

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur Et de La Recherche Scientifique

Faculté des Sciences de la  
Nature et de la Vie et Sciences  
de la Terre

جامعة غرداية



Université de  
Ghardaïa

كلية علوم الطبيعة و الحياة

وعلوم الأرض

قسم البيولوجيا

Département de Biologie

## Support pédagogique :

# **TD DE GEOLOGIE**

## **« Minéraux et Roches »**

Niveau : 1<sup>ère</sup> Année Tronc commun : *Sciences de la Nature et de la Vie*

- Premier semestre
- Unité méthodologique
- Crédits : 05
- Coefficient : 3
- Volume horaire : 65 heures

Préparé par :

**Dr. KHELLAF Khoudir**

2021

# Table de matière

<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	4
<b>2</b>	<b>Definition</b> .....	4
<b>3</b>	<b>Les mineraux des roches</b> .....	4
3.1	NOTIONS DE CRISTALLOGRAPHIE.....	4
3.2	NOTION DE MAILLE.....	4
3.3	SYMETRIE ET SYSTEMES CRISTALLINS.....	5
3.4	PROPRIETES PHYSIQUES DES MINERAUX (LES CRITERES DE RECONNAISSANCE SUR LE TERRAIN) ...	7
3.4.1	Les propriétés mécaniques .....	7
3.4.1.1	Le clivage.....	7
3.4.1.2	La ténacité.....	7
3.4.1.3	La dureté.....	7
3.4.2	Les propriétés organoleptiques.....	7
3.4.2.1	Le gout.....	7
3.4.2.2	La couleur.....	7
3.4.2.3	Le trait.....	8
3.4.2.4	L'éclat.....	8
3.4.2.5	La luminescence.....	8
3.4.2.6	Densité.....	8
3.4.2.7	Les macles.....	9
3.4.3	Les propriétés magnétiques des minéraux.....	9
3.4.4	Les propriétés thermiques des minéraux.....	9
3.4.5	Les propriétés électriques des minéraux.....	9
3.4.6	Les propriétés de surface.....	9
3.4.7	Les critères de reconnaissance des minéraux au laboratoire.....	10
3.4.7.1	Les éléments natifs.....	10
3.4.7.2	Les sulfures et les sulfosels.....	10
3.4.7.3	Les oxydes et les hydroxydes.....	11
3.4.7.4	Les halogénures.....	11
3.4.7.5	Les carbonates.....	11
3.4.7.6	Les nitrates et les borates.....	11
3.4.7.7	Les sulfates.....	11
3.4.7.8	Les phosphates, vanadates, arséniate, tungstates, molybdates et uranates.....	11
3.4.7.9	Les silicates.....	11
3.5	CLE DE DETERMINATION DU TYPE DE ROCHE A PARTIR D'UN EXAMEN MACROSCOPIQUE .....	13
3.5.1	Clé de détermination des roches mantelliques et magmatiques à partir d'un examen macroscopique.....	14
3.5.2	Clé de détermination des roches sédimentaires à partir d'un examen macroscopique.....	15
3.5.3	Clé de détermination des roches métamorphiques à partir d'un examen macroscopique ..	16
<b>4</b>	<b>LES ROCHES</b> .....	17
4.1	CYCLE GEOLOGIQUE DES ROCHES .....	17
4.2	LES ROCHES MAGMATIQUES.....	18
4.2.1	Conditions de formations des roches magmatiques.....	18
4.2.1.1	Les roches plutoniques.....	18
4.2.1.2	Les roches volcaniques.....	18
4.2.2	Domaine du magmatisme.....	18
4.2.3	Classification des roches magmatiques.....	19
4.2.3.1	Selon leurs proportions en minéraux mafiques.....	19
4.2.3.2	Selon leur contenu en silice on distingue.....	19

4.2.4	Du magma à une roche magmatique .....	20
4.2.5	Configuration magmatique.....	20
4.2.6	Structure des roches magmatiques .....	20
4.2.6.1	Structure grenue .....	20
4.2.6.2	Structure microgrenue.....	20
4.2.6.3	Structure microlitique .....	21
4.2.6.4	Structure vitreuse .....	21
4.3	LES ROCHES SEDIMENTAIRES .....	21
4.3.1	Structure d'une roche sédimentaire .....	21
4.3.2	Domaine de formation des roches sédimentaires.....	21
4.3.3	Processus de formation des roches sédimentaires .....	22
4.3.3.1	Météorisation .....	22
4.3.3.2	Le Transport.....	25
4.3.3.3	Sédiments et sédimentation.....	26
4.3.3.4	La Lithification et la Diagenèse .....	27
4.3.4	Classification des roches sédimentaires.....	27
4.3.5	Les familles des roches sédimentaires .....	27
4.3.5.1	Les roches détritiques.....	27
4.3.5.2	Les roches biogéniques, biochimiques ou organiques .....	27
4.3.5.3	Les d'origine chimique .....	28
4.3.5.4	Les pyroclastites.....	28
4.4	LES ROCHES METAMORPHIQUES .....	28
4.4.1	Domaine des roches métamorphiques.....	28
4.4.2	Structure des roches métamorphiques.....	29
4.4.3	Classification des roches métamorphiques.....	29
4.4.4	Facteurs du métamorphisme .....	30
4.4.4.1	L'augmentation de la pression .....	30
4.4.4.2	L'augmentation de la température .....	30
4.4.4.3	Les fluides .....	30
4.4.5	Types de métamorphisme.....	30
4.4.5.1	Le métamorphisme régional.....	30
4.4.5.2	Le métamorphisme de contact .....	31
4.4.5.3	Le métamorphisme d'impact .....	31
4.4.5.4	Le métamorphisme d'enfouissement .....	31
4.4.5.5	L'autométamorphisme des corps magmatiques .....	31
4.4.5.6	L'értrométamorphisme.....	31
4.4.5.7	La dynamométamorphisme.....	31

# 1 Introduction

La science est une composante essentielle du savoir humain. Son but premier est d'explorer la matière et cherche de comprendre le fonctionnement de la nature.

La *géologie* est une science de terrain où les observations sont indispensables, quelle que soit l'échelle, depuis les grandes structures régionales (grâce aux satellites de télédétection) jusqu'aux minéraux (par l'utilisation des microscopes). L'ultime but des études géologiques est de comprendre l'objet Terre : décrire sa structure, explique son fonctionnement, découvrir les étapes et son évolution et refaire son histoire. Ce but nécessite la collaboration de toutes disciplines de la géologie comme la sédimentologie, la tectonique, la géochimie, ...la *cristallographie* et la *minéralogie*.

Ce document est destiné aux étudiants de 1<sup>ère</sup> année géologie pour développer ses connaissances minéralogiques. À travers ce document les étudiants peuvent connaître et acquérir des connaissances préalables sur les minéraux (propriétés, structures, gisements, ...etc.) et les roches (type, caractéristiques, classifications...etc.) qui constituent l'écorce terrestre.

## 2 Définition

La *minéralogie* est l'ensemble des techniques permettant, à partir de substances minérales brutes, d'obtenir des produits utilisables industriellement. La *cristallographie* est l'étude des formes, des structures et des propriétés des cristaux.

## 3 Les minéraux des roches

Les minéraux des composants des matériaux de l'écorce terrestre et leur étude est la clef qui mène à la compréhension de nombreux aspects de la géologie. Ils constituent une richesse naturelle plus importante et une ressource non renouvelable.

### 3.1 Notions de cristallographie

En cristallographie, les minéraux sont des composés ou des éléments chimiques qui se présentent naturellement sous forme de substances inorganiques dans un état cristallin et ils constituent les briques de bases des roches.

Pour comprendre la variété des formes cristallines, il faut revenir à quelques notions simples de cristallographie.

Un cristal est une forme polyédrique limitée par des surfaces régulières, fonction notamment de sa composition chimique. Donc, les faces d'un cristal sont parallèles à des plans perpendiculaires du réseau cristallin.

### 3.2 Notion de Maille

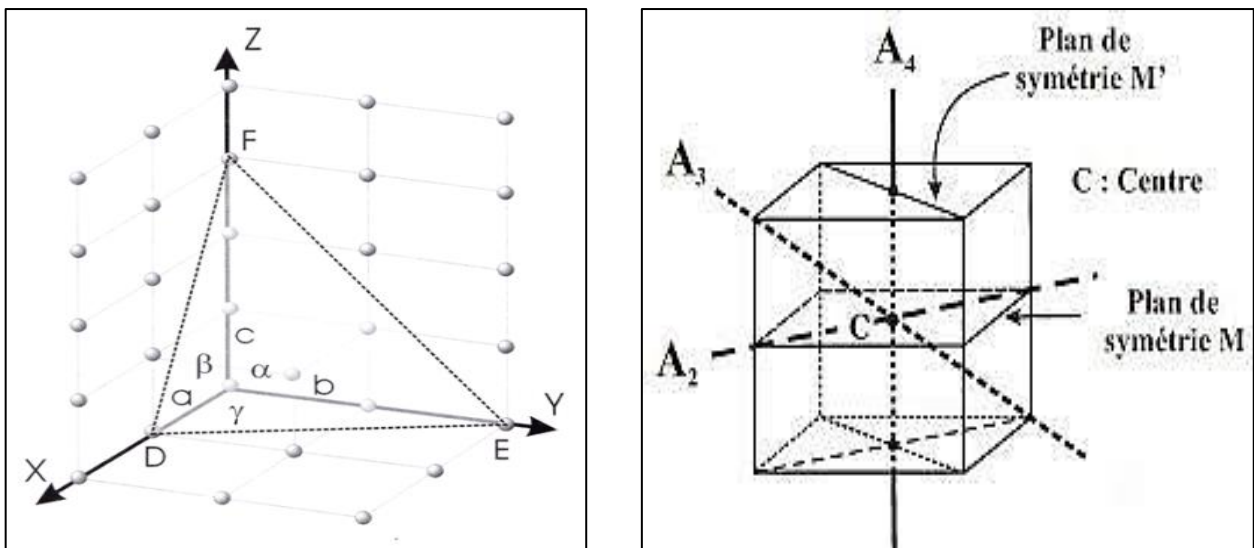
C'est l'unité de base d'un cristal ou plus petit parallélépipède de la matière cristallisée conservant toutes les propriétés (géométriques, physiques et chimiques) du cristal. Le contenu atomique entre les mailles est appelé *motif cristallin* et ses sommets, les *nœuds*. Sa géométrie est définie par trois vecteurs  $a$ ,  $b$  et  $c$  correspondant aux distances entre les nœuds du réseau et des angles dièdres entre ces vecteurs ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ). Cette maille est positionnée dans un repère cristallographique  $X$ ,  $Y$  et  $Z$ . les faces cristallines sont définies par leur intersection avec les axes  $X$ ,  $Y$  et  $Z$  sous forme

d'indices. On définit également la rangée comme toute droite passant par deux nœuds quelconques. Les plans réticulaires correspondent quant à eux à des surfaces limitées par trois nœuds situés sur plus d'une rangée. Un cristal contient donc une infinité de ces plans. Ils sont identifiés en utilisant en général les indices de Miller  $h, k, l$  qui correspondent à des nombres entiers (positifs, négatifs et nuls), proportionnels aux inverses des longueurs interceptés (1,  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{3}$  ou (6 3 2)). Toujours pour le même plan, les directions parallèles aux axes cristallographiques sont notées (100) pour X, (010) pour Y et (001) pour Z (Figure 1). Lorsqu'un plan est parallèle à un axe, l'indice correspondant sera nul. Tous les plans parallèles et équidistant formant une *famille des plans* réticulaires et l'équidistance est appelée *distance inter-réticulaire* (notée  $d_{hkl}$ ).

### 3.3 Symétrie et systèmes cristallins

Les cristaux sont donc des polyèdres qui peuvent être caractérisés par différents niveaux ou classes de symétrie. On définit par symétrie la présence dans un objet en 3D d'axes (notés A), de centre (noté C) ou de plans (notés M) de symétrie. Cette symétrie s'exprime par : la *translation* (déplacement dans une direction), l'*inversion* (symétrie par rapport au point, noté C), la *flexion* (symétrie par rapport à un *miroir* ou plan, noté m) et la *rotation* (symétrie par rapport à un axe de rotation, noté 2, 3, 4 ou 6 en fonction de l'angle de rotation) (Figure 1)

Sur la base des angles axiaux et des axes cristallographiques, tous les cristaux sont classés en 32 *classes de symétrie* ou combinaisons regroupés en *sept systèmes cristallins*, correspond aux sept systèmes de mailles du réseau : cubique, hexagonal, rhomboédrique, quadratique, monoclinique, triclinique, orthorhombique (Figure 2). Dans la nature, plus de 50% des minéraux se cristallisent dans le système monoclinique, et orthorhombique, environ 17 % dans le système hexagonal et 12% dans le système cubique.



**Figure .1 . a :** Maille élémentaire délimitée par les nœuds du réseau (le plan DEF est indiqué (6 3 2)).  
**b :** Composants de symétrie d'un minéral.

