

Chapitre 2

Les processus fondamentaux du magmatisme

2. Des magmas primaires aux magmas différenciés

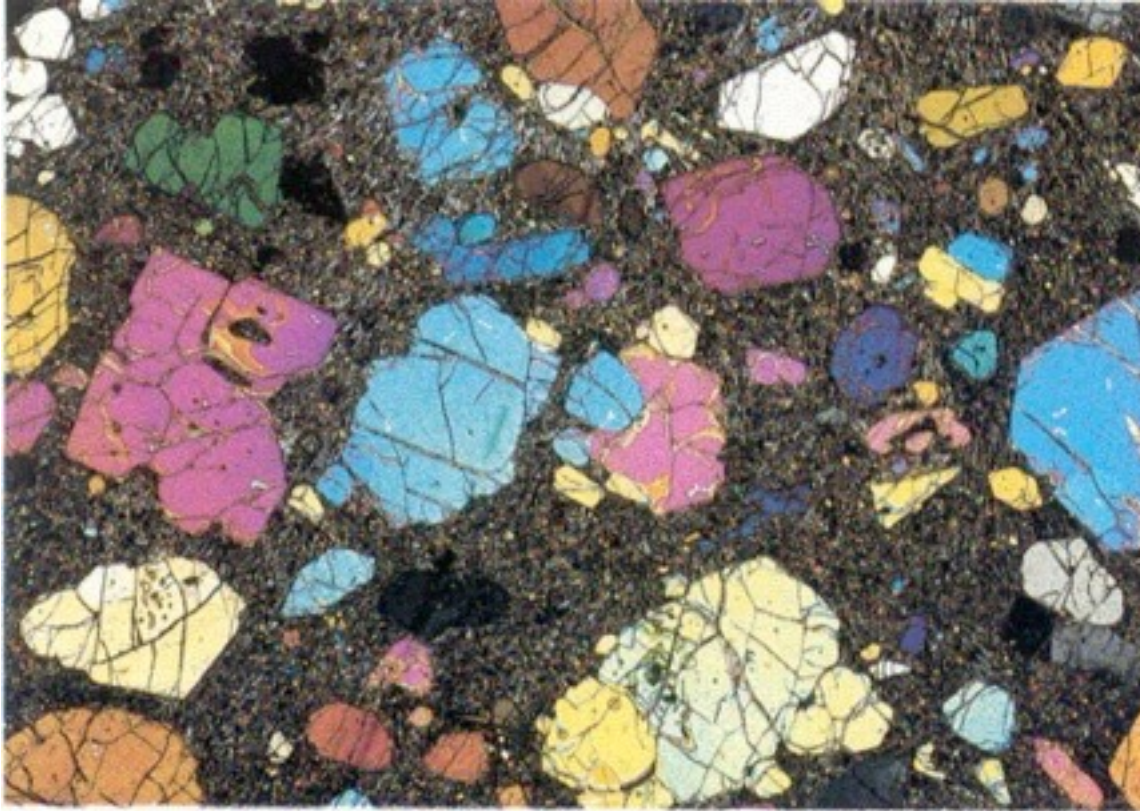
2.1. Cristallisation fractionnée et différenciation magmatique

a) Donnée d'observation : lames minces et affleurements

exemples de lames minces

Lame 1

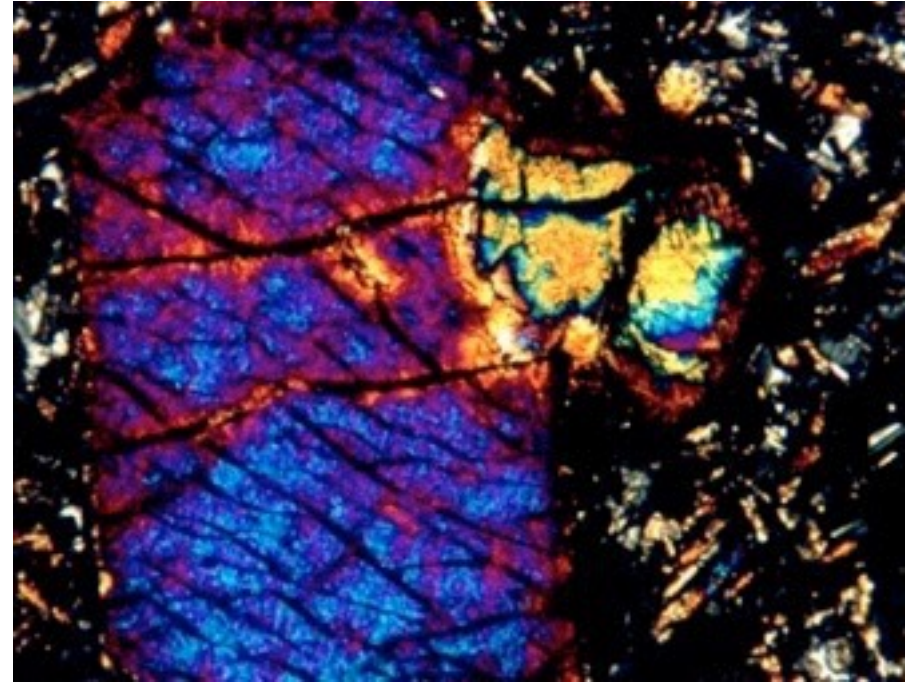
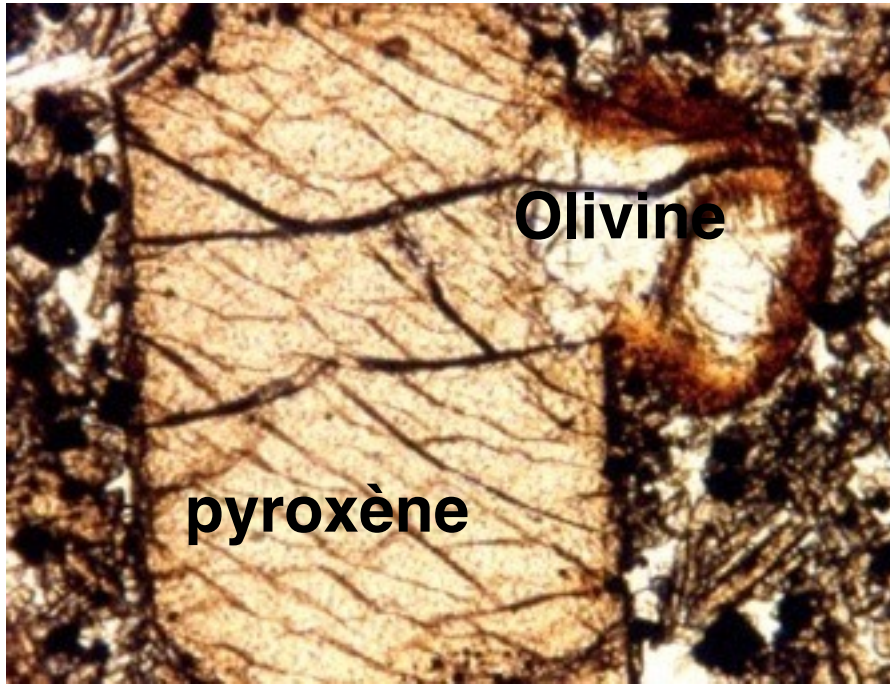
planet-terre.ens-lyon.fr



Basalte alcalin, coulée de la Vache, Lassolas. MO, LPA

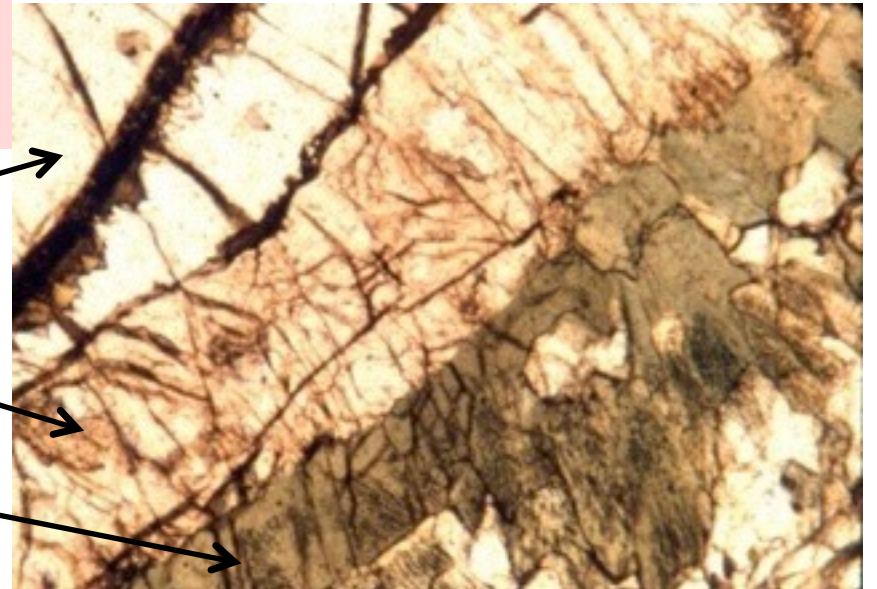
Olivines dans une pâte contenant plagioclases et pyroxènes : les olivines ont donc cristallisé avant l'éruption

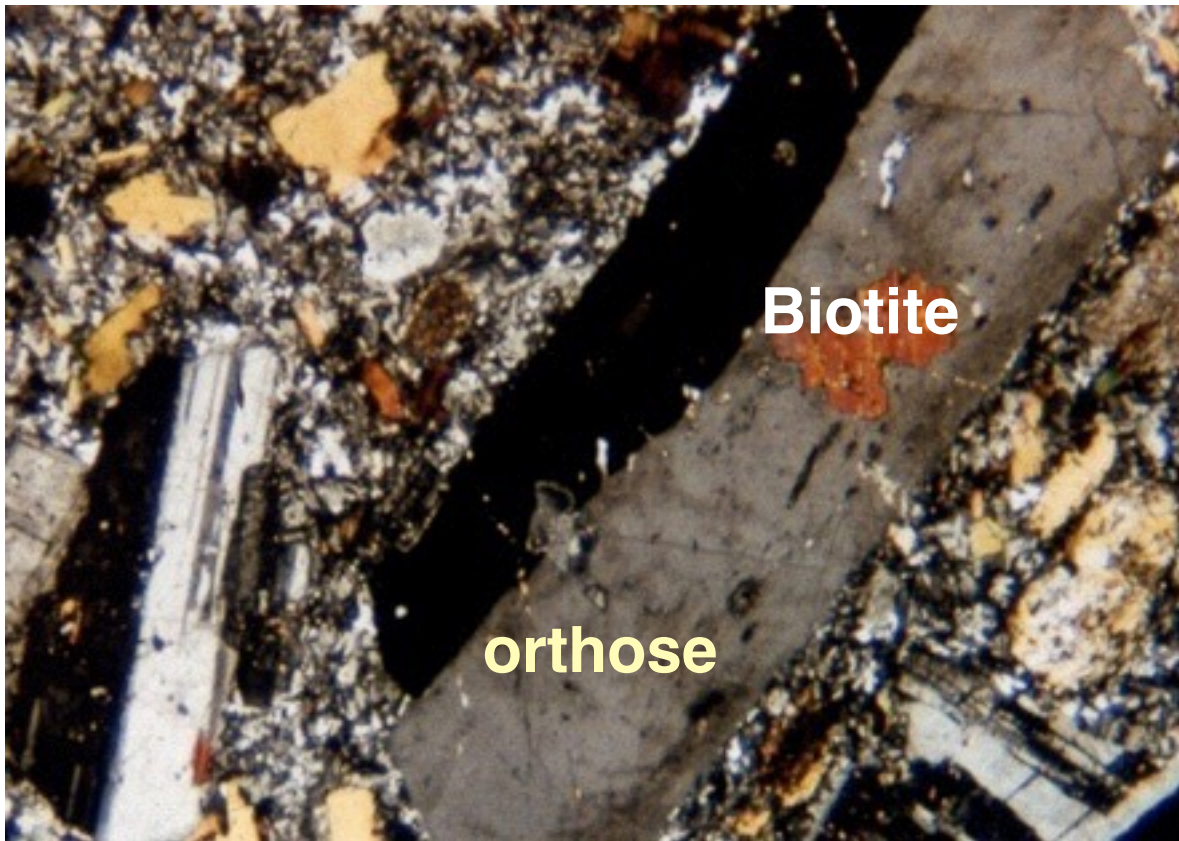
Lame 2 - Olivine incluse dans un pyroxène



Lame 3 - Ordre de cristallisation : olivine puis pyroxène puis amphibole

Olivine « blindée »
par un pyroxène,
lui-même entouré
d'amphibole





Zonation minérale dans un plagioclase

L'angle d'extinction des plagioclases dépend des proportions Ca / Na donc la chimie du magma a évolué au cours de la cristallisation.

