

CHAPITRE : III

LES MINÉRAUX DES ROCHES MAGMATIQUES ET LEUR ORDRE D'APPARITION

I. 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).

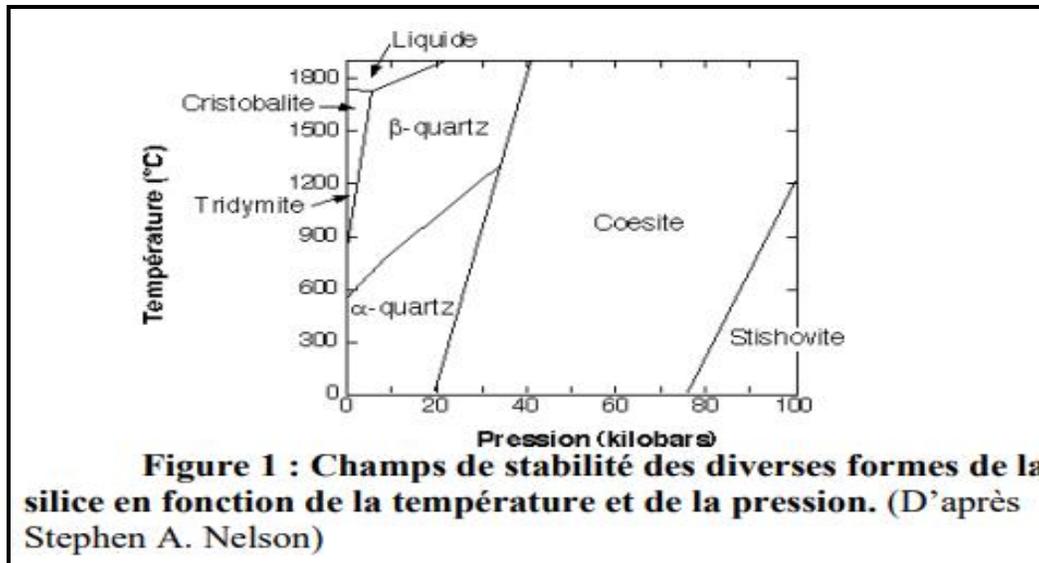
La composition modale est déterminée par l'analyse macroscopique et microscopique des roches. Il faut pour cela identifier les différents minéraux de la roche et exprimer le pourcentage du volume occupé par chaque minéral.

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.*

1. Le quartz:

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 dans les 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 .



