

Chapitre I : Étude des minéraux

L'étude des minéraux et des roches fait l'objet de la minéralogie et de la pétrographie.

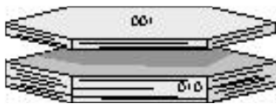
I. Reconnaissances macroscopiques des minéraux

→ **La forme** d'un minéral dépend de son système cristallographique. Le minéral présente des faces planes et un certain nombre de symétries (axes, plans, points).

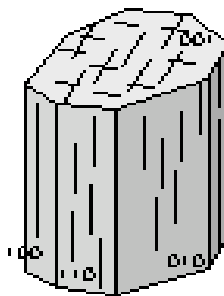
→ **La couleur** : critère bien repérable, mais rarement un critère d'identification (elle dépend souvent des impuretés : le quartz peut être transparent, blanc, noir, violet, ... selon sa teneur en impuretés).

→ **L'éclat** = expression du pouvoir réflecteur du minéral (/ absorption de la lumière) .

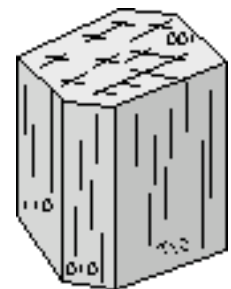
→ **Les clivages** = plans préférentiels de rupture sous des efforts généralement faibles.



Micas
1 clivage



Pyroxènes
2 clivages à 90°



Amphiboles
2 clivages à 56°

→ **Les macles** : accolement de deux ou plusieurs cristaux suivant des orientations relatives bien définies. Caractéristiques d'une espèce, leur observation est souvent malaisée.



Staurodite (silicate)
Mâcle de la croisette



Gypse
Mâcle en fer de lance

→ **La dureté** : caractéristique facile à mesurer de manière relative : un corps plus dur qu'un autre le raye et inversement ⇒ une échelle de dureté de MOHS.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Talc	Gypse	Calcite	Fluorine	Apatite	Orthose	Quartz	Topaze	Corindon	Diamant
		↑ ongle			↑ couteau	↑ verre			

→ **La réactivité aux acides** :



→ **La densité** : propriété physique invariable pour un minéral pur. Problème : la plupart des minéraux ont une densité comprise entre 2.5 et 3 + manque de précision sur la mesure ⇒ diagnose difficile.

II. Reconnaissances microscopiques des minéraux

→ **Diffraction de rayons X** : appareillage le plus couramment utilisé pour reconnaître, caractériser et quantifier les minéraux cristallisés.

→ Observations microscopiques :

- **Microscope optique polarisant sur lame mince** : permet d'identifier les minéraux et d'apprécier leurs structures et leurs états d'altération.

- **Microscope électronique à balayage** : morphologie microscopique des minéraux couplé à une analyse chimique par EDS (spectromètre de dispersion d'énergie).

→ Analyses thermiques :

Analyse thermique différentielle (ATD) et/ou gravimétrique (ATG) : identification et quantification des minéraux à partir des réactions endo ou exothermiques et/ou à partir des variations de masse.

Pratiquées couramment sur les matériaux argileux.

→ **La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN)**

La RMN est une technique sensible à l'arrangement atomique local capable de donner des informations sur le voisinage d'un noyau spécifique (^{29}Si , ^{17}Al , ...) telle que le degré de connectivité, le type de liaison, etc....

Très utilisée pour la caractérisation des matériaux amorphes.

