

V. Les roches magmatiques : Composition minéralogique

V.1. Introduction

La composition minéralogique d'une roche magmatique est fonction de la **composition chimique du magma** et de ses **conditions de cristallisation**. Elle s'exprime quantitativement par le pourcentage (ordinairement en volume) des différents minéraux réellement observés dans la roche : c'est la **composition modale** ou **mode**, évidemment différente de la composition normative (minéraux virtuels).

La composition modale est déterminée par l'analyse macroscopique et microscopique des roches. Il faut pour cela identifier les différents minéraux de la roche et exprimer le pourcentage du volume occupé par chaque minéral.

Bien qu'il existe plus de mille espèces minéralogiques, les minéraux qui constituent plus de 99 % des roches magmatiques appartiennent à 8 groupes de minéraux (principalement des **silicates** et d'**alumino-silicates**) : quartz, feldspaths, feldspathoïdes, olivines, pyroxènes, amphiboles, biotites (micas), oxydes de fer et de titane.

V.1.1. Le quartz (ancien terme de mineurs allemands)

Le quartz (silice, SiO_2) représente environ 12 % de l'ensemble des minéraux des roches magmatiques. C'est le minéral caractéristique des roches acides ; il est peu représenté dans les roches intermédiaires et absent des roches basiques.

Le quartz appartient à la famille des tectosilicates. Il possède six variétés polymorphiques, chacune cristallisant dans des conditions de pression et de température bien définies (figure 1) : quartz α , quartz β , tridymite, cristobalite, coesite et stishovite. Le quartz stable aux conditions de température et de pression de la surface de la Terre est le quartz α .

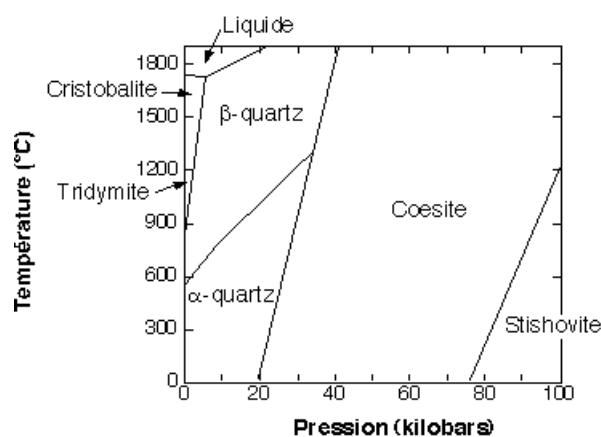


Figure 1 : Champs de stabilité des diverses formes de la silice en fonction de la température et de la pression. (D'après Stephen A. Nelson, <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/tectosilicates&others.htm>)

V.1.2. Les feldspaths (de l'allemand *feld*, champ et *spath*)

Les feldspaths sont les constituants essentiels des roches magmatiques, plutoniques ou effusives (59,5 % des minéraux des roches magmatiques). Leur composition chimique varie avec la nature des roches : les roches acides renferment des feldspaths alcalins, les roches intermédiaires des feldspaths alcalins et des plagioclases moyens, les roches basiques des plagioclases calciques.

Les feldspaths appartiennent à la famille des tectosilicates. L'analyse des feldspaths permet de les considérer comme des mélanges plus ou moins homogènes de trois constituants élémentaires :

- KAlSi_3O_8 : **Orthose** (Or) (Sanidine ou microcline)
- $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$: **Albite** (Ab)
- $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$: **Anorthite** (An)

KAlSi_3O_8 et $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ forment une solution solide complète, appelée **feldspaths alcalins** ; de la même manière, $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ et $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ forment une solution solide complète, appelée **plagioclases**. La composition des feldspaths est généralement représentée dans un diagramme triangulaire : KAlSi_3O_8 [Orthose (Or)] - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ [Albite (Ab)] - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ [Anorthite (An)] (figure 2).

