



Intrusion stratifiée dans le fjord de Kangerlussuaq (Complexe de Skaergaard), dans le sud-est du Groenland. Source : [GEOPHOTOSCAPES](#)

ST-F LE MAGMATISME

ST-F-2 Les processus fondamentaux du magmatisme

RESUME

Une série magmatique est définie comme un ensemble de roches mises en place dans une même région, au cours d'un intervalle de temps relativement limité et présentant entre elles des liens génétiques.

Une série magmatique présente généralement un ensemble de roches, allant de termes basiques à destermes différenciés, de volumes respectifs souvent très différents et attestant d'une évolution de la composition des magmas (différenciation magmatique).

La différenciation des magmas résulte de l'extraction d'un mélange de cristaux de composition différente de celle du liquide. Les autres mécanismes d'évolution des magmas sont les mélanges de magmas et l'assimilation d'éléments solides (contamination).

La composition des liquides basaltiques initiaux et des roches différenciées obtenues conduit à définir trois séries magmatiques principales : les séries tholéiitique, calco-alkaline et alcaline.

La série tholéiitique caractérise le magmatisme des dorsales ainsi que celui de grands épanchements endomains intraplaques océaniques ou continentaux. La série calco-alkaline caractérise les zones de subduction et sont souvent le siège d'éruptions explosives. La série alcaline s'observe principalement en domaine intraplaque.

C Vilbert

ST-F-2-2 Évolution des liquides-
(2 heures)

THEME ST-F – LE MAGMATISME

THEME ST-F-2 – LES PROCESSUS FONDAMENTAUX DU MAGMATISME

ST-F-2-2 – Evolution des liquides

ST-F-2-2 Évolution des liquides

Une série magmatique est définie comme un ensemble de roches mises en place dans une même région, au cours d'un intervalle de temps relativement limité et présentant entre elles des liens génétiques.

Une série magmatique présente généralement un ensemble de roches, allant de termes basiques à des termes différenciés, de volumes respectifs souvent très différents et attestant d'une évolution de la composition des magmas (différenciation magmatique).

La différenciation des magmas résulte de l'extraction d'un mélange de cristaux de composition différente de celle du liquide. Les autres mécanismes d'évolution des magmas sont les mélanges de magmas et l'assimilation d'éléments solides (contamination).

La composition des liquides basaltiques initiaux et des roches différenciées obtenues conduit à définir trois séries magmatiques principales : les séries tholéitique, calco-alcaline et alcaline.

La série tholéitique caractérise le magmatisme des dorsales ainsi que celui de grands épanchements en domaines intraplaques océaniques ou continentaux. La série calco-alcaline caractérise les zones de subduction et sont souvent le siège d'éruptions explosives. La série alcaline s'observe principalement en domaine intraplaque.

Les séries magmatiques engendrées dans les différents contextes géodynamiques sont différentes, en termes de nature des magmas, de composition chimique, et de composition isotopique.

- Identifier une série magmatique à partir de différentes sources de documents (cartes, étude de gisements, analyse chimiques, datation) et proposer des hypothèses sur l'histoire régionale de cette série.

- Distinguer l'évolution des phases solides et liquides dans une cristallisation fractionnée en mettant en relation les observations pétrologiques (ordre de cristallisation, cristaux zonés), les données géochimiques et les diagrammes : diagrammes binaires à solution solide (albite-anorthite) ou diagramme ternaire.

- Exploiter des observations pétrologiques et des données géochimiques pour formuler et argumenter des hypothèses sur les processus pouvant guider une différenciation magmatique.

- Identifier la nature d'une série magmatique en utilisant un diagramme TAS et AFM.

- Formuler des hypothèses sur le contexte géodynamique de mise en place d'ensembles magmatiques à partir de données pétrologiques et géochimiques.

- Associer certains dynamismes éruptifs et la (les) série(s) observée(s).

- Exploiter des données afin de déterminer la diversité des sources et la variation du taux de fusion partielle.

- Exploiter des données afin de déterminer les deux moteurs de la différenciation magmatique (la cristallisation fractionnée et l'existence de mélanges).

- Exploiter des documents afin de proposer une (des) hypothèse(s) sur l'histoire régionale d'une série magmatique.

Expliquer les processus magmatiques dans le cadre de la formation de la lithosphère océanique.

Précisions et limites :

Un seul exemple de série magmatique est utilisé pour définir les arguments en faveur d'une évolution par cristallisation fractionnée, associant données pétrologiques et données géochimiques (nature du magma initial, ordre de cristallisation...).

Leur chimie n'est présentée que dans les diagrammes d'éléments majeurs. Seules les grandes séries sont abordées.

La nomenclature des différents termes volcaniques et plutoniques des différentes séries n'est pas à mémoriser. On utilise le terme « cristallisation fractionnée » quel que soit le mécanisme exact (cristallisation à l'équilibre ou distillation de Rayleigh).

Les mécanismes physiques pouvant expliquer l'extraction et la séparation des phases cristallisées, même s'ils sont mentionnés, ne sont ni à argumenter, ni à connaître.

Liens :

La carte géologique (ST-A)

La géodynamique de la lithosphère (ST-C-3)

Le métamorphisme (ST-G)

Les grands ensembles géologiques : les îles océaniques (ST-J-2-2)

Activités de terrain

Physique-chimie : descriptions microscopique et macroscopique d'un système (3.1)

I. UN MAGMA CRISTALLISE AU SEIN D'UNE CHAMBRE MAGMATIQUE

- A. LE LIQUIDE MAGMATIQUE ALIMENTE UNE CHAMBRE MAGMATIQUE
- B. UNE CRISTALLISATION FRACTIONNEE
 - 1. *Le massif du Skaergaard : objet d'étude*
 - 2. *Les conditions de la cristallisation fractionnée*
 - 3. *Modèles de cristallisation fractionnée*
- C. ORDRE DE CRISTALLISATION DES MINERAUX : LES SERIES REACTIONNELLES DE BOWEN
 - 1. *Suivi de la cristallisation d'un magma*
 - 2. *La série discontinue des ferromagnésiens * * **
 - 3. *La série continue des plagioclases ***
 - 4. *La composition du liquide primaire influence l'ordre de cristallisation des minéraux*

II. LA DIFFERENCIATION DANS UNE SERIE MAGMATIQUE → MISE EN EVIDENCE DES SERIES CF LES EXERCICES !!!!! → TP2 + RAPPEL DEFINITION SERIE STF-1

- A. LA SERIE THOLEIITIQUE : L'EXEMPLE DES GALAPAGOS
 - 1. *Caractéristiques de la série tholéiitique*
 - a) Comportement des éléments majeurs
 - 2. *Une série rarement complète au niveau des dorsales*
- B. LA SERIE ALCALINE : L'EXEMPLE DE LA CHAINE DES PUY (CF TP ET STF-1)
- C. LA SERIE CALCO-ALCALINE
 - 1. *Le magmatisme des zones de subduction*
 - 2. *Une diversité des processus de contamination : l'exemple de la Martinique*
 - a) Un magmatisme calco-alcalin
 - b) Contamination par l'encaissant et mélanges

Introduction :

Il existe une très grande diversité des roches magmatiques qui ne peut s'expliquer par une simple différence de source de magma primaire.

Les roches magmatiques peuvent s'organiser en associations temporelles et spatiales (Cf ST-F-1) ce qui a amené à reconstituer des systèmes magmatiques au niveau desquels un même magma primaire ne peut engendrer sans subir de modifications les différentes roches observées.

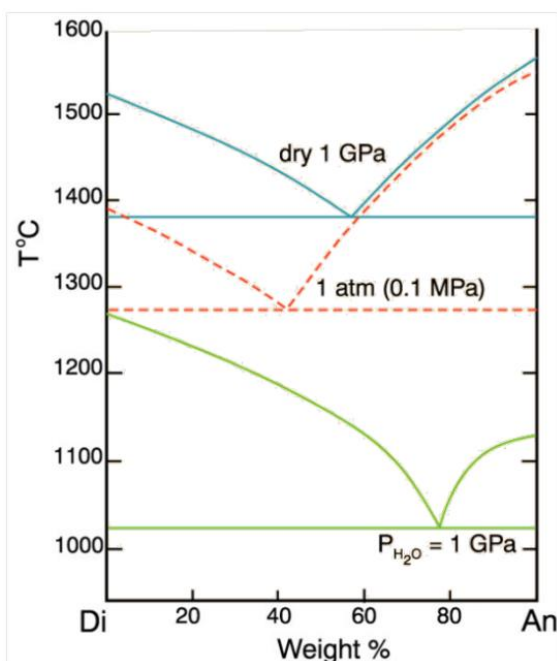
Les magmas primaires qui remontent depuis le manteau ou la croûte inférieure sont modifiés par de nombreux processus regroupés sous le terme de différenciation.

I. Un magma cristallise au sein d'une chambre magmatique

A. Le liquide magmatique alimente une chambre magmatique

Un liquide magmatique primaire atteint rarement directement la surface. Il séjourne dans une vaste poche située à quelques km de profondeur : **la chambre magmatique**. C'est au cours de ce séjour que le magma primaire va commencer à cristalliser.

Montrer comment les conditions régnant dans la chambre magmatique peuvent être à l'origine des modifications de l'eutectique et donc des conditions commençantes de cristallisation du magma.



Cette cristallisation est :

- **Progressive** : la cristallisation ne se réalise pas en une seule étape. Cela semble paradoxal car le magma primaire a en théorie la composition de l'eutectique, mais les modifications de pression entre le lieu de fusion partielle et la chambre magmatique modifient les conditions de l'eutectique **Document 1 - Cf ST-F-2-1**. De plus ce magma a pu au cours de son ascension s'enrichir en éléments chimiques (**contamination**) ce qui change encore sa composition et l'éloigne de la composition de l'eutectique (cf. infra).

- **Non homogène** car dans la chambre il existe des zones plus riches en cristaux ce qui favorise la séparation liquide/cristaux. Ce processus fondamental est appelé **cristallisation fractionnée** : il va conduire à des **modifications chimiques** du magma primaire et à une **différenciation** en magmas secondaires.

Document 1 : Effet de quelques paramètres sur la composition de l'eutectique

B. Une cristallisation fractionnée

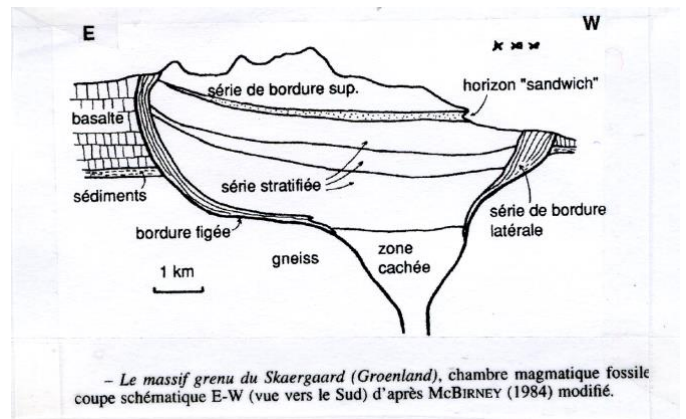
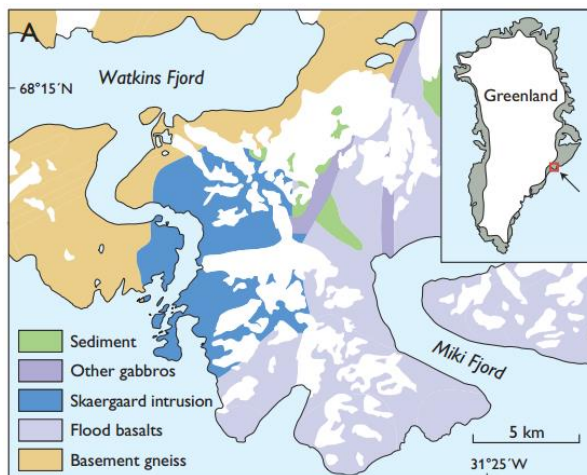
1. Le massif du Skaergaard : objet d'étude

La complexité des processus de cristallisation des magmas basaltiques peut être abordée par l'étude des intrusions comme celle de Skaergaard. Ce massif situé sur la côte Est du Groenland est un **complexe de 500 km³ de roches grenues** (essentiellement des **gabbros**). Il s'est mis en place il y a **50 Ma**.

