

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique



Ecole Normale Supérieure (ENS)
d'Abidjan

REPUBLIQUE DE COTE D'IVOIRE



Union-Discipline-Travail

COURS DE PREPARATION GEOLOGIE

Sciences de la Vie et de la Terre (SVT)

Session 2025

Aspirants

- CAP/PC SVT
- CAP/PL SVT

MINERALOGIE

GENERALITE ET DEFINITION

La minéralogie est la science qui s'intéresse à l'étude et à la description des minéraux sous leur aspect macroscopique. Les minéraux sont des corps solides inorganiques naturels possédant une composition chimique définie. Ils peuvent se rencontrer dans la nature sous deux états physiques opposés de leur matière : l'état cristallin et l'état amorphe.

L'état amorphe décrit l'absence de régularité des molécules qui forment le minéral. Dans cet état, toutes les propriétés sont les mêmes en n'importe quel point du minéral (exemple le verre). Le minéral amorphe est dit isotrope.

Dans l'état cristallin par contre, les molécules qui forment le minéral présentent un arrangement ordonné et régulier. Ici, la matière cristalline présente des propriétés variables. Certaines de ces propriétés varient d'une manière continue avec la direction (lumière, conduction calorifique, etc.), d'autres propriétés varient d'une façon discontinue (clivage). De tels minéraux sont dits anisotropes.

I. ORIGINE OU FORMATION DES MINERAUX

Les principaux processus qui conduisent à la formation de minéraux sont les suivants :

- La cristallisation d'un liquide qui, par refroidissement, passe de l'état liquide à solide : le passage de l'eau à la glace, la cristallisation par refroidissement d'un magma ;
- La précipitation chimique à partir d'une solution sursaturée par rapport à un minéral. C'est le cas de la formation des agates, la formation des dépôts de cavernes (spéléothèmes), la formation des minéraux de la séquence évaporitique ;
- La cristallisation de vapeurs : la cristallisation du soufre autour des fumerolles sur les volcans (émanations de gaz riches en H_2S provenant de la chambre magmatique) ;
- Sécrétion par la matière vivante (coquille en calcite des mollusques) ;
- Transformation (recristallisation) de minéraux existants en formes cristallines différentes de l'original.

I-1. Cristallisation par refroidissement d'un magma

La matière peut exister sous trois états : solide, liquide ou gazeux. La température et la pression sont les deux principaux facteurs qui règlent l'état sous lequel elle se trouve. Le diagramme de phases de l'eau (figure 1) illustre de façon simple les relations entre états de la matière et température-pression.

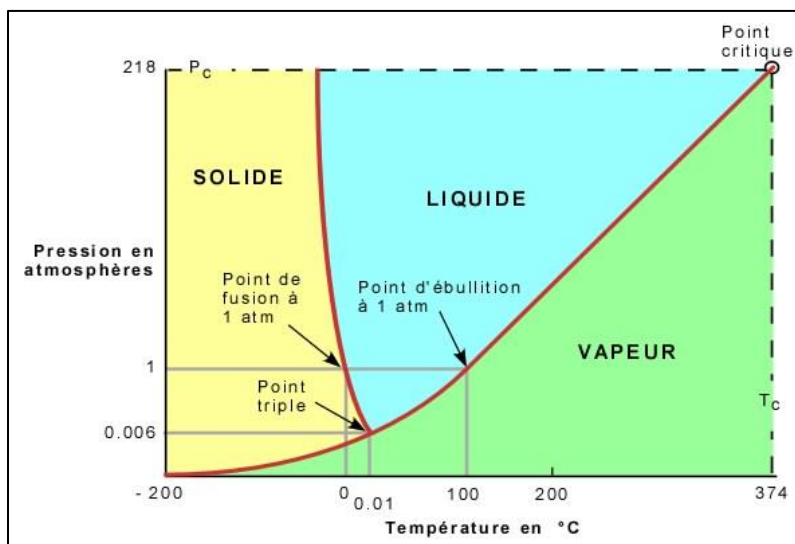


Figure 1 : Diagramme de phases de l'eau

D'après ce diagramme, en fonction des conditions de température et de pression, l'eau peut exister sous trois états : l'état solide, l'état liquide ou l'état gazeux (vapeur). A pression ambiante (1 atm), il ne y avoir de l'eau liquide chaude de plus de 100°C. Cela n'est possible qu'à une pression plus élevée. Tout au long des courbes solide-liquide et liquide-vapeur, les deux phases sont en équilibre. Au point triple, les trois phases sont en équilibre. Dépassé le point critique, défini par la température critique (T_c) et la pression critique (P_c), les phases liquide et gazeuse ne peuvent plus être distinguées.

De tels diagrammes, construits pour plusieurs minéraux, sont très utiles pour connaître l'état de ces minéraux sous des températures et pressions variables.

C'est le cas à l'intérieur de la croûte terrestre ou du manteau. Ainsi, chaque minéral possède son point de fusion (passage du solide au liquide) qui correspond aussi à son point de cristallisation (passage du liquide au solide) à une pression donnée.

Plusieurs minéraux de la croûte terrestre cristallisent à partir d'un magma (roche fondue). Cette cristallisation obéit à certaines règles.

