

ST-F : LE PHENOMENE MAGMATIQUE

ST-F Le magmatisme (BCPST 2)

Cette partie permet de comprendre le rôle joué par le magmatisme comme mécanisme d'évacuation de la chaleur interne de la Terre. 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. Postérieurement à la formation des magmas, leur composition chimique évolue par soustraction des cristaux formés dans le magma, et par mélange avec d'autres magmas ou assimilation d'éléments solides. Les magmas se déplacent vers la surface en fonction de leurs propriétés physiques (densité, température, viscosité). Les magmas cristallisant dans la croûte forment des roches plutoniques grenues alors que ceux qui parviennent à la surface forment des édifices volcaniques, dont les caractéristiques sont liées à leur viscosité et à leur teneur en gaz dissous. La nature et la quantité de magmas formés dépendent étroitement du contexte géodynamique. Les connaissances relatives au processus magmatique sont remobilisées dans l'étude des risques et des ressources géologiques (partie ST-I).

Savoirs visés

Capacités exigibles

ST-F-1 La mise en place des magmas

La trace de l'activité magmatique peut être directe (roches magmatiques, volcans, fumerolles, activité sismique) ou indirectes (auréoles de contact, hydrothermalisme associé).
Les modes de gisement des roches magmatiques sont variés : intrusions plutoniques résultant de la

- Analyser des paysages, des affleurements et des cartes permettant de visualiser la diversité des modes d'expression du magmatisme.
- Identifier à l'échelle macroscopique et microscopique de manière raisonnée des roches magmatiques : basaltes, gabbros, andésites, diorites, rhyolites, granites,

cristallisation de magmas en profondeur et mises à l'affleurement, formations filoniennes ou formations volcaniques.
La chronologie de mise en place des roches magmatiques peut être établie par datation relative et par datation absolue.
Le type de volcanisme et les modes de mise en place des magmas dépendent du contexte tectonique.
Les produits émis au niveau des volcans attestent de l'existence de différents types de dynamismes éruptifs.
Les différents dynamismes éruptifs sont déterminés par les caractéristiques physico-chimiques des magmas émis (viscosité, teneur en gaz), ainsi que par les caractéristiques de la zone d'émission (topographie, présence d'eau phréatique, de glace...).
La prévention des risques volcaniques se fonde sur la connaissance des éruptions passées et sur la mise en place de réseaux de surveillance.
Les roches magmatiques s'organisent en associations temporelles et spatiales (séries magmatiques) que l'on peut identifier à partir des caractéristiques des gisements et de critères pétrographiques ; leur étude permet de reconstituer le fonctionnement des systèmes magmatiques.

trachytes, par l'étude de leur texture, de la minéralogie observable et de la mésostase.
- Identifier le mode de gisement d'une roche par analyse de sa texture.
- Identifier une roche magmatique plutonique par analyse de sa composition modale et la placer dans la classification de Streckeisen.
- Identifier une roche volcanique par sa composition minéralogique et sa constitution chimique et la placer dans un diagramme TAS.
- Expliquer le lien entre composition chimique et composition minéralogique d'une roche magmatique.
- Exploiter des données géophysiques, cartographiques, pétrologiques afin d'établir un modèle de fonctionnement de chambre magmatique (exemple d'une dorsale rapide).
- Établir une chronologie relative entre des formations magmatiques et leur environnement et/ou entre des formations magmatiques entre elles.
- Exploiter des données radiochronologiques et géochimiques pour déterminer un âge absolu.
- Différencier un dynamisme effusif d'un dynamisme explosif par l'étude des édifices volcaniques et des produits émis.
- Relier dynamismes éruptifs et caractéristiques physico-chimiques des magmas.
- Identifier des risques volcaniques à partir d'études cartographiques, pétrologiques ou géophysiques. Identifier un ensemble correspondant à une série magmatique à partir de différents critères (cartes, gisements, analyses chimiques, datation etc.).

ST-F-2 Les processus fondamentaux du magmatisme	
ST-F-2-1 Production des magmas primaires	
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.	- 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).
Les grands ensembles géologiques : les îles océaniques (ST-J-2-2) Physique-chimie : descriptions microscopique et macroscopique d'un système (3.1)	
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.

Introduction : Définition d'un magma, rappels sur les silicates, **rappels des relations avec les frontières des plaques :** présence de magmatisme dans les zones de divergence (dorsales, rifts continentaux), certaines zones de convergence (subductions) et dans certaines zones internes aux plaques (points chauds) à partir de la carte mondiale des volcans actifs

I Etude d'une province magmatique : la chaîne des Puys

→ Voir TP 1

II Les manifestations actuelles et passées du phénomène magmatique

A/ Les formations magmatiques de surface sont éphémères

1. Les principaux types de volcans en lien avec les phases qui les composent
2. Les émissions : types de coulées, extrusions, explosions, gaz
3. Après érosion modérée: plateaux (mesas), dykes et necks

B/ Plus en profondeur : les gisements plutoniques visibles après érosion

1. Exercice (rapide!) d'isostasie : granite du Massif Central et taux d'érosion
2. Quelques gisements plutoniques

C/ Des manifestations indirectes

1. Le métamorphisme de contact
2. L'hydrothermalisme de dorsale et les gisements polymétalliques associés

III Les roches magmatiques : structure, texture, compositions

Voir TP 1

IV La production des magmas primaires : source solide et fusion partielle

A/ Quelques preuves d'une fusion partielle du manteau supérieur

1. Arguments de terrain : enclaves de péridotite
2. Les complexes ophiolitiques associent péridotite et roches magmatiques
3. Les données expérimentales

B/ La composition du manteau supérieur présente une certaine variabilité

C/ Les causes possibles de la fusion partielle : existence d'une « fenêtre » de fusion possible

1. Analyse des géothermes et des solidus des roches de la croûte et du manteau supérieur
2. La décompression adiabatique
3. Le réchauffement par apport solide de matériaux profonds
4. L'hydratation
5. Le cas particulier du géotherme continental et de l'anatexie