2. Les feldspaths:

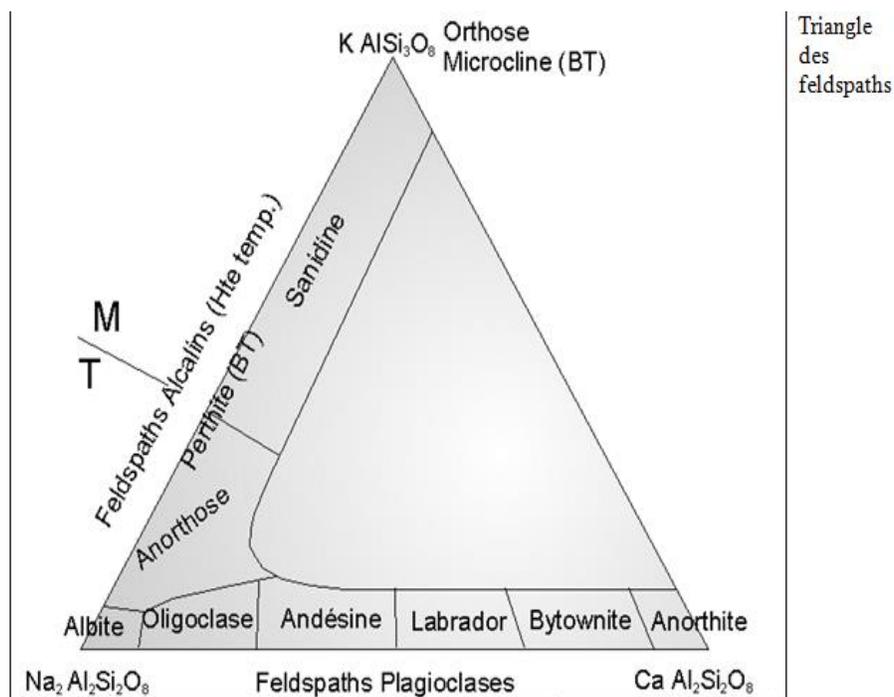
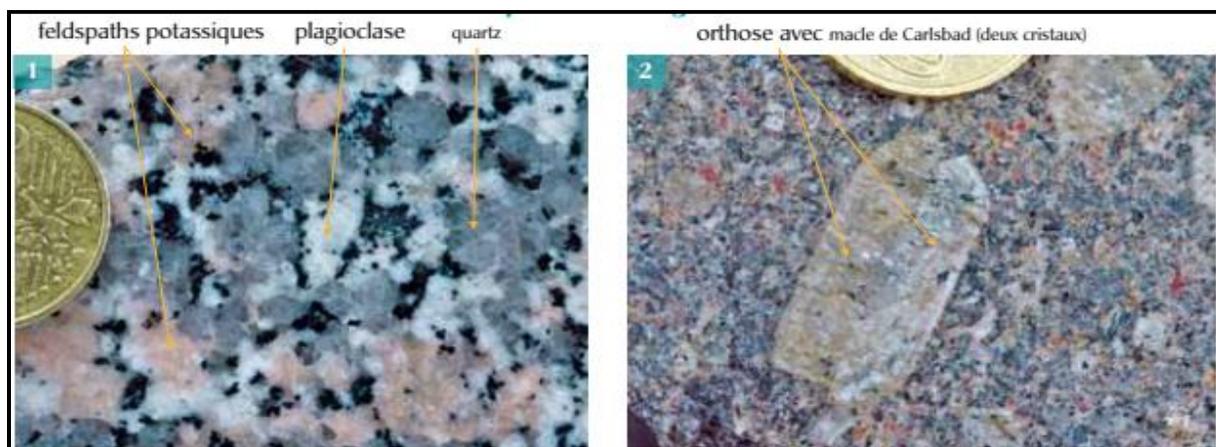
Les feldspaths sont les constituants essentiels des roches magmatiques, plutoniques ou effusives (59,5 % des minéraux des roches magmatiques). Leur composition chimique varie avec la nature des roches : les roches acides renferment des feldspaths alcalins, les roches intermédiaires des feldspaths alcalins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



Les feldspaths alcalins comprennent deux grands types :

- ❖ **Les feldspaths potassiques $(K,Na)AlSi_3O_8$** avec faible proportion de Na, correspondant à la série microcline-orthose-sanidine, avec un arrangement Feldspaths plagioclases Feldspaths alcalins 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 $(Na,K)AlSi_3O_8$** , 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)

3. Les feldspathoïdes:

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.

4. les olivines:

Les olivines se rencontrent dans les roches basiques et ultrabasiques. Ils appartiennent à la famille des nésosilicates 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 $(\text{Fe}, \text{Mg})_2\text{SiO}_4$. 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..).