Dans un magma dont la température est supérieure à 1200°C, comme au niveau du manteau supérieur, les minéraux sont tous sous leur phase liquide. Si ce magma est introduit dans la croûte terrestre, il subit un abaissement de pression et se refroidit progressivement. En supposant que la pression est maintenue constante (à un niveau constant dans la croûte), les minéraux cristallisent lorsqu'ils atteignent la température correspondant à leur limite solide-liquide (température de cristallisation). Comme cette limite n'est pas identique pour tous les minéraux, ceux-ci ne cristallisent pas tous en même temps. Ils cristallisent

au fur et à mesure qu'ils atteignent individuellement leur température de cristallisation au cours du refroidissement du magma (figure 2).

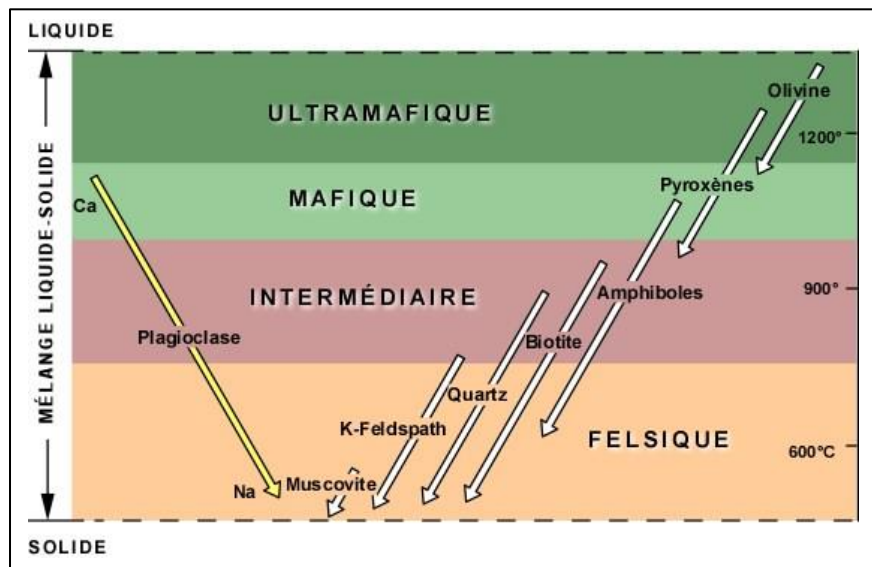


Figure 2 : Diagramme de cristallisation des minéraux en fonction de la température

Avec un abaissement de la température du magma, les minéraux dont la température de cristallisation est la plus élevée sont les premiers à cristalliser. Le premier est l'olivine. Le second groupe à se former comprend les pyroxènes. A ce stade, le magma aura épuisé son bagage en olivine. Puis avec la cristallisation des amphiboles, puis de la biotite, le bagage en pyroxènes est épuisé. Avec l'abaissement progressif de la température, suivent le quartz, les feldspaths potassiques et la muscovite. C'est donc une suite de cristallisation bien définie, contrôlée par la température. Cette suite de cristallisation est qualifiée de **suite discontinue**, parce qu'il s'agit dans chaque cas de minéraux distincts qui se forment (composition et structure cristalline distinctes).

Dans ce diagramme, il y a aussi une suite continue, celle des feldspaths plagioclases. C'est une suite continue, parce que la seule variable significative est la proportion de calcium par rapport au sodium. A l'extrémité "chaude", se trouve le plagioclase calcique ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$, anorthite) et à l'extrémité "froide", le plagioclase sodique ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$, albite).

Cette suite de cristallisation a été établie par Normand Bowen en 1928. Elle demeure valide dans ses grandes lignes, mais dans le détail, il y a des variations selon les conditions locales.

Au fur et à mesure que les minéraux cristallisent dans la chambre magmatique (poche où s'est introduit le magma), les cristaux sédimentent, s'accumulent à la base de la chambre. Il se produit ainsi une ségrégation minérale. Les roches issues de la cristallisation du magma, appelées roches

ignées, auront des assemblages de minéraux différents en fonction du lieu de la chambre magmatique où elles se forment (à la base, au milieu ou au sommet de cette chambre). Ainsi, le premier assemblage à se former est un assemblage d'olivine et de pyroxènes : c'est l'assemblage ultramafique (ultrabasique). Ensuite, il y a un assemblage de pyroxènes et d'amphiboles : c'est l'assemblage mafique (basique). Un assemblage d'amphiboles, biotite et quartz est qualifié d'assemblage intermédiaire (neutre), tandis qu'un assemblage des minéraux les plus "froids", est qualifié de felsique (acide).

I-2. Formation des dépôts de cavernes

Des dépôts spectaculaires comme les stalactites et les stalagmites des cavernes se forment à partir d'une solution riche en sels minéraux. Cela fait suite à un dégazage important que subit cette solution lorsqu'elle atteint les parois internes des cavernes. Ces dernières sont creusées dans des terrains calcaires sous l'effet d'une dissolution à grande échelle par les eaux de pluies naturellement acides. En effet, en s'infiltrant dans les fractures, ces eaux d'infiltration, fort de leur acidité acquise, agrandissent les fractures progressivement pour créer un réseau de cavernes et de galeries souterraines. Les stalactites et les stalagmites, et d'autres formes de dépôts tels que les boucliers, les draperies, se forment par précipitation sur les murs et le plancher de la caverne à partir de l'eau qui ruisselle. Ils sont composés de calcite et rarement d'aragonite (forme métastable du CaCO_3) (figure 3).