⇒ **Procédure simplifiée pour la reconnaissance d'un minéral**

III. La famille des silicates

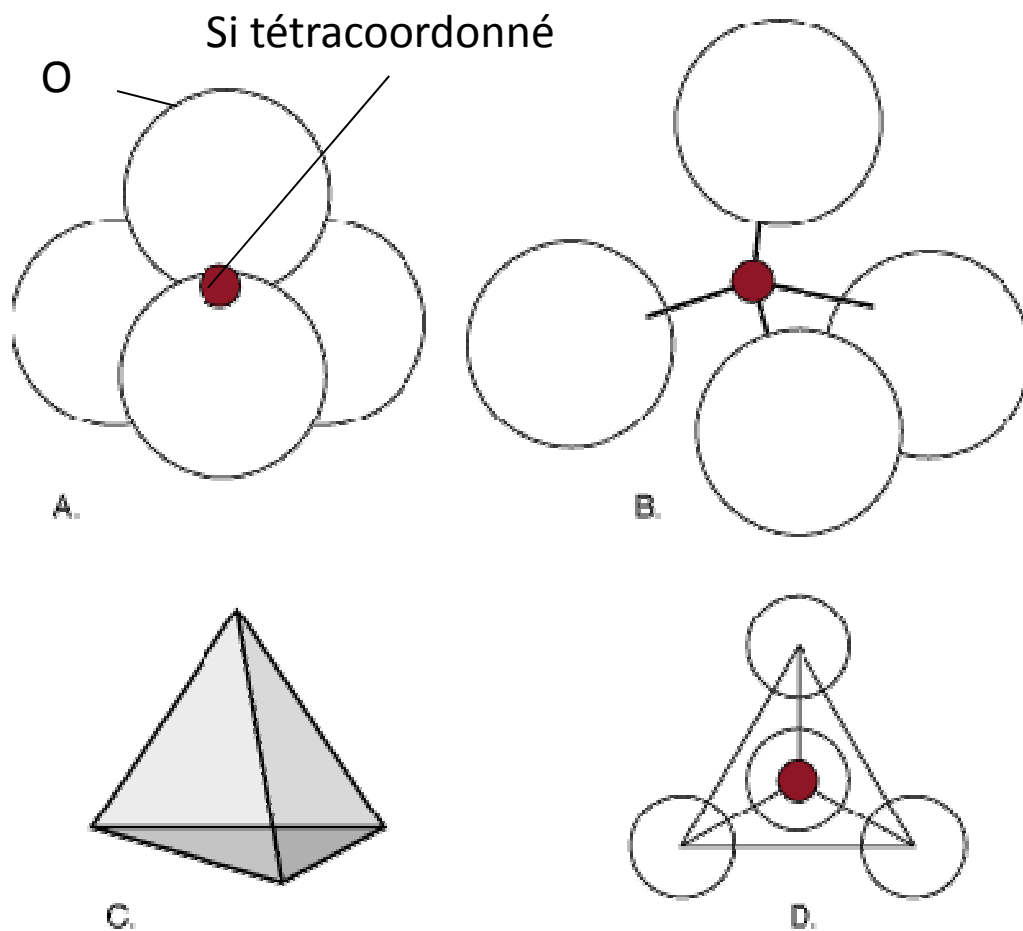
composition moyenne de la croûte terrestre

	O	Si	Al	Fe	Ca	Na	K	Mg
%	46,6	27,7	8,1	5,0	3,6	2,8	2,6	2,1

1) Structure des silicates

→ Le polyèdre de coordination $[\text{SiO}_4]$ est un tétraèdre. Si^{4+} est entouré de 4 oxygènes $\text{O}^{2-} \Rightarrow$ il y a donc 4 charges négatives à neutraliser soit par polymérisation de polyèdres identiques, soit par combinaison avec un cation.

→ famille des silicates.



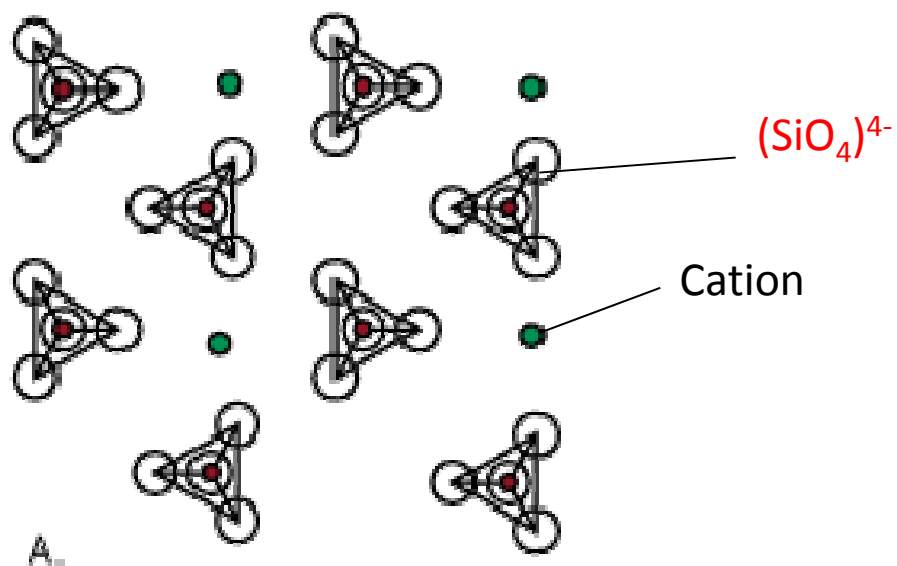
Différentes représentations du tétraèdre de silice

→ On distingue :

- les tétraèdres isolés (reliés par un cation) : **néosilicates**
- les tétraèdres en chaîne : **inosilicates**
- les tétraèdres en feuillets : **phyllosilicates**
- les tétraèdres en 3D : **tectosilicates**

2) Les néosilicates

→ Tétraèdres de silice reliés à des cations interstitiels (par ex. Ca^{2+})



→ $(\text{SiO}_4)^{4-}(\text{Ca}^{2+})_2 \equiv 2 \text{CaO}, \text{SiO}_2 = \text{calcio-olivine} : \gamma - \text{C}_2\text{S} : \text{inerte}$

3) Les inosilicates : pyroxènes et amphiboles

→ Chaîne de tétraèdres de silice avec mise en commun d'un O : simple (pyroxènes) ou double (amphiboles).

