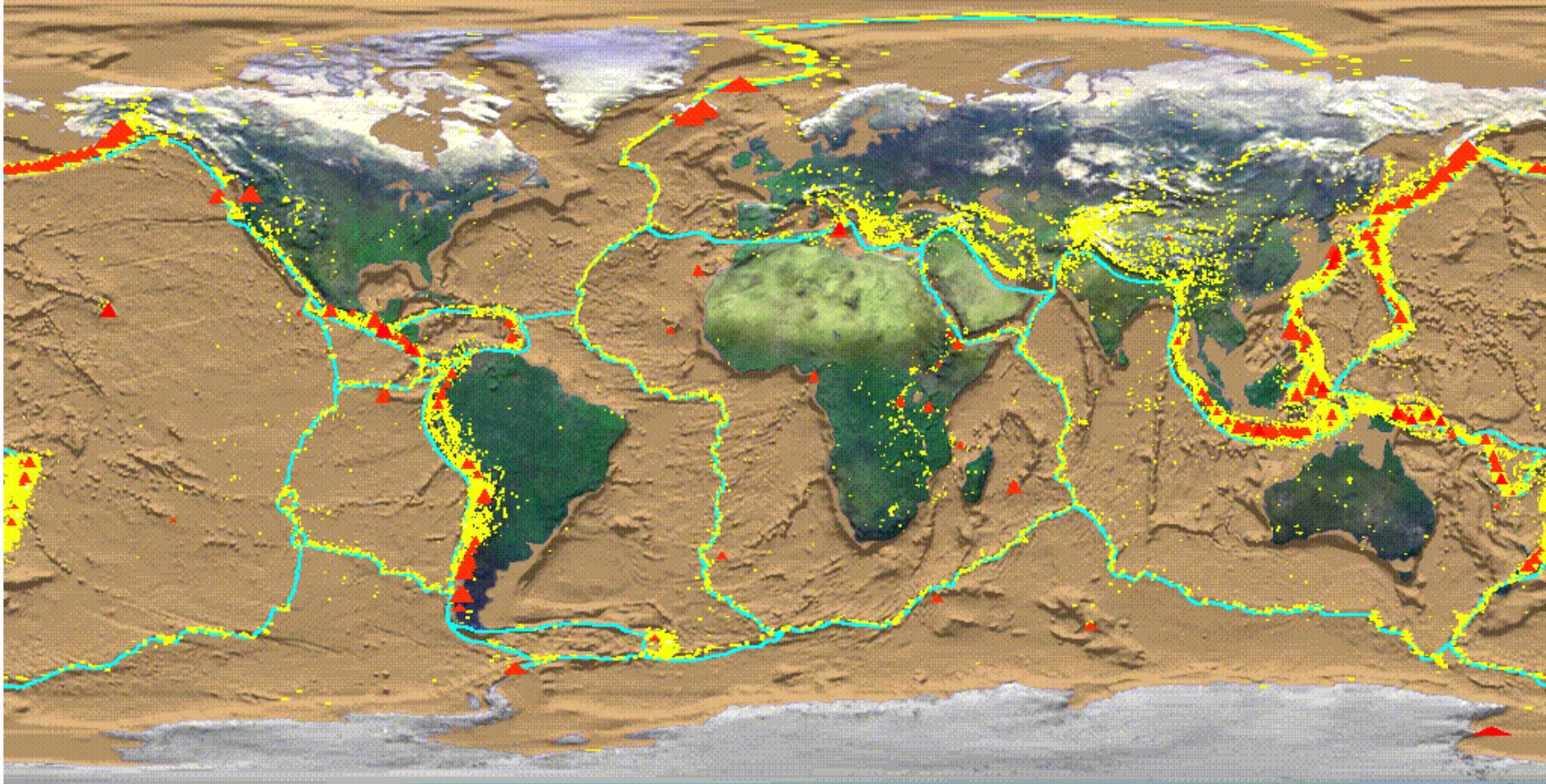


ST-F LE MAGMATISME (6h)



Répartition mondiale des volcans

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 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.

- 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, 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 physicochimiques 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.).

Précisions et limites :

Le calcul de la composition normative d'une roche magmatique est hors programme. Les observations sont conduites à l'échelle macroscopique et à l'échelle microscopique des lames minces sous forme de photographies (LPNA, LPA). À l'échelle microscopique, les noms des minéraux sont fournis. L'objectif de l'étude pétrologique est la compréhension du système que constitue la roche, quant à sa formation, son origine et son histoire.

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.

La fusion partielle de la croûte continentale (anatexie crustale) entraîne la production de liquides de composition granitique.

Des données isotopiques permettent la détermination des sources de magma.

- 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-albiteorthose) et un basaltique (olivine-grenat-pyroxène).

- Montrer que la fusion partielle produit, à partir de roches de sources différentes, des liquides identiques, de composition granitique dans la croûte continentale, et basaltique dans le manteau.

- Estimer un taux de fusion partielle dans les systèmes manteau-basalte à partir de données géochimiques (les calculs sont réalisés à partir des concentrations en potassium).

- Exploiter des données isotopiques ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$) pour caractériser l'origine des magmas.

Précisions et limites :

Le comportement des éléments chimiques dans les magmas n'est abordé que pour les éléments majeurs.

Les rapports isotopiques sont présentés comme « signatures géochimiques » des mécanismes de fusion. Les rapports isotopiques initiaux $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ et $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ sont présentés comme des données intrinsèques des différents réservoirs (croûte continentale, manteau supérieur, manteau inférieur), sans expliciter l'origine des rapports isotopiques. La connaissance de la diversité des sources mantelliques n'est pas exigible.

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 tholéiitique, calco-alcaline et alcaline.

La série tholéiitique 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.

ST-F LE MAGMATISME (6h)

INTRODUCTION

I. LES DIFFERENTES FORMES D'EXPRESSION DU MAGMATISME

- I.1. Les traces actuelles et passées de l'activité magmatique
- I.2. Répartition mondiale des roches magmatiques
- I.3. Magmatisme et contextes géodynamiques
- I.4. Comment dater les événements magmatiques ? (Cours BCPST 1)

II. GENESE ET EXTRACTION DES MAGMAS

- II.1. Origine des magmas
- II.2 Les mécanismes de fusion partielle des roches
- II.3 La production des magmas primaires et leur migration verticale

III. L'EVOLUTION DES MAGMAS

- III.1 Établir un ordre de cristallisation
- III.2 Les processus d'évolution magmatique
- III.3 Les mécanismes de cristallisation
- III.4 Classification des roches magmatiques et notion de série magmatique

IV PRÉVENIR LE RISQUE VOLCANIQUE

- IV.1. La notion de risque volcanique
- IV.2. La gestion des risques volcaniques

CONCLUSION

Roches divisées en 4 groupes : sédimentaires, métamorphiques, **volcaniques et plutoniques**. Ces deux dernières sont des **roches magmatiques** = roches formées à partir d'un magma.

Magma = liquide à HT ($> 600\text{ °C}$) qui se forme en profondeur dans le globe solide et qui donne une roche par **solidification**.

Lorsqu'il cristallise en profondeur (manteau ou croûte) → **roches plutoniques** ou **intrusives** présentant des cristaux réguliers dont les granites constituent les meilleurs exemples.

Lorsqu'il est éjecté à la surface terrestre par des éruptions → roches **extrusives** ou **effusives** qui s'accumulent pour former des édifices volcaniques.

Magma = **état exceptionnel** qui implique une **fusion partielle (FP)** des enveloppes du globe.

A l'exception des points chauds, les magmas se forment en limite de plaque donc dans des **zones dynamiques (94% de l'activité mondiale)**

Questions

Quelles sont les conditions qui permettent la mise en place de magmas ?

Comment sont produits ces liquides ?

Comment expliquer la diversité des roches magmatiques ?

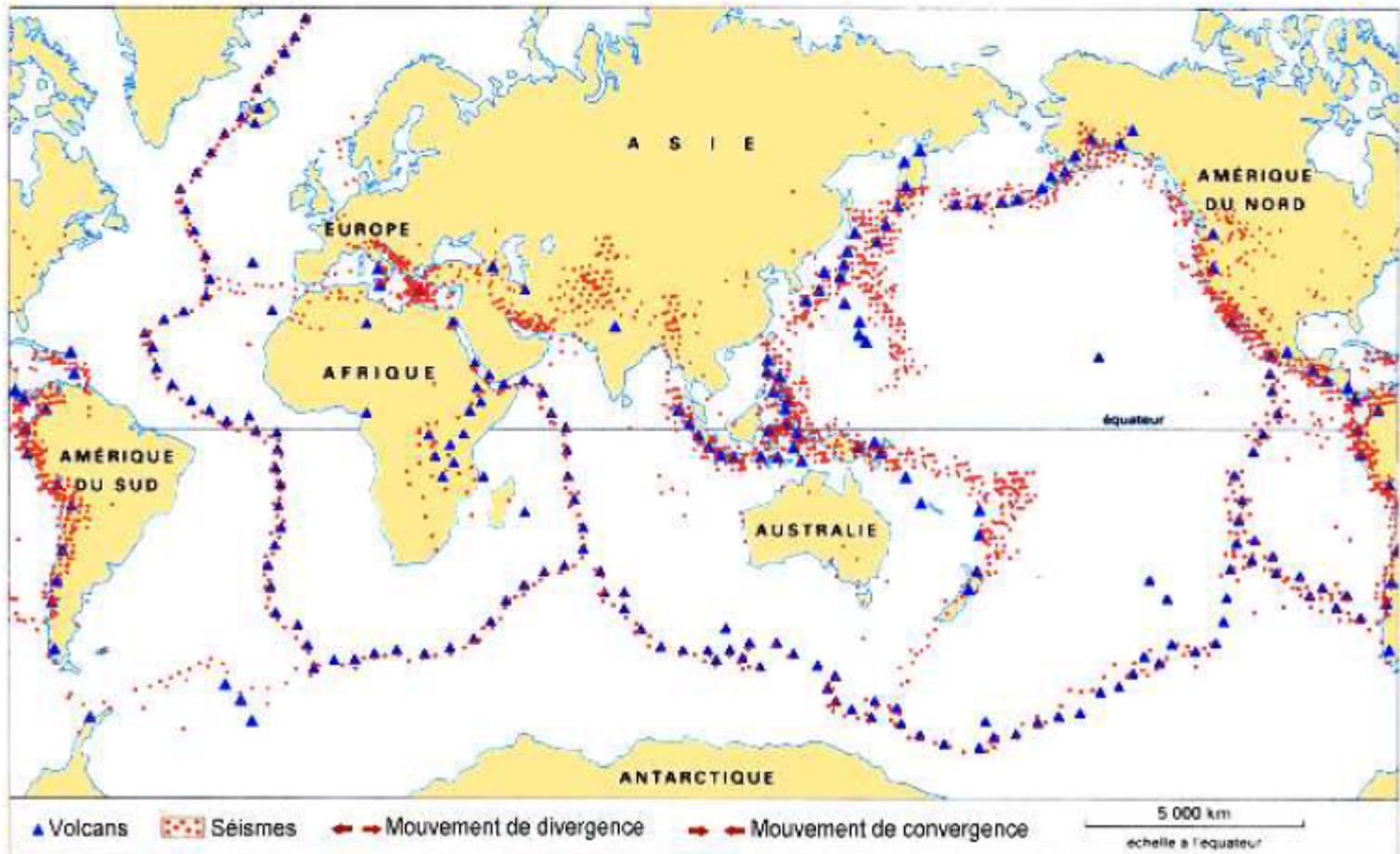
Comment prévenir le risque volcanique ?

Activité magmatique actuelle

94% de l'activité mondiale

- 81% dorsales océaniques
- 13 % zones de subductions
- 6% magmatisme intraplaque

Sans oublier le plutonisme !



I. LES DIFFERENTES FORMES D'EXPRESSION DU MAGMATISME

I.1. Les traces actuelles et passées de l'activité magmatique

I.2. Répartition mondiale des roches magmatiques

I.3. Magmatisme et contextes géodynamiques

I.4. Comment dater les événements magmatiques ? (Cours BCPST 1)

I. LES DIFFERENTES FORMES D'EXPRESSION DU MAGMATISME

I.1. Les traces actuelles et passées de l'activité magmatique

I.1.1. Les témoins directs du magmatisme : roches plutoniques et roches volcaniques

I.1.2. Les témoins indirects du magmatisme : Hydrothermalisme et métamorphisme de contact

I.1.3. La diversité des volcanismes éruptifs.

Roches sédimentaires

- Quaternaire
- Tertiaire
- Crétacé
- Jurassique
- Permien/Trias
- Paléozoïque

Roches plutoniques et métamorphiques

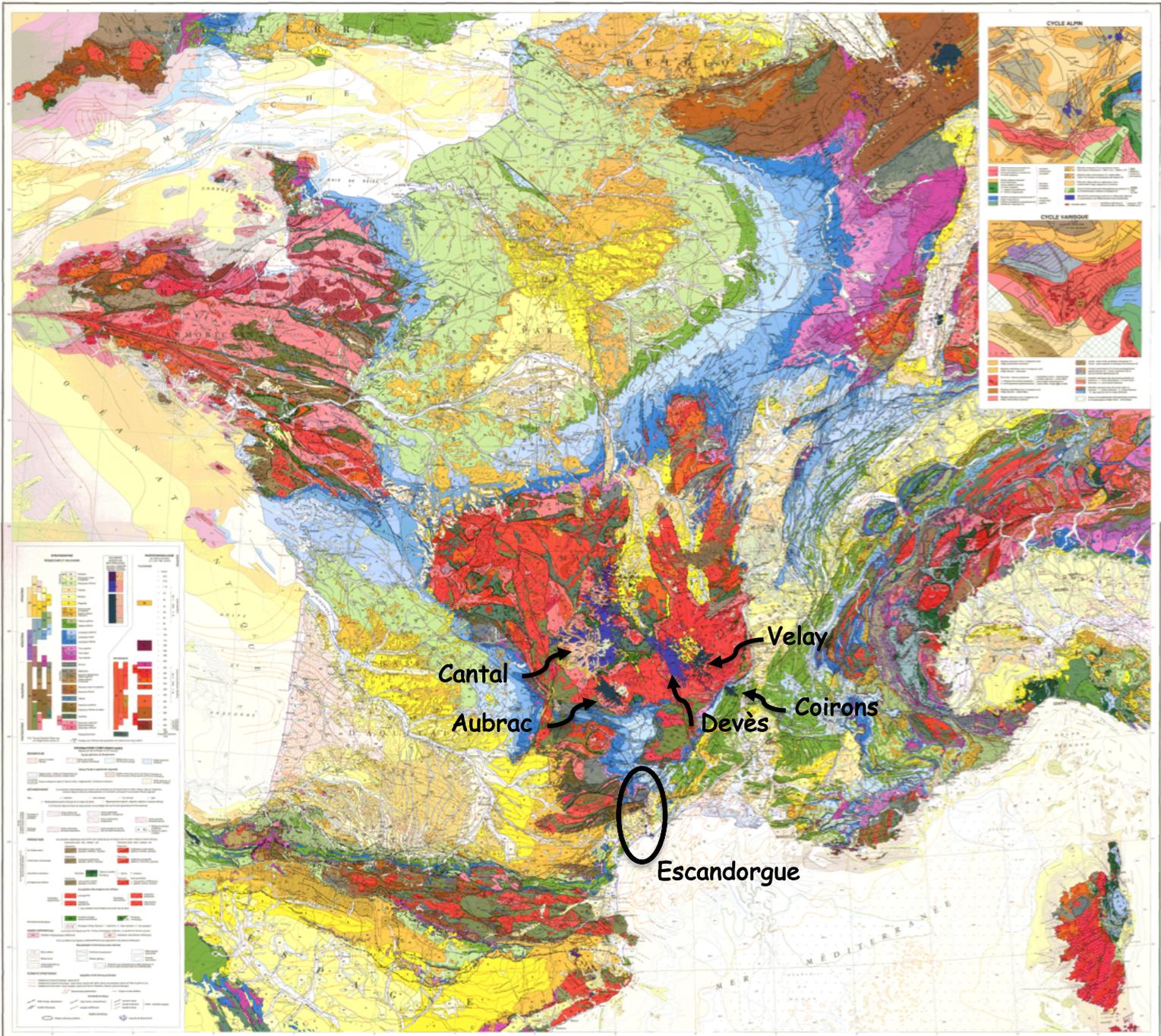
- Granites
- Roches métamorphiques
- Roches infra paléozoïques

Roches volcaniques

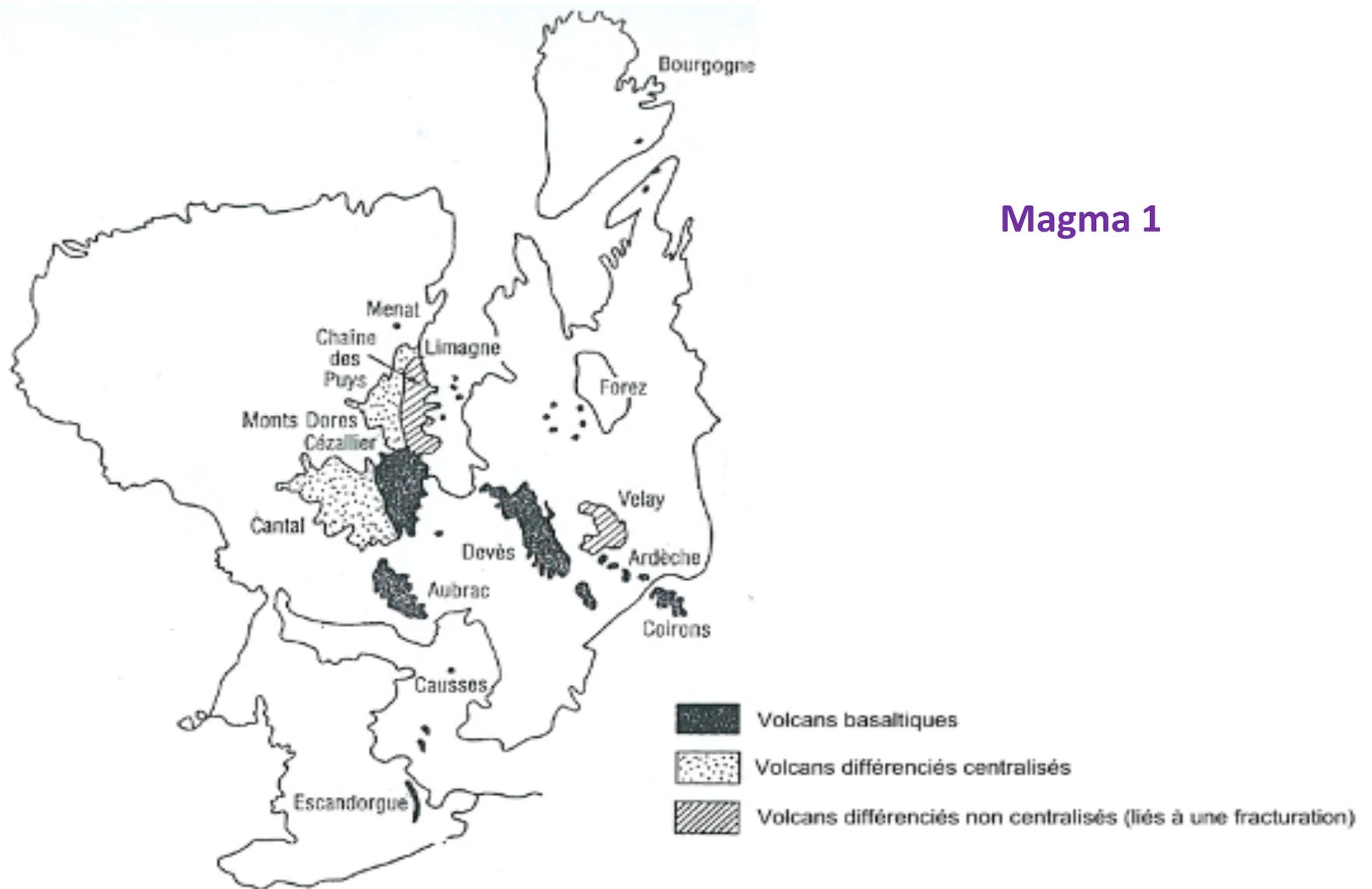
- Volcanisme tertiaire

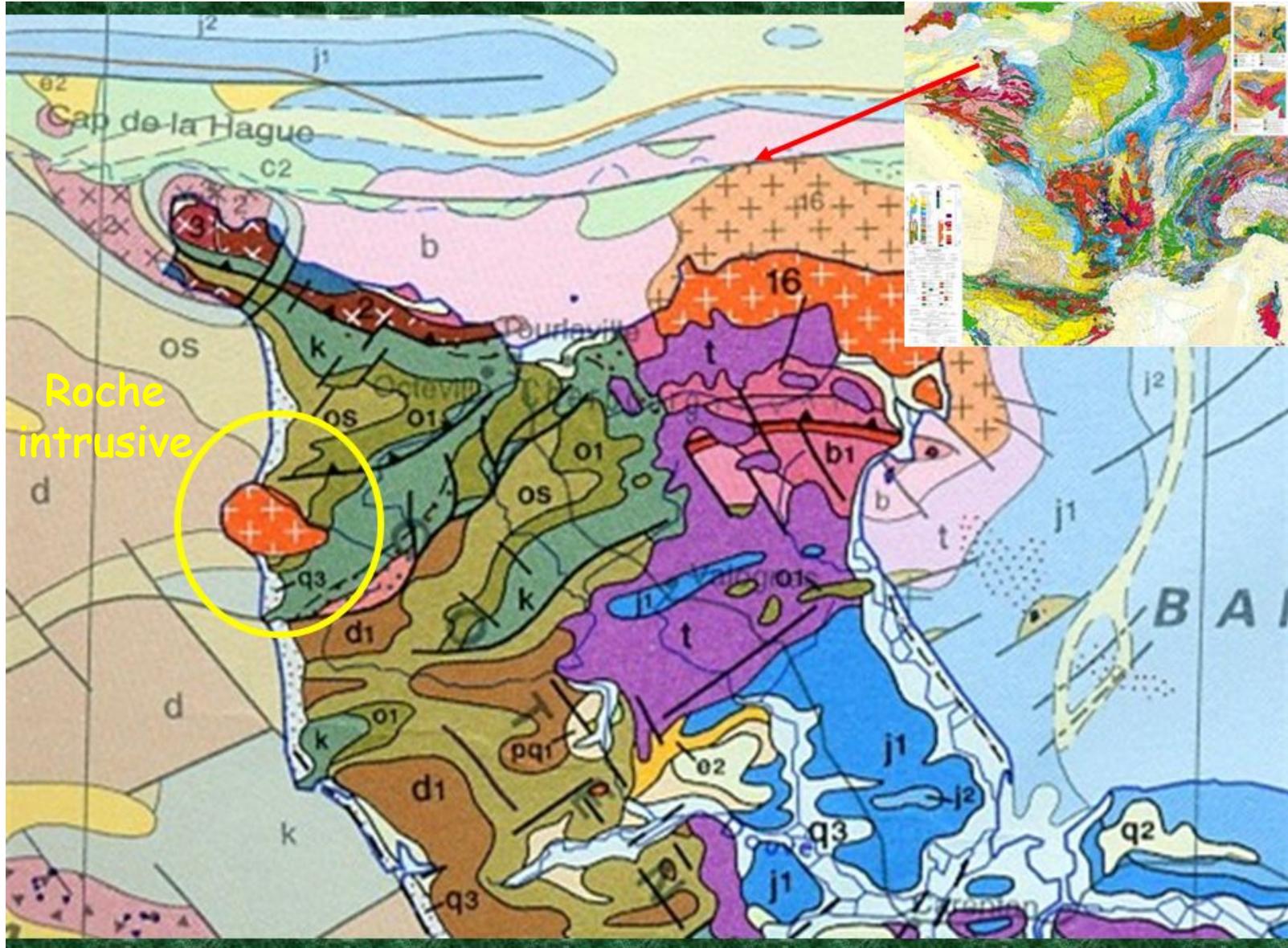


Magma 1: LA CARTE GÉOLOGIQUE DE FRANCE AU MILLIONIÈME

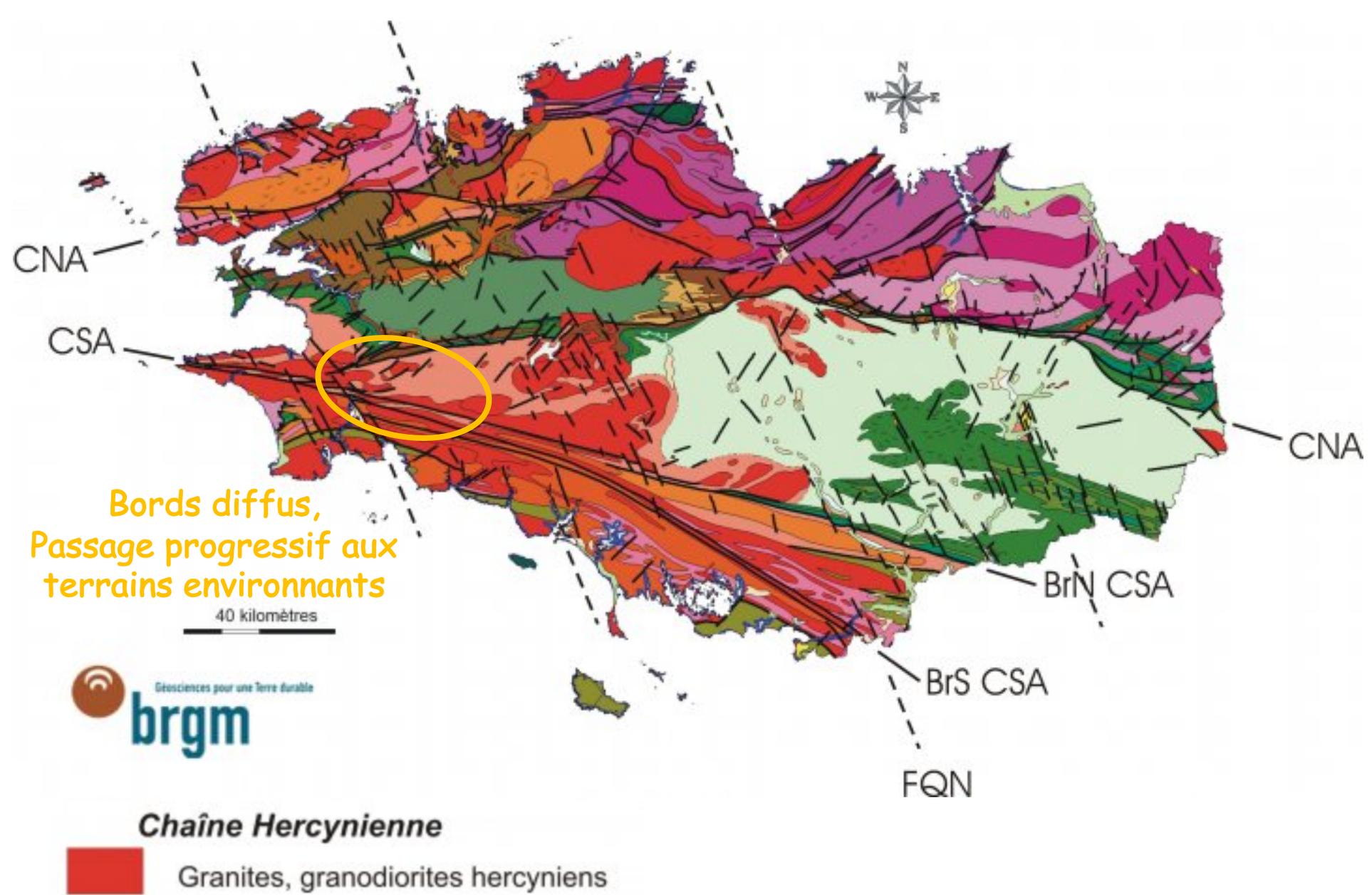


Magma 1





Le granite de Flamanville: un exemple de granite allochtone



Le granite de St Anne d'Auray : un exemple de granite autochtone

Différents types d'édifices volcaniques

Magma 1:

cônes de scories

cône régulier
cône égueulé
cônes associés

coulée

dôme

dôme endogène

caldeira

cratère d'explosion

pipe

lopolite

laccolithe

strato volcan

sill

neck

dyke

mesa

volcan bouclier

lac de lave

coulée sommitale

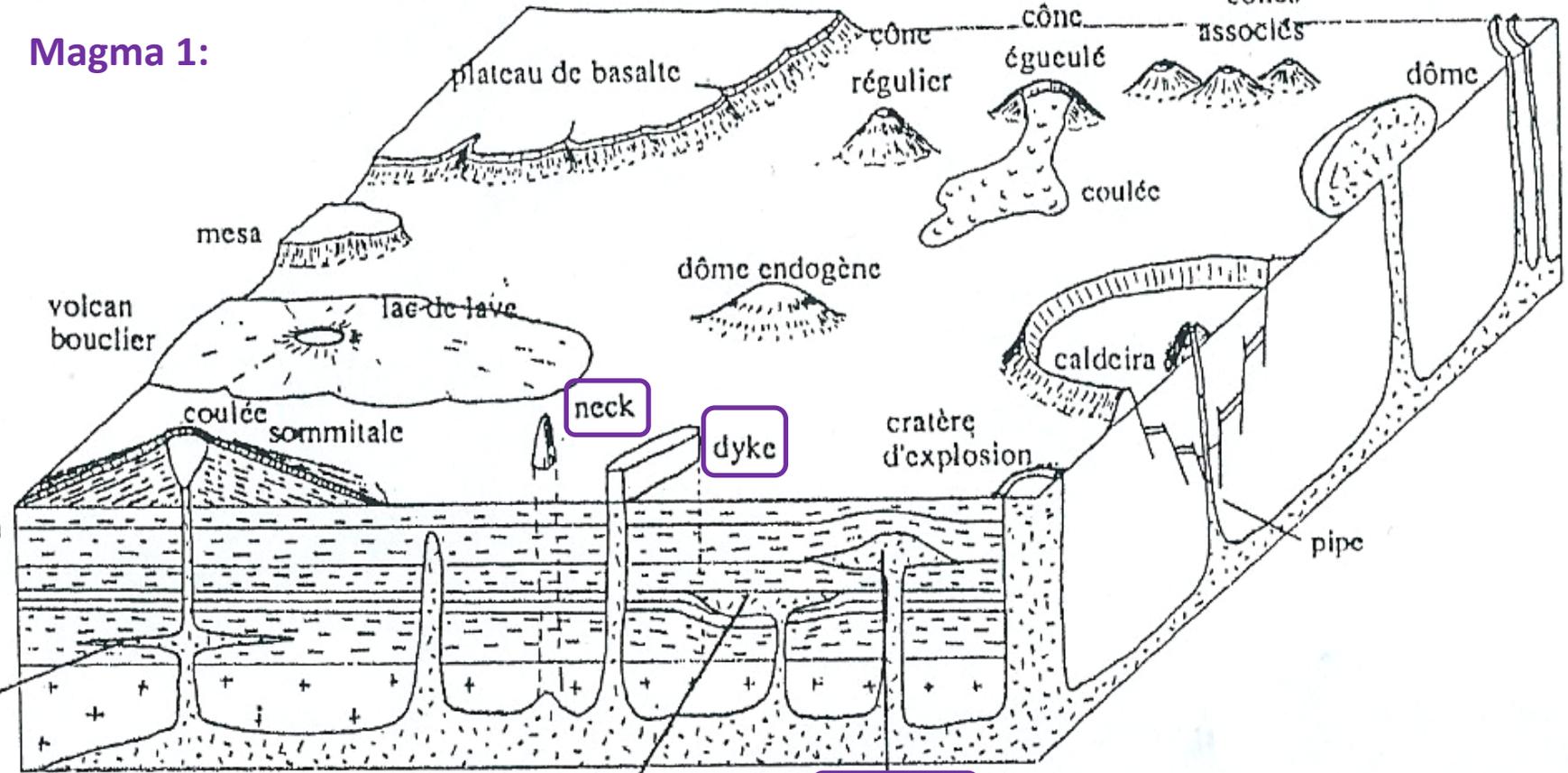
plateau de basalte

cône régulier

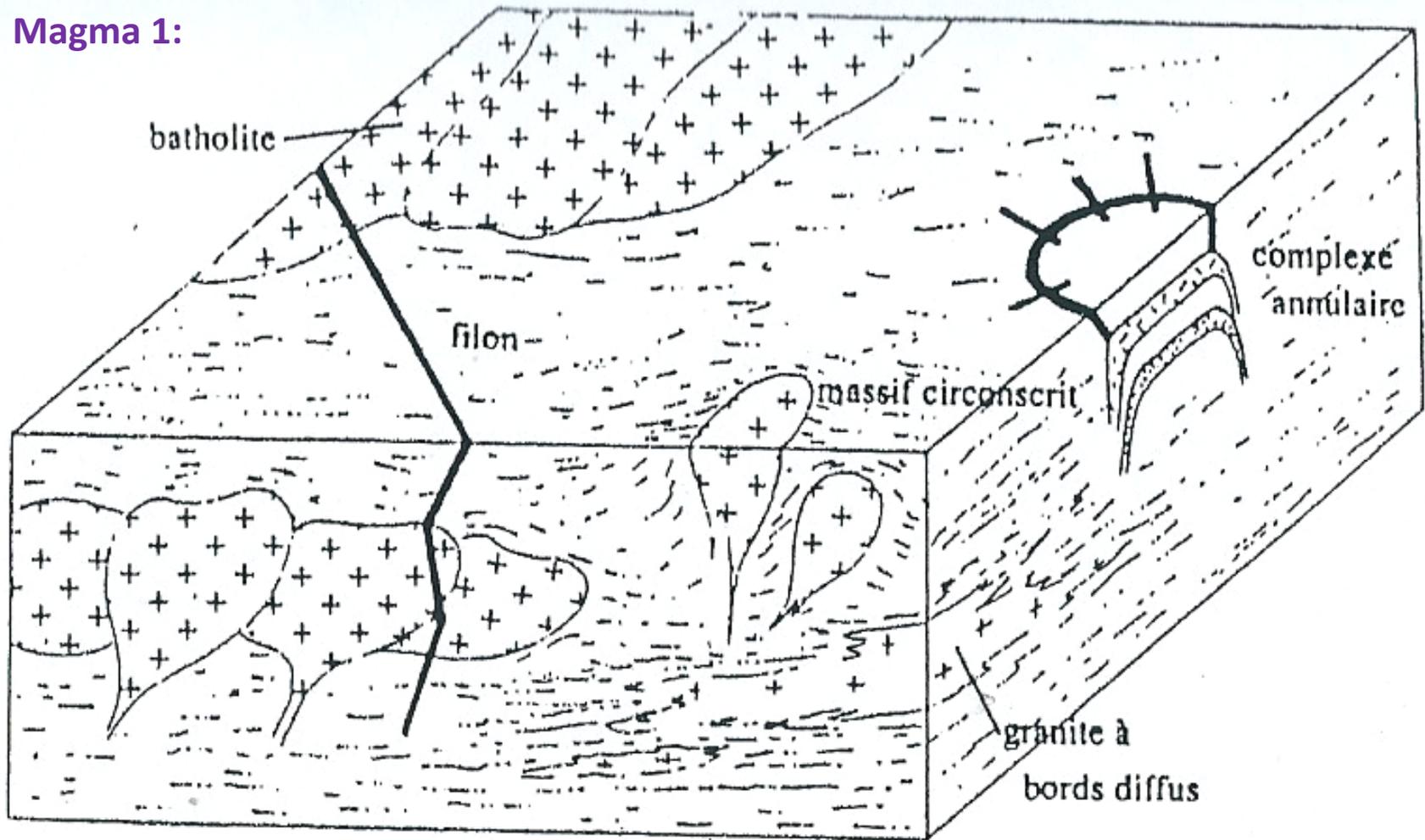
cône égueulé

cônes associés

- Laccolithe** : massif de roches plutoniques de plusieurs kilomètres en forme de lentille à surface inférieure plane et surface supérieure convexe.
- Neck** : masse de roches volcaniques, conique ou cylindrique de quelques dizaines à centaines de mètres de diamètre, recoupant l'encaissant, laissée en relief par l'érosion différentielle
- Dyke** : lame épaisse de quelques dizaines à centaines de mètres de roche magmatique, recoupant l'encaissant, donnant en relief une forme de mur du fait de l'érosion.
- Sill** : appelé aussi filon-couche.

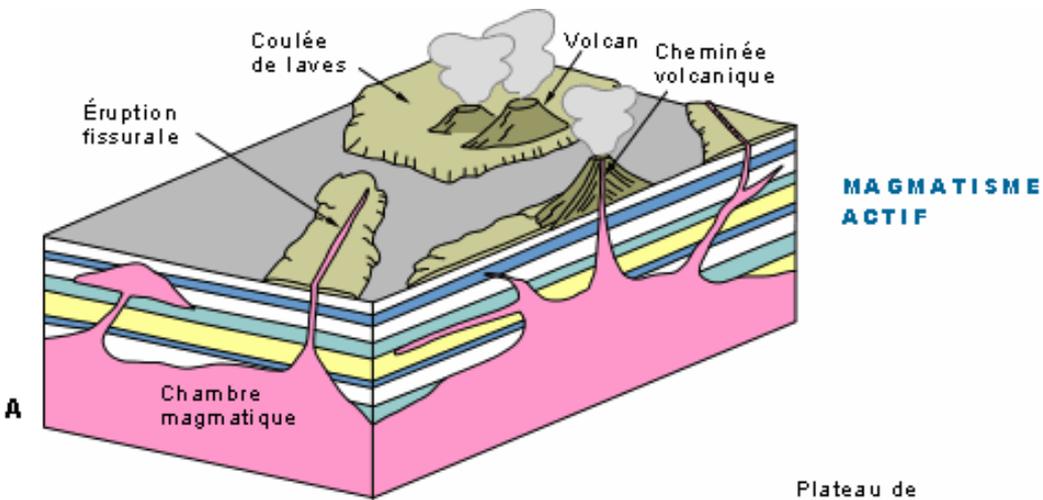


Magma 1:

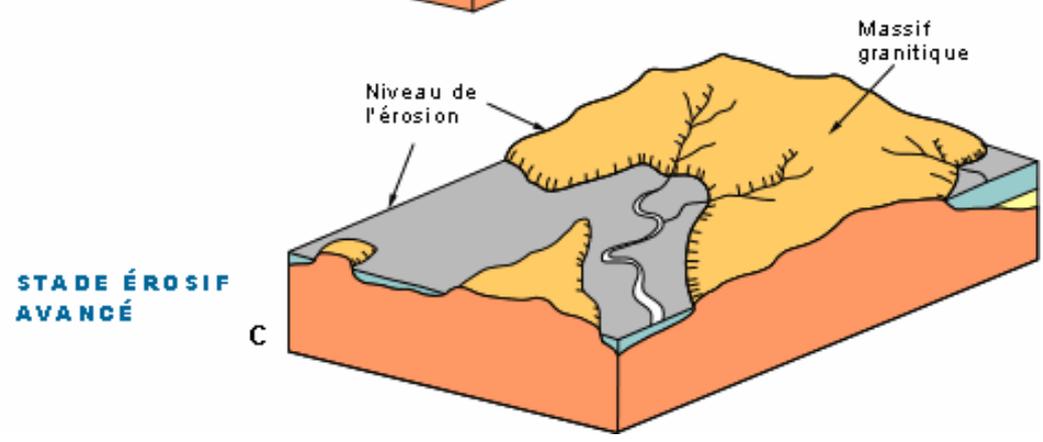
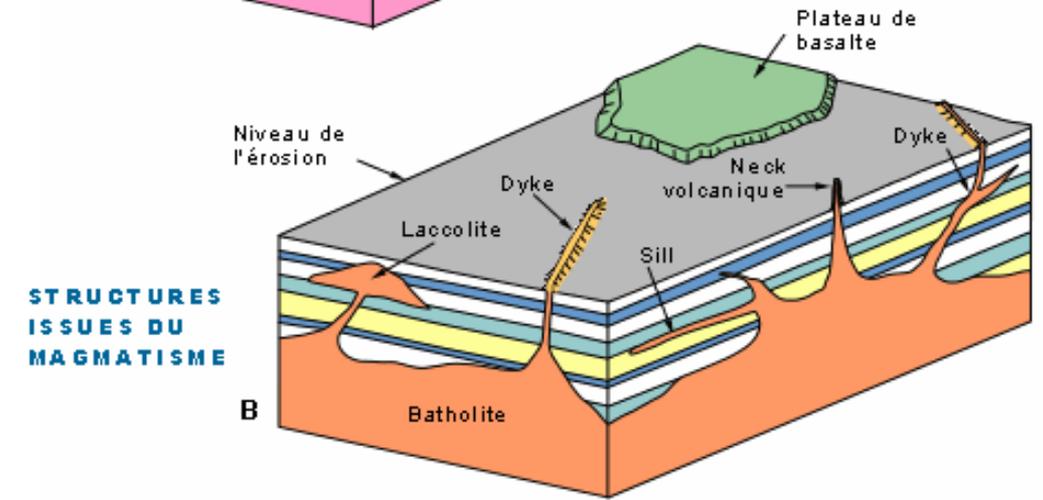


Batholithe : massif de roches plutoniques à section circulaire ou elliptique recoupant l'encaissant, appelé aussi massif intrusif ou circonscrit.

Filon : lame de roche, épaisse de quelques centimètres à quelques mètres de roche magmatique, recoupant l'encaissant, correspondant au remplissage d'une fracture (diacalse, faille) le plus souvent.



Magma 2 : Du magmatisme actif aux structures héritées



Granite chilien sous forme de laccolite (Tores Del Paine, Chili), intrusif dans des sédiments du Crétacé supérieur beaucoup plus sombres. On peut observer à la fois les contacts inférieur (le mur) et supérieur (le toit) de cette intrusion. Le laccolite mesure ici environ 700 à 1000 m d'épaisseur.



Photographie : Maxime Chireux



Neck (plus ultra !) du Salagou

Dyke dans la bauxite (Bédarieux)

Moho océanique (Chypre, R. Bousquet)).
Alternance Dunite serpentinisée (clair) -
Harzburgites (brun), le tout est recoupé par
un filon de plagiogranite. Très différent de
l'Oman car plus petit, avec une richesse des
phénomènes pétrologiques et métallogéniques



Magma 3: Le métamorphisme de contact, témoin indirect du magmatisme

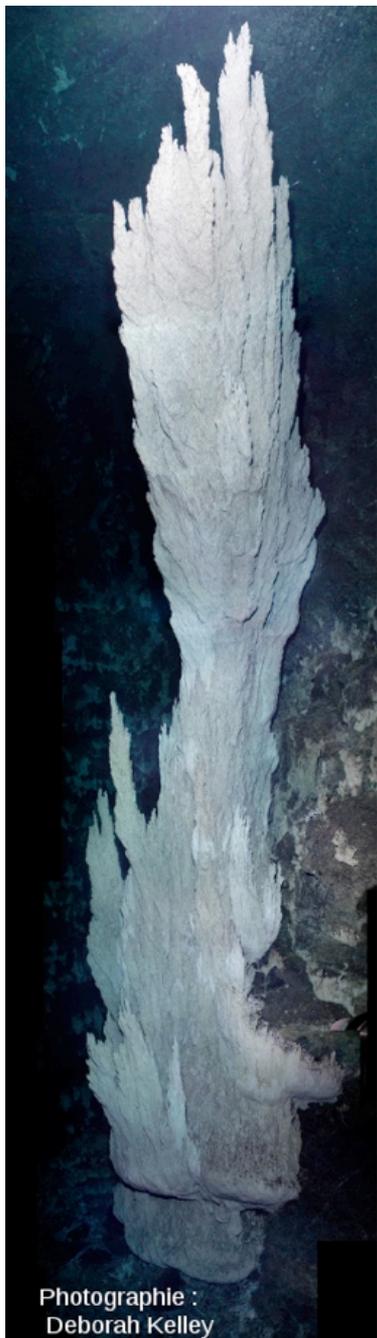


- Crétacé
- Jurassique
- Trias
- Silurien
- Ordovicien
- Cambrien
- Granodiorite cadomienne
- Auréole de métamorphisme
- Briovérien

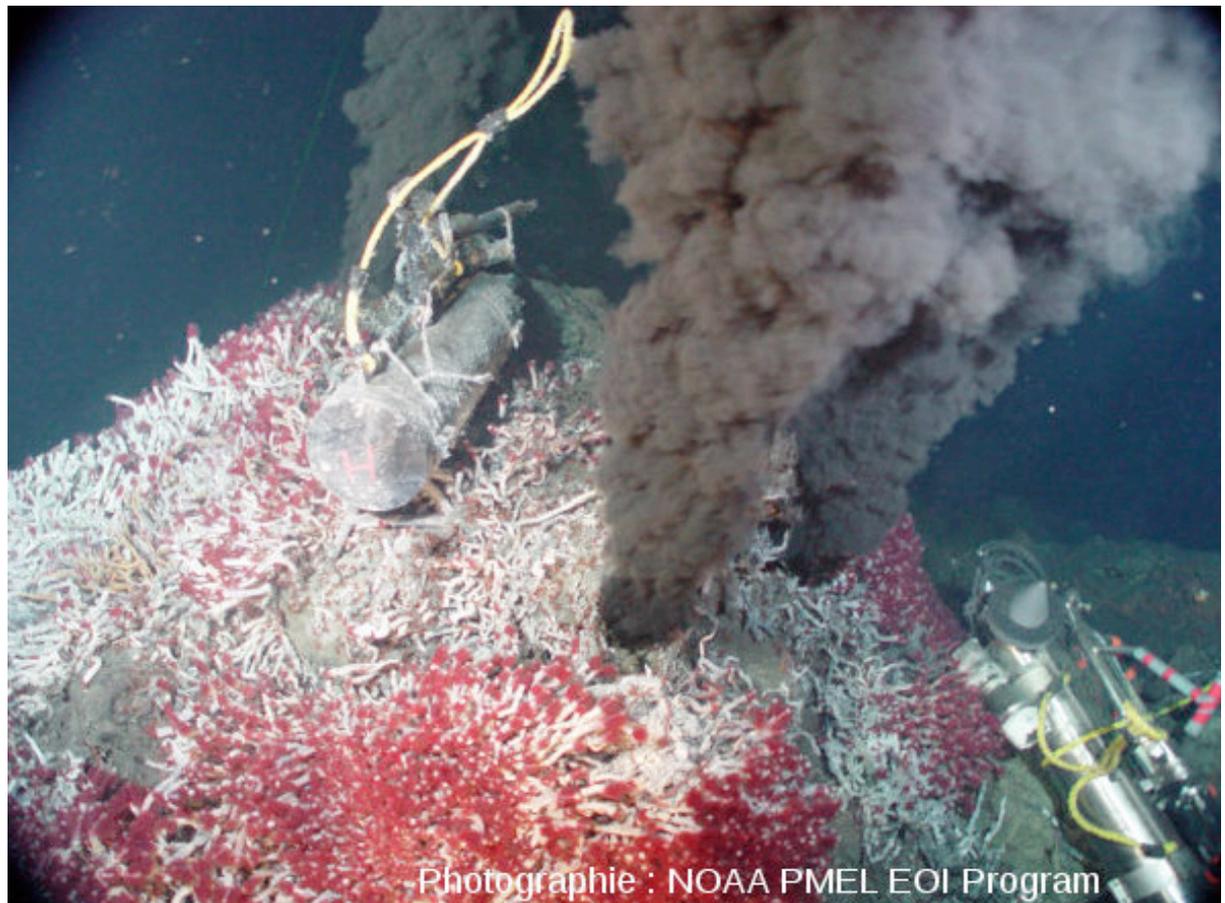
Batholite intrusif dans le Briovérien supérieur, mis en place lors de l'orogénèse cadomienne, vers 550 Ma.
 Il a induit une **auréole de thermométamorphisme** constituée de cornéennes à cordiérite et de schistes tachetés

- 1 Faille affectant la couverture mésozoïque :
1- supposée
- 2 2- observée, avec sens du rejet apparent
- 1 Axe de pli varisque : 1- anticlinal, 2- synclinal
- 2

- Faille inverse varisque
- Faille de socle indifférenciée
- 1 Axe de pli cadomien : 1- anticlinal, 2- synclinal
- 2



Photographie :
Deborah Kelley



Photographie : NOAA PMEL EOI Program

Fumeurs blancs (2001) et fumeurs noirs (1979)

Fumeurs noirs: $T > 350^{\circ}\text{C}$, riche en sulfures

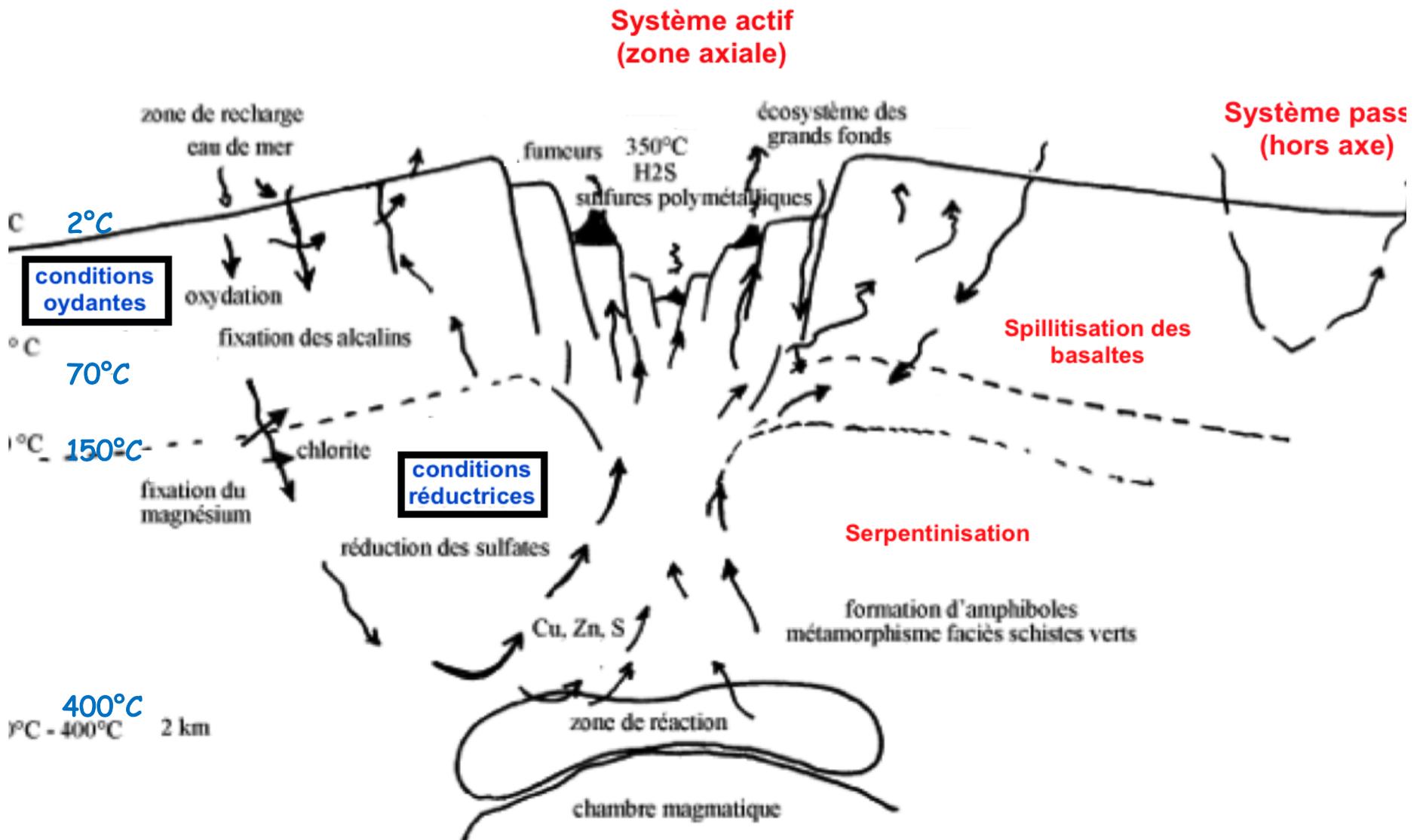
Fumeurs blancs: (CaCO_3) et brucite $(\text{Mg}(\text{OH})_2)$

magmatisme absent ou très faible: péridotite serpentinisée

$T^{\circ}\text{C}$ modérée (40-75 $^{\circ}\text{C}$), pH basique (9 -10), pauvre en H_2S , riche en SO_4^{2-}

Magma 4 : L'hydrothermalisme, témoin indirect du magmatisme

Schéma de circulation hydrothermale dans la croûte océanique au voisinage d'une dorsale.



Spillitisation : transformation du basalte par métamorphisme hydrothermal (FPI → albite et Px → chlorite)
Serpentinisation : transformation des péridotites par métamorphisme hydrothermal (Olivine → serpentine)

Magma 5 : Quelques manifestations du magmatisme effusif

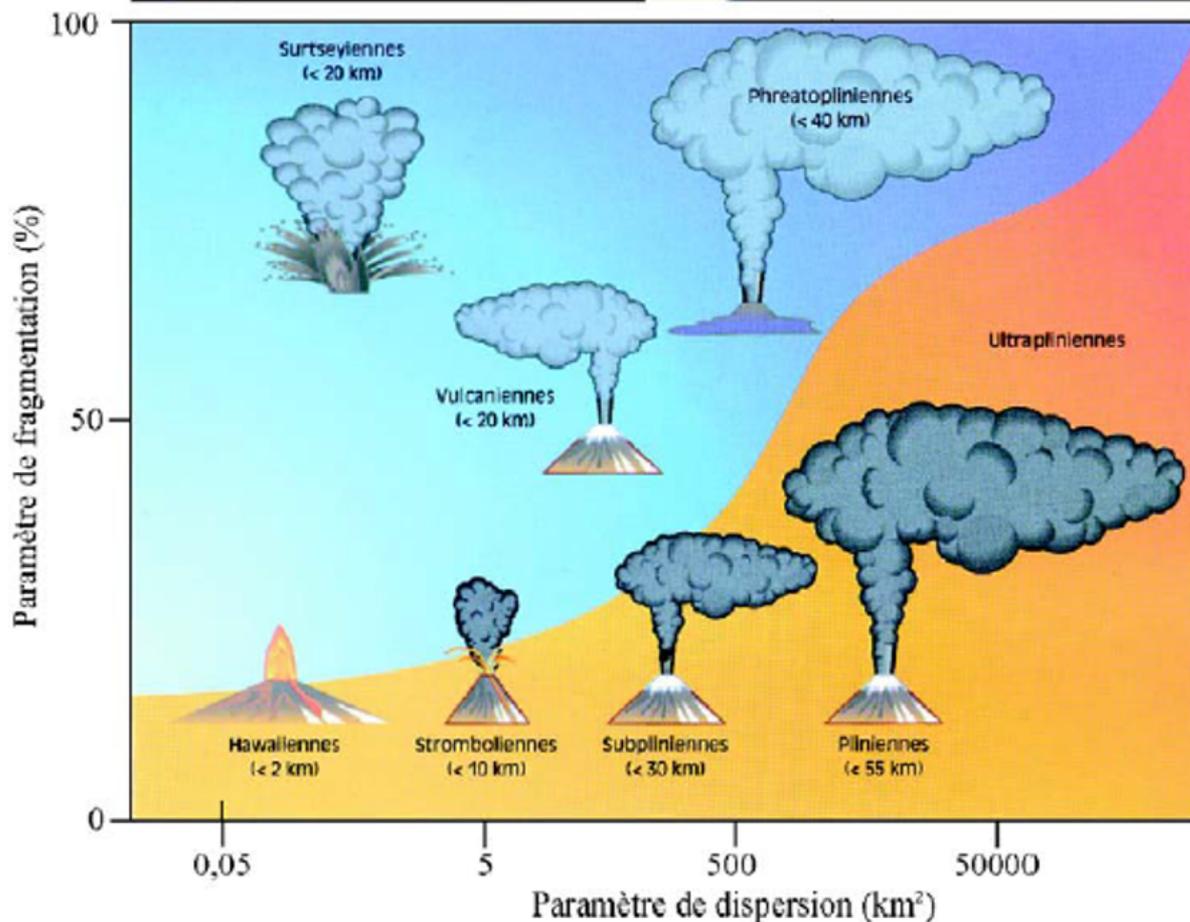


Etna - strombolien



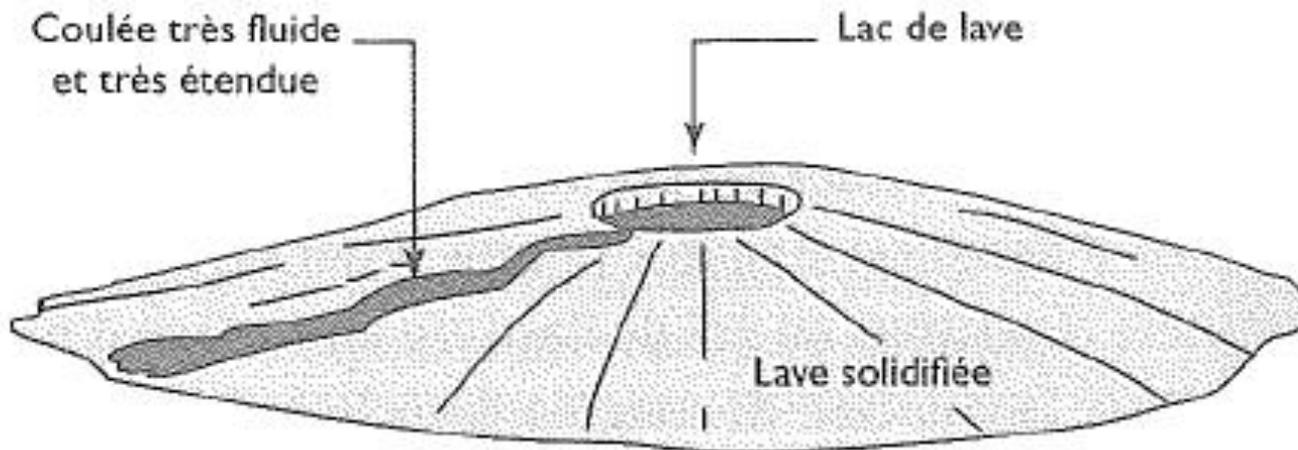
Mont Saint-Hélens

Plinien

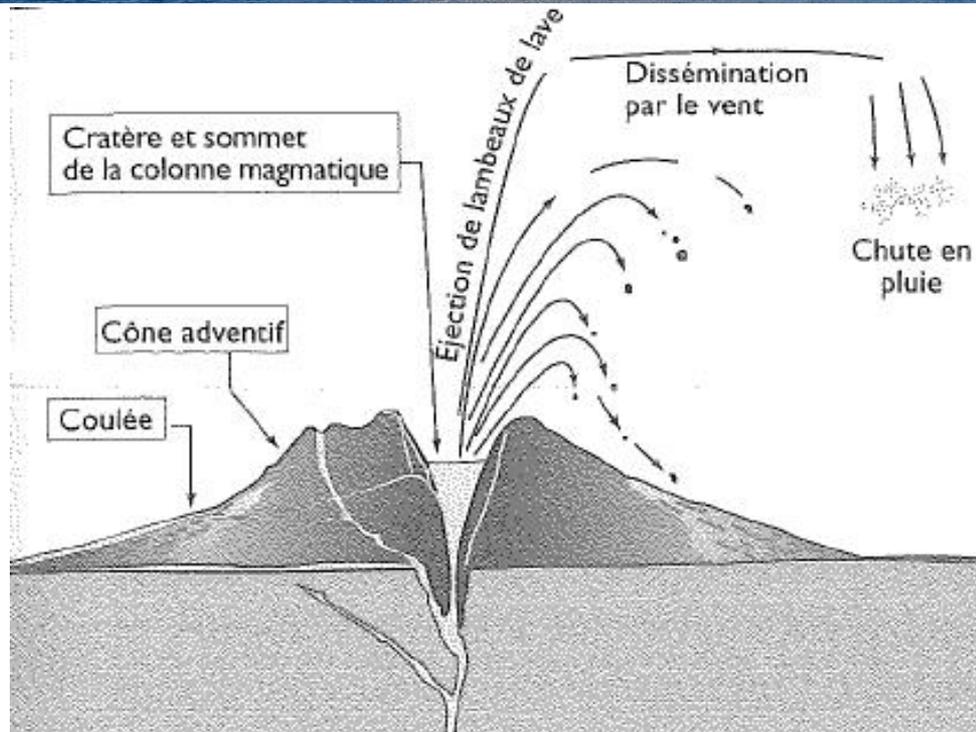




Volcanisme de type hawaïen

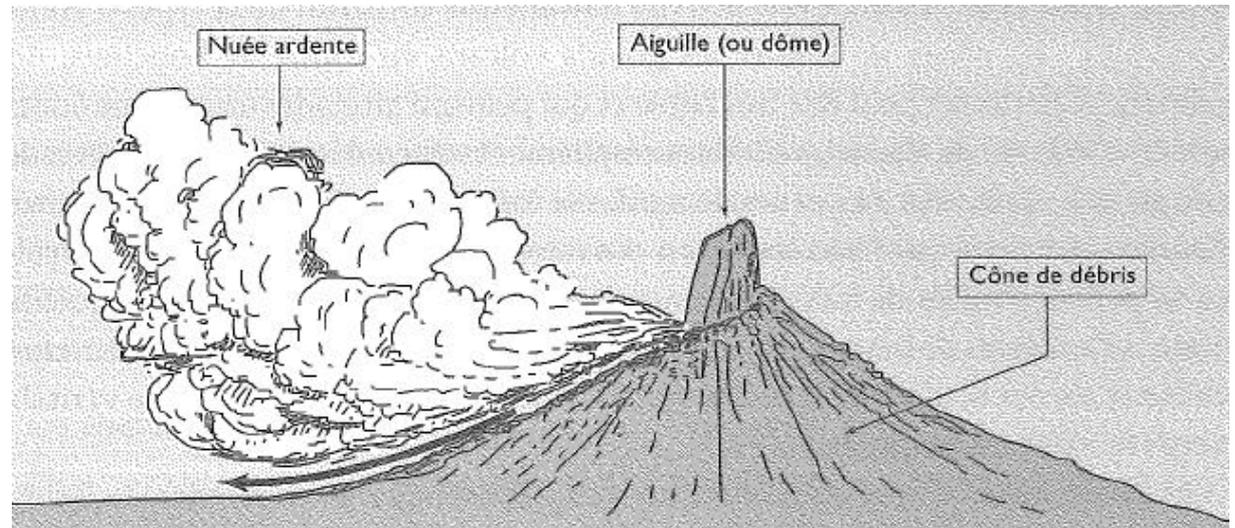


Volcanisme de type strombolien (Etna)