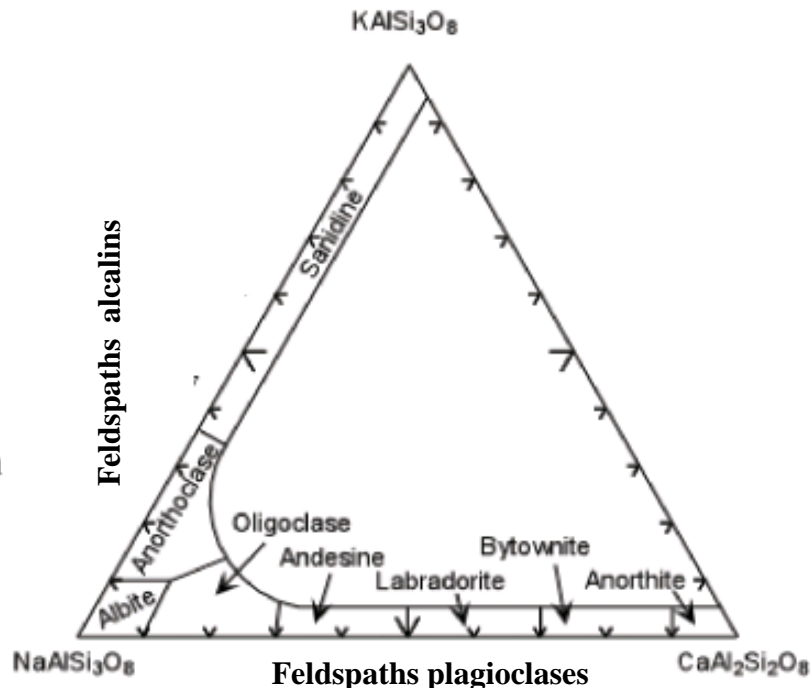


Figure 2 : Position des feldspaths dans le diagramme KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$. (D'après Stephen A. Nelson, <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/tectosilicates&others.htm>)

Les **feldspaths alcalins** comprennent deux grands types :

- Les feldspaths potassiques $(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$ avec faible proportion de Na, correspondant à la série microcline-orthose-sanidine, avec un arrangement

de plus en plus désordonné des ions Si et Al dans le réseau. L'orthose est le feldspath potassique de basse température caractéristique des granites. Il cristallise dans le système monoclinique. Le microcline est la forme ordonnée du feldspath potassique stable à basse température. C'est un minéral secondaire, cristallisant dans le système triclinique. La sanidine est la variété du feldspath potassique de haute température, qui présente la structure la plus désordonnée.

- Les feldspaths sodi-potassiques $(\text{Na,K})\text{AlSi}_3\text{O}_8$, plus riches en Na que les précédents, sont intermédiaires entre l'orthose et l'albite. L'*anorthose* est en moyenne constitué de 60% d'orthose et de 40% d'albite. C'est un minéral de haute température fréquemment associé à la sanidine.

Les *feldspaths plagioclases* (feldspaths tricliniques) forment une solution solide complète entre le pôle albite sodique (ab) et le pôle anorthite calcique (an), et peuvent contenir une petite quantité d'orthose (figure 2). Les différentes espèces distinguées sont les suivantes (An = anorthite = teneur en calcium) (voir aussi figure 2) :

- Albite : An_0 - An_{10} (0-10 % An)
- Oligoclase : An_{10} - An_{30} (10-30 % An)
- Andésine : An_{30} - An_{50} (30-50 % An)
- Labrador : An_{50} - An_{70} (50-70 % An)
- Bytownite : An_{70} - An_{90} (70-90 % An)
- Anorthite : An_{90} - An_{100} (90-100 % An)

V.1.3. Les feldspathoïdes (de feldspath, et du grec *eidos*, aspect)

Les feldspathoïdes sont des alumino-silicates de Na et K, appartenant à la famille des tectosilicates, très pauvres en silice, et qui se rencontrent dans des roches riches en Na_2O et K_2O (alcalines) et pauvres en SiO_2 (sous-saturées). Ces minéraux sont incompatibles avec le quartz, et sauf rares exceptions, ils ne peuvent coexister avec ce dernier dans les roches. Les feldspathoïdes ont une composition voisine de celle des feldspaths, mais ont une teneur en silice plus faible.

