme le granite, la syénite, la granodiorite la rhyolite, la trachyte, et certains porphyres. Dans les roches sédimentaires, le feldspath potassique peut être abondant dans les arkoses.

(1) **felsiques** : riches en **feldspath** et **silice**

❖ **Plagioclase** $(\%NaAlSi_3O_8 \text{ et } \%CaAl_2Si_2O_8)$

Le plagioclase forme une série chimique continue entre un pôle sodique (albite) et un pôle calcique (anorthite). Le plagioclase est arbitrairement divisé en six espèces, d'après la proportion en albite et anorthite de la composition (avec les compositions chimiques respectives

$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

La tendance actuelle est de ne nommer le plagioclase que d'après sa proportion albite et anorthite (Ab0-100% - An100-0%), plutôt que d'après le nom.

Albite	Ab 90-100% - An 0%-10%	Feldspath commun dans les granites, rhyolites, syénites et trachytes ainsi que dans les pegmatites.
Oligoclase	Ab 70-90% - An 10% -30%	Feldspath commun dans les granodiorites et monzonites.
Andésine	Ab 50-70% - An 30% -50%	Feldspath commun dans les diorites, andésites et anorthosites.
Labradorite	Ab 30-50% - An 50% -70%	Feldspath commun dans les gabbros, basaltes et anorthosites.
Bytownite	Ab 10-30% - An 70% -90%	Feldspath moins commun, quelquefois présent en petits grains dans les gabbros.
Anorthite	Ab 0-10% - An 90% -100%	Feldspath rare, présent dans les roches volcaniques mafiques et dans certains marbres de métamorphisme de contact.

Utilisations

Similaires à celles des feldspaths potassiques

Gîtes et gisements

Le plagioclase est le minéral le plus abondant de la croûte terrestre, on trouve du plagioclase dans la plupart des roches ignées intrusives, extrusives et métamorphiques. Le

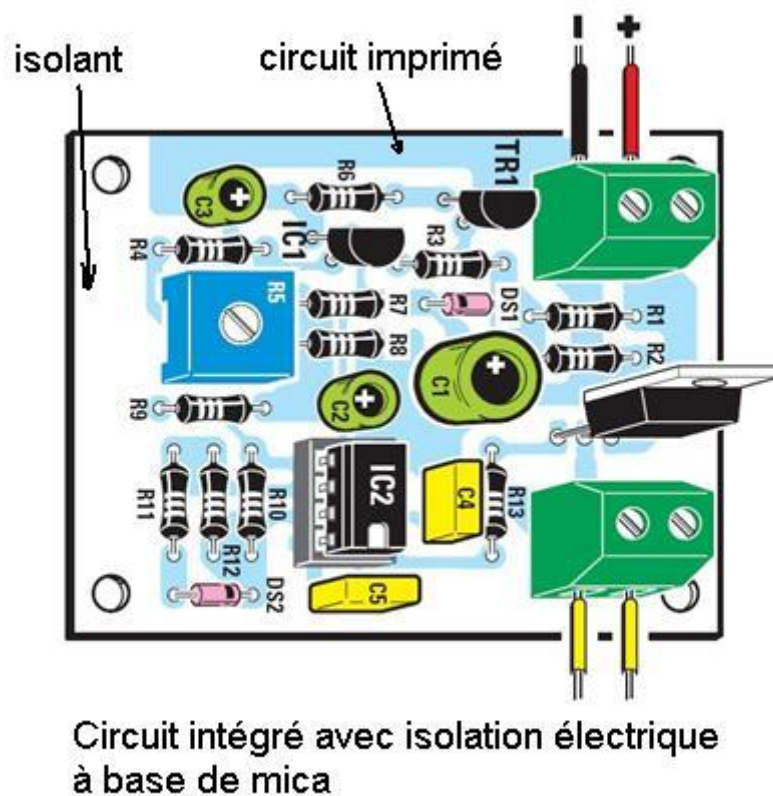
plagioclase est relativement moins abondant dans les sédiments et les roches sédimentaires à cause de sa faible résistance à la météorisation.

❖ Muscovite $\text{KA}_{12}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH},\text{F})_2$

La muscovite est un minéral du groupe des silicates (sous-groupe des phyllosilicates). C'est un silicate hydroxylé d'aluminium et de potassium. C'est le minéral le plus commun du groupe des micas.