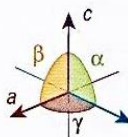


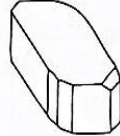

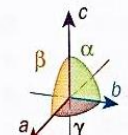


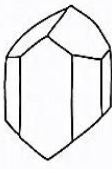
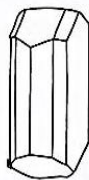
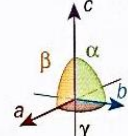
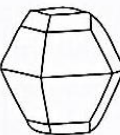


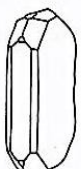
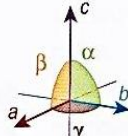
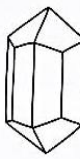

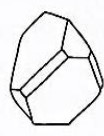
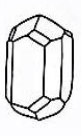
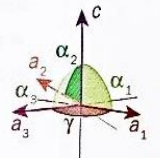
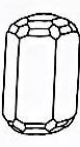

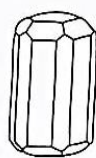
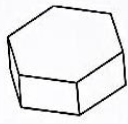
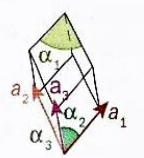
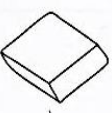

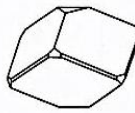
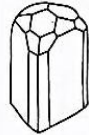
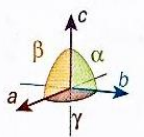
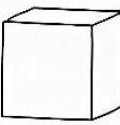
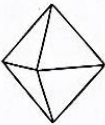
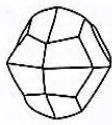
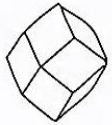
Système cristallin (nombre de divisions)	Axes et paramètres cristallographiques	Minéraux			
Triclinique (2)	 $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$				
Monoclinique (3)	 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \gamma = 90^\circ$ $\beta \neq 90$				
Orthorhombique (3)	 $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Quadratique (7)	 $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				
Hexagonal (7)	 $a_1 = a_2 = a_3 \neq c$ $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = 90^\circ$ $\gamma = 120^\circ$				
Rhomboédrique (5)	 $a_1 = a_2 = a_3$ $\alpha_1 = \alpha_2 = 90^\circ$ $\alpha_3 \neq 90^\circ$				
Cubique (5)	 $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$				

Figure 2. Principales formes géométriques des cristaux réparties selon les systèmes cristallins

### 3.4 Propriétés physiques des minéraux (Les critères de reconnaissance sur le terrain)

#### 3.4.1 Les propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques comme le clivage, la cassure, la ténacité, et la dureté des minéraux sont très intéressantes car elles permettent souvent, comme la reconnaissance du système cristallin, une identification rapide sans matériel sophistiqué.

##### 3.4.1.1 Le clivage

Est la propriété que possèdent certains minéraux de se casser suivant un plan bien déterminé qui correspond à des faces cristallines existantes ou possibles. Le clivage s'effectue selon des plans cristallins au sein desquels les atomes (ions) sont fortement liés entre eux. Selon la facilité avec laquelle le minérale se laisse cliver, on parle de clivage parfait, bon, distinct, mauvais...etc. on identifie le clivage à l'aide des indices de Miller ou par rapport au type de faces auxquels ils correspondent (ex. clivage basal ou (001), clivage prismatique (110)...). Parfois, les clivages libèrent de véritables polyèdres appelés solides de clivage, que l'on nomme d'après leur forme : clivage cubique, clivage rhomboédrique... etc.

Certain minéraux ne possèdent pas de clivage. Ils se brisent suivant des cassures d'orientation quelconque que l'on qualifie d'irrégulières, rigoureuses, conchoïdales....etc. selon l'aspect de la surface de fracture.

##### 3.4.1.2 La ténacité

Traduit l'état de cohésion existant entre les atomes constitutifs du minéral. On décrit la ténacité par des mots usuels comme sectile (ex. talc), ductile (cuivre natif), élastique (micas), fragiles (calcite).

##### 3.4.1.3 La dureté

Est liée notamment à la densité du réseau cristallin et à la nature des liaisons entre les atomes. Elle s'évalue en général par comparaison avec une échelle conventionnelle des minéraux. La plus utilisée celle de F. Mohs, comprend les degrés suivants : 1 (talc), 2 (gypse), 3 (calcite), 4 (fluorine), 5 (apatite), 6 (orthose), 7 (quartz), 8 (topaze), 9 (corindon) et 10 (diamant). L'angle rayé 1 et 2, le canif 1, 2, 3, 4 et 5. Le verre est rayé par 7, 8, 9 et 10.

#### 3.4.2 Les propriétés organoleptiques

Il s'agit des propriétés directement accessibles aux organes des sens : gout, touche, vue, odorat.

##### 3.4.2.1 Le gout

Permet d'identifier les minéraux solubles dans l'eau (ex. la halite, NaCl,...). Les minéraux argileux peuvent repérer à leur **odeur** particulière de terre. Quelques minéraux possèdent un **toucher** spécifique (ex : touche gras du talc).

##### 3.4.2.2 La couleur

Est une propriété caractéristique de nombreux minéraux qui peut être utilisé comme critère de détermination. Il faut cependant distinguer les minéraux dont la couleur est le résultat de la composition chimique ou des propriétés cristallographiques (*idiochromatiques*), des minéraux dont la coloration est due à des substances étrangères (*allochromatiques*). La couleur de ces dernières n'est donc pas caractéristique (Tableau 1).



### 3.4.2.3 Le trait

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). 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.

**Tableau 1.** Couleur de quelques minéraux

Couleur	Minéraux
Blanc	Quartz, calcite, dolomite, halite, talc, gypse, feldspath
Vert	Malachite, chlorite, serpentine, apatite, épidote, olivine
Jaune	Soufre, carnotite, orpiment
Jaune laiton	Pyrite, chalcopryrite
Bleu	Azurite, turquoise, kyanite, covellite
Brun	Sidérite, goethite, zircon, limonite
Violet	Fluorite, améthyste
Rose	Quartz rose, rhodocrosite, rhodonite, orthose
Orange	Réalgar, crocoite
Rouge	Cinabre, hématite, zincite, nickéline, grenat, jaspé, cuivre natif.
Doré ou bronzé	Or natif, marcasite, pyrrhotite
Argenté	Argent natif, platine, arsénopyrite
Gris plomb	Graphite, galène, molybdénite Hématite
Noir ou gris très foncé	Magnétite, ilménite, chromite, uraninite

### 3.4.2.4 L'éclat

Des minéraux est liée à l'*indice de réfraction n*. cet indice varie en fonction de longueur d'onde et est plus grand pour la lumière bleue que pour la lumière rouge, amenant une dispersion des rayons lumineux à la sorte des cristaux (les feu des diamants en son bon exemple). En général, l'éclat d'un minéral est d'autant plus grand que son indice de réfraction est plus élevé. Pour les minéraux opaque on utilise l'indice de *réflexion x*. l'échelle suivante est couramment utilisée :

*Semi-vitreux* ( $n=1.3-1.5$ ), *vitreux* ( $n= 1.5-1.8$ ), *sub-adamantion* ( $1.8-2.2$ ), *adamantin*, *comparable au diamant*,  $2.2-2.7$ , *sub-métallique* ( $x=8-20\%$ ), *métallique* ( $x= 20-50\%$ ).

### 3.4.2.5 La luminescence

Est la propriété de certains minéraux d'émettre de la lumière visible lorsqu'ils sont soumis à des rayons ultraviolets. On distingue la *fluorescence*, émission lumineuse qui ne dure qu'aussi longtemps qu'agit l'exposition et la *phosphorescence* qui se prolonge l'arrêt de l'exposition.

### 3.4.2.6 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  $2.7 \text{ gr/cm}^3$ , 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.



### 3.4.2.7 Les macles

Imbrication intime de 2 ou de n individus de la même espèce dès les premiers stades de la germination et de la croissance cristalline. Il est rare que le cristal soit seul, on assiste très souvent à l'association de 2 ou 3 cristaux, cette association s'appelle macle. On distingue les *macles simples* lorsque deux individus composent le groupe (ex : orthose, gypse) et les *macles multiples* si l'ensemble comporte plus de deux individus (aragonite, albite).

### 3.4.3 Les propriétés magnétiques des minéraux

La magnétite ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), pierre d'aimant des anciens, a été utilisée telle quelle comme boussole. Ces cas est exceptionnel, mais par contre, beaucoup de minéraux sont capables d'acquérir une aimantation lorsqu'ils ont soumis à un champ magnétique. On dit qu'ils présentent une certaine *susceptibilité magnétique*  $x$ .

$$x = M/H$$

Avec  $M$  est l'aimantation et (A/m) et  $H$  est l'excitation magnétique appliquée (A/m)

Les minéraux qui présentent une susceptibilité magnétique négative sont repoussés par l'électro-aimant : ils sont dit *diamagnétiques* (calcite, or, argent...). Les minéraux présentent une susceptibilité positive sont dit *paramagnétiques* ou *ferromagnétiques* suivant que cette susceptibilité est faible ou élevée. Pour attirer les minéraux ferromagnétiques, il suffit d'un aimant (magnétite, pyrrhotine...), alors, pour attirer les minéraux paramagnétiques, il faut un électro-aimant.

### 3.4.4 Les propriétés thermiques des minéraux

La facilité avec laquelle un minéral fond quand on le chauffe est une caractéristique spécifique. Le minéralogiste (1878) a proposé une échelle de fusibilité en choisissant certains minéraux comme terme de comparaison (Tableau 2).

**Tableau 2.** Echelle de fusibilité de certains minéraux de Von Kobell

1	Stibine	Fusible à la flamme d'une bougie
2	Mésotype	
3	Almandin	Fusible au chalumeau
4	Actinote	
5	Orthose	
6	Bronzite	
7	Quartz	Infusible au chalumeau

### 3.4.5 Les propriétés électriques des minéraux

Ces propriétés des minéraux dépendent en grande partie du type de liaisons chimiques de leurs atomes. Les minéraux à liaisons métalliques sont de bons conducteurs en raisons des électrons libres présents dans leur structure (métaux natifs et la plupart des sulfures). Les minéraux ioniques et covalents sont semi-conducteurs ou isolants (la majorité des espèces minérales).

### 3.4.6 Les propriétés de surface

La mouillabilité est une propriété qui peut être utilisée dans le traitement des minerais, pour séparer des minéraux *lyophiles* (qui se mouillent facilement) des minéraux *lyophobes* (qui se mouillent difficilement). En général, les minéraux lyophiles possèdent des réseaux à liaisons ionique tandis les minéraux lyophobes présentent des liaisons métalliques ou covalentes. Il est donc possible, par flottation, pour séparer les sulfures de non-sulfures, le diamant des grenats... etc.

### 3.4.7 Les critères de reconnaissance des minéraux au laboratoire

La première étape de la reconnaissance des minéraux se fait sur le terrain, à l'œil nu ou à la loupe, et fait appel à des critères simples. Il sera complété ultérieurement en laboratoire (Tableau 3), par des techniques plus coûteuses et souvent destructives : microscopies en transmission ou réflexion, analyses chimiques ou diffraction X, microsonde ionique ou microscopie électronique.

**Tableau 3** : Les critères de reconnaissance des minéraux au laboratoire

	<b>appareillage</b>	<b>Traitement du minéral/roche</b>	<b>Résultats obtenus</b>
<b>microscope</b>	Polarisant	Lame mince	Identification (teinte de polarisation, clivage et extinction)
	métallographique	Lame polie	Identification (polarisation, réflectance et macles)
	Cathodoluminescence	Lame mince polie	Couleur de Cathodoluminescence
	Electronique	Echantillon ou esquille métallisée	Morphologie, altération, zonation
<b>Microscope ionique</b>		Lame polie	Composition chimique
<b>Diffraction X</b>		Poudre	Phases minéralogiques
<b>Spectrométrie</b>	Torche à plasma	poudre	Composition chimique

### 3.3. Les classes des minéraux

De nombreuses classifications minéralogiques ont été proposées depuis les débuts de la discipline. La classification géochimique est la plus utilisée et est basée sur la nature des ou des groupes ioniques présents dans la formule du minéral. Elle permet aussi de différencier des classes des minéraux dont le comportement géochimique montre des similarités évidentes.

Les noms des minéraux dépendent surtout de leur forme, de leur composition chimique ou de leur propriété physique pour les plus anciens et de noms de lieux ou de personnes célèbres pour les plus récents. Les différentes classes des minéraux sont :

#### 3.4.7.1 Les éléments natifs

Sont des éléments combinés. Ils sont relativement rares et ne concernent que quelques éléments chimiques : citons surtout le soufre, le carbone (sous deux formes : graphite ou diamant) et quelques métaux : l'or, le cuivre, l'argent, le platine. Leur système cristallin présente une symétrie élevée.