exemples d'affleurements

Évolution des volcans de la chaîne des Puys

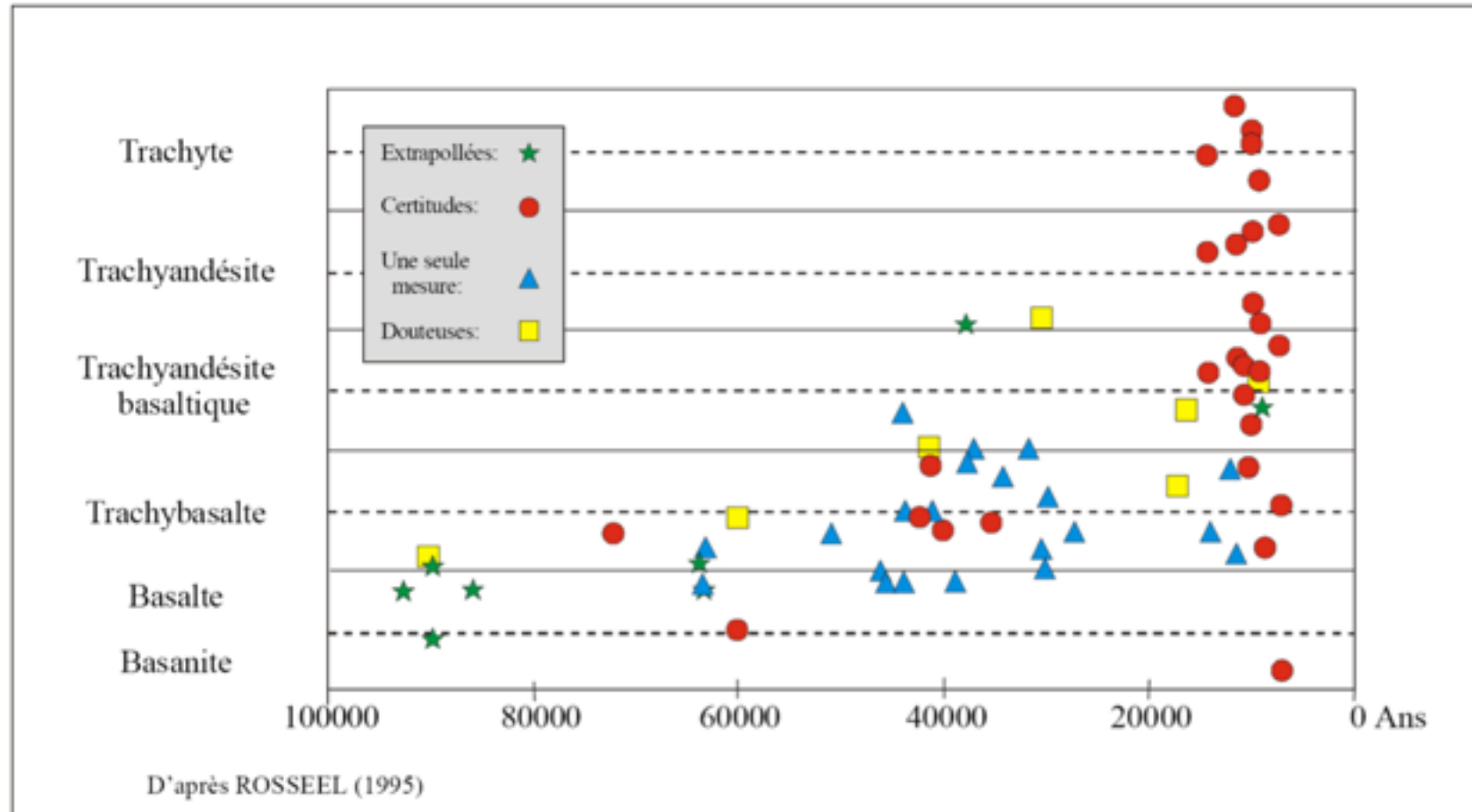
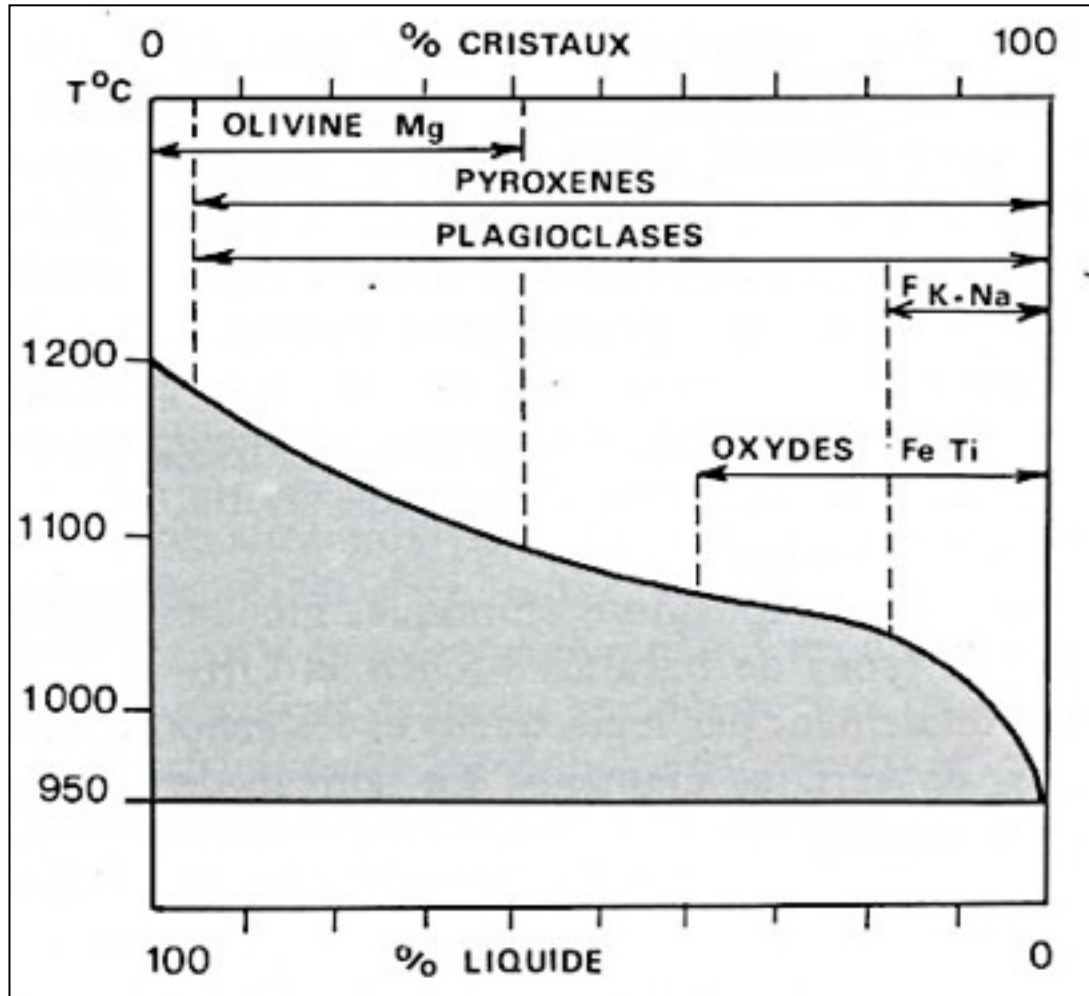


Figure 11 – Diagramme montrant l'ensemble des âges des produits volcaniques de la Chaîne des Puys en relation avec leur chimisme (d'après Rosseel, 1996 et de Goër, 1997). Un examen attentif des périodes d'activité montre clairement l'alternance de périodes d'activité et de périodes d'arrêt du volcanisme. Certaines de ces périodes de repos sont plus longues que celle qui nous sépare des dernières éruptions volcaniques (7000 ans). Ceci suggère qu'une reprise de l'activité volcanique est possible. Il est cependant impossible de savoir quand : dans 2 mois ou dans 2000 ans. Par contre l'évolution chimique et volcanologique passée des éruptions de la Chaîne des Puys indiquent une évolution marquée vers des produits de plus en plus riches en silice et par conséquent un dynamisme de plus en plus explosif.

Ordre d'apparition des minéraux



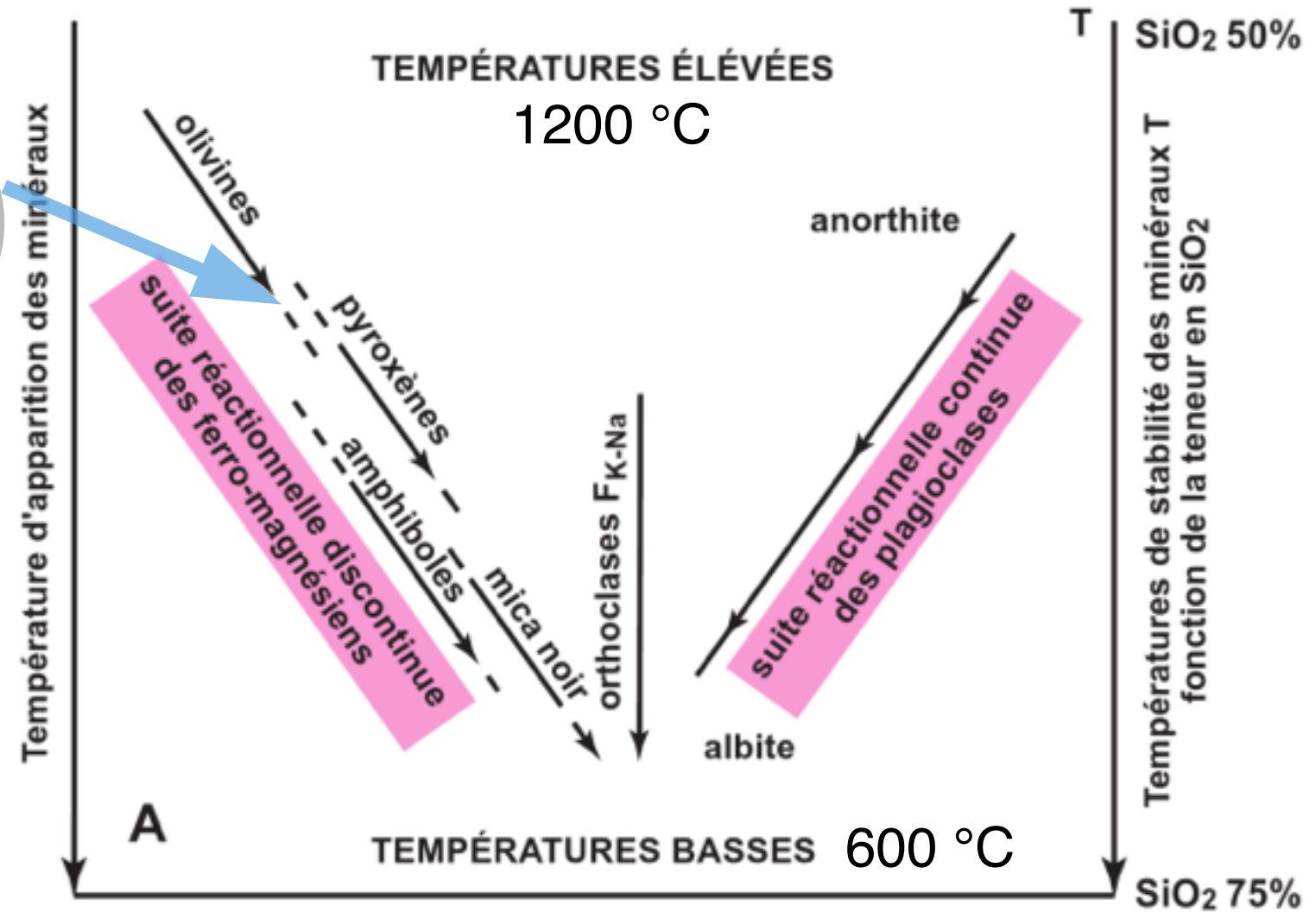
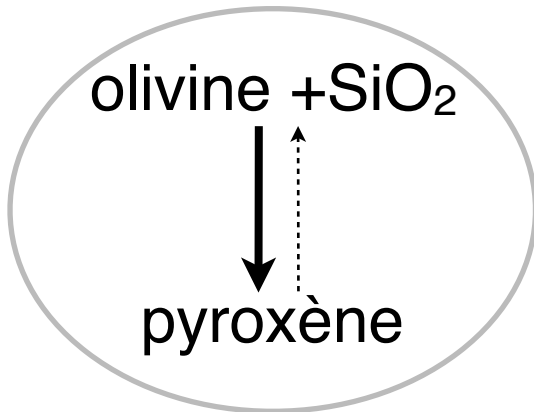
Ordre d'apparition des minéraux lors de la cristallisation lente d'une coulée de basalte d'Hawaï.

Le pourcentage de liquide est apprécié d'après celui des verres des laves solidifiées. A 900 °C, la lave est solide.

2.1. Cristallisation fractionnée et différenciation magmatique

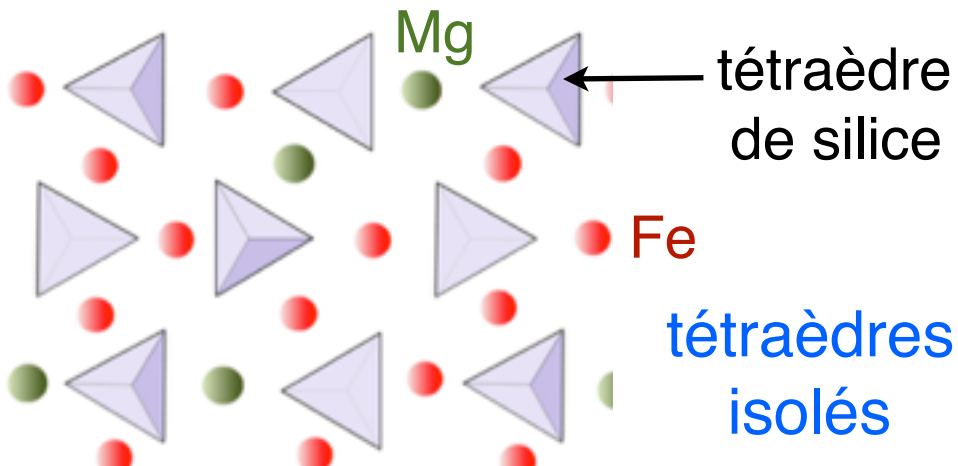
b) Ordre de cristallisation et compatibilité