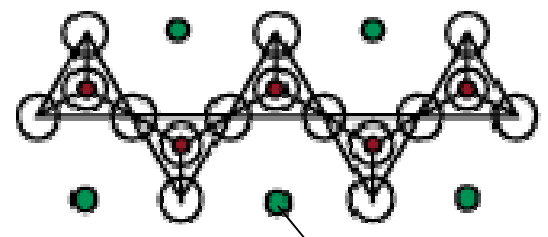
→ Chaîne simple (pyroxènes) :

$(\text{SiO}_3)^{2-} \Rightarrow$ exemples :

Enstatite: $\text{Mg}(\text{SiO}_3)$

Diopside: $\text{CaMg}(\text{SiO}_3)_2$

Pyroxéne: $\text{Fe}(\text{SiO}_3)$

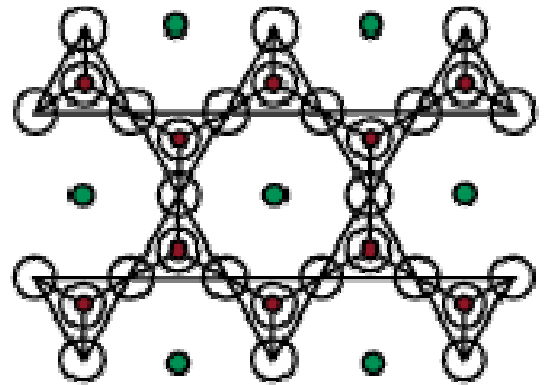


cation pour neutraliser la charge

→ Chaîne double (amphiboles) :

$(\text{Si}_4\text{O}_{11})^{6-}(\text{OH})^- \Rightarrow$ exemple :

Anthophyllite : $\text{Mg}_7(\text{Si}_8\text{O}_{22})(\text{OH})_2$



→ Dureté Mohs : 5 à 6

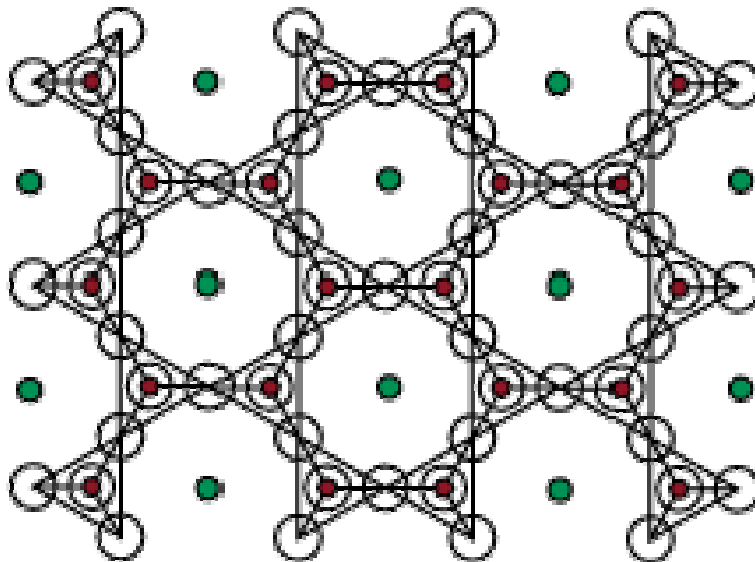
→ Plans de clivage : 2 faciles (90° pour les pyroxènes, 56° pour les amphiboles).

→ Certaines espèces d'amiante appartiennent à la famille des amphiboles.

4) Les phyllosilicates : micas et argiles

→ Les tétraèdres de silice s'orientent pour placer tous les oxygènes basaux dans le même plan.

\Rightarrow structure en feuillets \Rightarrow clivage.



→ $(\text{Si}_4\text{O}_{10})^{4-}((\text{OH})_2)^{2-} \Rightarrow$ exemples :

talç : $\text{Mg}_3(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_2$

kaolinite : $\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8$

→ Si substitution Si par Al : $(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})^{5-}((\text{OH})_2)^{2-}$

⇒ exemples : muscovite (mica blanc) : K, Al, F(\leftrightarrow OH)

biotite (mica noir) : K, Mg, Al

→ Les micas

- Plan de clivage très facile ⇒ sous forme de feuillets très brillants (paillettes).

- 2 sortes de micas :

- le mica blanc ou muscovite : inaltérable



- le mica noir ou biotite : très altérable (se transforme en argile).



