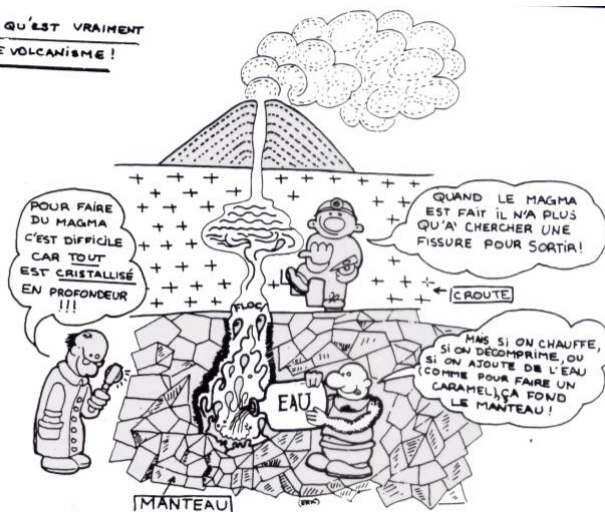


CE QU'EST VRAIMENT
LE VOLCANISME !



CE QUE N'EST PAS
LE VOLCANISME !



ST-F LE MAGMATISME

ST-F-2 Les processus fondamentaux du magmatisme

RESUME

Les magmas sont des mélanges de fluides (silicates fondus, éventuellement sulfures, carbonates, gaz) et de solides (cristaux, enclaves). Ils sont formés par fusion partielle des roches crustales ou mantelliques. La composition du liquide primaire obtenu par fusion partielle dépend de la nature de la source et du taux de fusion. La fusion partielle des péridotites mantelliques produit des liquides primaires de composition basaltique. La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) entraîne la production de liquides de composition granitique. Des données isotopiques permettent la détermination des sources de magma.

C. Vilbert

ST-F-2-1 Production des magmas primaires- (2 heures)

THEME ST-F – LE MAGMATISME

THEME ST-F-2 LES PROCESSUS FONDAMENTAUX DU MAGMATISME

ST-F-2-1 – Production des magmas primaires

| | |
|--|---|
| <p>Les magmas sont des mélanges de fluides (silicates fondus, éventuellement sulfures, carbonates, gaz) et de solides (cristaux, enclaves). Ils sont formés par fusion partielle des roches crustales ou mantelliques. La composition du liquide primaire obtenu par fusion partielle dépend de la nature de la source et du taux de fusion.</p> <p>La fusion partielle des péridotites mantelliques produit des liquides primaires de composition basaltique</p> <p>La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) entraîne la production de liquides de composition granitique.</p> <p>Des données isotopiques permettent la détermination des sources de magma</p> | <ul style="list-style-type: none"> - Relier la convergence de composition des premiers liquides produits lors de la fusion d'une source (manteau ou croûte) avec les propriétés thermodynamiques (eutectiques). - Identifier les conditions de fusion partielle de phases solides et d'apparition d'un liquide dans deux diagrammes binaires pour la chimie basaltique (albite-anorthite et diopside-anorthite) et dans deux diagrammes ternaires : un granitique (quartz-albite-orthose) et un basaltique (olivine-grenat-pyroxène). - Montrer que la fusion partielle produit, à partir de roches de sources différentes, des liquides identiques, de composition granitique dans la croûte continentale, et basaltique dans le manteau. - Estimer un taux de fusion partielle dans les systèmes manteau-basalte à partir de données géochimiques (les calculs sont réalisés à partir des concentrations en potassium). - Exploiter des données isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) pour caractériser l'origine des magmas. |
| <p>Précisions et limites :</p> <p>Le comportement des éléments chimiques dans les magmas n'est abordé que pour les éléments majeurs.</p> <p>Les rapports isotopiques sont présentés comme « signatures géochimiques » des mécanismes de fusion. Les rapports isotopiques initiaux $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ sont présentés comme des données intrinsèques des différents réservoirs (croûte continentale, manteau supérieur, manteau inférieur), sans expliciter l'origine des rapports isotopiques. La connaissance de la diversité des sources mantelliques n'est pas exigible.</p> | |
| <p>Liens :</p> <p>La carte géologique (ST-A)</p> <p>La structure de la planète Terre (ST-B)</p> <p>La dynamique des enveloppes internes (ST-C) Le magmatisme (ST-G)</p> <p>Les risques géologiques (ST-I-1)</p> <p>Les grands ensembles géologiques : les îles océaniques (ST-J-2-2)</p> <p>Physique-chimie : descriptions microscopique et macroscopique d'un système (3.1)</p> | |

I. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides formés par fusion partielle des roches crustales ou mantelliques.

A. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides

B. Les principaux mécanismes de fusion des roches

1. Les conditions nécessaires à l'obtention d'un magma

- Relations entre les différents géothermes et les courbes du liquidus et du solidus des principaux matériaux des enveloppes terrestres.
- Les cas possibles de fusion des roches en liaison avec le contexte géodynamique
- Les roches : un système constitué d'un assemblage de minéraux

2. Identification des conditions de fusion partielle de phases solides et d'apparition d'un liquide au moyen des diagrammes de phase

- Les diagrammes de phase, des modèles d'étude
- Les diagrammes de phase de mélanges binaires
 - Cas 1 : Diagramme albite - anorthite - mélange de deux espèces minérales formant une série isomorphe
 - Cas 2 : Diagramme diopside - anorthite, deux espèces minérales non miscibles à l'état solides

ST-F Le magmatisme

ST-F-2 Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

- c) Les diagrammes de phase des mélanges ternaires
 - i. Comprendre les diagrammes ternaires
 - ii. Cas 1 : Diagramme Olivine-Grenat-Pyroxène
 - iii. Cas 2 : Diagramme Quartz-albite-orthose
- 3. Effet de la pression et de la présence de fluide sur les diagrammes de phase

II. La composition du magma dépend de la nature de la source et du taux de fusion partielle

- A. *Les apports des données géochimiques*
 - 1. Répartition des éléments chimiques dans les phases liquide et solide et taux de fusion
 - 2. Les rapports isotopiques permettent d'identifier deux sources majeures des liquides magmatiques
 - a) Les rapports isotopiques sont des signatures géochimiques des mécanismes de fusion par le comportement plus ou moins incompatible des isotopes qui les forment
 - b) Les liquides magmatiques ont une origine mantellique ou crustale
- B. *La fusion partielle d'une péridotite produit un liquide basaltique*
 - 1. Le magma basaltique correspond à l'eutectique d'un mélange ternaire
 - 2. Taux de fusion et composition du magma obtenu
 - a) Estimation du taux de fusion
 - b) Fusion partielle et diversité des magmas basaltiques
 - i. La nature du magma primaire dépend du mécanisme de fusion
 - ii. La nature du magma primaire dépend du taux de fusion partielle
 - c) Facteurs contrôlant la composition de l'eutectique
 - 3. Extraction et ascension du magma → pour info
 - a) Une différence de densité → pour info
 - b) Une fracturation hydraulique → pour info
- C. *La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) produit un liquide granitique*
 - 1. Origine des granites (vue simplifiée)
 - 2. L'anatexie crustale indissociable du métamorphisme
 - 3. La fusion partielle produit, à partir de roches crustales différentes, des liquides identiques de composition granitique dans la croûte continentale

Introduction :

Les résultats géophysiques sur la transmission des ondes sismiques indiquent que la croûte et le manteau sont constitués de matériaux solides. Cependant, l'observation d'édifices volcaniques en fonctionnement montre que, localement au moins, il peut y avoir fusion de ces matériaux à l'origine de la production d'un liquide magmatique. Les **magmas** sont produits par **fusion partielle** du manteau, produisant essentiellement des **liquides de composition basaltique**, et, par fusion partielle de la croûte continentale, produisant essentiellement **des liquides de composition granitique**. La nature et la quantité de magmas formés dépendent étroitement du **contexte géodynamique**.

I. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides formés par fusion partielle des roches crustales ou mantelliques.