Suite réactionnelle de Bowen

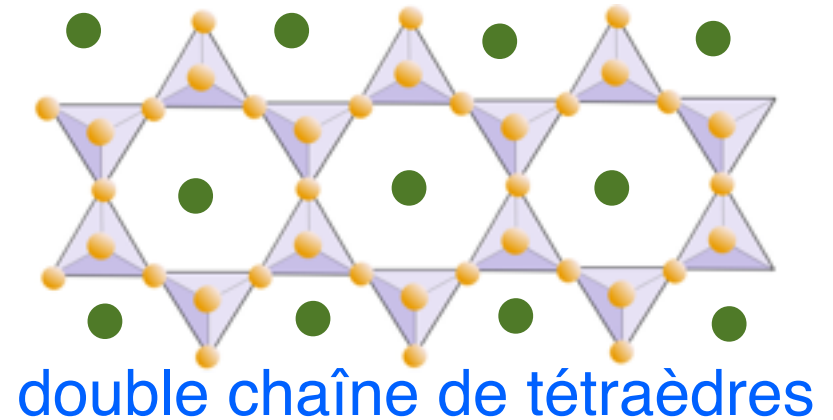


série discontinue des ferro-magnésiens

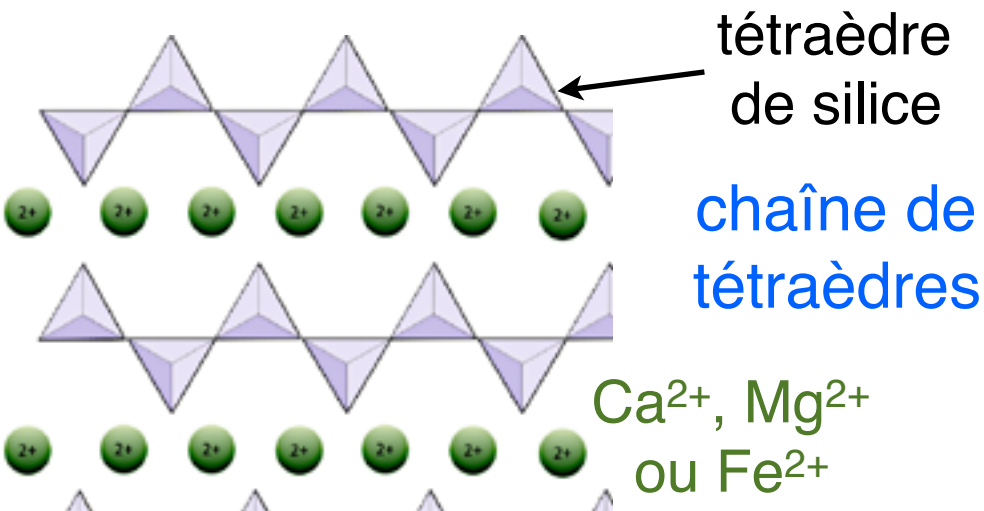
Quelques silicates pour les pros



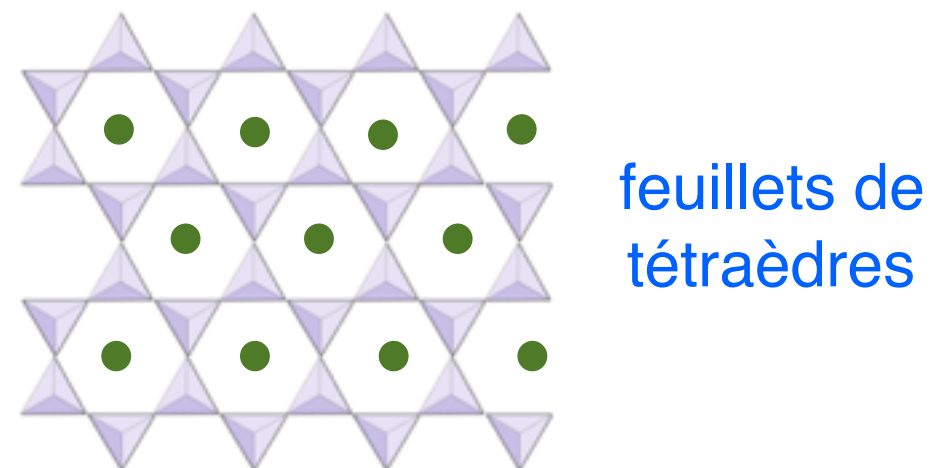
Olivine (Mg, Fe)SiO₄



Amphibole
(Ca, Na, Mg, Fe)Si₄O₁₁OH



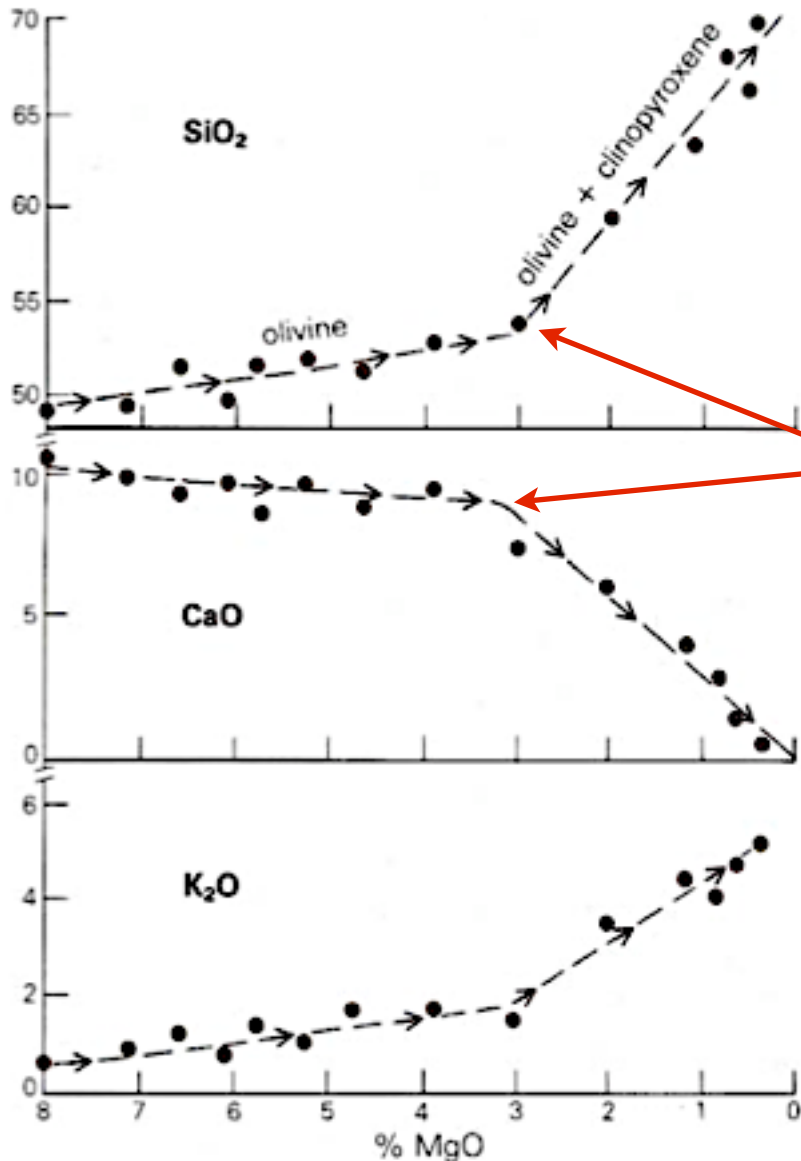
Pyroxène (Ca, Mg, Fe)Si₂O₆



Biotite
K(Mg, Fe)₃(OH F)₂Si₃AlO₁₀

Diagrammes de Harker

Evolution chimique du magma lors de la cristallisation : suite de roches volcaniques cogénétiques résultant de la cristallisation d'olivine, clinopyroxène et magnétite.

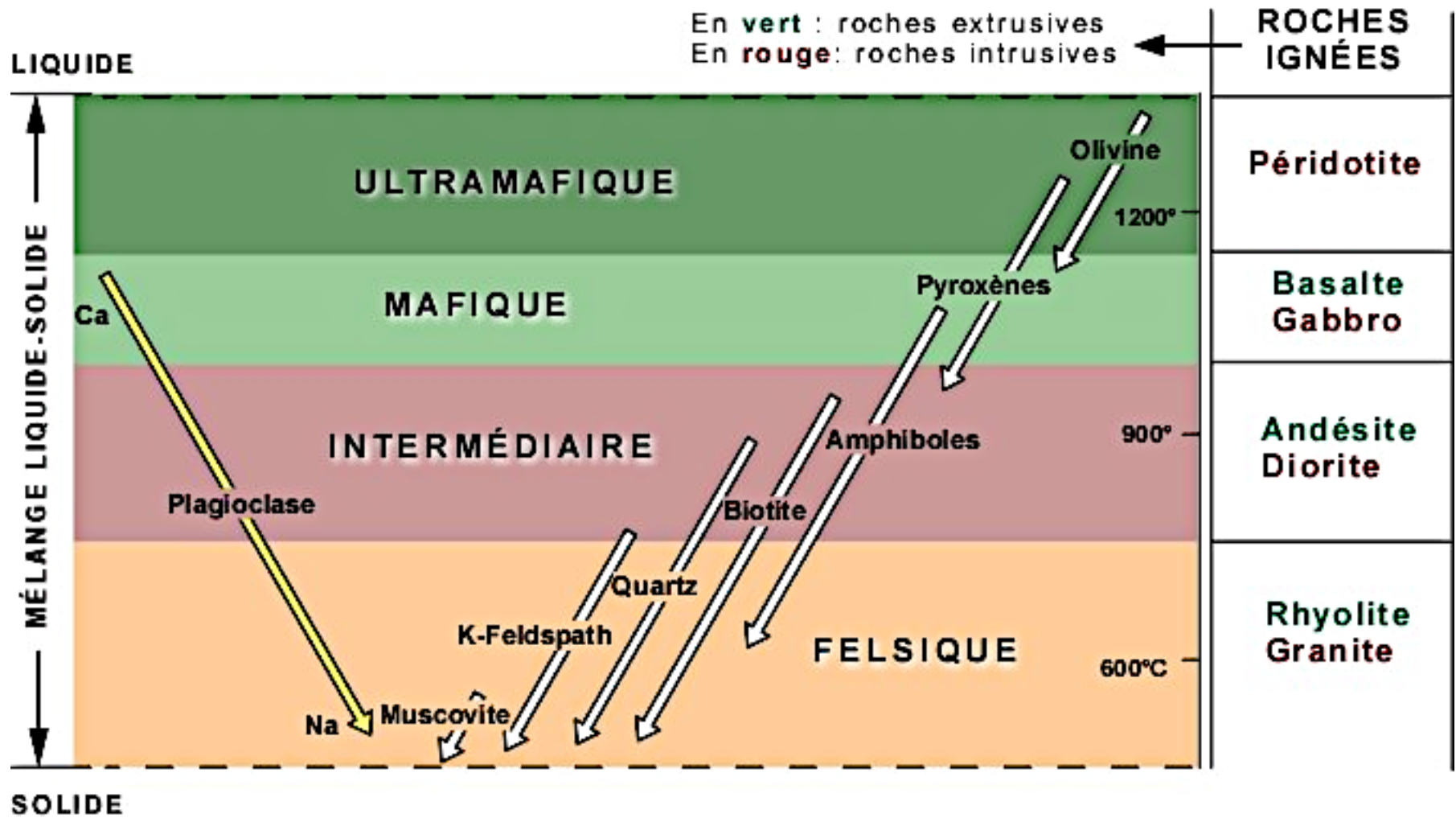


rupture de pente
interprétée comme
l'apparition d'un nouveau
minéral qui cristallise et
modifie la chimie du
magma restant

Globalement : le taux de Si et
des alcalins augmente alors
que les quantités de Fe, Mg et
Ca diminuent

série continue des plagioclases

Série de Bowen



Lien avec le TP : exercice 6

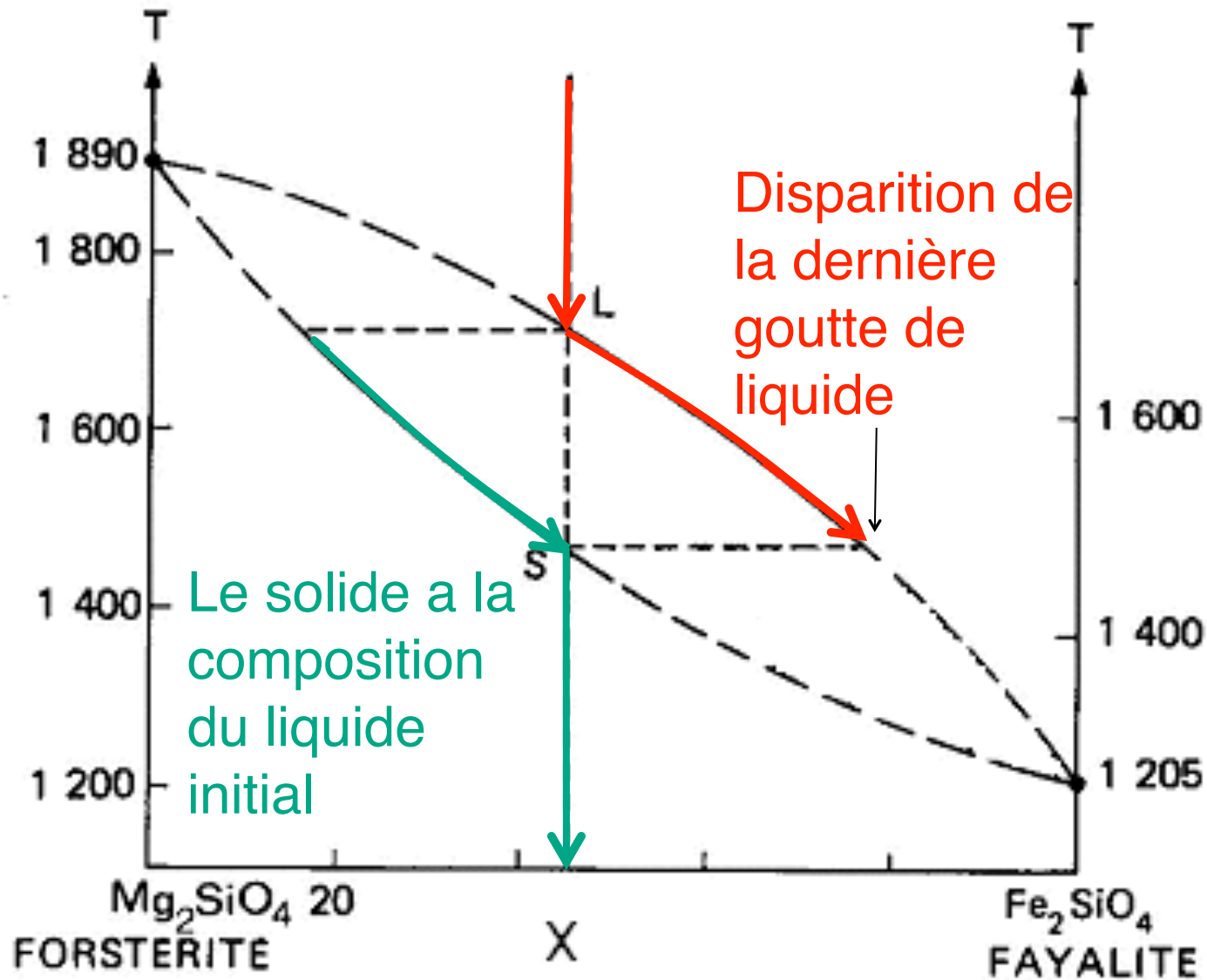
Exercice 6

1. Roche volcanique à texture microlithique. Phénocristal + microlithes + verre.
2. $\text{Ca}_{0.6}\text{Na}_{0.4}\text{Al}_{1.6}\text{Si}_{2.4}\text{O}_8$ ou $\text{Ca}_6\text{Na}_4\text{Al}_{16}\text{Si}_{24}\text{O}_{80}$
3. Il s'agit de cristaux miscibles : le mélange fondu conduit à la formation de cristaux de même structure et de composition intermédiaire.
4. Le cristal est zoné. Ceci traduit une évolution au cours du temps sans rééquilibrage entre le cristal et le liquide. Le cœur plus calcique est formé vers 1450°C . La cristallisation se poursuit au cours du refroidissement en surface permettant l'agrandissement du cristal. La cristallisation se fait à partir d'un liquide de plus en plus riche en Ab. La périphérie est cristallisée vers 1150°C .
5. Si l'on suppose que le cristal a commencé à se former à partir du liquide initial, cela correspond à un liquide An44.
6. Le grand cristal cesse de croître et les microlithes sont formés rapidement lors de la trempe due à l'arrivée en surface. Ils ont la composition donnée par le solidus correspondant à la composition du liquide à ce moment, qui est également en équilibre avec celle de la périphérie du grand cristal. Ce liquide est plus albitique que le liquide de départ du fait de l'isolement de fractions plus anorthitiques dans le cœur du cristal.

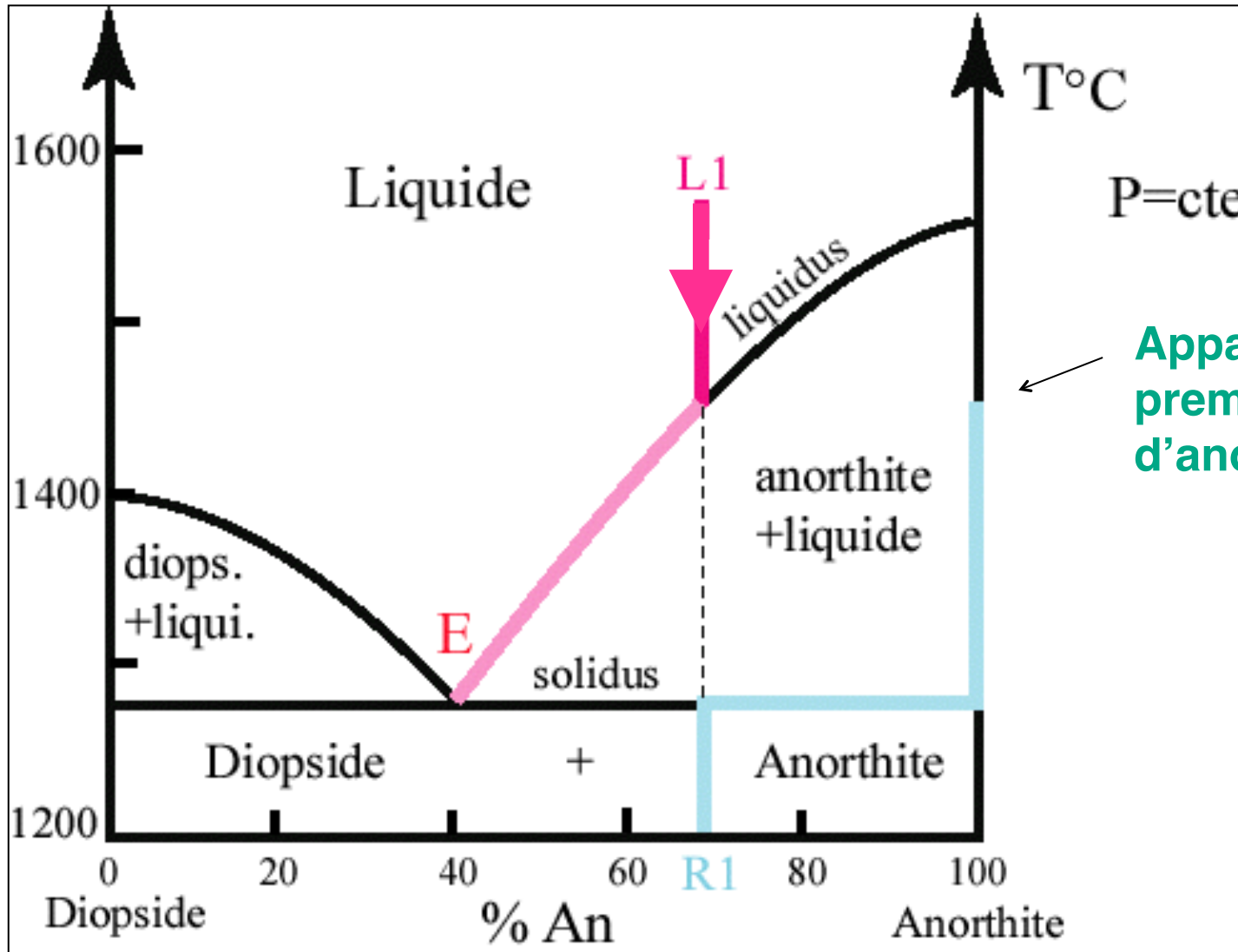
2.1. Cristallisation fractionnée et différenciation magmatique

c) Expériences de cristallisation

Cristallisation fractionnée dans un diagramme binaire



Cristallisation fractionnée dans un diagramme binaire avec eutectique



(inverser le sens de la flèche sous $L1$).

