

III. LE MAGMATISME, UNE CLE DE LA DIFFERENCIATION DU GLOBE.

A. les séries magmatiques.

1. notion de série magmatique.

Poly Massif - Central.

Le volcanisme du Massif Central montre des ensembles variés. Nous ne parlerons pas ici des liens qui existent entre la forme des édifices volcaniques, la nature des éruptions et la nature des produits émis. De nombreux ouvrages traitent de ces questions classiques.

Nous allons prendre un exemple de roches émises par un même volcan de la chaîne des Puys.

Série de diapos.



Basalte à olivine. (roche pauvre en silice).

Basalte sans olivine. Roche un peu moins pauvre en silice. Vue en lame mince.

Trachyte. Roche plus claire, présentant des cristaux de biotite et d'amphibole ainsi que



des phénocristaux de F.K.

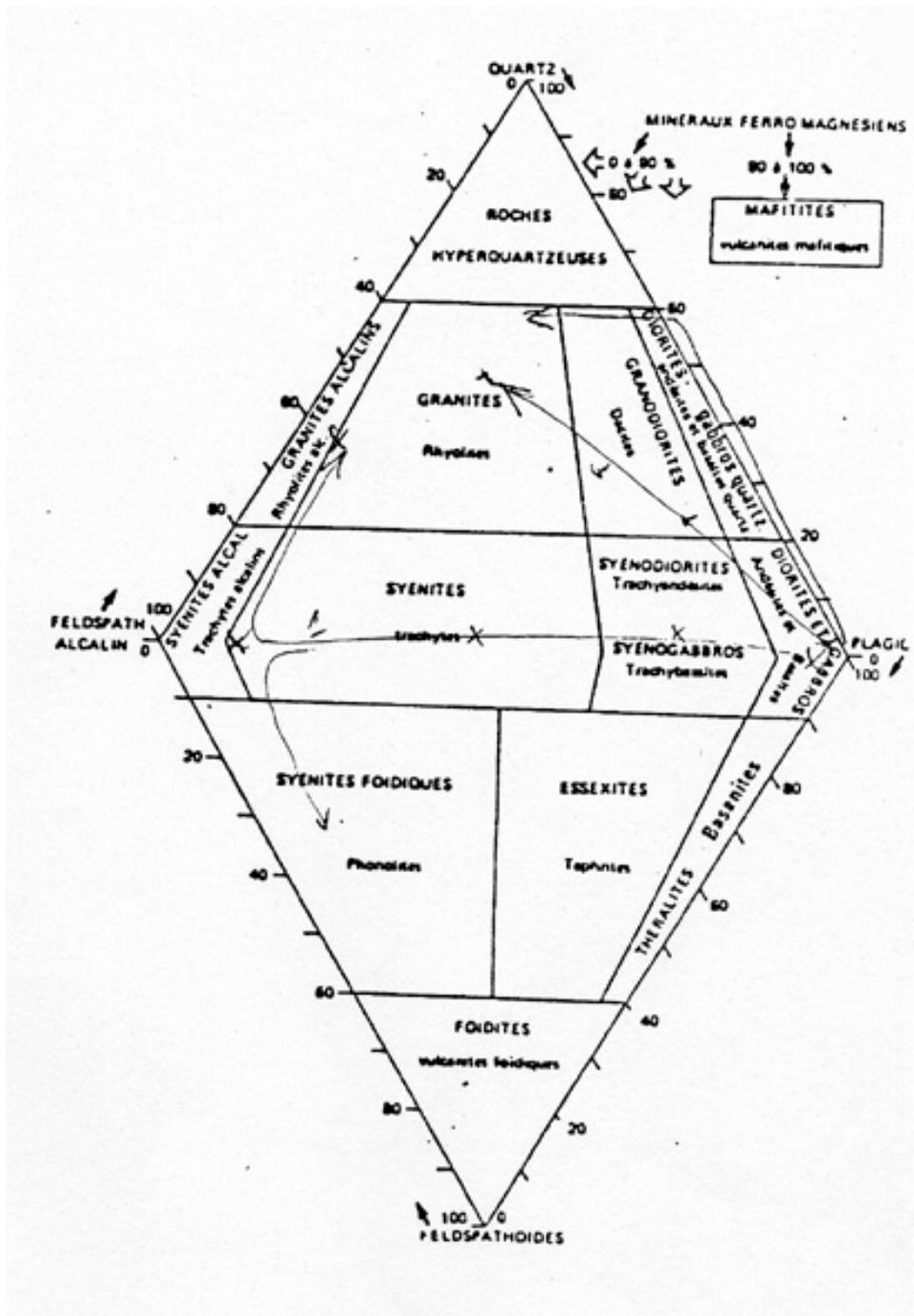
Rhyolite. On y distingue des cristaux de F.K et des cristaux de Q



Voilà un exemple d'un cortège de roches qu'un même volcan a pu émettre à différents moments.

Pour étudier ces différentes roches on va les replacer dans la classification internationale de Streckeisen.

Voir aussi le logiciel à télécharger [La classification des roches magmatiques. \(streck.zip\)](#)



La composition minéralogique d'une roche est fonction de sa composition chimique et des conditions de cristallisation. On peut donc prendre en compte les minéraux réellement observés: c'est la **composition modale**. On peut prendre en compte les minéraux virtuels (qui n'ont pu s'exprimer par suite d'un refroidissement trop rapide). On calcule les pourcentages de ces minéraux selon une procédure standard à partir de la composition chimique. On parle alors de norme ou de **composition normative**.

Dans cette classification on tient compte des pourcentages de minéraux clairs: Q- Feldspaths alcalins- Feldspaths plagioclases et feldspathoides. Le triangle du haut comprend les roches excédentaires en silice; le triangle du bas comprend les roches pauvres en silice. Les roches que nous venons d'observer proviennent de la différenciation du magma qui se refroidit. En se refroidissant un magma va donner à partir d'un terme dominant, des termes

différenciés de moins en moins basique par suite du phénomène de cristallisation fractionnée. Illustrons ceci à l'aide d'un exercice.

Quelle est la **nature** et la **quantité des liquides résiduels**, après cristallisation fractionnée, d'un basalte tholéïtique et d'un basalte alcalin. (voir composition normative en minéraux ci-dessous).