A. Les magmas sont des mélanges de fluides et de solides

Un **magma** est un **bain naturel fondu**, de **nature silicatée ou aluminosilicatée**, dont la teneur en silice (SiO_2) varie entre 40 et 75% en poids ce qui peut être à l'origine de la diversité des roches magmatiques rencontrées (n'oublions pas que les magmas proviennent soit de la lithosphère, silicatée, soit de l'asthénosphère, silicatée). Un magma est constitué de **3 phases** :

Une **phase liquide** (10 à 70% du magma selon la nature chimique du magma).

Une **phase solide** (les magmas sont issus de la fusion partielle d'une roche profonde et des enclaves subsistent et la cristallisation peut commencer au niveau de la chambre magmatique et donc même un magma qui s'épanche à la surface présente une phase solide)

Une **phase gazeuse** dont l'importance dépend notamment de la quantité d'eau.

B. Les principaux mécanismes de fusion des roches

1. Les conditions nécessaires à l'obtention d'un magma

Rq : allez vite car pas explicitement au programme de 2^{ème} année → vu en 1^{ère} année ST-C3

Pour obtenir un magma, il faut faire fondre une roche. Dans quelles conditions cela est-il possible ?

La température augmente avec la profondeur, on peut s'attendre à ce que le manteau fonde, mais il faut tenir compte de la pression qui s'oppose à l'agitation thermique et qui constitue un facteur prépondérant dans la fusion des roches.

Il est donc nécessaire de connaître l'évolution de la température en fonction de la profondeur, autrement dit de connaître le géotherme (Cf thème ST-B).

a) Relations entre les différents géothermes et les courbes du liquidus et du solidus des principaux matériaux des enveloppes terrestres.

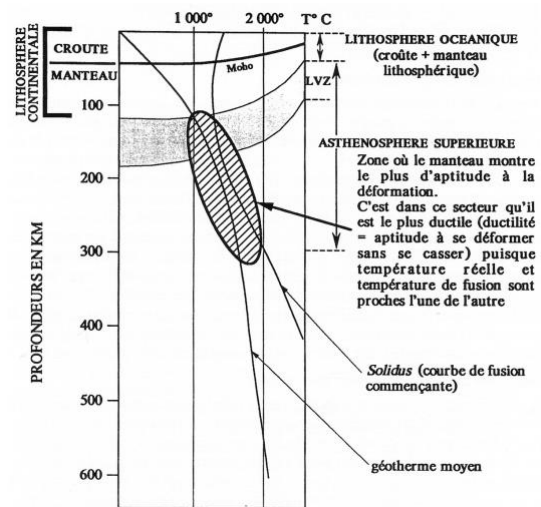
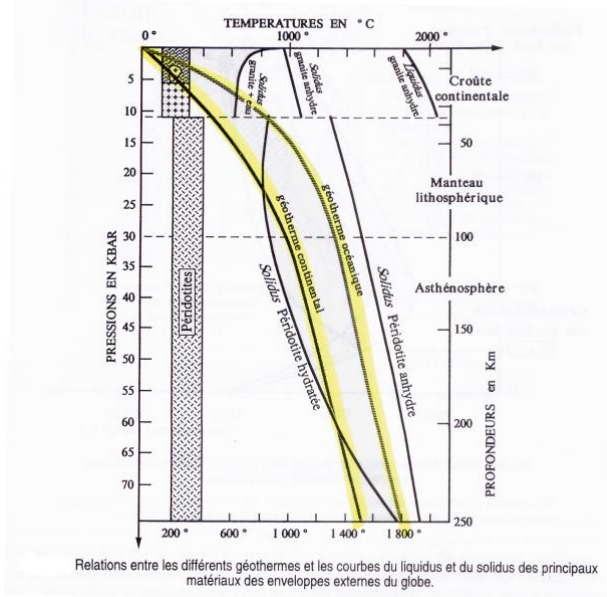


Figure 2 : Position du géotherme du manteau supérieur par rapport à la courbe du solidus péridotitique.

Document 1a et 1b → à faire sur le doc

Dans les conditions thermodynamiques « classiques » où sont les conditions les plus propices à la production de magma ?



b) Les cas possibles de fusion des roches en liaison avec le contexte géodynamique

On appelle **liquidus**,

On appelle **solidus**,

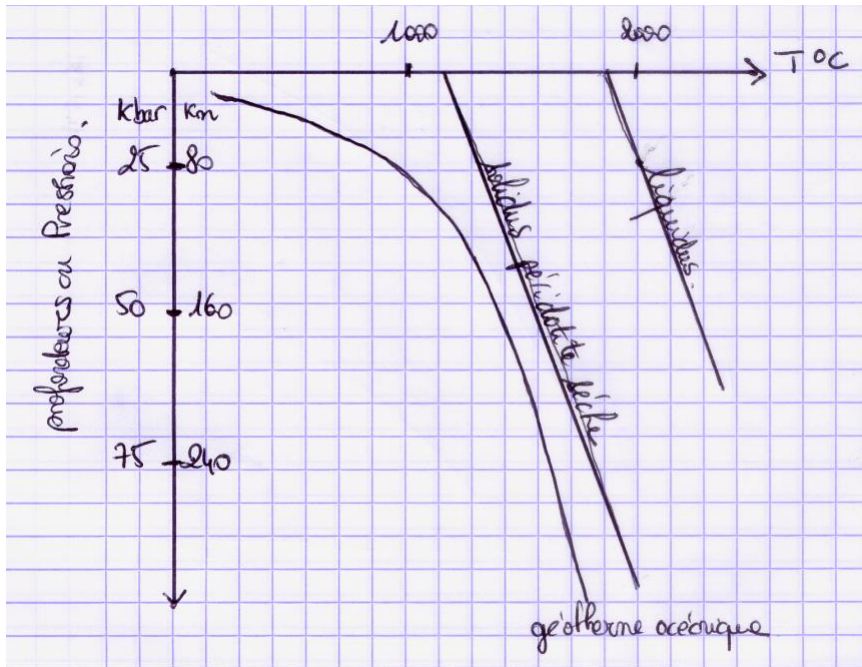
La fusion des roches ne peut donc se réaliser que par un écart par rapport aux conditions normales des zones internes du globe. **Comment peut-on obtenir cet écart ?**

ST-F Le magmatisme

ST- F-2 *Les Processus fondamentaux du magmatisme*

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

A faire sur le document 2 :



D'un point de vue thermodynamique, on remarque que la fusion nécessite :

Soit

Soit

Soit

On peut faire le lien avec la mise en place des magmas en lien avec le contexte tectonique (Cf thème ST-F1)

c) Les roches : un système constitué d'un assemblage de minéraux

Or une roche est un système (Cf physique-chimie) constituée d'un assemblage de minéraux représentant généralement des phases distinctes, il est donc nécessaire d'étudier le comportement des minéraux lorsque l'on augmente la température.

Un minéral porté à des températures croissantes passe successivement de l'état solide à l'état liquide puis à l'état gazeux.

Il est donc nécessaire, afin de comprendre quels seront les produits de fusion des matériaux des enveloppes terrestres, d'étudier quelques diagrammes de phases.

2. Identification des conditions de fusion partielle de phases solides et d'apparition d'un liquide au moyen des diagrammes de phase

a) Les diagrammes de phase, des modèles d'étude

On peut distinguer, selon leur chimie, **deux types principaux de magmas** à l'origine des deux roches les plus représentées à la surface du globe :

- Les **magmas basaltiques**, saturés et basiques à température élevée (vers 1200°C). Ils sont à l'origine de volcanisme et de plutonisme (basalte et gabbro par exemple) ;
- Les **magmas granitiques**, sursaturés en SiO_2 donc acides, à température relativement faible (vers 600-700°C), ils forment essentiellement du plutonisme ;

Le **liquide basaltique** doit donc avoir une origine mantellique et la roche source à l'origine de ce liquide devrait être une péridotite et le **liquide granitique** doit avoir une origine crustale proche du granite. Ainsi, on étudiera

ST-F Le magmatisme

ST-F-2 Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

quelques diagrammes de phase en relation avec la composition d'une périclase de type Lherzolite (cf. infra) et avec la composition d'un granite à savoir :

- Deux diagrammes binaires pour la chimie basaltique : albite-anorthite et diopside-anorthite
- et dans deux diagrammes ternaires : un granitique (quartz-albite-orthose) et un basaltique (olivine-grenat-pyroxène).