- La forme en plaquette est mauvaise pour les bétons ⇒ rejet de certains sables de rivière pour la confection de bétons (problème d'adhérence pâte/granulat).

→ Les argiles

- Constituants principaux des sols.
- Se présentent sous forme de plaquettes non visibles à l'œil ($< 1 \mu\text{m}$) entre lesquelles l'eau peut pénétrer et les dissocier (clivages faciles).

- Plusieurs types d'argiles :

➤ *Les illites :*

C'est la famille qui se rapproche le plus des micas.



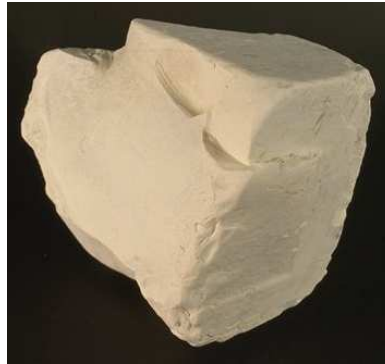
➤ *Les chlorites :*

Très fréquentes dans les sols, elles se forment par altération des micas noirs, amphiboles et pyroxènes.



➤ *Les kaolinites :*

Obtenues par altération hydrothermale des feldspaths granites.
Utilisation importante : 1/3 pâte à papier, 2/3 porcelaine et charge de peintures.

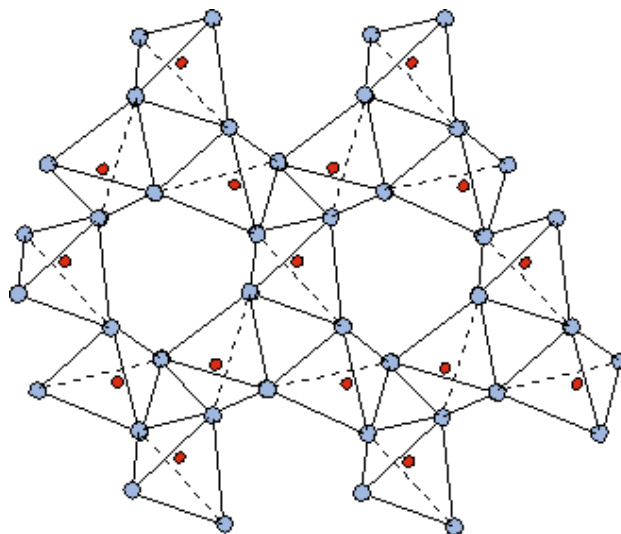


➤ *Les smectites ou montmorillonites :*

Ces argiles présentent des liaisons lâches entre feuillets qui leur donne la possibilité de fixation d'eau. L'écartement variable entre feuillets (de 10 à 20 Å) peut être très préjudiciable (argiles gonflantes) ou très utile (bentonite).

5) Les tectosilicates : quartz et feldspaths

→ Tous les O sont mis en commun entre les tétraèdres voisins.



Famille des tectosilicates
(quartz, feldspaths alcalins et plagioclases)

→ Le quartz (SiO_2):

- Forme naturelle la plus répandue de la silice cristallisée
- Inaltérable.
- Dureté Mohs : 7
- Insoluble aux acides sauf HF
- Pas de plan de clivage.



→ Les feldspaths :

- Minéraux les plus répandus dans la couche terrestre (60% des roches éruptives).

- Constitués de tétraèdres de SiO_4 dans lesquels 1 ou 2 Si sont remplacés par 1 ou 2 Al \Rightarrow déséquilibre électrique (Si^{4+} par Al^{3+}) compensé par l'introduction dans le réseau de cations K^+ , Na^+ ou Ca^{++} .

- Dureté Mohs : 6
- Altération avec l'eau en mica, argile ou calcite.
- Plans de clivage : 2 (difficiles).
- On distingue, classés par degré d'altérabilité croissante :
 - les feldspaths potassiques ou orthose : $\text{Si}_3\text{O}_8\text{Al K}$.
 - les feldspaths calco-sodiques ou plagioclases.
 - les feldspaths sodiques ou albite : $[\text{Si}_3\text{O}_8\text{Al}]^- \text{Na}^+$.
 - les feldspaths calciques ou anorthite : $[\text{Si}_2\text{O}_8\text{Al}_2]^{2-} \text{Ca}^{2+}$.

IV. La famille des carbonates

→ Les plus fréquemment employés sont la calcite et la dolomite.

→ La calcite CaCO_3 :

- Dureté Mohs : 3
- Elle est attaquée à froid par les acides, même dilués.
- Utilisation :
 - blocs ou granulats à béton.
 - fabrication de la chaux ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$) et du ciment Portland (80% calcaire, 20% argiles).