#### 3.4.7.2 Les sulfures et les sulfosels

Ces minéraux résultent de la combinaison des sulfures avec un métal ou des sulfures avec As, Sb, Bi, Te et éventuellement un métal. Cette famille des minéraux a une grande importance économique car de nombreux sulfures et sulfosels contiennent des métaux comme le cuivre, l'argent, ...etc. des gisements, les sulfures et les sulfosels représentent les minéraux primaires et témoignent des conditions réductrices. Dans les conditions de surface, ils peuvent être altérés sous forme d'oxydes, carbonates, sulfates secondaires. Ces minéraux se caractérisent par un éclat métallique et leur dureté en général assez faible.

### 3.4.7.3 Les oxydes et les hydroxydes

Sont des minéraux secondaires résultent en général de l'oxydation de sulfures. Ils sont beaucoup plus tendres que les oxydes primaires et ils sont formés de l'association d'éléments métalliques avec l'oxygène, la plupart des oxydes ont une formule et une structure cristalline relativement simple. La plupart des oxydes primaires sont durs (corindon, spinelle...etc.) et quelques-unes pierres précieuses les plus appréciées (saphir, rubis) font partie de cette famille. On y trouve aussi certains minerais important comme la cassitérite ou l'hématite.

### 3.4.7.4 Les halogénures

Résultent de la combinaison d'éléments métalliques avec  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{I}^-$ . ces minéraux tendres et solubles dans l'eau sont transparents et cristallisent souvent dans le système cubique. Les grands gisements halogénures préviennent de par précipitation par évaporation à partir d'eau lacustre ou marine.

### 3.4.7.5 Les carbonates

Se caractérisent par le groupe anionique  $\text{CO}_3$ . Ils sont translucides et relativement tendres. Tous sont plus ou moins solubles dans l'acide chlorhydrique et beaucoup cristallisent en système rhomboédrique dont présente un bon clivage. Certains carbonates (calcite en particulier) sont très abondants et résultent de la biominéralisation. D'autres découlent de l'altération primaire de minéraux primaires par des fluides riches en  $\text{CO}_2$  et peuvent représenter de bons minerais.

### 3.4.7.6 Les nitrates et les borates

Comme les halogénures, la plupart de minéraux de cette famille sont très solubles dans l'eau, tendre et peu colorés. Ils résultent de l'évaporation des saumures en climat très sec. Certains borates rares et peuvent être d'origine magmatique.

### 3.4.7.7 Les sulfates

Contenant  $\text{SO}_4$ , peuvent résulter de l'évaporation des saumures (gypse). Ils peuvent aussi former dans les parties oxydées des filons et amas sulfurés. Ces derniers sont souvent très colorés et possèdent une densité relativement élevée. Tous les sulfates sont tendres et solubles dans l'eau.

### 3.4.7.8 Les phosphates, vanadates, arséniate, tungstates, molybdates et uranates

Sont constitués de groupes anioniques oxydés faisant intervenir P, V, As, W, Mo et U. ils sont généralement tendres, denses et colorés et résultent souvent de processus d'altération par oxydation des minerais métalliques. Seule l'apatite est à la fois un phosphate primaire des roches magmatiques et un minéral biogénique (os, dents).

### 3.4.7.9 Les silicates

Résultent de l'assemblage plus ou moins complexe de tétraèdres  $\text{SiO}_4^{4-}$ , associées à différents cations. Ces tétraèdres possèdent en leur centre un atome de silicium, entourée de quatre atomes d'oxygène, occupant les quatre sommets. Il y a donc, 4 charges négatives, à neutraliser, soit par combinaison avec des cations, soit par polymérisation de polyèdres identiques.

Cette famille des minéraux comprend probablement la moitié des minéraux connus. Ils sont durs, infusibles, et très peu solubles. La plupart sont relativement peu denses et présentent un éclat vitreux. Leur formule chimique est souvent complexe et leur réseau cristallin possède une symétrie

élevée. La classification des minéraux silicatés, basée sur l'arrangement spatiale des tétraèdres, comprend (Figure 3):

**Les néosilicates**, comportant des tétraèdres isolés, de formule générale  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ; ex : forstérite  $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$

**Les sorosilicates**, où les tétraèdres s'unissent par deux, de formule générale  $(\text{Si}_2\text{O}_7)^{6-}$ , ex : Hémimorphite  $\text{Zn}_4(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$

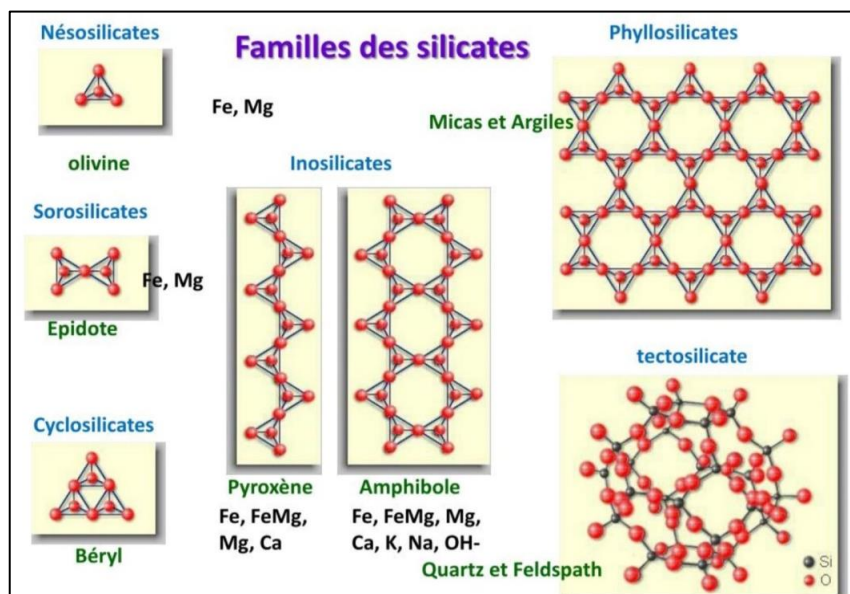
**Les cyclosilicates**, où l'on observe les anneaux de trois, quatre ou six tétraèdres et dont la formule générale est  $(\text{SiO}_3)^{2-}$ ; ex : bénitoïde  $\text{BaTiSi}_3\text{O}_9$ , (trois anneaux), béryl  $\text{Be}_3\text{Al}_2\text{Si}_6\text{O}_{18}$  (six anneaux).

**Les inosilicates** comportant des chaînes simples ou doubles des tétraèdres, de formule respectives  $(\text{SiO}_3)^{2-}$  et  $(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}$ . C'est la structure de pyroxène et de l'amphibole.

**Les tectosilicates** où les tétraèdres forment une charpente en trois dimensions. Elle est de formule  $\text{SiO}_2$  dans le cas du quartz, mais si  $\text{Al}^{3+}$  remplace certains  $\text{Si}^{4+}$ , la charpente, d'électriquement neutre, devient négative et peut être incluse des cations (cas des feldspaths). Cette structure tridimensionnelle est à l'origine de la dureté de la plupart des tectosilicates.

**Les phyllosilicates** se caractérisent par de feuillets de tétraèdres de formule  $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}$ . C'est la structure typique des micas, des chlorites et des argiles. Les tétraèdres ayant une base dans un même plan, chaque oxygène est commun à deux tétraèdres. Les oxygènes libres s'associent avec des cations ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  ...) qui constituent eux-mêmes, avec des groupes hydroxyles, des octaèdres groupés en couches.

Certains phyllosilicates possèdent des feuillets simples et asymétriques (kaolinite), avec une couche tétraédrique et une couche octaédrique (TO), d'autres des feuillets doubles (talc), avec les tétraèdres déposés de chaque côté de la couche octaédrique (TOT). Cette disposition en feuillets permet à quelques phyllosilicates (ex : montmorillonite), d'admettre de l'eau entre les couches TOT. Comme cette eau est relativement mobile, l'espacement des feuillets varie (10Å pour une montmorillonite déshydratée à 400°C, 15Å pour une montmorillonite hydratée. On parle alors d'argile gonflante. A noter que la structure en feuillets des phyllosilicates est responsable de leur excellent clivage basal.



**Figure 3.** Classification et structures des silicates

3.5 Clé de détermination du type de roche à partir d'un examen macroscopique (Figure 4, 5, 6 et 7)

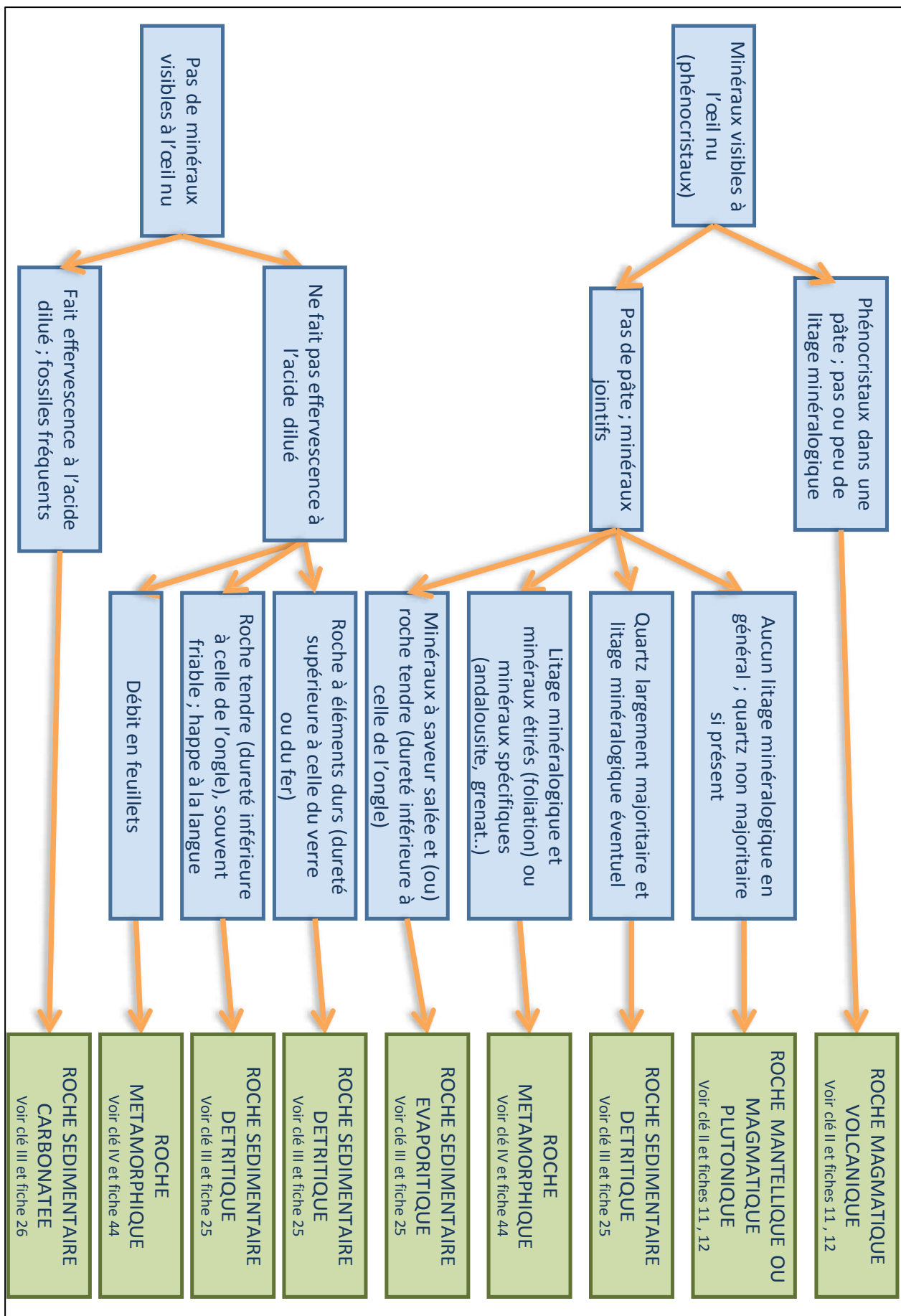


Figure 4. Clé de détermination du type de roche à partir d'un examen macroscopique