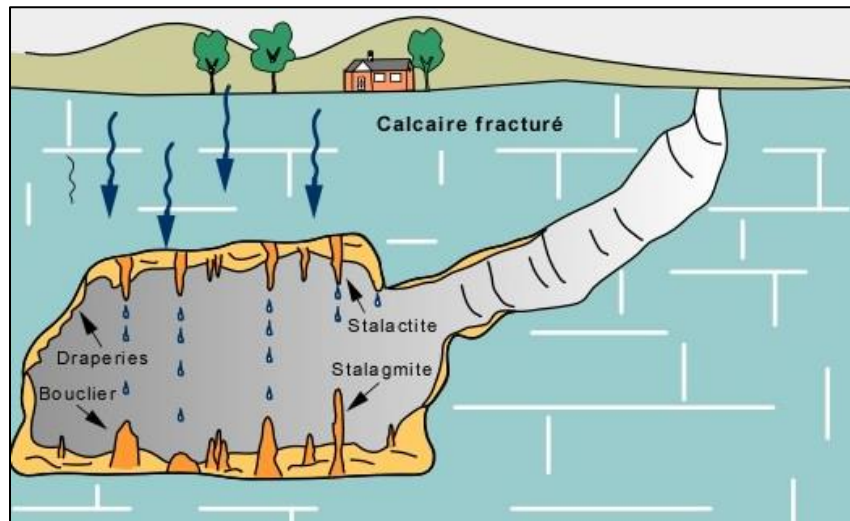


Figure 3 : Illustration des dépôts de cavernes

L'eau infiltré à travers les fractures du calcaire depuis la surface, est une solution qui contient du CO_2 et en de moindres proportions des ions calcium (Ca^{2+}) et des radicaux HCO_3^{2-} acquis de la

dissolution des calcaires. Dans les roches juste au-dessus de la caverne, la pression du CO₂ contenu dans la solution se trouve à plusieurs atmosphères, à cause du poids de la roche (pression lithostatique dans les calcaires : 2,7 atm/10 m ou 270 atm/km). Lorsque la solution arrive aux parois de la caverne, sa pression passe subitement de plusieurs atmosphères à 1 atm car la pression dans la caverne est à peu près la même que celle de la surface de la terre parce que la caverne communique avec la surface. Cela fait suite au dégazage du CO₂.

L'expression chimique de ce processus est décrite par l'équation suivante :



La variable la plus mobile dans cette équation est le CO₂ (gaz). La perte subite de pression fait que la solution dégage du CO₂. Ce dégazage de la solution force un rééquilibrage chimique :

- la réaction se fait de la gauche vers la droite ;
- la calcite (CaCO₃) précipite au toit de la caverne pour donner les stalactites et les draperies ;
- la calcite précipite également sur les murs et le plancher de la caverne pour former les stalagmites et les boucliers.

I-3. Minéraux de la séquence évaporitique

Plusieurs cristaux se forment à partir de solutions sursaturées en certains éléments chimiques. Il s'agit d'une solution contenant plus de sels qu'elle ne peut en dissoudre. Les cristaux précipitent à partir de la solution selon divers processus. L'évaporation est l'un de ces processus. La suite de minéraux qui précipitent quand s'évapore de l'eau de mer en est un exemple très expressif.

L'eau de mer contient une panoplie importante d'ions en solution (figure 4), en occurrence :

- des cations tels le calcium (Ca²⁺), le sodium (Na⁺) et le potassium (K⁺) ;
- des anions tels le chlore (Cl⁻) ;
- et des radicaux négatifs comme CO₃²⁻ (ion carbonate) et SO₄²⁻ (ion sulfate).

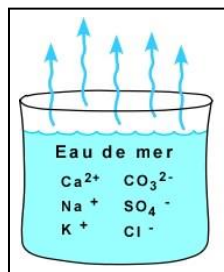


Figure 4 : Composition de la solution saline d'eau de mer

L'évaporation consistant en la disparition de l'eau, au fur et à mesure qu'elle s'intensifie, la solution devient de plus en plus saline, c'est-à-dire que les sels se concentrent de plus en plus.

L'eau de mer normale a une salinité de l'ordre de 35 ppm. A cette salinité, elle est légèrement sursaturée par rapport au carbonate de calcium (CaCO_3 : calcite, aragonite). Ce dernier précipite naturellement et dépose une couche de cristaux de CaCO_3 au fond du bocal (figure 5).

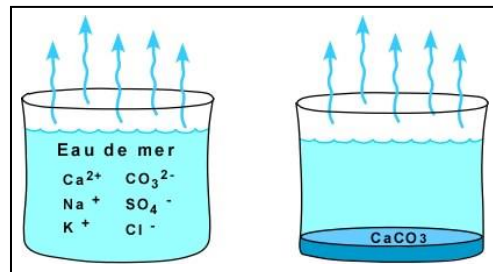


Figure 5 : Dépôt du carbonate de calcium

Au fur et à mesure que l'évaporation se poursuit, la salinité augmente et la solution devient sursaturée par rapport à un autre sel, le CaSO_4 hydraté appelé gypse (figure 6). A ce stade, la solution est dite péné saline ou le milieu péné salin. Le gypse précipite.