D/ La fusion partielle est incongruente et produit surtout des liquides basaltiques

1. Echelle des minéraux et diagrammes de phase
2. Echelle des éléments majeurs et notion de compatibilité
3. Eléments traces et isotopes apportent de nouvelles informations sur la source des magmas

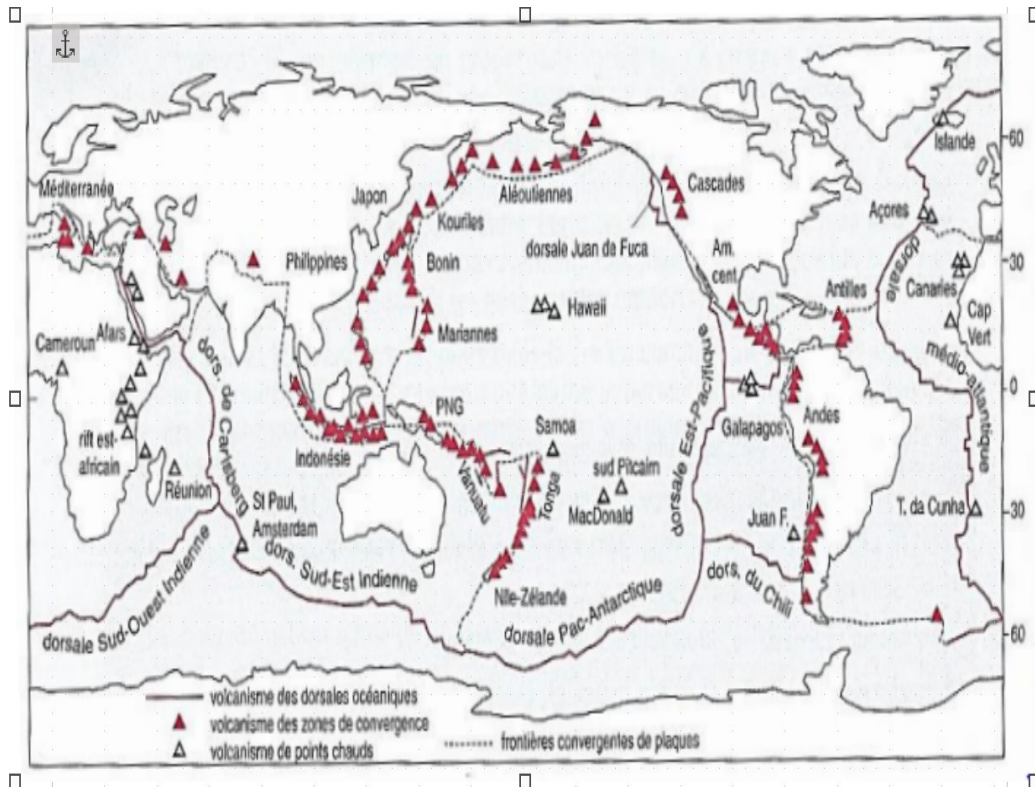
V Du magma à la roche magmatique : la cristallisation fractionnée et la notion de série magmatique

Voir TP 1 et 2

VI Magmatisme et contextes géodynamiques : à chaque contexte sa série !

Voir TP 2

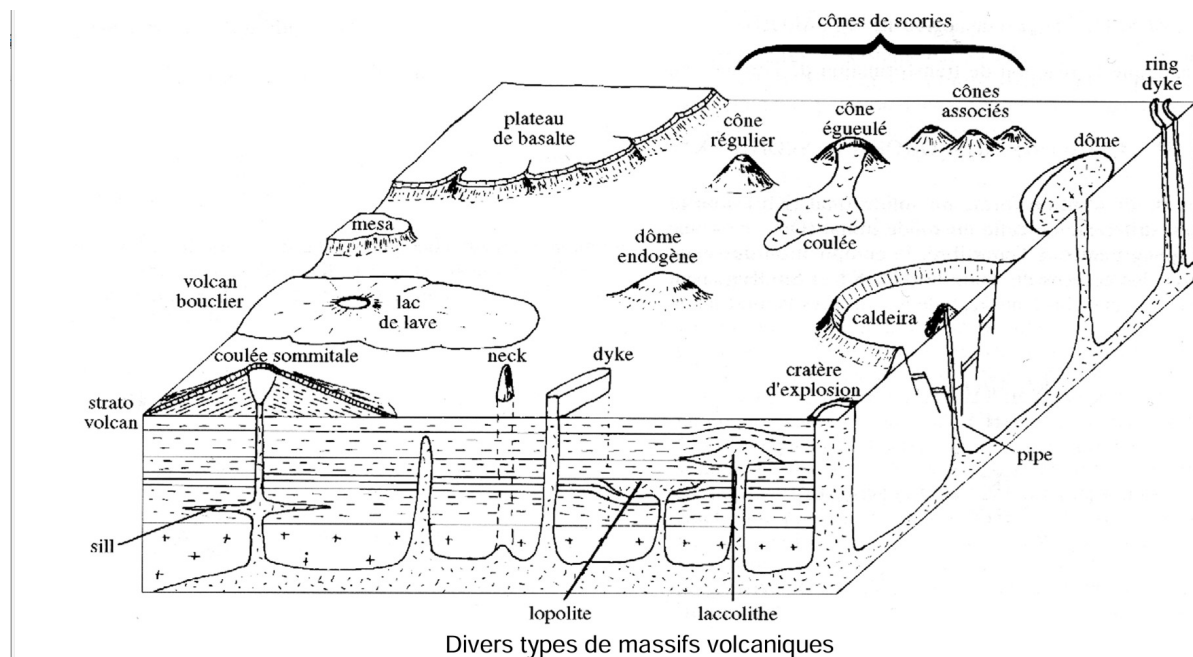
PREAMBULE : LE VOLCANISME MONDIAL ACTUEL