3.5.1 Clé de détermination des roches mantelliennes et magmatiques à partir d'un examen macroscopique (Figure 5)

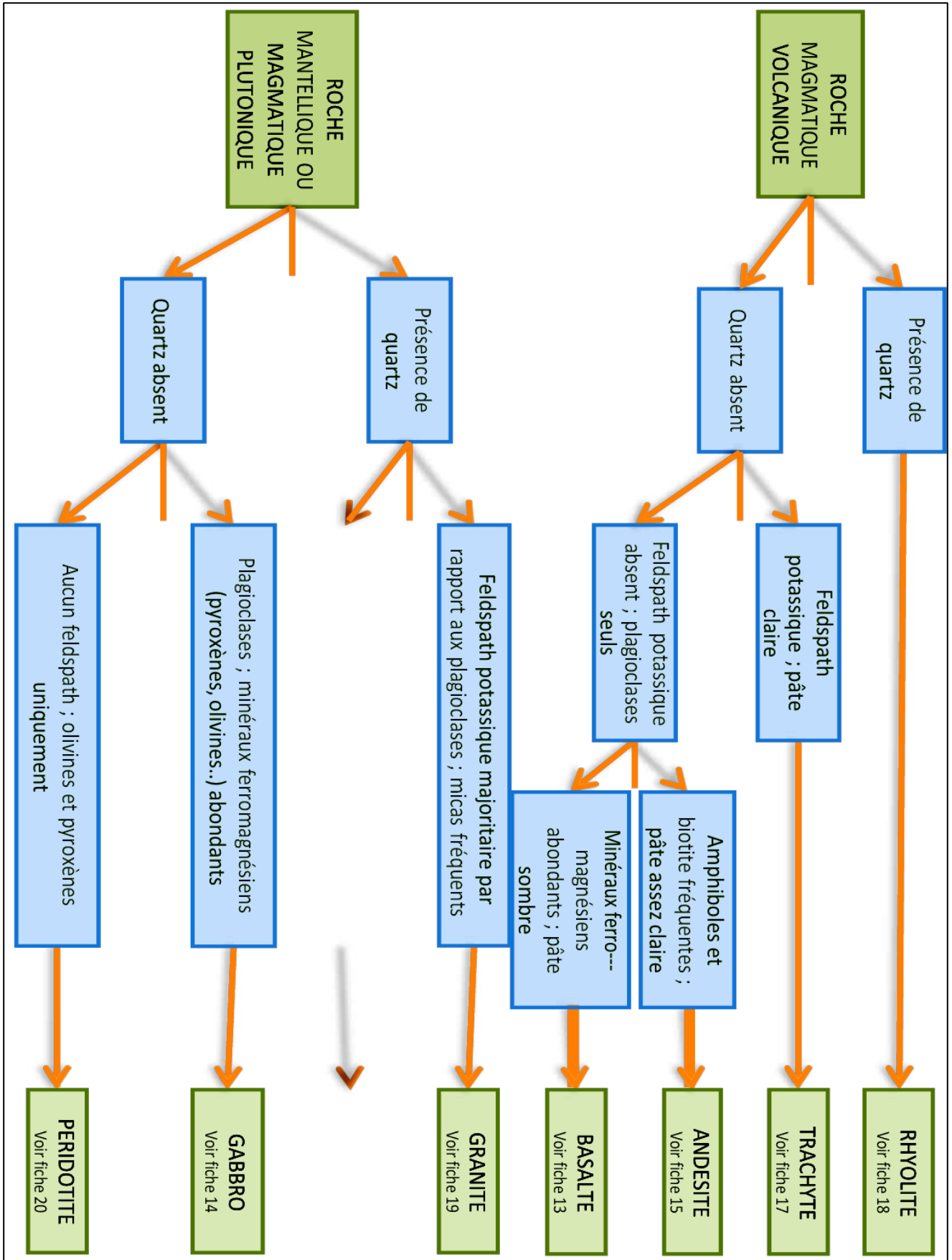


Figure 5. Clé de détermination des roches mantelliennes et magmatiques à partir d'un examen macroscopique



3.5.2 Clé de détermination des roches sédimentaires à partir d'un examen macroscopique (Figure 6)

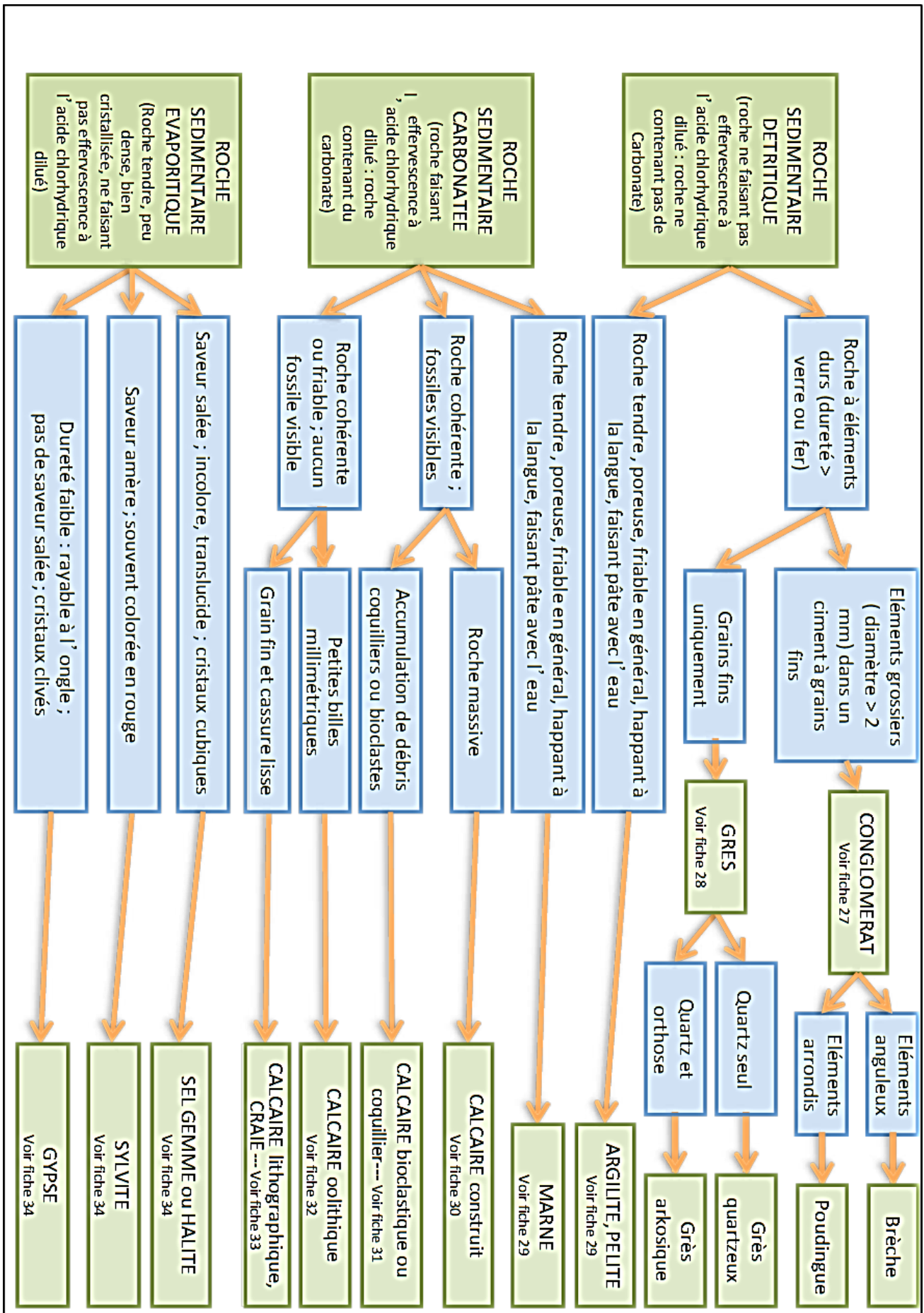


Figure 6. Clé de détermination des roches sédimentaires à partir d'un examen macroscopique



3.5.3 Clé de détermination des roches métamorphiques à partir d'un examen macroscopique (Figure 7)

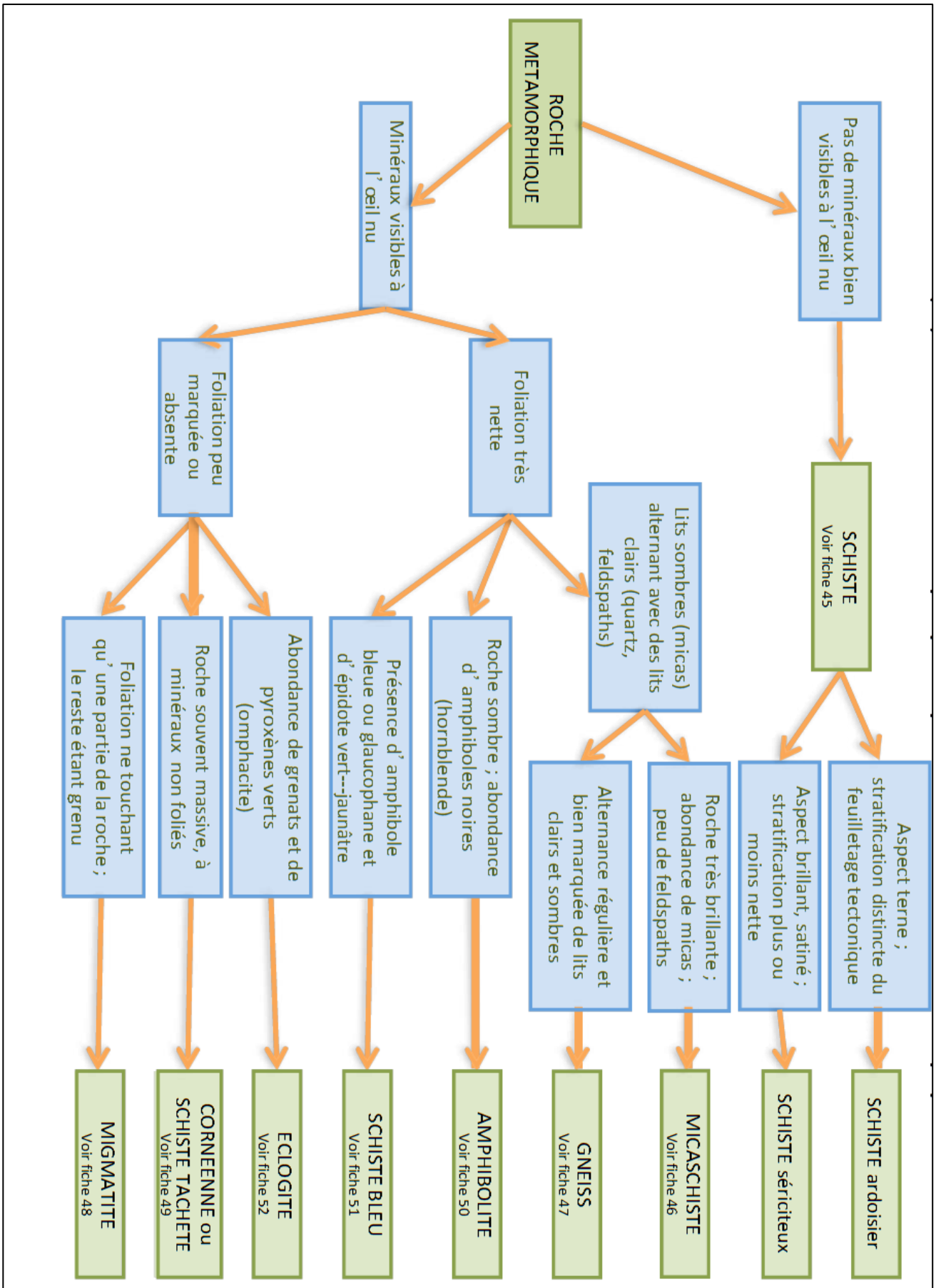


Figure 7. Clé de détermination des roches métamorphiques à partir d'un examen macroscopique

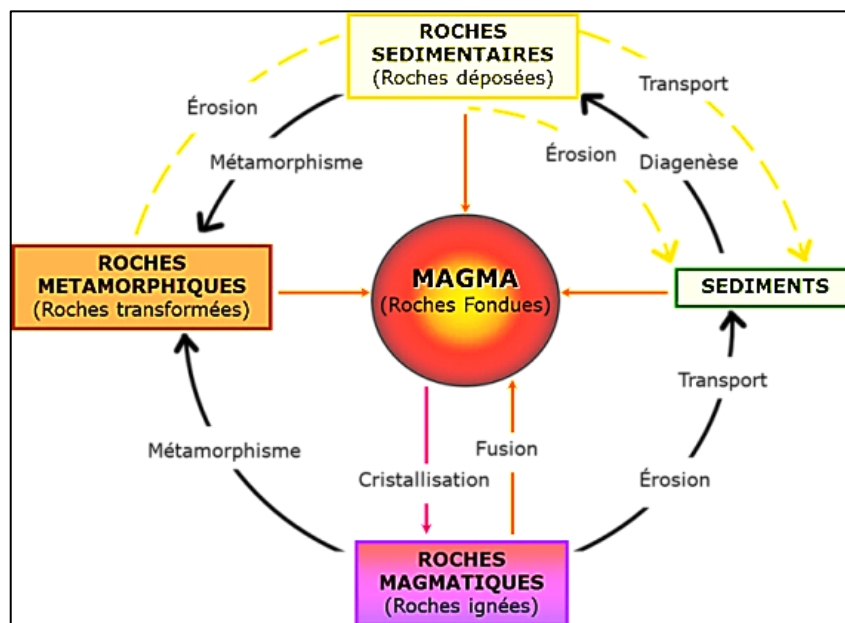
## 4 Les roches

Les *roches* sont des matériaux naturels, cohérents ou meubles, constituent d'un *assemblage des minéraux* qui peuvent s'ajouter *des fossiles* et des *débris d'autres roches*. Ces roches sont formées aux cours de processus bio-physico-chimiques que l'on regroupe en trois catégories :

1. *Les processus magmatiques*, à *haute température*, conduisant à la cristallisation de minéraux ou à la consolidation de verres naturels lors du refroidissement de magma, sortes de bains fondus généralement silicatés dont une image imparfaite nous est fournie par les laves rejetées par les volcans.
2. *Les processus sédimentaire*, comportant, dans le cas le plus général, la mobilisation des substances (solides et dissoutes) par l'érosion des roches préexistantes, le transport des produits de l'érosion par l'eau, le vent, la glace ou le seul effet de la gravité, le dépôt des matériaux amenés par les agents de transport dans les bassins de sédimentation et la transformation des sédiments meubles en une roche sédimentaire cohérente.
3. *Les processus métamorphiques* responsables de recristallisations de réactions entre les cristaux d'une roche lorsqu'elle est soumise à des conditions de température et de pressions différentes de celles qui régnaient au moment de sa formation.

