

Composition chimique des roches ignées

I. Rappels

1) Définition d'un magma

Le magma est un bain naturel de silicates en fusion (600-1300°C) Il est constitué d'une phase liquide, d'une phase solide (cristaux) et d'une phase gazeuse. Selon sa nature physicochimique et plus particulièrement selon sa teneur en SiO₂, il peut être plus ou moins visqueux.

2) Types de magma

-Les **magmas basiques (basaltiques ou gabbroïques)** : 1000 – 1200°C ; 45-55 % SiO₂, riche en Fe, Mg, Ca, pauvre en K, Na.

- **Les magmas intermédiaires (andésitiques ou dioritiques)** : 800-1000°C ; 55-65 % SiO₂, avec des teneurs moyennes en Fe, Mg, Ca, K, Na.

- **Les magmas acides (rhyolitiques ou granitiques)** : 650-800°C ; 65-75 % SiO₂, pauvre en Fe, Mg, Ca, riche en K, Na.

Les basaltes représentent 90% des roches volcaniques et les granites 95% des roches plutoniques.

3) Contexte géodynamique et nature chimique des magmas

La lithosphère est découpée en plusieurs plaques rigides (≈ 14) qui bougent les unes par rapport aux autres en glissant sur l'asthénosphère. Ce déplacement définit trois types de frontière entre les plaques.

-Les **frontières divergentes / constructives** : là où les plaques s'éloignent l'une de l'autre permettant la montée d'un **magma basique** en provenance de l'asthénosphère. C'est ce qui se produit au niveau des dorsales océaniques.

-Les **frontières convergentes** : là où l'une des deux plaques, plus dense, s'enfonce sous l'autre, comme on l'observe au niveau des zones de subduction (frontières destructives) ; le magma produit est **surtout intermédiaire**. Quand deux plaques entrent en collision, il se forme des chaînes de montagnes intracontinentales. Le magma produit dans ce cas est **acide**.

-Les **frontières transformantes (ou failles)** : là où deux plaques coulisent latéralement sans destruction, ni création notable de matière.

II. Composition chimique des roches magmatiques

La composition chimique d'une roche peut être déterminée par l'analyse chimique classique, mais celle-ci est largement supplantée par des méthodes physicochimiques de plus en plus sophistiquées dont la spectroscopie de fluorescence ou l'absorption atomique.

1) Abondance des éléments chimiques dans les roches de la croûte terrestre et dans les roches magmatiques (tab.1)

Une répartition par ordre d'importance des principaux éléments chimiques nous donne en premier l'oxygène, élément le plus abondant en poids et en volume, suivi par le silicium (Si). Viennent ensuite l'aluminium (Al), le fer (Fe), le magnésium (Mg), le calcium (Ca), le sodium (Na), le potassium (K), Ti, Mn et P. Etant donné la prépondérance de l'oxygène sur les autres éléments, les résultats des analyses chimiques des roches sont habituellement exprimés en pourcentages de poids d'oxydes.

| Oxydes | Pourcentages pondéraux (%) |
|--------------------|----------------------------|
| 1. Oxygène (O) | 45,2 % |
| 2. Silicium (Si) | 27,2 % |
| 3. Aluminium (Al) | 8 % |
| 4. Fer (Fe) | 5,8 % |
| 5. Calcium (Ca) | 5,1 % |
| 6. Magnésium (Mg) | 2,8 % |
| 7. Sodium (Na) | 2,3 % |
| 8. Potassium (K) | 1,7 % |
| 9. Titane (Ti) | 0,9 % |
| 10. Hydrogène (H) | 0,14 % |
| 11. Manganèse (Mn) | 0,1 % |
| 12. Phosphore (P) | 0,1 % |

Tableau 1 : Teneurs moyennes en éléments chimiques de la croûte terrestre.

2) Eléments majeurs, mineurs ou traces

Les *éléments majeurs*, représentant plus de 99 % de la composition globale d'une roche, sont ceux ayant une concentration supérieure à 1 % en poids de la roche. Ce sont : SiO₂, Al₂O₃, FeO et Fe₂O₃, MgO, CaO, Na₂O, K₂O, TiO₂.