On considère que ce phénomène a lieu à 1000°C alors que sont cristallisés l'ensemble des oxydes et des silicates ferro-magnésiens, ainsi qu'un feldspath plagioclase de composition 40% d'albite et 60% d'anorthite; ce plagioclase comprend toute l'anorthite de la norme.

minéraux	basalte tholéïtique	basalte alcalin
quartz	5	0
orthose	4	5
albite	20	20
anorthite	25	25
néphéline	0	5
pyroxène	42	21
olivine	0	20
magnétite	4	4

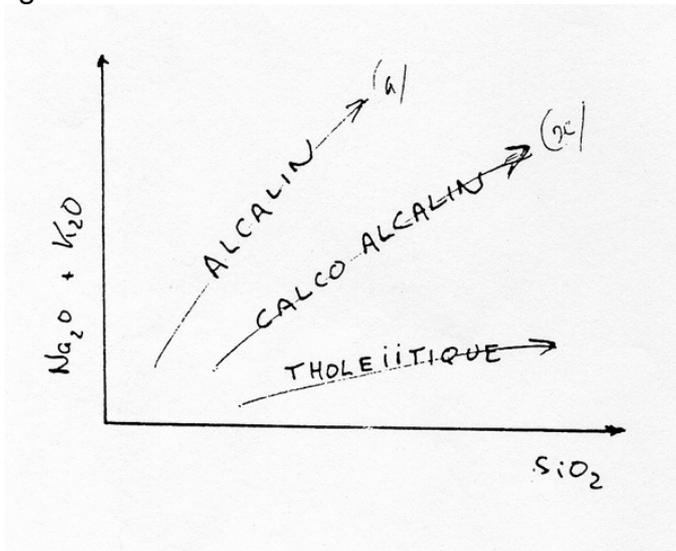
Composition minéralogique d'une rhyolite et d'une phonolite (équivalent microlitique d'une syénite néphélinique).

minéraux	rhyolite	phonolite
quartz	32	0
orthose	30	30
albite	25	35
anorthite	5	5
néphéline	0	20
micas, amphiboles	8	10

A 1000°C il reste un liquide résiduel qui a pour composition: Pour le magma tholéïtique:

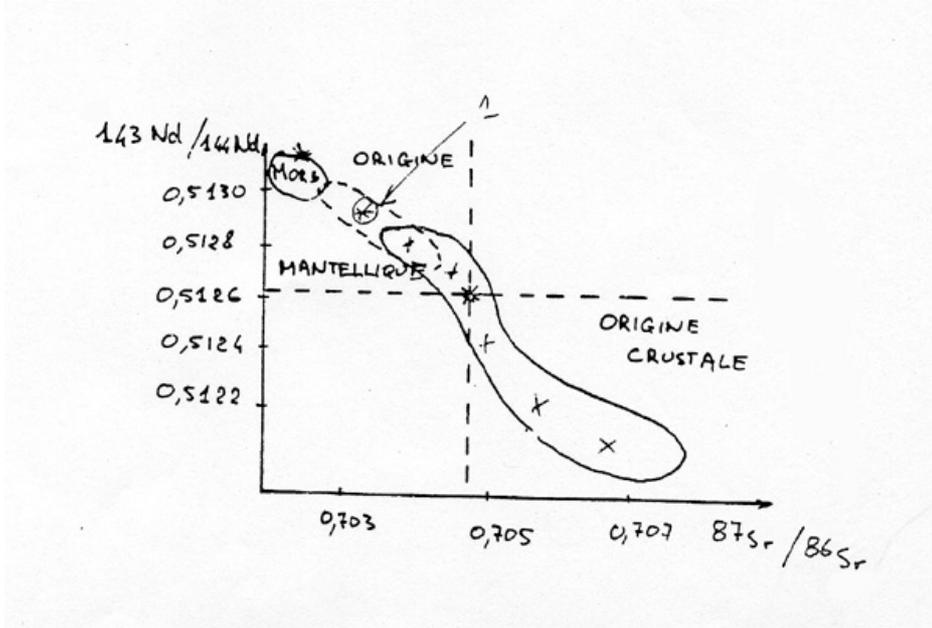
Q 5%- Or 4% - Ab 3%. Ce qui correspond à la composition minéralogique d'une rhyolite. Pour le magma alcalin cela donne : Or 5% _ Ab 3% - Néphéline 5%. Ce qui correspond à la composition minéralogique d'une phonolite. Dans l'exemple de la chaîne des Puys le magma étant moins alcalin a donné comme terme ultime de la différenciation des rhyolites alcalines. Ces suites de roches liées génétiquement constituent des **séries magmatiques**. Nous pouvons les reporter sur le diagramme de Streckeisen. Vous remarquez que pour les 3 séries envisagées les termes de départ sont extrêmement voisins. On doit donc déjà penser à distinguer différentes sortes de basaltes.

Une autre façon de distinguer les différentes séries consiste à se placer dans un diagramme binaire: alcalins- silice.



On remarque au passage que la série tholéitique et la série alcaline peuvent très bien avoir la même proportion de silice mais dans ce cas la proportion d'alcalins est très différente. On voit d'autre part sur ce diagramme une nouvelle série intermédiaire entre les deux précédentes, on l'appelle la série calco-alcaline. Elle est caractéristique des zones de subduction.

On peut aussi étudier les proportions en différents isotopes contenus dans les minéraux.



Exemple, le rapport $\text{Sr}87/\text{Sr}86$ est plus élevé dans les roches d'origine crustale que dans les roches d'origine mantellique. (cela tient à la proportion de $\text{Rb} 87$ plus grande dans l'écorce). Ici on y adjoint le rapport $\text{Nd} 143/\text{Nd} 144$ (Le néodyme provient de la désintégration du samarium). Ce rapport est plus élevé dans les roches d'origine mantellique. On peut donc replacer les séries dans un tel diagramme.

Donc tous les arguments concordent pour dire que les basaltes alcalins comme les basaltes tholéitiques ont une origine profonde, mantellique. Des arguments de terrain le confirment. On peut avoir des coulées de basaltes avec des péridotites(donc du manteau). Un magma basaltique a pu échantillonner en remontant des roches du manteau telles que les

péridotites. Ou bien encore à la faveur de la tectonique on peut voir des affleurements de péridotites.