document 2 : différences entre les deux grandes catégories de volcans

Nom du volcan	Piton de la fournaise	Mont Saint Helens	Montagne Pelée	Kilauea
Localisation géographique du volcan	Ile de la Réunion France	Etat de Washington Etats-Unis	Martinique France	Hawaii Etats-Unis
Durée de l'éruption (donner un ordre de grandeur)	160 éruptions depuis 400 très actif	Quelques secondes	Très court	très actif activité éruptive constante
Manifestations de l'éruption (que voit-on lorsque le volcan entre en éruption)	ouverture de fissures d'où sortent des coulées de lave	Explosion Destruction d'une partie du volcan	Explosion Destruction d'une partie du volcan	ouverture de fissures laissant s'échapper des coulées de lave
Produits rejetés par le volcan pendant l'éruption	Fontaines de lave Coulées de lave	blocs, pierres ponce, cendres nuée ardente	Nuée ardente, blocs de roches	Fontaines de lave Coulées de lave
Conséquences de l'éruption sur le paysage et/ou les habitants	Peu dangereux	Destruction de 600 Km ² de forêts	Destruction de la ville de St Pierre Coulées de boues	Peu dangereux
Forme de l'édifice volcanique	Volcan bouclier	Dôme	Dôme	Volcan bouclier
Consistance de la lave	très fluide, rouge	visqueuse	visqueuse	très fluide, rouge

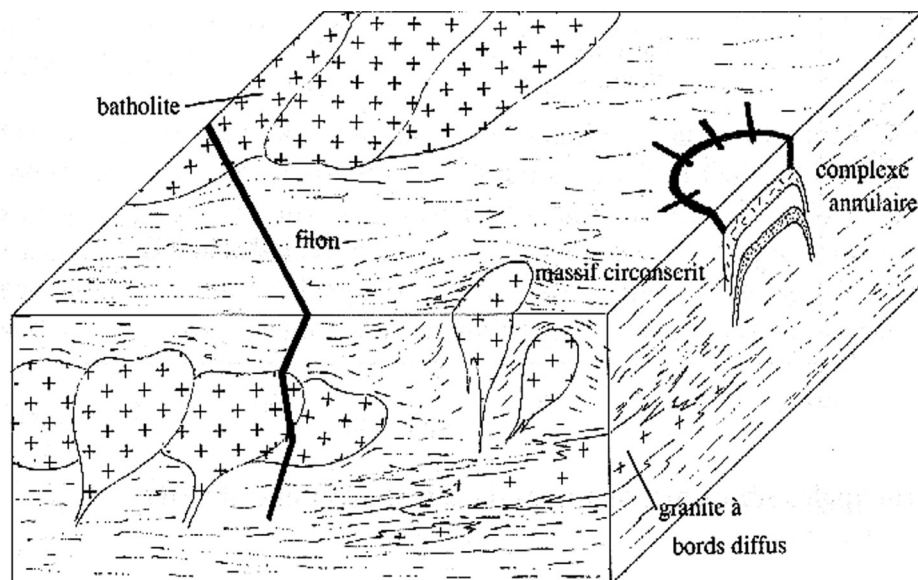
ANNEXE 2a : QUELQUES RELIQUES VOLCANIQUES APRES EROSION CONTINENTALE



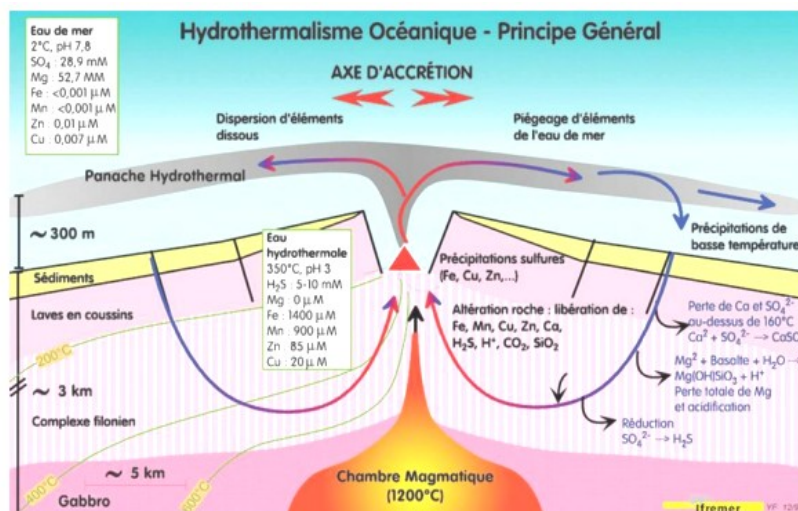
ANNEXE 2b : QUELQUES GISEMENTS DE ROCHES PLUTONIQUES APRES EROSION POUSSEE

Exercice : Il y a 330 millions d'années, la chaîne Hercynienne, dont fait partie le massif Central, était estimée à une altitude himalayenne, soit 8000m. On note actuellement une altitude moyenne de 1000m avec du granite à l'affleurement. Estimez, en utilisant le modèle de Airy d'isostasie, l'épaisseur de roche qui a été érodée. On estime la densité de la croûte à 2,8 et celle du manteau supérieur à 3,3.

Il y a 220 millions d'années, cette chaîne n'était plus qu'une pénéplaine quasi au niveau de la mer. Estimez la vitesse d'érosion.