La **bordure figée** de ce massif est de **texture microgrenue** et possède la *composition d'un basalte tholéiitique (type fond océanique = MORB)*.

Deux types de cristallisation différentes, comment l'expliquer ? liens avec les conditions régnant dans la chambre magmatique ?

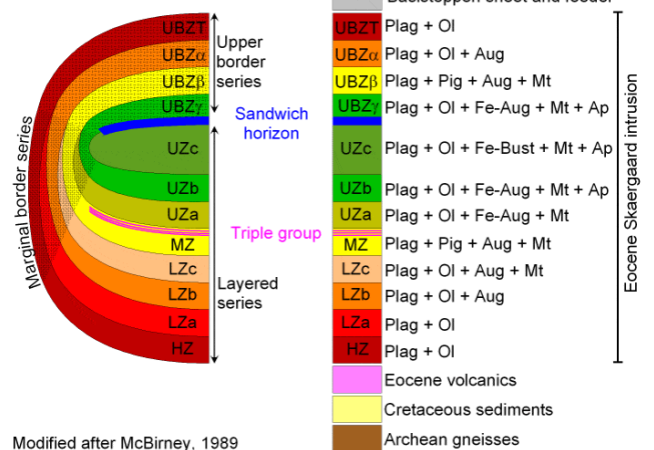
L'intrusion a été inclinée de 20° vers le Sud par le régime tectonique régional. **Grâce à l'érosion**, il existe aujourd'hui, à l'affleurement, **une coupe à travers l'intrusion** qui comprend le plancher, les murs et le toit de la chambre magmatique.



Document 2A : Carte géologique simplifiée de l'intrusion de Skaergaard : Entre sous-sol de gneiss, sédiments, autres gabbros et basaltes d'inondation. – Emplacement au Groenland en encart et coupe schématique E-W de la chambre magmatique



Explanation of the geologic map units



Document 2B : Explication de la carte géologique. Les noms des unités (1989). Les liens dans la liste suivante renvoient à des micrographies en coupe mince.

UBZT: Bordure supérieure série T
 UBZα : série de bordure supérieure alpha
 UBZβ : version bêta de la série Upper Border
 UBZγ : gamma de la série de bordure supérieure

UZc : Zone supérieure c
 UZb : Zone supérieure b
 UZa : Zone supérieure a

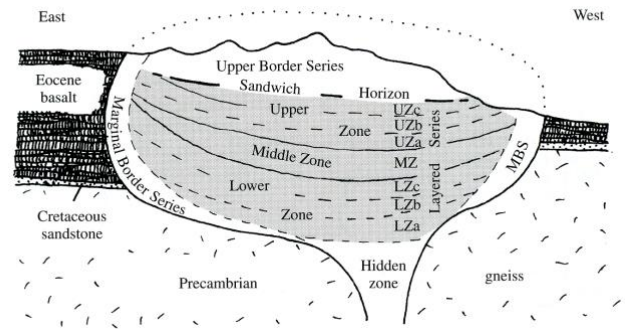
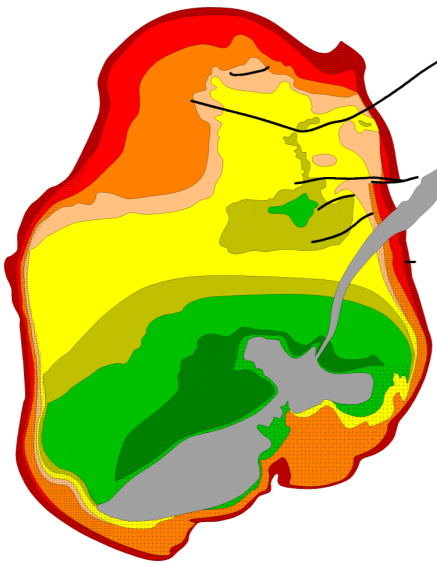
LZc : Zone inférieure c
 LZb : Zone inférieure b
 LZa : Zone inférieure a

MZ : zone médiane

HZ : Zone cachée*

Plag = plagioclase; Ol = olivine; Porc = pigeonite; août = augite ; Fe-Aug = ferroaugite ; Fe-Bust = ferrobustamite; Mt = magnétite ; Ap = apatite.

* La zone cachée est maintenant considérée comme étant de petit volume et similaire à la série de bordure supérieure T.

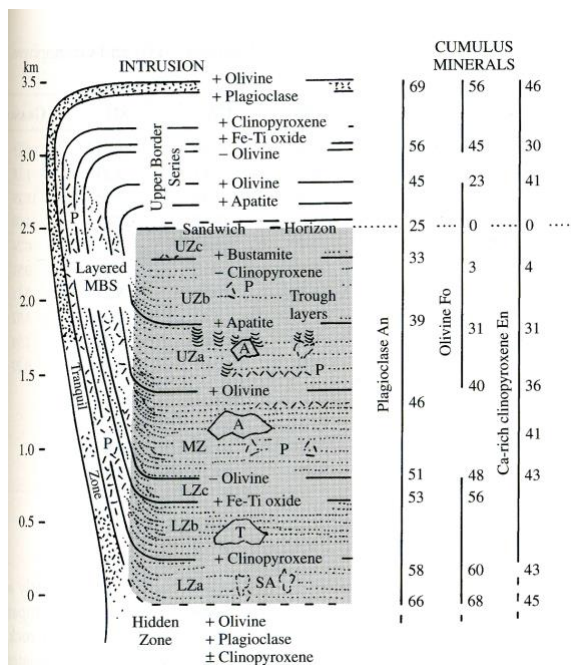


Document 2D : Coupe transversale reconstruite.

Document 2C : Extrapolation de la couche de Skaergaard sous l'eau, la glace et les matériaux non consolidés. Les couleurs, le schéma de motifs et l'échelle sont identiques à la carte ci-dessus.

L'identification de ces trois environnements a donné lieu à une division de l'intrusion en trois séries :

- La série la plus externe, Marginal Border Series (MBS), a cristallisé depuis les murs vers l'intérieur de la chambre.
- La Layered Series (LS), épaisse d'environ 2500m, est légèrement inclinée et a cristallisé du plancher vers le toit.
- La Upper Border Series (UBS), épaisse d'environ 1000m, a cristallisé du toit (aujourd'hui, partiellement érodé) vers le plancher.
- La limite entre la LS et l'UBS se nomme Sandwich Horizon (SH). Enfin, on suppose l'existence de roches sous les niveaux exposés de la LS, appelées Hidden Layered Series (HLS) ou Hidden Series (HS).



Document 2D : Litage magmatique dans le Skaergaard.

Document 2E : Minéralogie du Skaergaard.

Hypothèses sur un ordre de cristallisation au niveau des séries ? Hypothèses d'ordre de cristallisation au niveau des minéraux ?

→ On distingue dans ce massif :

-
-
-

→ Dans la série stratifiée on note :

-
-
-

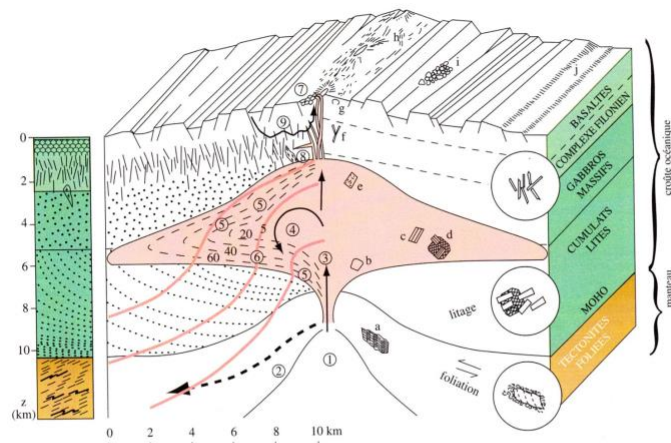
→ Au sein de cette zone stratifiée, les minéraux montrent une évolution chimique depuis la base vers le sommet :

-
-
-

→ On parlera de

→

Interprétation : On pense qu'un tel ensemble plutonique correspond à la mise en place d'un magma basaltique dans une vaste chambre magmatique. Au fur et à mesure de la cristallisation, les minéraux s'accumulent à différents niveaux en fonction de leur densité. Il ne s'agit vraisemblablement pas d'un simple phénomène gravitaire, c'est un modèle simple mais sans doute simpliste, d'autres phénomènes tels que des mouvements convectifs se produisent au sein de la bouillie cristalline représentant l'intérieur de la chambre magmatique et favoriseraient cette sédimentation.



Modèle de fonctionnement d'une chambre magmatique sous une dorsale rapide (les isothermes sont figurés en rose foncé).

- | | |
|---|---|
| 1. Montée de manteau supérieur partiellement fondu. | a. Olivine relique du manteau supérieur, déformée. |
| 2. Fluage latéral à l'état solide du manteau résiduel. | b. Cristallisation d'olivine. |
| 3. Injection rythmique de liquide peu évolué. | c. Cristallisation de plagioclase massif homogène. |
| 4. Brassage par convection. | d. Cristallisation de clinopyroxène à proximité des parois, englobant des plagioclases. |
| 5. Cristallisation fractionnée près des parois (les chiffres 5, 20, 40 et 60 correspondent à l'estimation du pourcentage de liquide ayant cristallisé). | e. Cristallisation en milieu instable, nombreuses zonations. |
| 6. Instabilités gravitaires, glissements et figures « sédimentaires ». | f. Cristallisation de microphénocrystaux dans les filons. |
| 7. Epanchement de basaltes plus ou moins différenciés sur le fond océanique. | g. Trempe du magma, éclatement de la croûte vitreuse. |
| 8. Injection de magma différencié au toit de la chambre. | h. Source hydrothermale (fumeur noir). |
| 9. Circulation hydrothermale. | i. Eboulements vifs, en contrebas de failles actives. |
| | j. Eboulements recouverts de sédiments pélagiques, au pied de failles fossiles. |

On considère que les chambres magmatiques sous les dorsales ont un comportement proche de ce qu'on observe au Skaergaard, la différence principale étant que ce massif est une intrusion qui n'a jamais subi de réinjection magmatique, à l'inverse des zones d'accrétion.

Document 3

2. Les conditions de la cristallisation fractionnée

Au sein de la chambre magmatique la **température n'est pas uniforme** : le liquide magmatique a une température qui peut atteindre 1200°C dans le cas d'un magma basaltique, il est refroidi par les parois latérales et sommitales de la chambre qui sont les plus froides. Ce refroidissement peut être renforcé par des échanges avec l'hydrosphère dans le cas de la partie supérieure de la chambre magmatique.

Ce refroidissement du magma va entraîner sa cristallisation. Or les températures de cristallisation des minéraux sont très variables (cf. infra séries de Bowen).