Volcanisme de type Péléen

La Montagne pelée (Martinique)



Le dynamisme associé aux magmas basiques: air libre et sous l'eau

Laves pahoehoe



Pillow lava



Laves aa



Le volcanisme plinien (Mont St Helens)

Nuée ardente dévalant les pentes du mont Saint-Helens après l'explosion de son sommet (1980)



Dôme de lave visqueuse en formation au fond du cratère après l'explosion du mont Saint-Helens (1984)



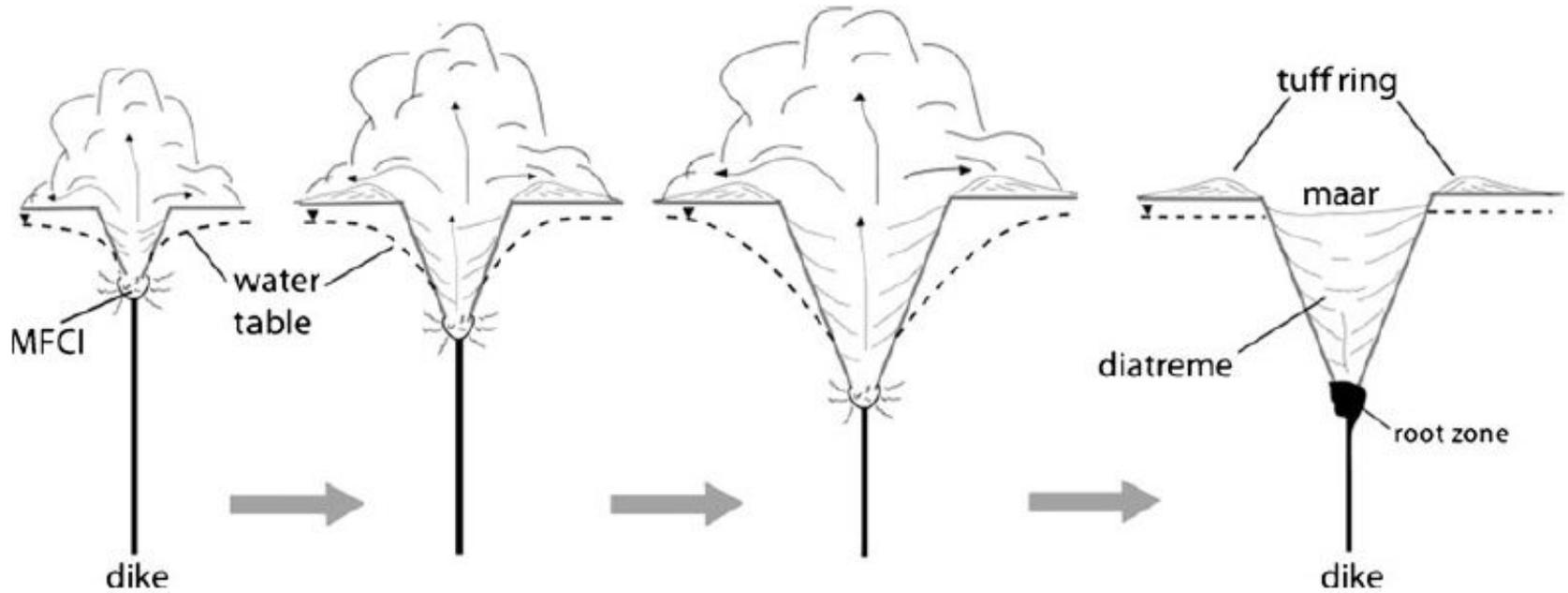
<https://www.youtube.com/watch?v=QLHkyR5a1Lk>



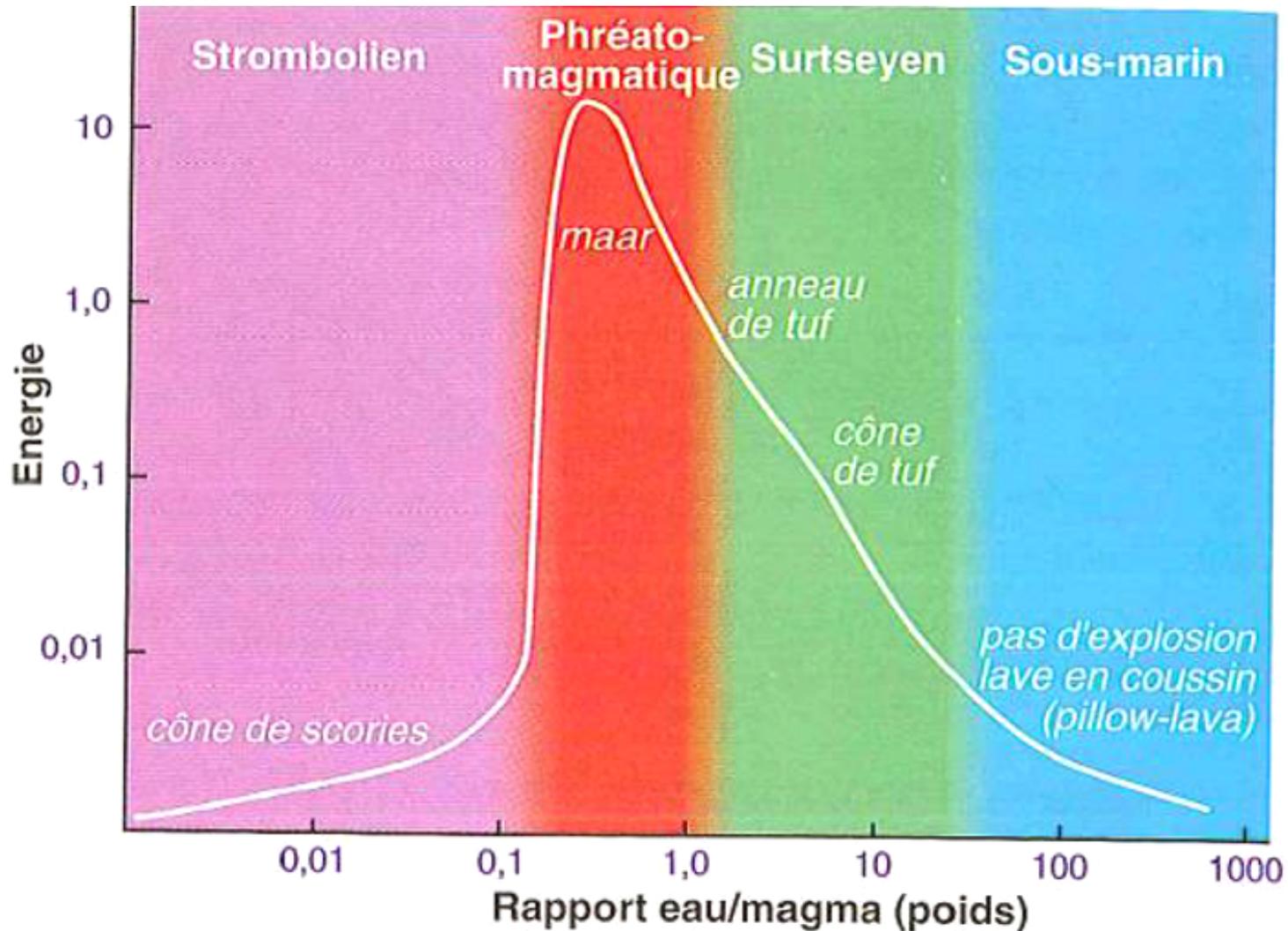
Le phréatomagmatisme

Lac Pavin: Maar

Formation et structure d'un Maar

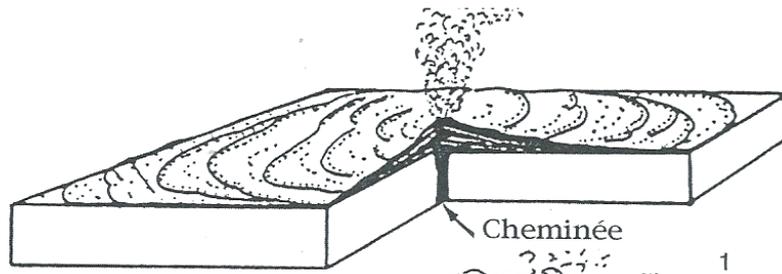


Le dynamisme phréatomagmatique : le rôle de l'eau

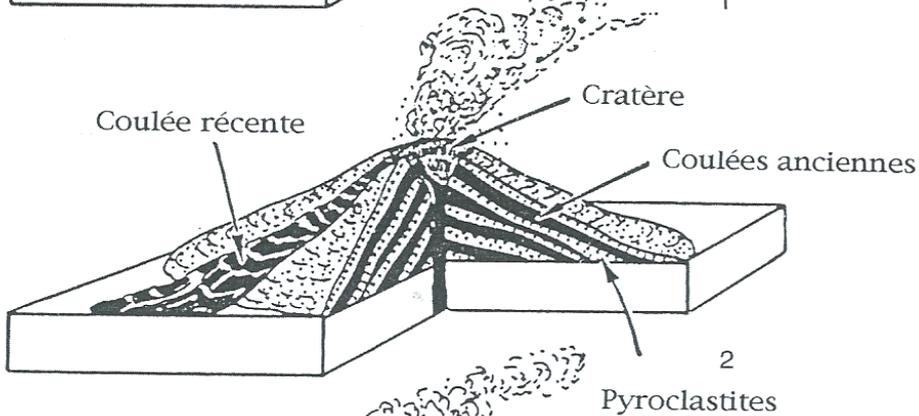


Relation entre l'énergie explosive et le rapport eau-magma, d'après H. Wohletz et R.-G. McQueen, 1984.

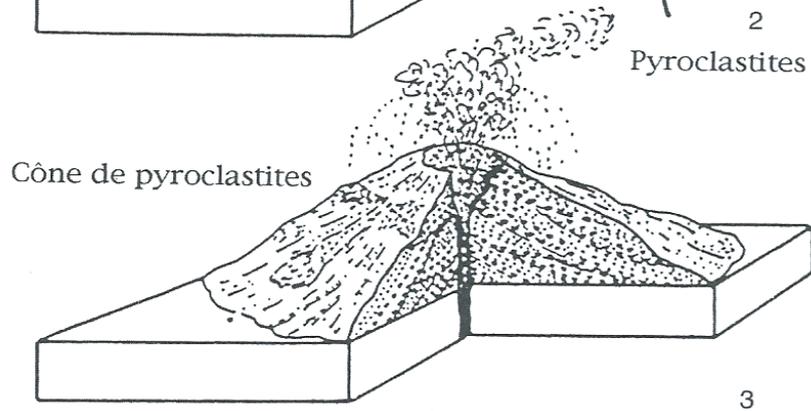
Magma 6 : les différents types de volcans



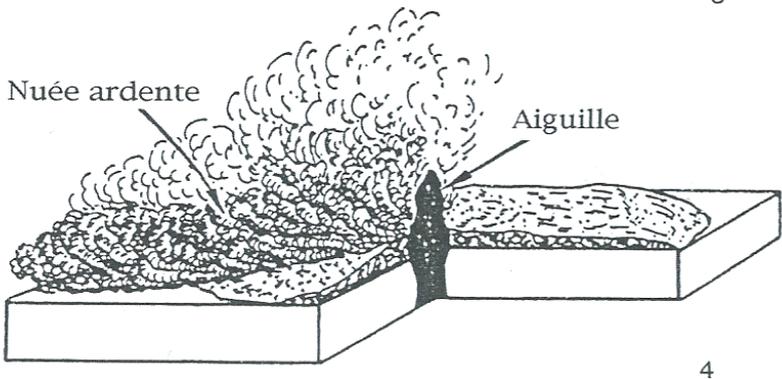
1 : Hawaïen : lave très fluide s'écoulant aisément



2 : Strombolien : lave fragmentée en bombes et scories et coulées successives



3 : Vulcanien : lave visqueuse et fragmentée, cône formé de projections. Le nuage éruptif peut être en forme de pin parasol dans le cas d'éruption plinienne.



4 : Péléen : lave très visqueuse et très riche en gaz produisant des écoulements pyroclastiques (nuées ardentes) et des aiguilles ou dômes dont l'instabilité donne des écoulements gravitaires

La vidéo proposée montre une éruption du piton de la Fournaise à la Réunion qui illustre les modalités de la mise en place des produits volcaniques, même si le contexte géodynamique est totalement différent (magmatisme de point chaud).

Visualisez cette vidéo sur la plage (t10"- t3'10") et identifiez les types de produits mis en place. Reliez ces observations aux productions identifiées sur la carte.

<https://www.youtube.com/watch?v=Cnf32ZbukPE&t=0s>

La vidéo permet de voir :

- *L'architecture d'un volcan avec caldeira*
- *L'organisation d'un cratère principal avec sur son flanc un cratère annexe en activité*
- *Les explosions avec des bulles de gaz en expansion lors de leur remontée*
- *La projection de pyroclastes donnant des cendres (<2 mm), lapillis (<64 mm) et bombes (>64mm) donnant respectivement après consolidation des tufs cendreux, des tufs de lapillis et des brèches pyroclastiques.*
- *Les différents types de laves sont aussi observables avec des laves pahoehoe, aa, à croûte fragmentée, des téphras en boule*
- *La viscosité des pyroclastes et l'écoulement des laves sont observables ceci au cours du temps lors du refroidissement. Différents gradients de refroidissement sont observables.*
- *Les émissions de gaz sont également observables*

I. LES DIFFERENTES FORMES D'EXPRESSION DU MAGMATISME

I.1. Les traces actuelles et passées de l'activité magmatique

I.2. Répartition mondiale des roches magmatiques

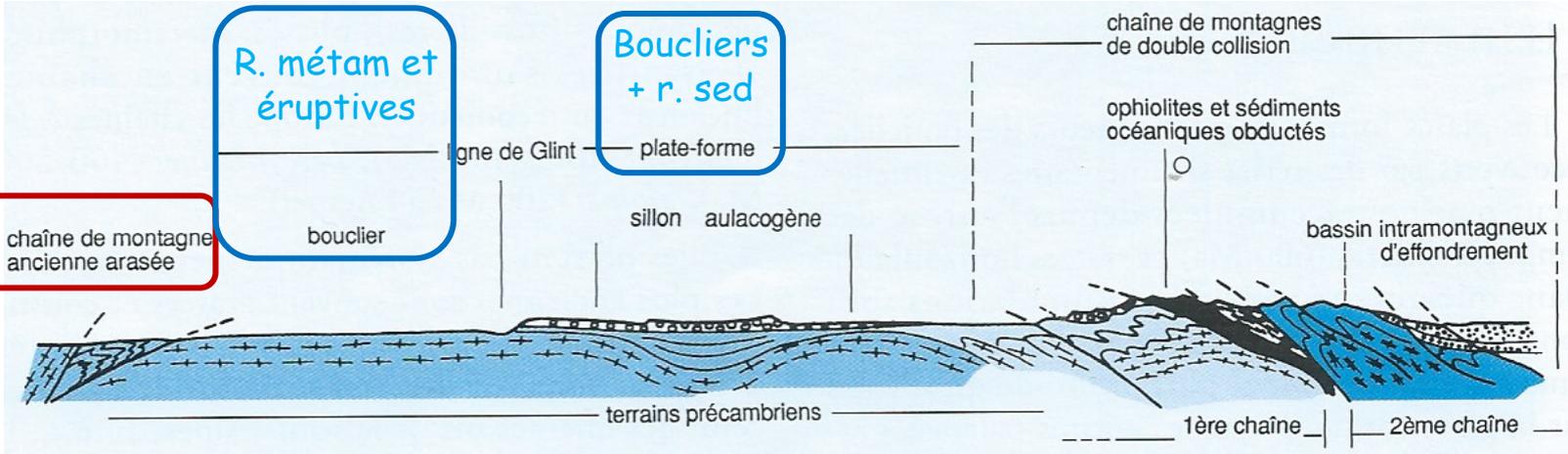
I.2.1. Les roches de la croûte continentale

I.2.2. Répartition planétaire des volcans

Paléozoïque

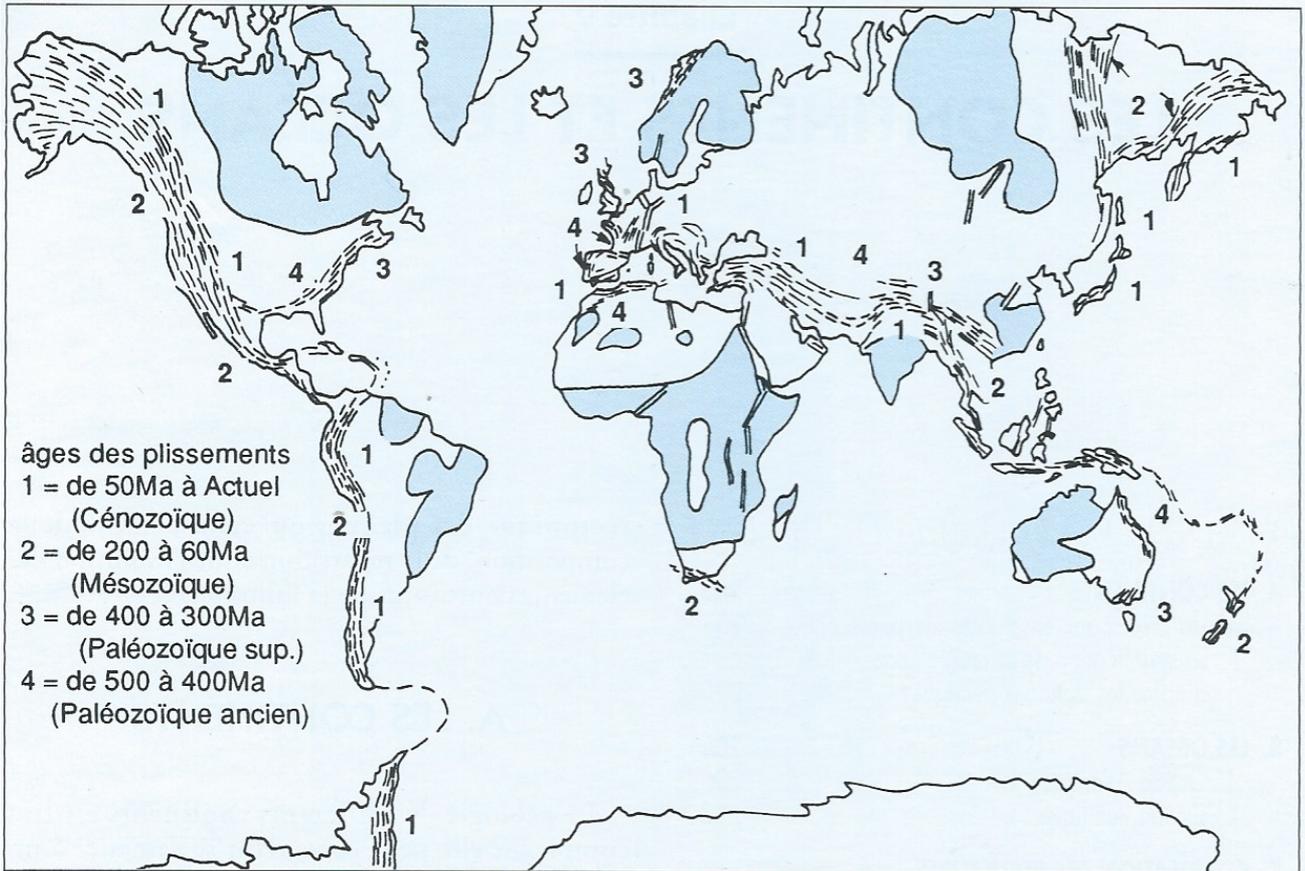
R. métam et éruptives

Bouliers + r. sed



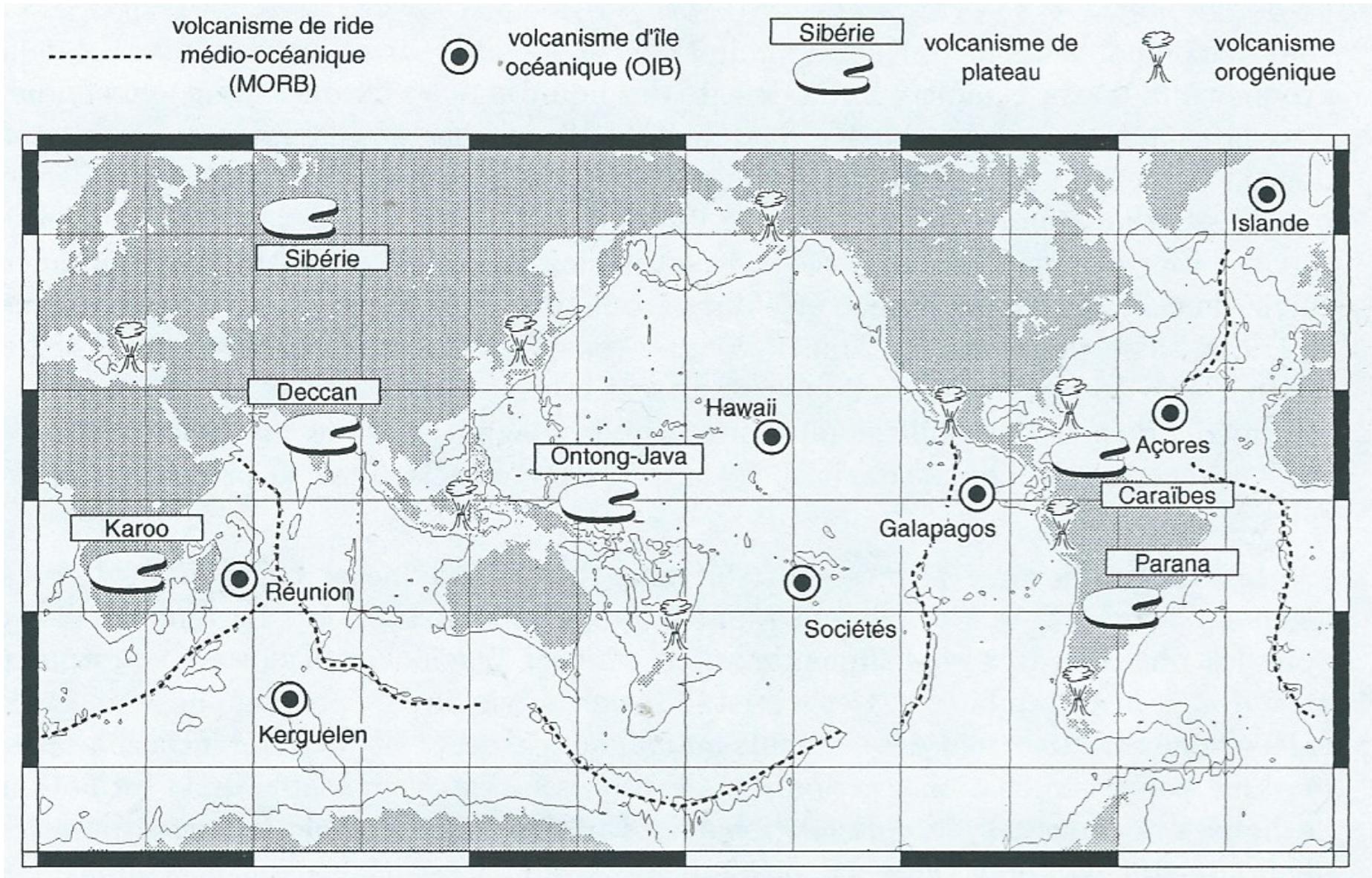
Magma 7 : Les roches de la croûte continentale (in Dercourt & Paquet, 2002)

Bouliers en bleu.
 Chaînes de montagnes récentes (< 140 Ma) disposées en 2 grandes ceintures : péripacifique et une ceinture alpine ou téthysienne (volcanisme moins intense).
 Fossés ou grabens ou rifts, zones de distension de 50 à 100 km figurés par un double trait.



Magma 8 Distribution géographique des différents types de volcanisme

(in Albarede La géochimie 2001 GIB)



I. LES DIFFERENTES FORMES D'EXPRESSION DU MAGMATISME

I.1. Les traces actuelles et passées de l'activité magmatique

I.2. Répartition mondiale des roches magmatiques

I.3. Magmatisme et contextes géodynamiques

I.3.1. Les trois contextes géodynamiques du volcanisme

I.3.2. Les principales roches magmatiques

I.3.3. Les informations apportées par les signatures géochimiques

A. L'identification de la source des magmas

B. Magmatisme actuel et archéen

1. La croûte archéenne est d'origine mantellique

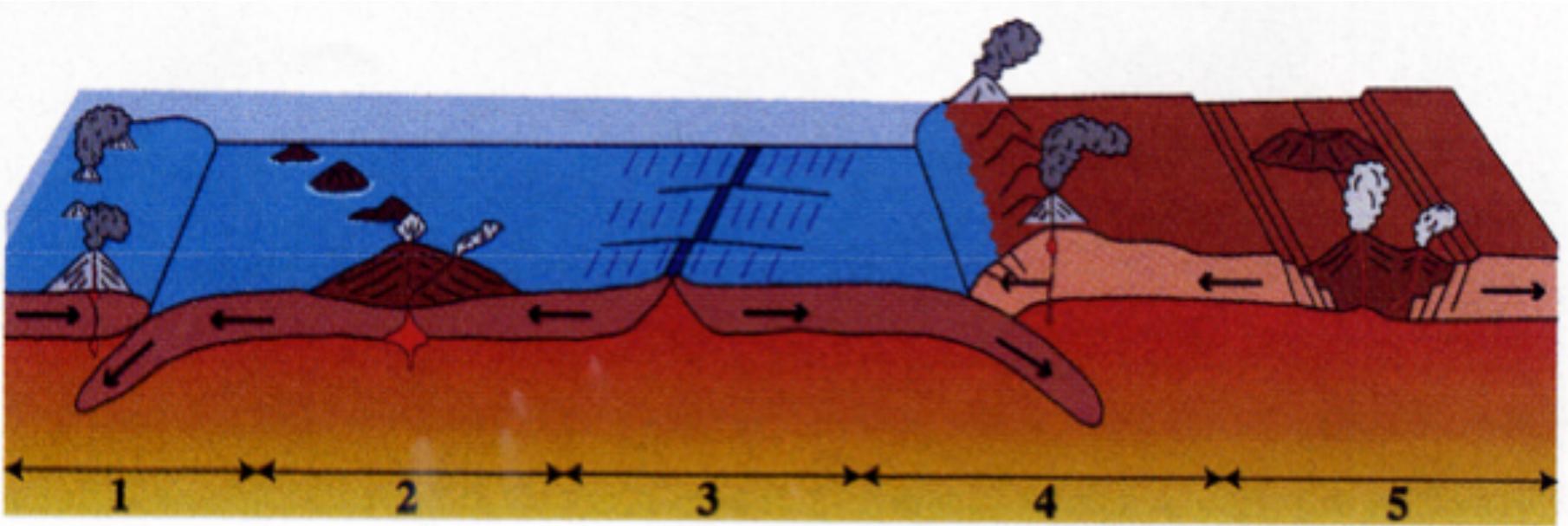
1.1. Les données des TTG et des éléments traces

1.2. Chondrites et traceurs radioactifs

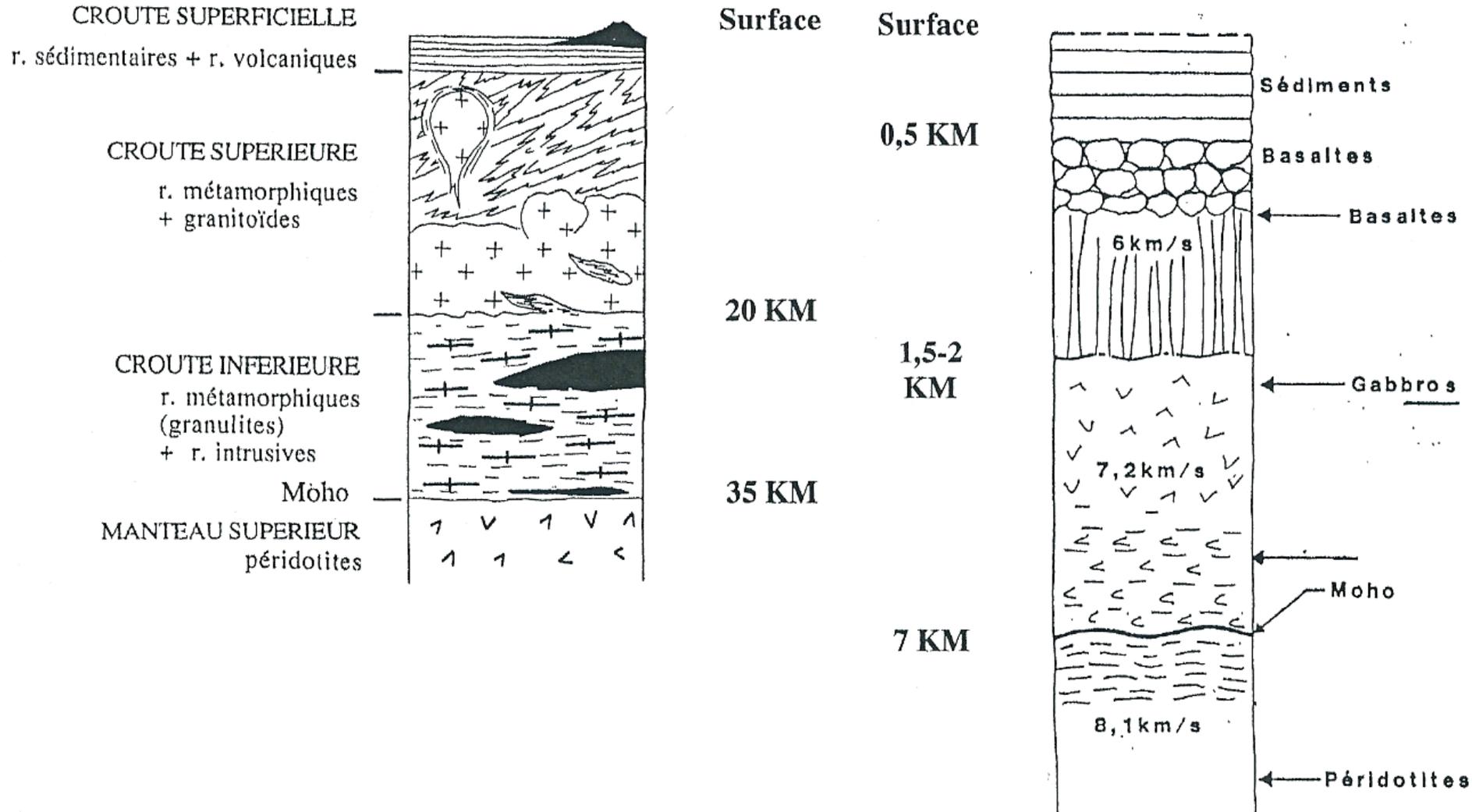
2. Quand et comment les continents se sont donc formés ?