Utilisations

La muscovite peut contenir du lithium, sodium, potassium, magnésium, aluminium, zinc, fer, vanadium et d'autres métaux. L'application industrielle est variable suivant les caractéristiques du mica : l'isolation électrique élevée, un meilleur transparent, une stabilité chimique plus élevée, meilleur réducteur.



Gîtes et gisements

La muscovite est un minéral abondant et communément constituant des roches ignées. La muscovite est un des minéraux caractéristiques des granites et des pegmatites granitiques.

La muscovite se forme également dans les roches métamorphiques et peut être le principal minéral dans certains schistes à mica. La séricite est une variété de muscovite qui se forme durant le métamorphisme rétrograde des feldspaths, topaze, kyanite, spodumène et andalousite.

LES MINÉRAUX FERRO-MAGNÉSIENS

❖ **Biotite** $K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Si_3AlO_{10})$

La biotite est un minéral, du groupe des silicates, sous-groupe des phyllosilicates de la famille des micas.

Utilisations

Similaires à celles de la muscovite.

Gîtes et gisements

La biotite est un des minéraux constituant des roches plutoniques (granites, diorites, syénites, surtout dans les familles intermédiaires calco-alkalines), des roches métamorphiques (schistes, gneiss et micaschistes), et plus rarement dans les roches volcaniques (rhyolites, dacites, trachytes, andésites). Son altération la transforme en chlorite.

Comme ce minéral est peu résistant à la météorisation, il n'est jamais présent en abondance dans les roches sédimentaires.

❖ **Amphiboles** $(Ca,Mg,Fe,Al,Na)_7 Si_8 O_{22} (OH)_2$

Les amphiboles sont des ferro-magnésiens (présence de Fe et Mg dans leur composition chimique) et leur couleur varie selon la composition chimique. Les amphiboles de teintes foncées sont associées à l'abondance de Fe tandis que celles de teintes claires sont associées à l'abondance de Mg. Les cristaux d'amphiboles sont généralement de forme allongée, prismatique ou aciculaire. Le groupe des amphiboles est le représentant des inosilicates à chaînes doubles.

Utilisations

Le nom d'amiante bleu est donné aux variétés fibreuses d'amphiboles. Les amphiboles fibreuses ont ainsi servi à la fabrication d'isolants thermiques ou de vêtements résistants au feu, à la protection de câbles électriques, au flocage protecteur de poutrelles métalliques.

On trouve l'amiante (forme non friable) incorporé dans des produits en ciment (amiante-ciment) ou dans des liants divers (colles, peintures, joints, mortiers à base de plâtre, béton bitumineux, matériaux de friction et même asphaltes routiers ou d'étanchéité...). Il a aussi été utilisé pour les patins de freins ou en garniture de chaudière ou fours électriques, ou encore dans diverses installations électriques (ex. : plaques chauffantes) pour ses capacités d'isolation électrique à forte température. Il a été massivement utilisé dans les bâtiments pour ses propriétés ignifuges, isolantes, sa flexibilité, sa résistance à la tension et parfois pour sa résistance aux produits chimiques.

Mais ce matériau est toxique. L'inhalation de fibres d'amiante est à l'origine de l'asbestose (fibrose pulmonaire) ; de cancers broncho-pulmonaires, ainsi que de cancers de la plèvre (mésothéliome) et de cancers des voies digestives. Les victimes de ces pathologies sont principalement les « travailleurs de l'amiante », mais aussi des personnes exposées de manière environnementale et souvent à leur insu. Bien que les dangers de l'amiante aient été identifiés clairement dès les années 1890, il faudra attendre près d'un siècle, soit les années 1980 et 1990, pour que l'utilisation de l'amiante soit interdite dans de nombreux pays, retard qui a été et sera encore la cause de la mort de dizaines de milliers de personnes. « *Toute intervention sur ces*



matériaux peut émettre des particules et poussières dangereuses » rappelle l'INRS. En France, bien qu'interdit depuis 1997, l'amiante est en 2010 selon l'INRS⁽¹⁾ « encore présent dans de nombreux bâtiments et équipements. Et le risque amiante reste sous-estimé dans certaines professions qui peuvent y être exposées. Or, les maladies liées à l'amiante représentent aujourd'hui la deuxième cause de maladies professionnelles et la première cause de décès liés au travail (hors accidents du travail) »

(1) L'Institut National de Recherche et de Sécurité

Gîtes et gisements

Très largement répandues dans la nature, elles sont généralement de couleur sombre, mais peuvent varier du blanc au noir. En général, ce sont des minéraux durs et lourds. Ils entrent

en partie dans la constitution des roches magmatiques et métamorphiques. Certaines roches appelées amphibolites sont constituées presque entièrement d'amphiboles.