5. Les pyroxènes:

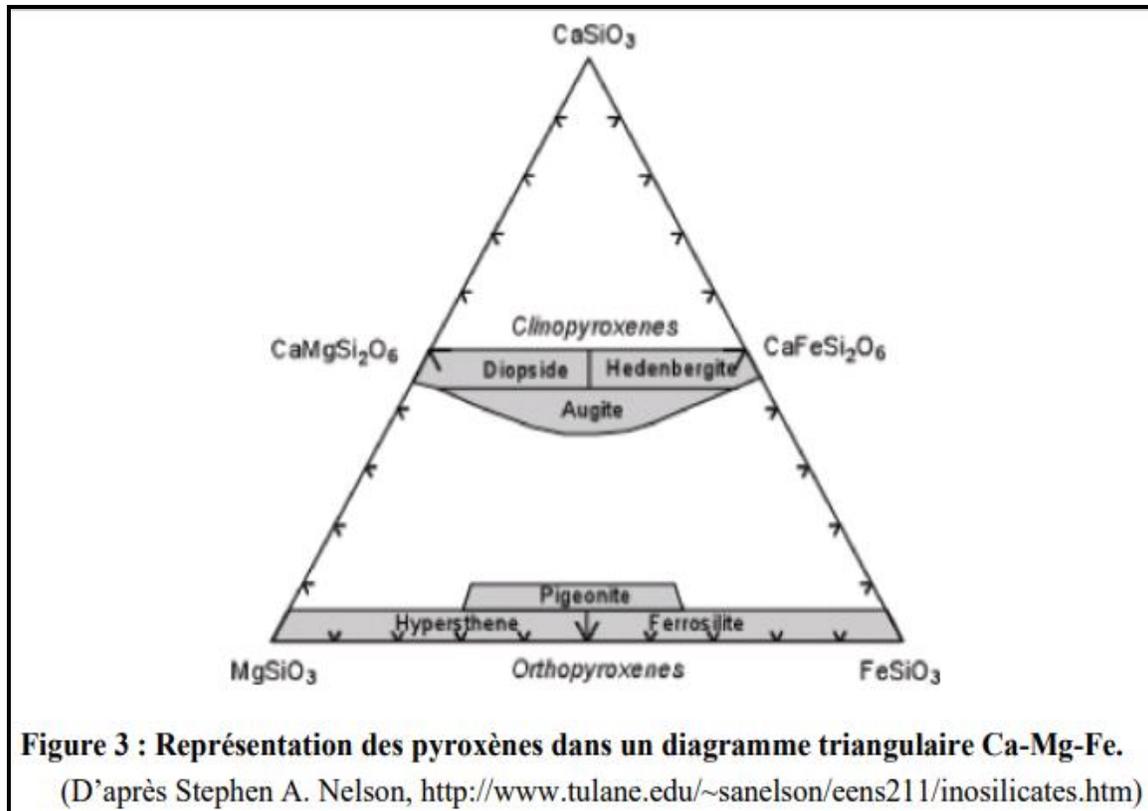
Les pyroxènes sont les plus fréquents et les plus abondants des silicates ferromagnésiens. Ils se rencontrent surtout dans les roches basiques (gabbros et basaltes). Ils appartiennent à la famille des inosilicates.

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 $Mg_2Si_2O_6$ et un pôle ferreux la ferrosilite $Fe_2Si_2O_6$. Les intermédiaires constituent les hypersthènes $(Mg,Fe)_2Si_2O_6$.
- Les clinopyroxènes, calciques, monocliniques, comprennent, d'une part la série qui va du diopside $CaMgSi_2O_6$ à l'hedenbergite $CaFeSi_2O_6$, 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 $LiAlSi_2O_6$, la jadéite $NaAlSi_2O_6$ et l'aegyrine $Fe_3+NaSi_2O_6$.





6. Les amphiboles:

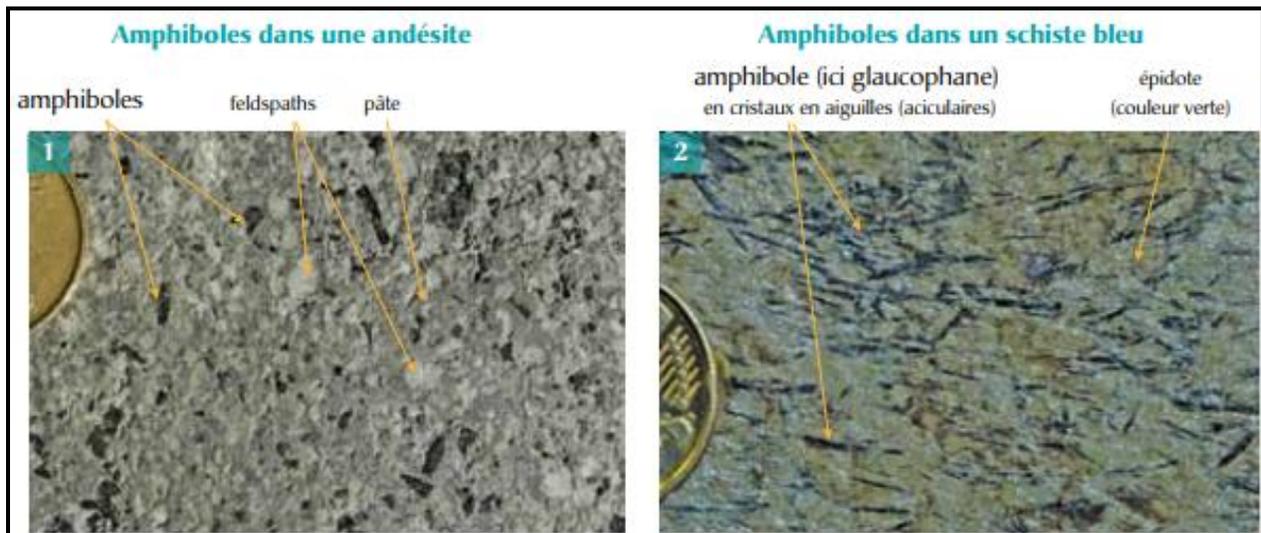
Les amphiboles sont des silicates ferromagnésiens. Ils se rencontrent surtout dans les roches plutoniques et métamorphiques. Ils appartiennent à la famille des inosilicates.