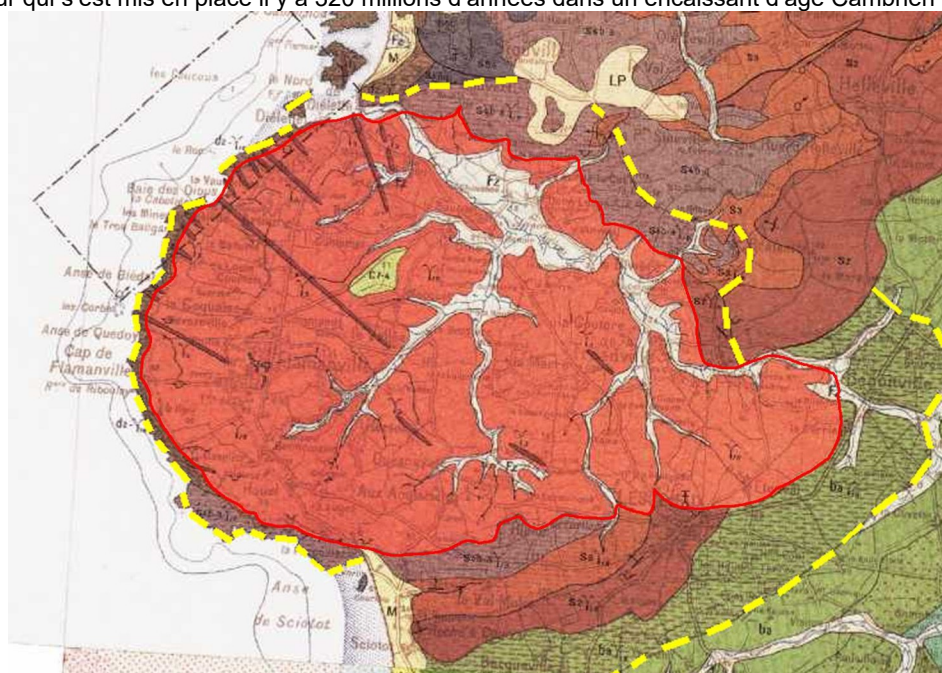


ANNEXE 3a : OPHIOLITES ET HYDROTHERMALISME OCEANIQUE



ANNEXE 3b : LE METAMORPHISME DE CONTACT

Le granite de Flamanville est situé au Nord-ouest de la presqu'île du Cotentin et est visible sur la carte géologique de Cherbourg à 1/50 000. C'est un pluton granitique d'environ 5 km de diamètre et au maximum 3 km d'épaisseur qui s'est mis en place il y a 320 millions d'années dans un encaissant d'âge Cambrien à Dévonien.



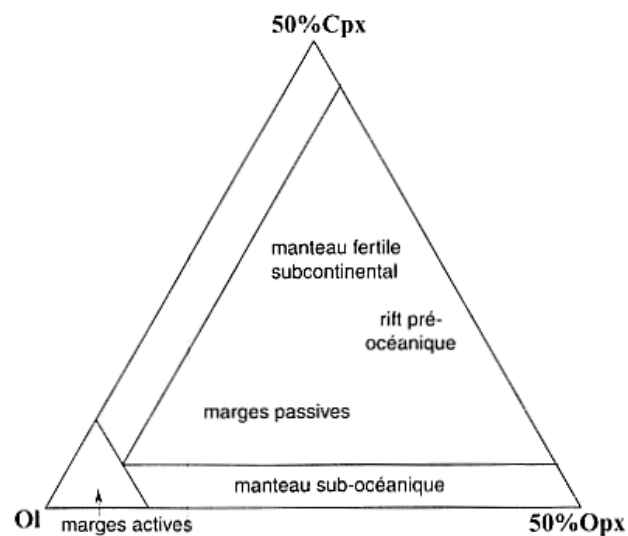
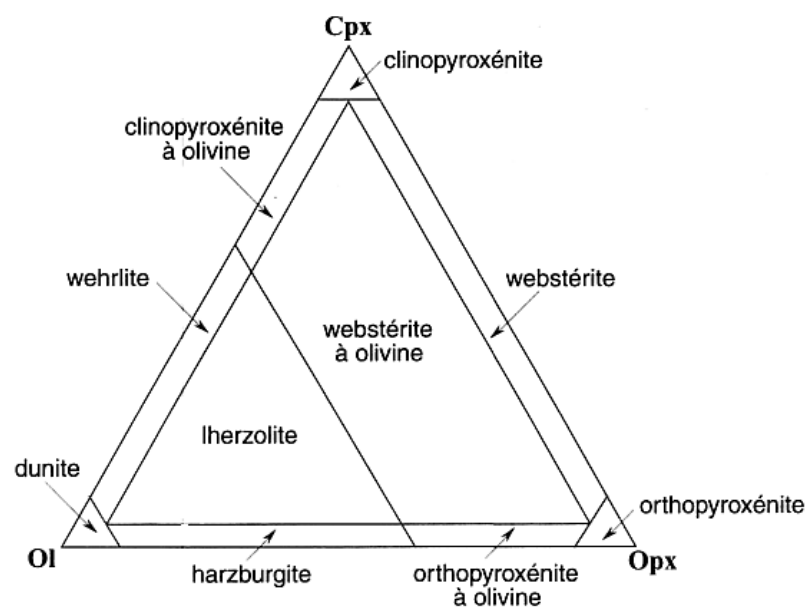
- Siluro-Dévonien : complexe de schistes et de quartzites
- Silurien : schistes ampéliteux
- Ordovicien-Silurien : Grès culminant
- Ordovicien supérieur : schistes à Trinudéus et Grès de May, regroupés
- Ordovicien moyen : Schistes à Calymene tristani
- Ordovicien inférieur : Grès armoricain
- Schistes et grès cambriens indifférenciés
- Cambrien inférieur : conglomérats de base et arkoses

- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : schistes et calcaires de Nêhou métamorphisés : cornéennes, cipolins
- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : schistes ampéliteux métamorphisés
- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : schistes à Trinudéus et Grès de May, métamorphisés
- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : schistes à Calymene tristani métamorphisés (schistes macifères et sériciteux)
- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : grès armoricain métamorphisé
- Auréole métamorphique du granite de Flamanville : schistes et grès cambriens indifférenciés, métamorphisés
- Granite de Flamanville (Hercynien)

ANNEXE 4 : PETROLOGIE DU MANTEAU SUPERIEUR

Compositions de péridotites du manteau

Faciès minéralogique	plagioclase + spinelle	spinelle	spinelle + grenat	grenat
olivine	64,8	61,0 à 65,3	70,1	67,0
orthopyroxène	27,1	22,0 à 21,8	16,9	12,0
clinopyroxène	6,2	23,0 à 11,3	10,2	11,0
plagioclase	1,3	–	–	–
spinelle	0,6	4,0 à 1,6	2,0	–
grenat	–	–	0,8	10,0
amphibole	–	–	–	–
phlogopite	–	–	–	–
apatite	–	–	–	–



Exercice : positionnez dans le diagramme 1 le manteau primitif (chondrite) contenant 65%Ol, 20%Opx, 15%Cpx

ANNEXE 5 : FUSION PARTIELLE EXPERIMENTALE

Compositions chimiques des liquides produits à l'équilibre par la fusion partielle du manteau à sec (d'après Jaques et Green, 1980 ; Falloon et *al.*, 1988).