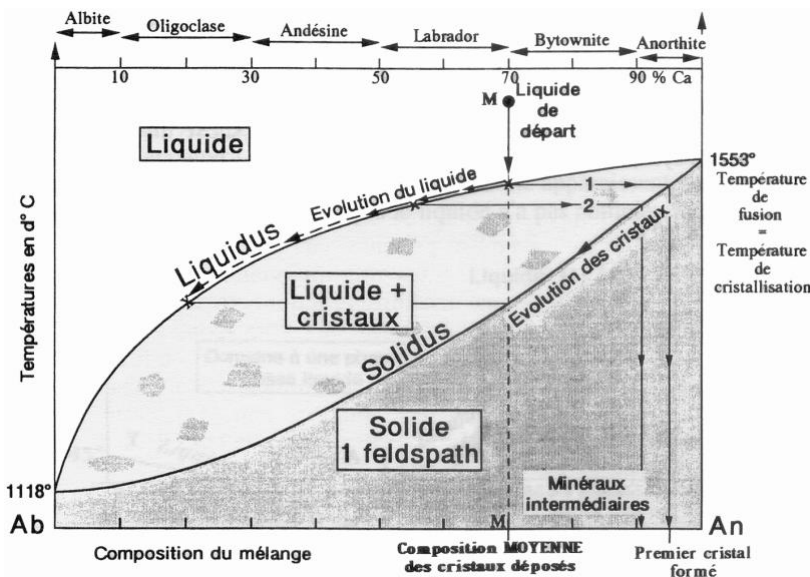
Rq : Ces diagrammes peuvent être utilisés dans le sens de la fusion à partir d'un solide ou dans le sens de la cristallisation à partir d'un magma (cf. thème ST-F-2-2).

b) Les diagrammes de phase de mélanges binaires

i. Cas 1 : Diagramme albite - anorthite - mélange de deux espèces minérales formant une série isomorphe

Isomorphie : c'est la propriété que présentent des composés chimiques différents de cristalliser dans une même structure

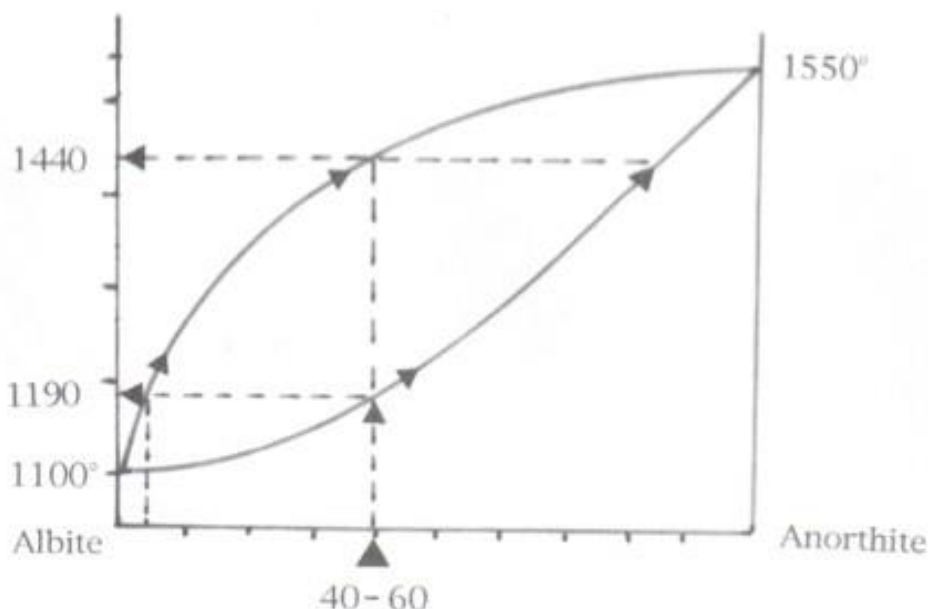
Série isomorphe : c'est une extension de l'isomorphie. Certaines espèces chimiques peuvent être regroupées en famille ou série car elles vont cristalliser dans une même structure.



Albite et Anorthite sont des minéraux qui forment une série isomorphe avec une **miscibilité complète** (Cf pour en savoir plus) à toutes les températures. Les ions Ca et Na peuvent se substituer l'un à l'autre en toutes proportions.

[Document 3a](#)

- Lecture du diagramme [Document 3b](#) (sens de la fusion)



Pour un mélange de 40% An/60% Al

Placer :

Le **solidus** et le **liquidus** (qui sont des courbes univariantes.).

La **gamme de température** → qui correspond au mélange

Les **phases** : solide, liquide, solide + liquide

- **Détermination du taux de fusion à T donnée :**

On utilise la règle des leviers, au niveau du solidus, le taux de fusion est de 0%, au niveau du liquidus le taux de fusion est de 100%.

Pour une composition X quelconque entre A et B, le taux de fusion sera donné par $\frac{AX}{AB} \times 100$.

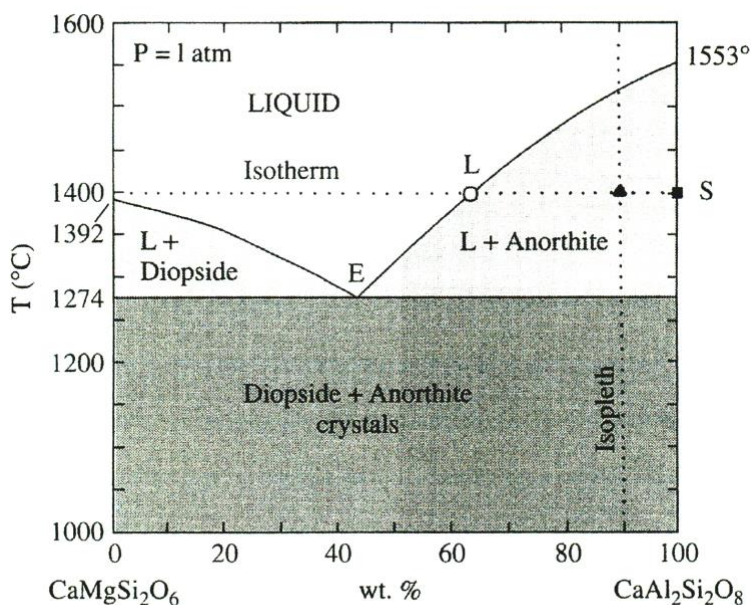
→ AX correspond à la portion de liquide et cela varie en fonction de la température

ii. **Cas 2 : Diagramme diopside - anorthite, deux espèces minérales non miscibles à l'état solides**

Document 4 : Fusion d'un mélange de diopside (pôle CaMg) et d'anorthite (pôle CaAl)

Ces deux minéraux ne sont pas miscibles à l'état solide.

- Lecture du diagramme



On distingue : (faire sur doc)

Liquidus, solidus

phases liquide, solide, liquide + solide

Faire évoluer deux mélanges dans le sens de la fusion :

90%A et 10%B

20%A et 80%B

placer l'eutectique et voir que l'on a toujours même composition quelque soit le mélange de départ

- E = eutectique c'est le point de température de fusion minimum d'un mélange de ces deux minéraux, c'est un

- $T_e = 1274^\circ < T_f \text{ diopside } 1392^\circ < T_f \text{ anorthite } 1553^\circ$

ST-F Le magmatisme

ST-F-2 Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

- Lorsqu'on réalise expérimentalement une fusion d'un mélange quelles que soient les proportions de diopside et d'anorthite

.....

- L'isotherme 1274° est un

La fusion d'un mélange Diopside/Anorthite est, le liquide obtenu à une composition différente du solide de départ, sauf si ce solide à une composition An₄₂ (composition de l'eutectique).