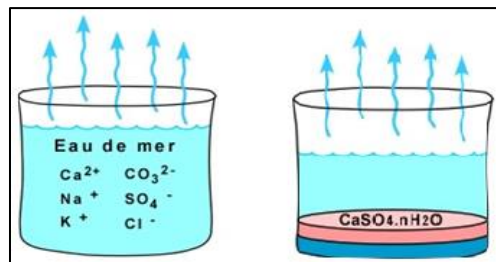


Figure 6 : Dépôt du gypse

Avec encore une augmentation de la salinité, vient la phase de précipitation du chlorure de sodium, NaCl (la halite ou sel commun) (figure 7). La solution (le milieu) est dite saline.

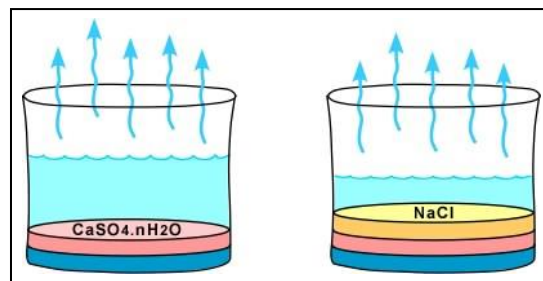


Figure 7 : Dépôt de la halite ou sel de cuisine (chlorure de sodium)

Le dernier dépôt qui se produit à l'évaporation totale de l'eau de mer est celui du chlorure de potassium, KCl (sylvite, communément appelée potasse). A ce stade, la solution (le milieu) est hypersaline (figure 8).

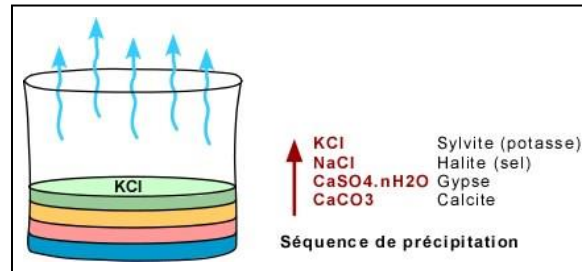


Figure 8 : Dépôt du chlorure de potassium

Une suite bien spécifique de minéraux précipités est obtenue au fur et à mesure que l'eau de mer s'évapore. C'est la **suite évaporitique** appelé plus communément les évaporites. Au moins trois de ces minéraux interviennent dans les activités humaines, en occurrence :

- le gypse, utilisé pour la fabrication des panneaux de gypse ;
- le sel de table, utilisé dans l'alimentation de l'homme ;
- la potasse, utilisé dans la fabrication des fertilisants.

Dans la nature, la précipitation des minéraux évaporitiques se fait dans les grandes lagunes en bordure de mer. Ces lagunes mesurent plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres carrés, dans des régions où l'évaporation excède la précipitation (figure 9).

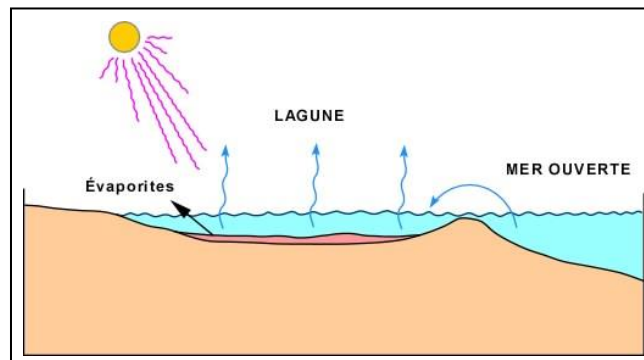


Figure 9 : Précipitation naturelle des minéraux évaporitiques

Le grand apport en eau de ces lagunes vient de la mer. L'évaporation de l'eau à la surface de ces lagunes, entraîne la concentration de la solution. Les minéraux évaporitiques s'accumulent alors au plancher de la lagune. Pour une région donnée, une sorte d'équilibre entre l'alimentation de la lagune en eau de mer et l'évaporation s'établit. Cela fait que la salinité de l'eau demeurera à peu près constante. En fonction de cette salinité, l'un ou l'autre des minéraux de la séquence évaporitique

précipite. Le plus souvent, ce précipité oscille entre la calcite et le gypse. Il atteint plus rarement la halite ou sel de cuisine et encore moins la potasse.

Dans une variante du système évaporitique, les minéraux cristallisent et croissent à l'intérieur du sédiment. Il s'agit de grandes plaines en bordure de mer qui s'étendent sur des centaines de kilomètres carrés, mais dont la surface est à peine de quelques mètres au-dessus du niveau marin. C'est la SEBKHA (figure 10).