### 4.1 Cycle géologique des roches

Nous avons vu que les roches sont classées en trois groupes : les roches métamorphiques résultent du refroidissement et de la recristallisation de magma, issus soit du manteau, soit de la fusion de la croûte. Les roches métamorphiques résultent de la modification des roches magmatiques ou sédimentaires, lesquelles proviennent de la consolidation (diagenèse) des sédiments. Comme ces sédiments proviennent de la désagrégation ou de la dissolution des roches sédimentaires, métamorphiques ou magmatiques, l'ensemble de ces phénomènes forme le cycle géologique (Figure 8).



**Figure 8.** Cycle géologique

## 4.2 Les roches magmatiques

On appelle magma un mélange silicaté qui se forme, par fusion partielle dans la croûte continentale ou le manteau. La cristallisation de ce magma donne naissance des roches magmatiques. On distingue deux types d'occurrence :

1. Le magma se cristallise en grandeurs profondes donne naissance de roches plutoniques ou intrusives.
2. Si des fractures permettent l'arrivée du magma à la surface, il s'écoule sous forme de lave qui par refroidissement, donne naissance des roches volcaniques (ou extrusives ou effusives).

### 4.2.1 Conditions de formations des roches magmatiques

Les conditions de formation de roches plutoniques et volcaniques sont très différentes :

#### 4.2.1.1 Les roches plutoniques

Se forment à des températures et pressions élevées. Leur refroidissement est lent et les différents minéraux ont donc le temps de cristalliser. La présence fréquente des constituants volatiles joue un rôle important en augmentant la fluidité du magma et abaissant le point de fusion des minéraux.

#### 4.2.1.2 Les roches volcaniques

Prendent naissance à des températures élevées mais à des pressions voisines à la pression atmosphérique. En se refroidissant brusquement, la lave fige sous forme de verre. Peu de minéraux ont le temps de cristalliser. La plupart des constituants volatiles s'échappés avant la mise en place de la lave.

### 4.2.2 Domaine du magmatisme

L'augmentation de la température à l'intérieur de la Terre favorise la fusion des roches libérant un liquide silicaté (Magma) qui circule au sein des masses réfractaires demeurées solides. La figure ci-dessous montre le domaine de formation de ces roches (Figure 9).

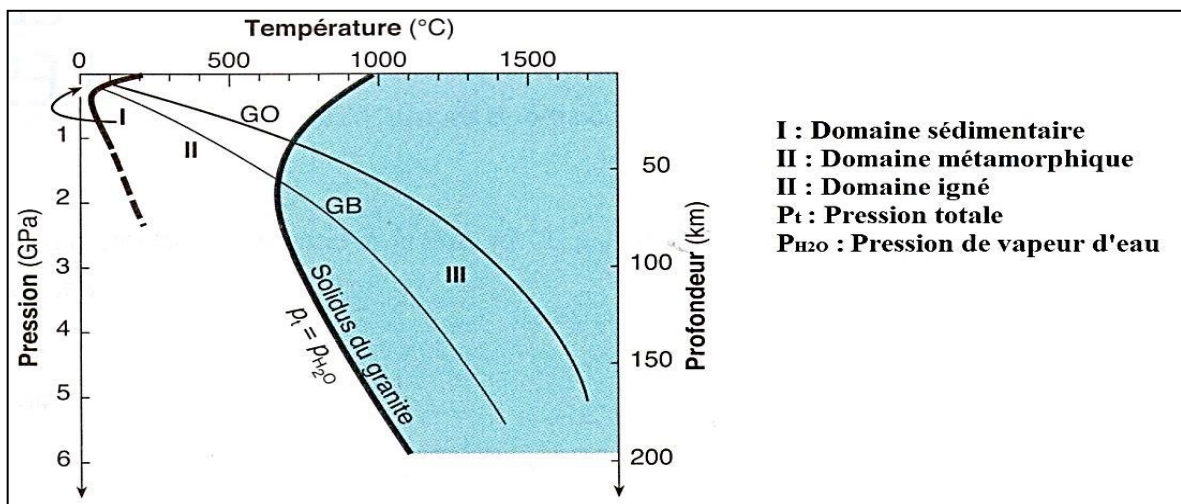


Figure 9. Diagramme P/T indiquant la position du domaine igné.

### 4.2.3 Classification des roches magmatiques

Les minéraux des roches magmatiques appartiennent à la grande famille des silicates. Ils peuvent être répartis en deux groupes : les minéraux felsiques (feldspath et silice) sont riche en silice et de couleur clair, les minéraux mafiques (magnésium et fer) sont riches en fer et en magnésium, de couleur sombre. Les roches magmatiques sont classées :

#### 4.2.3.1 Selon leurs proportions en minéraux mafiques

Selon la proportion en minéraux mafiques (color index) dans les roches, on distingue (Tableau 3) :

- Les roches leucocrates (<30%) ;
- Les roches mésocrates (30 à 60%) ;
- Les roches mélanocrates (> 60%).

#### 4.2.3.2 Selon leur contenu en silice on distingue

Selon le contenu en silice dans les roches, on distingue (Tableau 4)

- roches ultrabasiques (< 45% silice) ;
- Les roches basiques (45 à 52% silice) ;
- Les roches intermédiaires (52 à 66% silice) ;
- Les roches acides (> 66% silice).

**Tableau 3.** Classification basée sur divers paramètres.

Composition chimique et minéralogique  Gisement et structure	Roches acides		Roches intermédiaires		Roches basiques
	Feldspath orthose dominant		Pmagopemase dominants		
	Quartz	Peu de quartz	Plagioclase sodique acide	Plagioclase sodique basique	
Gisement d'épanchement structure vitreuse	PECHSTEN		OBSIDIENNES ET PONCE		TACHYLITE
Structure microlitique	RHYOLITE	TRACHYTE	ANDESITE	BASALTE	
Gisement de semi-profondeur	MICROGRANITE	MICROSYENITE	MICRODIORITE	MICROGABRO	
Structure microgrenue					
Gisement de profondeur	GRANITE	SYENITE	DIORITE	GABBRO	
Structure grenue					

**Roches volcaniques : en lettres minuscules**

**Roches plutoniques : en lettres capitales**

**Tableau 4.** Classification basée sur les minéraux et la coloration des roches

	Roches à quartz et feldspath		Roches à feldspaths seuls		Roches à feldspath et feldspathoïdes		Roches à feldspathoïdes seuls	
	Feldspaths alcalins	plagioclase	Feldspaths alcalins	plagioclase	Feldspaths alcalins	plagioclase	Néphéline	Leucite
ROCHES LEUCOCRATES	GRANITE rhyolite  GRANODIORITE rhyodacite  DIORITE QUARTZIQUE dacite		SYNETE trachyte				SYENITE NEPHELINIQUES phonolite	
ROCHES MESOCRATES			GABBRO basalte		basanite		néphéline	leucite
ROCHES MELANOCRATES				METAGABBRO métabasalte				
ROCHES HOLO-MELANOCRATES			AMPHIBOLITE PERIDOTITE PYROXENOLITE picrite		AMPHIBOLITE PERIDOTITE PYROXENOLITE picrite			

#### 4.2.4 Du magma à une roche magmatique

Lors d'un refroidissement lent (conditions plutoniques) quatre phénomènes qui contrôlent ce passage d'un magma à l'état de roche :

- *Cristallisation fractionnée* ;
- Ségrégation magmatique ;
- Assimilation ;
- Mélange.

#### 4.2.5 Configuration magmatique

Les types de l'activité magmatiques et la nature du magma sont liées à la configuration tectonique. En choisissant un profil au travers l'Atlantique, on a identifié les trois configurations magmatiques principales liées à la tectonique des plaques (Figure 10) : les rides dans l'océan (rift sur le continent), les zones de subduction et les points chauds (percées magmatiques au travers des plaques).

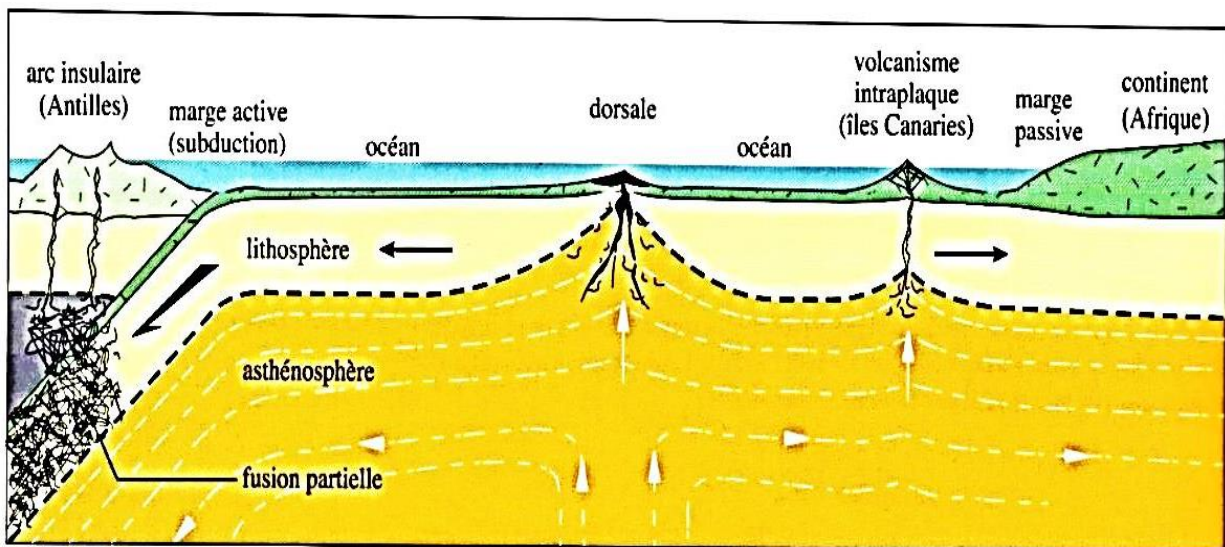


Figure 10. Trois configurations magmatiques rencontrées dans le profil au travers de l'Atlantique.

#### 4.2.6 Structure des roches magmatiques

Il s'agit de la disposition des minéraux telle qu'on peut l'étudier à l'échelle de l'échantillon, tant à l'œil nu qu'au microscope optique.

##### 4.2.6.1 Structure grenue

Lorsque la roche est composée de grains visibles à l'œil nu, non orientés et d'une taille comprise entre 5 mm et plusieurs centimètres (Figure 11A).

##### 4.2.6.2 Structure microgrenue

Les roches sont entièrement cristallisées mais constituées de microcristaux non orientés et invisibles à l'œil nu mais de taille < 5 mm. Cette structure est caractérisée par les filons et des zones périphériques des massifs plutoniques. Il peut exister des cristaux de grande taille (phénocristaux), la structure est dite porphyrique (Figure 11B).

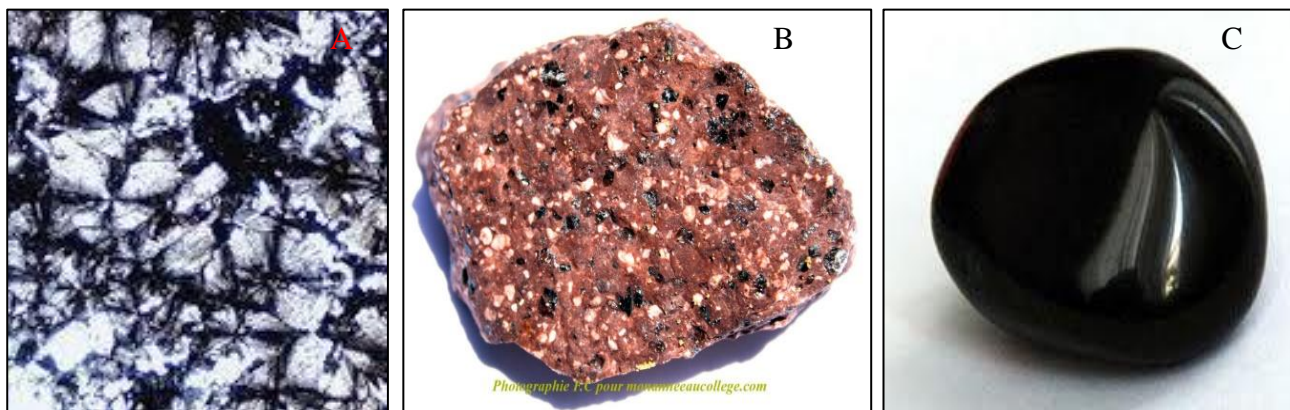


### 4.2.6.3 Structure microlitique

La roche n'est plus entièrement cristallisée. Il existe des cristaux et une pâte amorphe vitreuse qui indique une phase de refroidissement rapide (roche volcanique). Parmi les cristaux on observe quelques rares phénocristaux et de très nombreux microcristaux fins et allongés.