On appelle température eutectique

- Pour des compositions de mélange diopside-anorthite avec une composition d'anorthite supérieure à 42% la température restera à 1274° tant que du diopside n'aura pas été fondu (comme un mélange eau + glace reste à 0° tant que de la glace est présente). La chaleur est absorbée par la fusion du diopside. La composition du liquide reste constante à l'eutectique.
- Lorsque la totalité du diopside a été fondue, il ne reste plus dans le solide que de l'anorthite, la température augmente alors et de l'anorthite fond ce qui augmente la composition en CaAl₂Si₂O₈ du liquide. Ce changement de composition du liquide peut être matérialisé par une évolution de la température et donc de la composition chimique le long du liquidus (il ne reste plus que de l'anorthite à fondre). Lorsque l'isotherme recoupe la composition chimique du solide initial alors la fusion est totale.
- Pour un solide à 90% d'anorthite la température de fusion complète est de 1520°.

• Détermination du taux de fusion à l'eutectique

Le taux de fusion maximal pour que la composition du liquide reste à l'eutectique peut être déterminé par la règle des leviers.

Si le solide de départ à une composition correspondant à l'eutectique alors le pourcentage de fusion sera de 100.

Si le solide de départ est constitué uniquement d'anorthite alors le pourcentage de fusion sera de 0.

Pour une composition quelconque X comprise entre E et A le taux de fusion sera $\frac{XA}{EA} \times 100$.

si X = E on obtient bien 100%

Si X = A on obtient bien 0%

Dans l'exemple

EA = 58

XA = 10

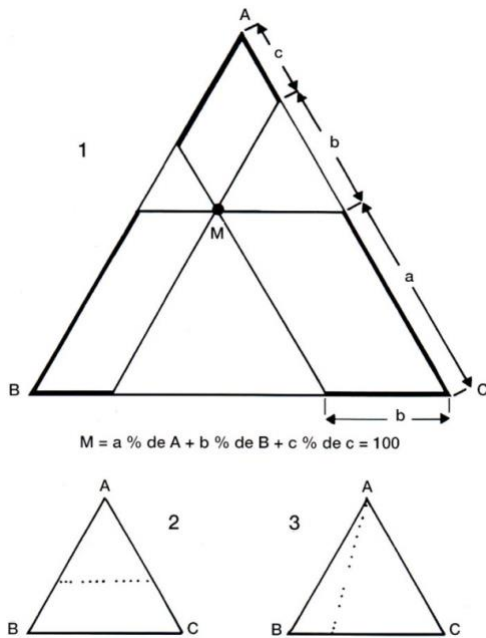
On trouve 17,24%.

c) Les diagrammes de phase des mélanges ternaires

i. Comprendre les diagrammes ternaires

Document 5

La composition d'un mélange de trois composants est représentée par un point situé à l'intérieur d'un triangle équilatéral. Chacun des sommets représente 100% de l'un des trois constituants. La teneur en chacun des constituants est déterminée en traçant les parallèles à chaque côté.



Représentation triangulaire

de la composition d'un mélange de 3 composants.

1. Chaque pourcentage de composant est situé sur un segment parallèle au côté opposé au pôle 100 % du composant (en A, il y a 100 % de A). Les intersections de ce segment avec deux côtés du triangle correspondent au pourcentage.
2. Tous les points situés sur un segment parallèle à un côté sont caractérisés par un pourcentage constant (ici de A).
3. Tous les points situés sur un segment passant par un sommet sont caractérisés par la même proportion des 2 autres composants à l'opposé du sommet considéré (ici B / B+C).

Documents 6

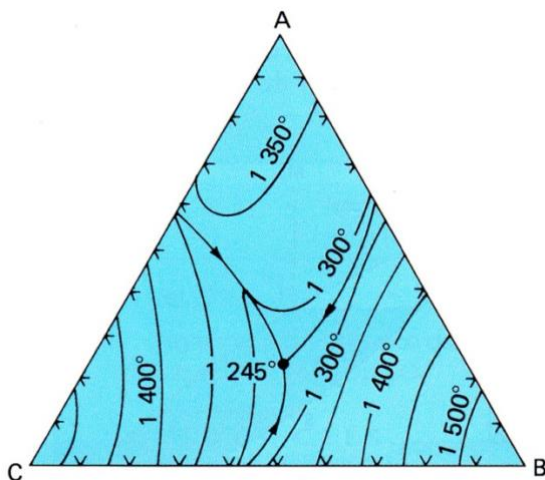
Soit un mélange ABC réalisé expérimentalement.

Pris 2 à 2 ces minéraux représentent des mélanges binaires avec eutectiques

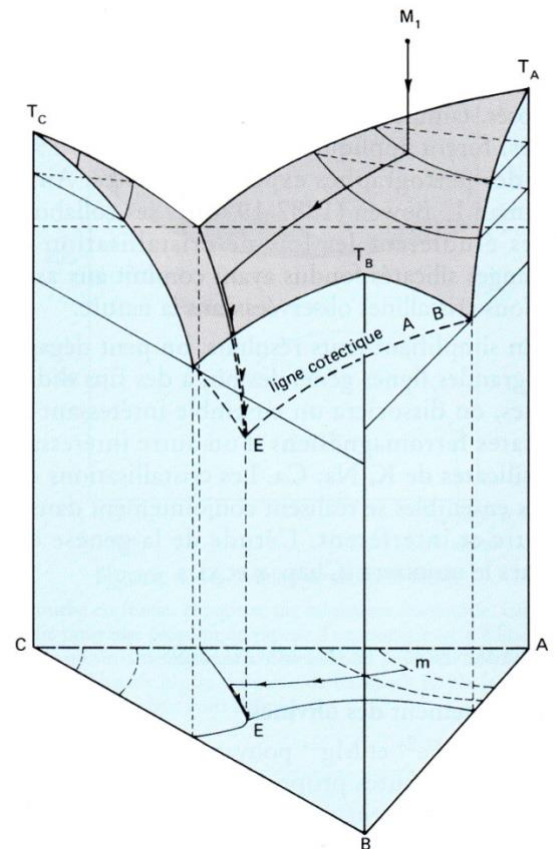
On peut construire un volume dont les trois faces correspondent aux trois types possibles de mélanges.

A partir de chaque sommet partent 3 surfaces courbes sécantes deux à deux selon une **ligne cotectique** et se réunissant toutes en un point E qui correspond à l'eutectique du mélange ternaire on parle de **puits eutectique**. Cette surface composite représente le liquidus du mélange ternaire.

Documents 7

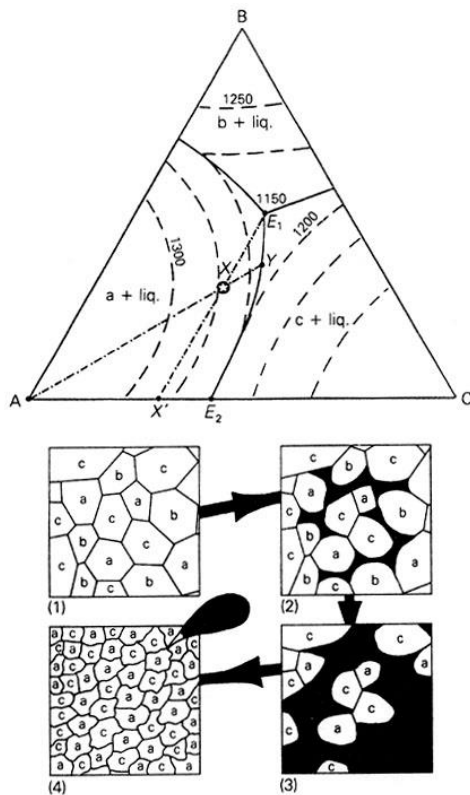


+ diaporama



On utilise sa projection dans le plan horizontal en projetant les lignes isothermes

obtenues par l'intersection de la surface du liquidus avec les plans horizontaux correspondant aux isothermes.



En partant d'un **solide X** de composition 40% de A, 30% de B et 30% de C le premier liquide formé à une composition différente de la composition de X et se forme à **l'eutectique E₁** (fusion incongruente). **La composition du liquide produit restera en E₁ à l'eutectique tant que les trois phases seront en présence.** Dans ce cas c'est la phase minérale B qui sera consommée la première (l'eutectique à une composition plus riche en B que X). Lorsque tout B aura fondu, alors le solide résiduel ne sera plus constitué que de A et C en X'.