Les *éléments mineurs* sont présents dans la roche avec une teneur comprise entre 0,1 et 1 % en masses d'oxydes. Pour les roches magmatiques les éléments mineurs typiques sont : MnO et P₂O₅.

Les *éléments traces /ou en traces*, sont ceux dont la teneur est inférieure à 0,1 %. Cette teneur est exprimée en ppm (partie par millions) ou en ppb.

Les éléments en traces les plus importants sont certains alcalins et alcalino-terreux : Ce, Sr, Rb, Ba ; les éléments de transition : Y, Zr, Nb, Ta, Ni, Cu ; les Terres Rares (Lanthanides) : La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Yb, Lu ou encore certains éléments de numéros atomiques élevés (Pb, U, Th).

Les résultats d'une analyse chimique se terminent souvent par une donnée **la perte au feu (PF)** ou **LOI** (*loss on ignitions*), c'est la perte de masse qui résulte du chauffage de l'échantillon à haute température ; elle correspond au départ des volatils (CO₂, S, F, Cl et vapeur d'eau) de la roche.

| Oxydes | Acide (Granite) | Intermédiaire (Andésite) | Basique (Basalte) | Ultrabasique (Péridotite) |
|--------------------------------|--------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| SiO ₂ | 71.3 | 57.94 | 49.2 | 42.26 |
| TiO ₂ | 0.31 | 0.87 | 1.84 | 0.63 |
| Al ₂ O ₃ | 14.32 | 17.02 | 15.74 | 4.23 |
| Fe ₂ O ₃ | 1.21 | 3.27 | 3.79 | 3.61 |
| FeO | 1.64 | 4.04 | 7.13 | 6.58 |
| MnO | 0.05 | 0.14 | 0.2 | 0.41 |
| MgO | 0.71 | 3.33 | 6.73 | 31.24 |
| CaO | 1.84 | 6.79 | 9.47 | 5.05 |
| Na ₂ O | 3.68 | 3.48 | 2.91 | 0.49 |
| K ₂ O | 4.07 | 1.62 | 1.1 | 0.34 |
| H ₂ O | 0.77 | 1.17 | 0.95 | 3.91 |
| CO ₂ | 0.05 | 0.05 | 0.11 | 0.30 |
| P ₂ O ₅ | 0.12 | 0.21 | 0.35 | 0.10 |

Tableau 2: Composition chimique moyenne des principales roches magmatiques.

3) Comportement des éléments majeurs dans les différents groupes de roches

La lecture de ce tableau 2 montre que :

- le granite a une forte teneur en SiO₂ et alcalins mais une faible teneur en fer total, CaO, MgO et TiO₂ ;
- le basalte a une faible teneur en SiO₂ et alcalins mais une forte teneur en fer total, CaO, MgO et TiO₂.
- les variations sont régulières entre le pôle granitique et basaltique en passant par les roches intermédiaires : Na₂O et K₂O diminuent depuis les granites aux basaltes alors que Fe total, CaO et MgO diminuent des basaltes aux granites.

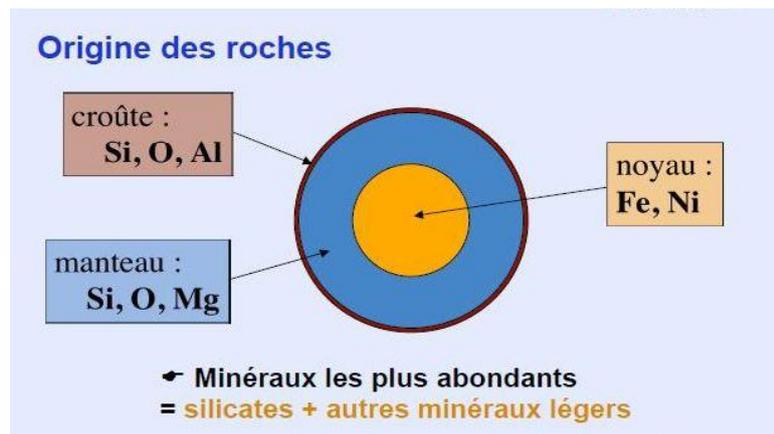
4) Intérêt de l'étude chimique des roches