2.les différents types de séries magmatiques.

On a déjà évoqué la variété des séries magmatiques à propos de leur définition même. Etudions les un peu plus en détail.

_ **La série calco-alkaline.** Voici un cortège qu'on peut rencontrer dans une telle série: Basaltes alumineux-- andésites-- dacites -- rhyolites.

Diapo d'andésite. Japon. Volcan Hakone



On y voit des plagioclase (andésine), des pyroxènes (Hypersthène). Rq: " L'andésite de Volvic" est en fait une trachy- andésite . L'étude des isotopes montre une origine mixte , crustale et mantellique. On doit aussi envisager le magmatisme calco-alkalin plutonique.

Série de diapos sur le volcanisme andésitique (Cinder Cone , Californie)

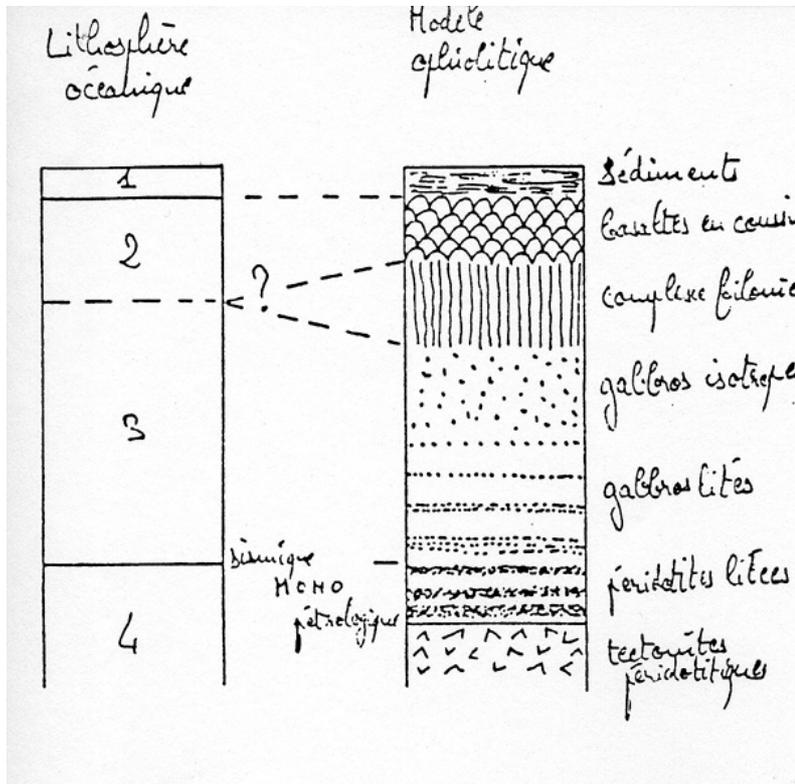


et sur les plutons grano-dioritiques (Yosémite, Californie).



On pourrait aussi prendre comme exemple les plutons calco-alcalins de Corse.

_ **La série Tholéitique.** On la replace sur le diagramme de Streckeisen et sur le diagramme binaire. Sur le terrain on peut considérer une série ophiolitique avec de bas en haut:

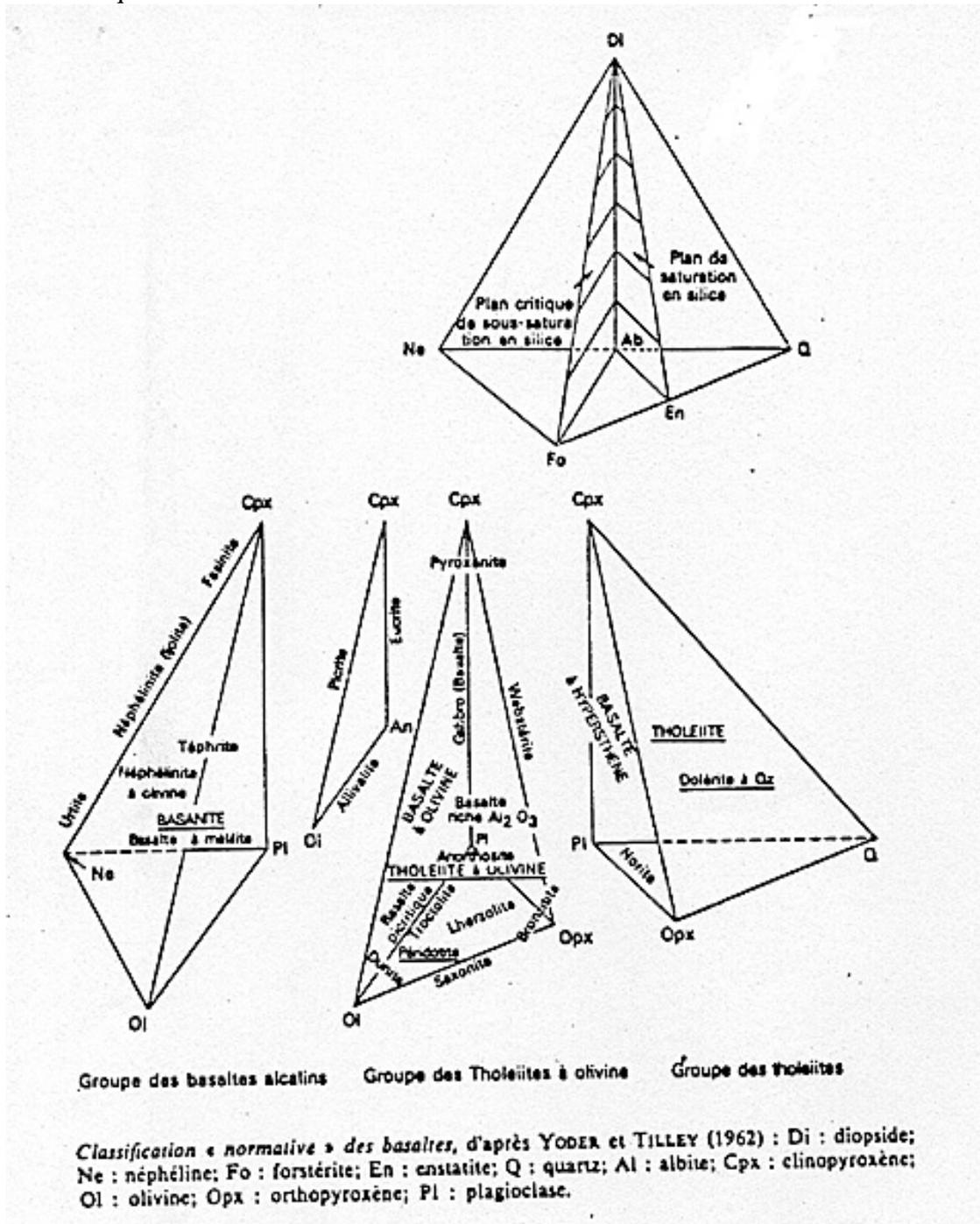


Des péridotites foliées. Des gabbros lités qui indiquent une accumulation de minéraux à cause de la gravité. Phénomène de cristallisation fractionnée. Tout au sommet de la série des basaltes en pillows lavas caractéristiques d'un volcanisme sous-marin.

Cette série donne donc un volcanisme de type dorsale et un magmatisme plutonique de type plancher océanique.

Si on reprend la comparaison série alcaline-série tholéitique, on constate que des souches basaltiques de composition voisine ont des potentialités évolutives différentes. Si on veut différencier ces souches basaltiques, il faut utiliser des classifications qui vont prendre en compte non plus les minéraux clairs mais les ferro-magnésiens.

Poly . On peut éclater ce diagramme en tétraèdre, pour bien distinguer les trois grandes souches basaltiques:

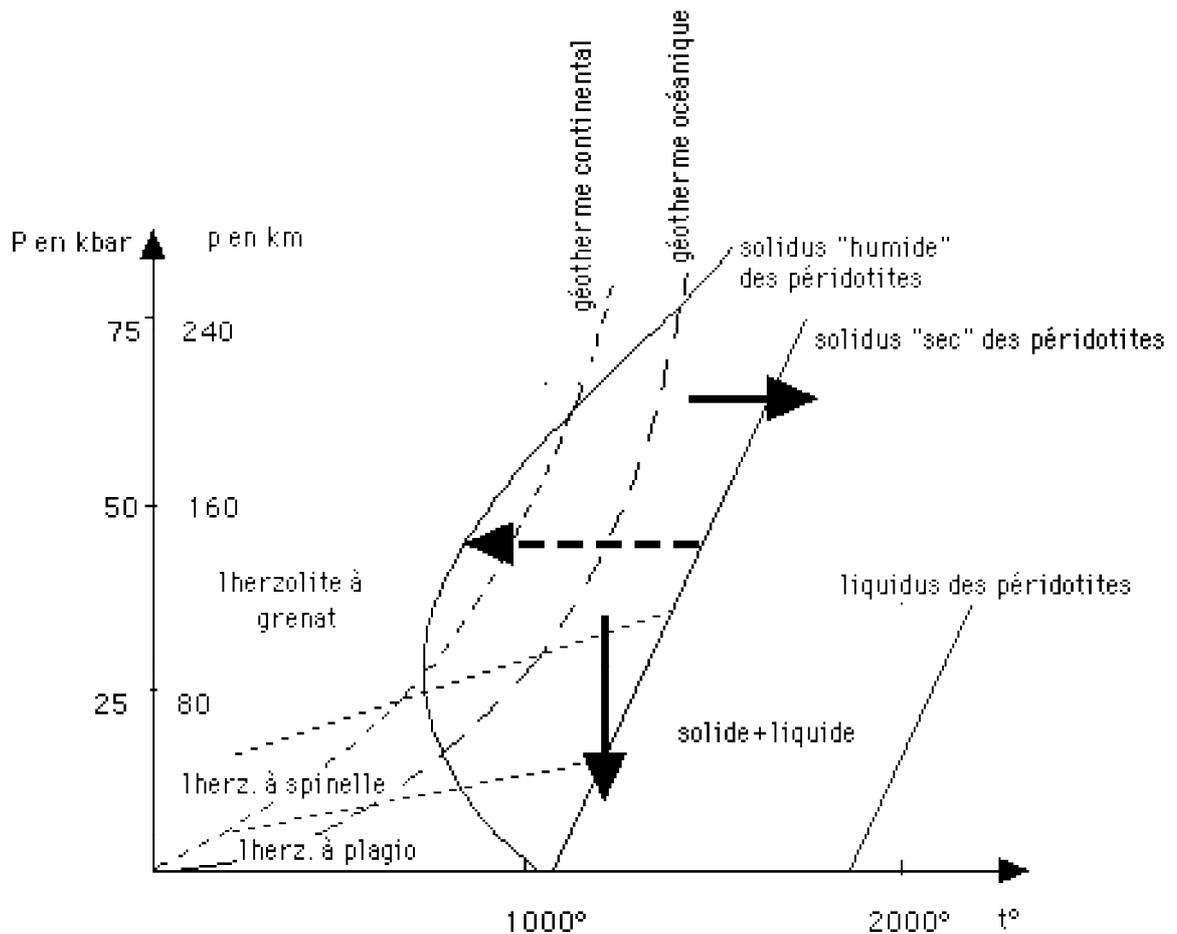


- Basanites: sous saturées en silice.
- Tholéites à olivine: Pas de Q normatif.
- Tholéites à Q ;Q normatif.

D'où viennent ces différences minimales entre les trois souches et qui vont induire une évolution ultérieure totalement différente? Ces trois souches doivent provenir d'une fusion du manteau, donc ce sont les conditions de la fusion qui ont du être différentes.

B.les conditions de fusion partielle du manteau.

Voir aussi logiciel à télécharger [Les conditions de la fusion partielle du manteau. \(manteau.zip\)](#)



On a reporté sur ce diagramme P-T :

- Le solidus "humide " des péridotites.
- Le solidus "sec" des péridotites.
- Le liquidus des péridotites.