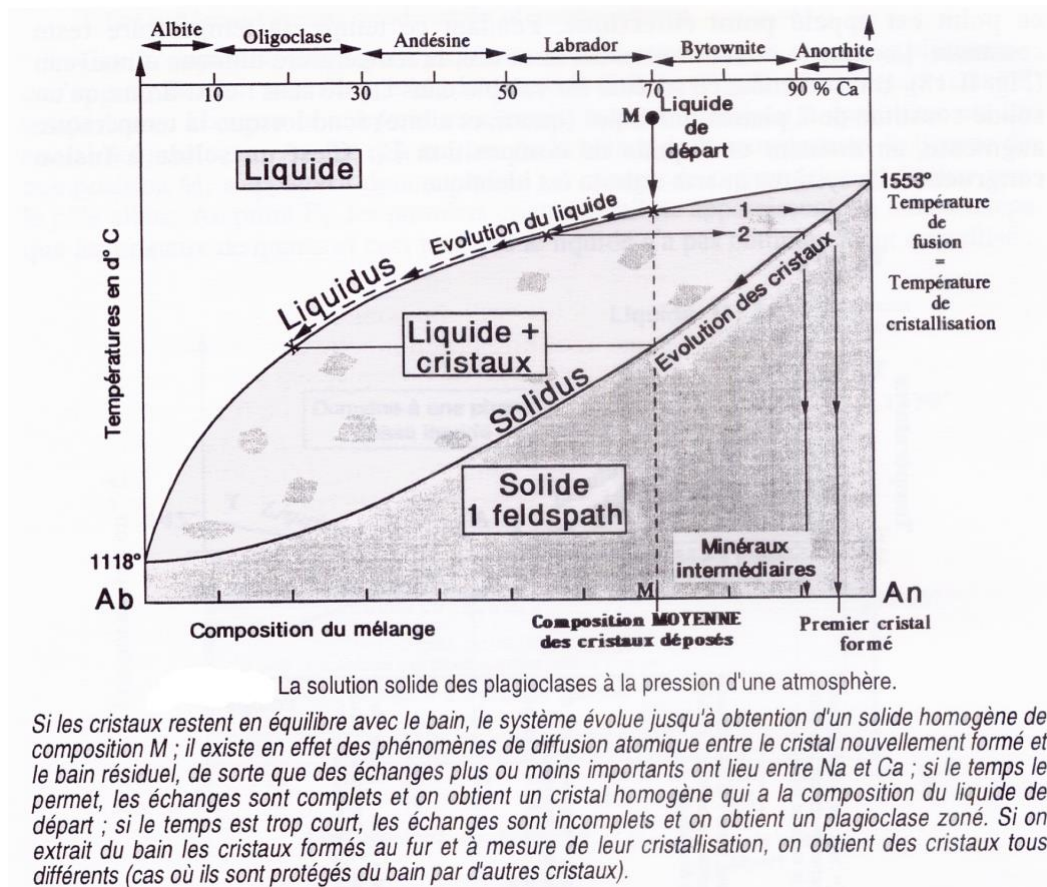
ST-F : le magmatisme

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

ST-F-2-2 : évolution des liquides

3. Modèles de cristallisation fractionnée

Rappel → série isomorphe thème VB1 – document 4



Quelle est la composition du magma du départ ? →

A la T°1 quelle sera la composition du premier cristal formé ? →

A T2 ? →

D'un point de vue relatif, qu'en déduire de la teneur en anorthite du liquide résiduel ? →

En plaçant un liquide de départ 50An/50Al, que remarque-t-on ?
→

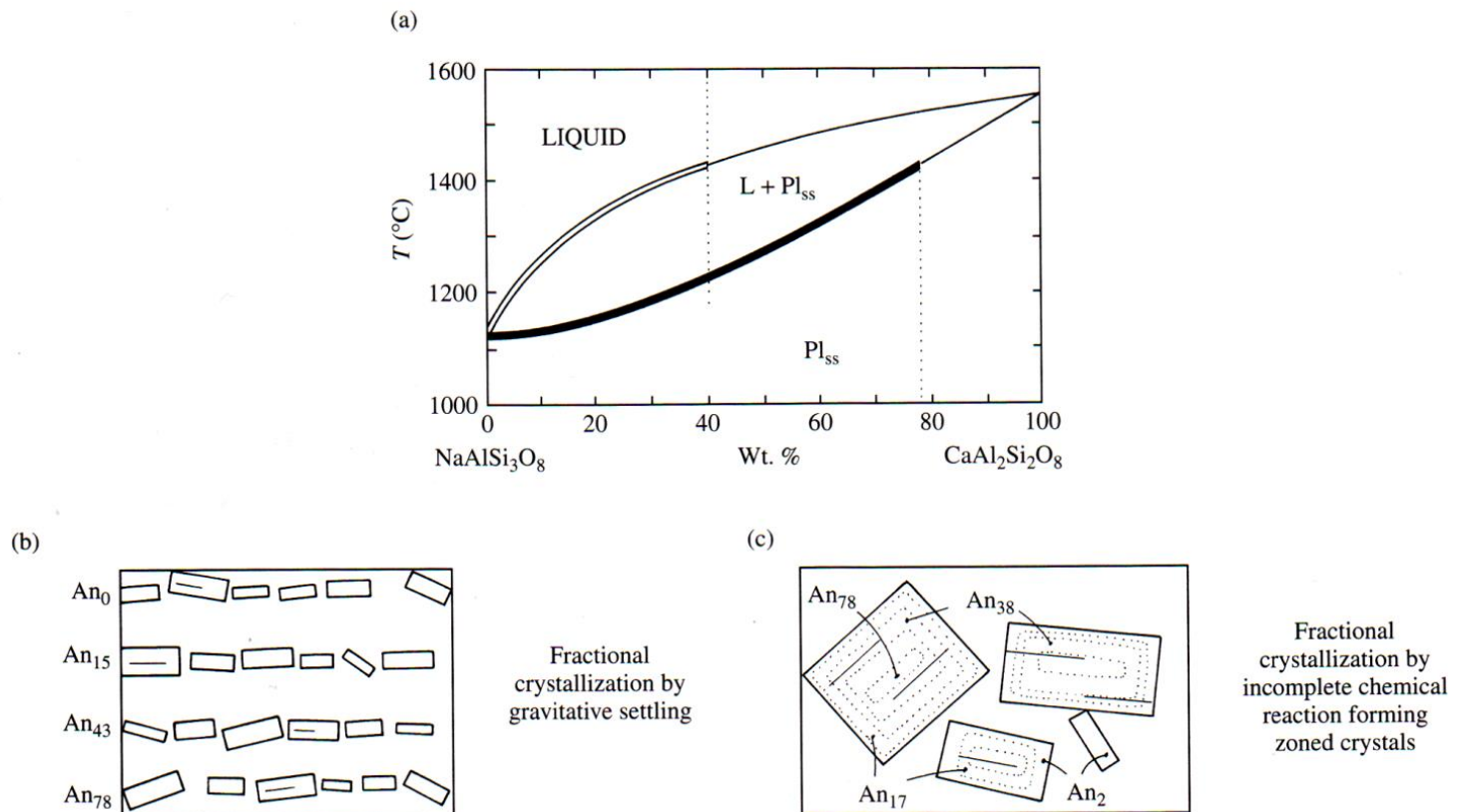
Quel que soit la composition du mélange initial, le 1^{er} cristal formé sera plus riche en anorthite que le liquide résiduel. Si le refroidissement est très lent et la température toujours élevée, Na et Ca peuvent se substituer dans le cristal ce qui permet de rétablir l'équilibre chimique entre le solide et la phase liquide.

Cristallisation fractionnée.

Plusieurs mécanismes sont possibles :

- **Sédimentation** des cristaux dans le magma, les minéraux sont alors soustraits à la phase liquide (ρ olivine et pyroxène $> 3 \text{ g.cm}^{-3}$ alors que ρ magma compris entre 2,4 et 2,8 g.cm^{-3}) ;
- **Phénomènes convectifs**, facilitant la séparation cristaux/liquide ;
- **Réaction incomplète** : les minéraux ne réagissent plus avec le liquide (diminution de la cinétique par diminution de la température), les cristaux présentent alors des variations de composition. C'est le cas des **plagioclases zonés**, au cœur riche en anorthite et à la périphérie riche en albite.

Document 5 : diagramme de phase albite-anorthite et cristallisation fractionnée.



Document 6 : plagioclase zoné de la Montagne Pelée (LPA x100)



ST-F : le magmatisme

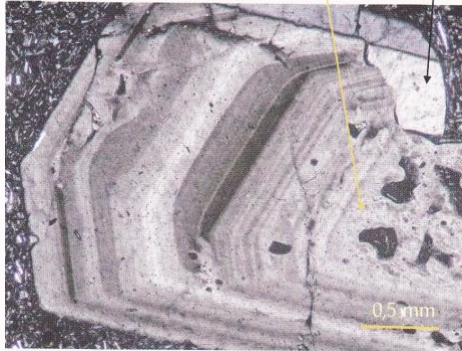
ST-F-2 : Les *Processus fondamentaux du magmatisme*

ST-F-2-2 : évolution des liquides

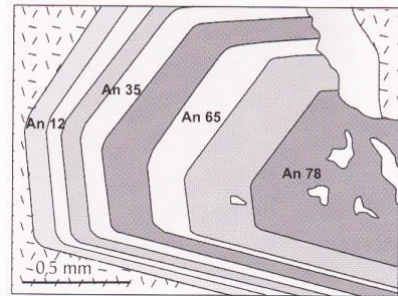
Exercice d'application : (si le temps en classe)

De nombreuses roches renferment des cristaux de plagioclases ; parfois, ceux-ci ont une allure inhabituelle au microscope polarisant (en LPA) : ils sont zonés.

L'analyse à la microsonde électronique permet de déterminer la composition chimique des différentes zones que l'on peut traduire en % massique de constituant anorthite notée An.



Pourcentages massiques en anorthite des différentes zones du plagioclase

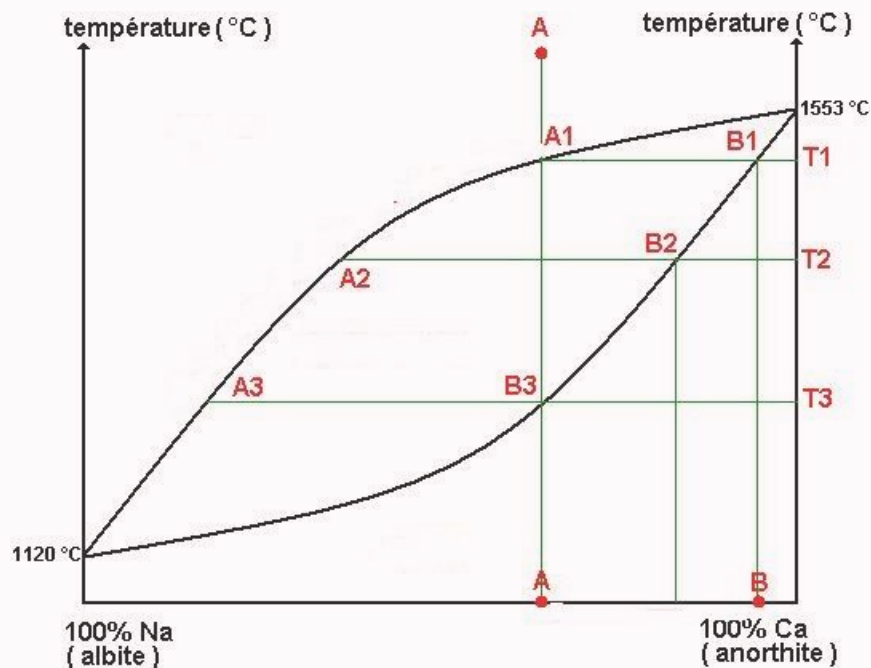


Rappeler comment un cristal se forme : préciser la zone formée en 1er puis en second...

Analyser les résultats obtenus grâce à la microsonde électronique.

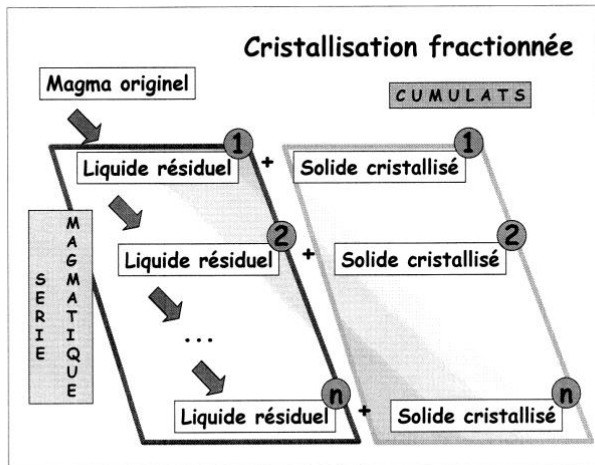
Légender complètement le diagramme binaire des plagioclases ci-dessous.