Le pourcentage maximal de X qui produira par fusion partielle un liquide de composition eutectique sera donné par la règle des leviers maximum de liquide en **E₁ = XX'/E₁X' * 100**

On suppose dans ce cas que la fusion se réalise à l'équilibre, ce qui n'est pas obligatoirement le cas (cf. infra).

Document 8 + diaporama

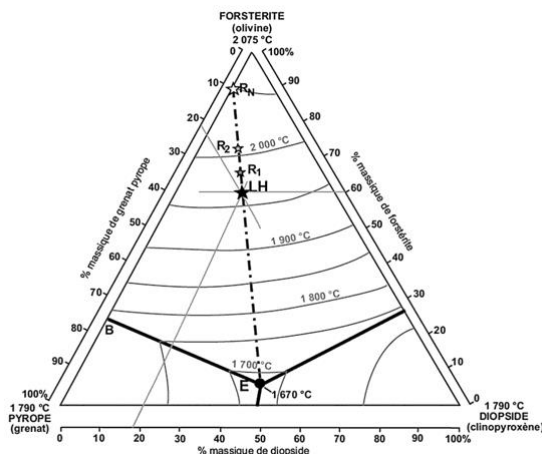
ii. Cas 1 : Diagramme Olivine-Grenat-Pyroxène

Document 9

Composition de LH ? ➔

Quelle est la température de fusion du mélange ternaire étudié ? que pouvez-vous dire à ce sujet ? ➔

Composition du premier liquide formé ? ➔



Composition de la roche dite résiduelle ? ➔

En complément 1

Si, au cours de la fusion, le liquide formé s'extrait du mélange, on parle alors de **fusion fractionnée** ; la composition de la roche résiduelle (ici péridotite résiduelle) évolue de façon complémentaire par rapport au liquide de composition eutectique produit et passe ainsi par les compositions transitoires R₁, R₂, etc. jusqu'à la

ST-F Le magmatisme

ST- F-2 Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

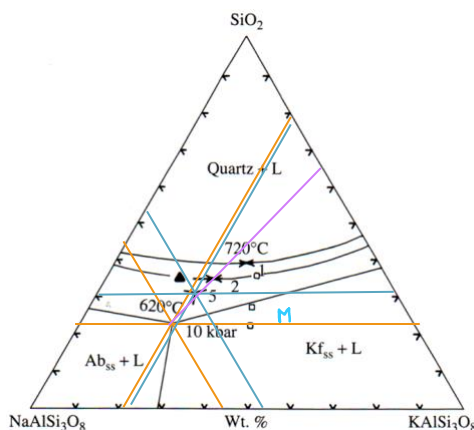
composition binaire Rn acquise lorsque le dernier clinopyroxène (minéral limitant ici) intègre le liquide. Le liquide obtenu est toujours de composition eutectique et le mélange solide résiduel (résidu réfractaire) n'est plus que binaire (Fo – Py), de nature harzburgitique.

En complément 2

Tant que la fusion s'opère à l'eutectique, la température du système demeure à 1 670°C. Elle peut ensuite augmenter jusqu'à 1 770°C, température à laquelle le solide binaire résiduel entame une nouvelle phase de fusion avec production d'un liquide de composition eutectique B ; la composition de ce nouveau liquide n'évolue pas tant que la phase pyrope n'a pas entièrement disparu. Au delà, la température peut de nouveau augmenter au fur et à mesure que la seule phase résiduelle (forstérite) fond. Cependant, ces deux dernières étapes (évolution binaire et évolution de la seule forstérite) sont sans grand intérêt car elles correspondent à des taux de fusion bien souvent supérieurs à ceux qui semblent responsables de la production des magmas actuels.

iii. Cas 2 : Diagramme Quartz-albite-orthose

Document 10a et 10b (Diagramme ternaire obtenu par expérimentation à $\text{PH}_2\text{O} = 0,2 \text{ GPa}$).



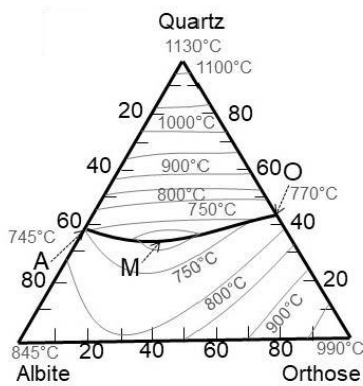
Composition de M ? →

Quelle est la température de fusion du mélange ternaire étudié ? →

Composition du premier liquide formé ? →

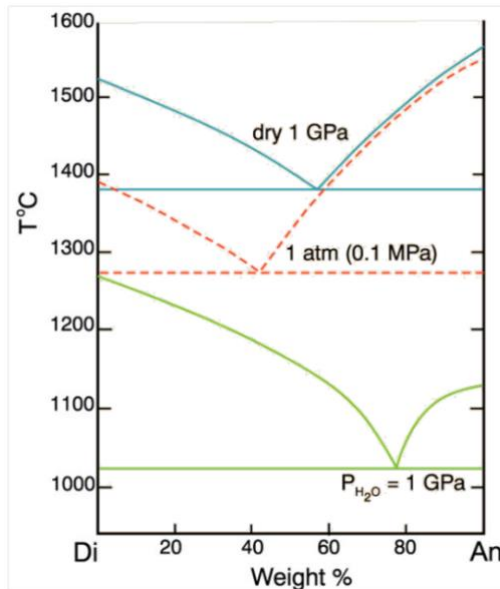
Quelle espèce minérale va fondre en premier ? →

Composition de la roche dite résiduelle ? →



Que représentent les points M, A et O dans le diagramme ternaire de la figure 10b ? →

3. Effet de la pression et de la présence de fluide sur les diagrammes de phase



Document 11

On distingue : (faire sur doc)

-
-

II. La composition du magma dépend de la nature de la source et du taux de fusion partielle

A. Les apports des données géochimiques

1. Répartition des éléments chimiques dans les phases liquide et solide et taux de fusion

Les éléments chimiques comme le Ti, Al, Ca, **Na** et **K** sont des éléments qui appauvrissant d'autant le solide résiduel, on les appelle (ils ne s'associent pas facilement aux réseaux cristallins) ou éléments Inversement, des éléments comme **Mg** et **Fe** sont des

schéma

On peut qualitativement illustrer les différences de composition chimique en partant d'une roche de départ qui comporte une certaine quantité d'éléments hygromagmatophiles.

Si l'on fait subir une **faible fusion partielle** les éléments hygromagmatophiles vont passer préférentiellement dans la phase liquide et seront en **proportion importante** vu le faible pourcentage de liquide. Inversement si l'on fait subir une **forte fusion partielle** les éléments hygromagmatophiles vont se trouver **dilués** avec les autres éléments chimiques.

→

2. Les rapports isotopiques permettent d'identifier deux sources majeures des liquides magmatiques

a) Les rapports isotopiques sont des signatures géochimiques des mécanismes de fusion par le comportement plus ou moins incompatible des isotopes qui les forment

^{87}Sr et ^{143}Nd sont deux isotopes radiogéniques dérivant, respectivement, de la désintégration du ^{87}Rb et du ^{147}Sm .

Les rapports isotopiques en Sr ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$), en Nd ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) isotopiques présentent l'avantage de ne pas fractionner lors de la fusion partielle (ni lors de la cristallisation fractionnée) ainsi la signature enregistrée par les

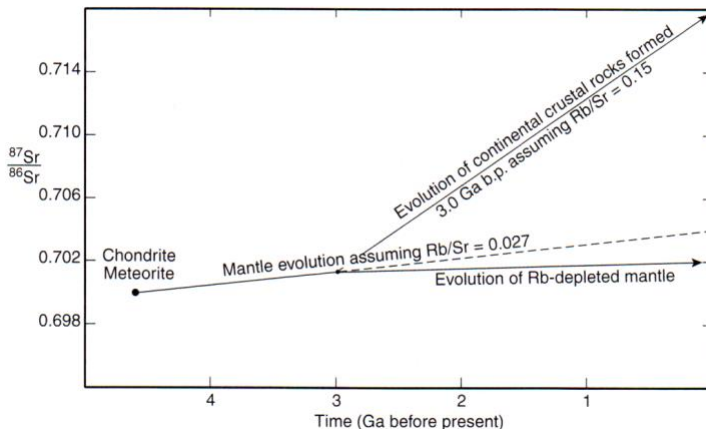
ST-F Le magmatisme

ST-F-2 Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-1 : Production des magmas primaires

magmas et les roches qui en seront issues est donc directement celle de leur roche source, en l'absence de contamination.