Les principaux feldspathoïdes sont :

- La *néphéline* $\text{Na}_3\text{K}[\text{AlSiO}_4]$: hexagonale, essentiellement sodique, et se transforme en albite en présence de quartz.
- La *sodalite* $\text{Na}_8\text{Al}_6\text{Si}_6\text{O}_{24}\text{Cl}_2$: cubique, minéral rare accompagnant la néphéline.
- La *leucite* KAlSi_2O_6 : quadratique à basse température, et cubique à haute température, riches en potassium, et se transforme en orthose en présence de quartz.

V.1.4. Les olivines (de la couleur de l'olive)

Les olivines se rencontrent dans les roches basiques et ultrabasiques. Ils appartiennent à la famille des néosilicates et forment une solution solide complète allant du pôle magnésien, la *forstérite* Mg_2SiO_4 , au pôle ferrifère, la *fayalite* Fe_2SiO_4 . Les intermédiaires correspondent à l'olivine $(\text{Fe, Mg})_2\text{SiO}_4$. L'olivine se forme à haute température, dans des roches sans quartz, pauvres en SiO_2 . Les olivines magnésiennes sont les plus courantes, alors que les olivines ferrifères, ou fayalites sont très rares. Ces dernières sont compatibles avec la présence de quartz et se rencontrent dans des roches acides (granites, rhyolites..).

V.1.5. Les pyroxènes (du grec *puros*, feu, et *xenos*, étranger)

Les pyroxènes sont les plus fréquents et les plus abondants des silicates ferromagnésiens. Ils se rencontrent surtout dans les roches basiques (gabbros et basaltes). Ils appartiennent à la famille des inosilicates.

Les pyroxènes sont pour la plupart des silicates anhydres de calcium, de magnésium ou de fer, qui renferment dans certains cas du sodium, du lithium et plus rarement du chrome et du titane. Ils cristallisent dans les systèmes orthorhombiques (*orthopyroxènes*) et monocliniques (*clinopyroxènes*).

La classification des pyroxènes est fondée en grande partie sur leurs teneurs respectives en Ca, Mg, Fe (composition chimique) et sur leurs systèmes cristallographiques, et apparaît sur un diagramme triangulaire Ca-Mg-Fe (figure 3). On distingue ainsi :

- Les **orthopyroxènes**, pratiquement dépourvus de calcium, forment une série continue entre un pôle magnésien l'*enstatite* $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ et un pôle ferreux la *ferrosilite* $\text{Fe}_2\text{Si}_2\text{O}_6$. Les intermédiaires constituent les *hypersthènes* $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$.
- Les **clinopyroxènes**, calciques, monocliniques, comprennent, d'une part la série qui va du *diopside* $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ à l'*hedenbergite* $\text{CaFeSi}_2\text{O}_6$, d'autre part le grand groupe des *augites*, plus pauvres en Ca, et enfin les *pigeonites*, très pauvres en calcium.
- Les pyroxènes riches en sodium Na et en lithium Li forment les **clinopyroxènes alcalins** (minéraux rares), du système monoclinique avec le *spodumène* $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, la *jadéite* $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ et l'*aegyrine* $\text{Fe}^{3+}\text{NaSi}_2\text{O}_6$.