→ La dolomite ($\text{CaCO}_3, \text{MgCO}_3$):

- Propriétés voisines de celles de la calcite.
- Réagit uniquement avec HCl à chaud.
- Dureté Mohs : de 3 à 4.

V. La famille des sulfates

→ 2 types de sulfates sont fréquemment utilisés en Génie Civil : l'anhydrite et le gypse.

→ L'anhydrite (CaSO_4) :

- Solubilité dans l'eau = 3 g/l
- Dureté Mohs : de 3 à 3.5



- Elle ne doit pas être utilisée comme granulats à béton (ettringite secondaire) mais peut être introduit dans les ciments pour réguler la prise.

→ Le gypse ($\text{CaSO}_4, 2\text{H}_2\text{O}$) :

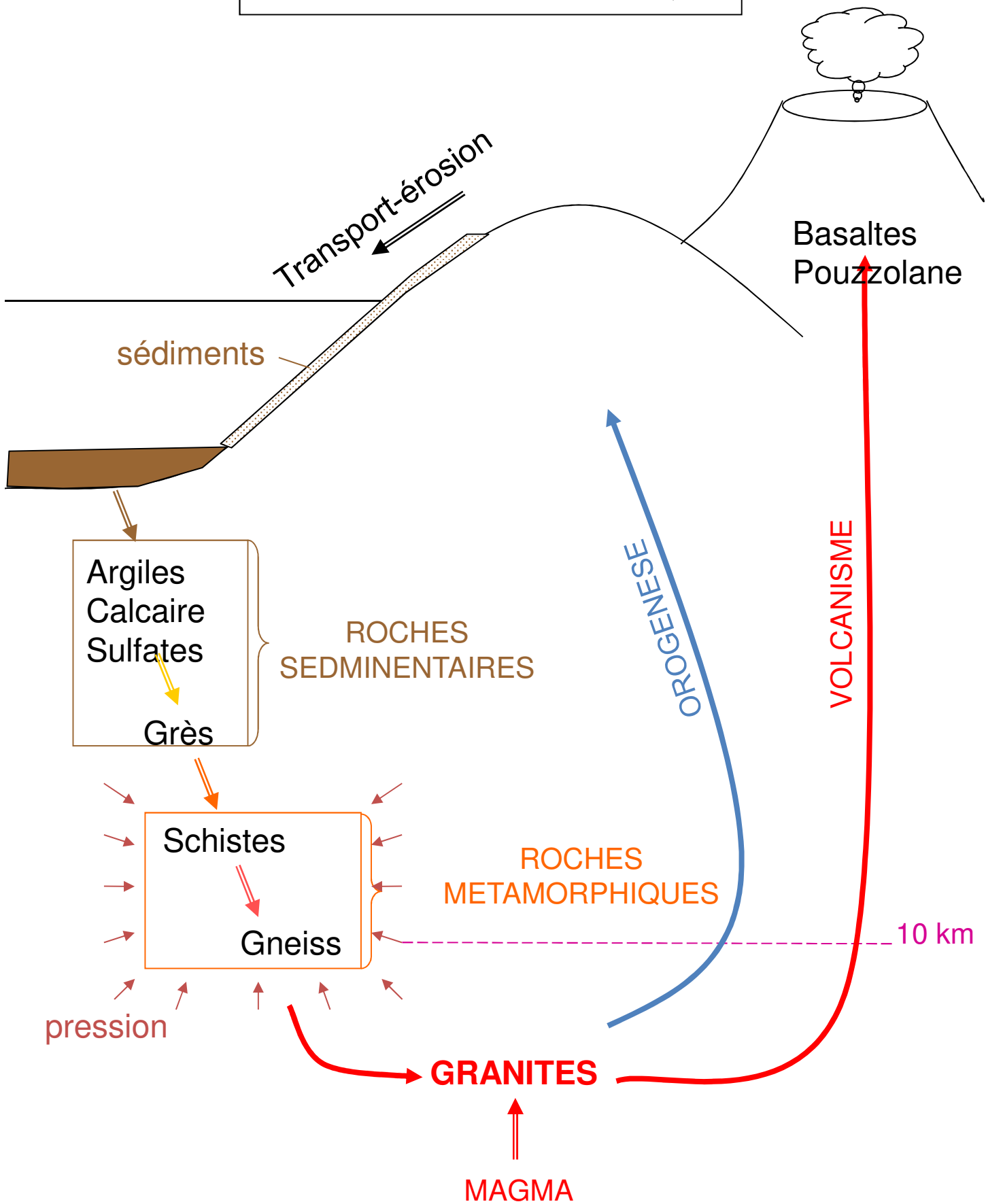
- Solubilité dans l'eau = 2g/l
- Très faible dureté : 2
- 3 plans de clivage dont un facile



• Utilisé comme régulateur de prise du ciment mais aussi dans la fabrication du plâtre (déshydratation à 170°C) :



CYCLE PETROGRAPHIQUE



Chapitre II : Étude des roches

→ Les roches sont des associations naturelles de grains appartenant à une ou plusieurs espèces minérales.