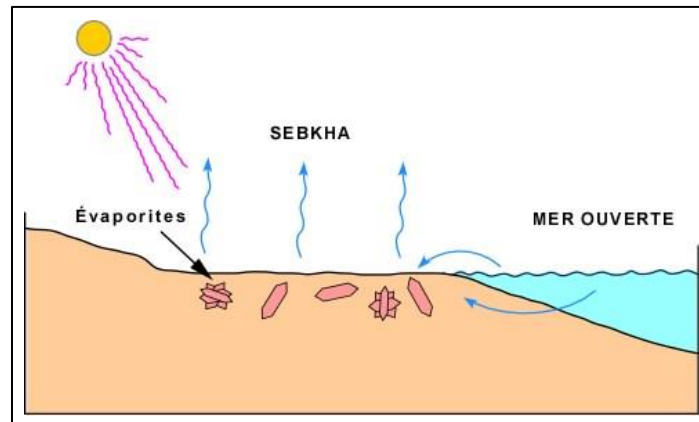


Figure 10 : Minéraux évaporitiques formés naturellement dans les sédiments en bordure de mer

Le sous-sol de ces grandes plaines est alimenté principalement par l'eau de mer. L'évaporation qui se fait à la surface de la plaine augmente la salinité des eaux souterraines qui précipitent alors les minéraux évaporitiques. Le plus souvent, le système se stabilise au gypse, avec parfois des cristaux de sel. Les minéraux cristallisent et croissent à l'intérieur du sédiment. La sebkha ne se développe pas exclusivement en bordure de mer, mais partout où des eaux salines peuvent se concentrer dans la nappe phréatique et s'évaporer.

I-4. Formation des agates

L'agate est une variété cryptocristalline¹ de quartz. Elle se forme généralement par dépôt de silice à partir d'eau souterraine dans les cavités des roches magmatiques. Elle se dépose en cercle concentrique autour des parois de la cavité ou en couches horizontales qui se forment à partir du fond de la cavité (figure 11).



Figure 11 : Une agate

¹ Cristaux de taille très petite, à peine visibles au microscope par lumière polarisée

Des fluides divers et des solutions circulent très lentement dans les roches et fractures à très grandes profondeurs (plusieurs kilomètres) dans la croûte terrestre. Ils peuvent provenir des zones chaudes du manteau. Ils sont constitués de l'excès de vapeur d'eau d'un magma ou de l'eau piégée dans les bassins sédimentaires profonds.

Quand ces solutions sont sursaturées par rapport à certains sels ou minéraux, elles précipitent pour donner des agates.

Les géodes ou les agates ont été formées par la précipitation de minéraux dans une cavité de la roche, à partir d'une solution. Par exemple, le quartz (SiO_2) des agates a été précipité à partir de fluides sursaturés par rapport à la silice et circulant dans les formations rocheuses. S'il y a dans ces formations rocheuses des cavités, comme c'est souvent le cas dans des roches volcaniques, le quartz va précipiter sur les parois de la cavité pour former une première couche de cristaux (figure 12).

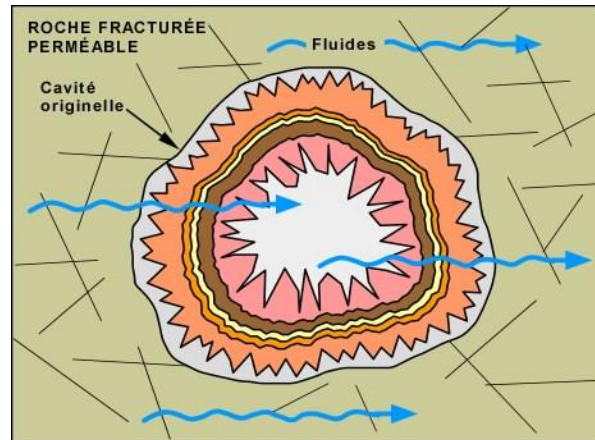


Figure 12 : Illustration de la formation des agates

A ce stade, une géode est formée. C'est une cavité tapissée de cristaux. Avec le temps et la poursuite de la circulation des fluides sursaturés en silice, d'autres couches vont successivement se former. Leur composition peut varier avec des variations dans la composition des fluides. C'est ce qui produit souvent des différences de couleurs entre les diverses couches d'une agate. Certaines agates montrent une cavité centrale simplement parce que les processus de précipitation n'ont pas été complétés jusqu'au remplissage total de la cavité.

II. IDENTIFICATION DES MINÉRAUX

Les minéraux possèdent des propriétés physiques permettant de les distinguer. Ces dernières constituent des critères d'identification. Certaines peuvent être observées sans l'aide d'instrument,

c'est-à-dire, à l'œil nu. Il s'agit en occurrence de : la couleur, l'éclat, le trait, la dureté, la densité, la forme cristalline, le clivage, l'effervescence et les propriétés optiques.

II-1. Couleur

Il y a une grande variété de couleurs de minéraux. Ce critère est loin d'être absolu. Des spécimens de couleurs différentes peuvent représenter le même minéral. C'est l'exemple du quartz qui présente plusieurs variétés selon la couleur :

- l'incolore limpide (cristal de roche) ;
- le violet (améthyste) ;
- le rouge (jaspe) ;
- le noir enfumé ;
- le bleu, etc.

De même, des spécimens ayant la même couleur, peuvent représenter des minéraux différents. C'est le cas des minéraux à éclat métallique de la couleur or (la pyrite ou l'or des fous, la chalcopryrite, les minerais duquel le cuivre est extrait, ... et l'or). La couleur d'un minéral est observée sur une cassure fraîche, car l'altération superficielle peut modifier la couleur, particulièrement chez les minéraux à éclat métallique.