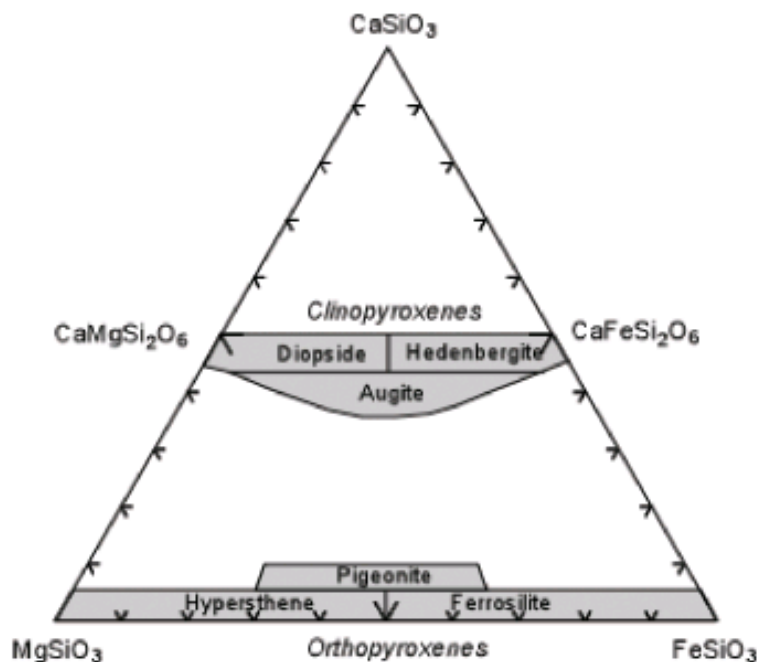


Figure 3 : Représentation des pyroxènes dans un diagramme triangulaire Ca-Mg-Fe.

(D'après Stephen A. Nelson, <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/inosilicates.htm>)

V.1.6. Les amphiboles (du grec *amphibolos*, ambigu)

Les amphiboles sont des silicates ferromagnésiens. Ils se rencontrent surtout dans les roches plutoniques et métamorphiques. Ils appartiennent à la famille des inosilicates.

Les amphiboles sont pour la plupart des silicates hydroxylés (ion OH) de fer et de magnésium, qui renferment en grande quantité du calcium, de l'aluminium, du sodium, du lithium ou du titane. Ils cristallisent en général dans le système monoclinique.

La classification des amphiboles est complexe et liée en grande partie aux variations progressives des teneurs en Mg, Fe, Ca, et Na. On distingue ainsi (Figure 4) :

- Les **amphiboles ferromagnésiens** : de formule $(\text{Mg,Fe})_7[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$, qui n'existent que dans les roches métamorphiques.
- Les **amphiboles calciques** : qui peuvent être ou non alumineuses.
 - Les amphiboles calciques non alumineuses, forment une série continue entre un pôle magnésien la *trémolite* $\text{Ca}_2\text{Mg}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ et un pôle ferreux la *ferroactinote* $\text{Ca}_2\text{Fe}_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, les *actinotes* constituent les termes intermédiaires $\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. Ils n'existent que dans les roches métamorphiques.
 - Les amphiboles calciques *alumineuses* forment le vaste ensemble des *hornblendes*, de formule $(\text{Ca,Na,K})_2(\text{Mg,Fe,Al})_5\text{Si}_6(\text{Si,Al})_2\text{O}_{22}(\text{OH,F})_2$. C'est les plus communs des amphiboles et se rencontrent dans les roches plutoniques calcoalcalines et dans les roches métamorphiques. Signalons aussi l'existence de la hornblende basaltique, beaucoup moins fréquente.