Magma 9 Contextes géodynamiques caractérisés par la présence de volcanisme actif (in courrier de la NATURE spécial volcans 2003)

1 : Arc insulaire (subduction) ; 2 : Point chaud ; 3 : Dorsale océanique (accrétion) ; 4 : Marge continentale active (subduction) ; 5 : Rift continental (accrétion)

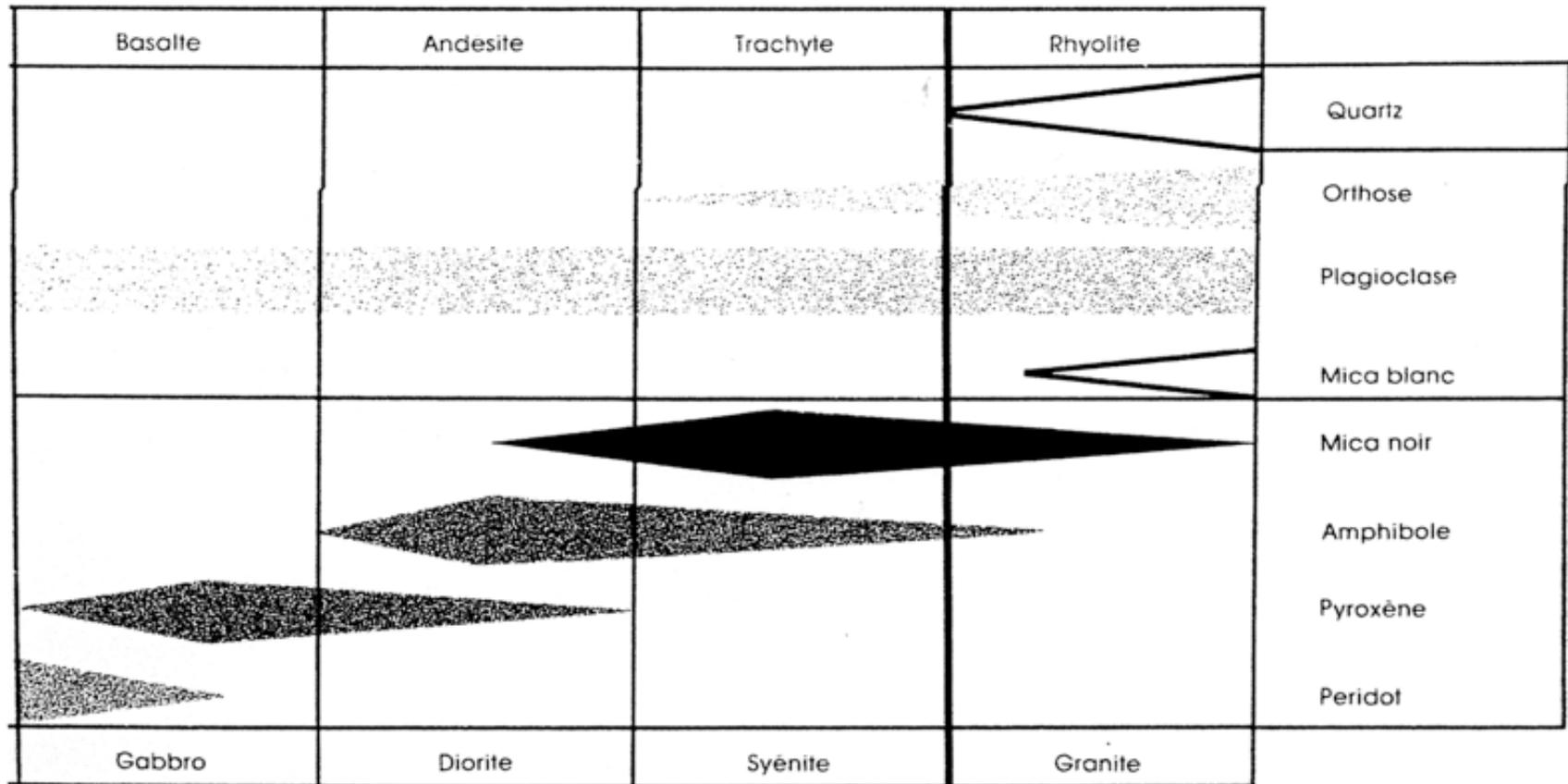


Magma 10 Comparaison schématique de la croûte continentale et de la croûte océanique (échelle verticale non respectée sur les schémas)



Magma 11: Les principales roches magmatiques

Roches à structure microlithique (roches effusives)



Roches à structure grenue (roches intrusives)



basalte

andésite

trachyte

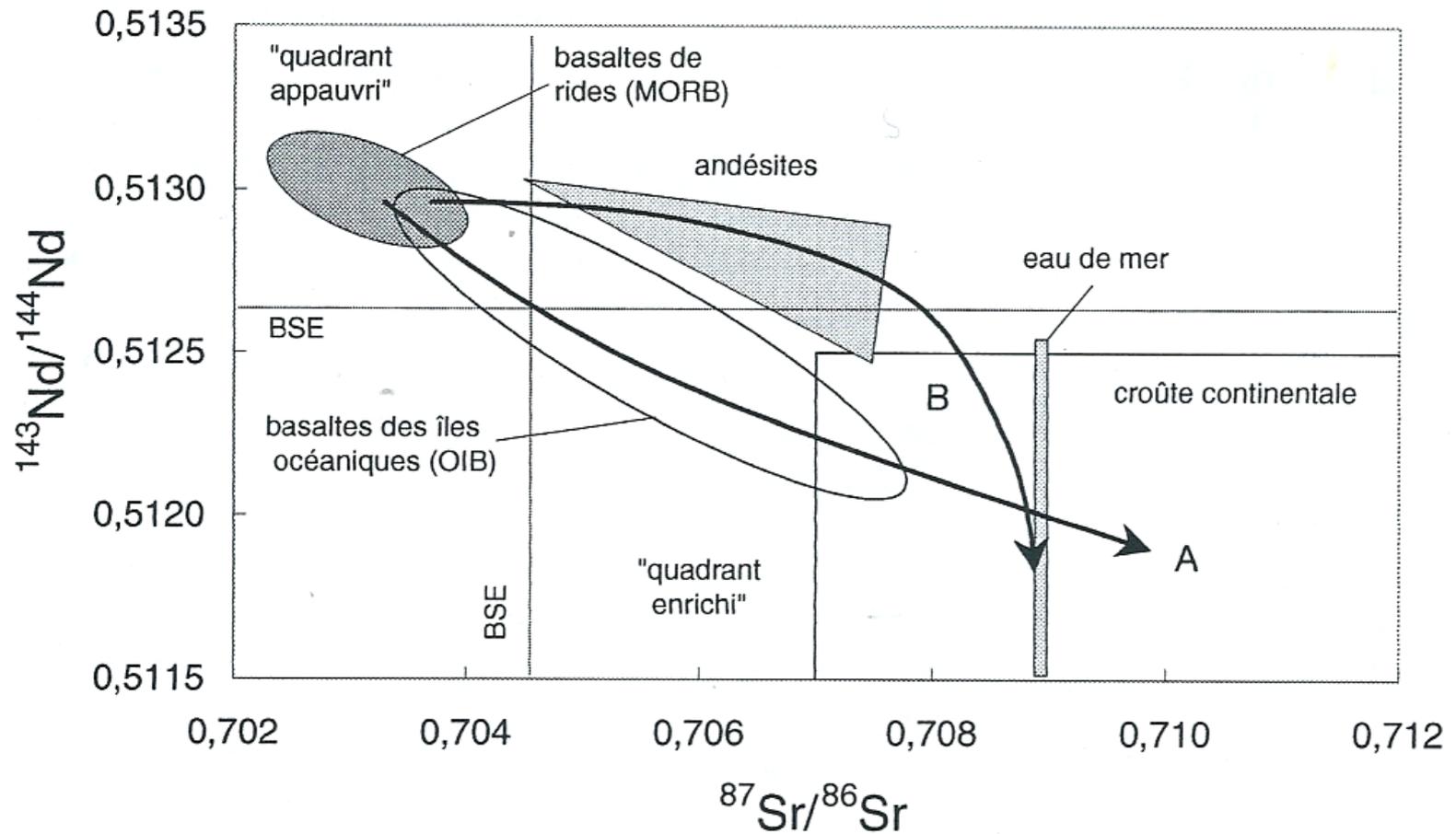
gabbro

diorite

syénite



Magma 12 : Identification de la source des magmas



BSE = Bulk Silicate Earth = terre silicatée moyenne = Chondrite

Composition modale ou normative d'une roche magmatique

-**Mode** : composition minéralogique effective de la roche telle qu'elle résulte d'une observation au microscope

C'est une composition **volumétrique**



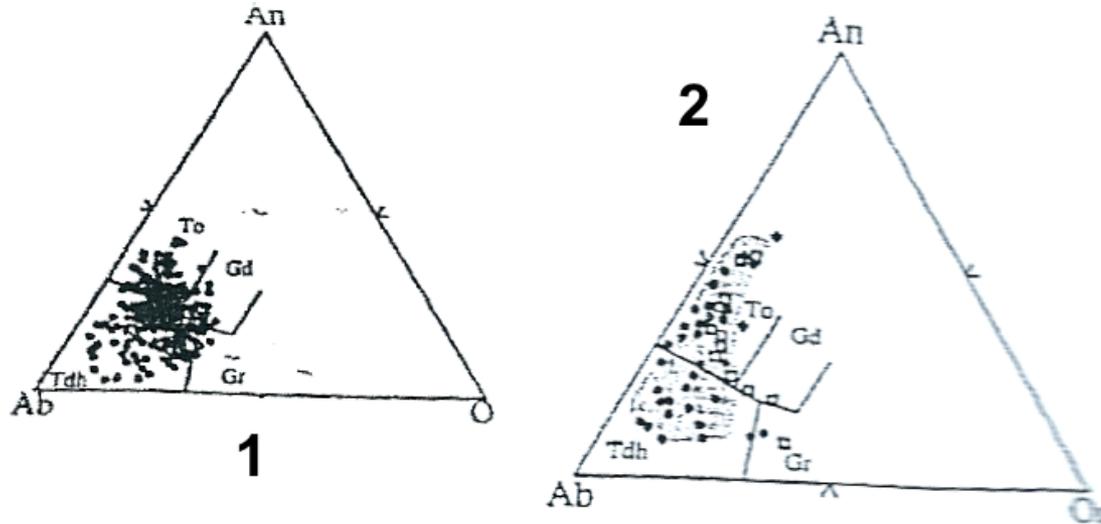
→ Ne peut s'appliquer que pour les roches grenues

-**Norme** : composition minéralogique virtuelle d'une roche, établie par calcul à partir d'une analyse chimique

Permet de reconstituer les minéraux virtuels qui constitueraient la roche si elle était entièrement cristallisée (ex : roche volcanique avec verre)

Oxydes	Pourcentages pondéraux (%)	Calcul Normatif	
		Minéraux	Pourcentages pondéraux
SiO ₂	73,3	Quartz (Qz)	33,2
TiO ₂	0,2	Orthose (Or)	31,7
Al ₂ O ₃	13,4	Albite (Ab)	25,1
Fe ₂ O ₃	1,2	Anorthite (An)	5,0
FeO	0,7	Nepheline (Ne)	-
MnO	0,1	Diopside (Di)	0,8
MgO	0,3	Hypersthène (Hy)	
CaO	1,1	Olivine (Ol)	-
Na ₂ O	3,0	Magnétite (Mt)	1,9
K ₂ O	5,3	Ilménite (Il)	0,5
H ₂ O ⁺	0,8	Apatite (Ap)	0,2
CO ₂	-		
P ₂ O ₅	0,1		

Magma 13 : Les TTG (Tonalite, Trondjenite et Granodiorite) et les amphibolites



1. Diagramme normatif An-Ab-Or des TTG

2. Diagramme normatif An-Ab-Or des liquides engendrés par la fusion expérimentale d'un mélange de basalte et d'amphibolites, roches de la lithosphère océanique

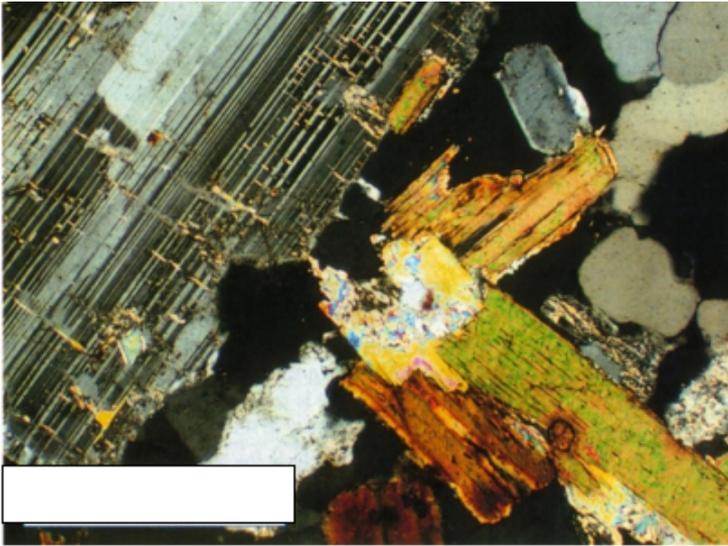
An: anorthite (FPL Calcique);

Ab: FPL sodique;

Or: orthopyroxène

ANALYSE DE LA COMPOSITION CHIMIQUE ET DE LA COMPOSITION MINÉRALOGIQUE DES ROCHES MAGMATIQUES

Positionnez la roche photographiée ci-contre en lame mince dans le diagramme QAP de Streckeisen



Composition modale déduite de

Composition modale :

Quartz SiO_2 : 30%

Feldspaths alcalins $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$: 30%

Plagioclase $(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$: 20%

Biotite $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$: 12%

Amphibole : 8%

Composition modale :

Quartz SiO_2 : 30% ; Feldspaths alcalins $(\text{K,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$: 30% ;

Plagioclase $(\text{Ca,Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$: 20%

Biotite $\text{K}(\text{Mg,Fe})_3(\text{OH})_2(\text{Si}_3\text{AlO}_{10})$: 12% ; Amphibole : 8%

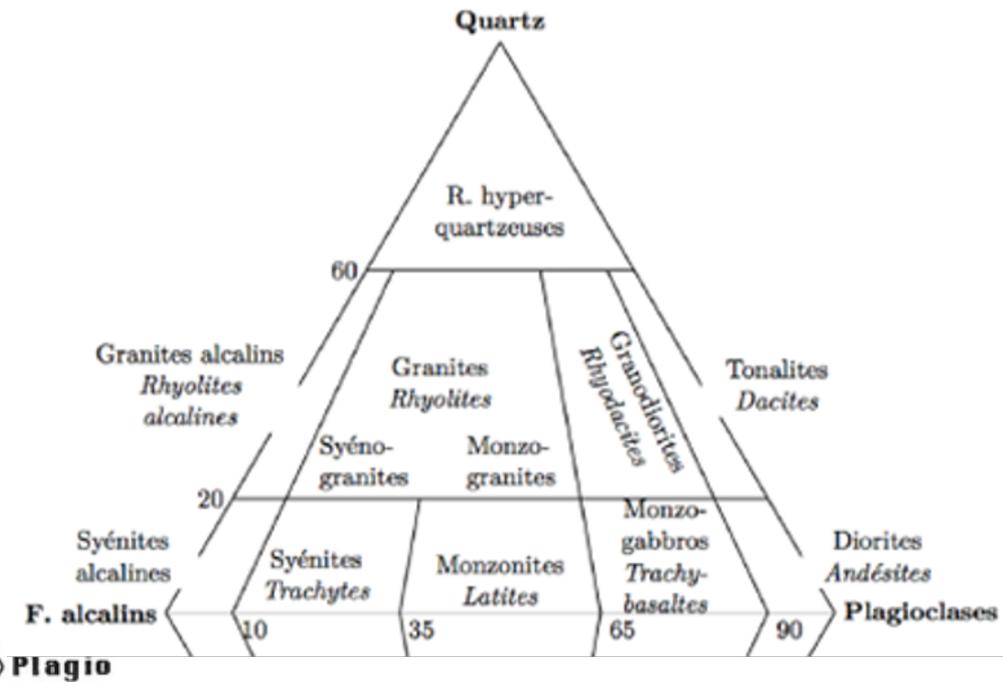
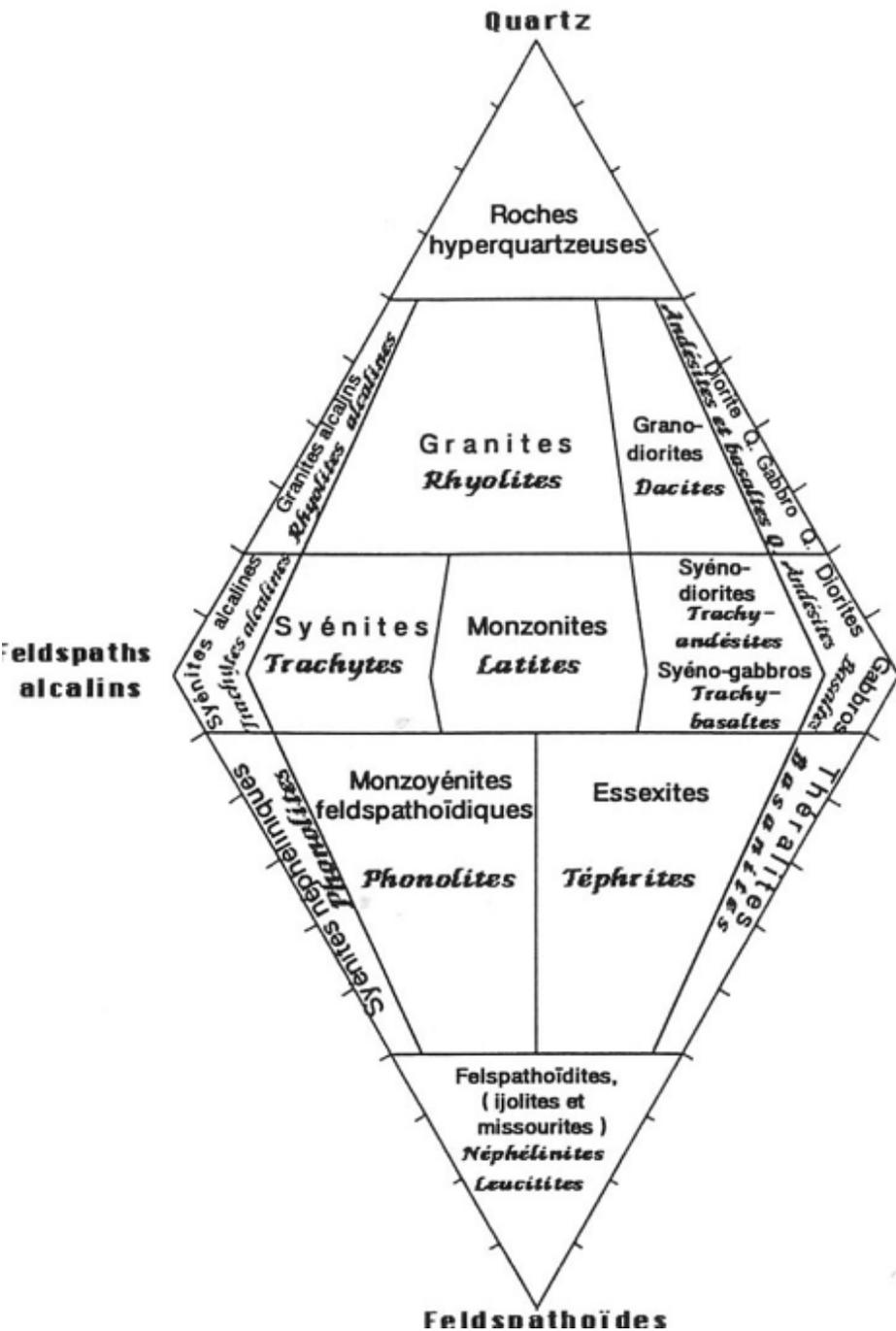
QAP : 30% + 30% + 20 % = 80% au total

→ Produit en croix

$$\text{Qz} = \text{Q} = 30 \times 100 / 80 = 37,5\%$$

$$\text{Fd alc} = \text{A} = 30 \times 100 / 80 = 37,5\%$$

$$\text{Plagio} = \text{P} = 20 \times 100 / 80 = 25\%$$



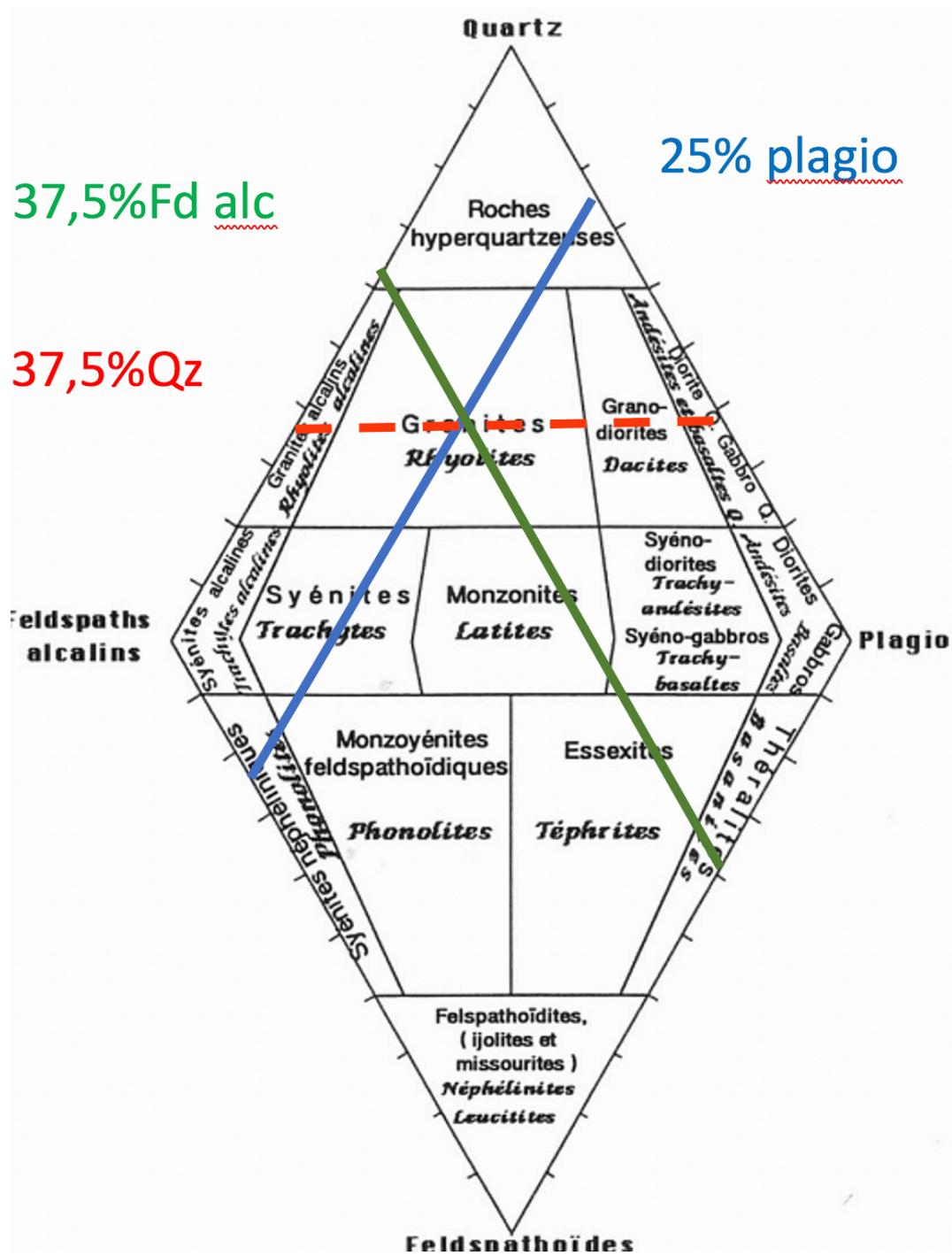
QAP : 30% + 30% + 20 % = 80%

➔ Produit en croix

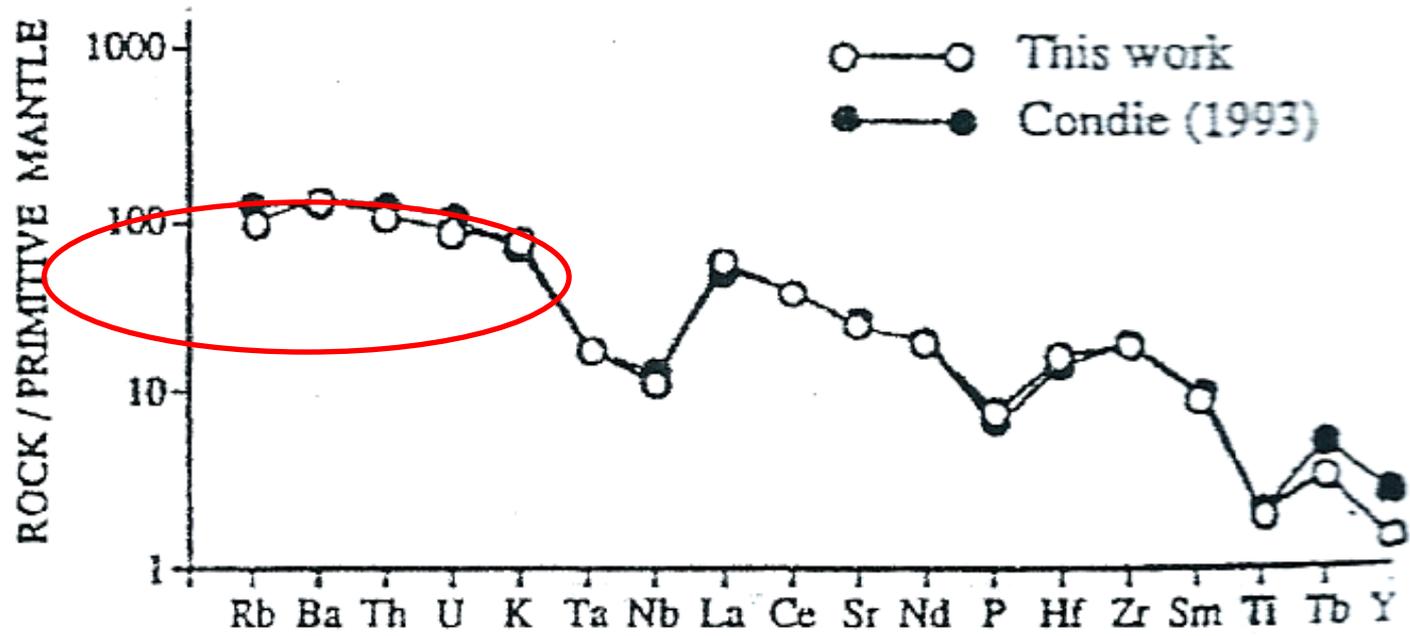
Quartz = $30 \times 100 / 80 = 37,5\%$

F Alcalins = 37,5%

F Plagioclases = 25%



Magma 14 : Les TTG et le manteau primitif



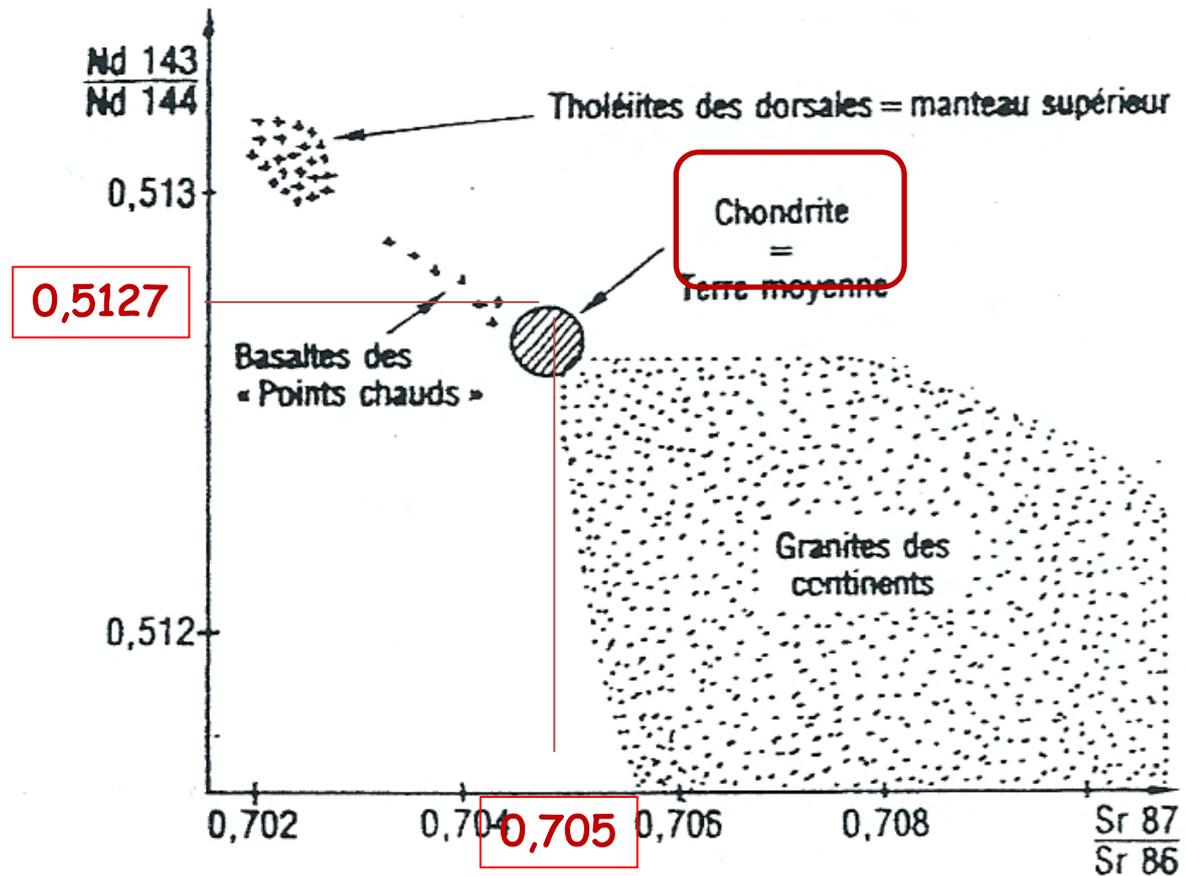
Plus incompatibles



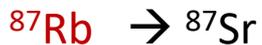
Moins incompatibles

100 fois plus d'incompatible que la terre moyenne (BSE = terre silicatée globale = chondrites) suggérant une origine enrichie : les roches archéennes ont une origine mantellique.