	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	54,99	52,57	52,77	49,80	46,67	49,30	49,60
TiO ₂	0,68	3,29	0,31	2,70	5,00	2,50	1,40
Al ₂ O ₃	15,18	15,07	10,63	12,50	14,66	11,70	7,00
FeO	5,78	8,47	9,82	8,90	9,50	9,50	9,50
MnO	n.d.	n.d.	n.d.	0,10	n.d.	0,20	0,10
MgO	8,94	6,99	15,78	12,00	10,60	13,20	24,90
CaO	12,67	9,89	9,99	10,90	7,84	10,70	6,10
Na ₂ O	1,04	2,94	0,63	2,40	4,10	2,30	1,10
K ₂ O	tr.	0,63	tr.	0,60	1,63	0,50	0,30
Total	99,28	99,85	99,93	99,90	100,00	99,90	100,00
Mg/(Mg + Fe)	0,73	0,60	0,74	0,73	0,66	0,71	0,82
P (GPa)	0,2	0,5	0,2	1,0	2,0	1,5	1,5
T (°C)	1 200	1 180	1 300	1 300	1 400	1 400	1 550
% liquide	17	20	29	23	10	25	51

Les liquides obtenus ont des compositions proches de magmas naturels :

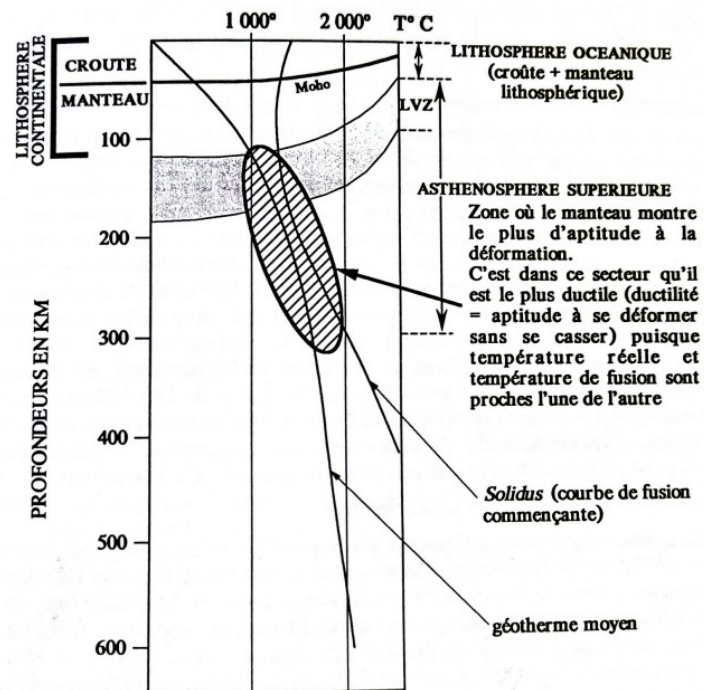
- 1, 2. tholéiites à quartz
- 3, 4, 6. tholéiites à olivine
- 5. basaltes alcalins
- 7. picrite tholéiitique et komatiite

Compositions chimiques des liquides produits à l'équilibre par la fusion partielle du manteau en présence de fluides (H₂O + CO₂) (d'après Mysen et Boettcher, 1975, 1976).

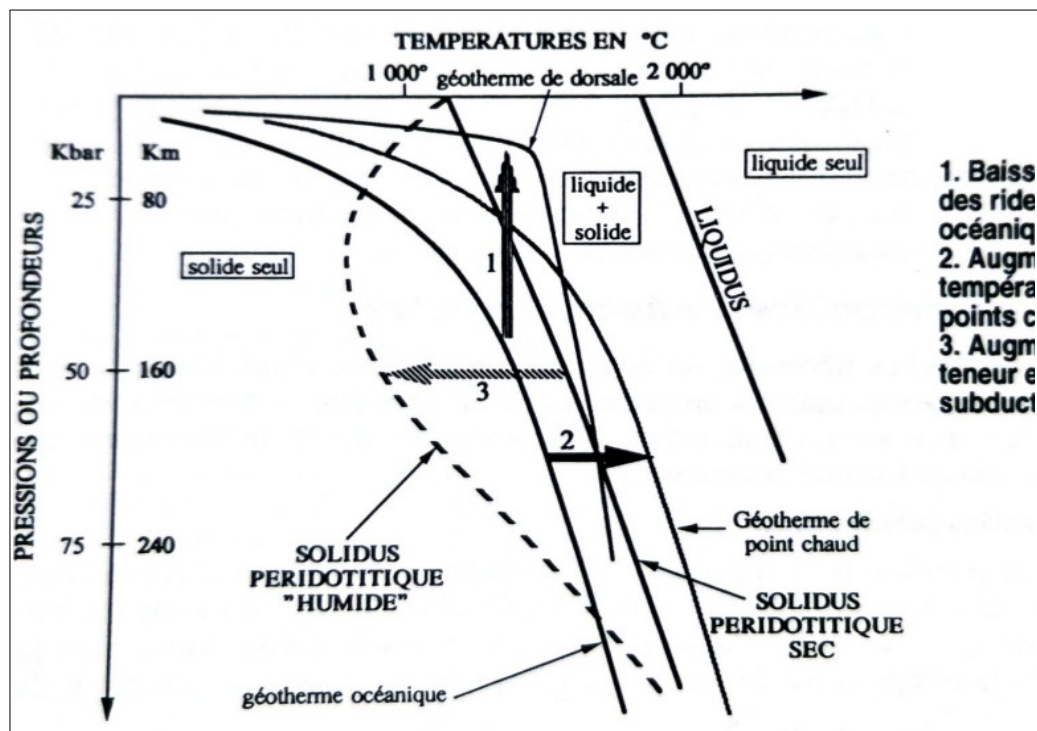
	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	63,10	58,00	57,90	45,60	43,50	58,90	46,40
TiO ₂	0,50	0,40	0,70	1,00	0,50	0,40	1,00
Al ₂ O ₃	22,10	16,10	17,90	18,90	10,50	24,00	14,70
FeO*	0,60	5,20	5,40	6,00	13,00	0,70	5,70
MnO	tr.	0,10	0,20	0,20	0,30	0,30	0,20
MgO	0,80	4,70	4,50	5,90	10,70	0,30	18,50
CaO	9,60	12,00	9,80	18,50	13,80	11,80	12,80
Na ₂ O	2,90	3,80	3,50	3,80	7,60	3,70	1,30
K ₂ O	0,20	0,50	0,10	0,10	0,40	0,10	0,10
Total	99,80	100,00	100,00	100,00	100,30	100,20	100,20