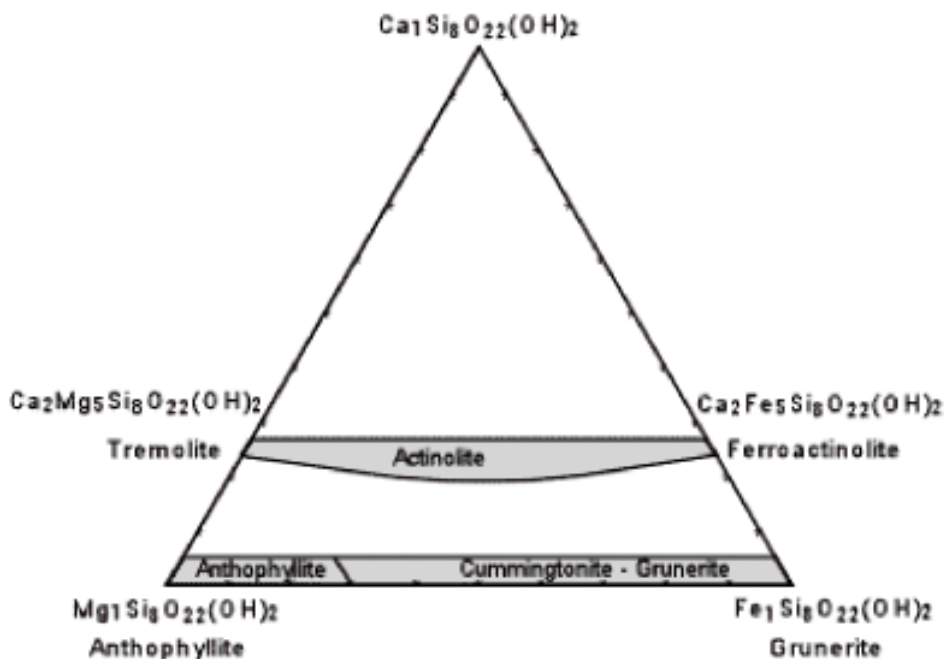


Figure 4 : Représentation des amphiboles dans un diagramme triangulaire Ca-Mg-Fe.
(D'après Stephen A. Nelson, <http://www.tulane.edu/~sanelson/eens211/inosilicates.htm>)

- Les **amphiboles sodiques** : forment une série continue entre la *glaucophane* $\text{Na}_2\text{Mg}_3\text{Al}_2\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$ et la *riébeckite* $\text{Na}_2\text{Fe}^{3+}_2\text{Fe}^{2+}_3\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. La glaucophane est limitée aux roches métamorphiques, alors que la riébeckite apparaît surtout dans les roches plutoniques alcalines.

V.1.7. Les micas (du latin *mica*, parcelle, miette)

Les micas sont des silicates hydratés, plus ou moins alumineux et presque toujours potassiques, qui contiennent en proportion variable du fer et du magnésium. Ils appartiennent à la famille des phyllosilicates et sont monocliniques. On distingue :

- **Les micas blancs alumineux** : avec principalement la *muscovite* $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, et son équivalent sodique, la *paragonite* $\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Ces minéraux sont fréquents dans les roches plutoniques acides.
- **Les micas noirs ferromagnésiens** : représentés principalement par les *biotites*, qui sont des minéraux intermédiaires entre un pôle magnésien, la *phlogopite* $\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ et un pôle ferrifère l'*annite* $\text{KFe}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Les biotites sont très fréquentes dans les roches magmatiques (surtout acides et intermédiaires).
- **Les micas lithinifères**, représentés par la *lépidolite* $\text{K}(\text{Li},\text{Al})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, sont présentes dans les pegmatites.

V.1.8. Les minéraux accessoires

Les minéraux accessoires comprennent :