Dans le couple Rb/Sr ($Rb \rightarrow Sr$)



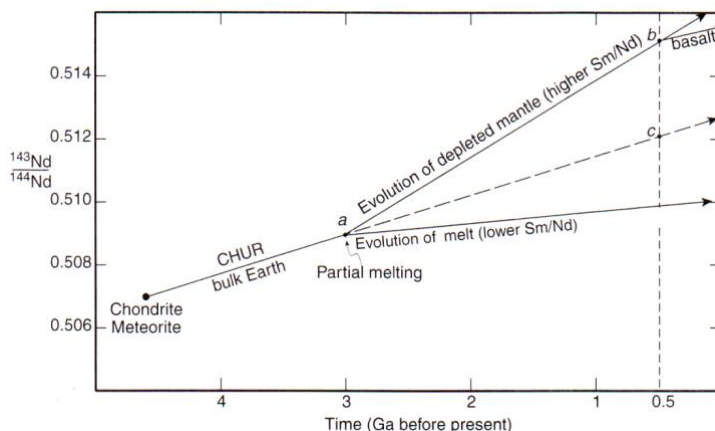
Document 12

Le rubidium est un élément fortement incompatible, davantage que le strontium.

→ Quel lien peut-on faire entre le ^{87}Rb , l'évolution du rapport $^{87}Sr/^{86}Sr$ et le liquide magmatique issu d'une fusion partielle d'une roche source du rubidium ?

Lors de la fusion partielle d'une roche en contenant,

Dans le couple Sm/Nd ($Sm \rightarrow ^{143}Nd$)



Document 13

Le samarium et le néodyme, eux, sont deux terres rares légères incompatibles, mais le néodyme est plus incompatible que le samarium. (donc plus de Nd dans le liq)

→ Quel lien peut-on faire entre le Sm, le ^{143}Nd , le rapport Sm/Nd , l'évolution du rapport $^{143}Nd/^{144}Nd$ et le liquide magmatique issu d'une fusion partielle d'une roche source du rubidium ?

b) Les liquides magmatiques ont une origine mantellique ou crustale

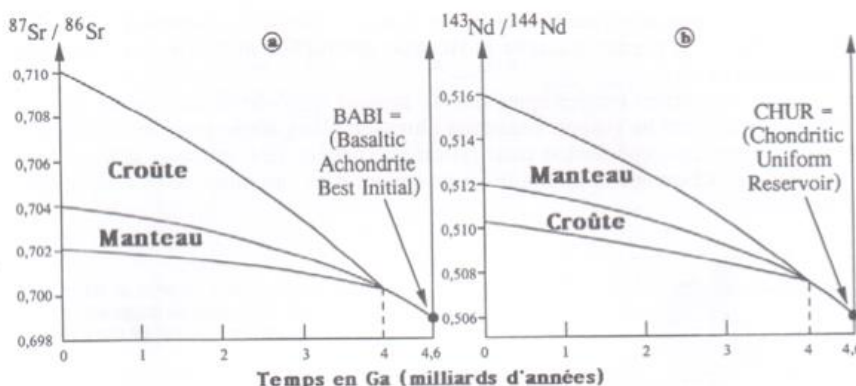


Fig. I-9 : Variations des rapports isotopiques du strontium et du néodyme depuis la formation de la terre.

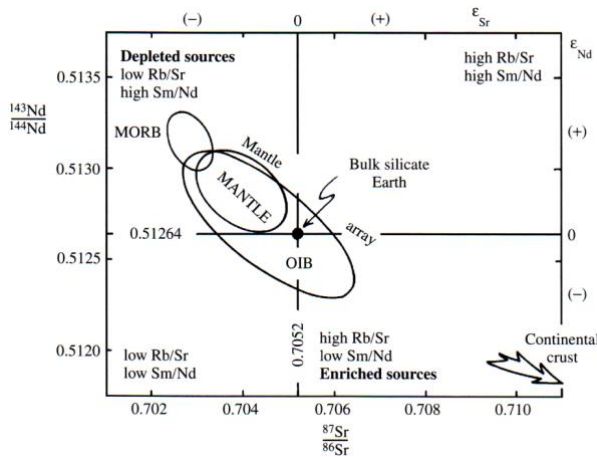
Des échantillons de roches issus du refroidissement d'un même magma auront des rapports ($^{87}Sr/^{86}Sr$) et ($^{87}Rb/^{86}Sr$) différents que l'on peut mesurer.

Le rapport Rb/Sr renseigne donc sur la source du magma.

Par exemple, un magma qui dérive de la fusion partielle de roches sources avec un rapport Rb/Sr faible hérite de cette propriété géochimique et possèdera un rapport ($^{87}Sr/^{86}Sr$) faible.

Documents 12 et partie gauche du document 14

Actuellement, les roches du manteau (péridotite), possèdent un rapport ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) faible et un rapport ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) élevé. C'est l'inverse pour les roches de la croûte continentale. Document 13 et partie droite du document 14



Lorsqu'on place les liquides basaltiques dans un diagramme isotopique Nd/Sr, on constate qu'ils possèdent des rapports proches de ceux du manteau, ils ont donc une origine mantellique et la roche source est une péridotite.

Document 15

Au contraire, lorsqu'on place les liquides granitiques dans ce même diagramme, ils possèdent des rapports proches de ceux de la croûte continentale (attention pas toujours!! cf. différenciation infra), ils ont donc une origine crustale et la roche source est un granitoïde.

MORB : basalte des dorsales médio océaniques – **OIB** (OIB

(Ocean Island Basalts) pour les îles issues de l'activité d'un point chaud). **Bulk Silicate Earth** = composition de la chondrite qui représente la Terre globale

B. La fusion partielle d'une péridotite produit un liquide basaltique

Quantitativement à la surface du globe 95% des roches volcaniques sont des basaltes (et 80% des roches plutoniques sont des granites). Nous allons tout d'abord nous intéresser aux magmas basaltiques d'origine mantellique et le **manteau supérieur est composé de péridotites solides (ST-B)**. Les péridotites sont des roches ultrabasiques holocristallines constituées surtout d'olivine et de pyroxènes et d'autres minéraux qui diffèrent selon les conditions (notamment de pression donc de profondeur).