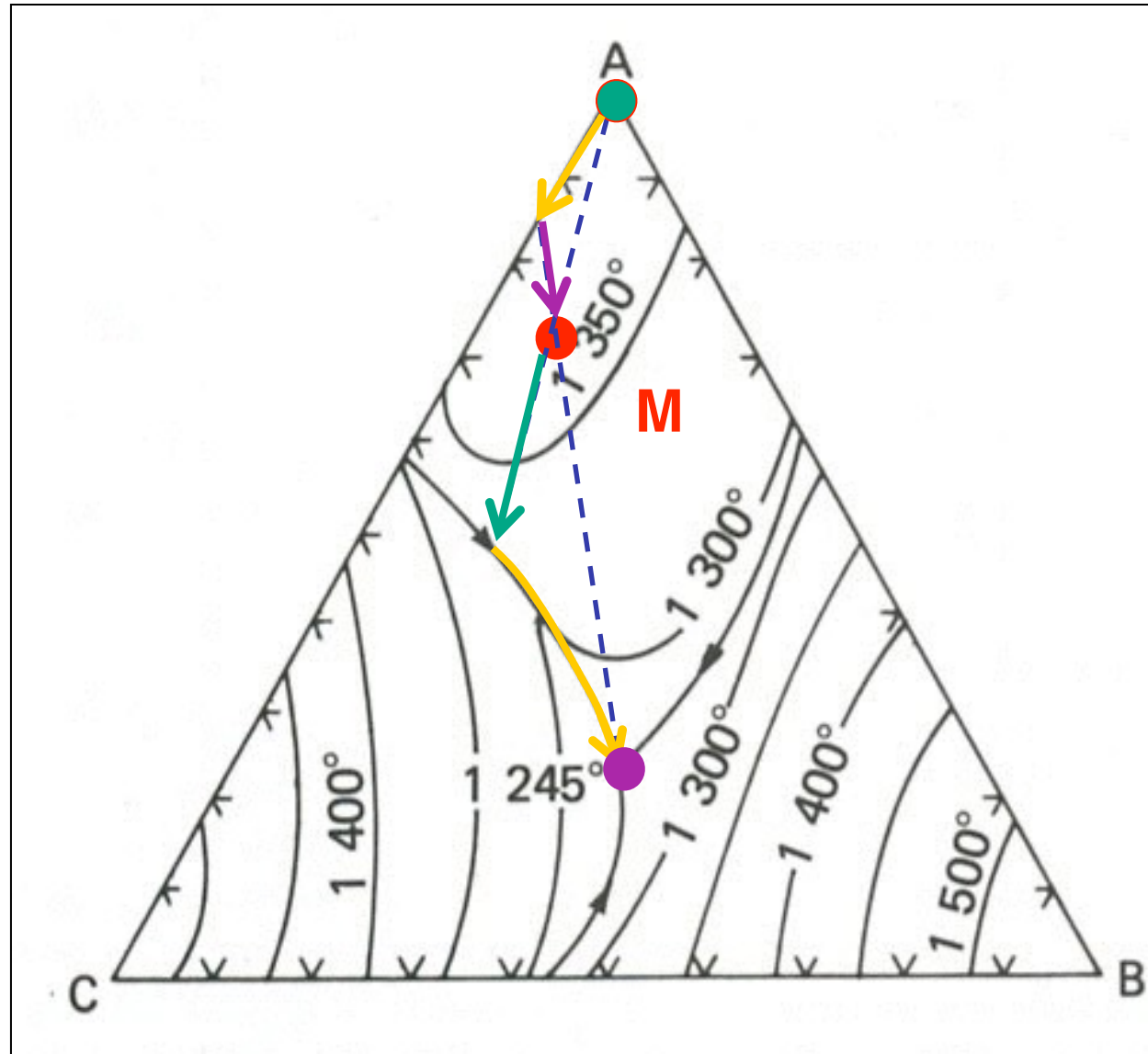
Cristallisation d'un mélange ternaire

A cristallise, la composition du liquide résiduel évolue en « descendant » la surface liquidus jusqu'à la ligne cotectique A+C+liquide

A + C cristallisent, la composition du liquide résiduel suit la ligne cotectique jusqu'au puits eutectique

A + B + C cristallisent, le liquide a la composition de l'eutectique, jusqu'à ce qu'il n'en reste plus

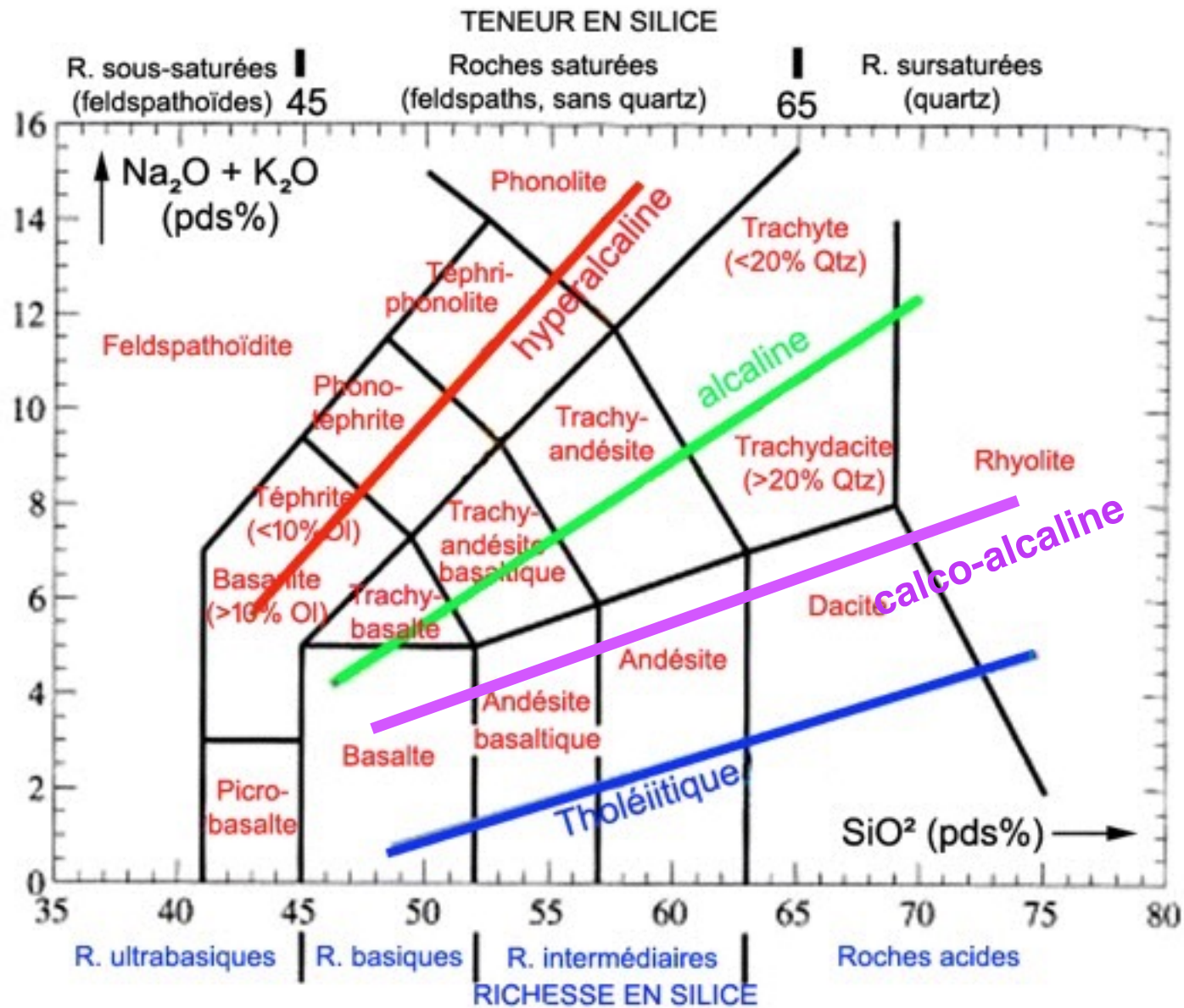
A la fin, le solide a la même composition M que le liquide initial



2.1. Cristallisation fractionnée et différenciation magmatique

d) Différenciation et diagramme de Harker

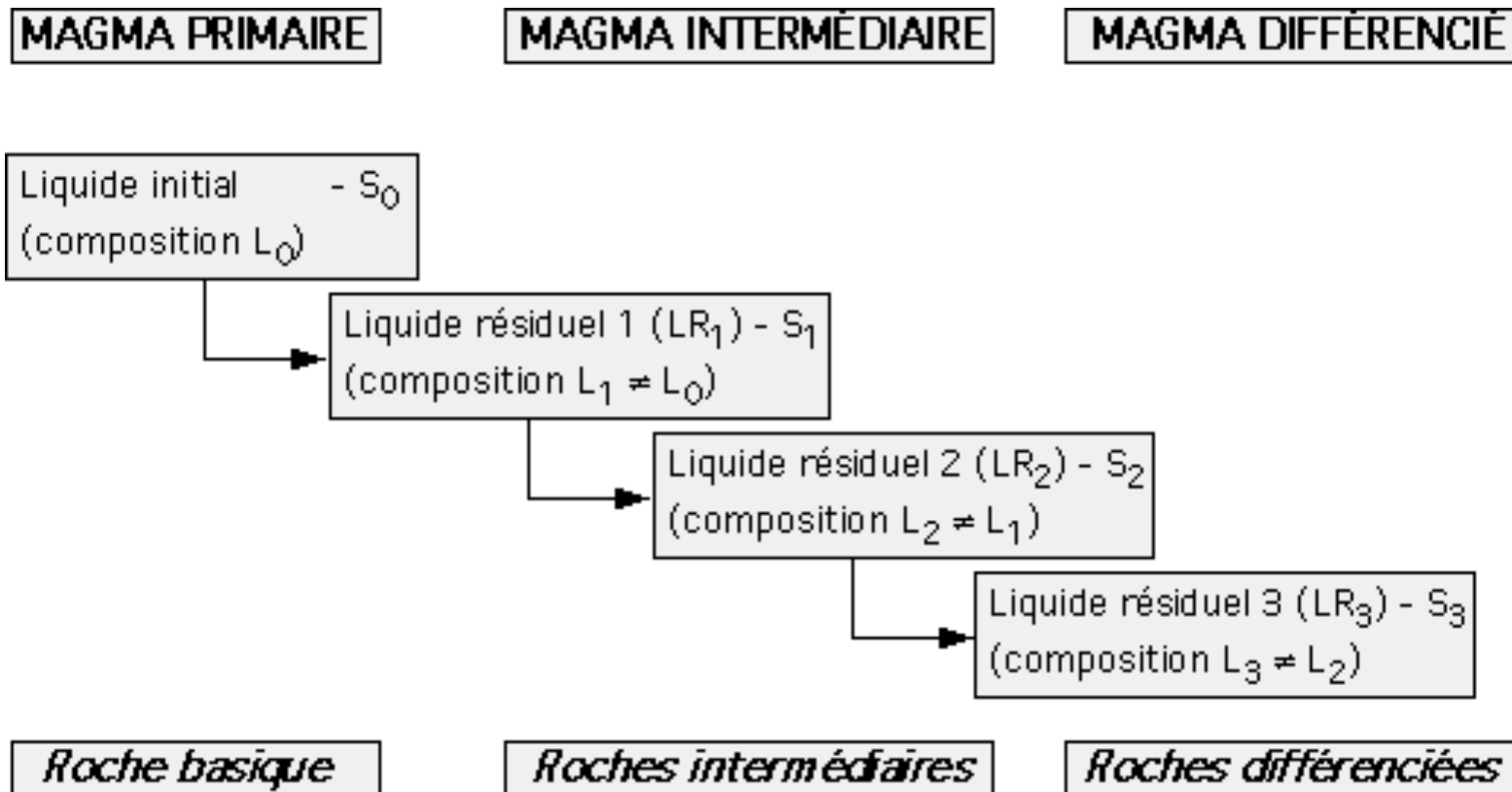
Les séries en diagramme de Harker (TAS)



(diagramme alcalin-silice ou TAS (=Total Alkali vs. silica))

(D'après "Géologie, roches et géochimie" (2011). A. Pruvost et C. Langlois. Dunod. ed.)

Evolution par cristallisation fractionnée

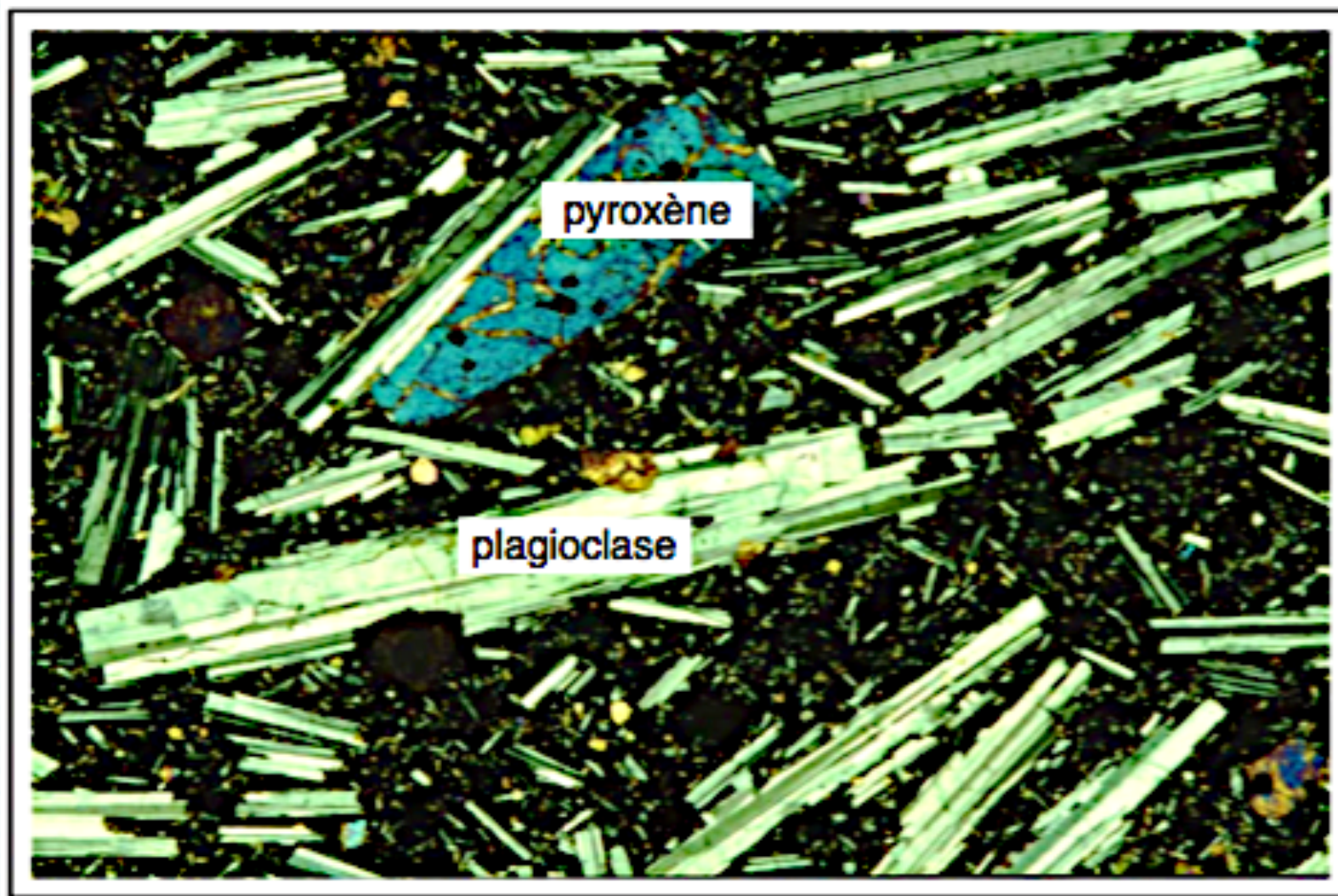


Différenciation magmatique : tout processus permettant à un magma (primaire) d'évoluer vers un magma différent.