Ainsi que deux géothermes calculées, l'une correspondant au domaine continental, l'autre au domaine océanique. On a noté aussi 3 domaines de stabilité pour des péridotites particulières: Les lherzolites à plagio, à spinelle et à grenats.

1ère remarque: Le manteau n'a aucune raison de fondre dans les conditions naturelles. Les points se trouvent à gauche du solidus sec.

Envisageons les cas où il y a fusion:

1er cas. Par suite d'une anomalie thermique locale la T augmente à P constante. Le solidus sec est recoupé. Il y a fusion partielle faible. 2 à 5 % fondent. Les éléments

magmatophiles ou incompatibles vont se précipiter dans le peu de liquide . Celui-ci sera donc très riche en alcalins (On a vu que les alcalins étaient des éléments incompatibles).

Le magma basaltique formé dans ces conditions sera donc alcalin. C'est ce qui se produit au niveau des points chauds. Ex : îles Hawaï. La fusion a lieu sous une forte pression, 160 à 200 km.

2ème cas. Lorsqu'il y a décompression adiabatique (c'est à dire sans échange de chaleur avec l'encaissant lors d'une remontée rapide), on constate que la flèche recoupe le solidus. Il y a formation d'un magma à P plus faible et 15 à 30 % de fondu. Le magma sera plus riche en silice. C'est un magma tholéitique. Il se forme dans un autre contexte géodynamique, celui des dorsales.

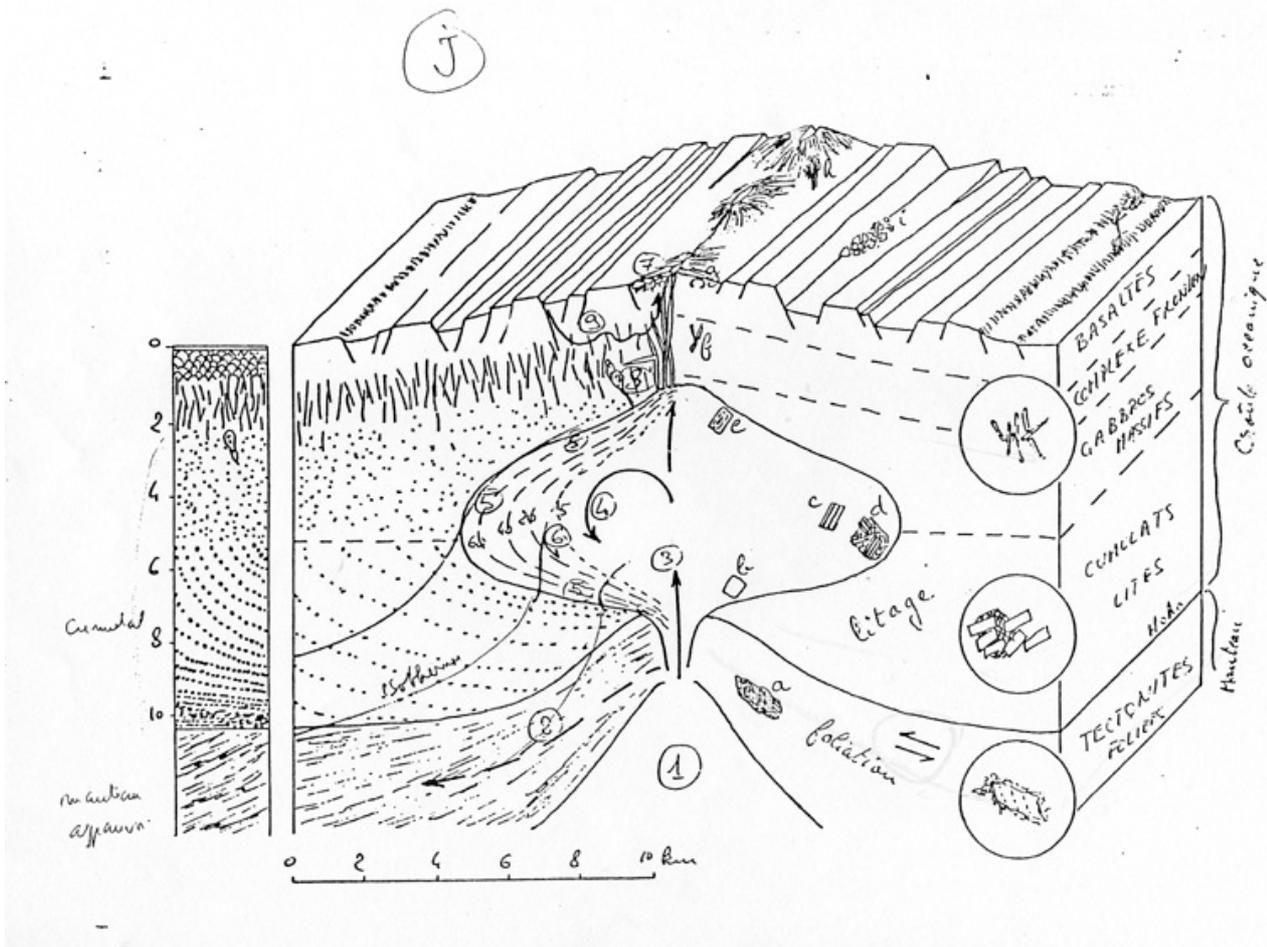
3ème cas. A P et T constantes, un apport d'eau local peut déplacer la courbe du solidus vers la gauche. A ce moment là le point "devient" liquide, sans que les conditions de P et de T n'aient changées. C'est le cas de la formation des magmas calco-alcalins. Contexte géodynamique: Les zones de subduction.

Vous constatez qu'il y a une analogie avec les conditions de la fusion partielle de la croûte continentale. Trois moyens pour fondre:

- Augmenter la T.
- Décompression.
- Adjonction d'eau.

Nous allons maintenant prendre un exemple de différenciation, le cas d'une série tholéitique.

Poly J. Modèle de chambre magmatique.