II-2. Éclat

L'éclat des minéraux est l'aspect qu'offre leur surface lorsqu'elle réfléchit la lumière. Il existe deux grandes catégories d'éclat : l'éclat métallique et l'éclat métallique non métallique.

- L'éclat métallique est un éclat brillant comme celui des métaux ;
- L'éclat non métallique est décrit par des termes tel que : vitreux (comme le verre), gras (comme si la surface était enduite d'huile ou de graisse), adamantin (qui réfléchit la lumière comme le diamant), résineux (comme la résine), soyeux (comme la soie), etc.

II-3. Trait

Le trait correspond à la couleur de la poudre des minéraux. Il se détermine sur la trace laissée par le minéral lorsqu'il est frotté sur une plaque de porcelaine non émaillée. Par exemple, l'hématite, minéral duquel est 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.

II-4. 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 (le diamant), d'autre plutôt tendres (le talc). Les minéralogistes ont une échelle relative de dureté qui utilise dix minéraux communs, classés du plus tendre au plus dur, de 1 à 10. Cette échelle, construite par le minéralogiste autrichien Friedrich Mohs, est appelée "**échelle de Mohs**" (figure 13).

DURETÉ		
Rayés par l'ongle	1	Talc
Rayés par le cuivre	2	Gypse
	3	Calcite
Rayés par l'acier	4	Fluorite
	5	Apatite
Rayent le verre	6	K-feldspath
	7	Quartz
	8	Topaze
	9	Corindon
	10	Diamant

Figure 13 : Echelle de dureté des minéraux ou échelle de Mohs

Cette échelle comporte quelques points de repères. Des minéraux comme le talc et le gypse sont si tendres qu'ils sont rayés par l'ongle. La calcite est rayée par le cuivre (une pièce d'argent en cuivre). Alors qu'une lame en acier pourra rayer tous les minéraux de dureté inférieure à 5. Mais elle ne pourra pas rayer les feldspaths et le quartz. Un morceau de corindon, très dur, utilisé dans les abrasifs, pourra rayer le quartz, mais sera rayé par un diamant.

II-5. Densité

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 dont la densité est 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.

II-6. Forme cristalline

La forme cristalline est souvent ce qui donne la valeur esthétique d'un minéral. Chaque minéral cristallise dans un système donné appelé **système cristallin**. Un minéral donné reproduira toujours les mêmes formes régies par ce système. Par exemple, la halite cristallise dans le système cubique. La calcite cristallise dans le système rhomboédrique. C'est un système où les trois axes sont de longueur égale et où les angles entre les axes sont identiques, mais différents de 90°. Le quartz commun cristallise dans le système hexagonal. Il existe des cristaux à six côtés.

II-7. Clivage

Le clivage est une propriété très importante des minéraux. Il correspond à des plans de faiblesse dans la structure cristalline. Puisqu'il s'agit de plans de faiblesse, un minéral va donc se briser facilement le long des plans de clivage, alors qu'il ne se brisera jamais selon ses faces cristallines. Lorsqu'un cristal de pyroxène ou d'amphibole est brisé par un coup de marteau, les morceaux obtenus auront toujours les mêmes angles entre leurs faces quelle que soit leurs dimensions. La calcite par exemple, possède un clivage rhomboédrique, avec des plans à 75° et 105°. Par contre, si un cristal de quartz (minéral sans clivage) est brisé, les morceaux ou fragments obtenus auront des cassures très irrégulières. Les micas se débitent en feuilles grâce à leur clivage selon un plan unique.

II-8. 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. Ce phénomène est qualifié d'effervescence (bouillonnement). Selon les minéraux carbonatés, cette effervescence se produit, sur la masse minérale ou sur la poussière, à froid ou à chaud.

II-9. Propriétés optiques

Les propriétés optiques constituent un élément diagnostique fondamental dans l'identification d'un minéral. 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 transparentes. Elles sont appelées lame mince. Elles facilitent ainsi l'étude de ces minéraux au microscope. Chaque groupe de minéraux possède ses propriétés optiques. Cela veut dire qu'ils transmettent différemment la

lumière et qu'ils produisent des couleurs caractéristiques lorsqu'ils sont observés en lumière polarisée. C'est ainsi que ces minéraux sont identifiés.

III. CLASSIFICATION DES PRINCIPAUX MINERAUX DE L'ECORCE TERRESTRE

La classification des minéraux est la répartition systématique des espèces minérales en classes et catégories, suivant des caractères communs propres à en faciliter l'étude, et tout particulièrement l'identification des minéraux provenant de roches prélevées sur le terrain.

De nombreuses classifications existent mais la plus courante est basée sur la composition chimique. Suivant ce critère, les minéraux sont regroupés en 8 classes : la classe des éléments natifs, la classe des sulfures et sulfosels, la classe des halogénures, la classe des oxydes et hydroxydes, la classe des carbonates, nitrates et borates, la classe des sulfates, chromates, molybdates et tungstates, la classe des phosphates, arséniates et vanadates et la classe des silicates.

Une classe supplémentaire est celle des sels d'acides organiques, des hydrocarbures et des résines.