Nécessité d'une séparation cristaux / phase liquide par sédimentation ou vidange partielle (éruption, migration du liquide)

Lien avec le TP : exercice 9

Exercice 9



Document 2 (x 15)

- 1) Décrire cette roche. De quelle roche du document 1 peut-on la rapprocher ? Trouver l'échantillon parmi les roches proposées.

Exercice 9

Une enclave de structure grenue a été trouvée dans une bombe volcanique d'un des puys de la chaîne des Puys. Son analyse chimique est présentée dans le document 3, analyse 1.

2) De quelle roche peut-il s'agir ? Argumenter.

On émet l'hypothèse que la roche CP1 provient de la fusion partielle d'une roche identique à cette enclave.

3) Expliquer le phénomène de fusion partielle.

4) Calculer le taux de fusion partielle en justifiant vos choix. Discuter cette valeur.

document 3

	1	2
SiO ₂	45.19	38.05
TiO ₂	0.71	0.00
Al ₂ O ₃	3.54	0.11
Cr ₂ O ₃	0.43	0.00
FeO	8.46	20.54
MnO	0.14	0.56
MgO	37.49	40.52
CaO	3.08	0.22
Na ₂ O	0.57	0.00
K ₂ O	0.13	0.00
NiO	0.20	0.00
P ₂ O ₅	0.06	0.00
total	100.00	100.00

5) Construire schématiquement un diagramme alcalins / silice ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} = f(\text{SiO}_2)$). Placer les points représentatifs des roches CP1 à CP7. Interpréter.

Un minéral M de la roche CP1 a été analysé : document 3 analyse 2.

6) De quel minéral s'agit-il ?

On suppose que 10% d'un magma de composition CP1 cristallise sous forme du minéral M et s'en sépare.

7) Argumenter cette hypothèse.

8) Calculer la teneur en silice du magma résultant. Comparer à la composition chimique de CP2 et interpréter.

Exercice 9

1) L'observation de cette lame mince de roche, en lumière polarisée et analysée, révèle une texture microlitique. C'est donc d'une roche volcanique (lave).

- présence de nombreux phénocristaux automorphes (rectangulaires) de plagioclases (taille de 1 à 5 mm) reconnaissables à leur macle polysynthétique noir et blanc

- un phénocristal de pyroxène

La pâte (mésostase) contient des microlithes de plagioclases et de pyroxènes ainsi que du verre. Il s'agit d'un basalte porphyrique, qui peut être rapproché de la lave CP1 (ou CP2) du document 1.

2) Roche grenue très pauvre en silice (45%) et quasiment exclusivement constituée de silice + Fe + Mg, avec un peu de Ca et Al. Il pourrait s'agir d'une péridotite, avec des olivines $(Mg,Fe)_2SiO_4$.

3) Les roches magmatiques ne se comportent pas comme un corps pur et ne fondent pas à une température unique. Elles commencent à fondre (fusion partielle) lorsqu'elles atteignent leur solidus et le taux de fusion augmente jusqu'au liquidus ($t_{\text{solidus}} < t_{\text{liquidus}}$). Dans le domaine situé entre le liquidus et le solidus, coexistent une phase liquide et une phase solide de compositions chimiques différentes. Certains éléments chimiques compatibles restent dans la phase solide alors que d'autres magmatophiles (incompatibles), migrent dans la phase liquide. Ce phénomène de fusion partielle explique la formation de magmas différents selon la roche initiale et le taux de fusion partielle (0 - 20 %).

Exercice 9

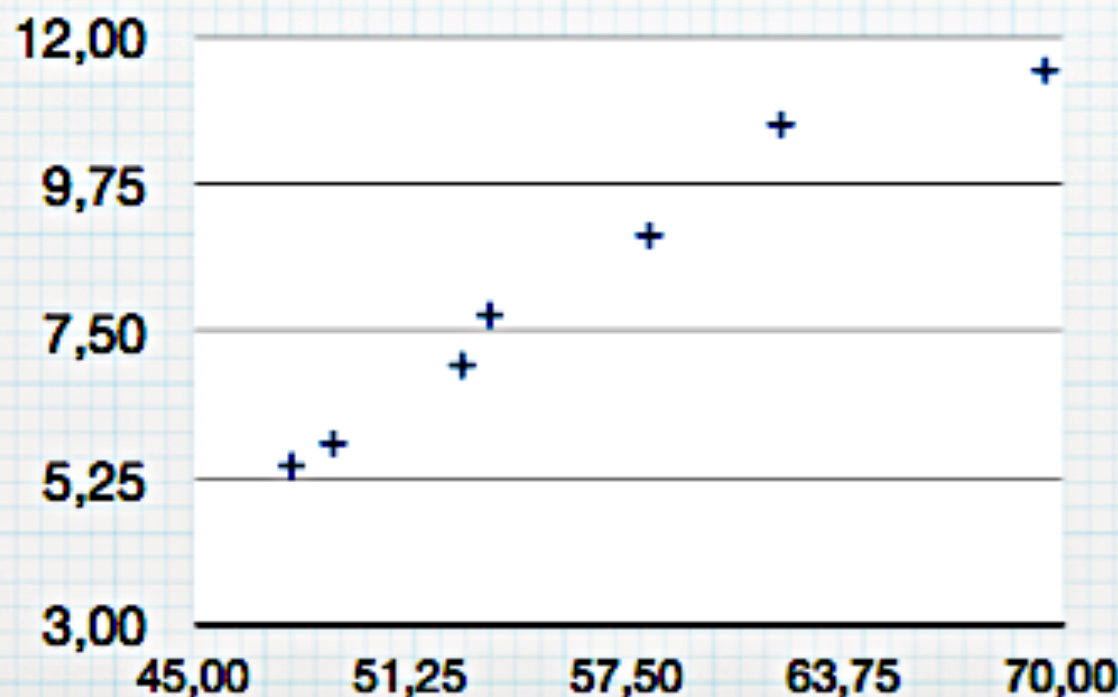
4) Le potassium est très magmatophile et passe donc très facilement dans la phase liquide. La péridotite contient 0,13 % de K_2O alors que la lave CP1 en contient 1,70 %. On fait l'hypothèse que tout le potassium est passé dans le magma.

donc : $0,13 = 1,70 \times T$ avec $T =$ taux de fusion partielle exprimée en %

soit : $T = 0,13 / 1,70 = 7,6 \%$

Valeur faible, compatible avec point chaud ou zone de subduction.

5) Enrichissement en silice et alcalins : témoin d'une différenciation. Notion de série magmatique.



Exercice 9

6) Le minéral (M) est un silicate relativement pauvre en silice, très riche en magnésium et aussi en fer. Il s'agit d'une olivine (parfois confondue avec un pyroxène), proche du pôle magnésien forstérite Mg_2SiO_4 .

7) L'olivine est un des premiers minéraux à cristalliser. Les basaltes les moins différenciés contiennent fréquemment de l'olivine (une teneur de 10 % est classiquement observée).

8) Il faut faire un bilan de matière.

Si 10 % d'olivine sont soustraits au magma de composition CP1, il vient :

$$100 \% \text{ CP1} = 10 \% \text{ olivine} + 90 \% \text{ magma 2}$$

$$\text{soit magma 2} = (\text{CP1} - 0,1 \text{ olivine}) / 0,9$$

pour la silice cela correspond à :

$$(47,79 - 3,81) / 0,9 = 43,98 / 0,9 = 48,87$$

Cette valeur est très proche de la teneur en silice (48,99 %) de CP2.

CP2 pourrait alors provenir d'une faible différenciation du magma CP1. L'hypothèse émise semble judicieuse en ce qui concerne la silice. Il faudrait en fait vérifier les autres équations correspondant à chacun des éléments chimiques.

2.2. Processus d'évolution magmatique

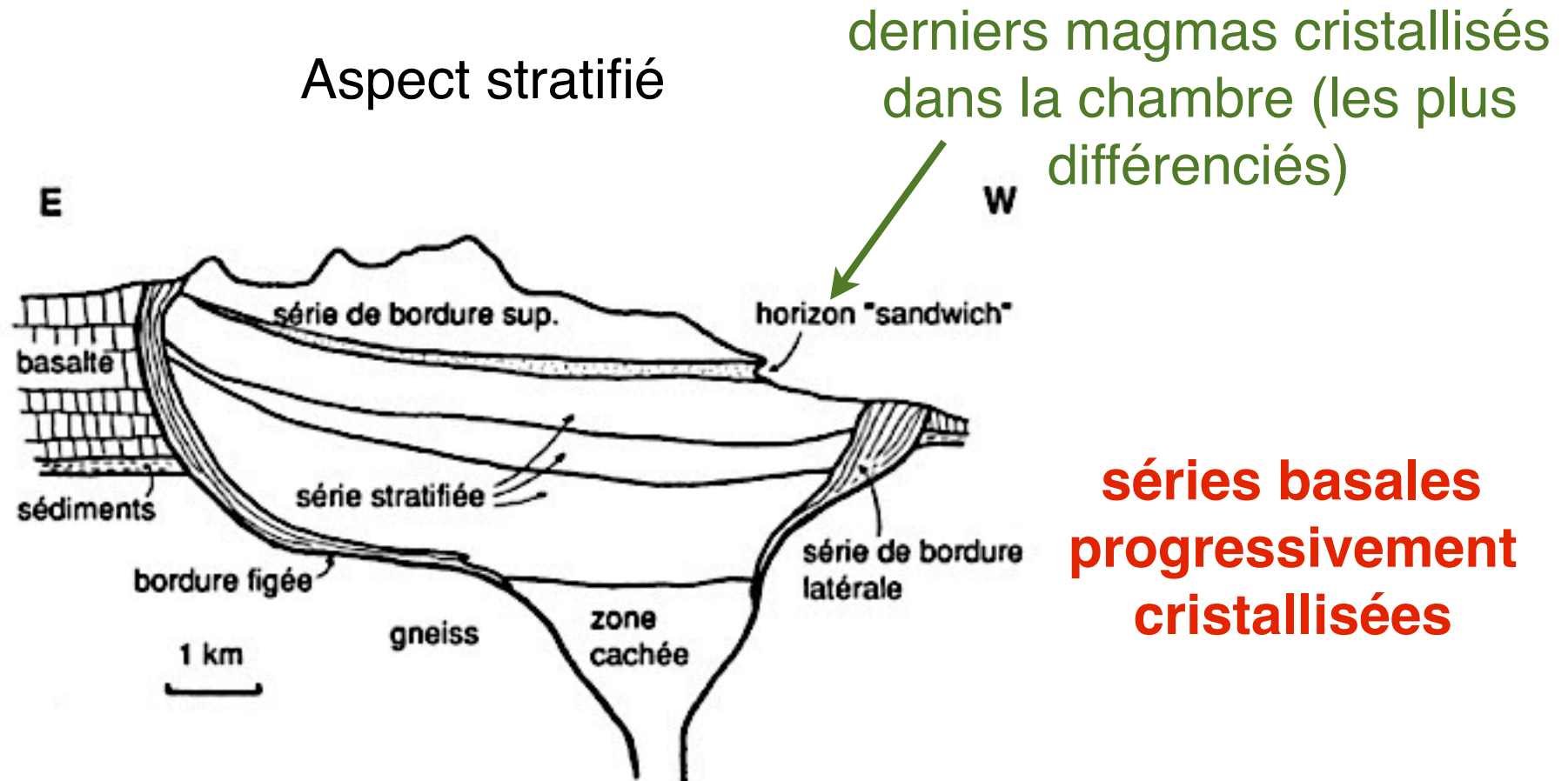
a) Effet de la sédimentation dans la chambre magmatique

Gabbros lités du Skaergaard

Chambre magmatique fossile du Groenland



Le Skaergaard, chambre magmatique fossile

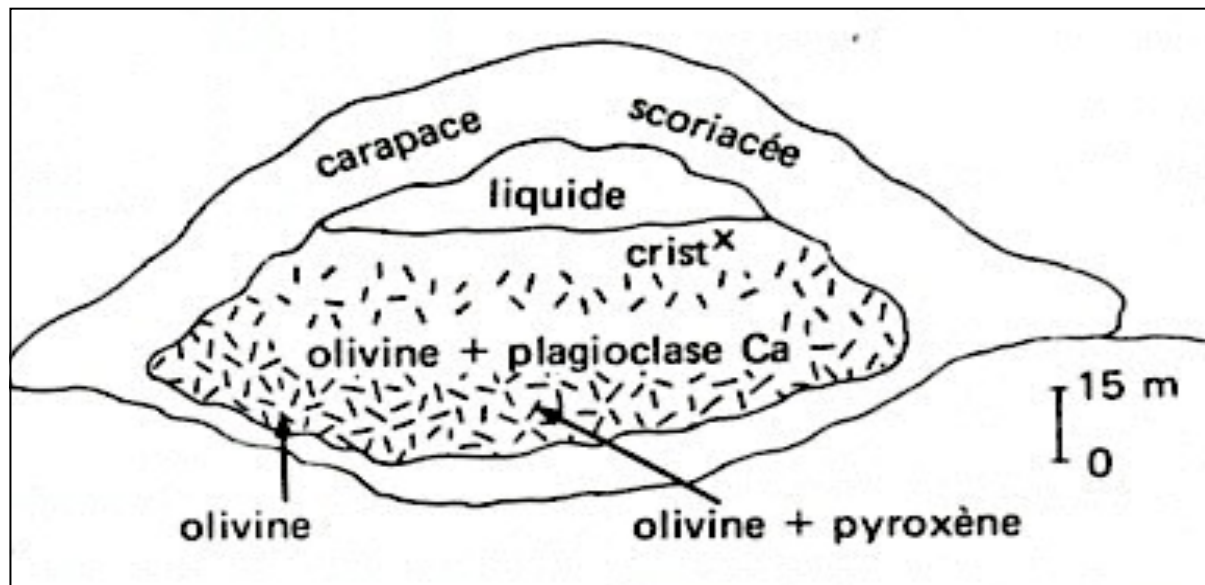
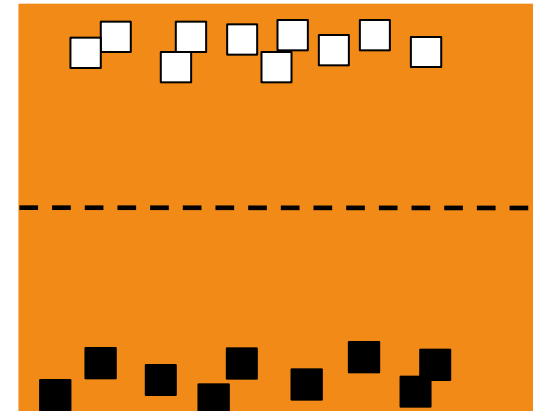
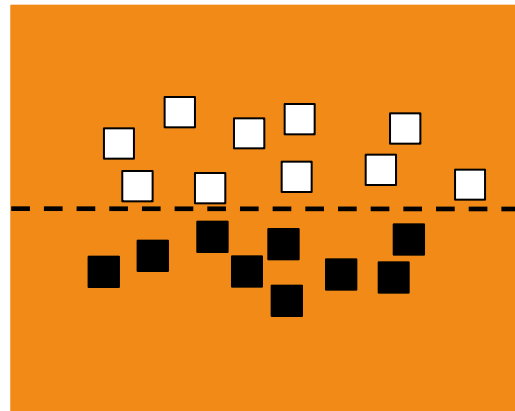
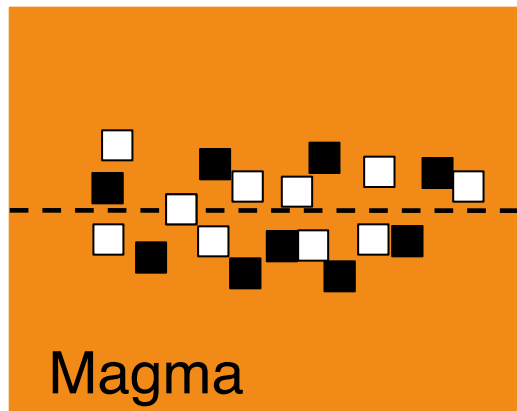


Le massif grenu du Skaergaard (Groenland), chambre magmatique fossile : coupe schématique E-W (vue vers le Sud)
(d'après McBIRNEY, 1993, modifié).