Magma 15 : Diagramme Strontium-Néodyme des différentes roches terrestres (in P. Thomas, Enseigner la géologie au collège et au lycée, Nathan)



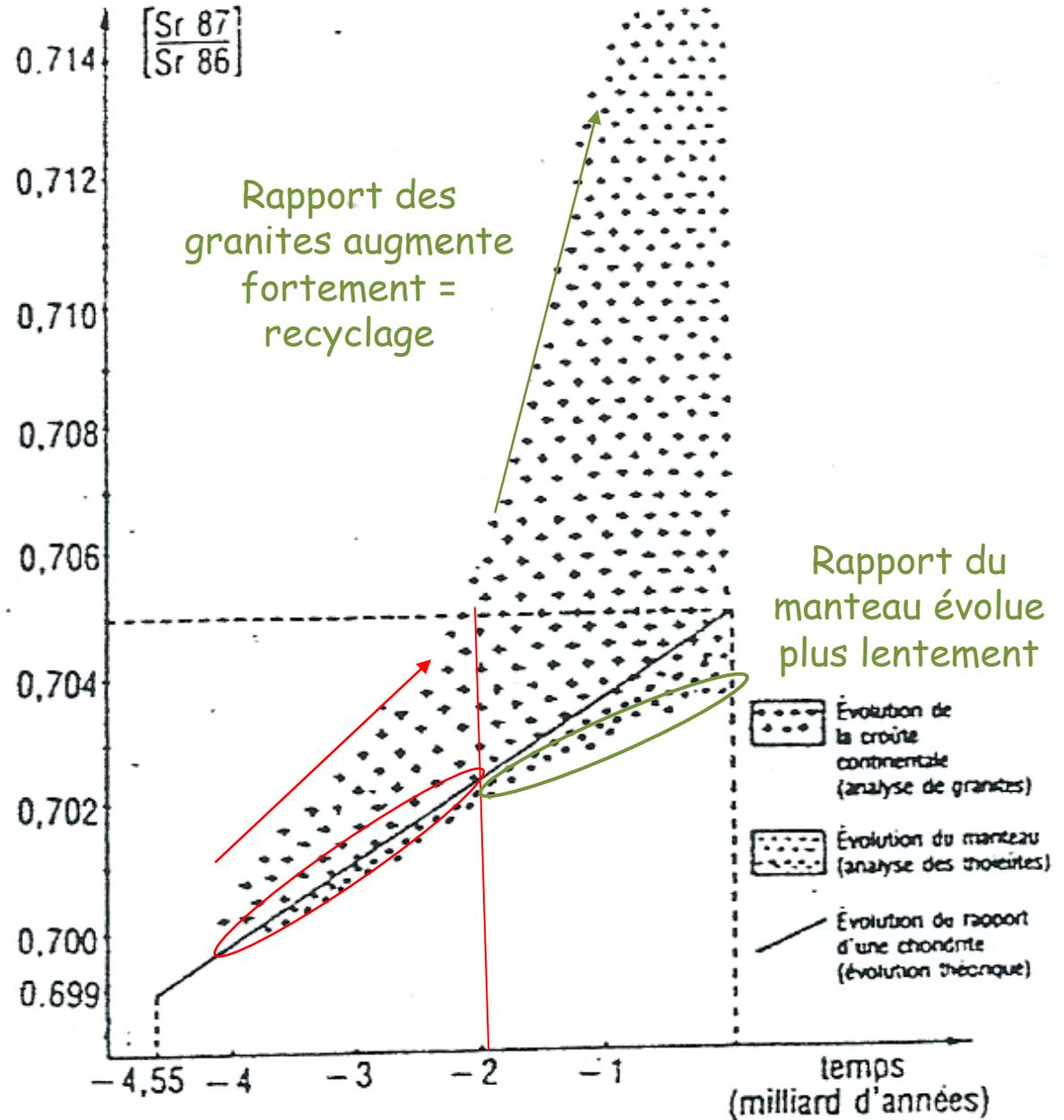
Incompatible



Compatible

Rb passe préférentiellement dans la croûte continentale et Sm dans le manteau. Leurs éléments fils se partagent donc produits en quantités différentes dans la croûte et le manteau. $^{87}Sr/^{86}Sr = 0,705$ et $^{143}Nd/^{144}Nd = 0,5127$ dans les chondrites. On considère qu'ils sont représentatifs de la terre globale. A partir d'un matériau primitif de composition chondritique il y aurait eu extraction de croûte laissant un résidu, le manteau supérieur. Ce n'est pas le cas des basaltes des points chauds.

Magma 16 : Représentation schématique du rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ au cours du temps
 (in P. Thomas, Enseigner la géologie au collège et au lycée, Nathan)



Rapport du manteau non modifié
 Rapports du granite et du manteau suivent l'évolution chondritique : CC peu abondante

I.4. Comment dater les événements magmatiques ? (Cours BCPST 1)

I.4.1. Dater des événements les uns par rapport aux autres.

Grands principes, établis dès 1669 par Nicolas Sténon, permettant de dater relativement des événements géologiques à toutes les échelles.

Le principe de superposition

Toute couche sédimentaire est plus récente que celle qu'elle recouvre et plus ancienne que celle qui la recouvre.

Ce principe est valable quelle que soit l'échelle considérée, celle du microscope ou celle du paysage.

Le principe de recoupement

1. Ce qui déforme est toujours postérieur à l'objet géologique déformé.
2. On ne peut dater relativement deux événements que s'ils sont sécants.

Les intrusions magmatiques sont postérieures à l'encaissant qu'elles traverse

Le principe d'inclusion

Ce principe s'applique à l'échelle de l'affleurement, de la roche (inclusions dans des roches magmatiques) mais aussi à l'échelle des minéraux : dans ce cas, les inclusions permettent de déterminer une chronologie de cristallisation.

Magma 3: Le métamorphisme de contact, témoin indirect du magmatisme



Batholite intrusif dans le Briovérien supérieur, mis en place lors de l'orogénèse cadomienne, vers 550 Ma.
 Il a induit une **auréole de thermométamorphisme** constituée de cornéennes à cordiérite et de schistes tachetés

- 1- - - - - Faille affectant la couverture mésozoïque :
 1- supposée
 2- observée, avec sens du rejet apparent
- 1- - - - - Axe de pli varisque : 1- anticlinal, 2- synclinal

- - - - - Faille inverse varisque
- - - - - Faille de socle indifférenciée
- 1- - - - - Axe de pli cadomien : 1- anticlinal, 2- synclinal

I.4. Comment dater les événements magmatiques ? (Cours BCPST 1)

I.4.1. Dater des événements les uns par rapport aux autres.

I.4.2. La radiochronologie

A. Principe général de la radiochronologie (cf Cours BCPST 1)

Couples utilisés en radiochronologie imposés par le programme

Élément père (radioactif)	Élément fils (radiogénique)	Période T en années	Matériaux
^{40}K	^{40}Ar	$1,25 \times 10^9$	Micas, Feldspaths, muscovite
^{238}U	^{206}Pb	$4,47 \times 10^9$	Zircon
^{235}U	^{207}Pb	$0,704 \times 10^9$	Zircon
^{14}C	^{14}N	5730	Bois, os, peintures

Gammes d'âges

K/Ar: 1 Ma à 4 Ga

U/Pb: Qqs dizaines de Ma

C/N: < 50 000 ans

B. La méthodes K/Ar

1. Désintégration et difficultés techniques
2. Contournement des difficultés
3. Âges plateau et âges in situ

1. Désintégration et difficultés techniques

Cette méthode se base sur la désintégration naturelle de l'isotope ^{40}K en ^{40}Ar .

$$^{40}\text{Ar} = ^{40}\text{Ar}_0 + 40\text{K} (e^{\lambda t} - 1)$$

Équation a deux inconnues, mais l'argon étant un gaz rare il n'interagit pas ou peu avec les réseaux cristallins : il est ainsi expulsé lors de la cristallisation de la roche $\rightarrow ^{40}\text{Ar}_0 = 0$.

On a donc : $^{40}\text{Ar} = 40\text{K} (e^{\lambda t} - 1)$

Problème: impossible de mesurer les teneurs d'un élément solide (K) et d'un élément gazeux (Ar) dans le même appareil. \rightarrow technique ingénieuse développée dans les années 1970.

2. Contournement des difficultés

Travail en phase gazeuse → utilisation d'un seul appareil de mesure.

Échantillon bombardé par un flux de neutrons dans un accélérateur nucléaire et le potassium qu'il contient se désintègre alors en ^{39}Ar .

Le taux de transformation de ^{40}K en ^{39}Ar est une constante qui peut être déterminée en irradiant un standard. Cette méthode permet de mesurer simultanément l'isotope fils naturel ^{40}Ar et ^{39}Ar isotope fils induit par désintégration de l'isotope père ^{40}K

L'argon (^{39}Ar et ^{40}Ar) est ensuite libéré par chauffage du minéral jusqu'à sa fusion. Les gaz obtenus sont purifiés pour ne garder que les isotopes de l'argon. Les rapports isotopiques sont alors déterminés par spectrométrie de masse.

3. Âges plateau et âges in situ

Ages plateau

Cette méthode consiste à chauffer (four ou laser) par palier le minéral entier ou réduit en poudre. A chaque palier, la quantité d'argon dégazé est quantifiée et un âge est estimé. On peut ainsi représenter les différentes estimations d'âges pour chaque palier, c'est-à-dire pour les pourcentages d'argon dégazé. L'âge est estimé en conservant les pas de chauffage cohérents et consécutifs entre eux qui représentent plus de 50% de l'argon dégazé : on parle d'âge plateau.

Ages in situ

Dans cette méthode, seule une portion d'un minéral est chauffée en une fois jusqu'à la fusion. Les gaz sont purifiés et quantifiés et un âge est proposé. Cette méthode permet par exemple de dater des croissances différentielles d'un minéral ou des modifications post-cristallisation (modification de la température, circulation de fluides etc.).

II. GENESE ET EXTRACTION DES MAGMAS

II.1. Origine des magmas

II.1.1. Les trois types majeurs de magmas

II.1.2. Les magmas et leurs propriétés physiques

II.2 Les mécanismes de fusion partielle des roches

II.2.1. Conditions thermodynamiques de l'apparition d'un magma

A. Approche expérimentale de la fusion d'une péridotite

B. La fusion fractionnée polybarique

C. L'eau dans le manteau et ses conséquences

II.2.2. Estimer et calculer le taux de fusion partielle

A. Le comportement des éléments chimiques

B. Le principe du calcul d'un taux de fusion

II.2.3. Les apports des éléments en traces

A. Éléments traces et contrôle lithosphérique de la fusion partielle

B. Éléments traces et source mantellique des magmas

II.3 La production des magmas primaires et leur migration verticale

II.3.1. Les étapes de la fusion partielle

A. Diagrammes de phase binaire et ternaire

B. La fusion d'une péridotite

II.3.2. La remontée du magma

II. GENESE ET EXTRACTION DES MAGMAS

II.1. Origine des magmas

II.1.1. Les trois types majeurs de magmas

Les magmas basaltiques :

Minéraux majeurs : olivines, pyroxènes et F. plagioclases
tous anhydres → magmas basaltiques essentiellement secs
et ils se forment par FP sèche du manteau.

Argumentation :

Expériences de FP (5 à 20%) d'une péridotite à des pressions équivalentes à 80-100 km de profondeur donne systématiquement un magma primaire de composition basaltique.

Rappel: 1 Gpa = 30 km de profondeur

Les magmas andésitiques :

Composition chimique moyenne proche de celle des CC et CO.

Argumentation :

Expériences de FP (10 à 20%) d'une CO hydratée à des pressions équivalentes à 80 km de profondeur → magma de composition andésitique. L'origine du magma andésitique est liée aux zones de subduction.

CO altérée par l'eau de mer, olivine, pyroxène et F. plagioclases transformés en minéraux hydratés. La plaque plongeante chauffée lors de sa descente dans le manteau → début de FP de la croûte vers 80 km.

Le magma andésitique, plus léger que les roches environnantes, monte et forme les volcans andésitiques.

II. GENESE ET EXTRACTION DES MAGMAS

II.1. Origine des magmas

II.1.1. Les trois types majeurs de magmas

Les magmas rhyolitiques

Origine continentale car :

Ils sont limités à la croûte continentale ou aux régions du volcanisme andésitique.

Argumentation :

Expériences de FP de roches saturées en H_2O ayant la composition de la CC → magma rhyolitique.

Magma 17 : La classification géodynamique des granitoïdes (in Robert & Bousquet, 2013, modifié)

Granitoïdes	Orogéniques			Transitionnels	Anorogéniques	
Contexte	Subduction		Collision	Post-orogéniques	Continentaux (dômes et rifting)	Océaniques
	Arc insulaire		Marge active			
Chimisme	Calco-alkalin		Calco-alkalin	Calco-alkalin	Alcalin	Tholéitique
Péetrographie	Diorites	Granodiorites	Leucogranite	Granodiorites Gabbro	Granites Gabbro	Plagiogranites
Volcanisme associé	Basaltes et andésites d'arc insulaire	Andésite	Absent	Basaltes et rhyolites	Laves alcalines	MORB et OIB
Origine	FP mantellique	FP mantellique et crustale	FP de CC recyclée	FP de CC inf + manteau	FP du manteau et/ou CC inf	FP du manteau et CF
Exemple	Nouvelle Guinée	Cordillère Ouest-Américaine	Himalaya Massif Central Massif Armoricaïn	Basin and Range Plutons fini hercyniens et alpins	Rift d'Oslo Yellowstone	Oman Islande La réunion

Migmatites : roches qui se sont trouvées dans un état partiellement fondu. Terme le plus poussé d'un métamorphisme prograde
Transition avec un granite dit d'anatexie.
Étude dans la partie consacrée au métamorphisme.



Plage de Propriano

II. GENESE ET EXTRACTION DES MAGMAS

II.1. Origine des magmas

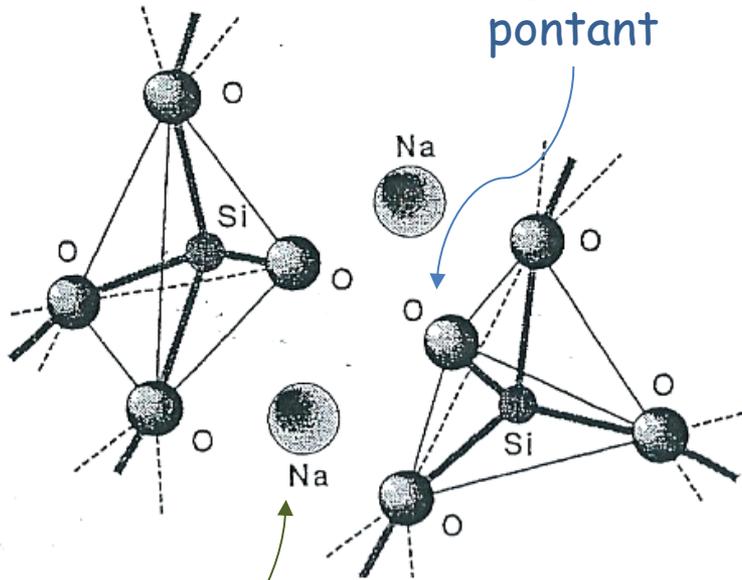
II.1.1. Les trois types majeurs de magmas

II.1.2. Les magmas et leurs propriétés physiques

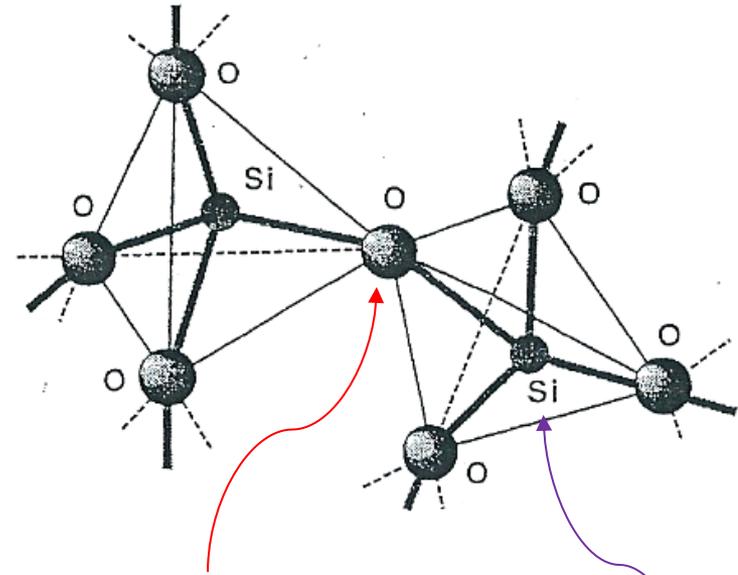
Magma 18 : Polymérisation et dépolymérisation du tétraèdre SiO_4

L'état dépolymérisé (à gauche) peut être obtenu par l'introduction d'oxydes modificateurs (Na_2O ici). L'oxygène pontant et l'oxygène apporté par l'oxyde sont transformés en deux oxygènes non pontant, le cation Na^+ venant compenser les charges à proximité des deux tétraèdres.

Oxygène non pontant



Modificateur
de réseau

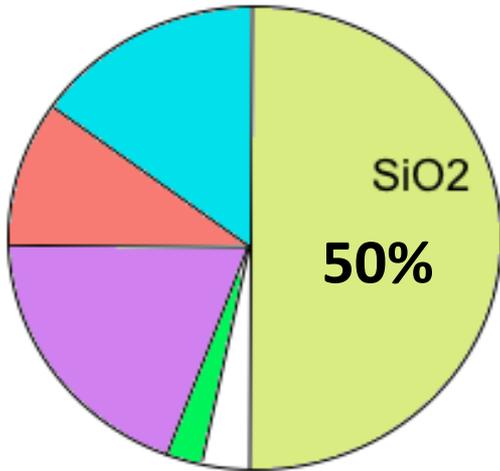


Oxygène
pontant

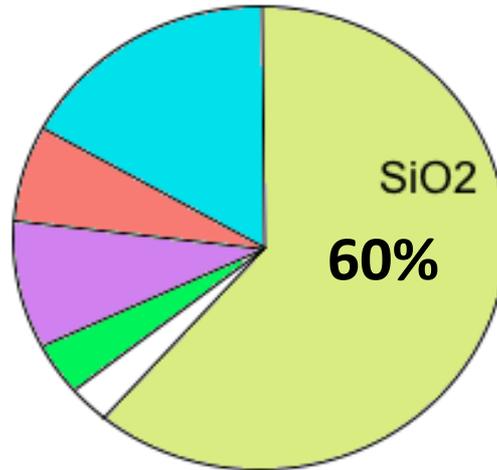
Formateur
de réseau

Magma 19 Les grands types de magmas

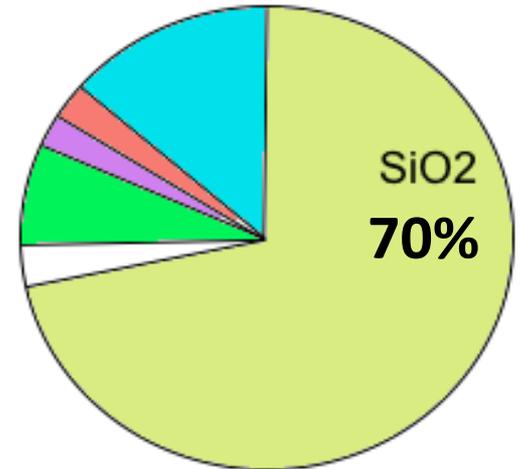
Basaltique



Andésitique



Rhyolitique



Al₂O₃



MgO + CaO



Autres
composants



FeO + Fe₂O₃



Na₂O + K₂O

1200°C
Basalte

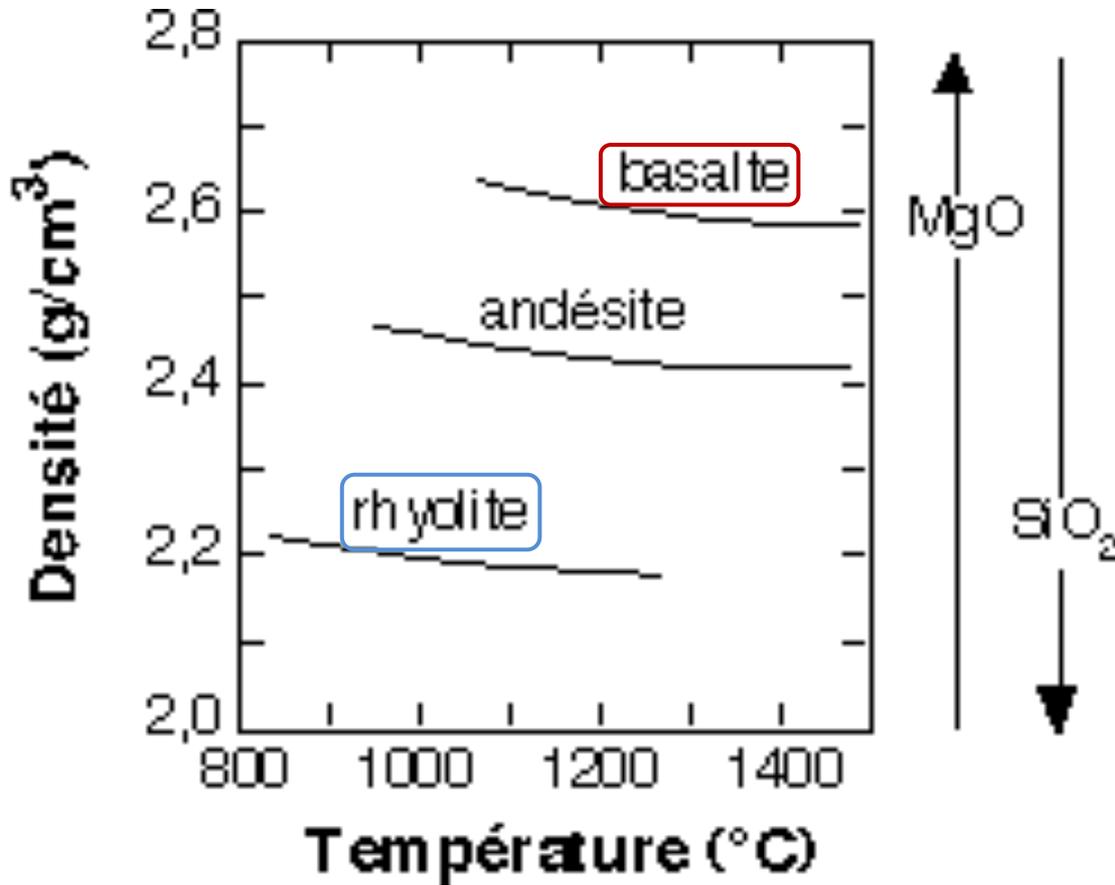


Température du liquidus
(liquide silicaté sans
cristaux en suspension)



700°C
Rhyolite

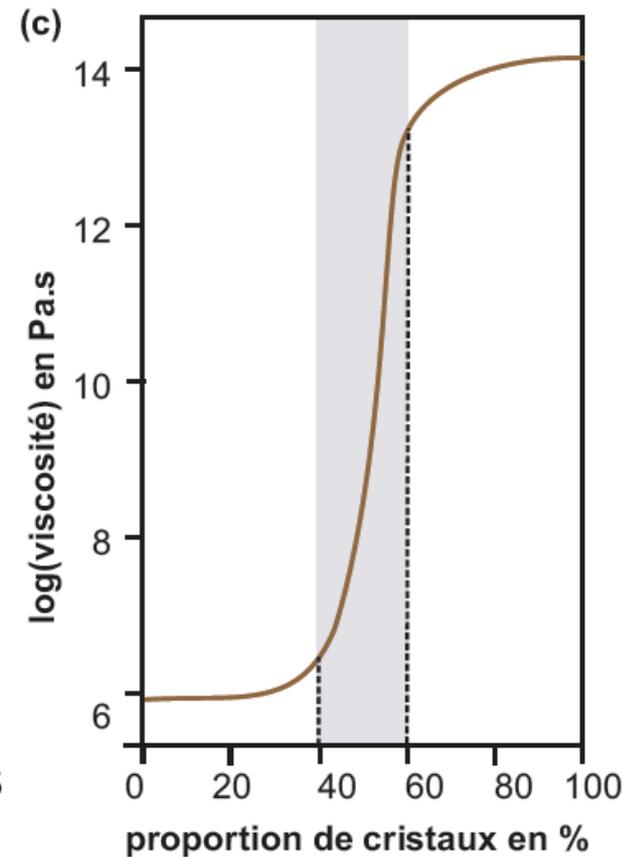
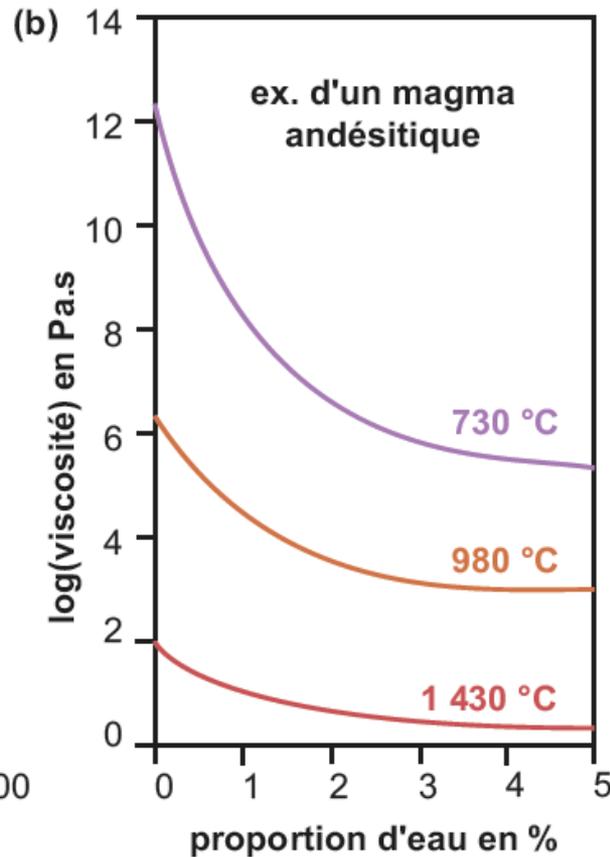
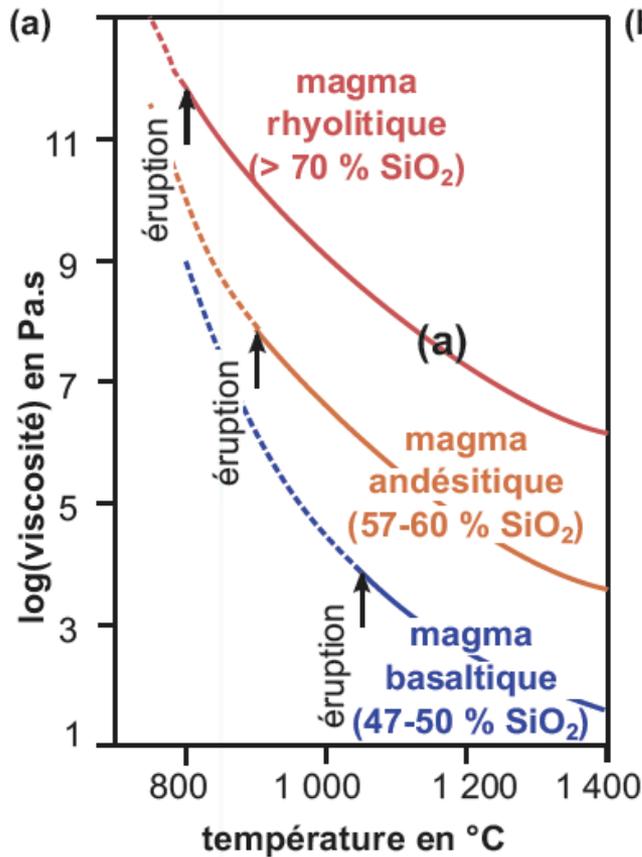
Magma 20: Densité des magmas basaltiques, andésitiques et rhyolitiques pour des températures supérieures à celle de leur liquidus



Densité d'un basalte proche de celle de la CO (2,9) → certains magmas plus denses restent à l'intérieur de la terre

Densité de la rhyolite faible → migration plus haute dans la croûte, plus froide et plus dense (2,7)

Magma 21: Quelques paramètres agissant sur la viscosité des magmas (in Géologie Tout-En-Un, Dunod.



a) Relation entre la viscosité, la température d'émission et la chimie des magmas ;

b) relation entre la viscosité et la quantité d'eau soluble pour une chimie donnée et pour différentes températures

c) influence de la proportion de minéraux sur la viscosité du magma.