A l'aide de ce diagramme, expliquer comment un tel plagioclase a pu se former.



Correction → Cf diaporama

Documents 6 + diaporama



Bilan :

La **cristallisation fractionnée** provoque une **évolution chimique** des liquides résiduels qui vont présenter une augmentation de la concentration en éléments alcalins et une diminution de la concentration des éléments basiques (type Mg). Cette modification chimique des magmas correspond à une **différenciation** à l'origine des **séries magmatiques** (cf. infra) présentant généralement un ensemble de roches, allant de termes basiques à des termes différenciés, de volumes respectifs souvent très différents

Document 7

L'étude de l'intrusion de Skaergaard et des observations réalisées sur des laves en cours de cristallisation ont permis d'établir un ordre de cristallisation des minéraux.

C. Ordre de cristallisation des minéraux : les séries réactionnelles de Bowen

Les travaux expérimentaux de Bowen et ses collaborateurs ont permis d'effectuer une corrélation entre la coexistence stable de minéraux, la température et la composition d'un magma c'est à dire de déterminer l'ordre de cristallisation.

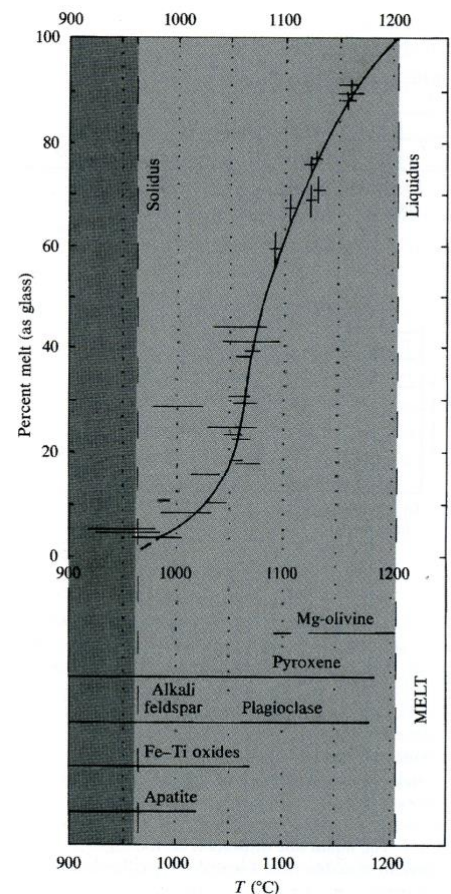
Attention, il ne s'agit pas directement de cristallisation fractionnée.

1. Suivi de la cristallisation d'un magma

Lors de l'éruption du Kilauea en 1965 il y a eu formation d'un lac de lave.

Des prélèvements de la lave ont été réalisés au cours de son refroidissement et les laves en cours de cristallisation ont été photographiées au microscope (le prélèvement vitrifie la phase liquide entre les cristaux).

Documents 8 (pour info)





Documents 9

Nature des minéraux ? taille ? relation ?

Commentaire de cette évolution :

- 1170°C
- 1130°C
- ;
- 1075°C
- 1020°C

On observe donc une évolution dans la nature des cristaux en fonction du refroidissement du magma, il se produit une évolution du magma au fur et à mesure de sa cristallisation.

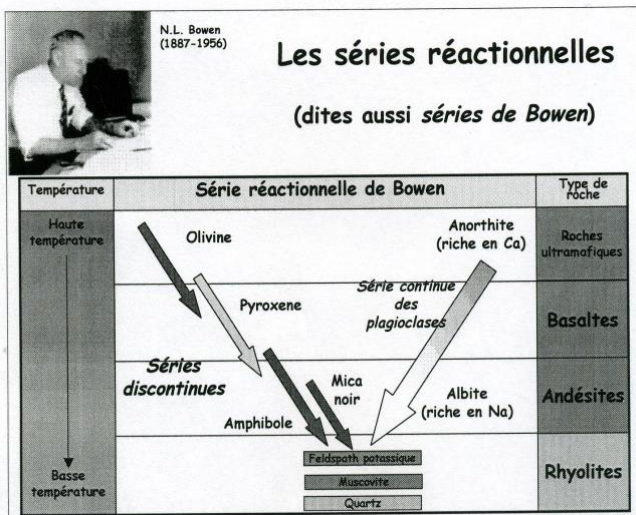
On peut en simplifiant considérer deux ensembles réactionnels = les séries de BOWEN du nom du chercheur qui les a découvertes.

Document 10

2. La série discontinue des ferromagnésiens ***

Dans le cas des ferromagnésiens la série réactionnelle est discontinue car ces minéraux ne forment pas des solutions solides. Les structures cristallines sont distinctes.

Dans le cas d'un magma basique, les olivines apparaissent à haute température puis lorsque la température décroît une partie des olivines formées réagit avec la phase liquide, il se produit une disparition des minéraux formés précocement.



On suppose une cristallisation à l'équilibre (non fractionnée)

T₁

La température diminuant l'olivine n'est plus stable

T₂

La température diminuant et si il y a présence d'eau

La température diminuant les amphiboles ne sont plus stables

3. La série continue des plagioclases**

Dans le cas des plagioclases on observe une évolution similaire

T₁ L₁ → anorthite + L₂

L'anorthite n'est plus stable

Anorthite + L₂ → L₃ + plagioclase CaNa

Plagioclase NaCa + L_n → albite + L_{n+1}

Bilan :

ST-F : le magmatisme

ST-F-2 : Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-2 : évolution des liquides

Rq : **Il ne s'agit donc pas d'un processus de cristallisation fractionnée**, celle-ci se superpose à ce phénomène au sein de la chambre magmatique.

L'évolution chimique d'un magma au fur et à mesure de la cristallisation dépend :

- **de la nature des minéraux qui se forment** (selon l'ordre des séries de Bowen) : Les **premiers minéraux sont riches en Mg** (forstérite) **et en Ca** (anorthite), si cristallisation fractionnée alors MgO et CaO diminuent dans les liquides résiduels par contre Na, K et Al peu impliqués dans les premiers minéraux qui cristallisent voient leur concentration augmenter ;
- **des caractéristiques des éléments chimiques** : les éléments compatibles Ni, Mg sont incorporés dans les minéraux ; les éléments incompatibles hygromagmatophiles Rb, Na, K s'accumulent dans les liquides résiduels ;
- **Pour la silice** comment s'effectue l'évolution ? **Un magma de 45% SiO₂** donc magma basique qui cristallise, la forstérite et l'anorthite cristallisent en premier : l'anorthite CaAl₂Si₂O₈ et la forstérite Mg₂SiO₄, quel pourcentage de SiO₂ dans ces minéraux ?

	Si	O	Mg	Ca	Al	Na		% de SiO ₂
Masse atomique	28	16	24	40	27	23		
1mole SiO ₂	28	2*16					→60g	
1mole Mg ₂ SiO ₄	28	4*16	2*24				→140g forstérite	$(\text{SiO}_2 / \text{Mg}_2\text{SiO}_4) * 100 = 60 / 140 * 100 = 43\%$
1 mole CaAl ₂ Si ₂ O ₈	2*28	8*16		40	2*27		→278g anorthite	$(2 * \text{SiO}_2 / \text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8) * 100 = 120 / 278 * 100 = 43\%$

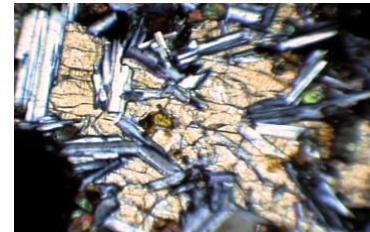
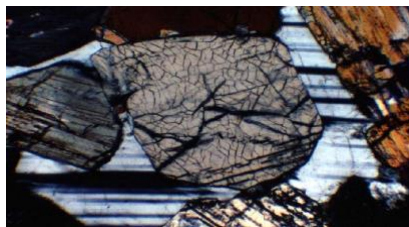
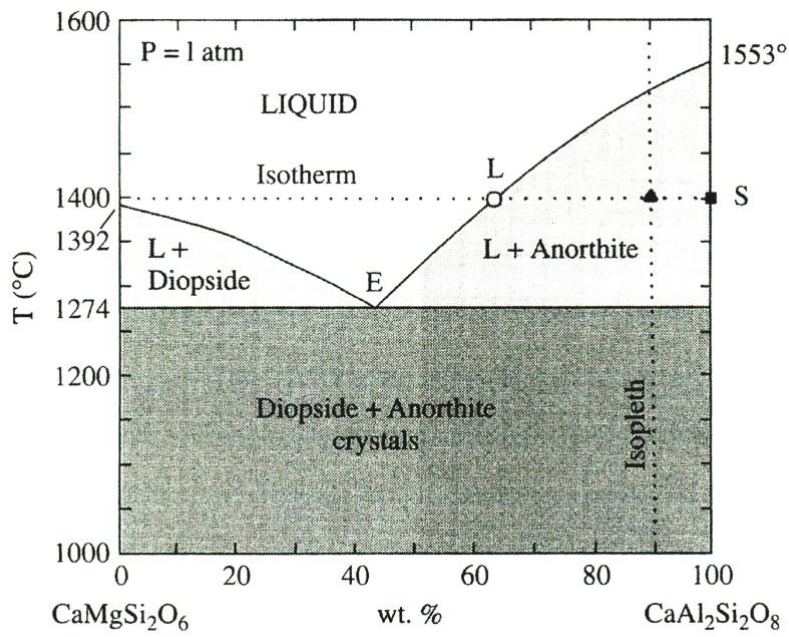
Donc % plus faible dans les premiers minéraux (que 45%) donc proportionnellement **le liquide résiduel s'enrichit en silice**

Remarque :

% SiO₂ dans albite NaAlSi₃O₈ ($3 * \text{SiO}_2 / \text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) = $180 / 262 * 100 = 69\%$

4. La composition du liquide primaire influence l'ordre de cristallisation des minéraux

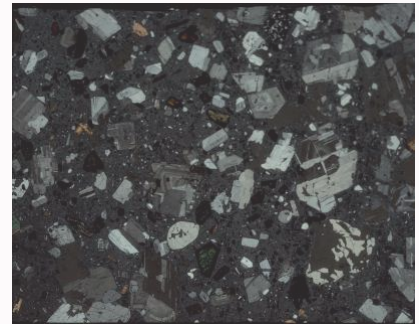
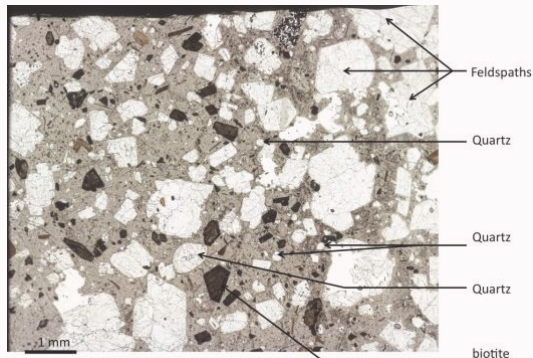
Dans le cas d'un mélange binaire avec eutectique (Diopside/Anorthite – Cf ST-F-2-1), la composition du liquide primaire par rapport à l'eutectique va influencer la nature du premier cristal formé mais aussi sa forme : **les premiers cristaux seront plutôt automorphes (ou sub-) tandis que les derniers cristaux à se former dans le volume restant seront xénomorphes.**

Documents 11 à 12

*A gauche, le pyroxène (D) cristallise avant les plagioclases.
A droite, les plagioclases (A) cristallisent avant le pyroxène.*

Exercice d'application : (si le temps)

Lame mince d'un échantillon X (Lumière Polarisée Non Analysée : LPNA à gauche en LPA à droite)



Après avoir annoté le plus précisément possible le document, proposez une diagnose de l'échantillon X. On ne demande pas ici d'aboutir à un nom précis pour l'échantillon mais de conclure sur une famille de roche

Exploitez le document 3 afin d'expliquer la différence qualitative des proportions de quartz et de feldspaths visibles sur le document 2. Vous préciserez la chronologie de cristallisation des minéraux.