Phénomène de sédimentation dans la chambre magmatique

Effet de sédimentation des minéraux

Sédimentation de minéraux de densités différentes => apparition de lits de minéraux différents.



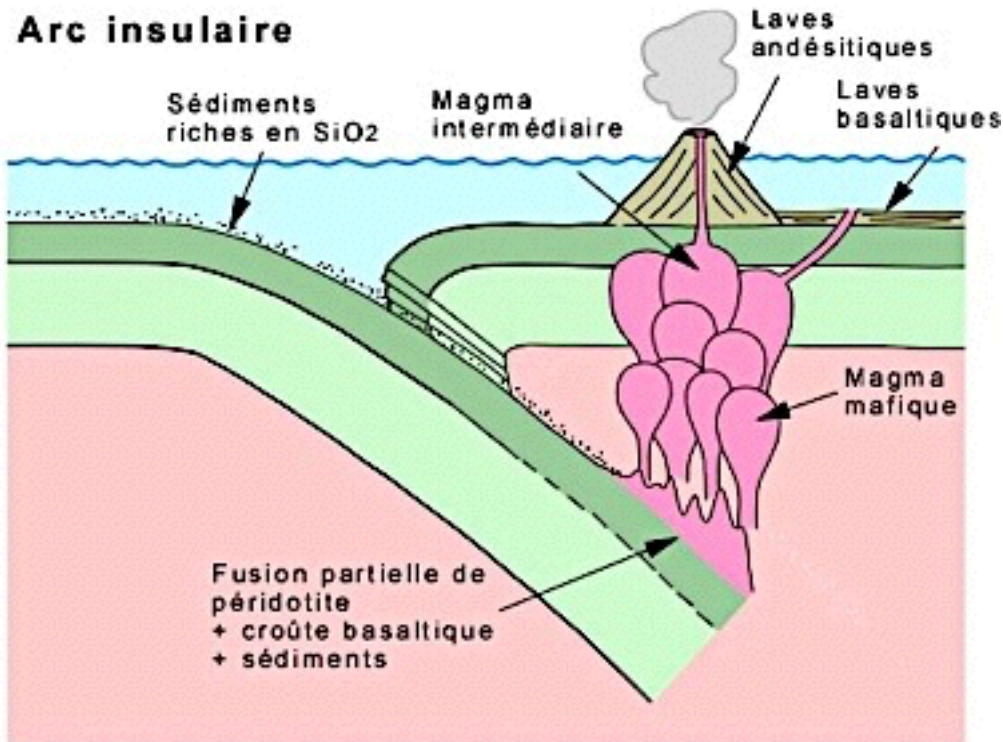
2.2. Processus d'évolution magmatique

b) Réinjection de magma dans la chambre

c) Mélange entre magmas

Contamination crustale

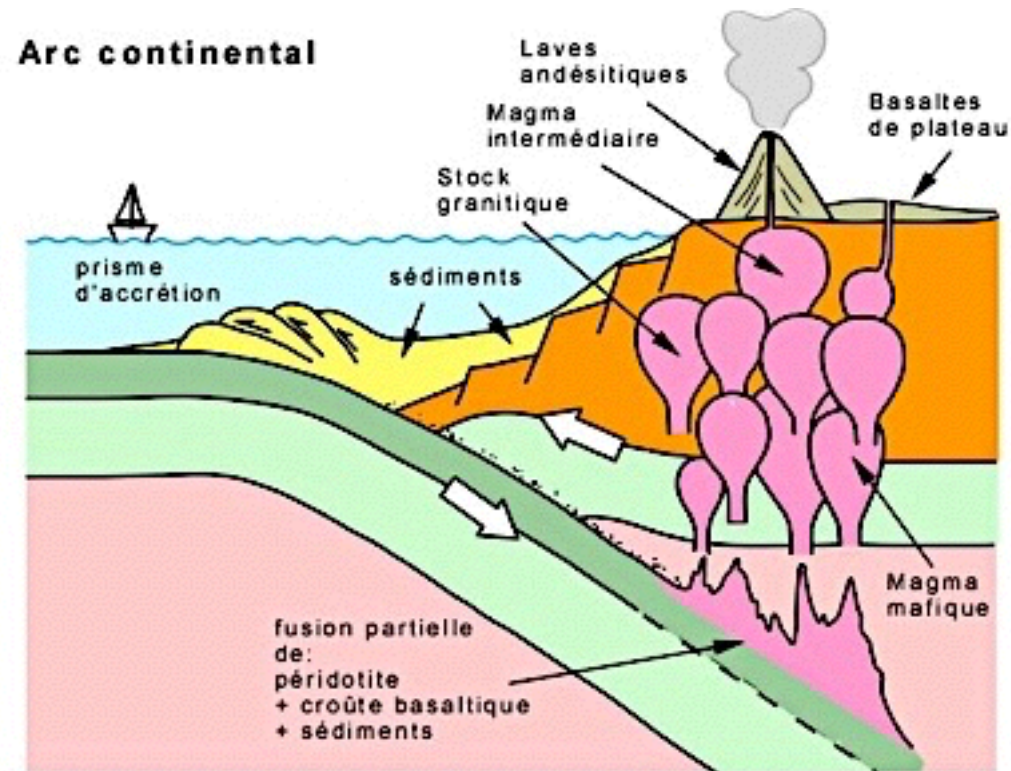
Arc insulaire



Zone de subduction entre 2 plaques océaniques

Le magma obtenu est riche en ferro-magnésiens issus de la participation de la fusion de la lithosphère océanique chevauchante => volcanisme basaltique possible.

Arc continental



Zone de subduction sous une plaque continentale

Le magma obtenu est moins riche en ferro-magnésiens mais plus siliceux à cause de la participation de la fusion de la croûte continentale => andésites et rhyolites dominant.

Hybridation magmatique



Baie de Sainte-Anne,
Trégastel (Côtes d'Armor).



Lien avec le TP : exercice 7

Exercice 7

1. Gabbro plus ancien car présent sous forme d'inclusions à section anguleuse. Le filon granitique aurait cassé cette roche préexistante lors de son infiltration.

2. Trois hypothèses sont possibles :

- différenciation magmatique d'un magma ;
- fusion de la croûte continentale par le magma basique très chaud
- ou origine magmatique indépendante : 2 magmas qui s'hybrident.

3. Différenciation magmatique

Les roches ne seraient pas contemporaines et montreraient des roches intermédiaires de la série. Le granite aurait fait «recuire» le gabbro ou fusion partielle sur les bords.

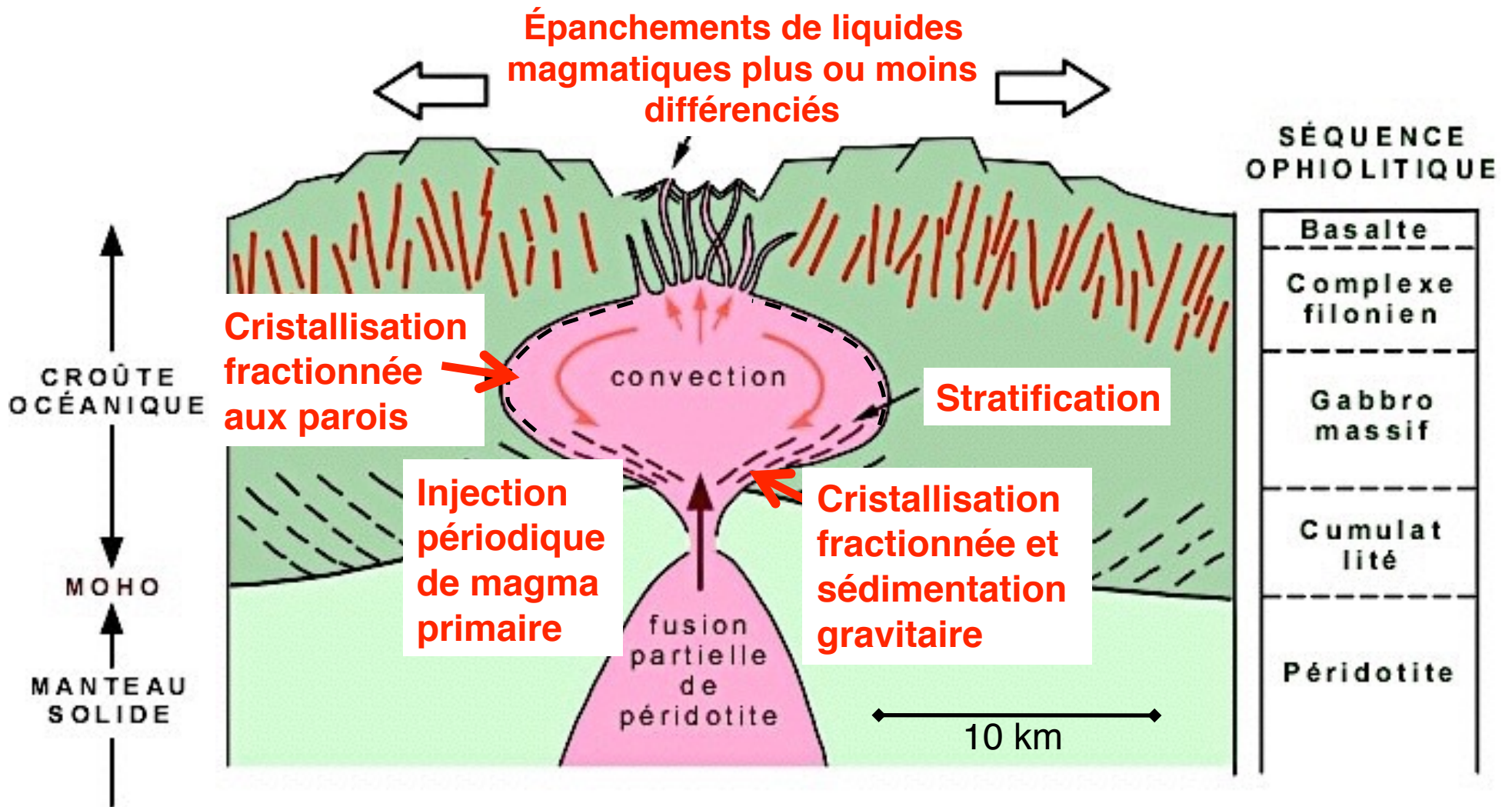
Fusion de la croûte par la remontée de magma basique

Ce serait plutôt le gabbro qui entourerait le granite.

Deux magmas qui s'hybrident

Il y aurait des inclusions réciproques : granite dans gabbro et gabbro dans granite

2.3. Bilan



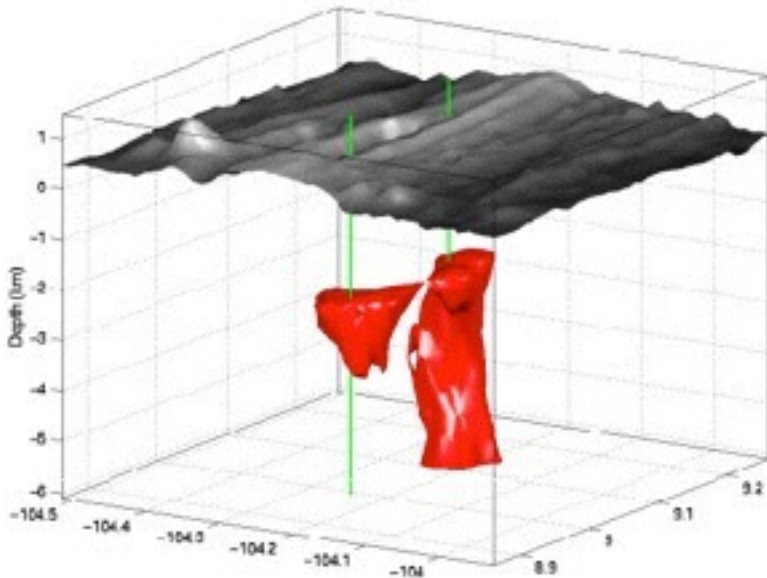
3. Des magmas aux roches magmatiques

3.1. Dans le cas du volcanisme

a) Accrétion océanique au niveau des dorsales

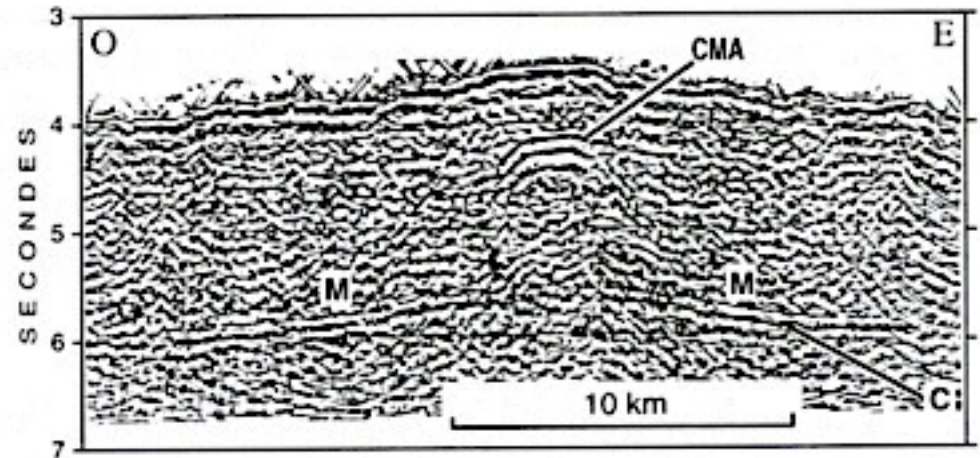
La dorsale océanique

Visualisation 3D de la chambre magmatique (zone à faible vitesse en rouge)

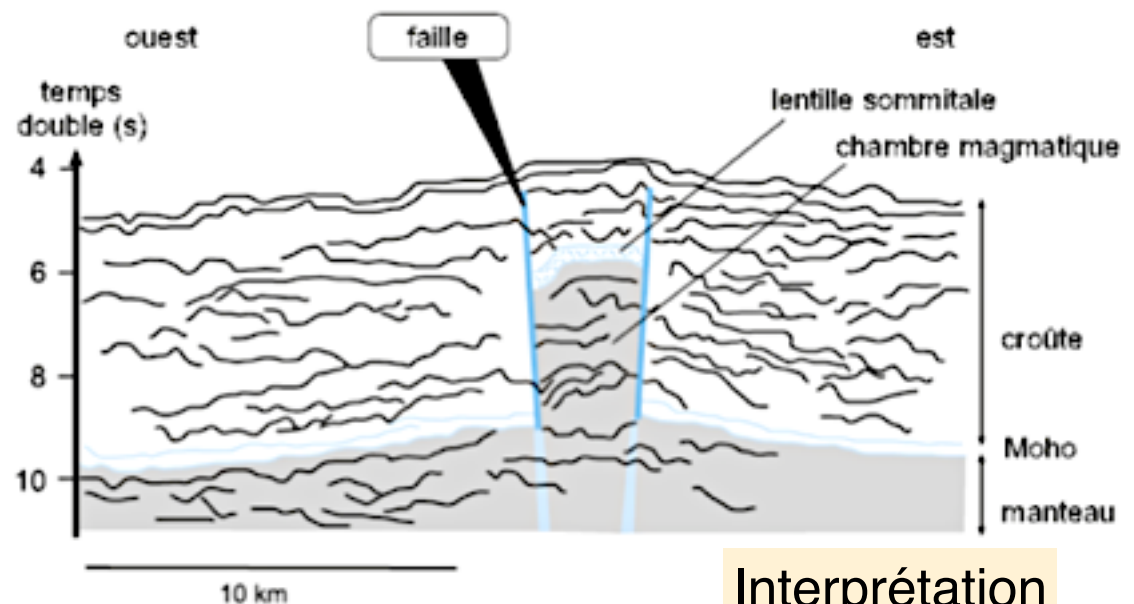


http://www.ipgp.fr/~bazin/sitewebsara_old/interest

Analyse par sismique réflexion



CMA = réflecteur correspondant au toit de la chambre magmatique
M = réflecteur du Moho.