La composition chimique des roches magmatiques est très importante car elle :

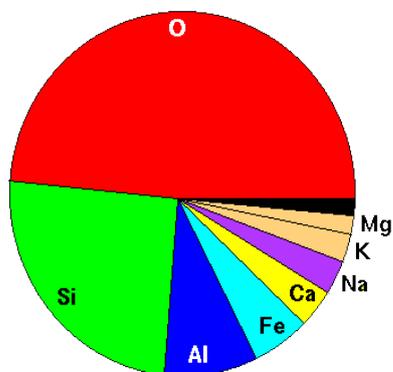
- renseigne sur le contexte géodynamique, la profondeur de fusion et donc sur la nature des magmas qui sont à l'origine des roches.
- permet de déterminer les roches incomplètement cristallisées par le calcul de la norme.

(Voir TD)

- informe sur l'altération secondaire que subissent les roches.
- Les éléments majeurs sont utilisés pour caractériser, comparer ou classer toutes les roches.
- Les éléments en traces, ainsi que leurs isotopes, permettent de définir l'origine, le parcours et parfois l'âge absolu d'un matériau géologique.



Principaux constituants atomiques de la Terre



(Le manteau montre un enrichissement en éléments réfractaires (Mg et Cr) et un appauvrissement en éléments fusibles (Na, K, Al, Ca, et Si). Le manteau est donc un réservoir à caractère résiduel.

La croûte continentale montre un enrichissement en éléments fusibles ou volatils, présents dans les feldspaths, le quartz et les minéraux micacés.

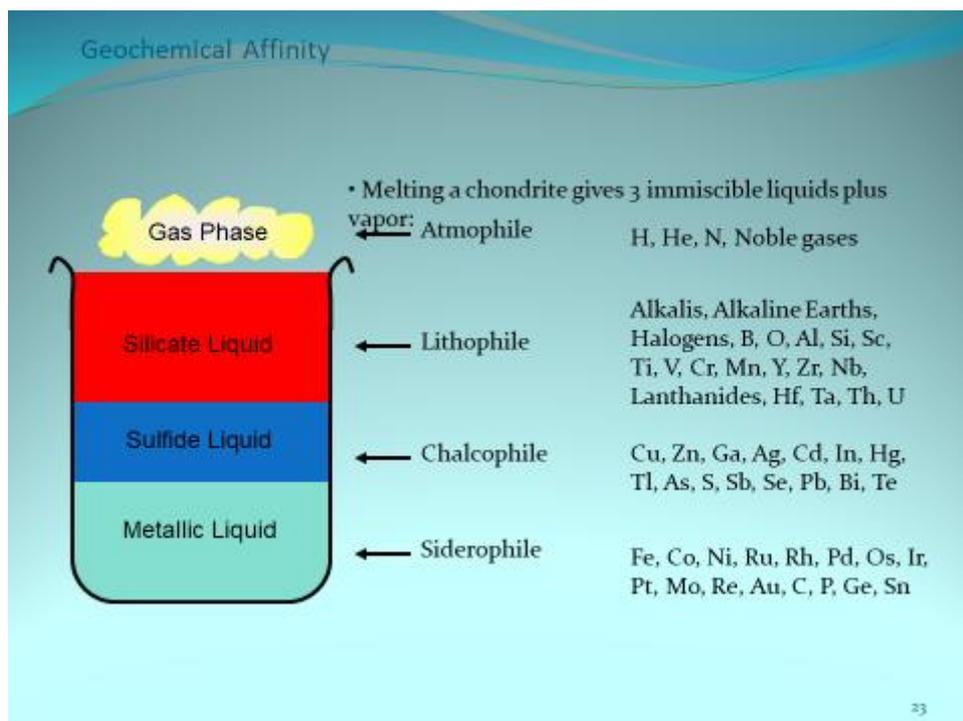
Les océans sont enrichis en cations solubles (Na, K, Ca) et en anions solubles (Cl, SO₄).