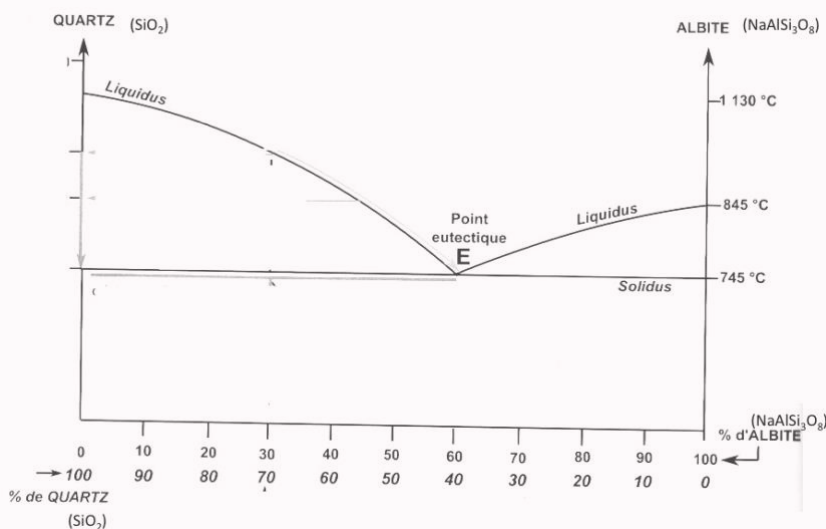
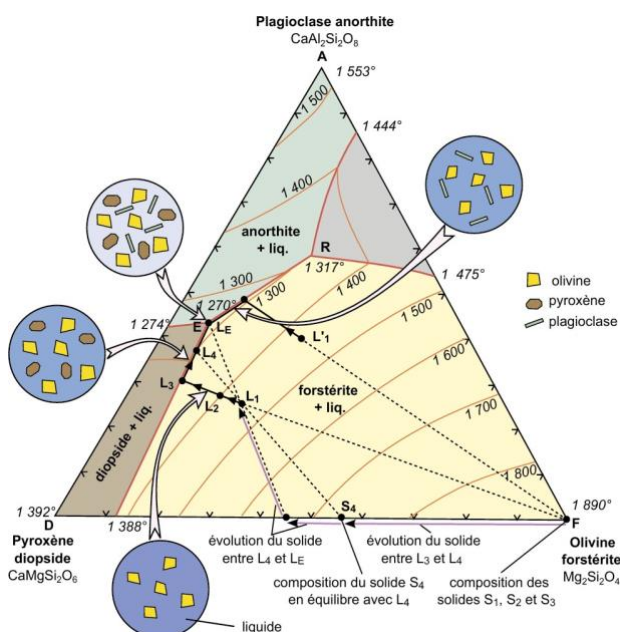


Diagramme de phase binaire quartz - albite

Document 13

Soit un liquide de composition L1 (forstérite 25 %; anorthite 25 %; diopside 50%) en cours de refroidissement. Les premiers cristaux apparaissent à une température de l'ordre de 1450°C : ce sont des cristaux d'olivine (solide S1 dont la composition se situe au pôle F). Le liquide s'appauvrit alors en constituant magnésien et évolue en direction de la ligne cotectique selon une droite F-L1. Lors de cette évolution, la portion de liquide et de solide peut être estimée par la règle des leviers. Ainsi, à la température correspondant à la composition L2, (1400°C), les proportions de solide et de liquide sont respectivement de : $L1-L2 / F-L2$ et $L1-F / F-L2$.

La composition du solide S2, formé uniquement d'olivine est toujours au pôle F. Le liquide atteint en L3 la température de la ligne cotectique où débute la cristallisation du diopside. L'évolution se fait alors selon la vallée thermique en direction du point E. Au cours de cette évolution, le solide est constitué d'olivine et de diopside avec une composition qui évolue selon la ligne F-D.

Le liquide atteint enfin l'eutectique avec une composition LE : l'anorthite cristallise. La composition du solide quitte alors la ligne F-D jusqu'à retrouver la composition du liquide initial.

On obtient finalement un solide constitué des phases anorthite - diopside et olivine dans les proportions initiales (F=25 %; A=25 %; D=50%).

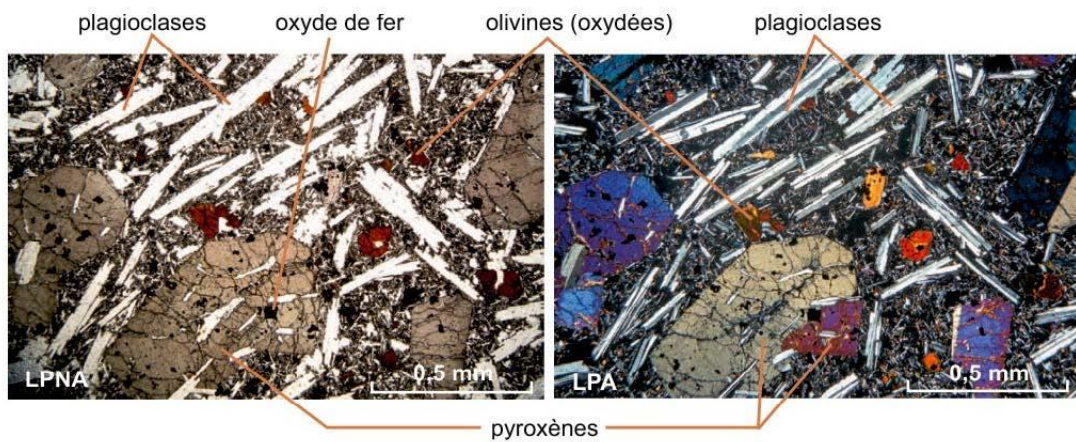
ST-F : le magmatisme

ST-F-2 : Les Processus fondamentaux du magmatisme

ST-F-2-2 : évolution des liquides

L4 est un liquide situé entre L3 et LE. Relevez sur le diagramme quelle est la composition du solide en équilibre L4. Quelles sont alors les proportions de solide et de liquide ? →

Quel serait l'ordre de cristallisation pour un liquide initial de composition L'1. →



Dans quel champ se situerait le liquide initial du basalte ci-dessous ? →

II. La différenciation dans une série magmatique → mise en évidence des séries Cf les exercices !!!!! → TP2 + rappel définition série STF-1

Les relations génétiques qui existent entre ces séries de roches peuvent être mises en évidence dans des diagrammes, dont les plus utilisés sont la représentation de NaO + K2O en fonction de SiO2.

A. La série tholéiitique : l'exemple des Galapagos

1. Caractéristiques de la série tholéiitique

a) Comportement des éléments majeurs

Type	BM	BE	FB	FA	IC	RD	RH
Phénoc.	PL + OL + CPX	PL + OL + CPX	PL + CPX + OL	PL + CPX + OL + MT	PL + CPX + MT	PL + CPX + MT + AP	PL + CPX + MT + AP
SiO ₂	48,61	48,66	49,21	51,70	53,78	64,05	70,92
TiO ₂	2,60	3,25	3,72	3,11	2,76	0,97	0,42
Al ₂ O ₃	14,18	13,70	13,40	13,39	12,90	13,67	13,04
Fe ₂ O ₃	12,62	14,30	15,70	14,65	13,77	8,07	589,00
MnO	0,17	0,20	0,23	0,23	0,22	0,17	0,15
MgO	6,79	5,99	5,08	4,07	3,29	1,66	0,14
CaO	11,27	10,80	9,73	7,77	6,76	3,38	1,73
Na ₂ O	2,75	2,90	3,27	3,63	3,81	5,20	4,83
K ₂ O	0,41	0,45	0,59	0,90	1,11	2,20	2,69
P ₂ O ₅	0,27	0,35	0,60	0,86	0,53	0,24	0,06
P.Feu	< 0,01	< 0,01	0,35	0,14	< 0,01	0,62	< 0,01
Total	99,62	100,61	100,73	100,44	98,95	99,35	99,87
Rb	6	–	10	18	30	44	63
Ba	51	95	115	15	183	30	399
Nb	17	20	25	37	47	66	88
La	12,7	14,9	17,9	29,1	33,4	48,5	60,6
Ce	29,4	38,2	47,5	68,9	78,3	109	132,7
Sr	347	290	320	311	328	174	123
Nd	19,5	23,6	30,3	44,4	48,2	59,1	68,1
Zr	161	185	240	336	521	670	893
Eu	1,83	2,2	2,57	3,65	3,8	3,92	3,56
Tb	0,85	1,12	1,35	1,8	1,87	2,19	2,55
Y	30	28	36	63	70	85	102
Yb	2,39	2,98	3,57	4,88	5,62	7,2	8,93

Mettre doc situation diaporama

Les îles Galapagos sont situées sur la plaque Nazca au large de l'Equateur. Elles correspondent à un **alignement de volcans boucliers** mis en place par le fonctionnement d'un **point chaud** localisé à proximité de la dorsale des Galapagos (plus au nord).

Les volcans les plus à l'Ouest ont émergé il y a environ 350kA et on y observe une diversité de roches mises en place depuis cette période.

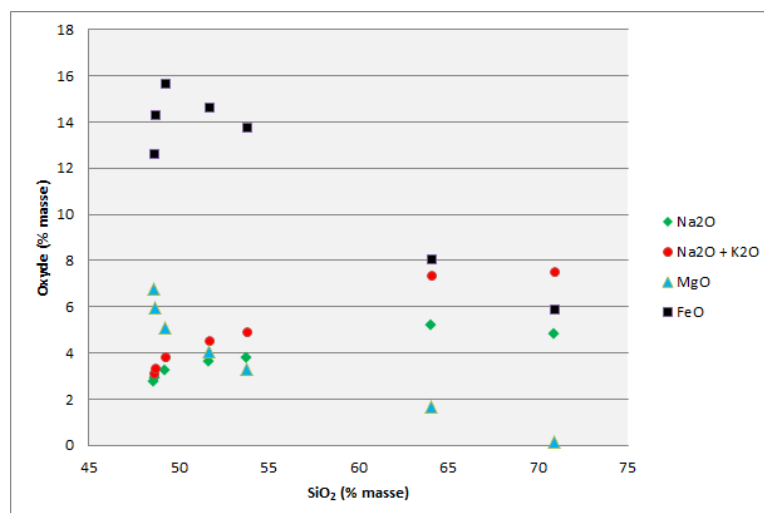
Document 14

Analyses de laves d'une série tholéiitique.

Exemple de la série enrichie (à tendance transitionnelle) du volcan Alcedo, île d'Isabela, Galapagos (Geist *et al.*, 1995). BM : basalte magnésien ; BE : basalte évolué (pauvre en Mg) ; FB : ferrobasilte ; FA : ferroandésite ; IC : icelandite ; RD : rhyodacite ; RH : rhyolite tholéiitique. La terminologie équivalente pour des roches plutoniques est : gabbro riche en olivine ; gabbro pauvre en olivine ; ferrogabbro ; ferrodiorite ; monzonite ; monzogranite ; granite tholéiitique (plagiogranite). Abréviations utilisées pour les phénocristaux : AP : apatite ; CPX : clinopyroxène calcique ; MT : titanomagnétite ; OL : olivine ; OPX : orthopyroxène ; PL : plagioclase.

→ Évolution des éléments majeurs au sein des laves émises ?