Les roches sont regroupées en différentes familles selon leur origine et leur structure (arrangement microscopique).

I. Les roches éruptives

→ Formation : solidification de magma : refroidissement lent (granite) et refroidissement brutal (basalte)

→ Granites (16%) : quartz, feldspaths alcalins, plagioclases (+ mica et amphibole) - possibilité d'altération



→ Basaltes (66%) : plagioclases, pyroxènes (+ matière vitreuse) - pavés, empierrement



II. Les roches sédimentaires

1) Formation

→ Formation :

- Destruction des roches mères : altération (phénomène chimique) et érosion (phénomène physique et mécanique).
- Transport des débris sous forme de particules ou en solution.
- Dépôt (sédimentation).
- Agglomération des sédiments meubles (diagenèse) : par tassement ou par cimentation.

→ Les roches sédimentaires, représentant l'essentiel des roches de surface, sont séparées en roches siliceuses (20%), carbonatées (8%) et argileuses (70%).

2) Les roches siliceuses

→ **Les grès** : résultent de la cimentation d'un sable. Granulats de qualité moyenne, utilisables s'ils sont peu poreux.

« C'est l'une des grandes roches favorables à l'escalade. La France possède l'un des espaces gréseux les plus célèbres du monde de la grimpe avec les grès siliceux de Fontainebleau ».



Grès perforé par des bivalves lithophages (Mollusque qui, grâce à une sécrétion acide, creuse des galeries dans les roches pour s'y loger).

→ **Les quartzites sédimentaires** : s'apparentent aux grès. Assez bons granulats.

→ **Les silex** : renferment des variétés de silice amorphes. Granulats médiocres présentant certains risques pour les bétons (alcali-réaction).



→ **Les meulières** : roches silicocalcaires en cours de décomposition, inutilisables pour le Génie Civil.

→ **Les alluvions siliceux** : constituent en général de très bons granulats (ex : granulats de Garonne ou d'Ariège).

3) Les roches carbonatées

→ Suivant le degré de consolidation, elles se présentent sous forme :

- de boues,
- de craies (très poreuses)
- et de calcaires proprement dits.

→ Granulats utilisables pour le Génie Civil :

- **les calcaires**, qui font de bons granulats s'ils sont durs.
- **les dolomies**, semblables aux calcaires.

→ Granulats peu utilisés directement pour la construction : les calcaires impurs où la calcite est associée à du quartz (calcaires gréseux) ou des argiles (calcaires argileux, marnes).

Toutefois ces calcaires peuvent servir à la fabrication du ciment et de la chaux.

4) Les roches argileuses

→ Les argiles, qui se forment par altération de roches mères, se retrouvent sous forme de kaolinite, d'illites, de smectites et de chlorites.

III. Les roches métamorphiques

→ Proviennent de la transformation des roches magmatiques ou sédimentaires sous l'action de la température, de la pression ou de l'apport de substances chimiques.

→ **Les calcaires cristallins ou marbres**, issus de la recristallisation de calcaires purs, qui sont utilisés surtout comme granulats de parement.

→ **Les gneiss**, composés de couches alternativement claires (quartzofeldspathiques) et foncées (micacées), sont comparables aux granites et utilisés uniquement lorsqu'ils sont stables.



→ **Les micaschistes**, issus de la transformation de matériaux argileux en micas, conduisent à des granulats de caractéristiques souvent médiocres.

→ **Les quartzites**, qui sont des grès métamorphiques et donnent des granulats de haute qualité très durs et résistants aux acides.

→ **Les schistes**, qui, s'ils sont durs et denses font de bons granulats.

Chapitre III : Céramiques, verres et isolants

I. Les céramiques

→ Céramique : grec « keramikos » = argile cuite.

→ La famille actuelle des céramiques englobe:

- les céramiques traditionnelles fabriquées à partir d'argile cuite,
- les oxydes purs,
- les verres,
- les carbures, nitrures et borures,
- les matériaux carbonés ainsi que les ciments et bétons.

1) Propriétés générales

→ Les éléments qui entrent dans la composition des céramiques sont liés entre eux par des liaisons fortes, covalentes ou ioniques.

⇒ principales propriétés des céramiques sont :

- mauvaise conduction d'électricité et de chaleur,
- températures de fusion élevées,
- grande inertie chimique,
- grande rigidité,
- comportement fragile,
- faible résistance à la traction (défauts de surface et porosité).

→ Les propriétés mécaniques dépendent des matières premières utilisées et des méthodes de fabrication (cuisson, frittage, fusion, ...).