Les roches sédimentaires détritiques concentrent les éléments insolubles et fusibles (Si, Fe et Al) représentés par le quartz et les minéraux argileux.)

Classification de GOLDSCHMIDT

Une classification géochimique des éléments par GOLDSCHMIDT. mise au point après des observations sur du minerai d'oxydes et de sulfures

- L'examen des produits de la fusion du minerai lui ont permis de classer les différents éléments chimiques, selon la façon dont ils se séparent entre liquides coexistant : liquide silicaté, liquide sulfuré, liquide métallique, et phase gazeuse.
 - Des résultats similaires sont obtenus avec la fusion d'une chondrite.



Les roches sont composées de minéraux essentiels, de minéraux accessoires et de minéraux secondaires.

1. Les feldspaths (de l'allemand *feld*, champ et *spath*) .Figure 1

Représentent environ 60% 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 sont des tectosilicates ; leur analyse montre qu'ils sont des mélanges de trois composantes élémentaires :

$KAlSi_3O_8$: **Orthose** (Or) (Sanidine , microcline)

$NaAlSi_3O_8$: **Albite** (Ab)

$CaAl_2Si_2O_8$: **Anorthite** (An)

$KAlSi_3O_8$ et $NaAlSi_3O_8$ forment une solution solide complète, appelée **feldspaths alcalins** ;

$NaAlSi_3O_8$ et $CaAl_2Si_2O_8$ forment une solution solide complète, appelée **plagioclases**.

Les feldspaths peuvent être représentés dans un diagramme triangulaire Orthose - Albite - Anorthite.

Les **feldspaths alcalins** comprennent :

▲ Les feldspaths potassiques $(K,Na)AlSi_3O_8$ 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 (monoclinique) est de basse température. Le microcline (triclinique) est aussi stable à basse température. La sanidine est typique des roches volcaniques et présente la structure la plus désordonnée.

▲ Les feldspaths sodi-potassiques $(Na,K)AlSi_3O_8$, plus riches en Na, ils 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 **plagioclases** (feldspaths tricliniques) forment une solution solide complète entre le pôle albite sodique (ab) et le pôle anorthite calcique (an). Ils peuvent contenir une petite quantité d'orthose (quelques %). Les différentes espèces de plagioclases sont définies selon leur % en anorthite An ce qui correspond aussi à leur teneur en Ca.

Albite : An₀- An₁₀ (0-10 % An)

Oligoclase : An₁₀-An₃₀ (10-30 % An)

Andésine : An₃₀-An₅₀ (30-50 % An)

Labrador : An₅₀-An₇₀ (50-70 % An)

Bytownite : $An_{70}-An_{90}$ (70-90 % An)

Anorthite : $An_{90}-An_{100}$ (90-100 % An).

Les feldspaths s'altèrent facilement par kaolinisation, séritisation ou damouritisation.

2. Le quartz (Figure2) : SiO_2 , représente environ 12 % des minéraux formant des roches magmatiques. Il est abondant dans les roches acides ; peu fréquent dans les roches intermédiaires et absent ou très rare dans les roches basiques.

Le quartz est un tectosilicate qui selon les température et pressions de cristallisation, possède six polymorphiques.

3. Les feldspathoïdes : (oïdes : du grec *eidos*, aspect car ces minéraux ont une composition proche de celle des feldspaths, mais avec une teneur en silice plus faible. 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 alcalines (riches en Na_2O et K_2O) pauvres en SiO_2 . Ils sont par conséquent **incompatibles** avec la présence de quartz. Ces minéraux se transforment en feldspaths en présence de silice

Les principaux feldspathoïdes sont :

La *sodalite* $Na_8Al_6Si_6O_{24}Cl_2$: cubique, minéral rare accompagnant la néphéline.