❖ **Pyroxènes** $(\text{Ca,Na,Mg,Li})(\text{Mg,Fe,Ti,Al})(\text{Si,Al})_2\text{O}_6$

Les pyroxènes sont des ferro-magnésiens (présence de Fe et Mg dans leur composition chimique) et leur couleur varie selon la composition chimique. Les pyroxènes de teintes foncées sont associés à l'abondance de Fe dans la composition tandis que ceux de teintes claires sont associés à l'abondance de Mg. Les cristaux de pyroxènes sont généralement de forme prismatique plus ou moins trapu. Le groupe des pyroxènes est le représentant des inosilicates à chaînes simple.

Utilisations

Le pyroxène lithique (riche en oxyde et manganèse) ainsi que Les pyroxènes de type jadéitique (jade : $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$) sont appréciés dans l'art lapidaire (collection des pierres précieuses).

Gîtes et gisements

Ce sont des composants courants des roches ignées et métamorphiques

❖ **Olivine** $(\text{Mg,Fe})_2\text{SiO}_4$

L'olivine est un minéral du groupe des silicates, sous-groupe des nésosilicates (*=du grec nesos (île), car ils sont formés de tétraèdres $[\text{SiO}_4]$ isolés, non reliés entre eux*)

Série : Fe_2SiO_4 fayalite - Mg_2SiO_4 forstérite

Utilisations

L'olivine est utilisée comme additif dans la sidérurgie, où elle entre dans la préparation de l'aggloméré. Elle apporte de la magnésie au minerai de fer enfourné au haut fourneau, afin de servir de fondant et de contrôler les caractéristiques du laitier. La consommation d'olivine dépend essentiellement du procédé par haut fourneau.

La variété gemme (= *Pierre précieuse*) de la forstérite est utilisée comme pierre fine en joaillerie sous le nom de « péridot ».

Gîtes et gisements

L'olivine est un minéral constituant ou accessoire des roches ignées mafiques comme les gabbros, basaltes et péridotites, en association avec le plagioclase et le pyroxène. L'olivine peut également se former dans les roches métamorphiques comme le marbre.

Les olivines sont les premiers produits de cristallisation (magmas riches en fer et Mg et pauvres en silice).

Lors de l'altération olivine = serpentines (amiante blanche).

❖ Grenats $X_3Y_2(SiO_4)_3$

Les grenats sont des nésosilicates.

Les grenats sont formés de trois groupements silicate associés à des cations métalliques divalents et trivalents, de formule générale $X_3Y_2(SiO_4)_3$, où :

X est un élément de degré d'oxydation II (2 charges positives : cation X^{2+}),

Y est un élément de degré d'oxydation III (3 charges positives : cation Y^{3+}).

SERIE		UGRANDITE	PYRALSPITE		
Y=	X=	Ca^{2+}	Fe^{2+}	Mg^{2+}	Mn^{2+}
Al^{3+}	grenats alumineux	<i>grossulaire</i> $Ca_3Al_2Si_3O_{12}$	<i>almandin</i> $Fe_3Al_2Si_3O_{12}$	<i>Pyrope</i> $Mg_3Al_2Si_3O_{12}$	<i>spessartite</i> $Mn_3Al_2Si_3O_{12}$
Fe^{3+}	grenats ferrifères	<i>andradite</i> $Ca_3Fe^{3+}_2Si_3O_{12}$	—	—	<i>caldérite</i> $Mn_3Fe_2(SiO_4)_3$
Cr^{3+}	grenats chromifères	<i>uvarovite</i> $Ca_3Cr_2Si_3O_{12}$	—	—	—

Utilisations

- Comme géomatériaux, les grenats sont principalement utilisés :
 - comme abrasifs dans les industries du bois, du cuir et du plastique ;
 - pour le décapage par sablage ;
 - Pour la confection de papier abrasif,
 - Pour le surfaçage du verre ;
 - Pour la filtration.
- Les grenats magnétiques, étant des isolants par excellence, trouvent des applications dans le domaine des hyperfréquences (100 à 9 000 MHz), comme isolateurs, circulateurs, etc.
- Comme pierre fine semi-précieuse.