III-1. Classe des éléments natifs

Cette classe réunit environ 80 minéraux constitués par un ou plusieurs éléments natifs à l'état de mélange (alliage). La plupart de ces éléments sont rares. On distingue :

- les métaux natifs : or, argent, cuivre, etc. Ils possèdent un fort éclat métallique et une densité élevée. Ils sont malléables et ne présentent pas de clivages ;
- les semi-métaux : Bismuthum (Bi), Stibium (Sb), Arsenium (As), Tellurium (Te), etc. Leur éclat est variable (métallique à submétallique) et leur densité élevée. Plus ou moins malléables, ils présentent des clivages ;
- les métalloïdes : carbone, soufre, etc. Fragiles et peu denses, ils présentent de nombreuses formes, comme par exemple le carbone, dont les polymorphes les plus connus sont le graphite et le diamant.

III-2. Classe des sulfures et sulfosels

Cette classe comprend environ 350 minéraux, répartis en deux sous-classes : la sous-classe des sulfures et la sous-classe des sulfosels.

❖ **La sous-classe des sulfures** inclut aussi les arséniures, les antimoniures et les tellurures. Au sein de cette sous-classe, les cations associés peuvent être les métaux suivants : Fe, Pb, Zn, Cu, Sb, Bi, Ag, As, Co, Ni, Mo, Mn, Ti, V, W et Sn. Les minéraux de cette classe sont généralement

tendres et fragiles, exception faite de la pyrite et de la sperrylite. Ils sont aussi parfois sectiles, c'est-à-dire susceptibles de se diviser ;

❖ **La sous-classe des sulfosels** regroupe des minéraux dans lesquels le soufre se lie, dans le groupement anionique, à un ou plusieurs semi-métaux tels que : As, Sb, Ge, Bi. Les métaux associés en tant que cations, quant à eux, peuvent être : Ag, Cu, Pb, Sn, Bi, Fe, Sb, Ti. Les sulfures d'argent et de fer (argentopyrite), ou de cuivre et de fer (bornite) sont des sulfosels. Les sulfosels sont généralement tendres et fragiles.

III-3. Classe des halogénures

Les halogénures sont des minéraux composés de métaux combinés avec des éléments halogènes : chlore, fluor, brome et iode. Cette classe comprend environ 130 minéraux. Dans cette classe, les fluorures sont les minéraux les plus courants. Les chlorures par contre, sont peu nombreux, même si le chlorure de sodium (halite) ou sel de cuisine (NaCl) est largement exploité. Quant aux bromures et iodures, ils sont extrêmement rares.

Les propriétés physiques communes à ces halogénures sont leur fragilité, leur dureté et leur densité faibles. Ces minéraux sont souvent solubles dans l'eau.

III-4. Classe des oxydes et hydroxydes

Dans cette classe qui regroupe environ 320 minéraux, l'oxygène (O) ou l'ion hydroxyl (OH^-) occupe la position de l'anion. On distingue trois sous-classes :

- la sous-classe des oxydes simples. Exemple : la cassitérite (SnO_2) ;
- la sous-classe des oxydes multiple : ici, plusieurs métaux cohabitent (chromite, avec du fer et du chrome), comme la chromite (FeCr_2O_4) ;
- la sous-classe des hydroxydes. Dans cette sous-classe, le groupement OH^- occupe la position de l'anion.

On distingue aussi le groupe des spinelles (cuprite, magnétite), des chrysobéryls pour les oxydes d'aluminium et de béryllium (œil de chat), des corindons pour les oxydes d'aluminium (rubis, saphir), des quartz pour les oxydes de silicium (cristal de roche, améthyste, agate, aventurine, jaspes) et des opales pour les oxydes de silicium hydraté.

A quelques exceptions près, les oxydes simples et multiples sont des minéraux durs et relativement denses. A l'opposé, les hydroxydes présentent fréquemment une faible dureté.

III-5. Classe des carbonates, nitrates et borates

Les carbonates, les nitrates et les borates sont des minéraux composés de métaux combinés avec les éléments carbones (C), azote (N) ou bore (B). Cette classe comporte environ 300 espèces regroupées en 3 sous-classes :

- **la sous-classe des carbonates** : elle comporte de près de 100 espèces dont 3 sont particulièrement bien représentées : la Calcite, l'Aragonite et la Dolomite. Le groupement anionique est ici constitué par (CO_3^{2-}). Les carbonates ont une faible dureté. Ils sont fragiles et se clivent, en général, facilement. Ils entrent pour la plupart en effervescence avec les acides (dégagement de dioxyde de carbone) ;

- **la sous-classe des nitrates** : Ils sont rares et généralement solubles dans l'eau. Sur les 8 espèces répertoriées, les plus connues sont : le salpêtre ordinaire ou nitre (KNO_3) et le salpêtre du Chili (NaNO_3), également appelé nitratine ou nitronatrite ;

- **la sous-classe des borates** : elle est constituée d'environ 100 minéraux où (BO_3^{2-}) et parfois (BO_4^{4-}) forment le groupement anionique. Ses représentants ont en majorité un éclat vitreux. Ils sont incolores à blancs et de faibles duretés et densité. Les borates les plus connus sont les borates hydratés, tel que le borax. Ils sont de conservation délicate car ils subissent très facilement des variations d'hydratation en dehors de leurs conditions naturelles de gisement. Ainsi, à l'air, le borax se transforme presque immédiatement en tincalconite.