La *néphéline* $Na_3K[AlSiO_4]$: hexagonale, riche en Na.

La *leucite* $KAlSi_2O_6$: quadratique à basse température, et cubique à haute température.

4. Les péridots dont les plus importants sont les olivines (appelées ainsi en raison de leur couleur vert olive)

Les olivines sont des néosilicates qui se rencontrent dans les roches basiques et ultrabasiques. Ils forment une solution solide complète allant du pôle magnésien, la *forstérite* Mg_2SiO_4 , au pôle ferrifère, la *fayalite* Fe_2SiO_4 . L'olivine $(Fe, Mg)_2SiO_4$ se forme à haute température, dans des roches pauvres en SiO_2 . Les olivines magnésiennes ou forstérites sont les plus répandues, alors que les olivines ferrifères, ou fayalites sont très rares ; elles sont compatibles avec la présence de quartz et se rencontrent donc dans certaines roches acides (granites, rhyolites..).

5. Les pyroxènes (du gr. *puros*, feu, et *xenos*, étranger) .Figure 3

Les pyroxènes, de la famille des inosilicates en chaîne simple; ce sont les ferromagnésiens les plus fréquents et les plus abondants. Ils sont surtout répandus dans les roches basiques et ultrabasiques.

La classification des pyroxènes est basée sur leurs teneurs respectives en Ca, Mg, Fe et sur leurs systèmes cristallographiques orthorhombiques (*orthopyroxènes OPX*) ou monocliniques (*clinopyroxènes CPX*).

Les **orthopyroxènes**, pauvres en calcium, ils 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**, riches en calciques, ils 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.

Plus rares sont les pyroxènes riches en sodium Na et en lithium Li qui forment les **clinopyroxènes alcalins** (monocliniques) avec le *spodumène* $\text{LiAlSi}_2\text{O}_6$, la *jadéite* $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6$ et l'*aegyrine* $\text{Fe}_{3+}\text{NaSi}_2\text{O}_6$.

Les pyroxènes peuvent s'altérer en serpentine, chlorite, calcite et subissent fréquemment une ouralitisaiton c.à.d. formation de hornblende vert pâle et d'actinote.

6. Les amphiboles (du gr. *amphibolos*, ambigu, du fait de confusions possibles avec d'autres minéraux.). Figure 4

Les amphiboles sont des inosilicates en chaîne double. Ils se rencontrent surtout dans les roches plutoniques et métamorphiques.

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

La classification des amphiboles est complexe et liée aux variations progressives des teneurs en Mg, Fe, Ca, et Na.

Les **amphiboles calciques** peuvent être ou non alumineuses. Les amphiboles calciques **alumineuses** sont les plus communes des amphiboles et se rencontrent dans les roches plutoniques calcoalcalines et dans les roches métamorphiques.

Les **amphiboles ferromagnésiens (pauvres en Al, Ca, Na)**: de formule $(\text{Mg, Fe})_7[\text{Si}_8\text{O}_{22}](\text{OH})_2$, n'existent que dans les roches métamorphiques.

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

Les micas cristallisent dans le système monoclinique ; ce sont des phyllosilicates hydratés, plus ou moins alumineux et potassiques.

Les micas noirs ferromagnésiens : la variété la plus abondante est la biotite avec une composition intermédiaire 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 acides et intermédiaires.

Les micas blancs alumineux (ne font pas partie des ferromagnésiens) : avec principalement la *muscovite* $\text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, et son équivalent sodique, la *paragonite* $\text{NaAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$. Ils sont fréquents dans les roches plutoniques acides.

Les micas lithinifères, représentés par la *lépidolite* $\text{K}(\text{Li,Al})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$, sont présentes dans les pegmatites.