Gîtes et gisements

Les grenats sont les minéraux constituant de certaines roches métamorphiques et les minéraux accessoires de certaines roches ignées.

II/ LES CARBONATES

Le **carbonate** est, en chimie, un ion formé d'un atome de carbone et de trois atomes d'oxygène portant une double charge électrique négative (CO_3^{2-}), ou un composé chimique comprenant cet anion.

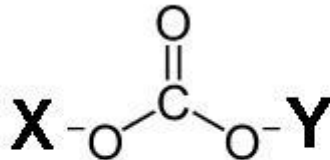


Schéma d'un carbonate

En fonction des cations divalents (Ca^{2+} , Fe^{2+} ...) combinées à l'ion carbonate, on distingue :

- ❖ **Groupe de la Calcite** : Calcite, Magnésite, Rhodochrosite, Sidérite, Smithsonite.
- Formules chimiques brutes : CaCO_3 , MgCO_3 , MnCO_3 , FeCO_3 , ZnCO_3 ,
- ❖ **Groupe de la Dolomie** : Ankérite, Dolomite.
- Formules chimiques brutes : $\text{Ca}(\text{Fe,Mg,Mn})(\text{CO}_3)_2$, $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
- ❖ **Groupe de l'Aragonite** : Aragonite, Cérusite, Strontianite, Withérite.
- Formules chimiques brutes : CaCO_3 , PbCO_3 , SrCO_3 , BaCO_3
- ❖ **Hydrocarbonates** : Aurichalcite, Azurite, Hydrozincite, Malachite
- Formules chimiques brutes : $(\text{Zn,Cu})_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$, $\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$, $\text{Zn}_5(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_6$, $\text{Cu}_2(\text{CO}_3)(\text{OH})_2$
- ❖ **Carbonates complexes** : Bastnaésite, Liébégitte, Phosgénite, Parisite, Synchronite...
- Formules chimiques brutes : $(\text{Ce,Lu})\text{CO}_3\text{F}$, $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, $\text{Ca}(\text{Ce,Lu})_2(\text{CO}_3)_3\text{F}_2$, $\text{Ca}(\text{Ce,Lu})(\text{CO}_3)_2\text{F}$

Utilisations

Les roches carbonatées à base de carbonate de calcium (CaCO_3) sont exploitées dans plusieurs applications industrielles, Bâtiment & Travaux Publics et utilisations agricoles. En plus des utilisations des roches dolomitiques (pierre à bâtir, pierre ornementale, fabrication de certains ciments), la dolomite est utilisée pour la fabrication de la magnésie, réfractaire très employé dans la métallurgie de l'acier. C'est enfin un minéral potentiel du magnésium. (**Voir TD**).

Gîtes et gisements

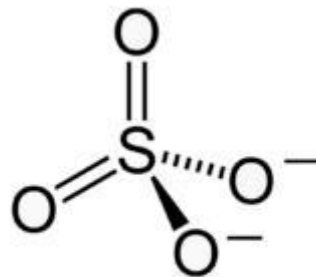
Roches sédimentaires.

Selon Arthur Holmes, les roches sédimentaires (3% de la lithosphère) se composent de:

- 70% d'argiles
- 16% de grès
- 14% de calcaires

III/ LES SULFATES (SO_4^{2-})

Les sulfates sont les sels de l'acide sulfurique H_2SO_4 . La formule de l'ion sulfate est SO_4^{2-} . Dans la nature, on compte plus de 200 espèces minéralogiques de sulfates.



ion sulfate

- Sulfate de potassium K_2SO_4
- Sulfate de sodium Na_2SO_4 , sel de Glauber ou Mirabilite
- Sulfate d'ammonium $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$
- Sulfate de magnésium MgSO_4 , communément appelé « sel anglais » ou « sel amer » ;
- Sulfate de calcium (Anhydrite) CaSO_4 ;
- Sulfate hydraté de calcium (gypse) $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Utilisations