Les liquides produits ont une composition d'andésite lorsque les fluides contiennent plus de 60 % d'eau pour une pression atteignant 2,5 GPa et une température située à moins de 200 °C au-dessus du solidus. Pour des fluides moins aqueux (moins de 50 % d'eau), les liquides sont alcalins et sous-saturés en silice

ANNEXE 6 : CONDITIONS PROBABLES DE FUSION PARTIELLE

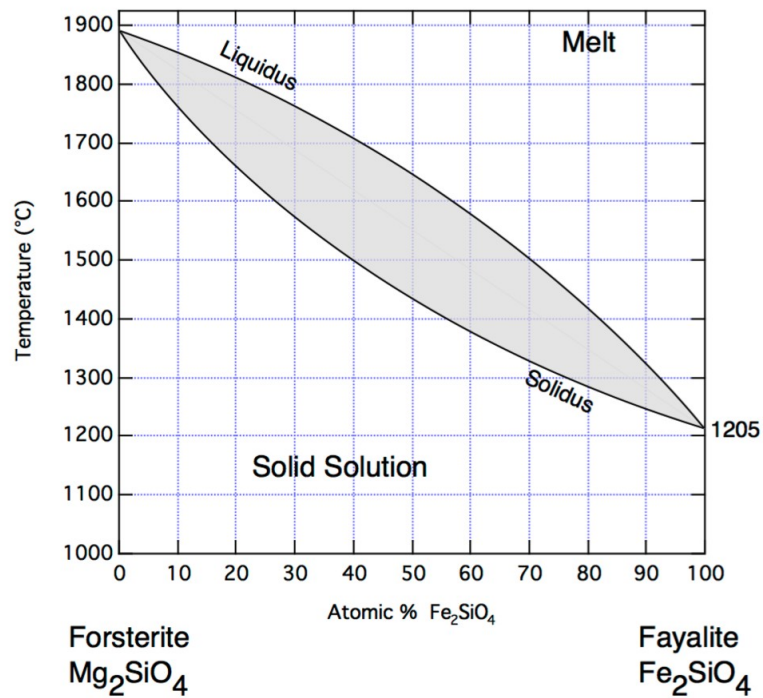
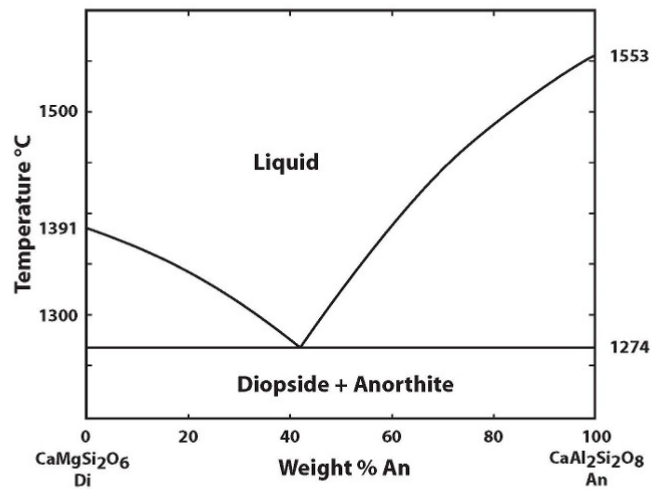


Géotherme, solidus des péridotites et « fenêtre de fusion partielle »



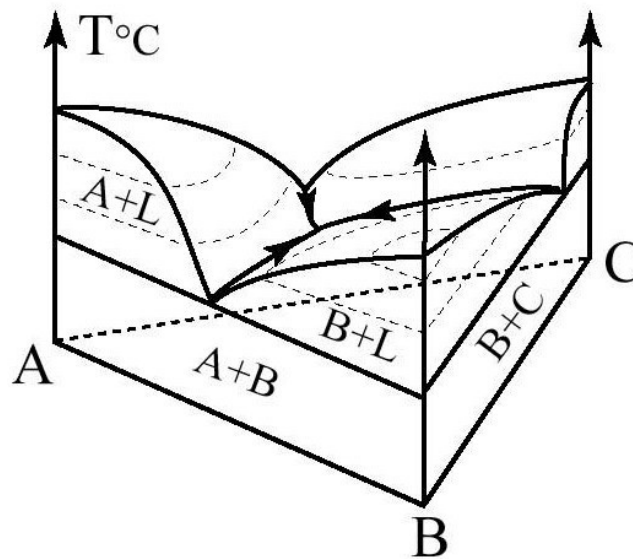
Fusion partielle et contextes géodynamiques