1. Le magma basaltique correspond à l'eutectique d'un mélange ternaire

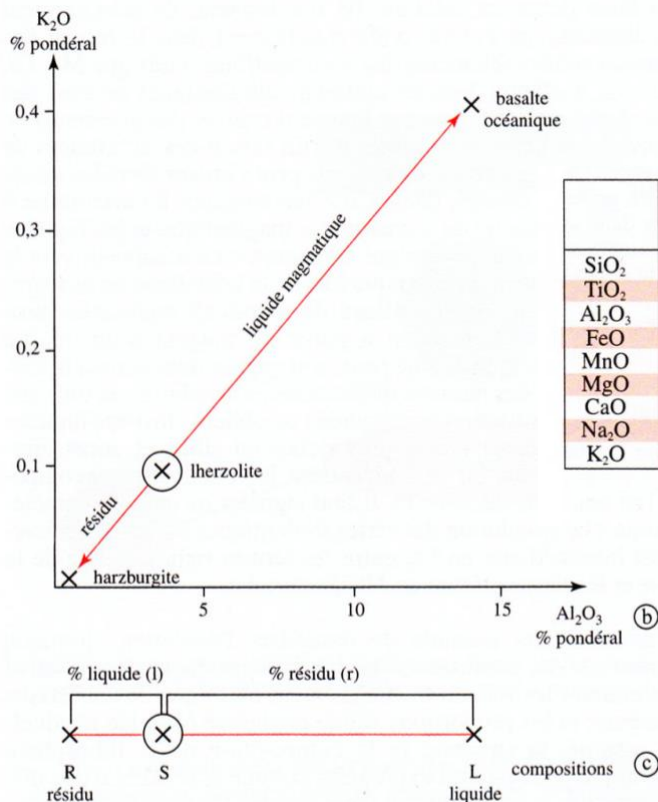
→ Cf partie diagramme

- Le premier liquide a une **composition eutectique** (ne dépend pas du taux de fusion) = composition d'un basalte → donc c'est bien le premier liquide à apparaître par fusion d'une péridotite mantellique (lherzolite) → **composition relativement uniforme** (Cf infra) → uniformité des MORB même si diversité des lherzolite
- La composition eutectique est indépendante de la minéralogie initiale de la péridotite : le liquide obtenu par fusion partielle demeure basaltique quelles que soient les éventuelles variations de proportion des minéraux ; seul le volume d'eutectique formé diffère.
Appliquée au contexte péridotitique du manteau, cela nous montre qu'une péridotite délivre, lors de sa fusion partielle, des **liquides de composition non péridotitique mais basaltique**.
- La lherzolite s'épuise en phase alumineuse (grenat alumineux) et clinopyroxène (diopside)
- La composante solide restante est appauvrie en cette phase alumineuse et enrichit en olivine → sa composition varie en fonction du taux de fusion contrairement à la phase liquide

2. Taux de fusion et composition du magma obtenu

a) Estimation du taux de fusion

Le solide résiduel est encore une péridotite mais qui est plus pauvre en certains éléments chimiques en particulier le Ti, Al, Ca, Na et K : la harzburgite. Au cours de la réaction de fusion partielle, une nouvelle phase solide de composition différente à la roche d'origine se forme, la fusion est incongruente.



| | Harzburgite ophiolitique | Lherzolite à grenat | Pyrolite | Basalte océanique |
|--------------------------------|--------------------------|---------------------|----------|-------------------|
| SiO ₂ | 42,3 | 45,3 | 45,2 | 47,1 |
| TiO ₂ | 0,1 | 0,2 | 0,7 | 2,3 |
| Al ₂ O ₃ | 0,5 | 3,6 | 3,5 | 14,2 |
| FeO | 7,1 | 7,3 | 9,2 | 11,0 |
| MnO | 0,1 | 0,1 | 0,14 | 0,2 |
| MgO | 49,6 | 41,3 | 37,5 | 12,7 |
| CaO | 0,1 | 1,9 | 3,1 | 9,9 |
| Na ₂ O | 0,1 | 0,2 | 0,6 | 2,2 |
| K ₂ O | 0,005 | 0,1 | 0,13 | 0,4 |

(a)

Document 16

Si l'on suppose qu'il existe une proportionnalité entre taux de fusion et pourcentage des éléments hygromagmatophiles (incompatibles) passant dans la phase liquide il est possible d'appliquer la règle des leviers.

En choisissant deux éléments hygromagmatophiles comme le K et Al et en représentant les pourcentages de ces éléments en % d'oxydes dans le résidu, dans le liquide produit et dans la roche de départ on peut déterminer le taux de fusion.

Dans l'exemple proposé, le taux de fusion est $f = \frac{RS}{RL}$, on peut aussi l'estimer directement avec le tableau en utilisant un élément très hygromagmatophile comme le potassium :

Soit une masse m_l de lherzolite qui fond donnant un liquide basaltique de masse m_b et un résidu harzburgitique de masse m_h , on a :

$$m_l = m_b + m_h \text{ et } f = \frac{m_b}{m_l}$$

Par conservation de la masse, $m_l \times [K]_l = m_b \times [K]_b + m_h \times [K]_h$

$$m_l \times [K]_l = m_b \times [K]_b + (m_l - m_b) \times [K]_h$$

$$[K]_l = f \times [K]_b + (1 - f) \times [K]_h$$

$$\text{Soit } f = \frac{[K]_l - [K]_h}{[K]_b - [K]_h}$$

On remarque que le MORB :

- Contient plus de SiO₂ ➔
- Contient plus d'Al ➔
- Peu enrichi en Fe, enrichi en Ca, appauvri en Mg (moins d'olivine !) ➔ donc si on fait le total de ces éléments que l'on peut considérer comme des bases, il est moins riche en bases donc il est basique alors que la péridotite sera ultrabasique
- Enrichi en Na et K (même si pas bcp) donc

On peut dire l'inverse pour la Harzburgite ➔ on retrouve donc ici

b) Fusion partielle et diversité des magmas basaltiques

i. La nature du magma primaire dépend du mécanisme de fusion

La fusion de la roche mère est toujours partielle, et actuellement avec un taux inférieur à 30%.

Il existe différents types de fusion partielle, deux sont naturellement retrouvés :

- La **fusion partielle à l'équilibre**, qui produit un liquide en équilibre avec la phase solide cristalline résiduelle. Le liquide magmatique est extrait de la péridotite uniquement à la fin de la fusion. Sa composition est homogène et intègre l'ensemble des variations chimiques intervenues au cours des différentes étapes de la fusion car le liquide est resté en contact avec les matériaux compatibles (réfractaires). Dans l'exemple, le liquide évolue progressivement de e vers f puis M avec l'augmentation du taux de fusion ;

- La **fusion partielle par fractionnement**, les liquides sont extraits à plusieurs reprises pendant la fusion, cela peut se produire du simple fait de la différence de densité entre le magma produit et le solide résiduel. Dans l'exemple, 3 liquides, de composition, e, b puis C sont produits successivement sans intermédiaire ;

- Document 17

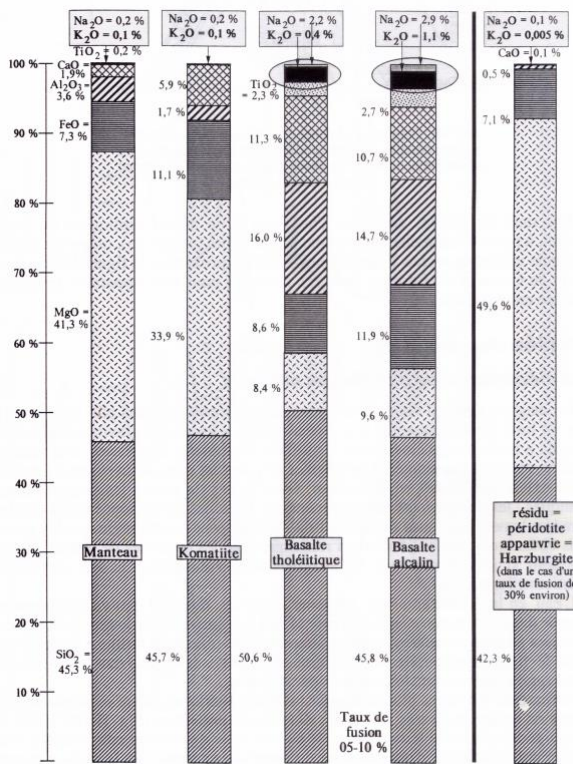
ii. La nature du magma primaire dépend du taux de fusion partielle

- Document 18 → Quel lien peut-on établir entre la nature du magma et la fusion partielle ?

On observe que le magma obtenu présente :

- Une composition
- Une composition

La figure 18, purement théorique, résume les deux cas principaux de fusion.



Formation des différents types de basaltes (actuels ou anciens : Komatiites) en fonction des taux de fusion, et composition chimique du résidu non fondu (Harzburgite).

c) Facteurs contrôlant la composition de l'eutectique

Plusieurs facteurs modifient la composition de l'eutectique, on peut citer :

- L'augmentation de pression, qui entraîne une diminution de SiO₂ dans la fraction liquide ;
- L'augmentation de la concentration en eau, qui entraîne une augmentation de SiO₂ dans la fraction liquide.

- Bilan :

3. Extraction et ascension du magma → pour info

a) Une différence de densité → pour info

L'ascension des magmas est rendue possible grâce à la poussée d'Archimède qui s'exerce sur les magmas dont les densités sont de 2,8-2,3 contre 3,2-3,3 pour les péridotites.

De plus, les magmas sont des liquides incompressibles qui vont être chassés vers la surface par simple pression.