### 4.2.6.4 Structure vitreuse

Elle est relativement rare. Le refroidissement rapide (roche volcanique) n'est pas laissé le temps aux cristaux de se former (Figure 11C). C'est un véritable verre.



**Figure 11.** Différents types des structures cristallines. A : structure grenue, B : structure microgrenue, C : structure vitreuse

## 4.3 Les roches sédimentaires

Les roches sédimentaires disposées généralement en couches ou en strates, se reconnaissent par la présence fréquente de fossiles et des structures sédimentaires et aussi par la nature des minéraux qui les constituent (quartz, les argiles, les micas, la calcite...etc.).

Au sein du cycle géologique, les processus sédimentaires comprennent l'altération, l'érosion, le transport, le dépôt, et la diagenèse. Les sédiments détritiques, formés des grains issus de la dégradation de roches préexistantes, transportés et déposés dans un bassin de sédimentation, constituent l'illustration la plus évidente de cette la partie du cycle géologique. Dans le cas des sédiments biogéniques et biochimique les constituants sont amenés au bassin sédimentaire sous la forme des ions solubles.

La notion de faciès est à la base de l'analyse sédiment logique. Il correspond l'ensemble des caractères lithologiques (lithofaciès) et paléontologiques (biofaciès) d'un dépôt.

### 4.3.1 Structure d'une roche sédimentaire

Les roches sédimentaires sont formées des **grains** (éléments figurés) qui sont visibles à l'œil nu, d'origine détritiques ou biogéniques et constituent l'ossature de la roche. **La matrice** qui se trouve entre les grains et qui est constituées des particules plus fines. **Le ciment** qui désigne les minéraux qui se précipitent dans les interstices de la roche pendant la diagenèse et **les pores** (vides) correspondent le volume de la roche qui n'est pas occupé par les grains, la matrice ou le ciment.

### 4.3.2 Domaine de formation des roches sédimentaires

Les roches sédimentaires sont dites exogènes. Elles se forment dans des conditions de pression et de température peu élevées, à l'interface de l'écorce, de l'atmosphère et de l'hydrosphère. La figure ci-dessous montre le domaine de formation de ces roches (Figure 12).

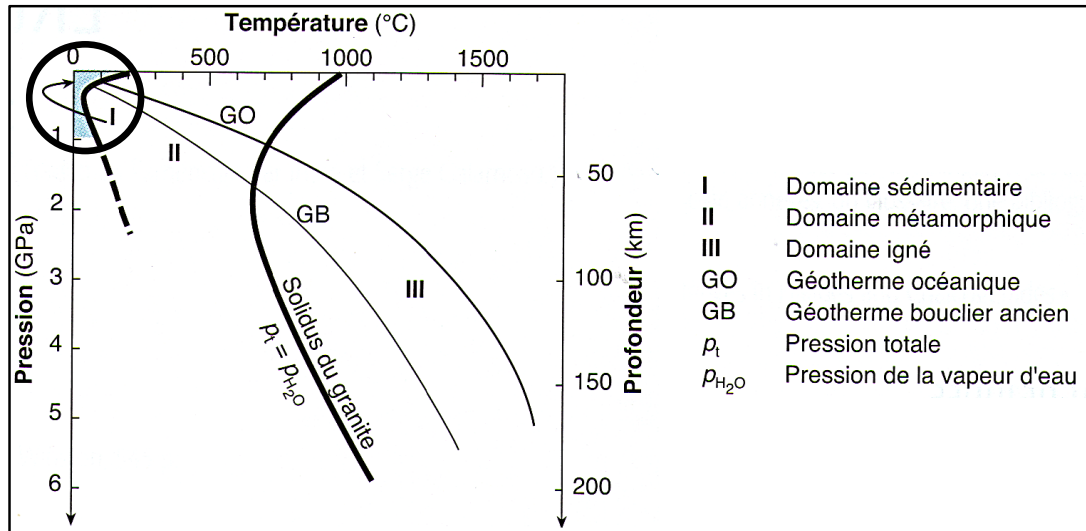


Figure 12 : Diagramme P/T indiquant la position du domaine sédimentaire

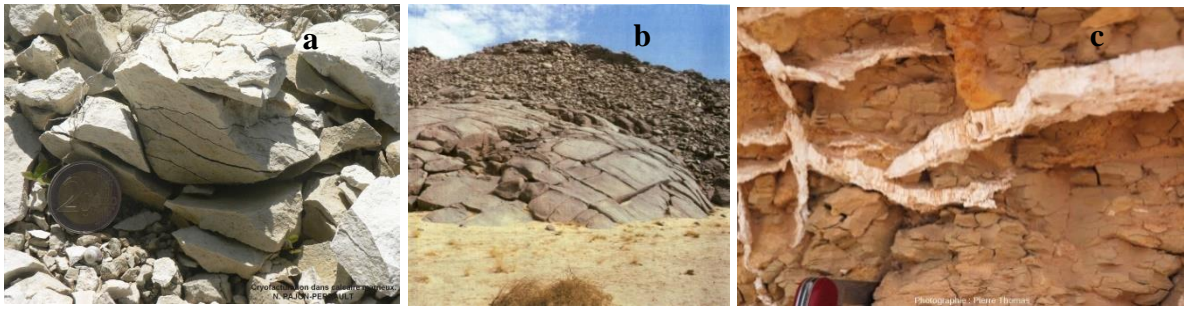
### 4.3.3 Processus de formation des roches sédimentaires

#### 4.3.3.1 Météorisation

Est l'ensemble des mécanismes conduisant à la désagrégation des roches exposés aux agents climatiques. On distingue trois processus :

1. **Altération physique ou la désagrégation mécanique** : Les massifs rocheux sont disloqués, fragmentés et progressivement réduits en arène, sans modification de leur composition minérale, ce mode de météorisation est dominant dans les déserts chauds et les régions froides. Les principaux mécanismes de désagrégation physique des roches sont :
  - **Variation thermique (thermoclastie)**: Chaque minérale a son propre coefficient d'expansions thermique, les surfaces rocheuses exposées aux agents climatiques (soleil) subissent des écarts thermiques diurnes et nocturnes qui entretiennent des tensions répétitives entre les grains des minéraux, ce qui les disloque et les délogent progressivement (Figure 13a). Ce mécanisme de désagrégation est important dans les déserts chauds.
  - **Cryoclastie ou Gélifraction**: Est provoquée par les cycles de gel et de dégel de l'eau infiltrée dans les roches et génère des contraintes en extension dans les matériaux lorsqu'elle gèle. Après de nombreux cycles de gel/dégel, les fissures des roches agrandies et des débris (gélifractions) peuvent être détachés. Ce mécanisme de désagrégation est conduit à la fragmentation de la roche en débris anguleux, mais variable selon la texture de la roche sous les climats tempérés, froids et humides (Figure 13b).
  - **Formation de cristaux** : Lorsque l'eau d'infiltration devient sursaturée par l'évaporation, elle précipite des minéraux qui créent des tensions dans la roche durant leur croissance. Ce mécanisme de désagrégation est occasionnel dans les déserts chauds mais plus fréquent dans les ouvrages en béton affectés par la formation de gypse (Figure 13c).





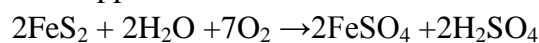
**Figure 13 :** **a** : Effet de la variation thermique sur les roches. **b** : Effet du phénomène de gel et dégel sur les roches de surface –Oued Otoul, Hoggar, **c** : Précipitation de gypse au sein des roches.

**2. Altération chimique :** elle tend à transformer les minéraux en composés plus stables à pression atmosphérique. Les principaux mécanismes de ce phénomène sont :

- **L'hydrolyse :** Est le processus d'altération chimique le plus fréquent, phénomène d'échange entre l'eau acide et les minéraux silicatés (concerne la dissolution des cations et des anions d'une roche par l'eau). L'action de l'eau peut être renforcé par la présence de CO<sub>2</sub> ou par le pH très élevé (alcalinolyse) ou très bas (acidolyse). L'exemple type de la réaction d'hydrolyse est celui de la forstérite :



- **L'oxydation:** Est souvent le premier signe d'altération chimique observable. Comme la plupart des roches contiennent de fer dans leur composition, la formation d'oxydes et hydroxydes de fer fait apparaître une couleur rouille caractéristique.



- **La carbonatation :** Est la formation de carbonates avec les cations solubilisés durant l'altération des feldspaths et des ferromagnésiens. L'acide carbonique se forme par dissolution de CO<sub>2</sub> dans l'eau.  $2\text{KOH} + 2\text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{K}_2\text{CO}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$

- **La dissolution :** Est le processus de dissociation des carbonates, chlorure, sulfates et phosphates par l'eau. La transformation en bicarbonates de calcium conditionne la mise en solution dans une eau chargée d'acide carbonique. Ce processus de dissolution est résumé dans la formule suivante :  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow (\text{HCO}_3)^{-2} + \text{Ca}^{2+}$

- **L'hydratation (hydroclastie) :** C'est une incorporation de molécules d'eau liquide à certains minéraux des roches qui sont capables de l'absorber et la fragmentation est provoquée par la variation de la teneur en eau contenus dans la roche ou dans les minéraux (comme les oxydes de fer) par des phénomènes alternant de retrait/gonflement; et donc favorise la destruction de la roche.

**3. L'Altération biologique :** est désignée également la contribution des êtres vivants à l'altération des roches causée par l'homme, la construction, l'exploitation minière et l'extraction, effet de l'agriculture ...etc. (Figure 14a). **Les animaux** fouisseurs (les blaireaux et les taupes, rongeurs) (Figure 14b) qui creusent des terriers dans les roches, les verres de Terre, fourmis, termites...etc. **Le couvert végétal dense**, les forêts, limite l'érosion en dissipant l'énergie de la pluie, favorise l'infiltration et s'oppose toute formes de l'érosion. Les racines des arbres, des herbes et d'autres plantes peuvent pousser dans de petits espaces et des lacunes dans la roche et au cours de leur croissance élargissent les fissures des roches (Figure 14c).

**Les bactéries, les algues et les champignons** : pour assurer leur fonctionnement, certains organismes lithophones, prélèvent nutriments et énergie au domaine minéral.



**Figure 14** : Forme de contribution des êtres vivants à la désagrégation physiques des roches.

4. **L'érosion** : Correspond à la mobilisation des produits de l'altération. Une fois libérés, ces produits sont transportés par le vent, l'eau, la glace...etc., laissant certaines formes d'érosion caractéristiques sur les massifs rocheux soumis à l'altération. Nous envisageons ci-dessous les plus caractéristiques :

- **L'érosion éolienne** : le vent soufflant sur une surface désertique balaie les particules les plus fines et peut faire apparaître la surface rocheuse. Lorsque le sol comporte des matériaux de tailles variées (alluvions), la déflation élimine la fraction la plus fine, laissant sur place un désert pavé de cailloux ou Reg (Figure 15).



**Figure 15.** Erosion éolienne (Reg).

- **Le ruissèlement et l'érosion fluviale** : en terrain meuble, après une forte pluie, les eaux empruntent les fissures du sol, les élargissent progressivement en chenaux parallèles qui fusionnent par écroulement des crêtes qui les séparent. En même temps les crêtes des chenaux reculent en amont. Ce processus est responsable du développement des *Bad land*. En terrain calcaire, la dissolution par les eaux de ruissèlement forme les *lapiez*. Dans des dépôts particulièrement hétérogènes (moraines glaciaires) la présence de blocs très lourds rend les argiles sur laquelle ils reposent plus compact et la protège du ruissèlement : c'est de cette façon ils naissent les cheminées de fées ou *demoiselles*

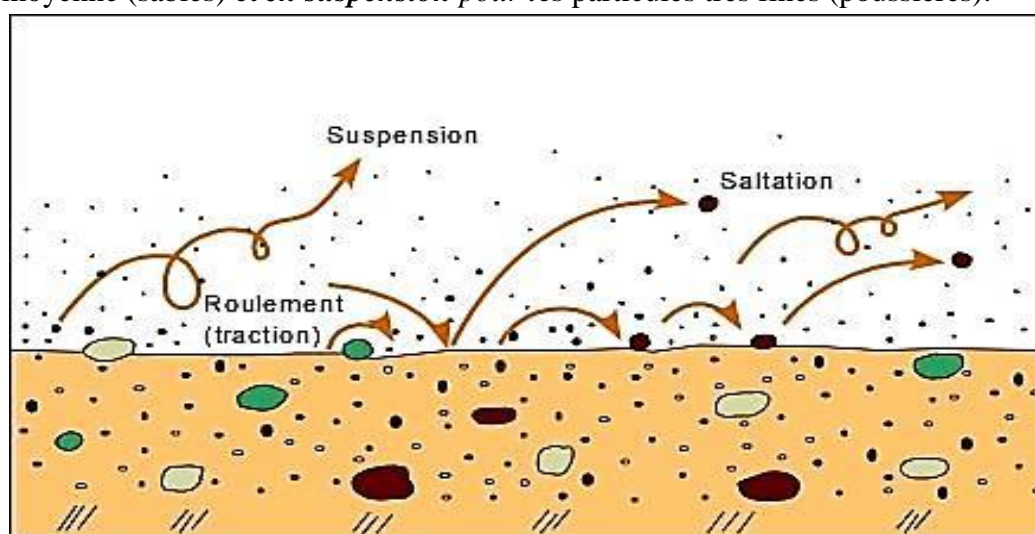
*coiffées*. En fin les spectaculaires *chaos granitiques* sont dus à la mobilisation de l'arène granitique.