ANNEXE 7 : FUSION PARTIELLE DU MANTEAU ET COMPOTEMENT DES MINERAUX : DIAGRAMMES BINAIRES

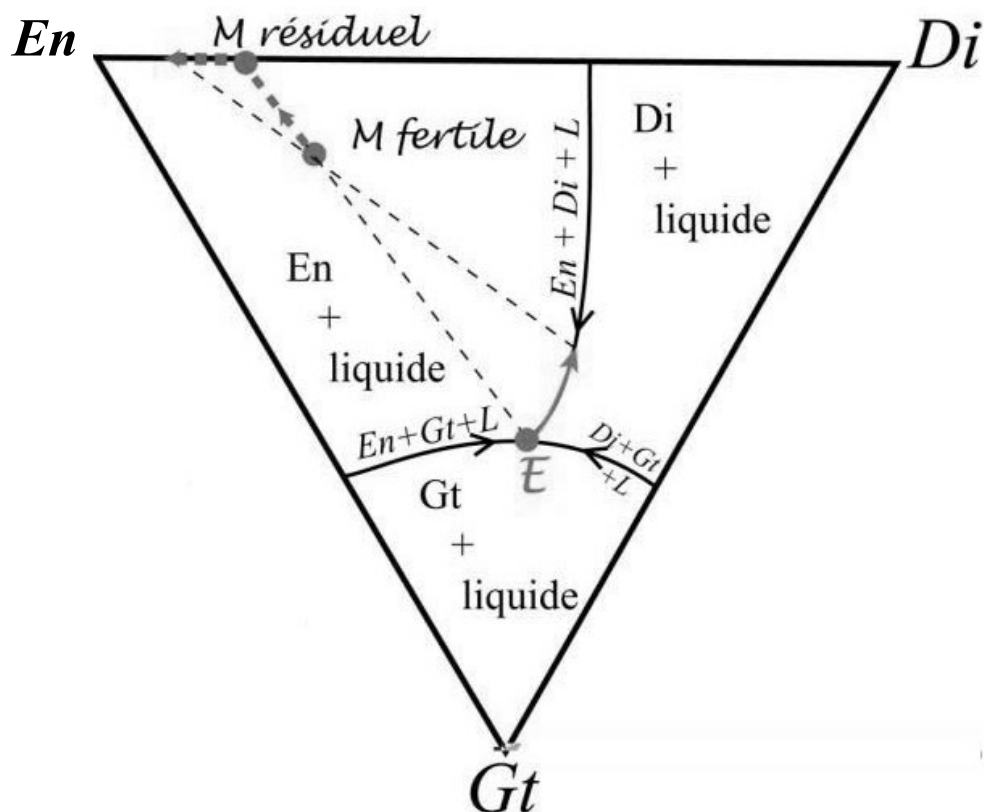


Exploitez ces deux diagrammes en augmentant la température et proposez la composition des premiers liquides puis des liquides successifs et des solides résiduels