Pour extraire un magma du manteau un taux de fusion minimum est nécessaire : le liquide produit est distribué entre les minéraux et ne constitue pas d'emblée un milieu continu.

On estime à 1% le seuil de fusion à partir duquel un liquide peut s'extraire. Les fines gouttelettes vont alors se rassembler en un liquide de volume suffisant pour remonter.

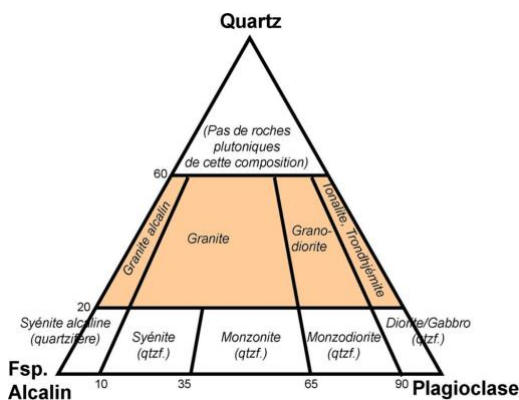
Au cours de sa remontée, le liquide magmatique pourra arracher des fragments d'encaissant formant des enclaves (ex. en surface des basaltes à nodules de péridotite).

b) Une fracturation hydraulique → pour info

Le liquide magmatique présente une densité plus faible et va exercer sur le solide une pression hydraulique égale à $P = \Delta\rho gh$.

A partir de 10 km de profondeur la colonne de liquide engendre une pression suffisante pour dépasser le seuil de rupture des roches. Le liquide s'échappe brutalement et la diminution de pression dans la colonne de liquide entraîne un arrêt temporaire de l'alimentation vers la surface. Le phénomène est donc discontinu et peut présenter une certaine périodicité.

C. La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) produit un liquide granitique



1. Origine des granites (vue simplifiée)

Rappel : Quantitativement à la surface du globe 80% des roches plutoniques sont des granites.

Attention : Par définition, les **granites** sont des roches plutoniques riches en quartz, qui comportent plus de feldspath alcalin que de plagioclase. En réalité, on s'intéresse le plus souvent aux granitoïdes zone en orangé sur la classification des roches plutoniques, c'est-à-dire aux roches plutoniques avec plus de 20% de quartz, indépendamment de la nature du ou des feldspaths qu'on y trouve. **Document 19**

Pour info : Les granites peuvent provenir de la fusion partielle du manteau, suivie de la différenciation du magma ainsi produit, sans aucune intervention du matériel de la croûte continentale. Ces granites, peuvent se trouver au niveau des dorsales, de rifts, de points chauds ou encore de zones de subduction intra-océaniques.



1er cas : fusion partielle du manteau + différenciation magmatique

Ce qui nous intéresse :



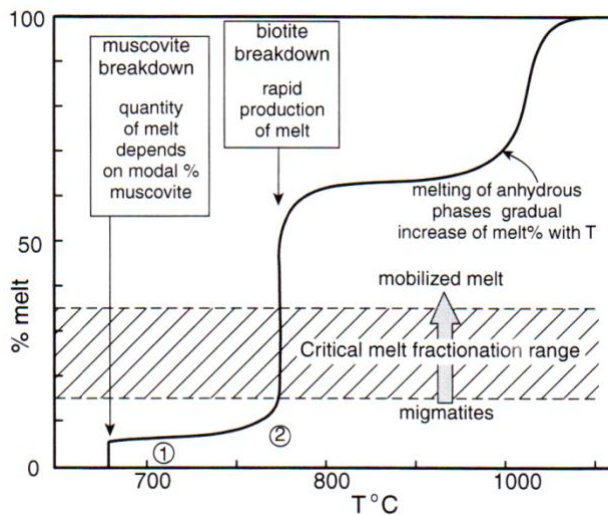
2eme cas : fusion partielle de la croûte continentale

Les granites peuvent provenir directement de la **fusion partielle de la croûte continentale**, sans aucune intervention de matériel mantellique. Cette fusion crustale → **anatexie crustale** a souvent lieu dans les zones

orogéniques par enfoncement-réchauffement de portions de croûte continentale, ainsi que par l'hydratation ou la décompression (par remontée) de fragments de croûte continentale profonde chaude.

Rq : Ce n'est pas toujours aussi tranchée quant à l'origine des granites mais nous nous limiterons à l'origine crustale des granites

2. L'anatexie crustale indissociable du métamorphisme



Document 20

On constate :

photo migmatite / faire lien avec granite....

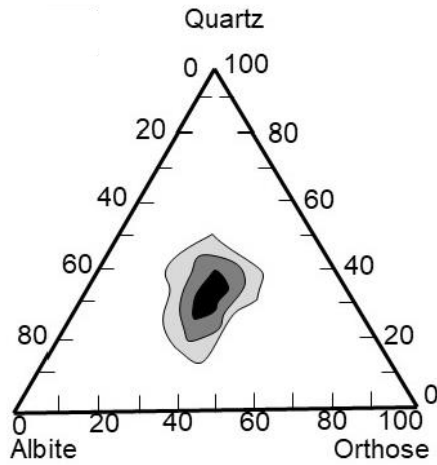
→ Revenir sur les diagrammes ternaires QOA et faire le lien avec liquide granitique et donc granite d'anatexie. Si le temps !!!! Les granites ont la composition d'un système comportant, d'une part du quartz, et d'autre part un constituant avec albite et orthose. La composition de ce système s'apparente au leucosome présent dans les migmatites. Ainsi les granites pourraient provenir d'un liquide extrait par fusion de la croûte continentale à partir des gneiss. Le système quartz-albite-orthose explique la présence de leucosome et de restites dans les migmatites issues de la fusion des gneiss.

→ L'anatexie est indissociable du métamorphisme puisqu'elle nécessitera une **modification de la pression et/ou de la température** (cf. infra) d'une partie de la croûte.

3. La fusion partielle produit, à partir de roches crustales différentes, des liquides identiques de composition granitique dans la croûte continentale

Les roches crustales possédant souvent de la silice et des feldspaths, d'autant plus dans la croûte inférieure (cf. ST-A et D), on peut utiliser le diagramme Qz/Ab/Or pour suivre la fusion d'une roche crustale (Cf paragraphe correspondant). Ce diagramme de phase possède un minimum thermique vers 700°C dont la composition est celle d'un granite alcalin.

Expérimentalement encore, la fusion d'une argile, sédiment classique de croûte continentale forme là encore un liquide granitique vers 700°C.



Document 21 : Projection de la composition de différents granites échantillonnés dans la croûte terrestre (plus de 500 points).

→ Coïncidence entre le point M de la figure 10b et de l'eutectique ternaire en 10a et la position des granites → lien génétique entre ces granites et la fusion des matériaux de la croûte continentale.

Bilan :

Conclusion :

La fusion partielle des roches mantelliques ou crustales peut être réalisée sous certaines conditions. La nature et la composition du liquide magmatique obtenu dépendent de la nature de la source (composition chimique de départ) et du taux de fusion (comportement des éléments incompatibles et rôle de l'eutectique).

On peut alors définir un magma comme un mélange :

- De fluides : silicates fondus, éventuellement sulfures, carbonates, gaz issu de la décompression lors de la remontée ;
- Et de solides (cristaux, enclaves).

| | | | |
|--------------------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | A | | H |
| anatexie crustale, 18 | | harzburgite, 16 | |
| | D | hygromagmatophiles., 13 | |
| <i>décompression adiabatique</i> , 6 | | | L |
| diagrammes binaires, 7 | | ligne cotectique, 10 | |
| diagrammes ternaires, 7 | | <i>liquidus</i> , 5 | |
| | E | | M |
| éléments compatibles, 13 | | magmas, 4 | |
| éléments incompatibles, 13 | | | P |
| <i>eutectique</i> , 8 | | puits eutectique, 10 | |
| | F | | S |
| fusion partielle, 13 | | <i>solidus</i> , 5 | |
| | G | | T |
| granites, 18 | | taux de fusion, 8 | |
| granitoides, 18 | | | |

Source : Cours de CV et JMF modifiés