- **L'érosion karstique** : les formes d'érosion qui résultent de la dissolution des roches (les calcaires) par les eaux douces chargées de CO<sub>2</sub> sont très particulières : elles reçoivent le nom de morphologie karstique.
- **L'érosion glaciaire** : les formes de ce type d'érosion sont visibles à deux échelles : à grande échelle, on observe des vallées en U avec des parois verticales s'oppose à la forme en V des vallées fluviales. A petite échelle, l'érosion glaciaire se manifeste par des surfaces polies et arrondies (*roches moutonnées*), souvent éraflées par des blocs durs enchâssés dans la glace.

#### 4.3.3.2 Le Transport

Les matériaux qui en résultent de l'altération et l'érosion sont entraînés par des agents de transport sous forme de sédiments. On distingue plusieurs modes de transports :

1. **Le transport Eolien**, où le vent est l'agent de redistribution de la matière à la surface du globe terrestre. Il prélève des particules, les déplace sur une distance de quelque à plusieurs dizaines de km, en provoquant des «vents de sable» et les dépôts. Les mouvements des particules solides qu'ils transportent s'effectuent selon des modalités (Figure 16) : par *charriage ou roulement* pour les plus grosses particules, *la saltation* pour les particules de taille moyenne (sables) et *en suspension* pour les particules très fines (poussières).



**Figure 16** : Modes de transport des particules.

2. **Le transport par glace** se caractérise le climat froid et humide où la neige se transforme en glace qui s'écoule comme un fluide visqueux pour former un glacier (Figure 17a). Pour certains, les glaciers sont de puissants agents érosifs du substratum, mais leur pouvoir d'érosion est sélectif (selon nature du substratum). D'une façon générale, les glaciers de montagne, très mobiles, sont des agents érosifs plus actifs que les inlandsis (calottes polaires), plus lents et plus froids.
3. **Le Transport par l'eau** affecte les matériaux désagrégés et arrachés, des roches exposées à la météorisation, vers les oueds. La charge d'une rivière et sa compétence de transport (régime) est plus faible que celle d'un glacier et dépasse rarement quelques dizaines de cm<sup>3</sup> (Figure 17c).



4. **Le Transport par gravité** (pesanteur) se rencontre dans les régions présentant des hautes altitudes et où la désagrégation mécanique est forte (montagnes et déserts). Les éléments arrachés sont déplacés sur une faible distance, quelques centaines de mètres, sont non usés et de toute taille (Figure 17b).

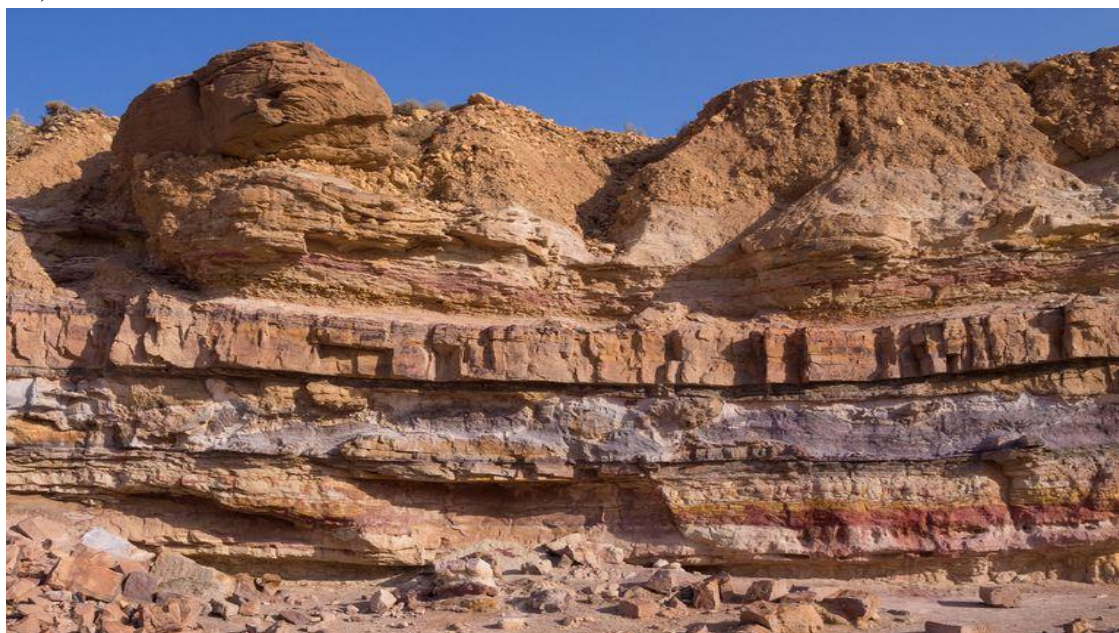


**Figure 17** : Différentes formes de transport. a : Transport des sédiments par glace, b : transport des particules par gravité, c : transport des particules par l'eau.

#### 4.3.3.3 Sédiments et sédimentation

On définit les sédiments comme un ensemble de particules d'origine minérale et/ou organique, qui se dépose sur une surface définie (l'aire de sédimentation) d'un bassin sédimentaire. Les sédiments ont en plus de la matière organique de deux origines possibles : l'une est l'aplanissement des reliefs continentaux (altération et érosion d'une roche mère : origine « exogène ») et l'autre est l'émersion de matériel volcanique (origine « endogène »).

Une roche sédimentaire témoigne, par ses faciès, du milieu de sédimentation où elle a pris naissance. Le faciès d'une roche est l'ensemble de ces caractères lithologiques (composition minéralogique, composition chimique, aspect sur le terrain), et des caractères paléontologiques (nature et situation des fossiles qu'elle contient). Les observations en lame mince permettent de préciser ces caractères et de définir le microfaciès. L'étude des macros faciès et des microfaciès des roches sédimentaires révèle leurs conditions de genèse par les renseignements directs qu'elle apporte sur les milieux de sédimentation mais aussi par ceux, indirects, qu'elle donne sur les régions voisines, elle permet la reconstitution des paysages anciens, c'est-à-dire la paléogéographie d'un espace donné (Figure 18).



**Figure 18**: Sédimentation des dépôts.

#### 4.3.3.4 La Lithification et la Diagenèse

On appelle Lithification ; le processus par lequel un sédiment non-consolidé est converti progressivement en une roche sédimentaire. Pendant la lithification, des changements physiques, chimiques et biologiques se déroulent, ce que l'on appelle diagenèse. La diagenèse englobe tous les processus chimiques, biochimiques et mécaniques qui transforment les sédiments après leur dépôt en une roche sédimentaire consolidée.

La diagenèse ne comprend que les phénomènes affectant les sédiments entre la surface et une profondeur de dizaine de km où la température avoisine 300°C. Au-delà, de ces conditions de pression et de température, les modifications diagénétiques appartiennent au métamorphisme. A partir de l'influence de ces paramètres, on distingue les processus suivant : **les processus biologiques** (bioturbation et la décomposition de la matière organique par l'activité bactérienne), **les mécanismes physiques**, dominant dans les premiers stades de la compaction et **les transformations chimiques** qui traduisent les interactions entre les fluides interstitiels et les particules solides. L'évolution diagénétique peut être divisée en quatre phases principales de durée inégale et croissante : la **pédogénèse** : évolution précoce des carbonates et de la silice, **la mobilité des ions** en solutions interstitielles et compaction mécanique. Autigenèse : épigénèse et néoformation, **la dissolution et le début de la compaction** : cimentation (lithification) et réduction de la porosité et **la déshydratation et compaction** chimique à son intensité maximale.

#### 4.3.4 Classification des roches sédimentaires

Trois critères essentiels sont généralement utilisés pour la classification des roches sédimentaires : **d'après le milieu de dépôts (faciès)** : On aura les roches marines (Ex : les calcaires à nummulites) et les roches lacustres ou lagunaires (Ex : gypse, huile, calcaire à limnées), **d'après les mécanismes de genèse** : On aura la famille des roches détritiques (Ex : sables, grés, conglomérats...) et la famille des roches biochimiques ou biogènes résultant de l'accumulation des organismes mortes, ou de la partie minérale (Ex : craie, radiolaires) ou organiques (Ex : huile), bioconstructions (Ex : coraux, calcaires d'algues) et **d'après la composition chimique** On aura les roches carbonatées, les roches siliceuses, les roches ferrifères, les roches évaporitiques, les roches phosphatées ou phosphorites, les roches carbonées ou organiques et les roches argileuses.

#### 4.3.5 Les familles des roches sédimentaires

On peut répartir les roches sédimentaires en quatre grandes classes génériques :

##### 4.3.5.1 Les roches détritiques

Elles sont formées de grains issus de l'altération de roches préexistantes (matériel terrigène). Ces grains sont transportés par les agents de transport et se déposent lorsque la vitesse de ces agents diminuée. Les roches détritiques sont classées en fonction de la granulométrie de leurs constituants (conglomérats, grés, sables argilites...). Elles forment plus de 65% de l'ensemble des roches sédimentaires.

##### 4.3.5.2 Les roches biogéniques, biochimiques ou organiques

Elles sont le produit d'une activité organique ou biochimique. L'altération fournit des substances dissoutes qui aboutissent dans la mer, les lacs, ... où elles sont extraites et précipitent par les microorganismes pour constituer leurs tests ou leurs os. Les plantes accumulent des matériaux carbonés par photosynthèse et sont directement à l'origine du charbon. D'autres types de sédiments

carbonés comme les schistes bitumineux, le pétrole, sont générées par l'altération de la matière organique. Les roches biogéniques forment près de 12% des roches sédimentaires.

#### 4.3.5.3 Les d'origine chimique

Résultent de la précipitation des minéraux dans un milieu sursaturé. Les évaporites (halite, anhydrite, gypse...) sont formées par l'évaporation des saumures.

#### 4.3.5.4 Les pyroclastites

L'origine n'est pas liée à l'altération, injectées directement dans les bassins de sédimentation par des processus volcaniques. Ces roches forment environ 22% des roches sédimentaires.

### 4.4 Les roches métamorphiques

On appelle une roche métamorphique un roche de nature quelconque (donc aussi bien magmatique ou sédimentaire) affectée par le métamorphisme, lui-même définit comme l'ensembles des modifications minéralogiques et texturales qui apparaissent dans les roches lorsqu'elles soumises à des conditions physiques (pression et température) différentes de celles qui régnaient au moment de leur formation.

Si le métamorphisme affecte les roches sédimentaires, on parle des roches para-métamorphiques ; s'il s'agit des roches magmatiques, d'ortho-métamorphisme ; enfin, s'il s'agit de roches déjà métamorphisées antérieurement on utilise le terme poly-métamorphisme

#### 4.4.1 Domaine des roches métamorphiques

En principe, le domaine des roches métamorphiques s'étend en température de 50-100°C à 650-700°C, et en pression de quelques atmosphères à quelques milliers atmosphères. Le processus qui, à des pressions faibles ou moyennes à des températures inférieures à 100°C, aboutit à une simple compaction et à un départ d'eau dans les minéraux fortement hydratés (*diagenèse*), puis le *métamorphisme*, la zone de transition est l'*anchmétamorphisme*.