2) Les céramiques traditionnelles

a) Généralités

- Matière abondante et bon marché :
 - argile : composé ternaire (Al_2O_3 , SiO_2 , H_2O),
 - sable
 - feldspaths (servent de fondants)
- Cuisson entre 850 et 1200°C.
- Composition : silicates et silico-aluminates.
- Structure : - en partie cristalline, en partie vitreuse
 - structure poreuse.

b) Les tuiles et briques de bâtiment

- Voir chapitre 4

c) Autres céramiques traditionnelles

→ **Faïences :**

- Céramique peu vitrifiée et opaque recouvert d'un émail spécifique.
- Utilisations : sanitaires, vaisselle, ...

→ **Grès :**

- Céramique vitrifiée très dure obtenue par ajout de gravillons siliceux à l'argile.
- Utilisations : carreaux de sols, équipements sanitaires, ...

→ **Porcelaine :**

La pâte est composée de 3 roches naturelles :

kaolin (55%) (argile blanche) + quartz (20%) + feldspath (25%) (fondant, assure la vitrification).

3) Les céramiques technologiques

→ Matériaux plus technologiques que les céramiques traditionnelles.

→ **Abrasifs et outils de coupe :**

- Caractéristiques : dureté, rigidité, Rm élevée, bonne tenue à chaud.

- Par ordre croissant de dureté:

- le sable et la silice (travail du bois),

- l'émeri (produit naturel contenant de l'alumine, de la silice et de l'oxyde de fer),

- les produits synthétiques : alumine, carbures (de silicium, de titane, de tungstène, de bore) et nitrure de bore cubique,

- le diamant.

→ **Les céramiques dans la construction mécanique :** fibres pour renforcer des matériaux composites (de carbone, de verre, ...).

→ **Les céramiques dans l'électronique :** certaines céramiques présentent des propriétés électriques ou magnétiques particulières (isolants, semi-conducteurs, piézoélectriques, ...)

→ **Les céramiques réfractaires**

- Caractéristiques : température de fusion élevée, bon comportement mécanique à T° élevée et faible conductibilité thermique.
- Principale application : industrie métallurgique (fours et poches de coulée).

II. Les verres

→ Les verres sont des solides amorphes : la cristallisation n'a pas eu le temps de se produire.

→ **Constituants des verres :**

- *formateurs de réseau* : matériaux qui lorsqu'ils refroidissent ne cristallisent pas (**la silice SiO_2** (la majorité des verres), l'anhydride borique (B_2O_3) et phosphorique (P_2O_5)).

- *modificateurs de réseau* : matériaux qui permettent de modifier la structure des verres et ainsi leurs propriétés (**Na_2O , K_2O , CaO , MgO , BaO**) + servent de fondants (diminution de la température de fusion (silice: 1650°C , verre: autour de 1200°C))

→ **Propriétés optiques** : transparence. Elle est due à sa structure amorphe et à l'absence de porosité.

→ **Propriétés thermiques :**

- faible coefficient de dilatation thermique de la silice,
- le verre n'est pas un bon isolant mais ceci est amélioré par l'utilisation d'un double vitrage,
- le pyrex, verre élaboré à partir de borosilicates résiste bien aux chocs thermiques

→ **Propriétés mécaniques :**

- Matériau fragile avec une faible résistance à la traction (10 MPa) et sensible à l'effet d'entaille.
- Les résistances peuvent être augmentées par traitement thermique ($R_t = 50$ MPa).
- Si le matériau est exempt de défaut de surface (fibres de verre après étirage), la résistance à la traction peut atteindre 4500 MPa.

→ **Les verres de bâtiments :**

- Composition :
 - sable siliceux très pur (vitrifiant, 60 à 70%),
 - carbonate de sodium et de sulfate (fondants 14 à 20%),
 - calcaire (stabilisant, 10%),
 - alumine et magnésie pour la durabilité,
 - colorants pour l'esthétique.

- Différentes variétés de verres plats :
 - **Le verre trempé** : réchauffé vers 600 °C puis refroidi brutalement \Rightarrow contraintes de compression en surface qui augmentent sa résistance à la flexion et aux chocs.
 - **Le verre feuilleté** : verre sandwich composé de 2 ou plusieurs feuilles de verre liées entre-elles par des films intercalaires de butyral de polyvinyle (PVB). Utilisé comme verre de sécurité.
 - **Les vitrages isolants** : composés de 2 ou plusieurs feuilles de verre séparées par des espaces d'air déshydraté ou de gaz.
 - **Le verre athermique** : teinté dans la masse, il limite l'effet de serre (employé dans les automobiles pour tous les vitrages).
 - **Les verres traités en surface** : anti-reflets (magasins), les pare-brises chauffants (avions), le verre miroir et le verre autonettoyant.