II.2 Les mécanismes de fusion partielle des roches

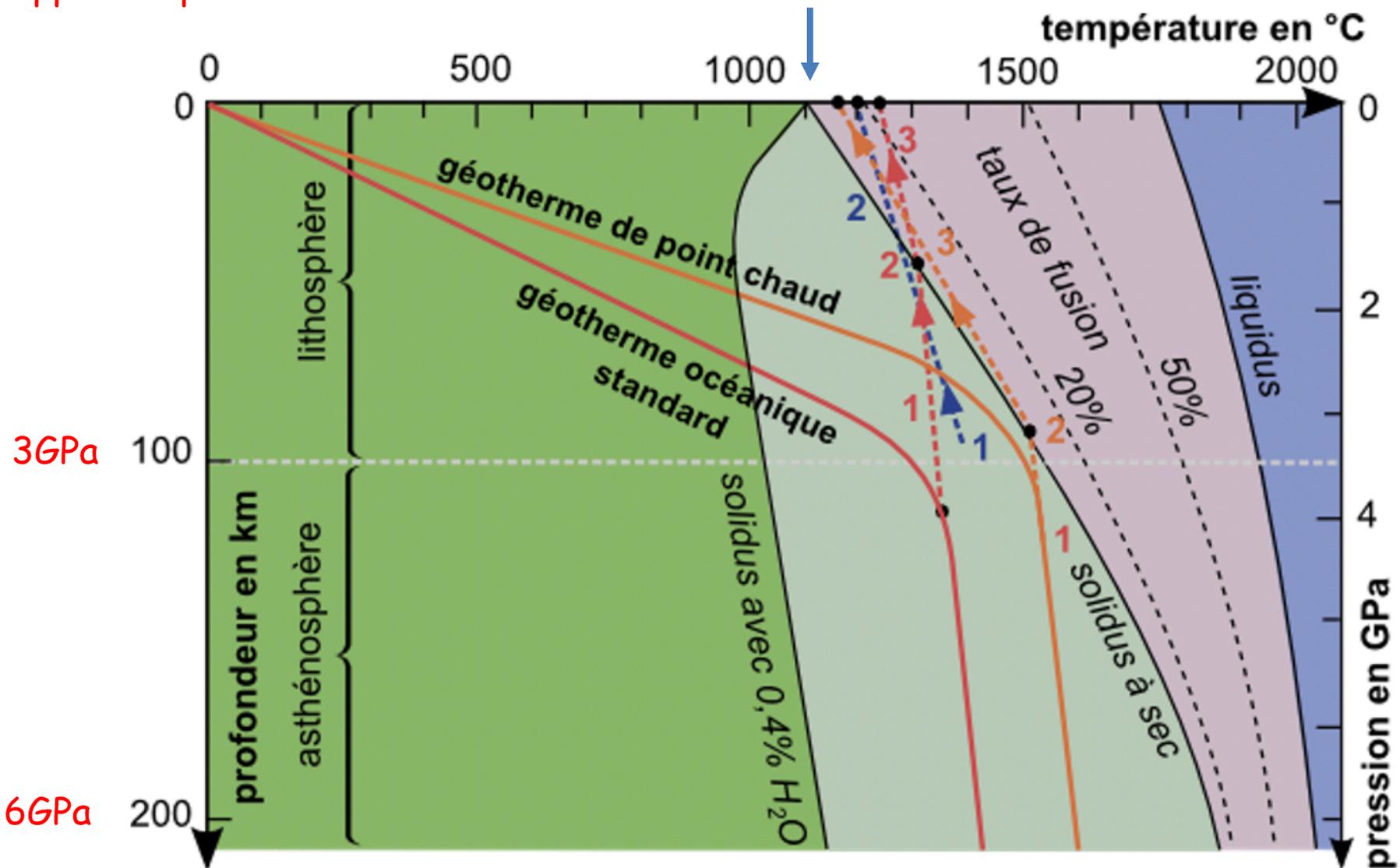
II.2.1. Conditions thermodynamiques de l'apparition d'un magma

- A. Approche expérimentale de la fusion d'une péridotite**
- B. La fusion fractionnée polybarique**
- C. L'eau dans le manteau et ses conséquences**

Magma 22: Les différentes modalités de production des magmas basaltiques par fusion des péridotites (in Tout-en-Fiche, Dunod 2019)

Rappel: 1 Gpa = 10 Kbar = 30 km

FP à 1075°C à P atm

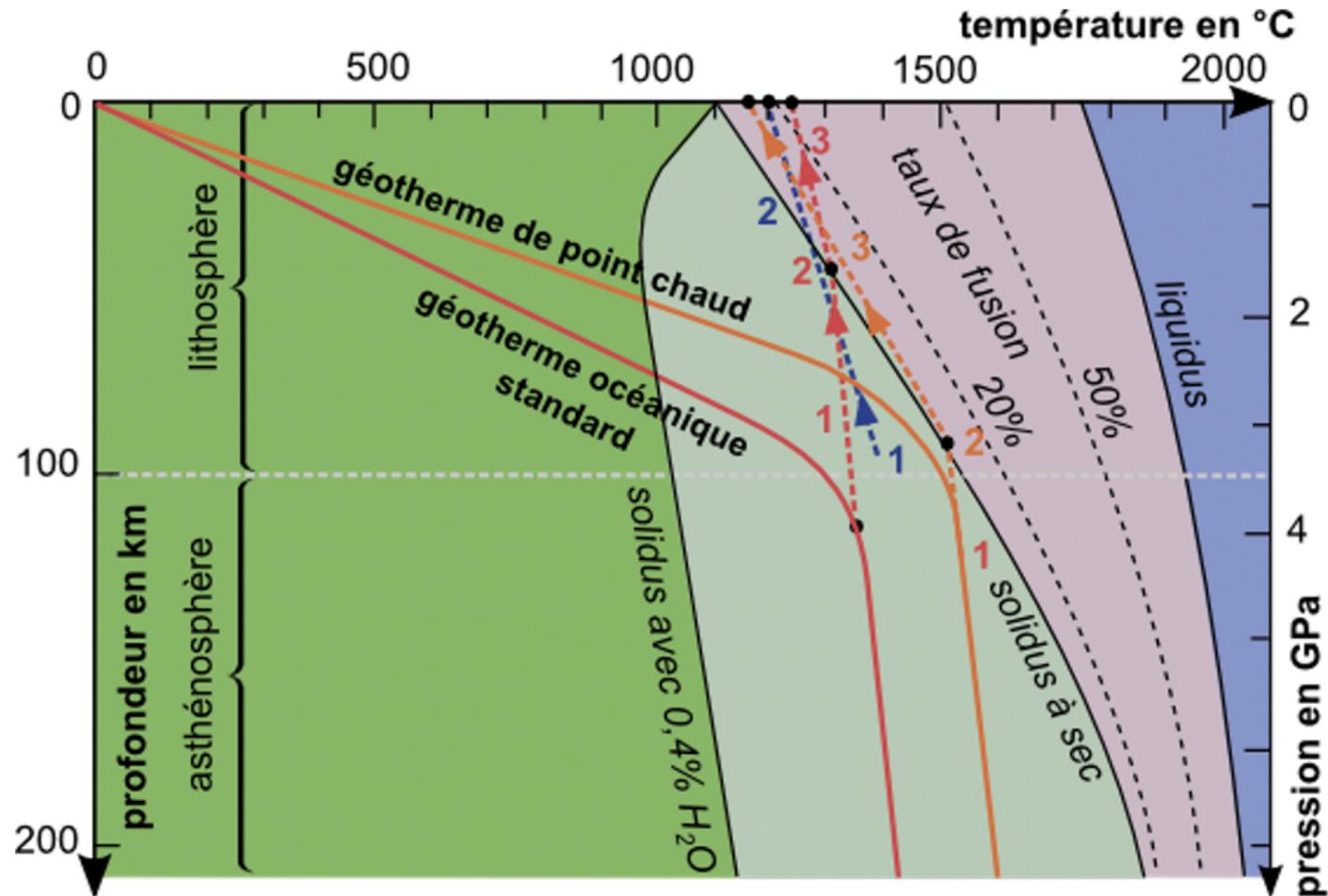


Axe de dorsale

1- ascension adiabatique de l'asthénosphère chaude sous une lithosphère très mince ;

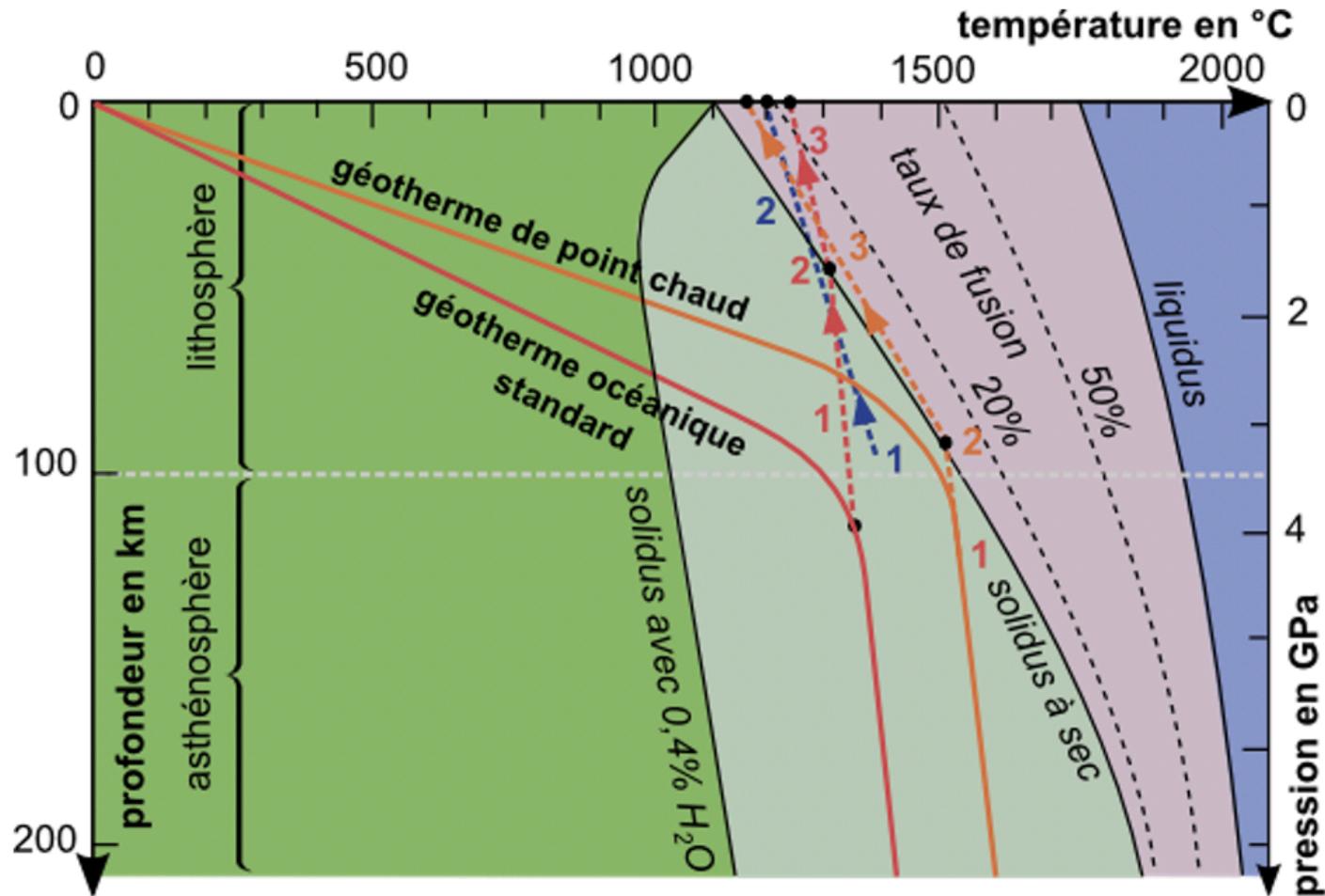
2- début de fusion à profondeur modeste ;

3- ascension adiabatique rapide avec poursuite de la fusion ; peu de perte de chaleur par conduction ; taux de fusion élevé.



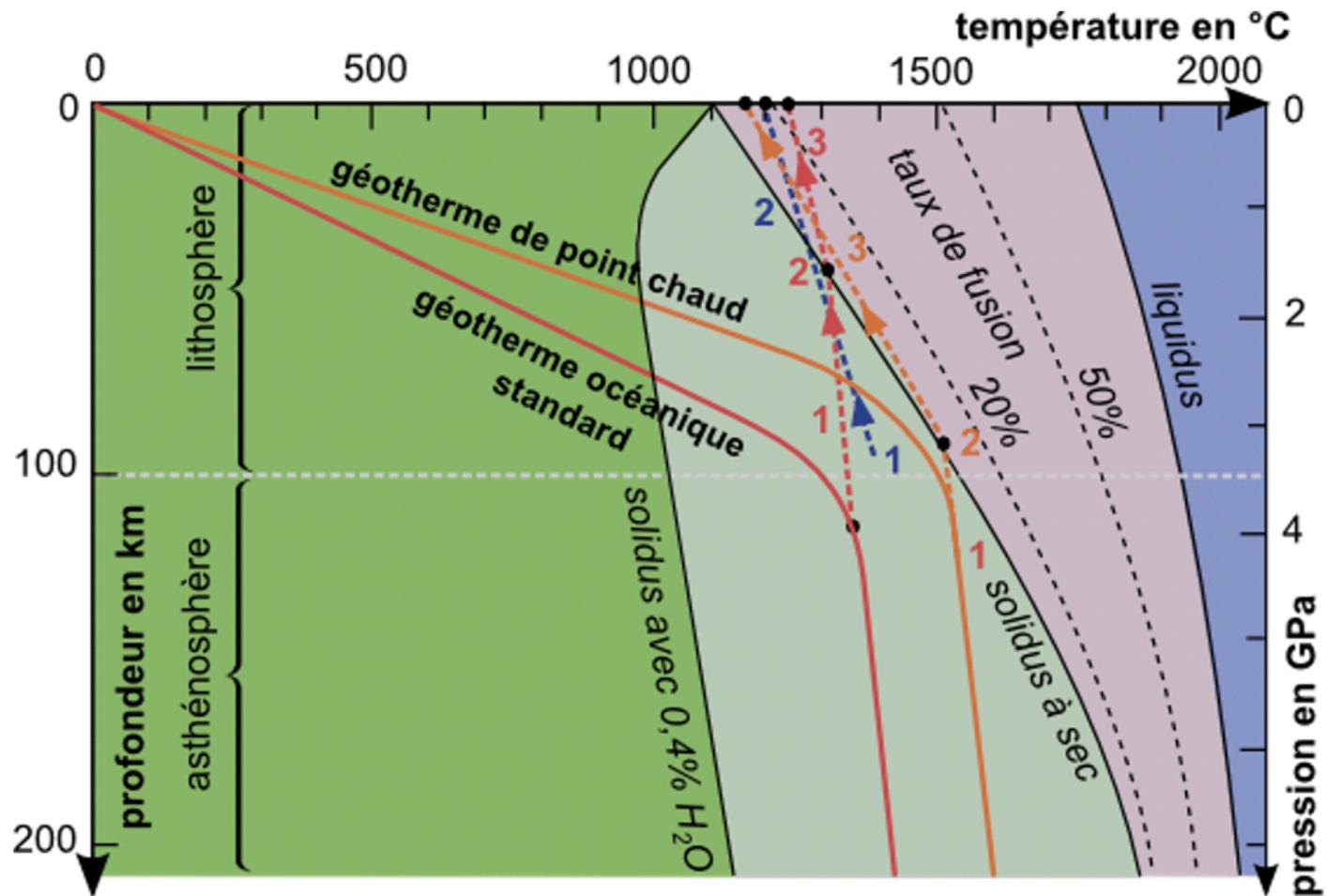
Point chaud

- 1- ascension adiabatique d'un panache très chaud d'asthénosphère ;
- 2- début de fusion en profondeur, sous la lithosphère d'épaisseur standard ;
- 3- ascension lente avec perte de chaleur par conduction ; faible taux de fusion au total.



Arc volcanique (subduction océan-océan)

- 1- apport d'eau et fusion de la péridotite chaude ;
- 2- ascension adiabatique avec fusion plus ou moins lente au sein de la lithosphère ; perte par conduction et taux de fusion intermédiaire.



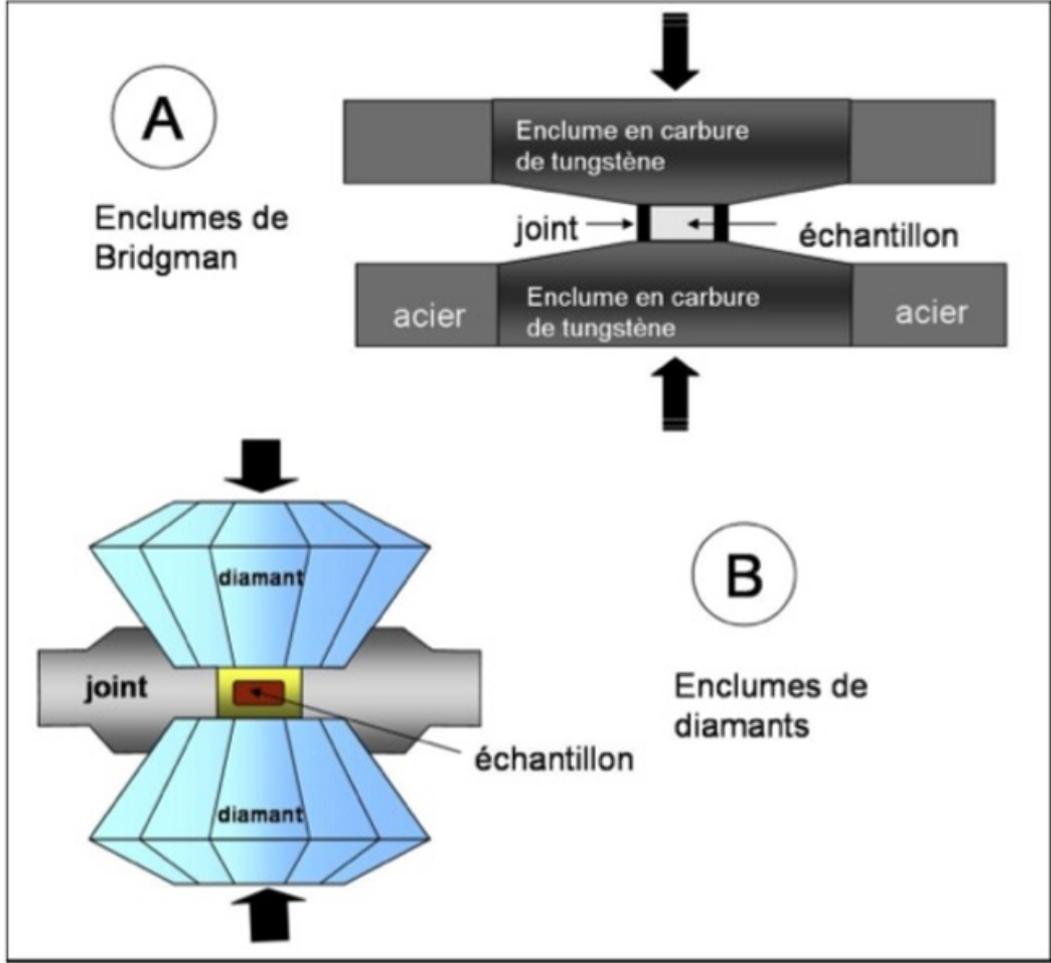


Figure Principe de la cellule à enclumes de diamant (B). Il est dérivé de celui des enclumes de Bridgman (A). L'échantillon à étudier sous pression est placé dans un trou (de 50 à 300 **nm** de diamètre) percé dans une feuille d'acier (le joint) de quelques dixièmes de millimètres d'épaisseur que l'on serre entre deux diamants.
 Source : Philippe Gillet

Magma 23: La presse à enclume

Expériences en HP - HT jusqu'à 200 GPa (6000 km) voire 500 GPa et 5000 K

La transparence sur une large bande de λ (IR -> ray X) du diamant permet:

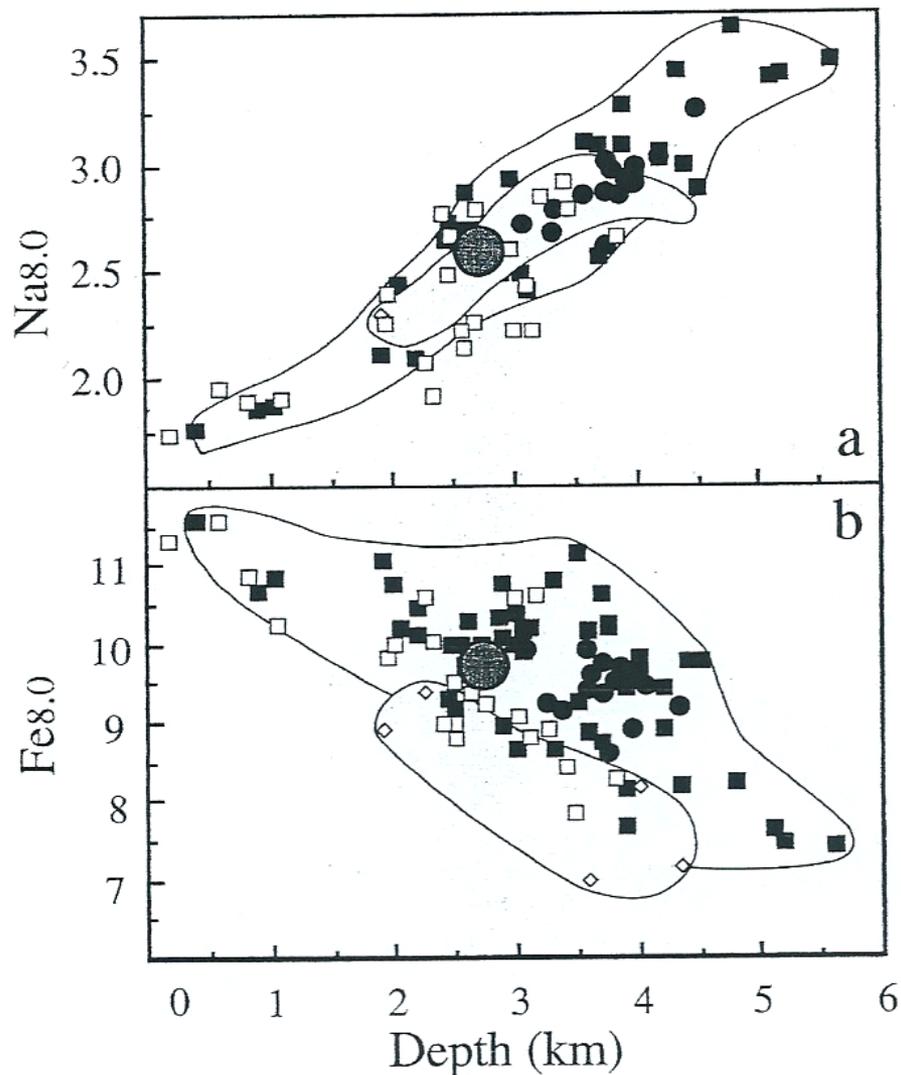
- ✓ une mesure in situ
- ✓ Une augmentation de T du seul échantillon par rayon laser

$P = F/S$ donc en réduisant la surface de l'échantillon (pyrolite), pour une force donnée, on augmente la pression exercée

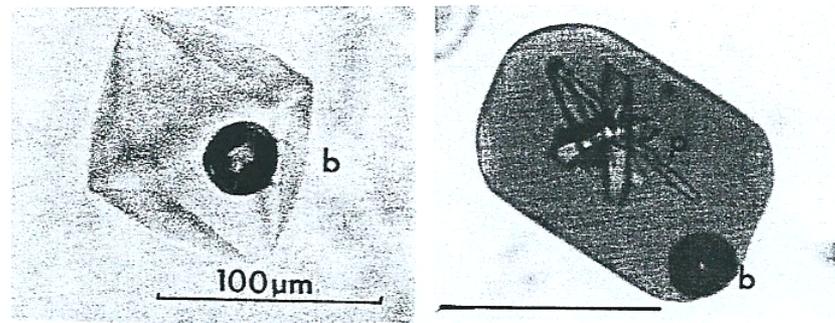
nm

Magma 24 : Comportement de Na et Fe lors de la fusion fractionnée (d'après E. Humler)

Teneurs en Na et Fe des basaltes normalisée à 8% de Mg



Magma 25 : Quelques inclusions vitreuses dans les minéraux des laves (in Mem soc Geol Fr 93)



A gauche, une bulle de gaz dans un grain de quartz.
A droite, inclusion de cristaux de pyroxène (p) et d'une bulle de gaz (b) dans un cristal de plagioclase.

Magma 26: L'eau dans le magma

T°C de l'eau de mer : 4°C

T°C de la lave
1100°C

4

croûte
vitreuse

Eau
piégée

3

2

1

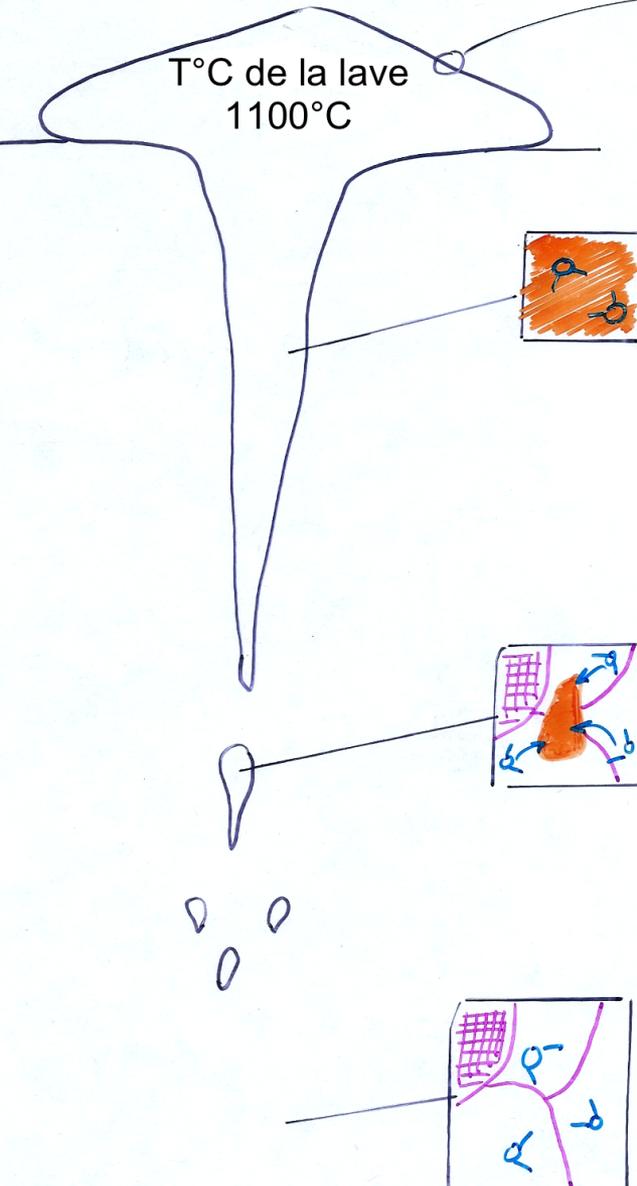
4. Une croûte vitreuse se forme par trempage et piège H₂O dont la valeur reflète celle du magma avant éruption

3. H₂O est transportée dans le magma à la concentration de 0,1 % < [H₂O] < 0,5%

2. Fusion partielle. H₂O incompatible pénètre dans le magma.

α Molécule d'eau

1 : H₂O est en solution dans les minéraux à la concentration de 50 ppm < [H₂O] < 500 ppm



Bilan : les causes de la variabilité chimique des magmas

- Nature de la roche source.
- Pression donc profondeur de fusion :
 - Faible: liq riches en Si et pauvres en Mg et alcalins (Basaltes tholéitiques).
 - Forte : liq riches en Mg et alcalins et pauvres en Si (Basaltes alcalin).
- Taux de fusion partielle (FP). Les éléments majeurs les plus fusibles (Si, Al, Ca, K, Na, Ti) et les éléments en traces (REE) incompatibles (Rb, Th, U..) relativement abondants dans les premiers liquides de fusion. Au fur et à mesure que FP progresse, le liquide s'enrichit en éléments réfractaires (Mg, Cr). Ainsi les komatiites, laves très magnésiennes des terrains archéens, résultent d'un taux de FP très élevé (50 %).
- Présence d'eau : abaisse T° de FP et change la composition du liquide de fusion. Une roche-source riche en eau \rightarrow magma plus riche en silice qu'une roche sèche.
- Interactions avec l'encaissant.
 - Remontée très rapide du magma \rightarrow interactions très limitées.
 - Remontée lente \rightarrow phénomènes de contamination. Un basalte alcalin pourra enrichir les péridotites appauvries du manteau supérieur en fer et en alcalins (et réciproquement).

II.2.2. Estimer et calculer le taux de fusion partielle

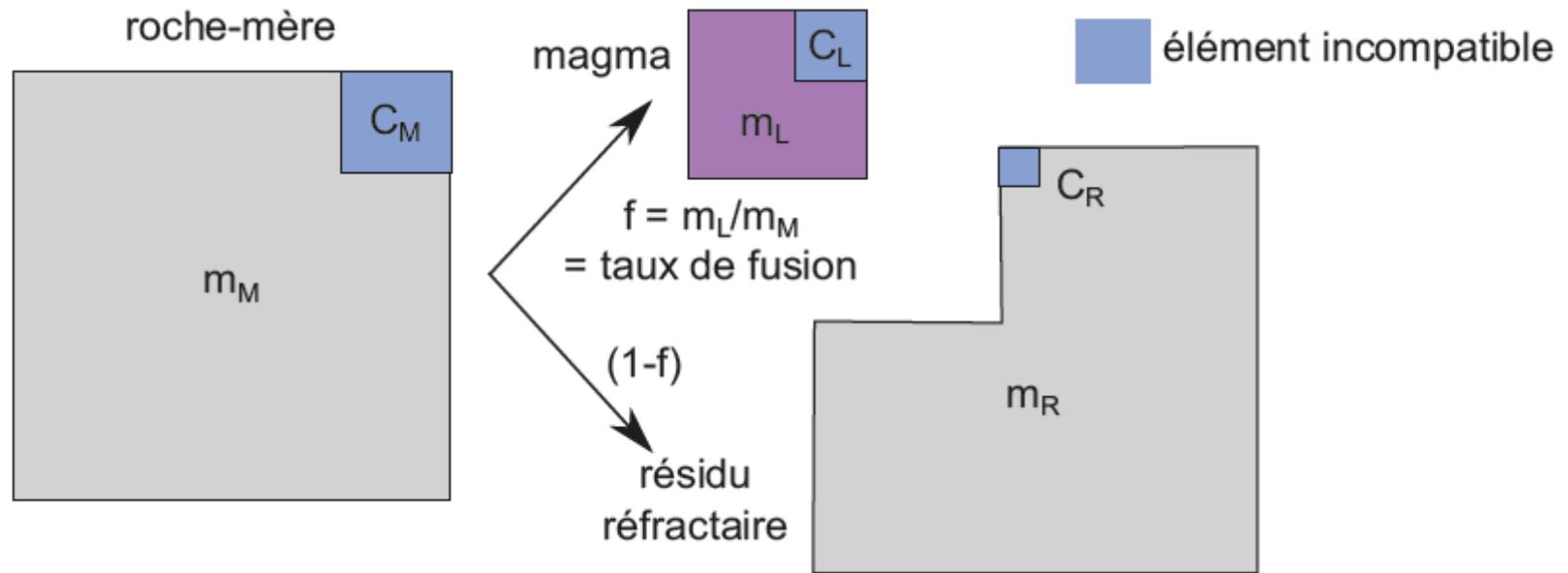
A. Le comportement des éléments chimiques

B. Le principe du calcul d'un taux de fusion

Les raisons de l'incompatibilité :

- Rayon ionique trop élevé (> 10 nm) pour entrer dans les sites des minéraux: cas des éléments lithophiles (concentration élevée dans la CC) ou LILE (Large Ion Lithophile Element). Rubidium (Rb = elt trace), potassium (K)
- Charge cationique trop élevée : zirconium (Zr), titane (Ti) \rightarrow grande force de champ ionique (HFSE : High Field Strength Elements). Ils s'entourent d'anions d'oxygène \rightarrow structures de taille plus élevée, limitant leur entrée dans les sites cristallins.

Magma 27 : Mode de calcul d'un taux de fusion (in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).