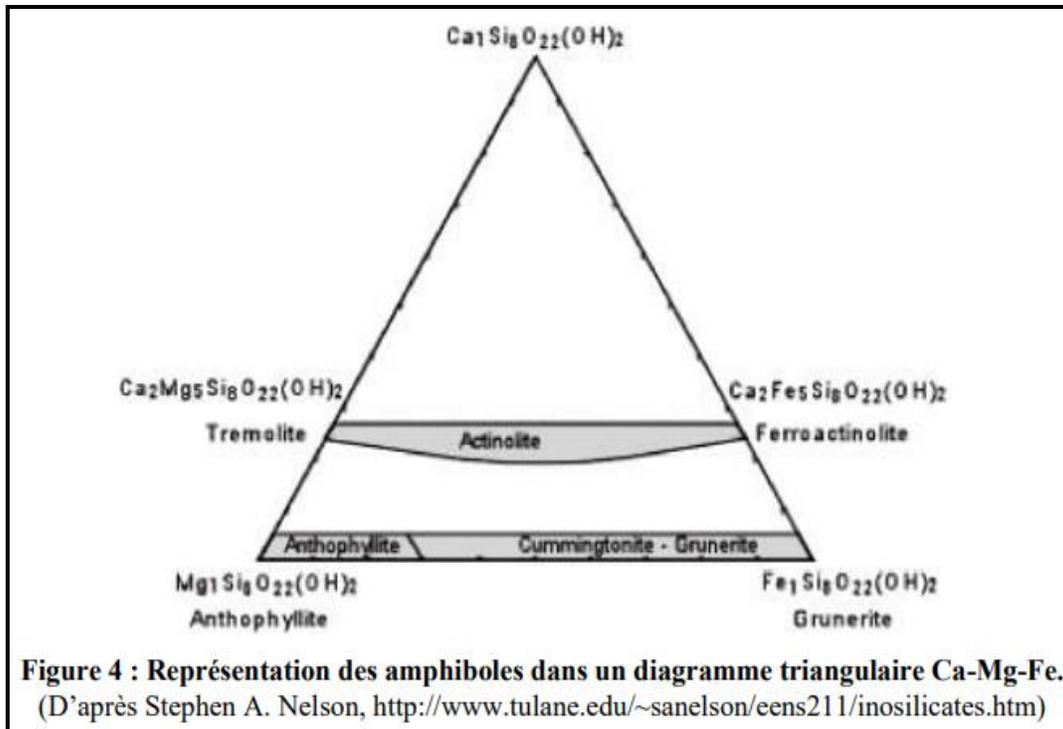
Les amphiboles sont pour la plupart des silicates hydroxylés (ion OH^-) de fer et de magnésium, qui renferment en grande quantité du calcium, de l'aluminium, du sodium, du lithium ou du titane. Ils cristallisent en général dans le système monoclinique.

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 $(\text{Mg,Fe})_7[\text{Si}_{18}\text{O}_{22}](\text{OH})_2$, 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.
- **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 $\text{Na}_2\text{Fe}_2^{+3}\text{Fe}_3^{+2}\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$. La glaucophane est limitée aux roches métamorphiques, alors que la riébeckite apparaît surtout dans les roches plutoniques alcalines.