On trouve de bas en haut:

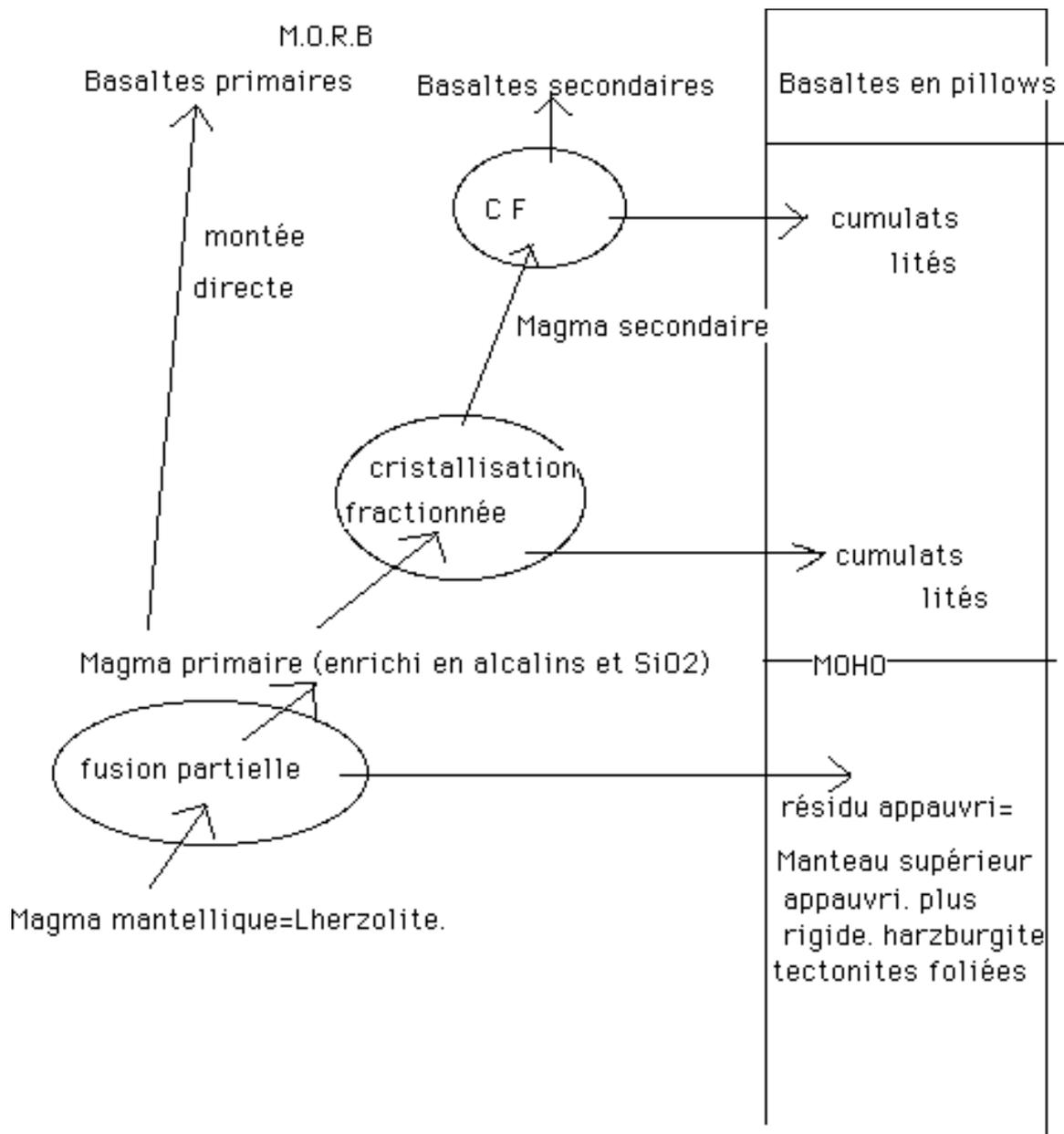
- des tectonites foliées péridotitiques; c'est le manteau.
- des cumulats lités; c'est la croûte.
- des gabbros massifs.
- un complexe filonien avec des dolérites.
- enfin des pillows lavas.

2. la cristallisation fractionnée dans une chambre magmatique.

Description du fonctionnement d'une chambre magmatique:

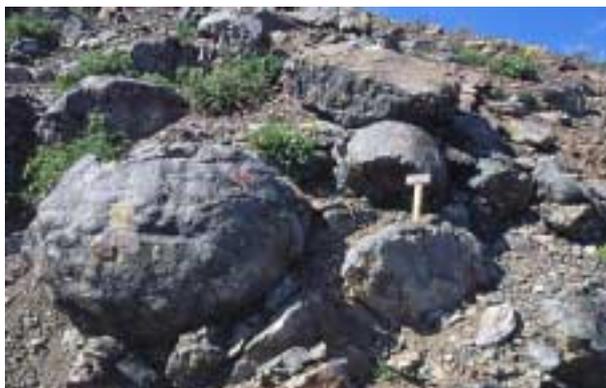
- 1- montée de manteau supérieur partiellement fondu.
- 2- Le manteau résiduel solide, appauvri, flue sur les côtés: tectonites foliées.
- 3- injection de liquide magmatique.
- 4- brassage par convection.
- 5- cristallisation fractionnée près des parois.
- 6- "sédimentation" des cristaux.
- 7- épanchement de basaltes sur le fond océanique.
- 8- injection de magma différencié au toit de la chambre: dolérites.
- 9- circulations hydrothermales.

Deux phénomènes importants, la fusion partielle et la cristallisation fractionnée expliquent la superposition des différentes couches.