Document 15



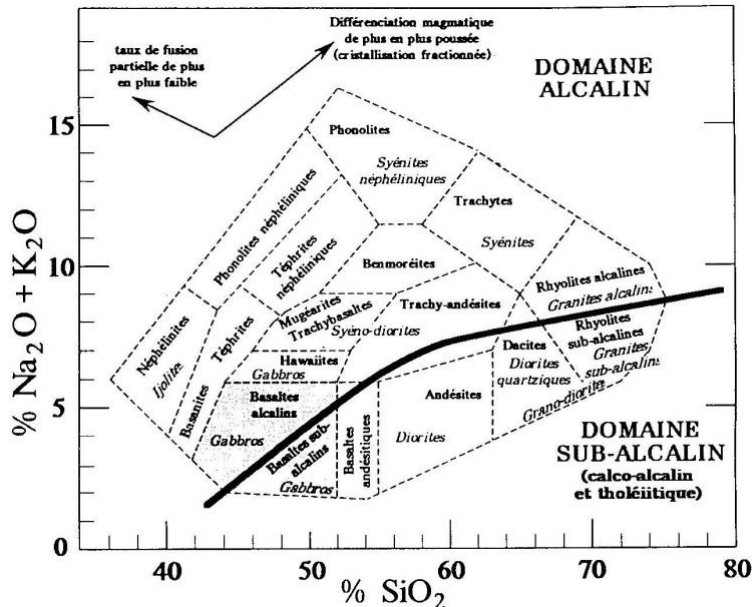
ST-F : le magmatisme

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

ST-F-2-2 : évolution des liquides

La **différenciation** des laves émises depuis les basaltes tholéiitiques riche en Mg de la série des Galápagos jusqu'aux rhyolites montre deux caractéristiques principales :

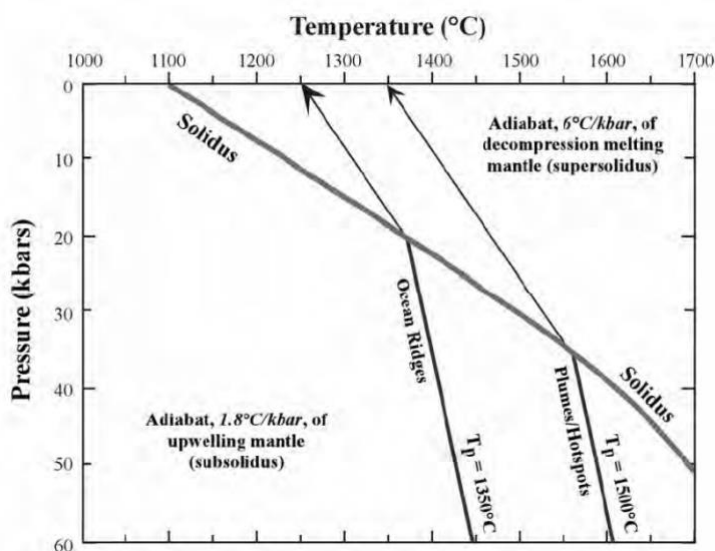
- Un **enrichissement en éléments hygromagmatophiles** comme les alcalins Na, K, et en silice ;
- Les magmas tholéiitiques étant pauvres en eau donc en oxygène, leur évolution s'effectue sous faibles pp d'oxygène. Par conséquent, les oxydes de fer-titane (de type titanomagnétite) apparaissent tardivement dans ces séries. Au début de leur fractionnement, les liquides successifs **s'enrichissent progressivement en fer** et titane : les ferro-basaltes termes intermédiaires de la série contiennent environ 16% de fer total.



Document 16

Au final, la série tholéiitique se positionne dans le domaine subalcalin. L'émission des termes les moins différencié s'accompagne d'un dynamisme effusif (peu de silice, viscosité faible).

2. Une série rarement complète au niveau des dorsales

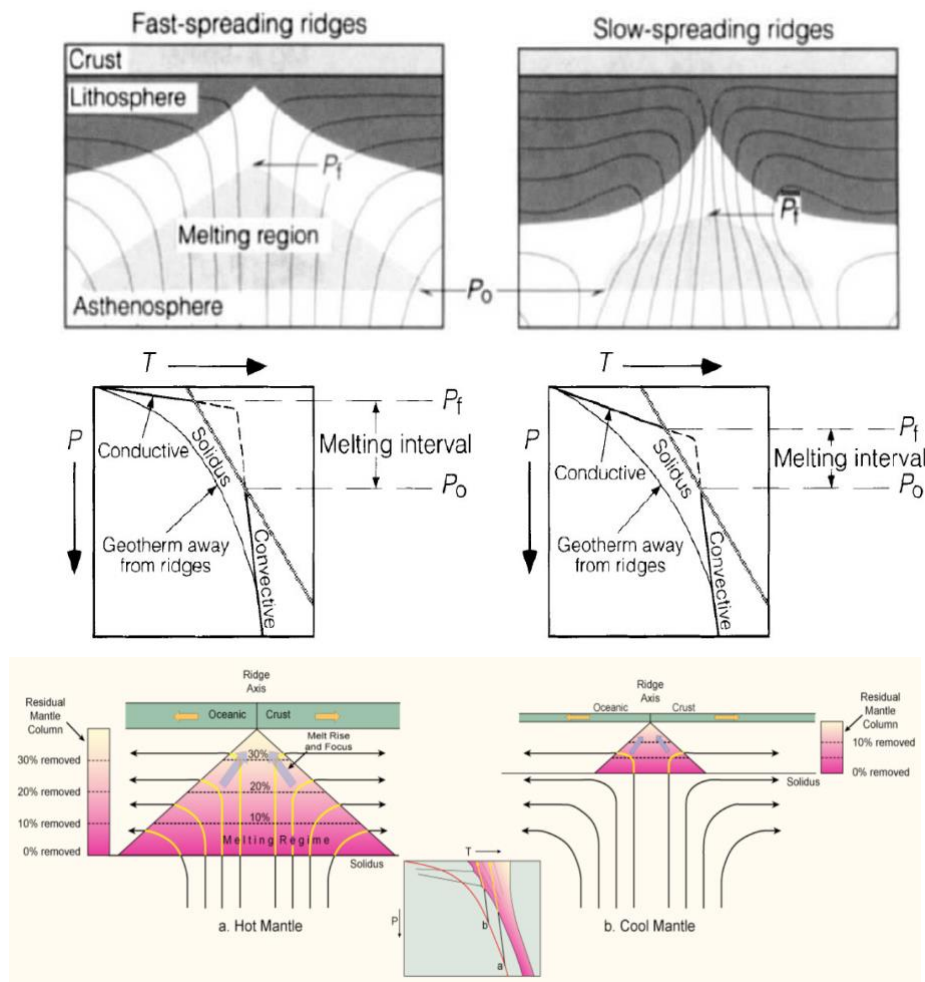


Au niveau des dorsales, l'expansion océanique provoque une **remontée passive et adiabatique** du manteau qui recoupe son solidus vers 60-70 km de profondeur (cf ST-F1). Plus la vitesse d'expansion est rapide, et plus le taux de fusion est élevé ce qui modifie légèrement la composition du liquide primaire obtenu.

Documents 17 et 18

Toutefois, au niveau des dorsales rapides, l'alimentation permanente de la chambre magmatique diminue la probabilité d'une différenciation du magma primaire. La série tholéiitique complète n'y est que rarement observée (Cf cours océan - dorsale).

Pour les dorsales lentes, la différenciation atteint plus souvent le stade de ferrobasalte mais on n'y drague pas de termes plus évolués.



Bilan :

Les Galapagos suivent la règle des trois unités ce qui en fait bien une **série magmatique** :

Une unité de lieu ;

Une unité d'âge ;

Une unité magmatique.

La **série tholéiitique** caractérise le magmatisme des dorsales ainsi que celui de grands épanchements en domaines intraplaques océaniques ou continentaux.

B. La série alcaline : l'exemple de la chaîne des Puys (Cf TP et STF-1)

La chaîne des Puys suit elle aussi la règle des trois unités :

- Unité de lieu ;
- Unité d'âge, les produits volcaniques ont été mis en place entre 90 000 BP et 9000 BP ;
- Unité magmatique, les différentes laves s'alignent dans un diagramme TAS dans le domaine alcalin (documents 19 et 16). L'évaluation de l'abondance relative donne 90% de basalte, 3% de roches intermédiaires et 7% de termes évolués (trachyte entre autre).

	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP6	CP7
SiO ₂	47,25	48,50	52,20	53,21	57,10	60,20	69,35
TiO ₂	2,25	2,16	1,81	1,49	1,12	0,83	0,39
Al ₂ O ₃	15,85	16,56	16,90	17,60	17,89	17,90	15,55
Fe ₂ O ₃ ^T	12,08	11,86	9,84	11,75	6,83	4,69	2,38
MnO	0,17	0,18	0,20	0,20	0,19	0,22	0,18
MgO	6,62	5,28	3,89	2,48	1,94	1,07	0,36
CaO	9,86	9,21	7,55	5,89	4,53	3,10	1,25
Na ₂ O	3,70	3,92	4,45	5,00	5,42	5,58	5,60
K ₂ O	1,68	1,80	2,47	2,71	3,40	3,82	4,88
P ₂ O ₅	0,61	0,72	0,73	0,31	0,55	0,31	0,09
D.I.	36,31	40,61	51,74	56,78	67,01	75,45	90,86

Fe₂O₃^T = fer total sous forme de Fe₂O₃.

CP1. basalte alcalin, Cheire d'Aydat, sous le Château de Saint-Saturnin

CP2. hawaïte = "labradorite", coulée de la vallée de la Tiretaine, Pont des Soupins

CP3. mugéarite, coulée du Puy de Louchadière, Pontgibaud

CP4. mugéarite, coulée du Pariou, Bonnabry près d'Orcines

CP5. benmoréite = "pierre de Volvic", coulée du Puy de la Nugère, Le Cratère (Volvic)

CP6. benmoréite = "dômite à amphibole", sommet du dôme du Clerzou

CP7. trachyte = "dômite à biotite" base sud du dôme du Puy de Dôme

Trachy-
andésites

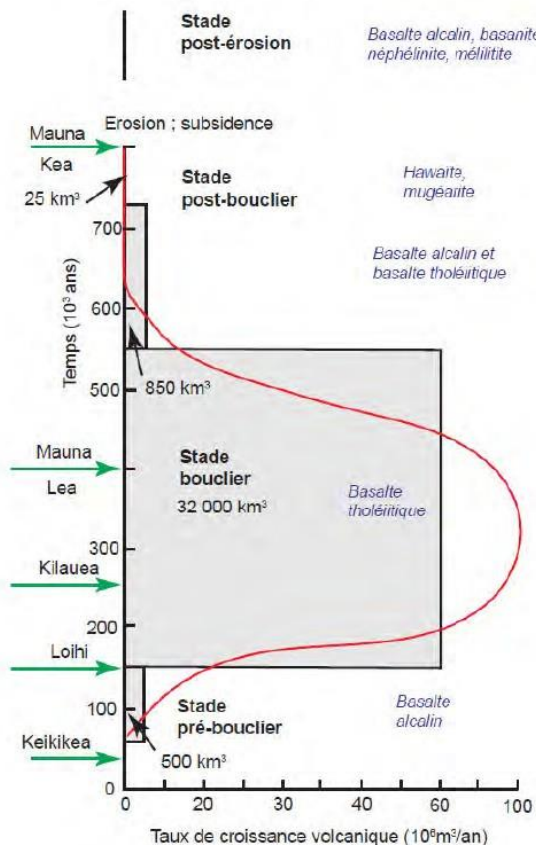
La plus forte teneur en alcalin dès les termes peu différenciés (basaltes alcalins) par rapport à la série tholéiitique traduit un **taux de fusion plus faible** (5% environ), à **plus forte profondeur** (100-120 km).

La série alcaline s'observe principalement en domaine intraplaque (rifting, points chauds).