III-6. Classe des sulfates, chromates, molybdates et tungstates

Cette classe compte près de 250 espèces. Les minéraux sont constitués d'un radical anionique de type (XO_4^{2-}) avec X = S (sulfates) ou Cr (chromates) ou Mo (molybdates) ou W (tungstates). Chaque radical détermine une sous-classe.

❖ **La sous-classe des sulfates** regroupe le plus grand nombre de minéraux (200 espèces). On distingue les sulfates anhydres (barytine, anhydrite, anglésite, célestite, crocoïse) et les sulfates hydratés (chalcantite, gypse, mélanterite). A l'exception des composés de cuivre, les sulfates ont généralement peu de couleur. Ils sont tous fragiles et tendres.

❖ **Les autres sous-classes : chromates, molybdates, tungstates**, comptent au total une trentaine d'espèces minérales, en général rares. Leurs représentants sont pour la plupart fragiles et de faible dureté.

III-7. Classe des phosphates, arséniate et vanadates

Les minéraux sont composés de métaux combinés avec un groupement tétraédrique constitué d'un élément phosphore, arsenic ou vanadium entouré de quatre atomes d'oxygène.

La classe des phosphates, arséniate et vanadates regroupe environ 250 espèces. Beaucoup sont très rares et ne se présentent qu'en petits cristaux, parfois uniquement visibles sous une loupe binoculaire. On distingue trois sous-classes :

- **la sous-classe des phosphates** : le radical anionique ici est le PO_4^{2-} . Ces minéraux sont le plus souvent très colorés et forment parfois de grands cristaux ;
- **la sous-classe des arséniate** : le radical anionique est AsO_4^{2-} . Les représentants les plus connus de cette sous-classe sont l'adamite, la mimétite et l'érythrite ;
- **la sous-classe des vanadates** a pour groupement anionique VO_4^{2-} . A l'exception de la vanadinite, les autres espèces de cette sous-classe sont très rares.

III-8. Classe des silicates

La classe des silicates est la plus importante par le nombre de ses représentants (près du tiers de l'ensemble des minéraux). Elle forme plus de 90% en terme de poids de la croûte terrestre. Les diverses espèces sont caractérisées par la présence de groupements tétraédriques (SiO_4^{4-}) constitués d'un atome de silicium au centre et de quatre atomes d'oxygènes aux sommets du tétraèdre. Ces groupements s'associent entre eux par un ou plusieurs de leurs sommets ou par l'intermédiaire des cations Mg^{2+} , Fe^{2+} , Fe^{3+} , Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , etc. La trame silicatée forme la structure de base de tous les silicates. Dans cette trame, l'atome de silicium occupe la position centrale (figure 14)

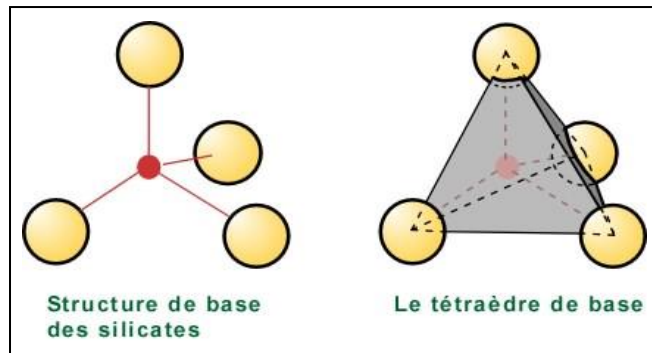


Figure 13 : Structure de base des minéraux silicatés

En fonction de l'agencement des tétraèdres, six sous-classes ont été définies (tableau I) :

les nésosilicates, les sorosilicates, les cyclosilicates, les inosilicates, les phyllosilicates, et les tectosilicates.

Tableau I : Description des sous-classes des minéraux silicatés

SOUS-CLASSE	STRUCTURE	EXEMPLE DE MINERAUX
Nésosilicates	tétraèdres isolés $[\text{SiO}_4]^{4-}$	Forstérite, Fayalite, Andalousite, Sillimanite, Staurotide, Grenats, etc.
Sorosilicates	tétraèdres groupés par deux $[\text{Si}_2\text{O}_7]^{6-}$	Epidotes, Lawsonite, Pumpellyite, etc.
Cyclosilicates	tétraèdres en anneaux de 3, 5, 6 ou +	Cordiérite, Tourmaline, Béryl, etc.
Inosilicates	tétraèdres en chaînes	Pyroxènes, Amphiboles, Hornblendes, Glaucophane, Riébeckite, etc.
Phyllosilicates	tétraèdres en couches avec intervention de Mg, Fe, K	Micas, Chlorites, Ar
Tectosilicates	Tétraèdres disposés en charpente à trois dimensions, formule structurale simplifiée = SiO_2	Quartz, Feldspath, etc.

Un résumé synthétique de ces huit classes de minéraux est consigné dans le tableau II.

Tableau de synthèse des huit premiers groupes de minéraux et leur usage

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

III-9. Classe des sels d'acides organiques, hydrocarbures et résines

La dernière classe de minéraux regroupe des mélanges de composés organiques, tels que les sels d'acides organiques, les hydrocarbures naturels (charbon, pétrole, etc.) et les résines pétrifiées (résines fossiles). L'ambre appartient à la classe des résines pétrifiées. Cette classe ne comprend qu'une trentaine d'espèces.