Calculer des taux de fusion partielle

Par le calcul

Echantillon	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Roche A %	47.10	2.30	14.20	11.00	0.20	12.70	9.90	2.20	0.40
Roche B %	45.30	0.20	3.60	7.30	0.10	41.30	1.90	0.20	0.10
Roche C %	42.30	0.10	0.50	7.10	0.10	46.60	0.10	0.10	0.0005

Calculer des taux de fusion partielle

Par le calcul

Echantillon	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Roche A %	47.10	2.30	14.20	11.00	0.20	12.70	9.90	2.20	0.40
Roche B %	45.30	0.20	3.60	7.30	0.10	41.30	1.90	0.20	0.10
Roche C %	42.30	0.10	0.50	7.10	0.10	46.60	0.10	0.10	0.0005

Lherzolite B



Basalte A

+

Harzburgite C

Si on applique la loi de conservation des masses pour l'élément K_2O :

Avec C = concentration de l'élément (K_2O) et F = fraction solide ou liquide

$$\text{On a : } C_B = C_A \cdot F_A + C_C \cdot F_C$$

$$\text{avec } F_A + F_C = 1$$

$$\text{Donc } C_B = C_A \cdot F_A + C_C \cdot (1 - F_A)$$

$$C_B = C_A \cdot F_A + C_C - C_C \cdot F_A$$

$$C_B - C_C = C_A \cdot F_A - C_C \cdot F_A$$

$$C_B - C_C = F_A (C_A - C_C)$$

$$\text{D'où } F_A = (C_B - C_C) / (C_A - C_C)$$

D'après les données du tableau relatives à K_2O ,

$$F_A = (0,1 - 0,0005) / (0,4 - 0,0005) = 0,25 \text{ soit } 25\% \text{ de fusion partielle}$$

Calculer des taux de fusion partielle

Par le calcul

On donne la composition de 3 roches de la lithosphère océanique

Echantillon	SiO_2	TiO_2	Al_2O_3	FeO	MnO	MgO	CaO	Na_2O	K_2O
Roche A %	47.10	2.30	14.20	11.00	0.20	12.70	9.90	2.20	0.40
Roche B %	45.30	0.20	3.60	7.30	0.10	41.30	1.90	0.20	0.10
Roche C %	42.30	0.10	0.50	7.10	0.10	46.60	0.10	0.10	0.0005

→ La roche C, la plus pauvre en SiO_2 et en K_2O (incompatible) est la péridotite résiduelle

→ La roche A, enrichie en éléments incompatibles et en SiO_2 est la roche magmatique (basalte)

→ La roche B est donc la péridotite initiale

On a donc:

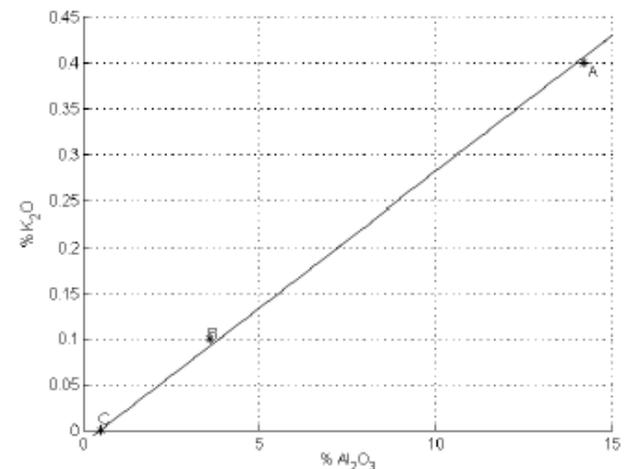
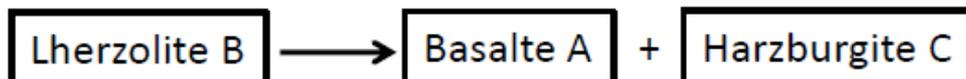


FIG. 2 – variation K_2O en fonction de Al_2O_3

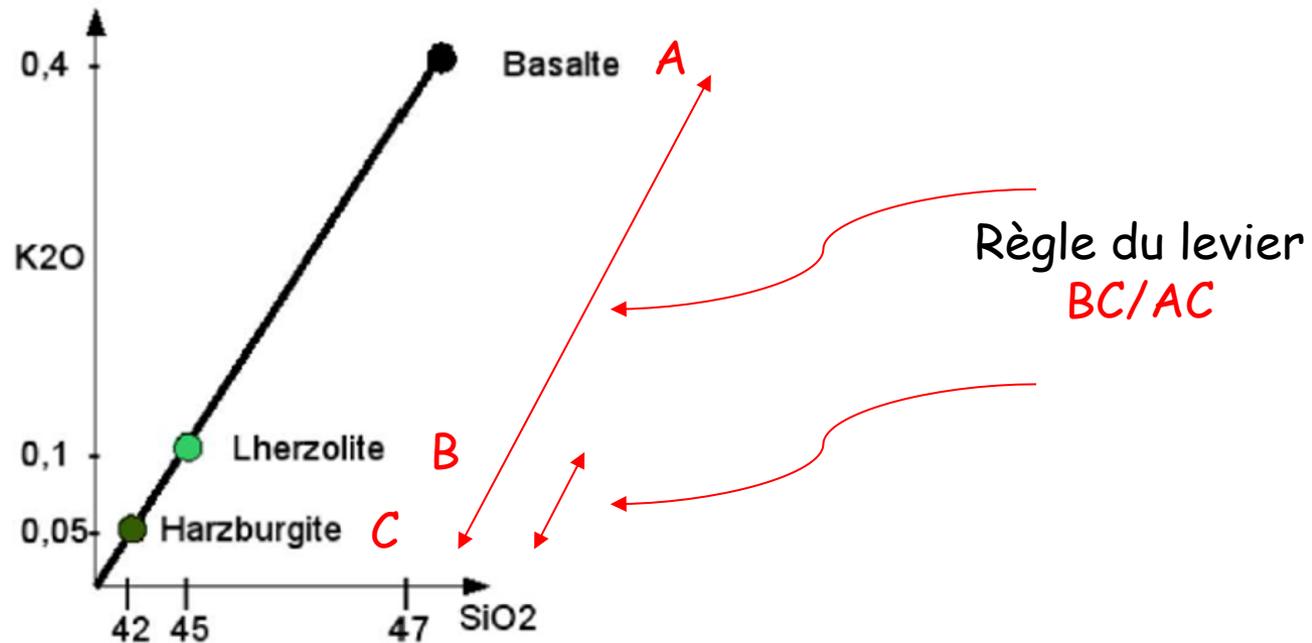
Calculer des taux de fusion partielle

Méthode graphique

Puisque les éléments incompatibles (dont K) ont tendance à migrer dans le liquide magmatique, l'étude de la concentration de ces éléments dans la roche initiale, la roche résiduelle et le magma cristallisé va permettre de connaître le **taux de fusion**.

→ Dans cet exemple, en étudiant la teneur en K₂O en fonction de SiO₂ dans un basalte (magma cristallisé), la lherzolite (roche initiale) et la harzburgite (roche résiduelle), on peut remonter au taux de fusion partielle.

A: Basalte
B: Lherzolite
C: Harzburgite



Taux de fusion partielle: $F = LH/BH$

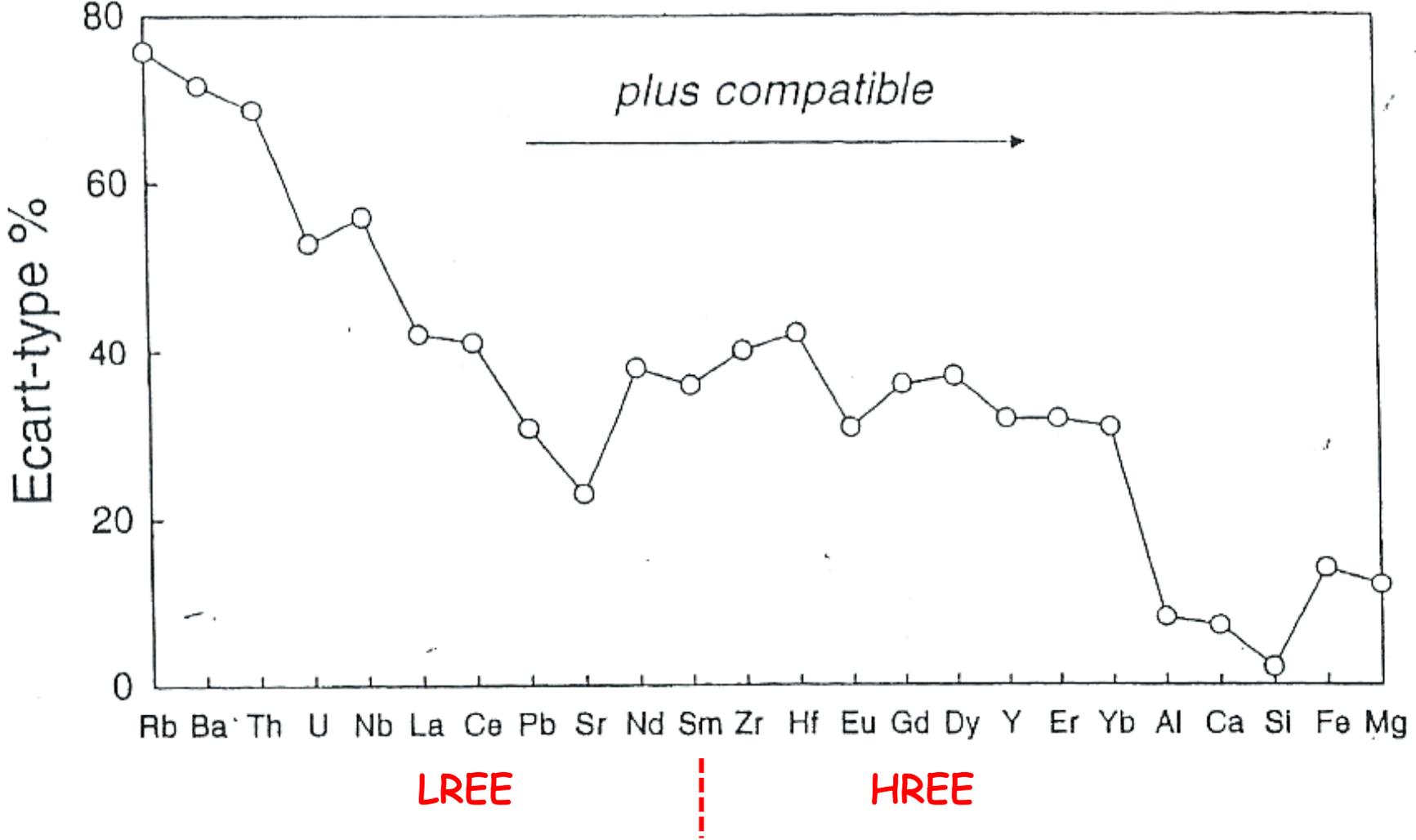
Par mesure graphique, on trouve $F = 0,25$ soit 25% de fusion partielle

II.2.3. Les apports des éléments en traces

A. Éléments traces et contrôle lithosphérique de la fusion partielle

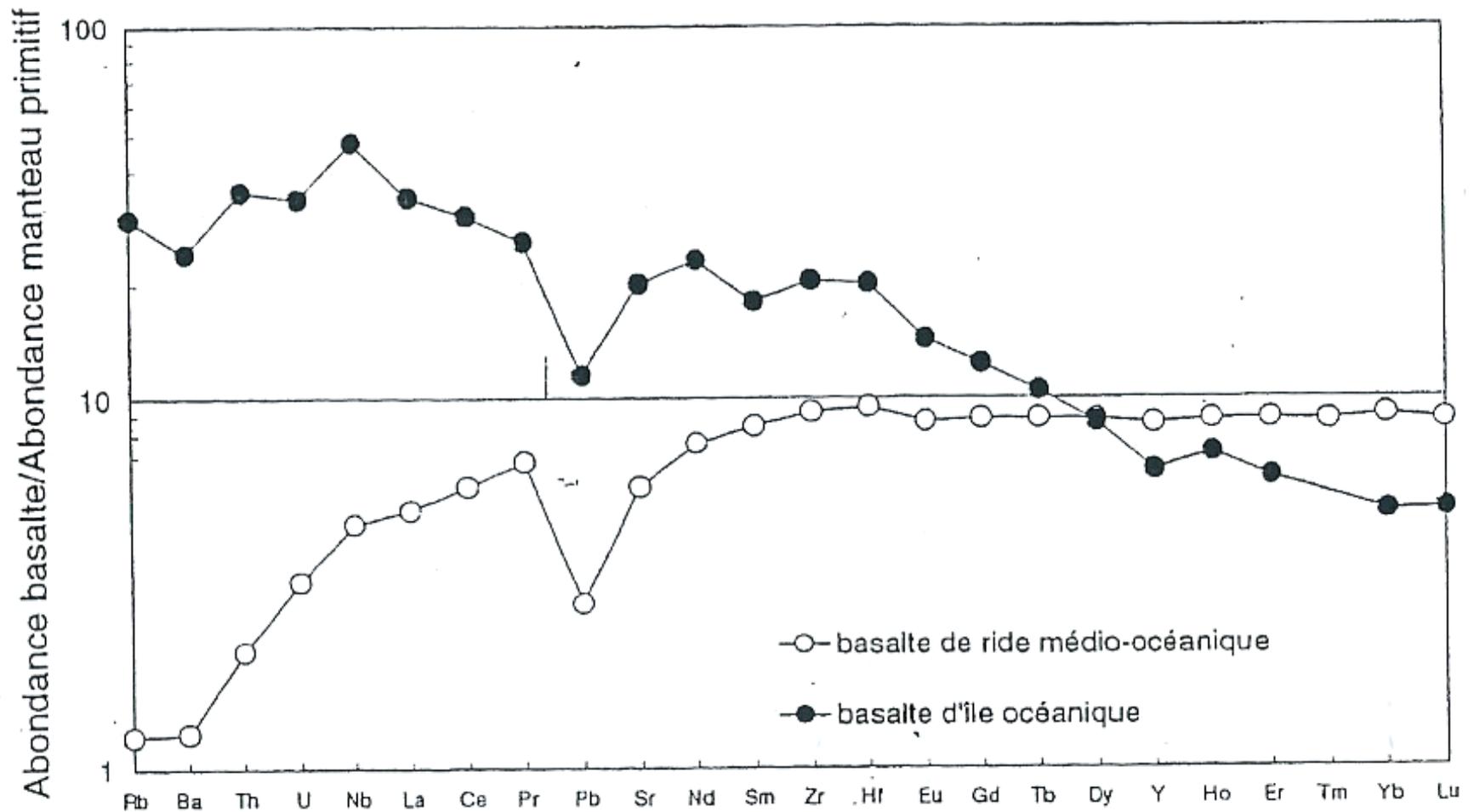
B. Éléments traces et source mantellique des magmas

Magma 28a : La variabilité des concentrations des éléments dans les basaltes, mesurée par l'écart-type relatif, diminue avec leur compatibilité.



Magma 28b : Spidergramme ou arachnogramme

Spidergramme représentant la concentration des éléments en trace dans les types essentiels de basaltes normalisée à un modèle de concentration du manteau primitif. L'incompatibilité des éléments, c'est-à-dire la propension des cristaux à les rejeter dans le liquide, diminue vers la droite. Les basaltes de rides (MORB) sont 'appauvris' en éléments incompatibles, les basaltes d'îles océaniques (OIB) sont 'enrichis'.



$$C_i^L \equiv \frac{C_i^P}{F + D_i^{S/L} (1 - F)}$$

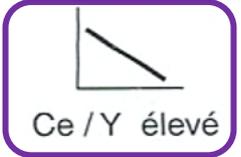
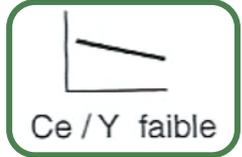
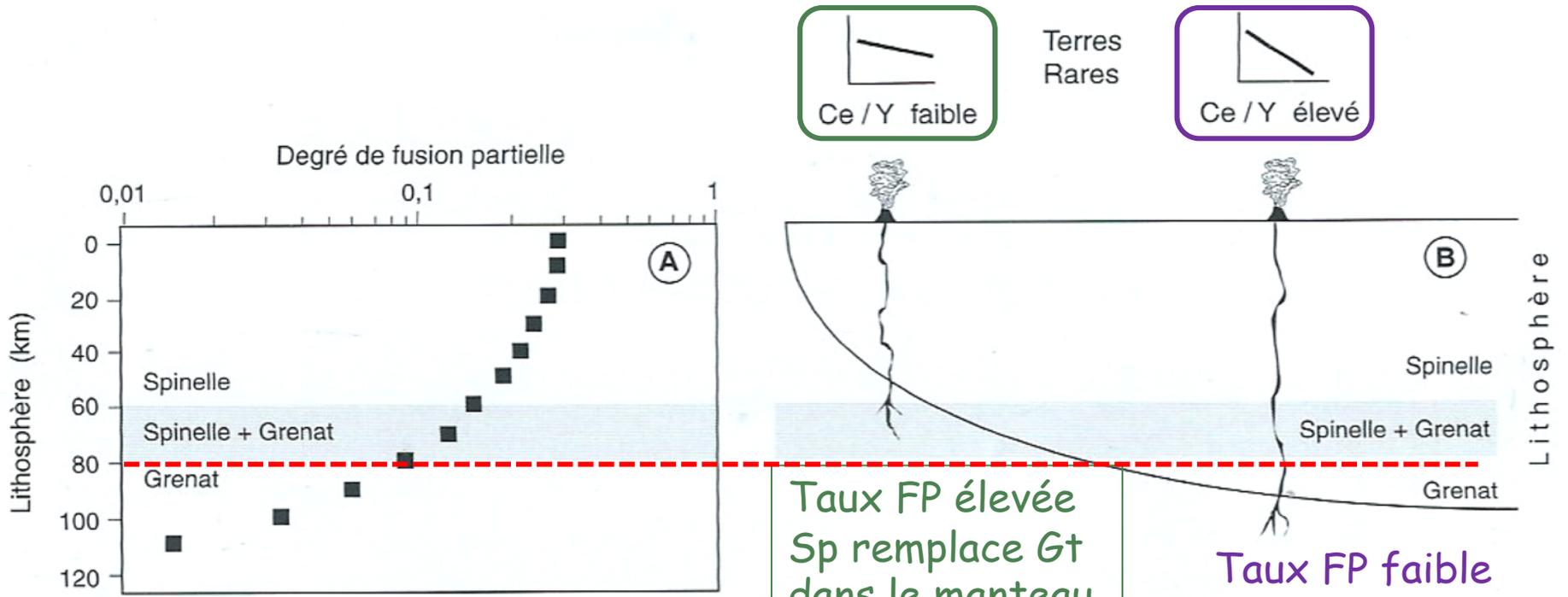
- C_i^L : Concentration du REE i dans le liquide basaltique
- C_i^P : Concentration du REE i dans le solide périclétique
- $D_i^{S/L}$: Coefficient de partage global du REE i entre solide et liquide
- F : Taux de FP ($0 < F < 1$)

Taux de FP habituellement $< 20\%$ (soit 0,2) \rightarrow teneurs en elts compatibles dans les liq primitifs peu variables et faible car $D_i^{S/L} \gg 1$.

Par contre, comportement des elts incompatibles beaucoup plus variable car $D_i^{S/L}$ étant petit, une augmentation du taux de FP (0,05 à 0,20) \rightarrow diminution importante de C_i^L .

Teneur en elts incompatibles des liq basaltiques est d'autant plus élevée que le taux de FP est faible.

Magma 29 : Taux de FP, profondeur de fusion et composition des liquides formés (in Boilot & Coulon, L déchirure continentale et l'ouverture océanique, GIB)



Terres Rares

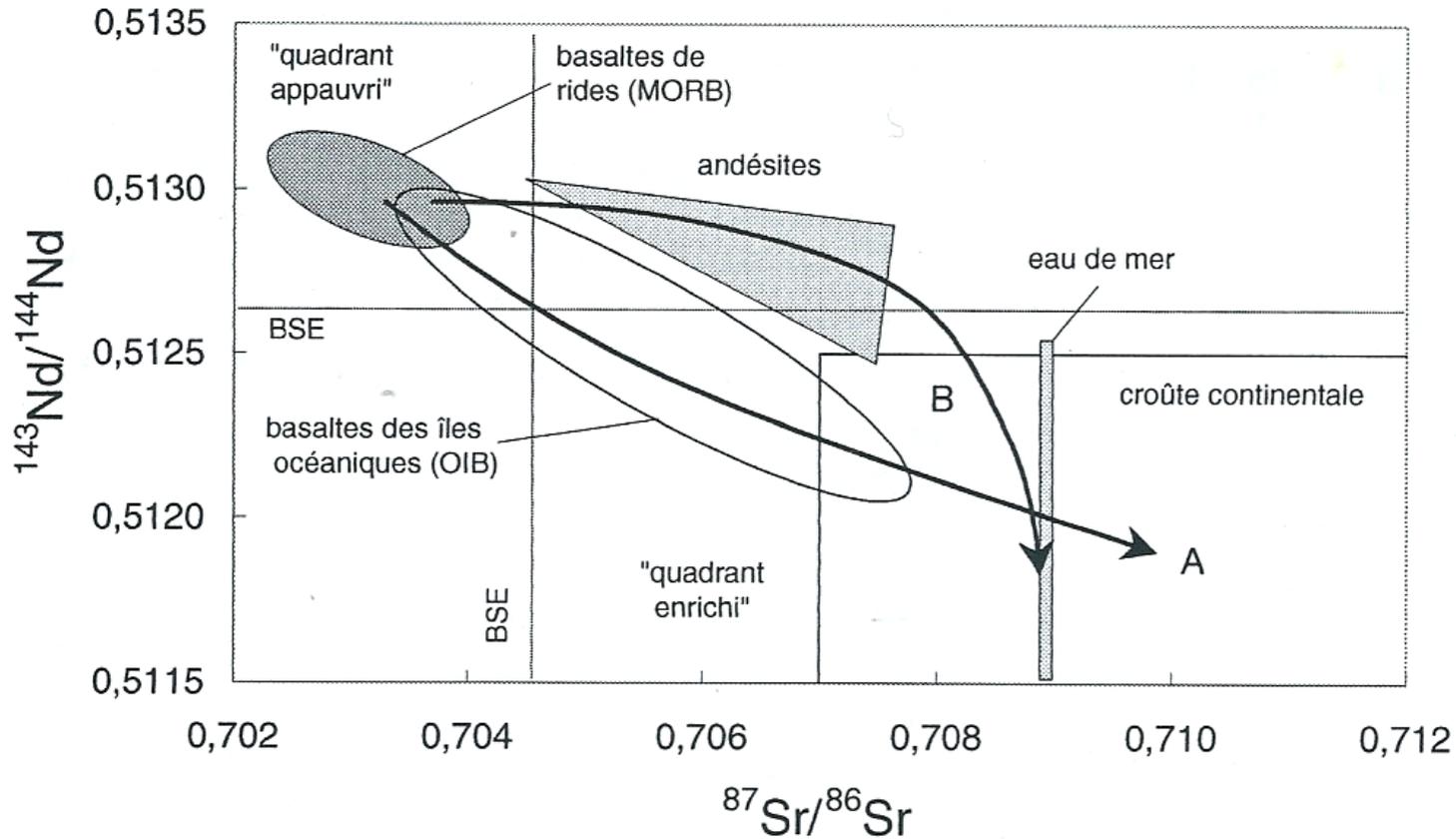
Cerium (Ce) très incompatible
Yttrium (Y) concentré dans le grenat

Taux FP élevée
Sp remplace Gt dans le manteau
Y non piégé dans le Gt →
Rapport Ce/Y faible

Taux FP faible
Gt stable donc Y reste piégé
Ce concentré dans le liquide →
Rapport Ce/Y élevé

Grenat: Gt
Spinelle: Sp

Rappel: Magma 12 : Identification de la source des magmas



Référence un manteau moyen idéal (BSE = Bulk Silicate Earth= Terre silicatée globale)

Le ^{87}Rb très incompatible passe préférentiellement dans les liquides. En se désintégrant, il donne du ^{87}Sr qui est moins incompatible. Il en résulte que dans le manteau, le rapport $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ est relativement faible.

Le samarium est très compatible et reste donc dans la phase solide. En se désintégrant, il donne du ^{143}Nd qui est incompatible. Il en résulte que dans le manteau, le rapport $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ est relativement élevé.

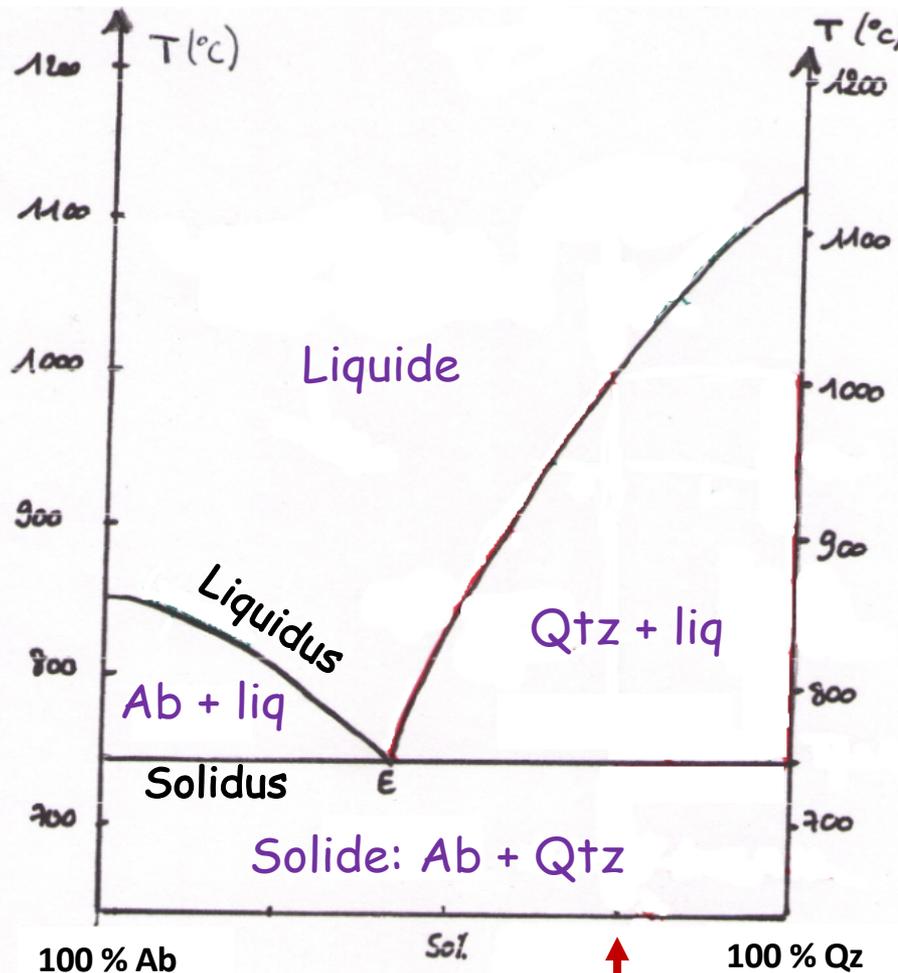
II.3 La production des magmas primaires et leur migration verticale

II.3.1. Les étapes de la fusion partielle

A. Diagrammes de phase binaire et ternaire

B. La fusion d'une péridotite

Diagramme de phase binaire Albite (Ab)/Quartz (Qz)



Qtz et Ab sont des minéraux non miscibles car leur réseaux cristallins sont trop différents

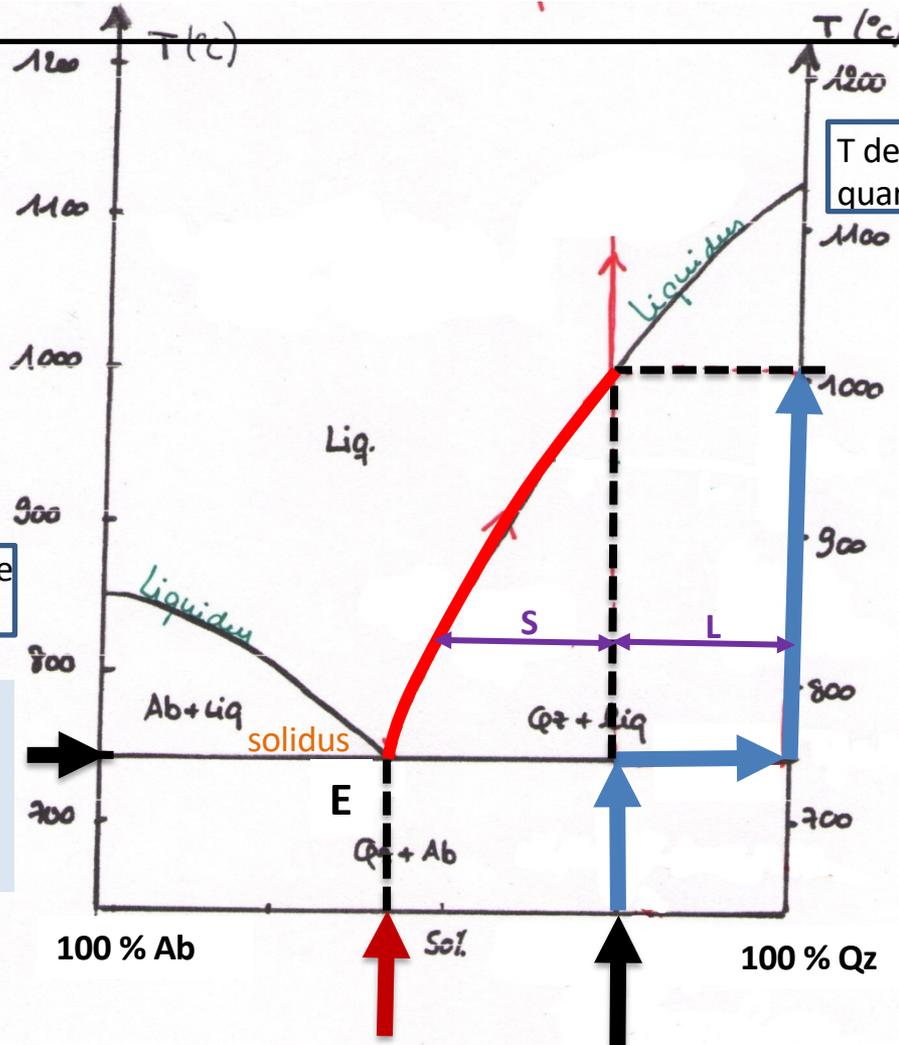
E = point eutectique

Eutectique = minimum thermodynamique
Correspond à la composition du 1^{er} liquide apparu, mélange de constituants en proportions déterminées qui fondent (ou cristallisent) totalement à température constante et minimale.