ANNEXE 8 : FUSION PARTIELLE DU MANTEAU ET COMPORTEMENT DES MINÉRAUX : DIAGRAMMES TERNAIRES

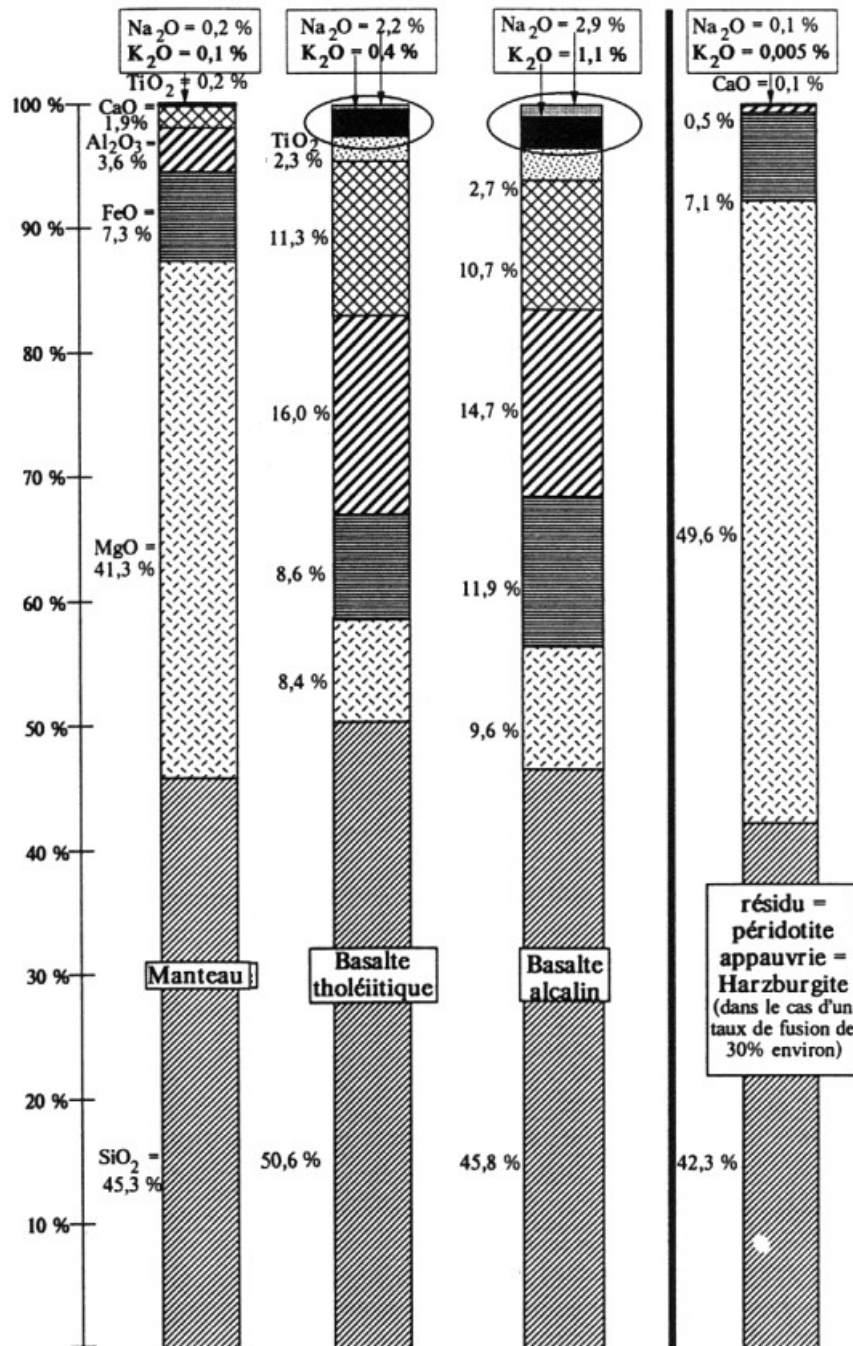


Principe général du diagramme ternaire à eutectique



Idem avec un exemple concret d'une péridotite. L'ensemble a été projeté sur le plan du solidus et on négligera le comportement de l'olivine qui est le minéral le plus abondant et réfractaire. Discutez quels minéraux fondent en premier puis disparaissent. Ce diagramme permet également d'évaluer le taux de fusion selon la « règle du levier » en mesurant le rapport entre le segment du liquide MfL et celui des quantités totales MrL .

ANNEXE 9 : FUSION PARTIELLE DU MANTEAU ET ELEMENTS / NOTION DE COMPATIBILITE



Remarquez le comportement des éléments alcalins et du magnésium. Conclusion ?

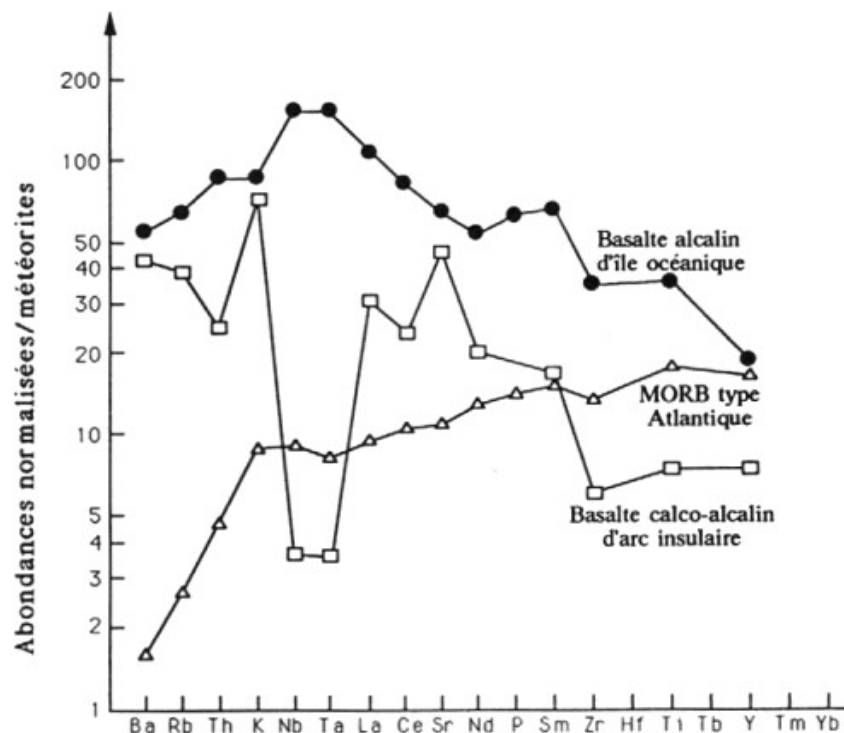
On définit le coefficient de partage d'un élément X : $[X]_{\text{dans le solide initial}} / [X]_{\text{dans le liquide}}$

Si ce coefficient est $\gg 1$, l'élément est dit compatible (avec la structure cristalline)

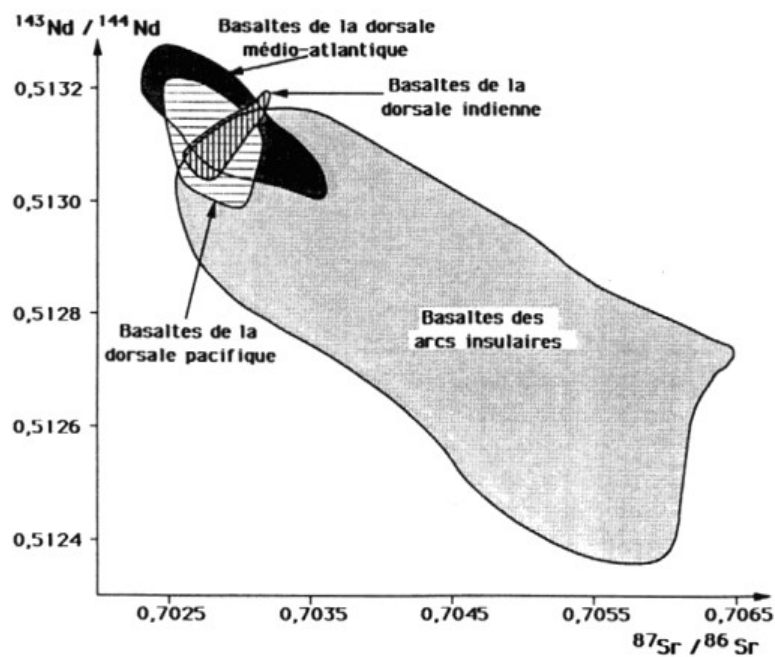
Ceci permet de calculer le taux de fusion selon la formule :

$$Tf = \frac{[\text{élément X}]_{\text{solide initial}} - [\text{élément X}]_{\text{solide résiduel}}}{[\text{élément X}]_{\text{liquide}} - [\text{élément X}]_{\text{solide résiduel}}} \times 100$$

ENCART ENS / G2E : UTILISATION DES ELEMENTS TRACES ET DES ISOTOPES ET SOURCE DES MAGMAS



Abondance des éléments-traces pour les tholéiites (MORB), les basaltes alcalins des îles (OIB) et les basaltes calco-alcalins des arcs insulaires (Spiderdiagram)



Variations isotopiques de Nd et Sr des basaltes des dorsales comparées à celles des basaltes des arcs insulaires