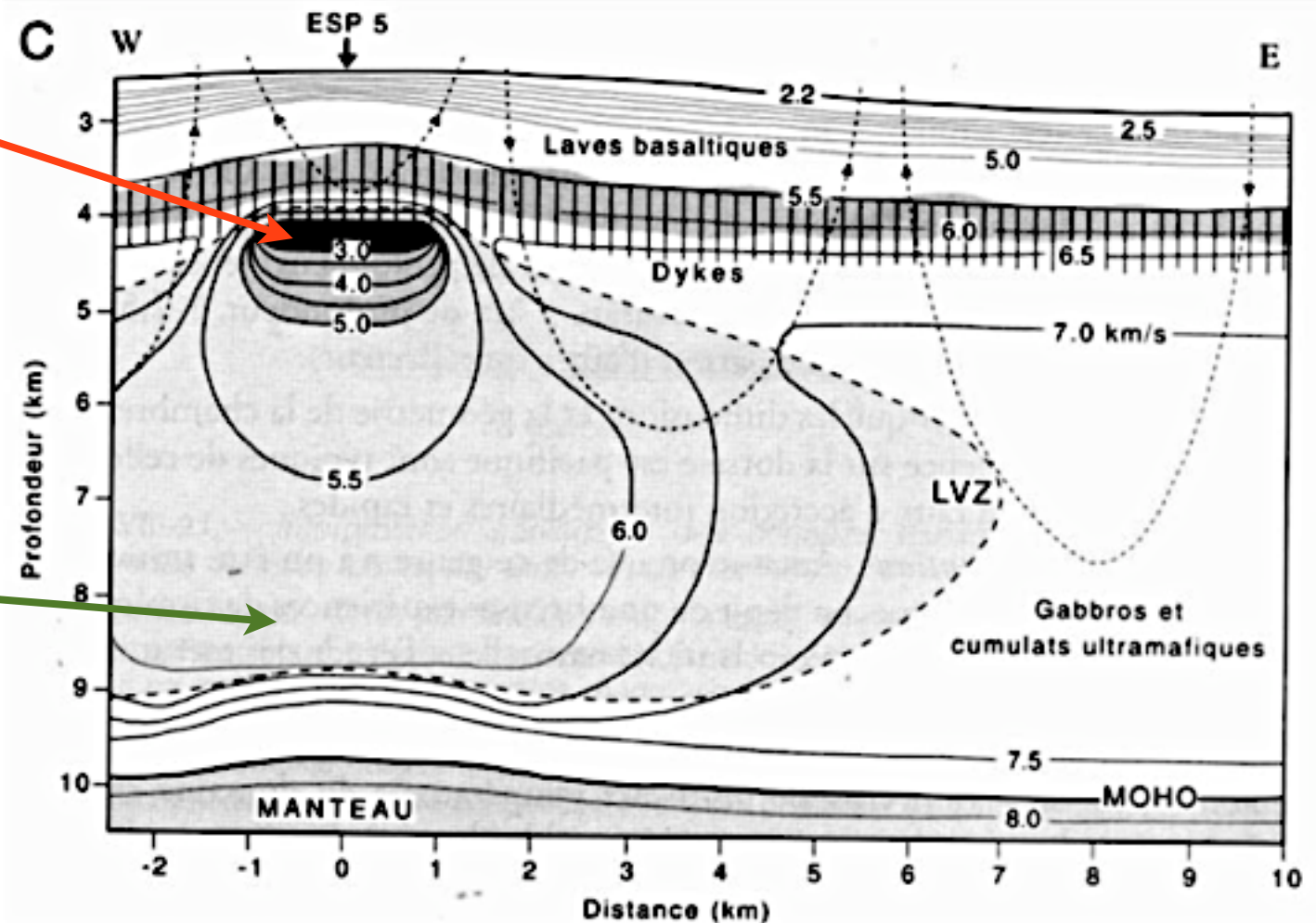
Interprétation

http://elecoix.free.fr/paf/M1%20ESPE%202013/confs/06B_Divergence%20lithospherique.pdf

Modèle de structure de vitesse sur un profil

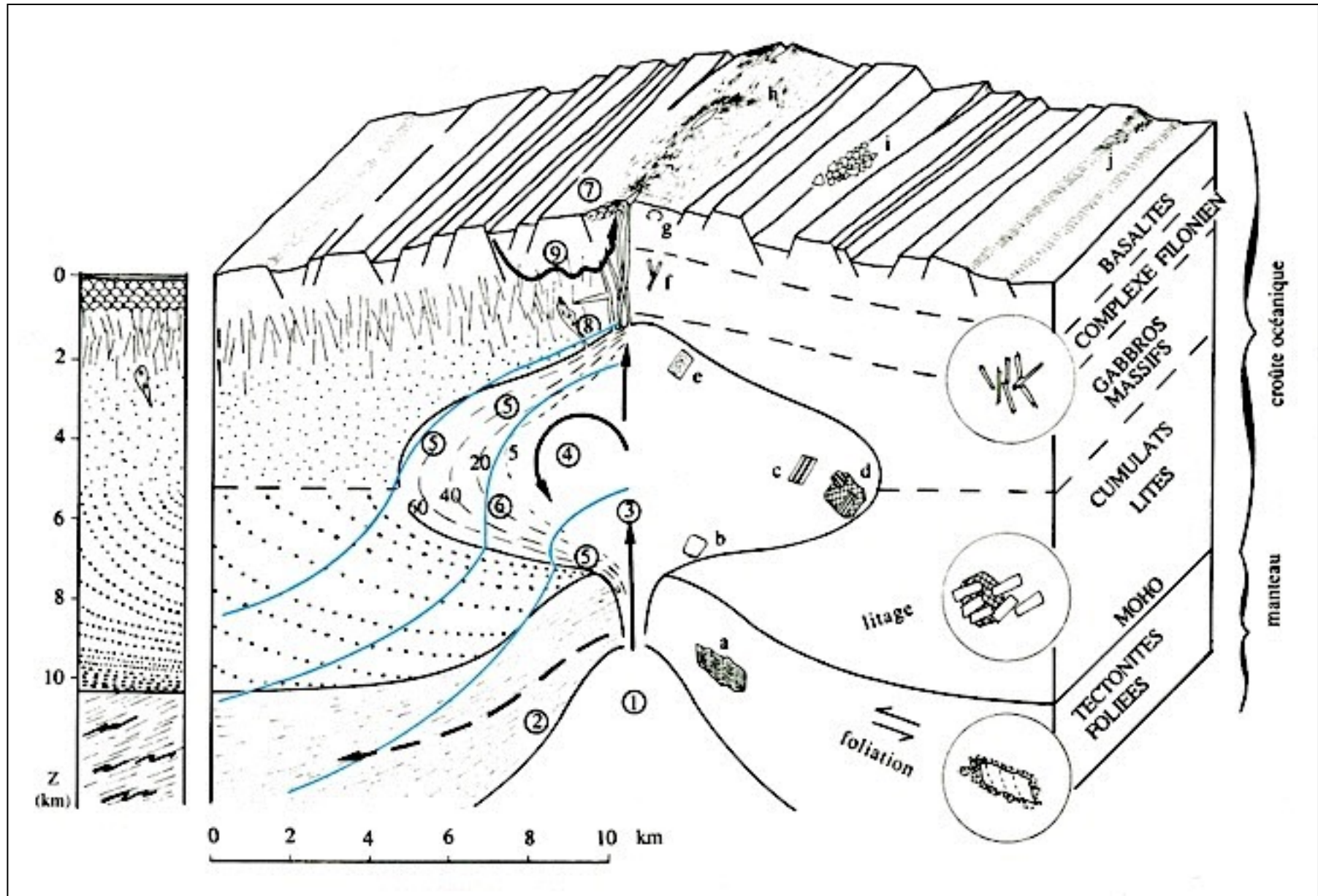
À son sommet, les ondes S n'y sont pratiquement plus transmises, ce qui suggère un état quasi liquide

état quasi solide



L'étude sismique au niveau des dorsales rapides révèle l'existence d'une zone au sein de la croûte où les vitesses des ondes P sont très atténuées.

Une superposition de roches



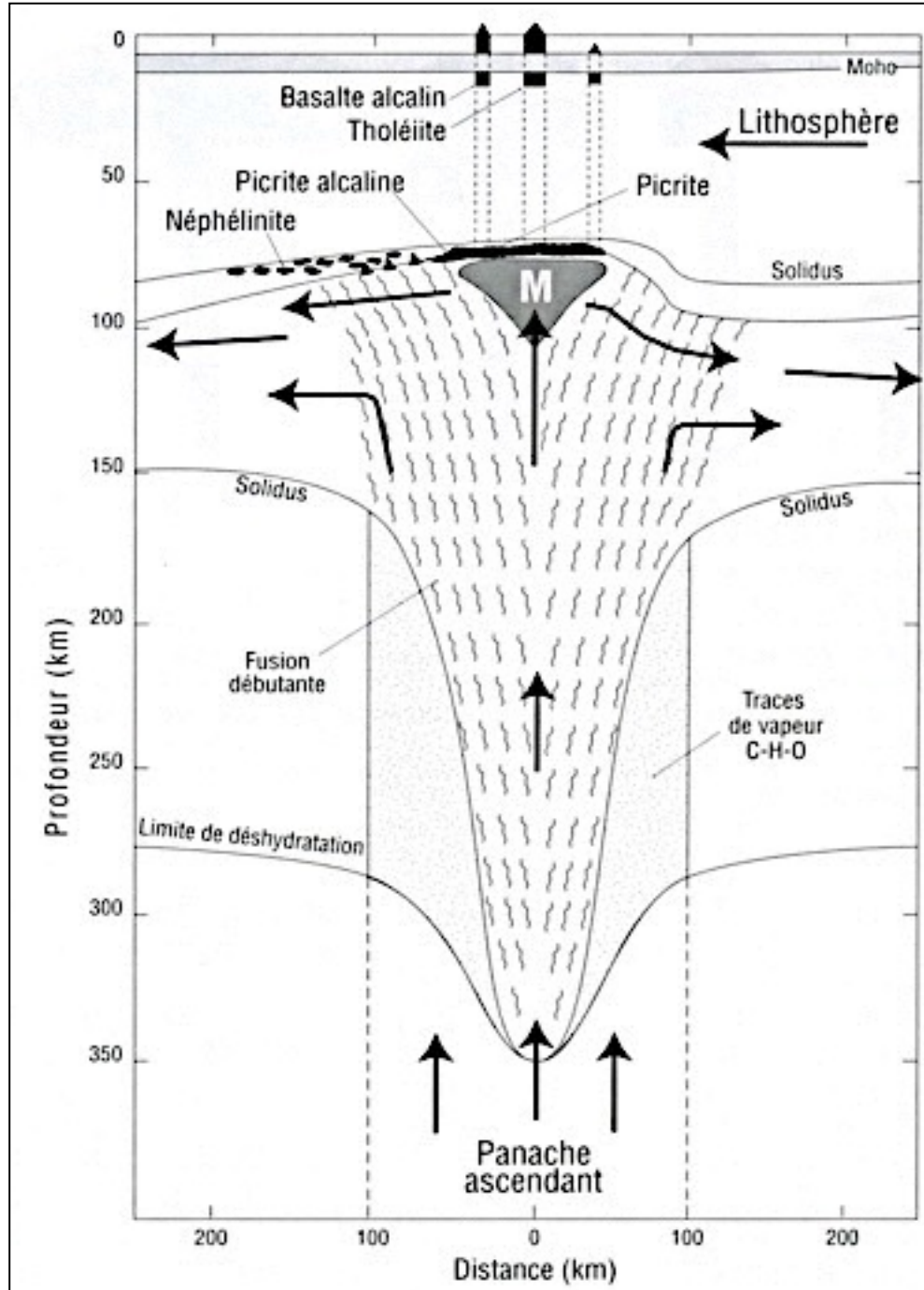
(Caron J.M. et coll., " Comprendre et enseigner la Planète Terre ", Ophrys Ed.).

3.1. Dans le cas du volcanisme

b) Volcanisme intraplaque

Modèle de fusion dans le cas d'un point chaud

M : chambre magmatique



(Juteau T., Maury B, " Géologie de la croûte océanique ", Dunod Ed.).

Lien avec le TP : exercice 8

Exercice 8

magma de densité de $2,7 \text{ g.cm}^{-3}$ qui arrive en surface (donc à l'altitude 7669 m) par rapport au fond océanique. Pour monter de 7669 m, il faut que la pression du magma au fond de l'océan vale :

$$P = \rho \cdot g \cdot z \text{ avec } \rho = 2,7 \text{ g.cm}^{-3} = 2700 \text{ kg.m}^{-3} \text{ et } g = 10 \text{ m.s}^{-2} = 10 \text{ N.kg}^{-1} \text{ et } P \text{ en Pa} = \text{N.m}^{-2}.$$
$$P = 2700 \times 10 \times 7669 = 2,07 \cdot 10^8 \text{ Pa} = 2,07 \text{ kbar} \text{ (1 bar} = 10^5 \text{ Pa)}$$

La magma provient du Moho (10 km sous le niveau de la mer) : il doit monter d'une hauteur de 14 169m. Par le même calcul,

$$P = 2700 \times 10 \times 14169 = 3,83 \text{ kbar. C'est la surpression du magma au niveau du Moho.}$$

Ce magma provient du Moho où il a la même densité (profondeur du Moho à 6,5 km sous le plancher océanique). De quelle profondeur vient le magma permettant d'expliquer une surpression de 3,83 kbar ?

Le manteau a une densité de 3,3. Ce magma une densité de 2,7.