- *Sulfate de potassium* : utilisé principalement comme engrais et marginalement comme additif alimentaire (régulateur d'acidité) ;
- *Sulfate de sodium* : fabrication des détergents et dans le traitement de la pâte à papier, industrie du verre, production d'acide chlorhydrique à partir de chlorure de sodium et d'acide sulfurique ($2 \text{NaCl} + \text{H}_2\text{SO}_4 \rightarrow \text{Na}_2\text{SO}_4 + 2 \text{HCl}$), dans l'industrie textile (en réduisant la quantité de charges négatives sur les fibres ce qui facilite la pénétration des teintures) ;
- *Sulfate d'ammonium* : utilisé comme engrais destiné à l'acidification des sols alcalins ;
- *Sulfate de magnésium* : En médecine, utilisé comme traitement des problèmes de peau, antidote, arythmie cardiaque, asthme, laxatif ou purgatif pour le soulagement de la constipation

occasionnelle, additif pour des bains minéralisés relaxants, problème de croissance des ongles, crampes etc. Le sulfate de magnésium fait partie de la liste des médicaments essentiels de l'Organisation mondiale de la santé (liste mise à jour en avril 2013). En industrie agroalimentaire, utilisé comme additif alimentaire. En cosmétique, le sulfate de magnésium hydraté est utilisé pour stabiliser les émulsions inverses. En agriculture, utilisé comme engrais pour l'apport du magnésium à la culture ;

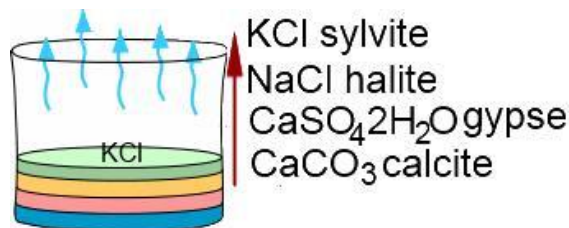
- *Sulfate de calcium (anhydrite)* : utilisations limitées : modificateur du sol, retardant du ciment Portland ;

- *Sulfate hydraté de calcium (gypse)* : fabrication du plâtre.

Gîtes et gisements

De nombreux sulfates sont des constituants habituels de séries continentales ou marines particulières, correspondant à des bassins endoréiques ou à des mers épicontinentales des zones climatiques arides. Dans les séquences d'« évaporites », les sulfates apparaissent avant les dépôts de sel gemme.

V/ LES HALOGENURES



Ordre de précipitation
des évaporites

Ce sont des minéraux renfermant des halogènes tels que le fluor (F), le chlore (Cl).

- **Fluorine** (Fluorure de calcium) : CaF_2 ,
- **Sel gemme** ou **halite** (Chlorure de sodium) : NaCl

Utilisations

- **Fluorine** : Le fluorure est utilisé comme fondant par les fabricants d'acier, dans la fabrication de la fibre de verre et du verre opale et surtout pour la production d'acide fluorhydrique et de produits fluorés dérivés, dont le fluorure d'aluminium, à partir duquel s'obtient l'aluminium métal. La fluorine est également utilisée dans l'optique instrumentale, les propriétés de ce solide cristallin étant meilleures que celles des verres connus, notamment dans sa puissance de transmission, de réfraction et de dispersion chromatique.

L'acide fluorhydrique (HF) a la propriété unique de pouvoir dissoudre presque tous les oxydes inorganiques. Il est de fait utilisé pour attaquer le verre, pour éliminer les oxydes de surface du silicium dans l'industrie des semi-conducteurs.