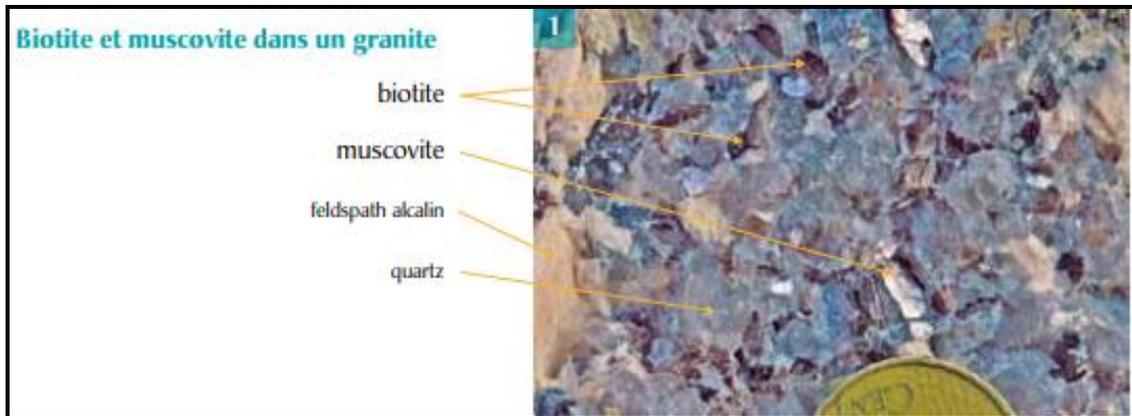




7. Les micas:

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.



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 FeS_2 : système cubique. Elle est répandue dans diverses roches magmatiques.

- ✓ La calcite CaCO_3 : système rhomboédrique. Elle est présente dans les carbonatites.
- ✓ La fluorine (ou fluorite) CaF_2 : système cubique (minerai du fluor). Elle est présente dans les roches magmatiques alcalines (granites, syénites, pegmatites).

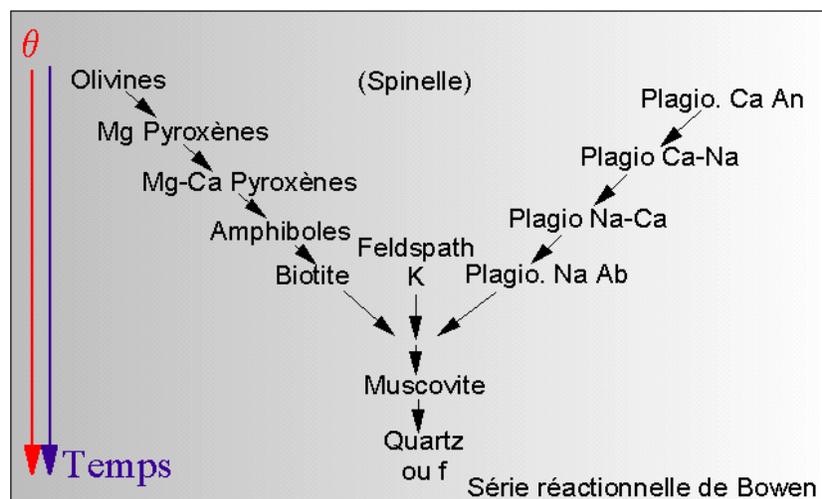
II. L'ordre d'apparition des minéraux dans les roches magmatiques:

L'ordre d'apparition des minéraux dans les roches magmatiques est principalement déterminé par la théorie de la série de réactions de Bowen, qui décrit l'évolution des minéraux lors du refroidissement d'un magma. Les minéraux de haute température cristallisent avant ceux de basse température. Voici quelques points importants concernant l'ordre d'apparition des minéraux dans les roches magmatiques :

- Les premières phases de cristallisation incluent l'olivine, puis les pyroxènes et les amphiboles.
- Suivent la biotite (mica noir), les plagioclases riches en calcium, l'orthose, la muscovite (mica blanc) et enfin le quartz.

L'ordre d'apparition des minéraux peut varier légèrement en fonction de la composition chimique initiale du magma, de la présence d'eau et de la pression à laquelle se fait la cristallisation²

En résumé, l'ordre d'apparition des minéraux dans les roches magmatiques est déterminé par la série de réactions de Bowen, qui prend en compte la température et la composition chimique du magma.



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

Tableau 1 : Principaux minéraux des roches magmatiques.