Surpression due à une colonne de roche de moindre densité : $0,6 \text{ g.cm}^{-3}$. Quelle hauteur h de magma faut-il pour compenser un déficit de densité de 0,6 mais une surpression de 3,83 kbar ?

$$\Delta P = \Delta \rho \cdot g \cdot h \Rightarrow h = 65 \text{ km sous le Moho.}$$

3.1. Dans le cas du volcanisme

c) Volcanisme de zone de subduction

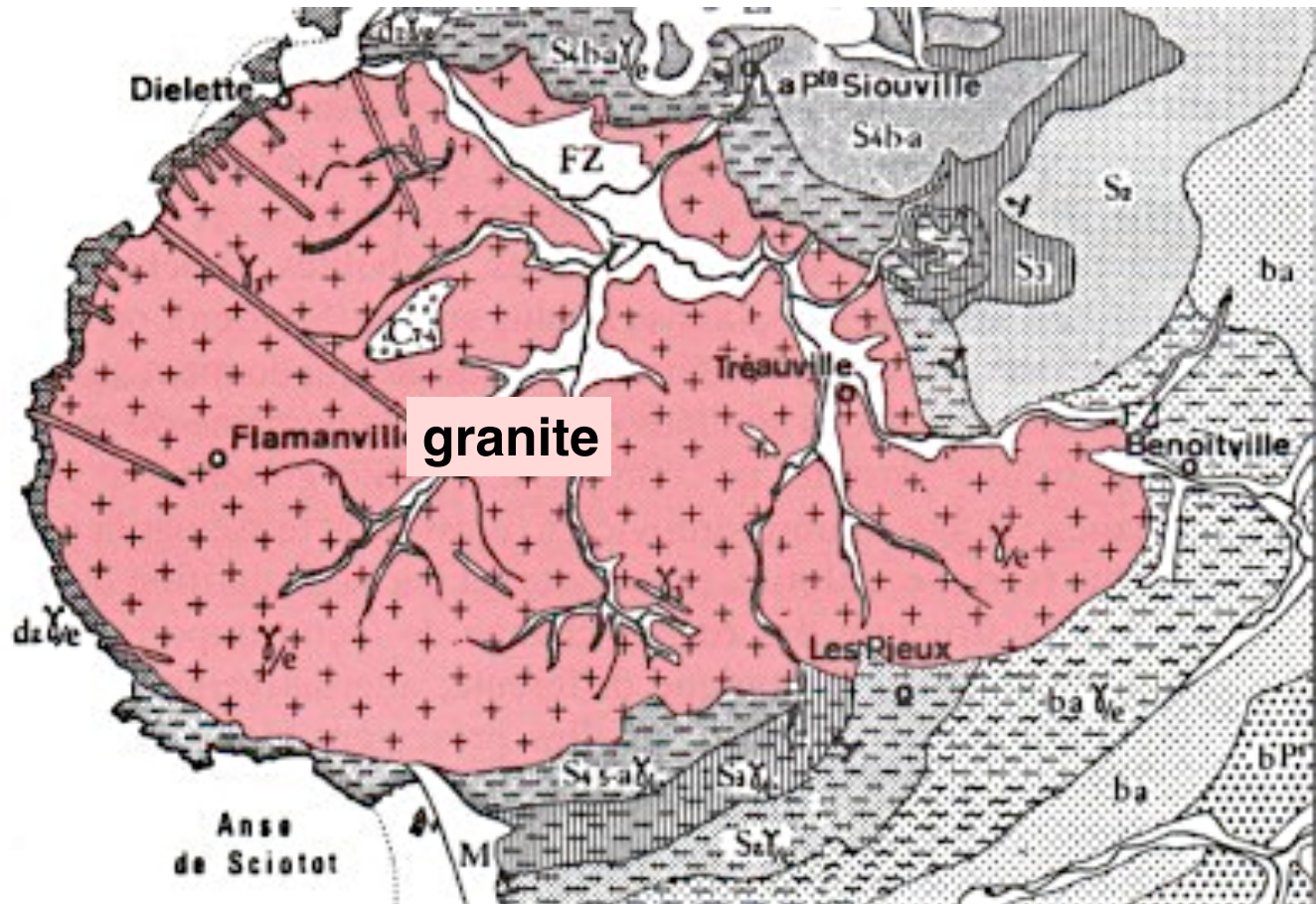
3.2. Dans le cas du plutonisme : production de croûte continentale en zone de convergence

a) Le granite de Flamanville, un granite intrusif (= allochtone)

Un pluton intrusif



--- auréole de
--- métamorphisme



3.2. Dans le cas du plutonisme : production de croûte continentale en zone de convergence

b) Le granite du Velay, un granite autochtone

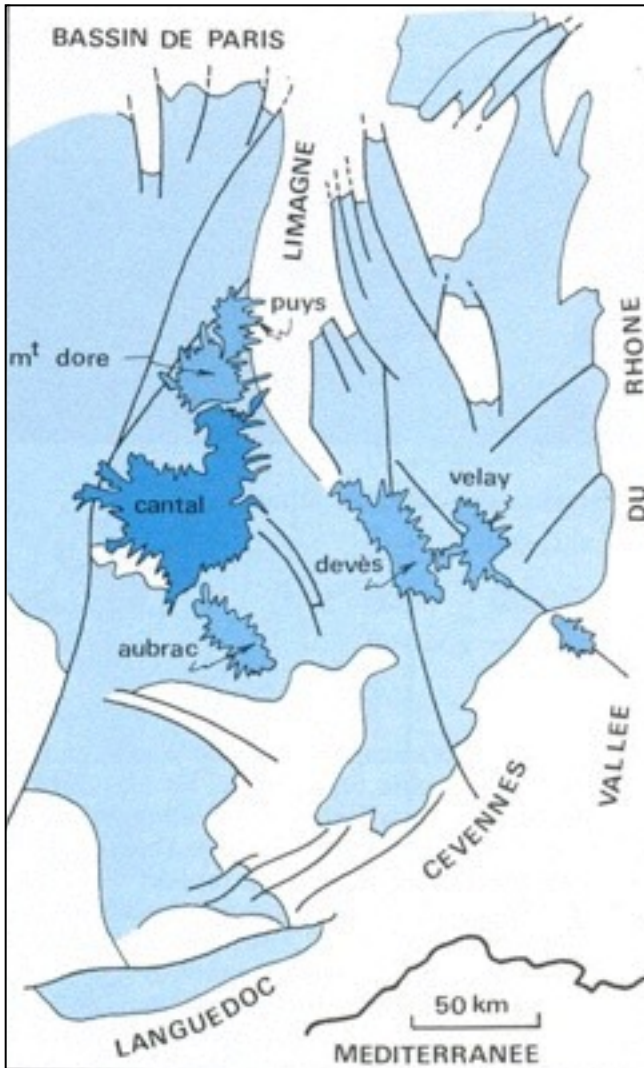
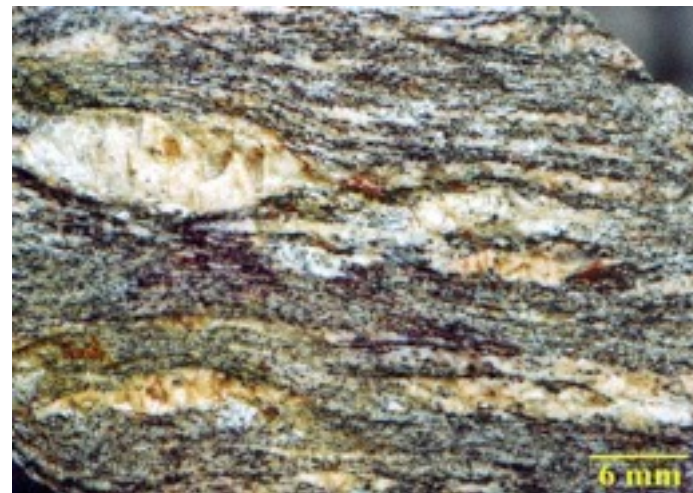
Le granite autochtone du Velay

Au cœur du massif : granite du Velay à biotite et cordiérite.

**Zone intermédiaire
Migmatite : lits clairs de
granite dans un gneiss**



**Autour du pluton
Orthogneiss constituant
le toit du granite du Velay.**



gros batholithe

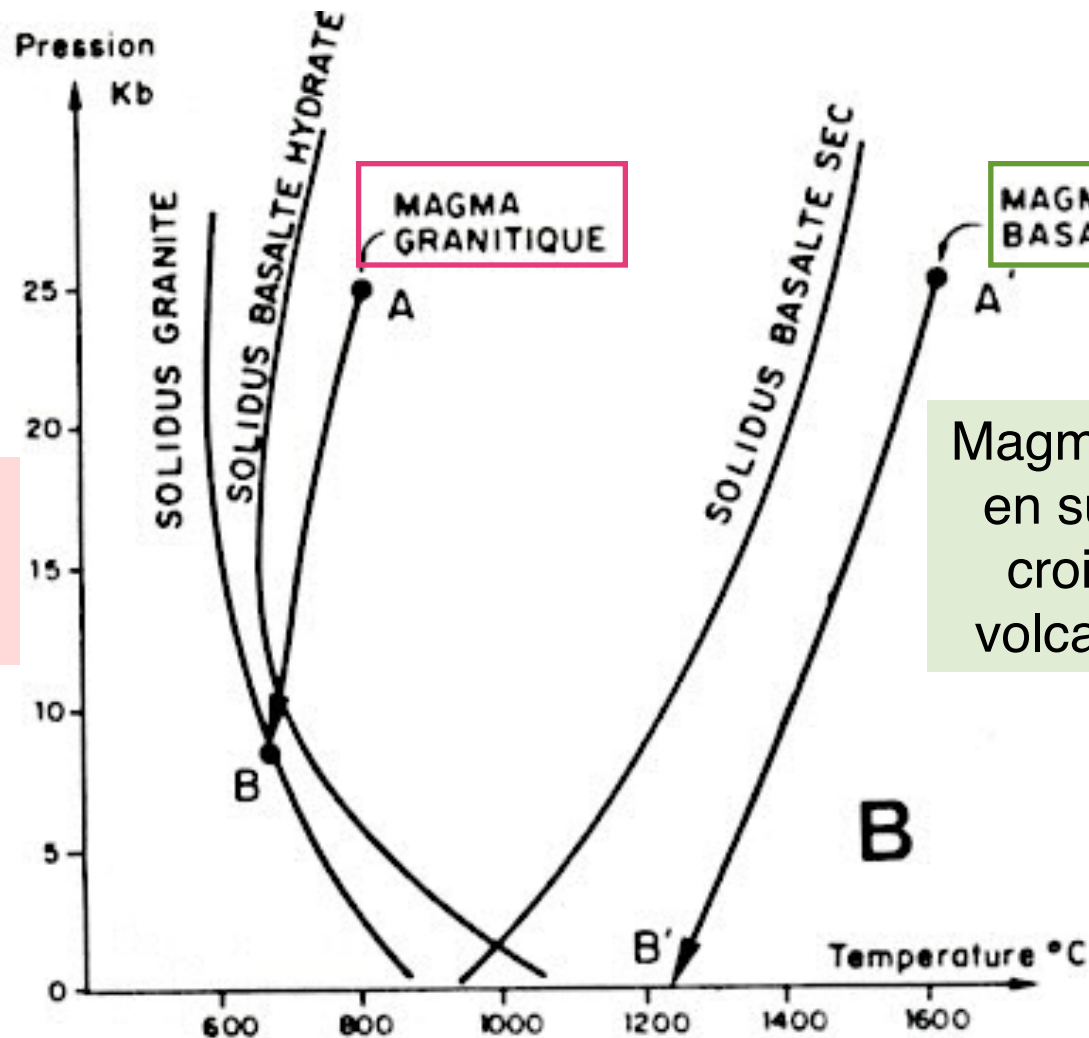
3.2. Dans le cas du plutonisme : production de croûte continentale en zone de convergence

c) Généralisation : mise en place de granite par anatexie crustale

Evolution comparée de 2 magmas

80 km =

Magma moins chaud qui croise le solidus vers 25 km => pluton



Magma chaud qui arrive en surface sans avoir croisé le solidus => volcanisme basaltique

(Pomerol C. Renard M. "Eléments de géologie", Masson Ed.).

Viscosité des magmas

Roches correspondantes	ν (viscosité) poiseuille = 1 Pa.s
granite sec 800 °C	10^{11}
granite saturé en H ₂ O 800 °C, 2kbar	$2,5 \cdot 10^6$
granite saturé en H ₂ O 1 200 °C, 5kbar	$0,5 \cdot 10^3$
basalte à 1 200 °C, P atmosphérique	10^2
andésite à 1 200 °C, P atmosphérique	10^3
rhyolite à 1 200 °C, P atmosphérique	10^5

Figure 5.1. Quelques données de viscosité de magmas.

Remontée plus lente des magmas granitiques de viscosité très importante

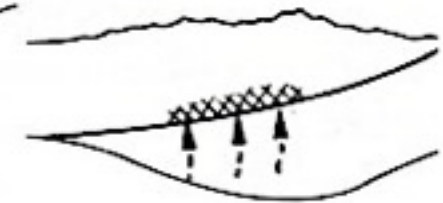
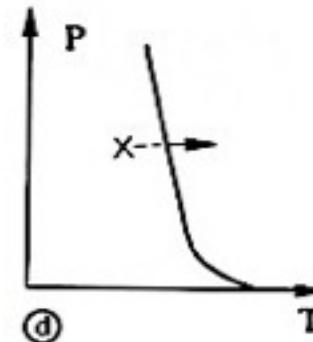
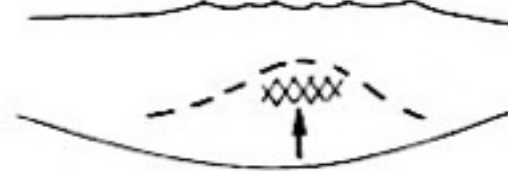
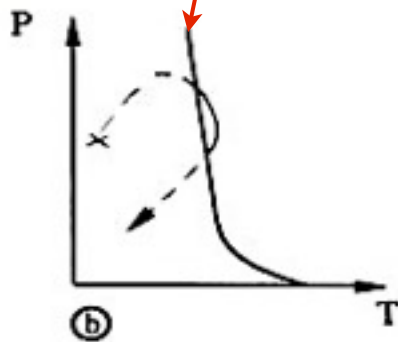
Circonstances de l'anatexie crustale

c. Décompression liée à l'érosion et l'extension post-orogénique, réchauffement (richesse en éléments radiogènes).

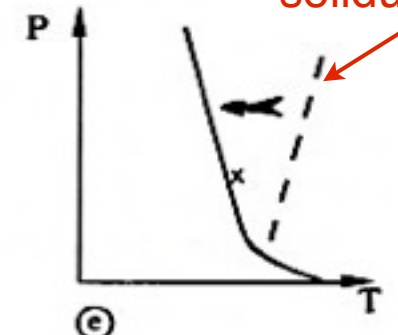
e. Déshydratation par métamorphisme de l'unité inférieure qui hydrate l'unité chevauchante.



solidus hydraté



solidus sec



b. Enfouissement tectonique, réchauffement puis remontée isostatique liée au décapage par l'érosion.

d. Réchauffement par l'apport magmatique d'origine mantellique.

Conclusion



Contexte géodynamique	Source du magma	Conditions de la fusion partielle	Profondeur FP	Taux FP	Nature et chimie magma I	Roches magmatiques et série correspondantes
Dorsales	Manteau asthénosphérique	Décompression adiabatique	Début vers 75 km 20 – 30 km	20 – 25 %	Basalte tholéitique Assez riche en SiO_2 : 47-49 % pauvre en alcalins : $\text{K}_2\text{O} < 0,5 \%$ $\text{Na}_2\text{O} \approx 2,5 \%$	basalte MORB gabbro Série tholéitique
Points chauds	Manteau inférieur ? (700 à 2900 km)	Augmentation de T° consécutive à panache mantellique ascendant	Début vers 300 km ? 50 – 100 km	5 % (peut atteindre 20 %)	Basalte alcalin Pauvre en SiO_2 : 44 – 47 % Riche en alcalins : $\text{K}_2\text{O} 1 \%$ $\text{Na}_2\text{O} 3 - 4 \%$	basalte OIB, trachyte (alcaline) rhyolite (alcaline) Série alcaline
Subduction	Manteau asthénosphérique et/ou manteau lithosphérique	Hydratation consécutive au métamorphisme HP-BT de la LO subduite	100 – 150 km	10 %	Basalte alumineux Saturé en SiO_2 : 48 - 53 % Riche en $\text{Al}_2\text{O}_3 > 16 \%$ Riche en eau Assez riche en alcalins	andésite granodiorite rhyolite granite Série calco-alcaline