8. Les minéraux accessoires. Ils comprennent les oxydes de fer et de titane :

La *magnétite* Fe_3O_4 : le plus commun des minéraux accessoires

L'*hématite* Fe_2O_3 , forme une solution solide avec l'ilménite dans les roches magmatiques non altérées. Elle est aussi produite par altération de la magnétite.

L'*ilménite* FeTiO_3 , principal minerais de titane, elle est fréquente dans une grande variété de roches magmatiques.

Les autres minéraux accessoires sont :

Le *spinelle* MgAl_2O_4 , est fréquent dans les roches ultrabasiques et basiques.

Le *corindon* Al_2O_3 , 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 (minéral du fluor). Elle est présente dans les roches magmatiques alcalines (granites, syénites, pegmatites).

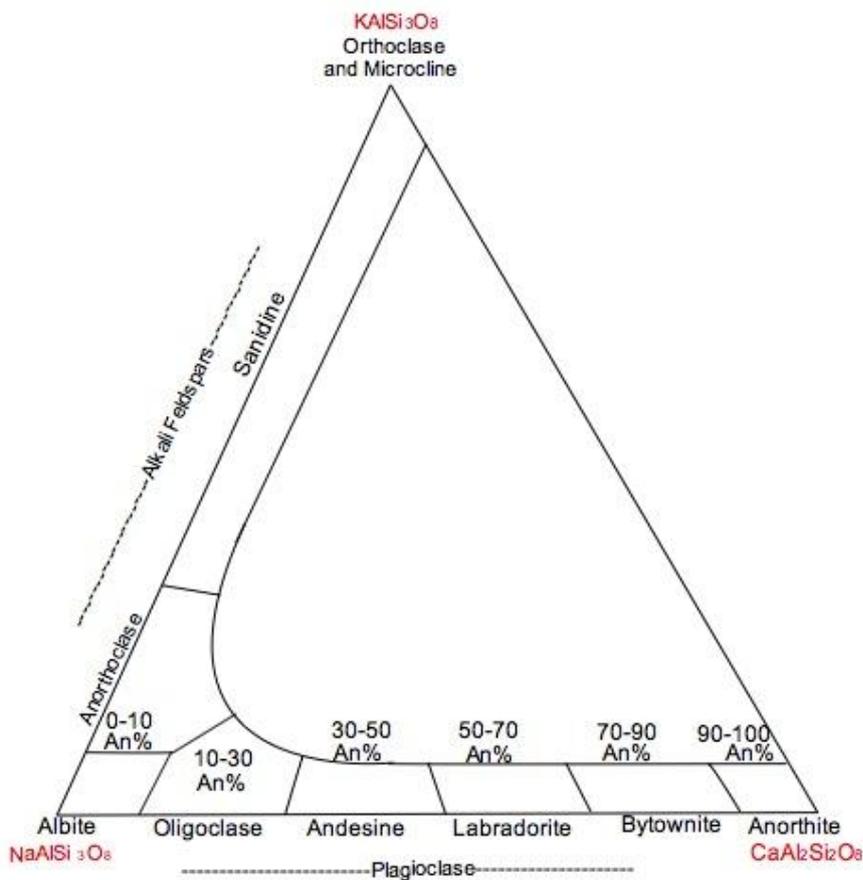


Figure 1 : Position des feldspaths dans le diagramme KAlSi_3O_8 - $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$.

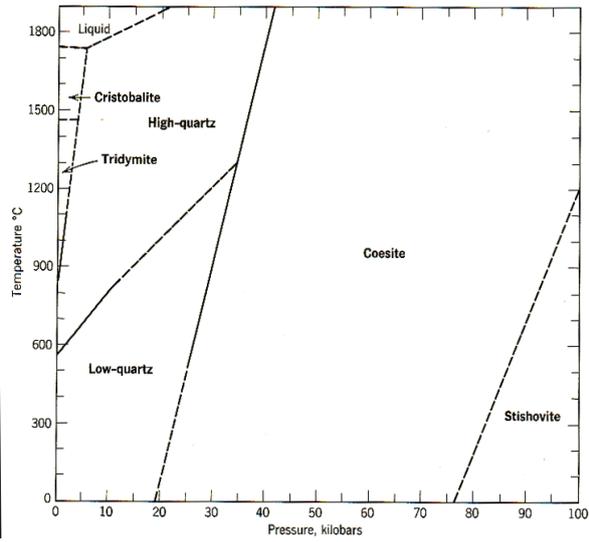


Figure 2 : Champs de stabilité des diverses formes de la silice en fonction de la température et de la pression.