Des fluorures sont ajoutés au sel et aux dentifrices, ou parfois dans certaines sources d'eau ou dans certains aliments pour lutter contre les caries dentaires ;

- **Sel gemme ou halite :**

- ✓ dans l'industrie alimentaire, comme conservateur (notamment pour la conservation de la viande) ou condiment (sel alimentaire) ;
- ✓ la halite est le principal constituant du sel employé pour le salage des routes ;
- ✓ important minéral pour les sous produits extraits : potasse, magnésium, chlore, brome, iode ;
- ✓ minierai d'extraction de la soude et de l'acide chlorhydrique

Gîtes et gisements

- **Fluorine** : minéral commun et particulièrement abondant dans les veines hydrothermales où il fait office de gangue pour des minéralisations de plomb et d'argent. la fluorine peut se former dans les roches sédimentaires carbonatées (calcaire et dolomie). La fluorine est un minéral accessoire mineur dans certaines roches ignées ;
- **Sel gemme (halite)** : L'halite est un composant de nombreuses roches évaporitiques, provenant de l'évaporation de lacs ou mers salées.

VI/ LES ARGILES

Les argiles ont été utilisées très tôt dans l'histoire de l'humanité, après le silex et la pierre taillée. Ce matériau possède des propriétés plastiques particulières : facilement modelable, il peut être figé de façon irréversible, ce qui a permis les premières applications domestiques (vases, plats, etc.) et culturelles (statuettes, supports d'écriture...). Depuis lors, les applications industrielles et domestiques n'ont cessé de se développer.

Les minéraux argileux, de taille nanométrique à micrométrique, sont invisibles à l'œil et à la loupe. Ils ne peuvent être observés que par diffraction des rayons X, microscopie électronique et microanalyse chimique, spectrométrie infrarouge ou par d'autres méthodes plus spécifiques. Les argiles sont souvent associées à la fraction inférieure à 2 micromètres (0,002 mm) ou à 4 micromètres (0,004 mm) dans la classification des roches sédimentaires. Les minéraux contenus dans les roches argileuses sont majoritairement des phyllosilicates (silicates hydratés lamellaires ou fibreux).

Selon le nombre de couches octaédriques (O) et tétraédriques (T), on distingue trois principaux types de minéraux:

type	groupe	Sous-groupe	espèces	formules
------	--------	-------------	---------	----------

1 : 1 (T-O)	kaolinite	kaolinites	Dichite Nocrite Kaolinite mètahalloysitehalloysite	$\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
		serpentine	antigorite	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$
	talc	pyrophyllite	pyrophyllite	$\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		talc	talc	$\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	smectite	Smectites dioctaédriques	montmorillonite	$(\text{Al}_{1,67}\text{Mg}_{0,33})\text{SiO}_{10}(\text{OH})_2$
		Smectites trioctaédriques	saponite	$\text{Mg}_3(\text{Si}_{3,67}\text{Al}_{0,33})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
2 : 1 (T-O-T)	vermiculites	Vermiculite dioctaédrique	Vermiculite dioctaédrique	$(\text{Al}, \text{Fe} \dots)_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		vermiculite trioctaédrique	vermiculite	$(\text{Mg}, \text{Fe} \dots)_2(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
	micas	micas dioctaédrique	muscovite	$\text{KAl}_2(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		micas trioctaédrique	phlogopite	$\text{KMg}_3(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH})_2$
		chlorite	sudoite	$(\text{Al}_4\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
2:1:1 (T-O-T-O)	chlorite	chlorite trioctaédrique	Espèces différentes	$(\text{Mg}, \text{Al}, \text{Fe})_6(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$

Utilisations

➤ Argiles et ressources énergétiques

L'exploitation d'énergies fossiles – le pétrole, le gaz, l'uranium... – fait intervenir les argiles de l'amont du cycle, lors de la prospection et de l'exploration jusqu'à l'aval du cycle pour la réhabilitation des sites et/ou le stockage. Elles interviennent également lors de l'exploitation géothermique du sous-sol, le traitement des effluents de l'industrie chimique, le stockage du dioxyde de carbone (CO_2), de l'hydrogène sulfuré (H_2S) et, plus généralement, la protection de l'environnement. Ces argiles contrôlent en partie les propriétés pétrophysiques des roches, la porosité et la perméabilité.

➤ Argiles et matériaux de construction

Tuiles et briques : des argiles « métamorphisées » (métamorphisme thermique)

- ☐ briques et tuiles : chauffage vers 900 °C
- ☐ carrelages, grès (argiles communes)
- ☐ faïences (kaolin) etc. : argiles communes + potasse = on refait des feldspaths potassiques (KAlSi_3O_8) par cuisson en quelques heures.