Pour chaîne des puy → Ce magmatisme s'expliquerait par un rifting actif par remontée asthénosphérique.

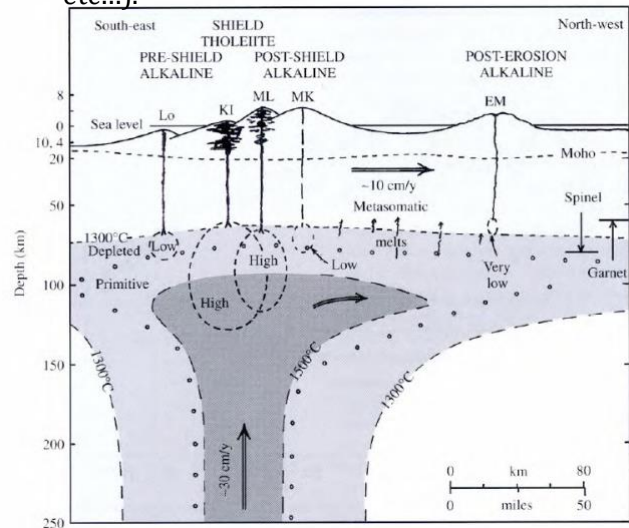
Il n'est pas rare que les séries alcaline et tholéiitique se succèdent dans le temps au niveau des points chauds, en fonction de la position de l'île volcanique par rapport à l'axe du panache mantellique.

Document 20 (pour info)



Document 20 : différenciation des magmas dans l'archipel Hawaïen.

Les faibles taux de fusion lors de la mise en place du stade pré-bouclier (Lo = Lohi) aboutissent à des basaltes alcalins, tandis que l'augmentation du taux de fusion à l'axe du panache force le passage au stade bouclier et à des basaltes tholéiitiques (Ki = Kilauea, etc...).



C. La série calco-alcaline

1. Le magmatisme des zones de subduction

On prend l'exemple de la **marge active Tonga-Kermadec**.

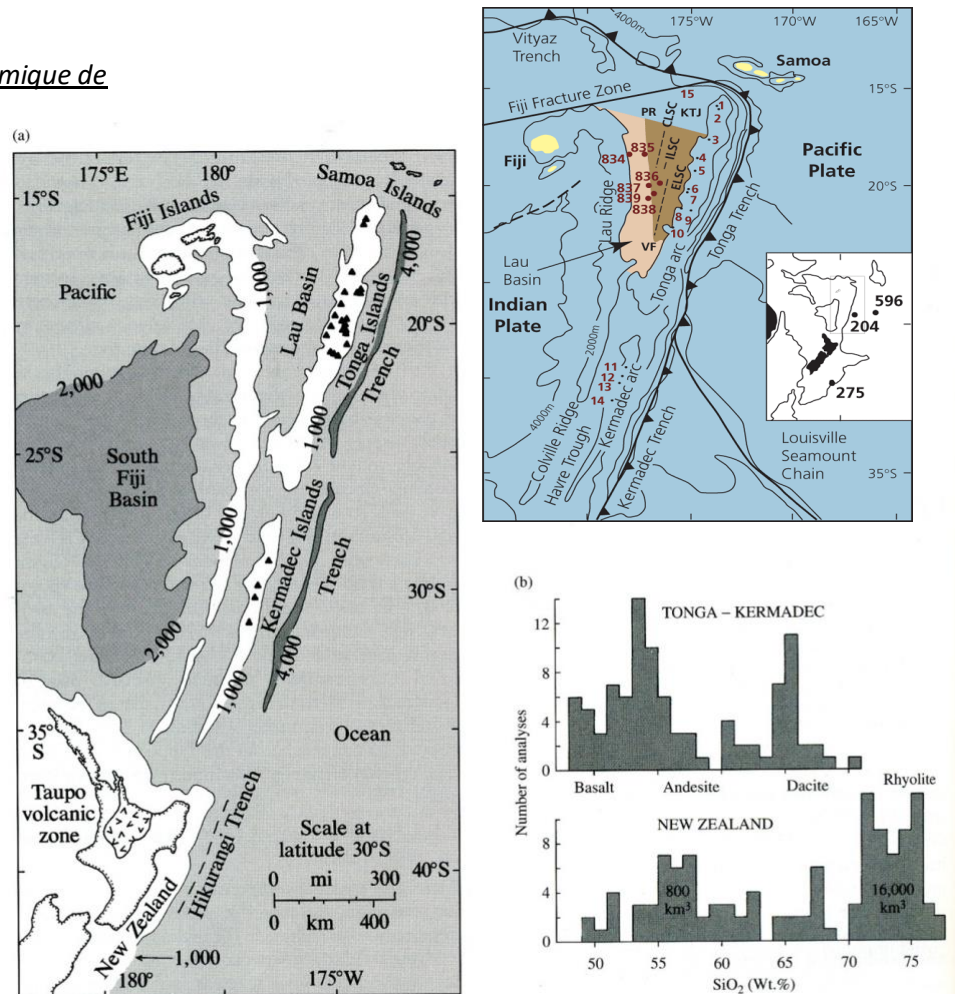
Établir la relation entre la nature des produits émis et l'épaisseur de croûte traversée. (documents à regarder à la maison)

Documents 21 à 23

Document 21 : contexte géodynamique de la zone Tonga--Kermadec.

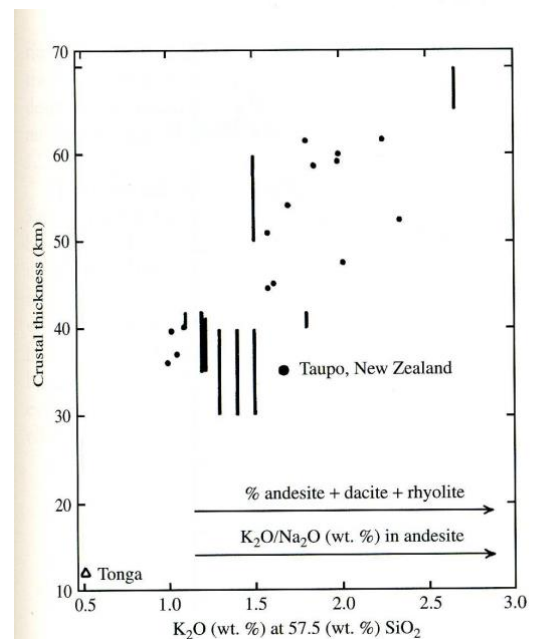
Document 22 :
diversité des
produits dans un
même contexte
géodynamique.

Document 23 : relation entre l'épaisseur de croûte et la nature des produits volcaniques.



12.26 Tonga-Kermadec-New Zealand volcanic arc and arc rocks in the southwestern Pacific. (a) Volcanic islands indicated by filled triangles. Bathymetric contours are in fathoms (1 fathom = 1.83 m). For a more detailed, larger-scale map of the North Island of New Zealand see Figure 13.27. (b) Frequency distribution of silica in analyzed rocks from the Tonga-Kermadec island arc and from the North Island of New Zealand. Tonga is chiefly basalt and andesite; sparse dacite is overrepresented. In New Zealand, rhyolite is estimated to be about 20 times more voluminous than andesite. (Redrawn from Ewart et al., 1977.)

12.27 Correlation between thickness of continental crust (>30 km) and compositional parameters. The graphed parameter is the concentration of K_2O at 57.5 wt.% SiO_2 from a best-fit line through a K_2O versus SiO_2 wt.% variation diagram for a rock suite; for example, values of K_2O at 57.5 wt.% SiO_2 for the New Zealand suite and, for comparison, the Tonga suite are taken from Figure 2.18. Bars in diagram indicate variable crustal thickness for the K_2O value. Two other parameters not graphed also show a positive correlation with crustal thickness; these are the K_2O/Na_2O in andesite (57–63 wt.% SiO_2) and the proportion of andesite + dacite + rhyolite to basalt. (Data from Leeman, 1983; Hildreth and Moorbath, 1988.)



Interprétation :

Le magma ascendant chaud de nature basaltique produit par fusion en présence d'eau va subir une **différenciation** plus ou moins complexe en fonction du degré de **contamination crustale**, lorsque la croûte est épaisse et de nature continentale (**cf. Nouvelle Zélande**) il y a abondance de rhyolites qui s'interprètent comme résultant de la fusion partielle de la croûte continentale, l'abondance des termes intermédiaires s'explique par un mélange entre le magma basaltique en cours de différenciation par cristallisation fractionnée et le magma acide produit par fusion partielle de la croûte continentale. Dans le cas des îles Tonga la diversité des produits s'explique par une différenciation due à la cristallisation fractionnée.

La série calco-alcaline caractérise les zones de subduction et sont souvent le siège d'éruptions explosives.

2. Une diversité des processus de contamination : l'exemple de la Martinique

a) Un magmatisme calco-alcalin

La Martinique est un assemblage de plusieurs massifs volcaniques traduisant le fonctionnement d'une zone de subduction depuis 25Ma environ.

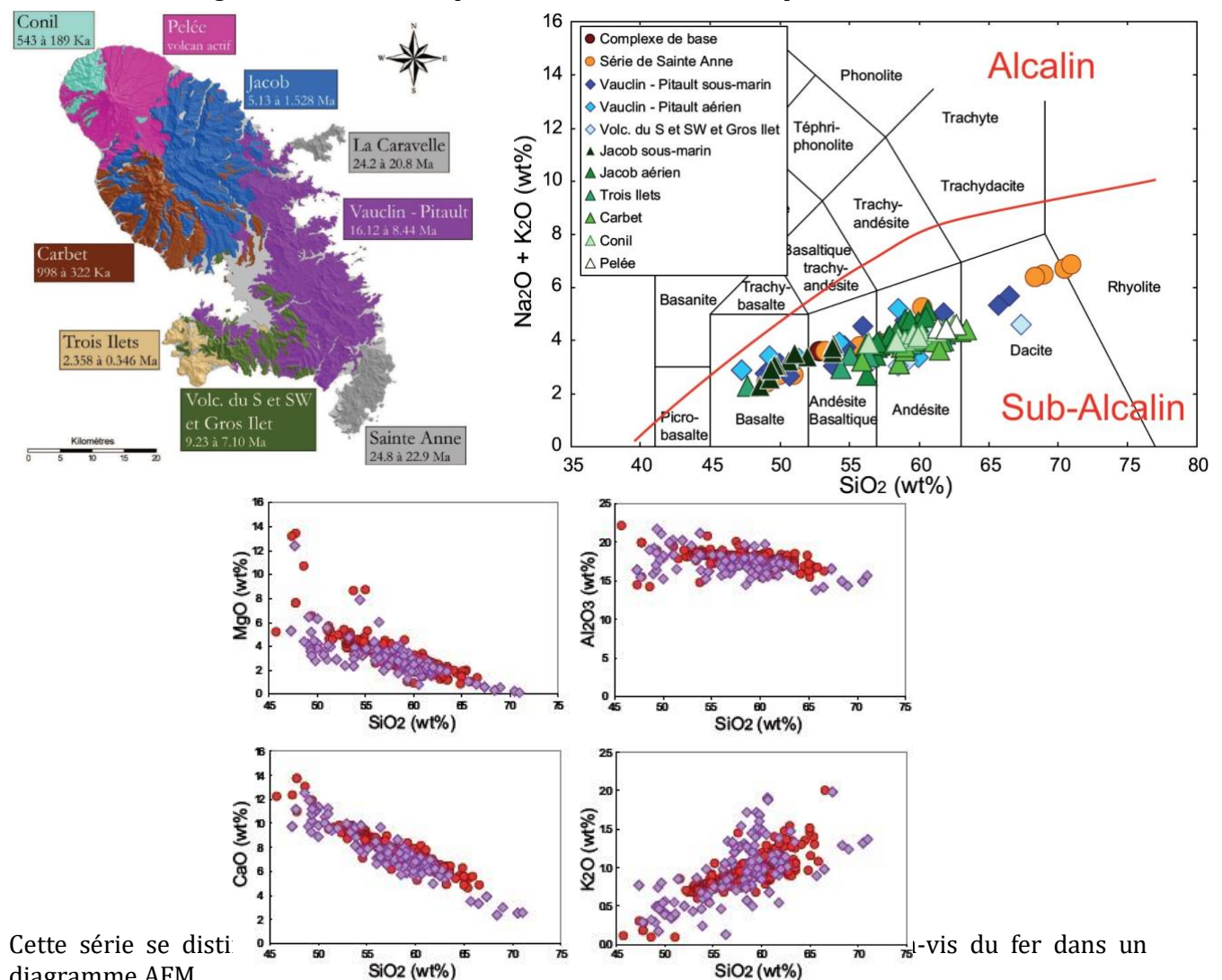
L'analyse de la composition de ces laves montre qu'elles forment une série sub-alcaline appelée série calco-alcaline.