Le degré le plus élevé du métamorphisme conduit à la *fusion totale* ou partielle des roches dépendant fortement de l'hydratation du milieu. Ainsi, le domaine de l'*anatexie* (fusion partielle des roches), qui est limité par le solidus du granite, vient-il recouvrir le domaine du métamorphisme (Figure 19). L'anatexie de la croute continentale aboutit à la formation in situ d'un magma de composition granitique (*néosome*) qui se mélange à la trame des roches métamorphiques (*paléosome*)

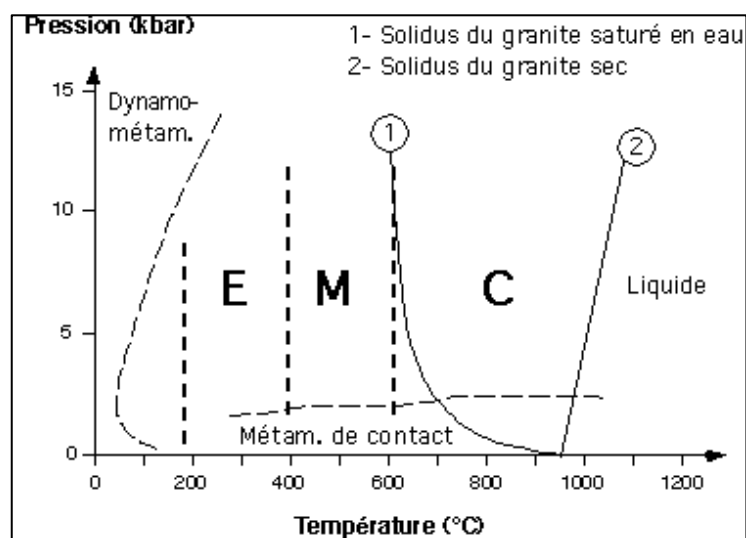


Figure 19. Conditions de formation des roches métamorphiques.

#### 4.4.2 Structure des roches métamorphiques

La structure des roches métamorphiques est un caractère important qui apporte souvent une information sur l'intensité de leur formation. L'orientation préférentielle des minéraux dans un plan par les processus tectoniques porte ainsi le nom de schistosité. Elle se marque le début de feuillets de certaines roches. Le plan de schistosité représente le plan de d'aplatissement de la matière lors de la déformation. Il est perpendiculaire à l'axe de raccourcissement et est très visible lorsqu'il est sécant par rapport à la stratification. On distingue plusieurs types de schistosité :

- **La schistosité espacée disjointe** dont les plan sont espacés de quelques millimètre voir de centimètre (anciennement schistosité de fracture). Ce type de schistosité n'implique jamais de recristallisation des minéraux de la roches (ex : schiste silteux).
- **La schistosité espacée de la crénulation**, d'espacement millimétrique, le long de laquelle les roches sont plissées.
- **La schistosité continue**, correspond à un espacement inframillimétrique (anciennement schistosité de flux). Dans ce type de schistosité une partie des minéraux se réoriente sous l'effet de la contrainte en se disposant parallèlement au plan d'aplatissement. De nouveaux minéraux peuvent apparaître, également orientés dans le plan d'aplatissement. C'est le cas des phyllades et des ardoises.
- Si on a une recristallisation importante, on a une **schistosité continue de type cristallophyllienne**. C'est le cas des micaschistes et de gneiss.

D'autres structures à l'échelle des grains (microstructures) sont aussi caractéristiques des roches métamorphiques. On cite :

1. **La structure granoblastiques**, caractérisée par la présence des minéraux équigranulaires sans orientation particulière.
2. **La structure lépidoblastique** (écaille), propre aux roches formées de minéraux lamellaires comme les micas.
3. **La structure nématoblastique** caractérisée par la prédominance des minéraux fibreux, allongés selon une direction générale commune, comme les amphiboles.
4. **La structure porphyroblastique**, définit par la présence des grands cristaux se détachant sur une trame finement cristallisée, comme le gneiss oeillé.
5. **La structure hélicitique**, variante de la précédente, où de grands cristaux se sont développés pendant la déformation en tournant sur eux-mêmes.

#### 4.4.3 Classification des roches métamorphiques

On peut distinguer trois groupes des roches métamorphiques sur la base de **la structure** : les **schistes** sont caractérisés par une schistosité bien développée, provoquant un débit en plaquettes, les **gneiss** possèdent un débit très fruste et les **granofels** sont particulièrement massifs.

A la base de la **composition minéralogique**, soit en utilisant les minéraux majeurs comme préfixe (ex : micaschiste), soit en mentionnant les minéraux importants après le nom de la roche (ex : gneiss à grenat). Dans certains cas, la roche de départ peut être identifiée et des roches



métamorphiques nommées en ajoutant le préfixe « *méta* » au nom de la roche sédimentaire ou magmatique originelle (ex : méta-basalte, meta-greywacke). Par ailleurs, lorsque de roche métamorphique contient plus de 75% d'un minéral, en ajoutant simplement le suffixe « *ite* » au nom du minéral (ex : épidotite).

#### 4.4.4 Facteurs du métamorphisme

Les principaux facteurs du métamorphisme sont :

##### 4.4.4.1 L'augmentation de la pression

Résulte le plus souvent des forces exercées verticalement par le poids des roches subjacentes et des forces orientées horizontalement, liées aux mouvements de l'écorce terrestre (pression dirigée). Comme la chaleur diminue la résistance des roches, la pression dirigée les déforme. Les minéraux recristallisent, subissent des rotations, s'allongent et s'alignent selon une direction déterminées par la déformation.

##### 4.4.4.2 L'augmentation de la température

Peut résulter soit de l'enfouissement, soit de la présence d'un corps magmatique. La température croît avec la profondeur : c'est ce que l'on appelle le *gradient thermique* (*température en profondeur-température de surface*)/profondeur). Sa valeur moyenne est de 30°C/km, mais on observe une grande variation de ce paramètre en fonction des différentes régions de l'écorce terrestre (20 à 60 °C/km). En ce qui concerne les intrusions, la température de fusion complète du basalte est d'environ 1200°C à la pression atmosphérique et celle du granite d'environ 800°C.

##### 4.4.4.3 Les fluides

Présents à l'interface des grains minéraux jouent un rôle important dans le déroulement des réactions métamorphiques puisqu'ils facilitent la diffusion des éléments. Les constituants les plus importants de ces fluides sont H<sub>2</sub>O et CO<sub>2</sub>, mais d'autres molécules comme CH<sub>4</sub>, NaCl...sont également présentes. L'origine de ces fluides peut être l'eau marine piégée dans les sédiments, modifiée par les réactions de diagenèse et les réactions métamorphiques. Comme ces dernières sont souvent des réactions de déshydratations et/ou décarbonatation, elles fournissent nécessairement des fluides.

Les facteurs du métamorphisme le développement d'un métamorphisme croissant ou *prograde*, correspond à un accroissement de la pression et/ou de la température. On observe aussi un métamorphisme décroissant ou *rétrograde* affectant les roches métamorphiques ramenées en surface par l'érosion.

#### 4.4.5 Types de métamorphisme

Sur la base de circonstances géologiques sur lesquelles se produit le métamorphisme, on distingue les types suivants :

##### 4.4.5.1 Le métamorphisme régional

C'est le type de métamorphisme le plus important tant par sa fréquence que par l'étendue des volumes affectés. On l'observe habituellement à la base des séries sédimentaires caractérisant les zones orogéniques (zone de convergence). Le métamorphisme résulte ici de l'action combinée de l'augmentation de température, de la pression lithosphérique et de l'existence des pressions dirigées. Les produits de ce métamorphisme sont caractérisés par la (re)cristallisation des cristaux sous pressions élevées, conduisant à leur aplatissement suivant une direction ou un plan privilégié (schistosité) et à la ségrégation des différents minéraux en couches alternantes (foliation).

#### **4.4.5.2 Le métamorphisme de contact**

Se développe dans l'aurole thermique liée à la mise en place de magmas chauds dans les roches encaissantes plus froides. C'est un phénomène d'extension limitée puisque la conductivité thermique des roches est faible. Par ailleurs, il résulte d'une augmentation de température sans intervention de pression dirigée, les roches métamorphiques produites par ce type de phénomène ne montrent pas de schistosité.

#### **4.4.5.3 Le métamorphisme d'impact**

Est spécifiquement lié aux impacts des météorites. Il induit la fracturation voire la fusion partielle des roches ainsi que l'apparition de minéraux de haute pression.

#### **4.4.5.4 Le métamorphisme d'enfouissement**

S'observe dans des dépôts sédimentaires et volcano-sédimentaires d'épaisseur importante. L'augmentation progressive d'épaisseur des dépôts sus-jacents provoque une augmentation de température et de pression lithostatique qui produit l'apparition de nouvelles associations minérales. Ce type de métamorphisme est très faible intensité et se manifeste dans les roches volcaniques interstratifiés dans la plie de sédiments. Comme aucune pression dirigée n'intervient, les roches ne sont pas déformées.

#### **4.4.5.5 L'autométamorphisme des corps magmatiques**

Correspond à la transformation des minéraux des roches magmatiques par l'action de leur propre fluides résiduels, enrichis en éléments volatiles (ex : transformation des olivines en serpentine).

#### **4.4.5.6 L'értrométamorphisme**

Est un métamorphisme rétrograde conduisant au réajustement à des conditions de basses pression et température d'un assemblage minérale de hautes pressions et température.

#### **4.4.5.7 La dynamométamorphisme**

Se produit dans la partie superficielle de la croûte, où les pressions dirigées l'emportent sur la pression atmosphérique et l'élévation de température. Les roches subissent des déformations purement mécaniques associées ou non à des phénomènes de recristallisation.

## Références bibliographiques

1. **Bardintzeff J.M., 2011-** Volcanologie. 4<sup>ème</sup> édition. Edition Dunod, 313p.
2. **Beaux J.F., Fogelgesang J.F., Agard P. et Boutin V., 2011-** Atlas de Géologie – Pétrologie. Edition Dunod, 143p.
3. **Beaulieu J., Authier M., Lucotte M., Moingt M., Occhietti S., Pinti D.L. et Quirion M., 2013.** Notions de Géologie. 4<sup>ème</sup> édition. Edition MODULO, 639p.
4. **Bonin B. et Moyen J.F., 2011-** Magmatisme et roche magmatiques. 3<sup>ème</sup> édition. Edition Dunod, 313p.
5. **Boulvain F., 2013.** Géologie. Géologie générale du minéral aux géosphères. Edition ellipses,
6. **Campy M., Macaire J.j. et Grosbois C., 2013.** Géologie de la surface. 3<sup>ème</sup> édition. Edition Dunod, 441p.
7. **Charles P. Yeves L. et Maurice R. 2003.** Eléments de géologie. 12<sup>ème</sup> édition, Edition Dunod, 746p.
8. **Dehouck E., 2012.** Caractérisation des processus d'altération à la surface de Mars primitive par approche expérimentale et télédétection. Thèse de doctorat. Université de Nantes. 373p.
9. **Dewolf Y. et Bourrié G., 2008.** Les formations superficielles. Genèse-Typologie - Classification. Paysage et environnement – genèse et risques. Edition Ellipses, 798p.
10. **Foucault A. Raoult J.F. Cecca F., 2010.** Dictionnaire de Géologie : 7<sup>ème</sup> édition. Edition Dunod, 388p.
11. **Landry B., Gauthier M., Lucotte M., Moingt M., Occhietti S., Pinti D.L. et Quirion M., 2013.** Notions de géologie. 4<sup>ème</sup> édition. Edition Dunod, 640p.
12. **Parriaux A., 2009.** Géologie base pour l'ingénieur. Edition Polytechnique et Universitaires Pomandes, 581p.
13. **Pereira-Barreto S., 1960.** Altération des roches et mise en place des principaux types de sol dans le Guidmaka. Centre de Pédologie de Hann-Dakar, 63p.
14. **Peycru P., Dupin J.M., Fogelgesang J.F. et Grandperrin D., 2008.** Géologie - Tout-en-un, 1e et 2ème années BCPST. Edition Dunod, 641p.
15. **Renard M., Lagabrielle Y. et Martin E et Rafélis M., 2015.** Éléments de géologie. 15<sup>ème</sup> Edition. Edition Dunod, 1042p.
16. **Roberts J.L., 2006.** Minéraux, roches et fossiles. Edition Broquet, 128p.
17. **Robert C. et Bousquet R., 2013.** Géosciences : La dynamique du système terre. Edition Belin, 1159p.
18. **Soleilhavoup F., 2010.** Curiosité géologiques au Sahara. Edition IBIS PRESS, 255p.
19. **Yaichi B. et Benali M., 2013.** Les altérations des granites et des basaltes. Mémoire d'Ingéniorat, Université d'Oran, 86p.

### Sites web consultés

20. <http://www.cours-geosciences.univ-lille1.fr>
21. <http://www.e>
22. [duterre.ens-lyon.fr](http://duterre.ens-lyon.fr)
23. <http://www.geo.umass.edu>
24. <http://www.glaciers-climat.fr>
25. <http://www.howlingpixel.com>
26. <http://www.innoverensvt.com>
27. <http://www.les.mineraux.free.fr>
28. <http://www.mediachimie.org>
29. <http://www.pairform.fr>
30. <http://www.pierrotcdl.over-blog.com>
31. <http://www.pinterest.fr>
32. <http://www.planet-terre.ens-lyon.fr>
33. <http://www.roche-sedimentaire.e-monsite.com>
34. <http://www.slideserve.com>
35. <http://www.thoughtco.com>