➤ Argiles et bio-disponibilité des métaux lourds

Les argiles jouent un rôle dans le piégeage biologique des métaux lourds toxiques. En particulier elle réduisent les effets toxiques pour différents métaux (Cd, Pb, Hg, Cu, Ni, Zn), les expériences démontrent l'habileté de différentes argiles à protéger les bactéries dans les sols ou champignons des effets toxiques des Ni, Cd, Zn, et Pb.

➤ *Argiles et diverses applications*

La **kaolinite** (argile blanche) est une roche argileuse servant de matière première dans la fabrication de céramiques et de produits réfractaires (briques, ciments).

La kaolinite est utilisée également comme charge minérale dans la fabrication du papier, plastique et peinture.

Sur le plan thérapeutique, on utilise la kaolinite sous forme de lait d'argile en pansement protecteur de la muqueuse gastrique et intestinale du fait de son fort pouvoir couvrant. La kaolinite possède également un pouvoir neutralisant et régularisant sur les acides et les alcalins (maintiens du pH). Son bon pouvoir d'adsorption des gaz et des toxines est intéressant pour les ballonnements et les intoxications alimentaires. Elle a, de plus, une action antibactérienne sur certaines formes de microbes pathogènes. Elle accélère la cicatrisation de la muqueuse irritée et a une action anti-inflammatoire.

La **montmorillonite** (argile verte), très riche en magnésie (10 %), est utilisée comme désintoxicante, absorbante, reminéralisante, agit en symbiose en particulier avec les essences de plantes.

La **bentonite** est une argile à forte prédominance Montmorillonite et Siallite. Elle est utilisée en fonderie comme matériau constituant de sables synthétiques, comme boues de forages pétroliers, pour le collage d'huiles et de graisses animales et végétales, comme support de médicaments et de cosmétiques où elle remplace avantageusement la lanoline et la vaseline et favorise la pénétration des principes médicamenteux ou cosmétiques à travers la peau. On l'ajoute également dans certains savons dans lesquels elle améliore l'émulsion et le pouvoir moussant.

L'**attapulгите** est argile très utilisée en médecine depuis plus de 20 ans avec de très bons résultats. C'est une argile fibreuse à fort pouvoir adsorbant qui lui donne toutes ses qualités médicales. Elle est utilisée couramment comme pansement gastrique et pour éliminer diverses toxines et poisons intestinaux.

L'attapulгите a le pouvoir de stopper les hémorragies lors d'ulcérations, colites, hyperacidité, crampes gastriques. On la prend sous forme de lait d'argile, mélangé à de l'eau.

Elle est aussi utilisée largement dans l'industrie pour décolorer et filtrer les huiles pétrolières, pour fabriquer des litières pour animaux, chats, chinchillas, etc.

C'est aussi un adjuvant de base dans la fabrication des adhésifs, mastics, épurateurs d'eau.

Gîtes et gisements

Roches sédimentaires.

Selon Arthur Holmes, les roches sédimentaires (3% de la lithosphère) se composent de:

- 70% d'argiles
- 16% de grès
- 14% de calcaires

eBibliographie / Bibliographie

- ✓ <http://www.beautiful-stones.fr/>
- ✓ <http://www.groupe.polymtl.ca/glq1100/mineraux/identification.html>
- ✓ <http://fr.wikipedia.org/wiki/>
- ✓ <http://www.universalis.fr/encyclopedie>
- ✓ <http://www.geowiki.fr/>
- ✓ http://www.geowiki.fr/index.php?title=Classification_Chimique_des_min%C3%A9raux
- ✓ <http://www.fdim.ma/upl/exposes/RMI.ONHYM.pdf>
- ✓ The age of the earth (Arthur Holmes) : <https://archive.org/details/ageofearth00holmuoft>
- ✓ <http://www.lesafriques.com/produits-de-base/inventaire-des-gisements-des-matieres-premieres-du-m-2.html?Itemid=308?articleid=18033>
- ✓ <http://encyclopedie-dd.org/encyclopedie/territoires/3-2-les-ressources-minerales/ressources-minerales-et.html>
- ❖ Classification des minéraux: <http://pgosse.chez.com/gem/chim.htm>
- ❖ Roches et minéraux industriels du Maroc, *Ministère de l'énergie et des mines*, Maroc 1981.