Documents 24 à 26

Document 24 : massifs volcaniques de la Martinique et leurs âges respectifs.

Document 25 : diagramme TAS des différentes laves de Martinique

Document 26 : diagrammes de Harker pour les laves de la Martinique

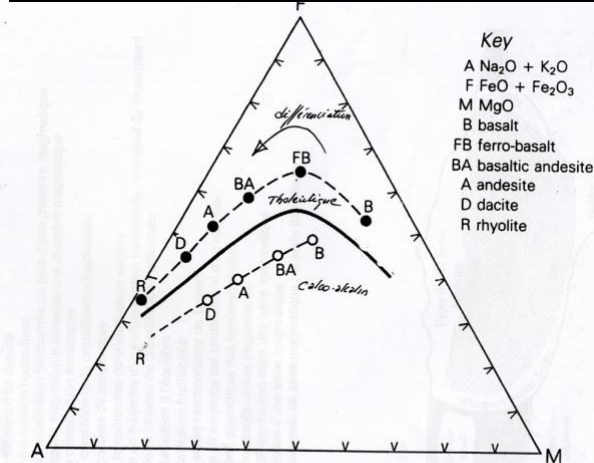


Cette série se distingue dans un diagramme AFM.

ST-F : le magmatisme

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

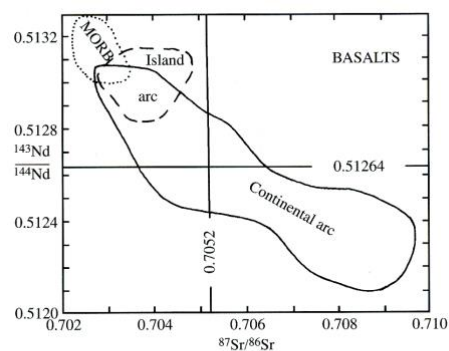
ST-F-2-2 : évolution des liquides

Document 27 évolution des séries tholéitique et calco-alcaline dans un diagramme AFM.

AFM diagram showing typical tholeiitic and calc-alkaline differentiation trends.

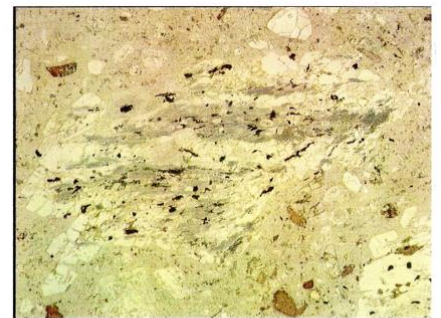
b) Contamination par l'encaissant et mélanges

Les isotopes radiogéniques permettent de montrer une contamination éventuelle par des produits crustaux car les rapports dans la croûte de Nd et Sr sont respectivement de 0,510 et 0,900.

Document 28 : rapports isotopiques des MORB et des basaltes de zones de subduction.

Nd and Sr isotope ratios in arc basalts compared to MORB. Basalts from western Pacific island arcs are slightly more radiogenic than MORB because of the slab-derived aqueous fluid component, whereas continental arc basalts (Japan, Philippines, New Zealand, Ecuador, Central America, Lesser Antilles) range to much more radiogenic ratios because of interaction with highly radiogenic old continental crust in which $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ can be 0.510 and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 0.900. (Redrawn from Tatsumi and Eggins, 1995.)

On constate que les magmas des arcs continentaux ont des rapports en Nd inférieurs aux MORB (basaltes des dorsales provenant de la cristallisation d'un magma d'origine purement mantellique) tandis que leurs rapports en Sr sont supérieurs aux MORB. Ces magmas ont donc été **contaminés par du matériel crustal**.

Document 29 : contamination par assimilation crustale

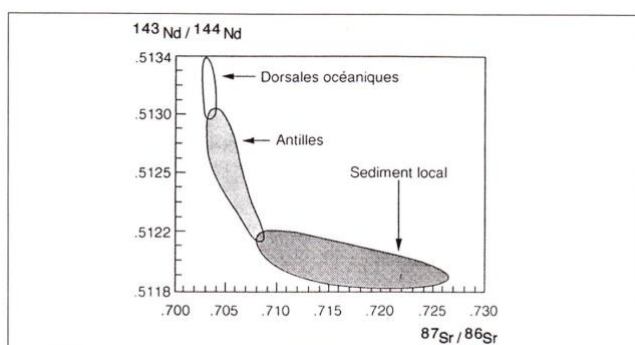
Enclave de socle partiellement assimilée dans une dacite (arc d'Ambon, Indonésie)

Mais comment expliquer ces rapports pour les arcs océaniques qui ne possèdent pas de croûte continentale épaisse ?

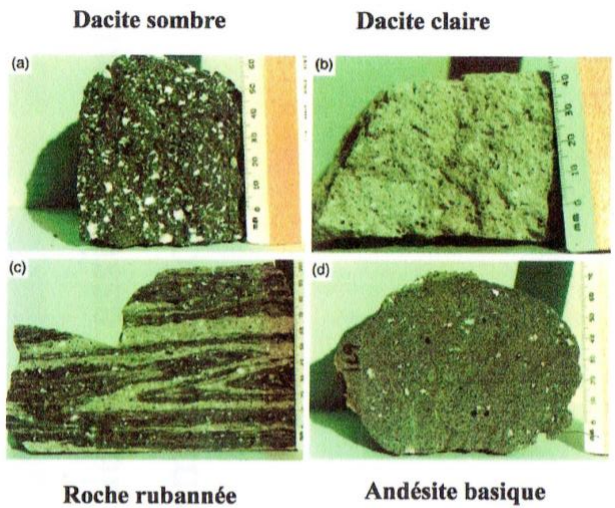
Les éléments radiogéniques montrent alors que les éléments hygromagmatophiles des sédiments de la plaque subduite passent dans le magma.

Document 30

Rapports isotopiques des basaltes des dorsales océaniques, de l'arc antillais et des sédiments Atlantique.



Dans ce diagramme, les basaltes antillais se situent entre les sédiments océaniques du prisme d'accrétion et les basaltes des dorsales : cette position intermédiaire atteste d'une contamination par les sédiments subductés (d'après B. Dupré)



De même, en Martinique, on observe des roches présentant des **rubanements** traduisant des **mélanges** entre andésites claires et sombres qui s'explique par une réalimentation de chambre magmatique et un **mélange entre des magmas différenciés et des magmas basiques**. C'est ce qu'on appelle de l'**hybridation**, qui est un cas limite de contamination. En fonction de la différence de viscosité entre les deux magmas, ces mélanges sont souvent incomplets.

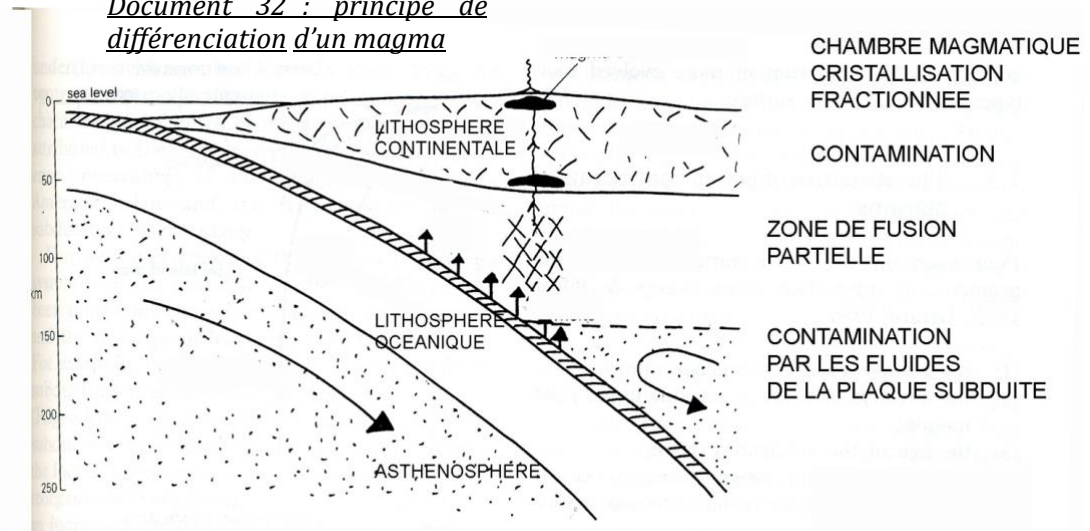
Documents 31

Document 31 : Roches issues de l'éruption du Lassen Peak (Californie).

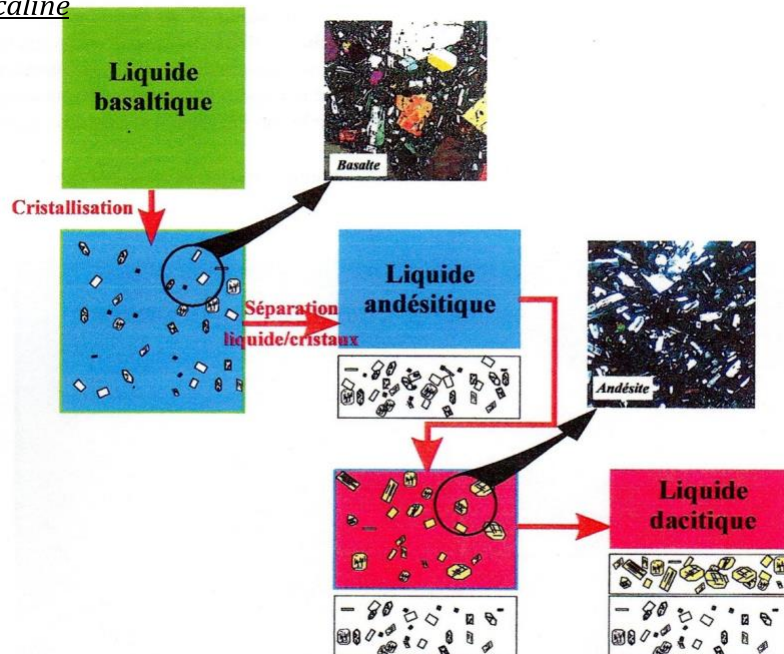
Ce volcan est situé au nord de la Californie, son activité est liée à la subduction de la plaque Juan de Fuca sous la plaque Nord-Américaine.

Bilan :

Document 32 : principe de différenciation d'un magma



Document 32 : différenciation d'un magma dans une série calco-alcaline



Conclusion :

La différenciation magmatique est le processus qui conduit à la mise en place de magmas secondaires de chimie différente du magma primaire, ce processus de différenciation se réalise selon 2 modalités principales : une différenciation par cristallisation fractionnée et/ou par contamination/assimilation.

assimilation, 22
 contamination, 4
 contamination crustale, 21
 cristallisation fractionnée, 4
 différenciation, 4
 mélange entre des magmas, 23

plagioclases zonés, 8
 série alcaline, 19
 série calco-alcaline, 21
 série magmatique, 18
 série tholéiitique, 18

Source : Cours de CV et JMF modifiés