- Les oxydes de fer et de titane :
 - La *magnétite* Fe_3O_4 : système cubique. Le plus commun des minéraux accessoires
 - L'*hématite* Fe_2O_3 : système hexagonal. Il représente fréquemment le produit d'altération de la magnétite ou forme une solution solide avec l'ilménite dans les roches magmatiques non altérées.
 - L'*ilménite* FeTiO_3 : système hexagonal. Principal minerais de titane. Fréquente dans une grande variété de roches volcaniques et plutoniques.
- Le *spinelle* MgAl_2O_4 : système cubique. Fréquent dans les roches ultrabasiques et parfois dans les basaltes.
- Le *corindon* Al_2O_3 : système hexagonal. Il est fréquent dans les roches magmatiques riches en aluminium (Al).
- L'*apatite* $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{OH},\text{F})$: système hexagonal. Très fréquent dans les roches magmatiques alcalines (granites, syénites, pegmatites et laves équivalentes).
- Le *zircon* ZrSiO_4 : système quadratique. Il est fréquent dans les roches magmatiques siliceuses (granites, granodiorites, syénites). Il contient souvent des traces d'éléments radioactifs (Th et U). Ce minéral est ainsi utilisé pour dater les roches avec la méthode U-Pb et Th-Pb.
- Le *sphène* $\text{CaTiSiO}_4(\text{OH})$: système monoclinique. Il est répandu dans de nombreuses roches magmatiques (granites, granodiorites, syénites).

- La *pyrite* FeS₂ : système cubique. Elle est répandue dans diverses roches magmatiques.
- La *calcite* CaCO₃ : système rhomboédrique. Elle est présente dans les carbonatites.
- La *fluorine* (ou fluorite) CaF₂ : système cubique (minerai du fluor). Elle est présente dans les roches magmatiques alcalines (granites, syénites, pegmatites).

Minéral	Formule chimique	Roches magmatiques
Silice Quartz, tridymite, cristobalite	SiO ₂	Roches acides
Feldspaths Sanidine, orthose, microcline Plagioclases <i>Albite</i> <i>Anorthite</i>	KAlSi ₃ O ₈ NaAlSi ₃ O ₈ CaAlSi ₃ O ₈	Volcaniques (sanidine) et plutoniques Roches volcaniques et plutoniques, acides et basiques.
Feldspathoïdes Népheline Leucite Sodalite	Na ₃ K[AlSiO ₄] KAlSi ₂ O ₆ Na ₈ Al ₆ Si ₆ O ₂₄ Cl ₂	Roches alcalines pauvres en SiO ₂
Olivines Fayalite Forstérite	Fe ₂ SiO ₄ Mg ₂ SiO ₄	Roches acides Roches basiques et ultrabasiques
Pyroxènes Enstatite Hypersthène Augite Aegyrine Spodumène	Mg ₂ Si ₂ O ₆ (Mg,Fe) ₂ Si ₂ O ₆ Ca(Mg,Fe)Si ₂ O ₆ Fe ³⁺ NaSi ₂ O ₆ LiAlSi ₂ O ₆	Roches volcaniques et plutoniques // // // // // // Roches alcalines – granite et syénite
Amphiboles Hornblende Riébeckite	(Ca,Na,K) ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ Si ₆ (Si,Al) ₂ O ₂₂ (OH,F) ₂ Na ₂ Fe ³⁺ ₂ Fe ²⁺ ₃ Si ₈ O ₂₂ (OH) ₂	Roches plutoniques calcoalcalines Roches plutoniques alcalines
Micas Muscovite Biotite Lépidolite	KAl ₂ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ K(Mg,Fe) ₃ (AlSi ₃ O ₁₀)(OH) ₂ KLi ₂ Al(Si ₄ O ₁₀)(OH) ₂	Roches plutoniques acides Roches magmatiques acides et inter. Pegmatites
Minéraux accessoires Apatite Corindon Sphène Fluorine Zircon Magnétite Ilménite Pyrite	Ca ₅ (PO ₄) ₃ (OH,F,Cl) Al ₂ O ₃ CaTiSiO ₅ CaF ₂ ZrSiO ₄ FeFe ₂ O ₄ FeTiO ₃ FeS ₂	Roches magmatiques alcalines Roches magmatiques riches en Al Roches magmatiques alcalines Roches magmatiques alcalines Roches magmatiques siliceuses Grande variété de roches magmatiques

Tableau 1 : Principaux minéraux des roches magmatiques.