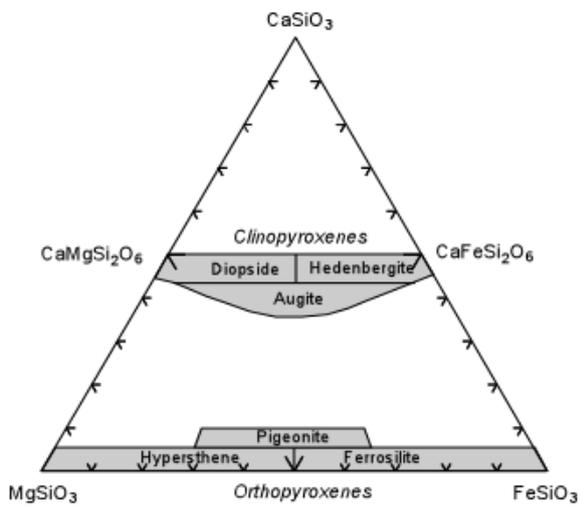


Figure 3 : Représentation des pyroxènes dans un diagramme triangulaire Ca-Mg-Fe.

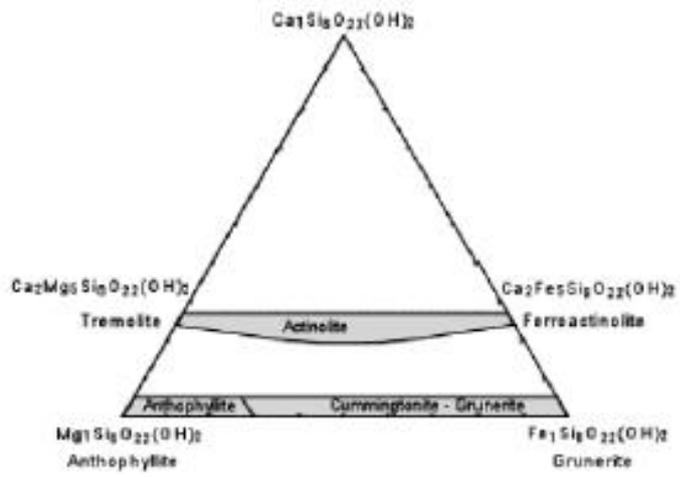


Figure 4 : Représentation des amphiboles dans un diagramme triangulaire Ca-Mg-Fe.

| 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 Anorthite | NaAlSi ₃ O ₈ CaAlSi ₃ O ₈ | Roches volcaniques et plutoniques, acides et basiques. |
| Feldspathoïdes Néphéline 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 Riëbeckite | (Ca,Na,K) ₂ (Mg,Fe,Al) ₅ Si ₄ (Si,Al) ₃ 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 |

| Type du magma | Roche volcanique formée | Roche plutonique formée | Composition chimique | Température | Viscosité | Teneur en gaz |
|---------------|-------------------------|-------------------------|--|---------------|---------------|---------------|
| Basaltique | Basalte | Gabbro | 45-55 % SiO ₂ , riche en Fe, Mg, Ca, pauvre en K, Na. | 1000 - 1200°C | Faible | Faible |
| Andésitique | Andésite | Diorite | 55-65 % SiO ₂ , intermédiaire en Fe, Mg, Ca, K, Na. | 800-1000°C | Intermédiaire | Intermédiaire |
| Rhyolitique | Rhyolite | Granite | 65-75 % SiO ₂ , pauvre en Fe, Mg, Ca, riche en K, Na. | 650-800°C | Elevée | Elevée |