III. L'amiante

1) Qu'est ce que l'amiante ?

→ Le terme amiante désigne les formes fibreuses de différents silicates minéraux naturels.

2) Minéralogie de l'amiante

→ Minéraux de la famille des silicates : 2 sous-familles :

- serpentines : phyllosilicates (silicates en feuillets),
- amphiboles : silicates en chaînes.

Les variétés d'amiante, leurs analogues minéraux non asbestiformes et leur composition nominale
(adapté de Hodgson [6] et Walton [9])

Variété d'amiante	Analogue minéral non asbestiforme	Composition nominale
<i>Minéraux du groupe des serpentines</i>		
Chrysotile	Lizardite, antigorite	$Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$
<i>Minéraux du groupe des amphiboles</i>		
Crocidolite	Riebeckite	$Na_2Fe_3^{2+}Fe_2^{3+}(Si_8O_{22})(OH)_2$
Amosite	Grunérite	$(Fe^{2+}, Mg)_7(Si_8O_{22})(OH)_2$
Anthophyllite fibreux	Anthophyllite	$(Mg, Fe^{2+})_7(Si_8O_{22})(OH)_2$
Actinolite fibreux	Actinolite	$Ca_2(Fe^{2+}, Mg)_5(Si_8O_{22})(OH)_2$
Trémolite fibreux	Trémolite	$Ca_2Mg_5(Si_8O_{22})(OH)_2$

→ Serpentine : Chrysotile : fibres de faibles diamètres (0.02 à 0.03 mm) mais pouvant être très longues (rapport longueur/diamètre jusqu'à 100).

→ Amphibole : les plus utilisés : amosite et crocidolite : diamètres des fibres plus importants : amosite de 0.15 à 1.5 mm, crocidolite de 0.06 à 1.2 mm.

3) Utilisations de l'amiante

→ Les fibres d'amiante ont été exploitées par le passé pour leurs propriétés :

- de flexibilité,
- de grande résistance à la traction,
- d'incombustibilité (résistance au feu),
- de faible conductivité thermique
- de résistance aux agressions chimiques.

→ Après avoir subi un traitement mécanique, les fibres d'amiante sont utilisées pour des productions très variées (isolation, joints, flocages, dalles, fibro-ciments, textiles, ...).

→ Les produits contenant de l'amiante peuvent se dégrader et libérer des fibres dans l'atmosphère qui pourront être inhalées par l'homme.

→ Leur aptitude à provoquer des lésions dépendra du type de fibre (espèce, dimensions), de la concentration, de la durée de la période d'exposition.

IV. Matériaux isolants

→ On peut classer les matériaux isolants en grands groupes :

- **matériaux synthétiques** (PS expansé, polyuréthane, ...),
- **fibres minérales, végétales et animales** (laines de roche et de verre, mais aussi laines de bois, lin, chanvre, ...),
- **autres matériaux renouvelables** (cellulose, liège, ...),
- **isolants minéraux** (perlite, vermiculite, argile expansée, verre cellulaire).

QUELQUES EXEMPLES (liste non exhaustive)

→ **Laine de verre et laine de roche:**

- La laine de verre est un matériau isolant thermique de consistance laineuse obtenu par fusion et soufflage de verre. Le verre de la laine de verre se compose de verre recyclé (de 40% à 80%), de sable et d'autres matières naturelles tels (calcaire ou dolomie)
- La laine de roche est obtenue par fusion de basalte à 1460°C. La lave de basalte est ensuite centrifugée, soufflée ou extrudée.
- Présentées en rouleaux, panneaux semi-rigides et rigides ou en vrac. Elles se déroulent sur le sol, se placent entre ossatures ou par soufflage (vrac).
- Leur pouvoir isolant diminue fortement en présence d'humidité (d'où la présence de pare-vapeurs sur les rouleaux).

→ **Laine de bois :**

La laine de bois est un matériau isolant fabriqué à base de fibres de bois. Elle est utilisée pour l'isolation thermique et acoustique des bâtiments, Les panneaux de laine de bois souples ou rigides.



→ **La laine de chanvre** est fabriquée à partir de chènevotte (partie fibreuse de la plante). Après défibrage mécanique, les fibres sont agglomérées grâce à un liant.



Présentée sous forme de rouleaux, panneaux semi-rigides ou en vrac

→ **Isolants en liège:**



Liège manufacturé aggloméré ou expansé proposé sous forme de granulés ou de panneaux. Naturellement imputrescible.

→ **Ouate de cellulose :**

- Produits isolants fabriqués à partir de journaux recyclés
- Le papier est moulu, puis reçoit un traitement antifongique, ignifuge, insecticide.
- Commercialisée en vrac pour épandage manuel ou insufflation mécanique ainsi qu'en panneaux (avec ajoutant de liant à base de polymères).