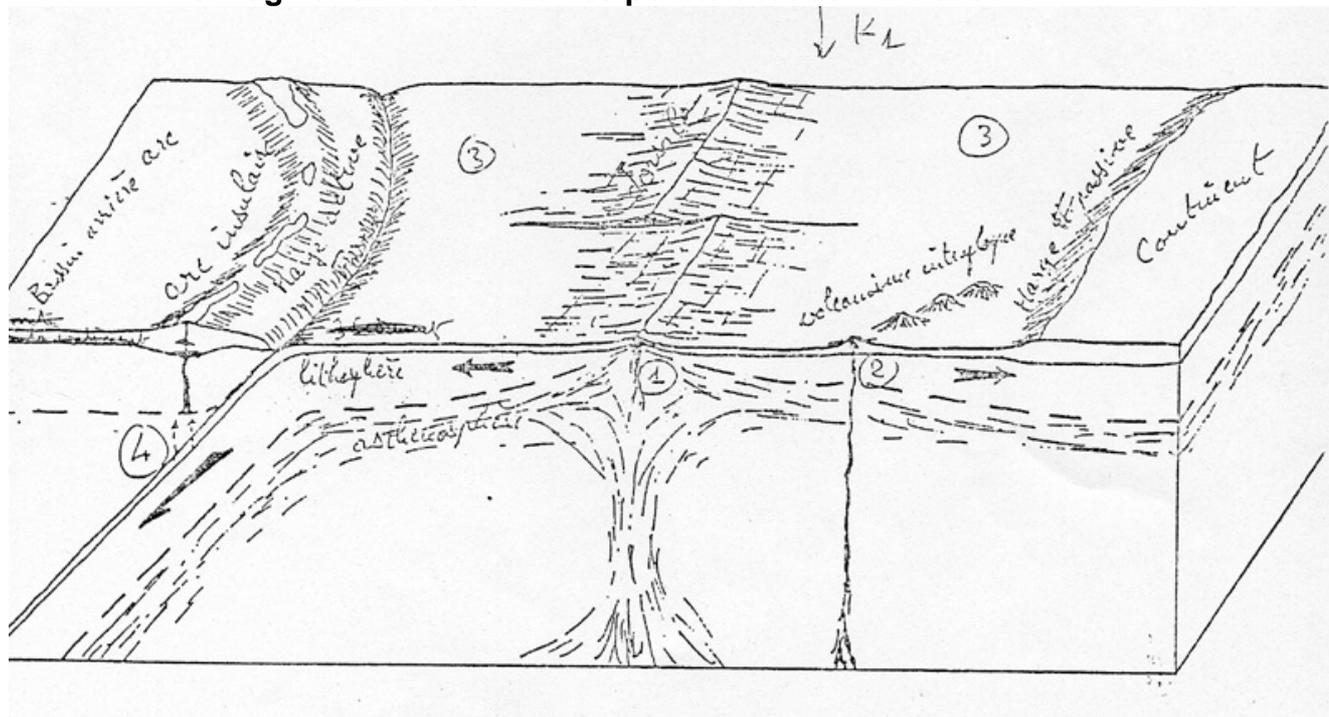
Il y a donc fractionnement chimique + ségrégation mécanique, qui expliquent la différenciation du globe.

Pillows lavas du Chenaillet : plancher océanique alpin ancien porté à plus de 2000m d'altitude.



D. les points chauds.

-Le magmatisme alcalin et les points chauds. Planche K1.



Il ya formation de plaques océaniques au niveau de la dorsale; elles se refroidissent, deviennent plus denses (enfouissement des plaines abyssales). si on a un point chaud, la plaque va être "percée" par ce volcanisme intra-plaque. On ignore actuellement à quelle profondeur se trouve la source du magma. 200, 600, 2900 km ! ?

Si le point chaud reste fixe, les volcans actifs vont se succéder à son aplomb. On aura des " chapelets de volcans éteints, témoins du mouvement de la plaque. Exemple: archipel Hawaï- Empereur.

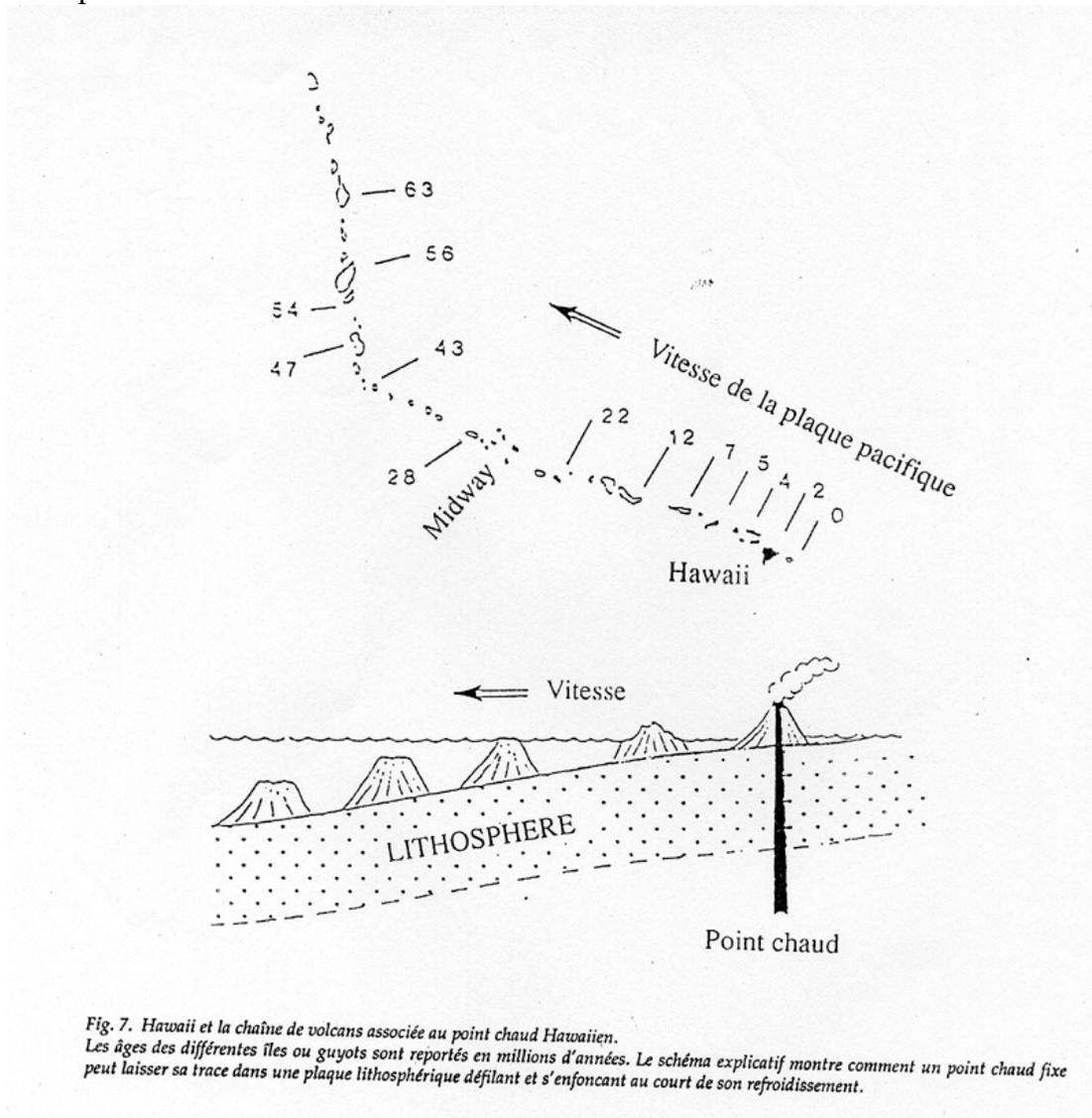


Fig. 7. Hawaïi et la chaîne de volcans associée au point chaud Hawaïien. Les âges des différentes îles ou guyots sont reportés en millions d'années. Le schéma explicatif montre comment un point chaud fixe peut laisser sa trace dans une plaque lithosphérique défilant et s'enfonçant au cours de son refroidissement.

On peut aussi trouver un magmatisme alcalin intra- continental. (Massif Central).

E.la subduction; la genèse des arcs insulaires.

1.le magmatisme calco-alcalin.

-Le magmatisme calco-alcalin. PlancheK.

Dans les zones de subduction on a déjà vu qu'il y avait un volcanisme explosif avec des andésites, et un plutonisme grano-dioritique. La plaque lithosphérique océanique plongeante constitue une "langue" descendante de matériel froid; ce qui explique l'aspect des isothermes. La libération d'eau déplace le solidus vers des T de fusion plus faibles, il y a donc fusion partielle du manteau. Ce magma monte:

- s'il arrive vite en surface cela donnera du volcanisme.
- s'il reste bloqué en profondeur, cela donnera des batholites calco-alcalins.

2.l'intervention de la croûte continentale.

D'autre part, la croûte continentale va interagir avec le magma mantellique. On a vu précédemment que le magma pouvait induire une anatexie de la croûte continentale; le mélange des deux magmas est possible, d'où ces changements de composition chimique qui expliquent la minéralogie particulière du magmatisme calco-alcalin. (L'étude des isotopes confirme les influences continentales).

F.la genèse de la croûte continentale.

1.origine mantellique.

On vient d'expliquer l'apparition d'une "stratification" du globe en couches concentriques, à propos d'une dorsale. Evoquons le problème de la croûte continentale.

Au niveau des zones de subduction le magmatisme calco-alcalin approvisionne sans arrêt la croûte continentale. Le manteau se différencie en croûte continentale. Celle -ci ayant une densité plus faible que le reste , ne replonge pas. C'est "l'écume de la Terre" de Claude Allègre. Voici donc une explication de l'apparition de cette croûte et de son extension en volume au cours des temps.

On peut envisager un manteau initial, la mésosphère, de composition comparable aux chondrites (météorites), qui par fusion partielle a donné un manteau appauvri à cause de la différenciation, et une croûte continentale extraite de ce manteau appauvri.

Donc depuis 4 milliards 550 millions d'années, il y aurait eu une différenciation du globe telle que les couches les moins denses se retrouvent en surface. Le noyau plus dense aurait donné le manteau vers 4 milliards 200 millions d'années, et le manteau se serait appauvri progressivement en éléments Si et alcalins, éléments qui auraient donné en se regroupant la croûte continentale. On estime que les grands boucliers ont été extraits du manteau il y a 2 à 3 milliards d'années. A cette époque il devait y avoir un pourcentage de fusion partielle plus important car le flux thermique devait être plus fort.

2.recyclage, métamorphisme et anatexie.

[Voir plus haut chapitre II](#)

CONCLUSION et Bibliographie sommaire.

Diapo structure interne du globe.

Faire un schéma synthétique de la structure interne du globe connue par les méthodes classiques de la géophysique, sismologie, gravimétrie, qui donne l'état actuel des lieux. L'étude du magmatisme avance des hypothèses pour expliquer la genèse de cet état actuel.



On vient donc de voir des hypothèses sur la formation de la structure du globe, telle que nous la connaissons aujourd'hui. On suppose donc que le matériel initial s'est agrégé uniformément de façon homogène, puis s'est différencié secondairement.

D'autre part la Terre au cours de son histoire, a connu plusieurs fois un super continent. Le dernier en date, la Pangée, date de 200 millions d'années. Le regroupement des continents empêche la chaleur de s'évacuer ce qui entraîne le rifting et "l'éclatement" du continent. Certains comme Wilson prétendent même que chaque phase d'éclatement est suivie d'une phase de regroupement, ces cycles ayant une durée de 400 à 500 millions d'années! De là à prévoir l'aspect de notre Terre dans quelques millions d'années...

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE.

Comprendre et enseigner la planète Terre. Caron. Gauthier. Schaaf. Ulysse, Wozniak. Ed. OPHRYS.

Consulter les éléments de bibliographie de cet ouvrage qui signalent la plupart des publications en français sur la Géologie moderne.

Atlas of igneous rocks and their textures. MacKenzie.

Atlas of rocks forming minerals in thin section. MacKenzie. Ed LONGMAN SCIENTIFIC & TECHNICAL. Burnt Mill, Harlow, Essex CM 2 0 -JE, ENGLAND. Vous pouvez les commander chez ABC Book Shop à Rouen. Beaucoup de très bonnes photos de lames minces, permettant d'illustrer la plupart des assemblages minéralogiques intéressants nos cours.

Thermodynamique. Annequin et Boutigny. Ed. VUIBERT.

Thermodynamique. J. Boutigny. Ed. VUIBERT.

La Thermodynamique. QUE SA I S- JE. n° 111 9.

Ces ouvrages destinés aux élèves de maths sup, permettent de se replonger dans la thermodynamique chimique utile au pétrologue.

Diapositives. Roches magmatiques. 2 livrets intéressants:

- Le phénomène magmatique

Ophiolites et plancher océanique. CRDP, de STRASBOURG.