75% de Qtz = Quartz
25% de Ab = Albite

Trajet bleu le long du solidus = composition du solide

Trajet rouge le long du liquidus = composition du liquide



T de fusion de l'albite seule

T de fusion du quartz seul

T(°C) de fusion totale du mélange solide considéré. 100% de liquide

745°C = T de fusion du mélange solide jusqu'à disparition totale du constituant le plus limitant (Ab ici)

Le taux de fusion ne peut être évalué qu'une fois que l'eutectique a été dépassé. Il vaut alors :

$$T = L / (L + S)$$

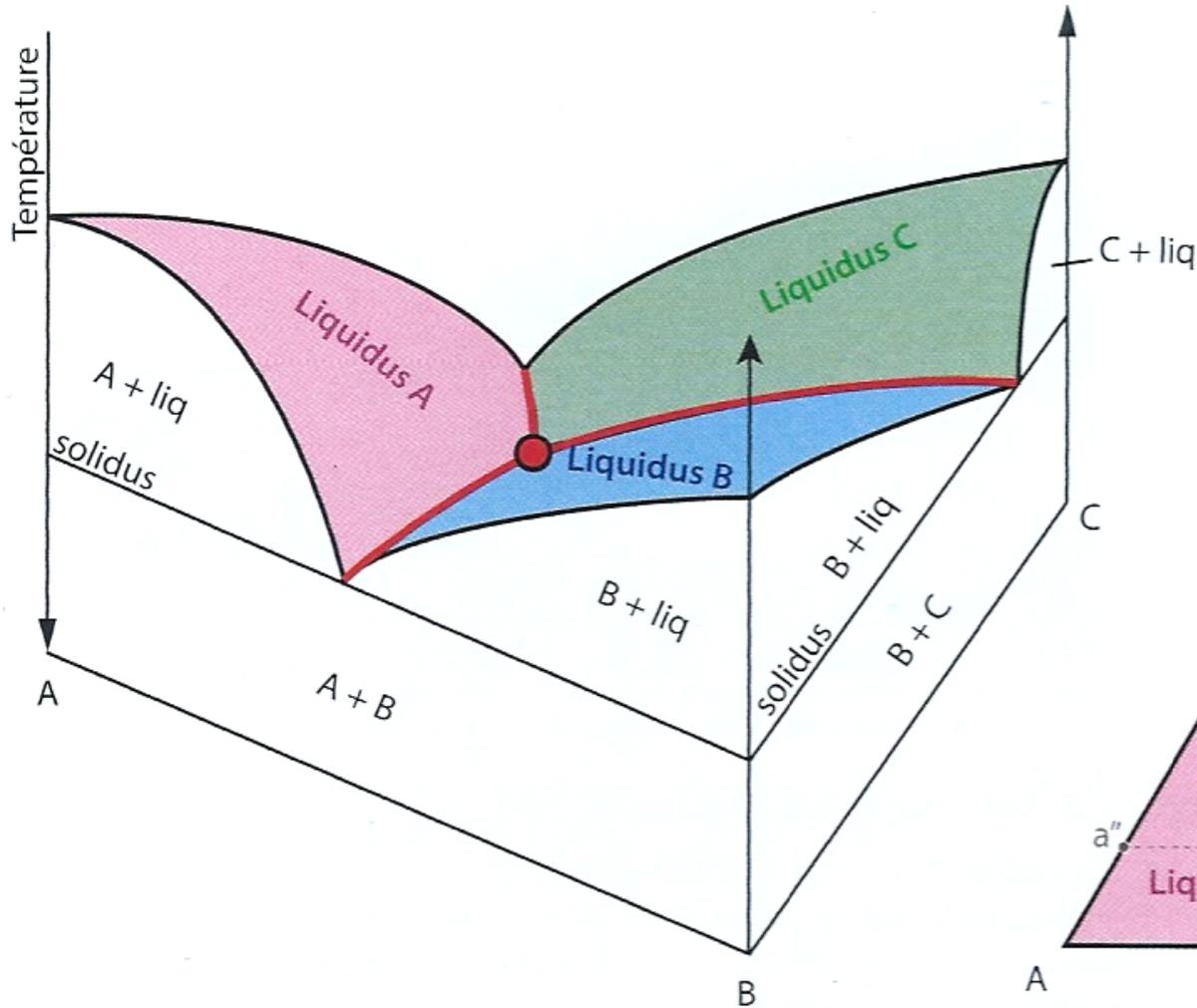
Soit ici 50% à 850°C, par exemple.

Composition du 1^{er} liquide, constante jusqu'à disparition totale du constituant le plus limitant (Ab ici)

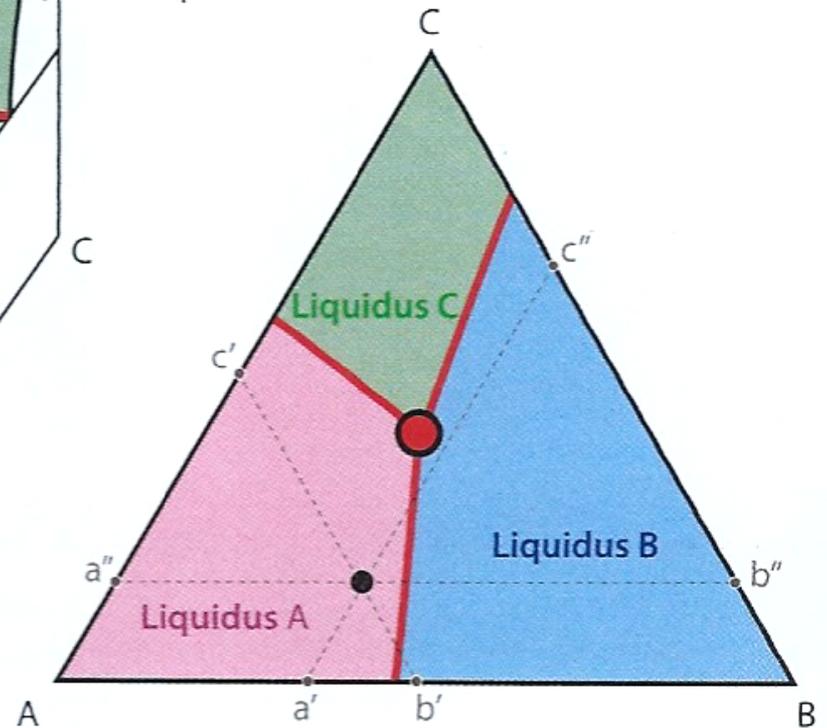
Mélange solide de départ, ex avec 75% Qz et 25% Ab

Quelle que soit la composition du mélange solide initial, la fusion débute à la température de l'eutectique et le premier liquide a la composition de l'eutectique

Diagramme de phase ternaire théorique
A = Olivine, B = CPx et C = Opx par exemple



**Point noir: roche de départ
15% de C, 50% de A et 35% de B**

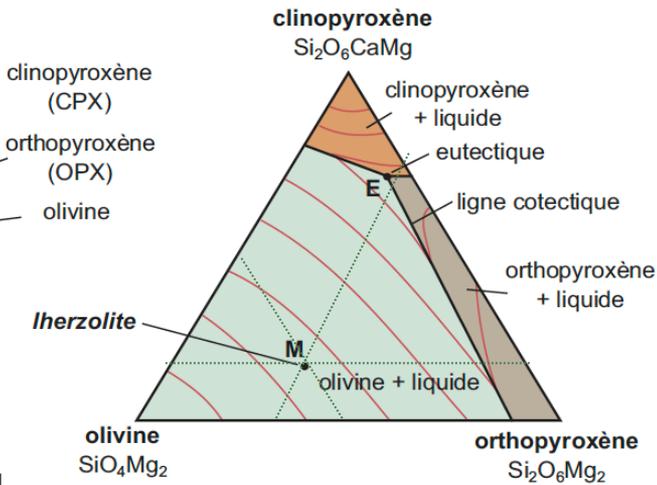
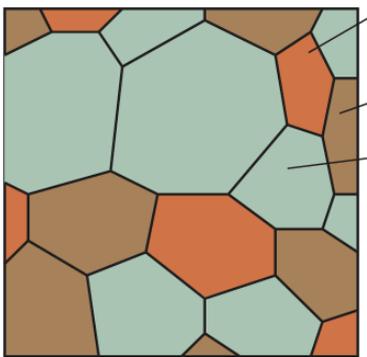


On combine 3 diagrammes binaires (A-B, A-C et B-C).

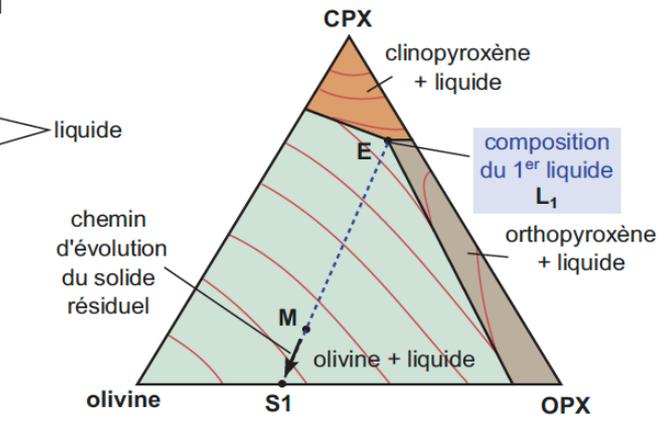
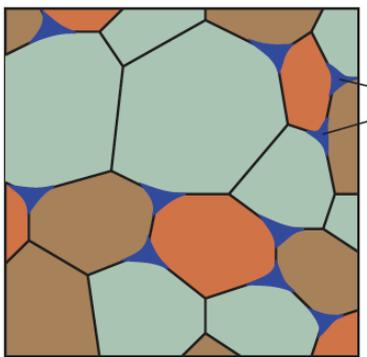
Les eutectiques de chaque système se transforment en **vallées cotectiques (courbes rouges)** qui convergent vers **l'eutectique du système ternaire (point rouge)**.

Il est plus simple d'utiliser la projection du diagramme selon le plan A-B-C pour travailler en 2D

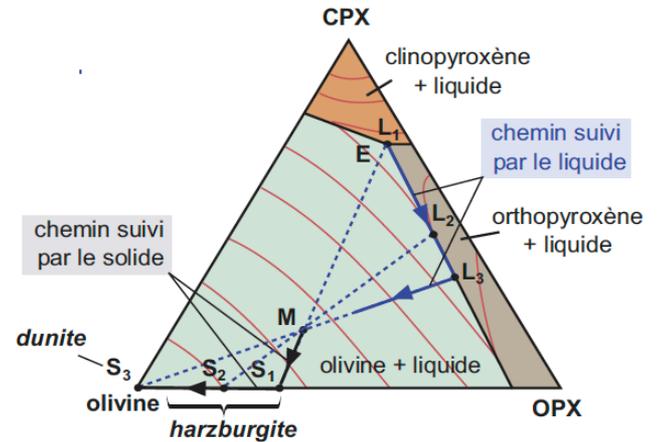
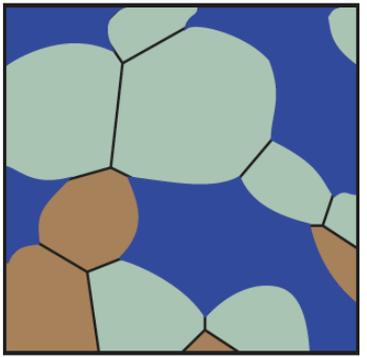
(a) situation avant fusion



(b) début de fusion (quelques %)



(c) fusion avancée (~30 %)



Magma 30 : Trois étapes conduisant à la fusion partielle dans le système ternaire CPx-OPx-OL

a) assemblage initial des 3 minéraux CPx-OPx-OL

b) situation à l'eutectique ternaire

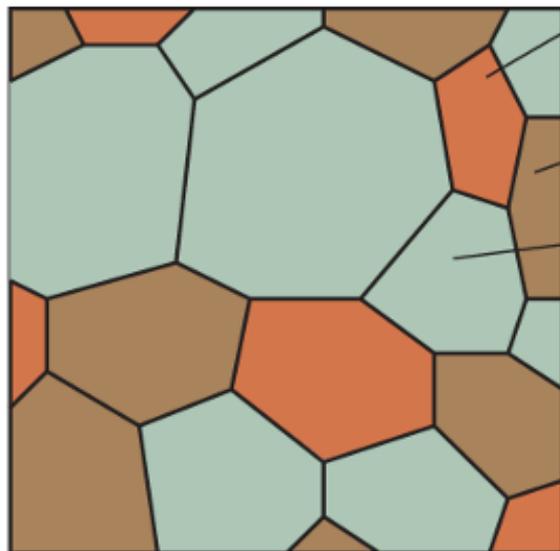
c) fusion avancée

Magma 30 : Trois étapes conduisant à la fusion partielle dans le système ternaire CPx-OPx-OL

a) assemblage initial des 3 minéraux CPx-OPx-OL

Cpx : 15 %
Ol : 55 %
Opx : 30 %

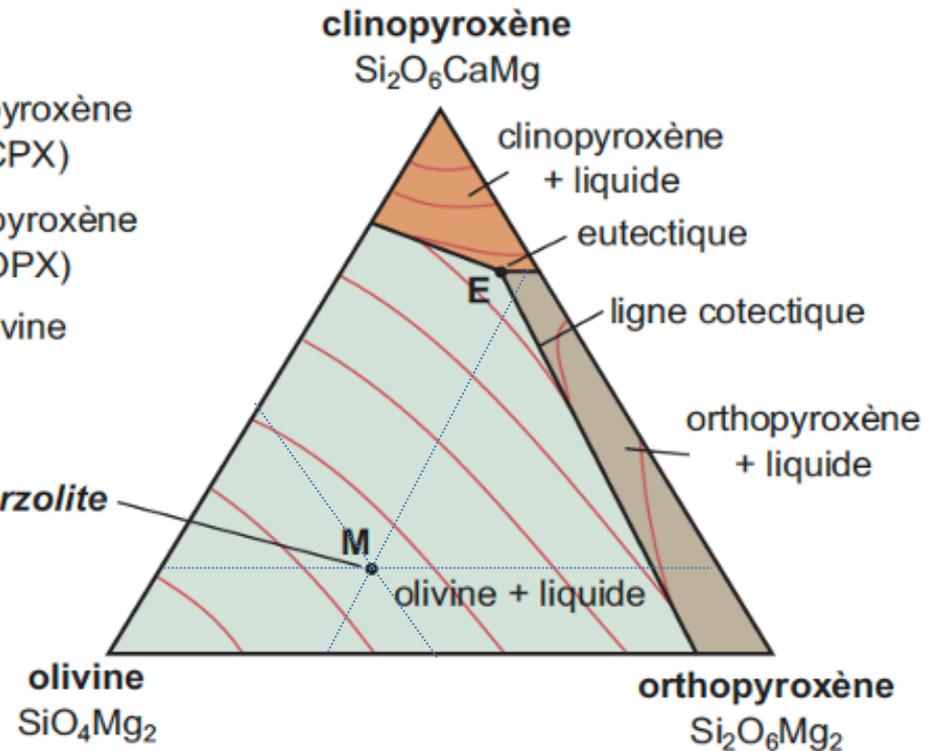
(a) situation avant fusion



clinopyroxène (CPX)
orthopyroxène (OPX)
olivine

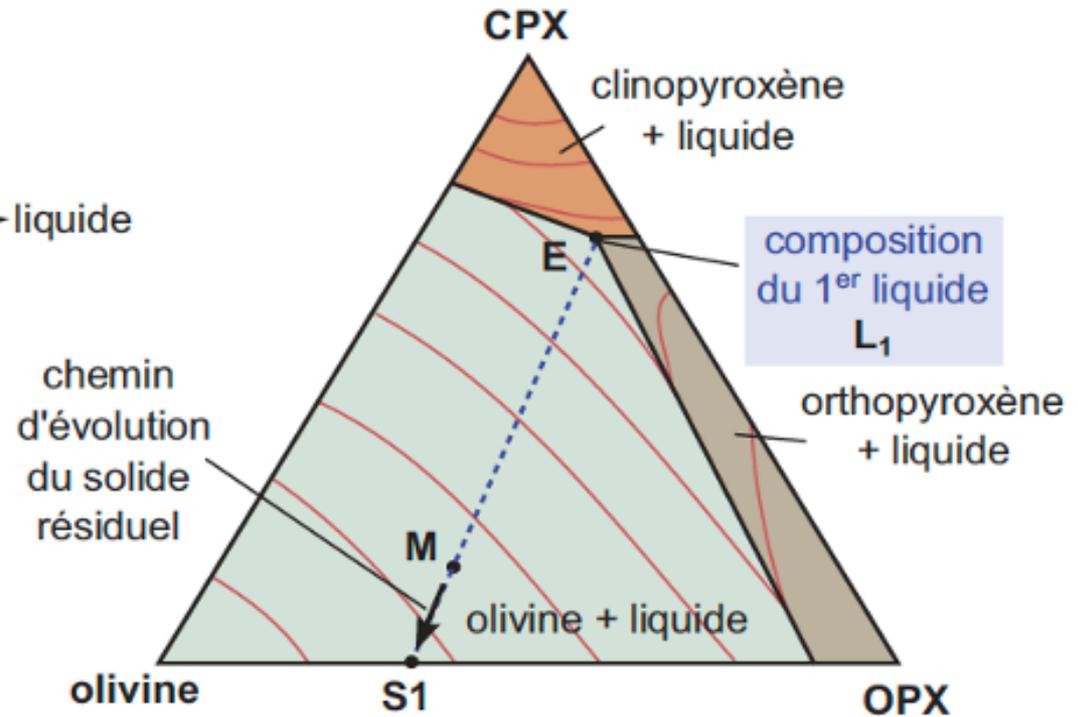
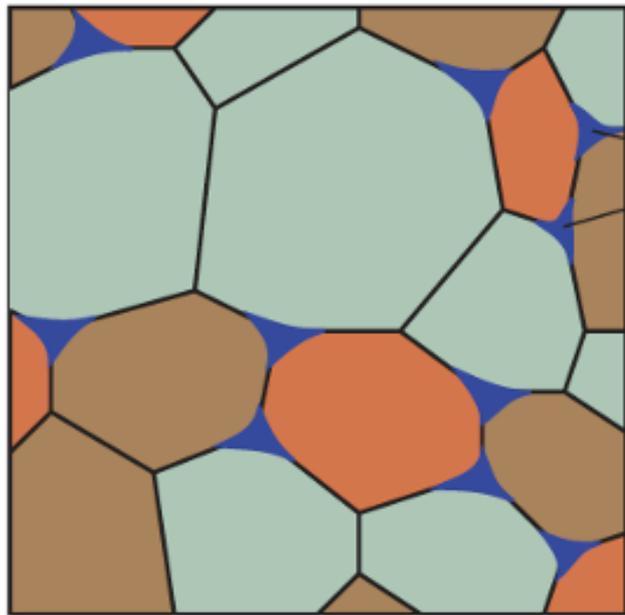
Iherzolite

olivine
 SiO_4Mg_2



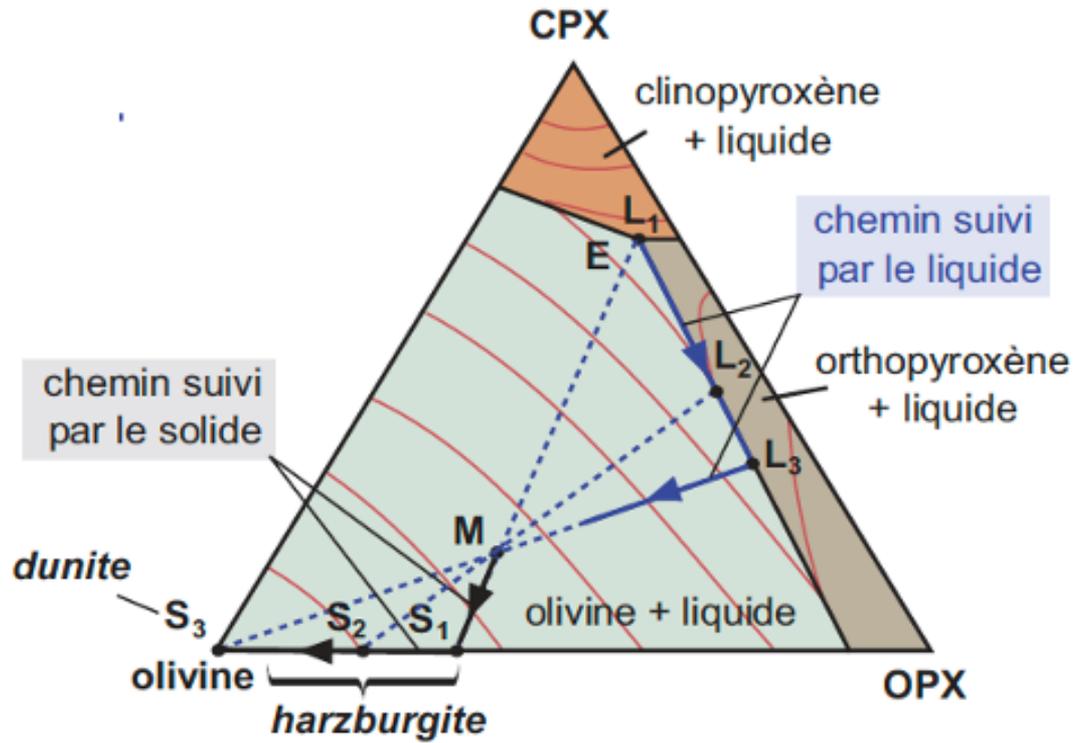
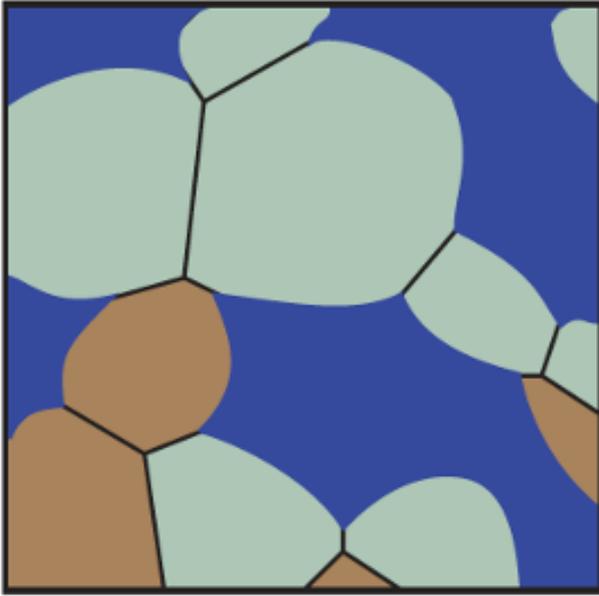
Eutectique : mélange de constituants en proportions déterminées qui fondent ou cristallisent totalement à température constante et minimale.

(b) début de fusion (quelques %)



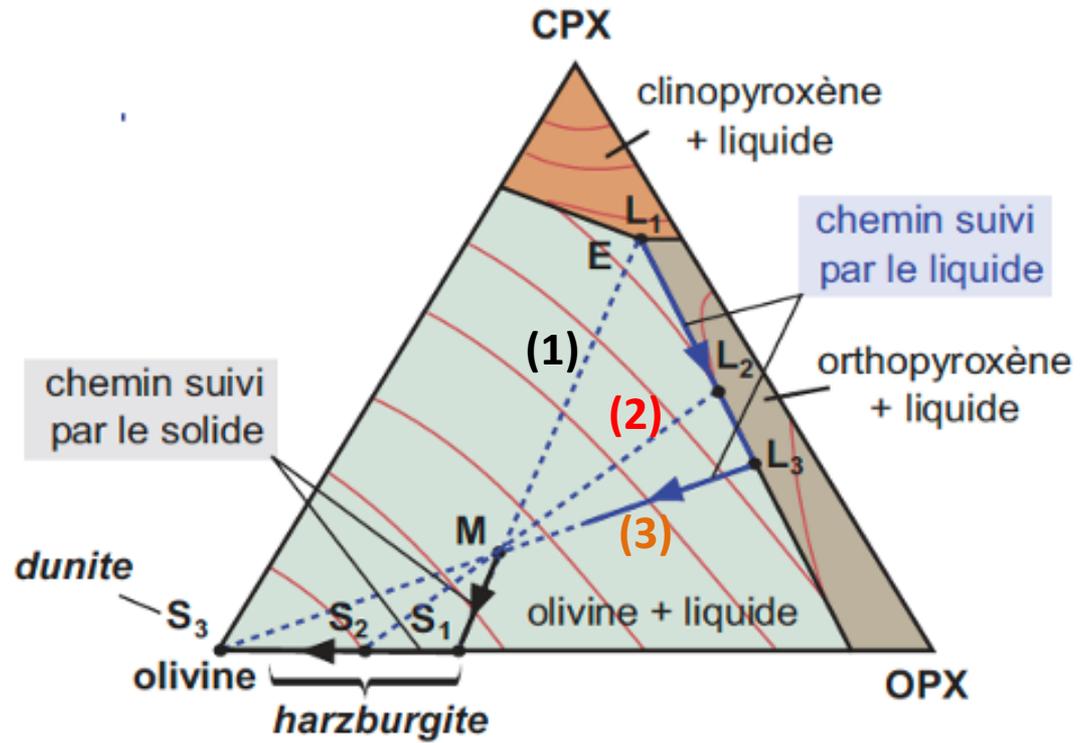
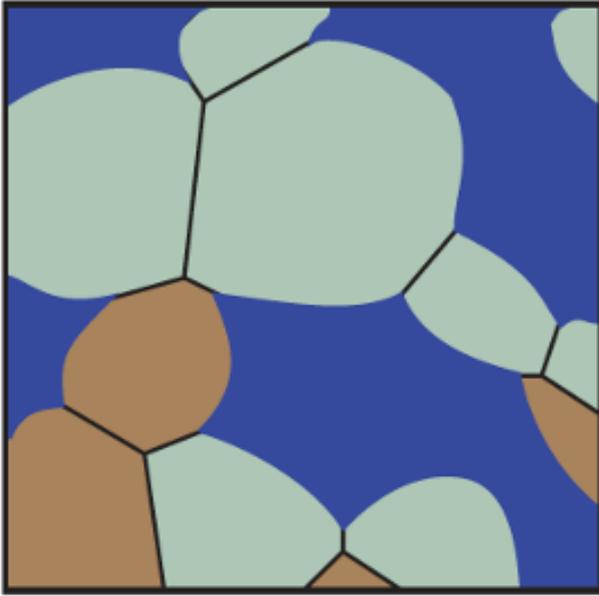
b) situation à l'eutectique ternaire ; lorsque la température de l'eutectique ternaire E est atteinte, la FP débute et produit un premier liquide dont la composition est celle de l'eutectique E ; la formation de ce liquide apparaît donc dans les zones de contact entre les trois minéraux ; le liquide formé en E est plus enrichi en CPx que le solide initial M ; le solide résiduel s'enrichit donc en OL et OPx : sa composition évolue de M à S1, atteinte lorsque le CPx est entièrement fondu.
La péridotite a alors une composition d'harzburgite.

(c) fusion avancée (~30 %)



c) **fusion avancée** : après disparition du CPx, la composition du liquide évolue alors selon la **ligne cotectique** séparant les champs de OL et OPx. La composition du solide résiduel se déplace peu à peu vers le pôle olivine au fur et à mesure que s'accroît la fusion de l'OPx (positions L2 et S2). Les proportions relatives de solide et de liquide aux différents stades sont données par la règle des leviers. La composition L3 est atteinte lorsque Opx a entièrement disparu : le solide résiduel est entièrement constitué d'olivine, ce qui correspond à la composition d'une dunite. L'évolution ultérieure du liquide pour des températures croissantes se ferait alors vers M, où serait atteinte la fusion totale.

(c) fusion avancée (~30 %)



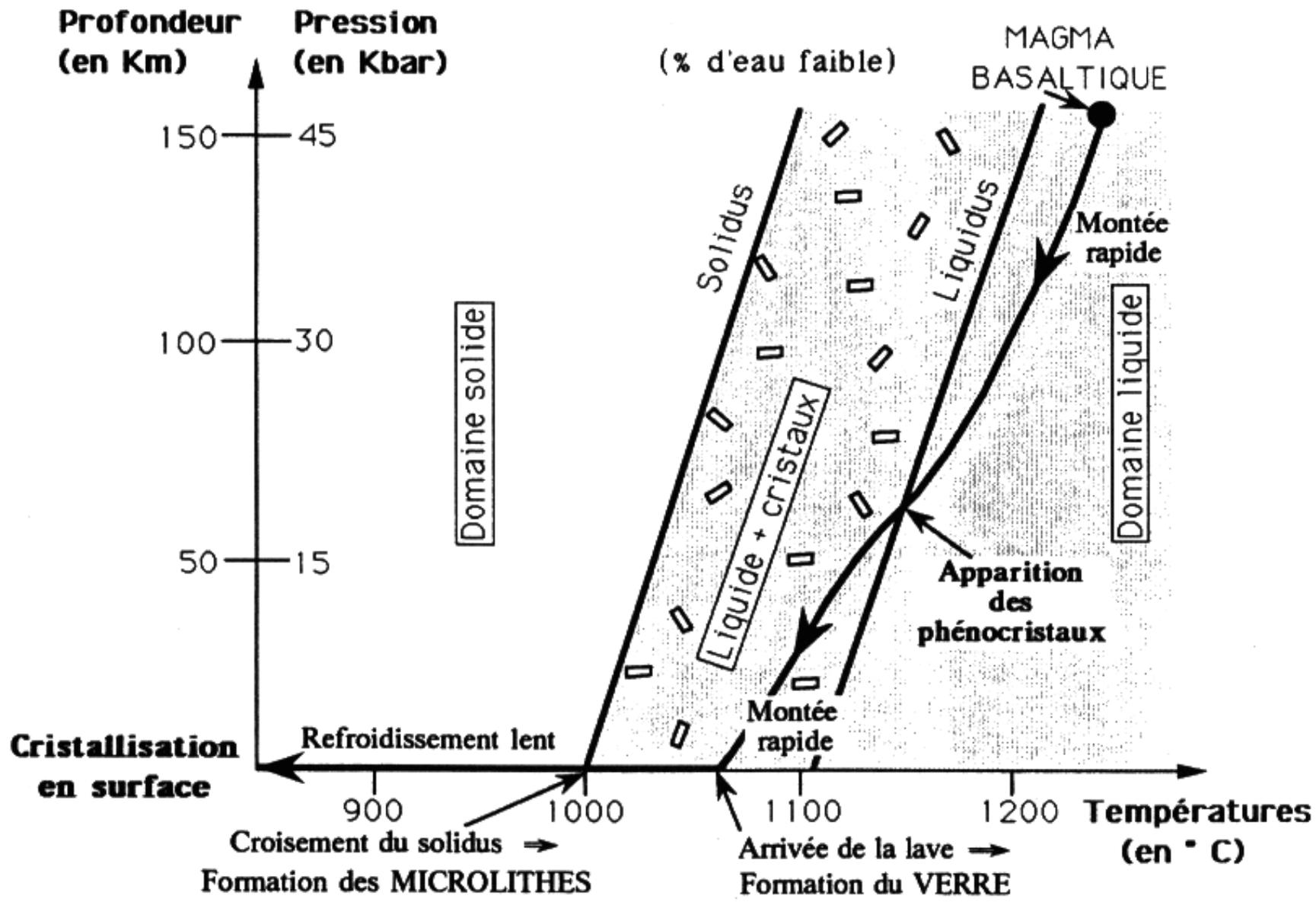
La règle des leviers

$$(1) \% \text{ de liquide} = MS_1/L_1S_1$$

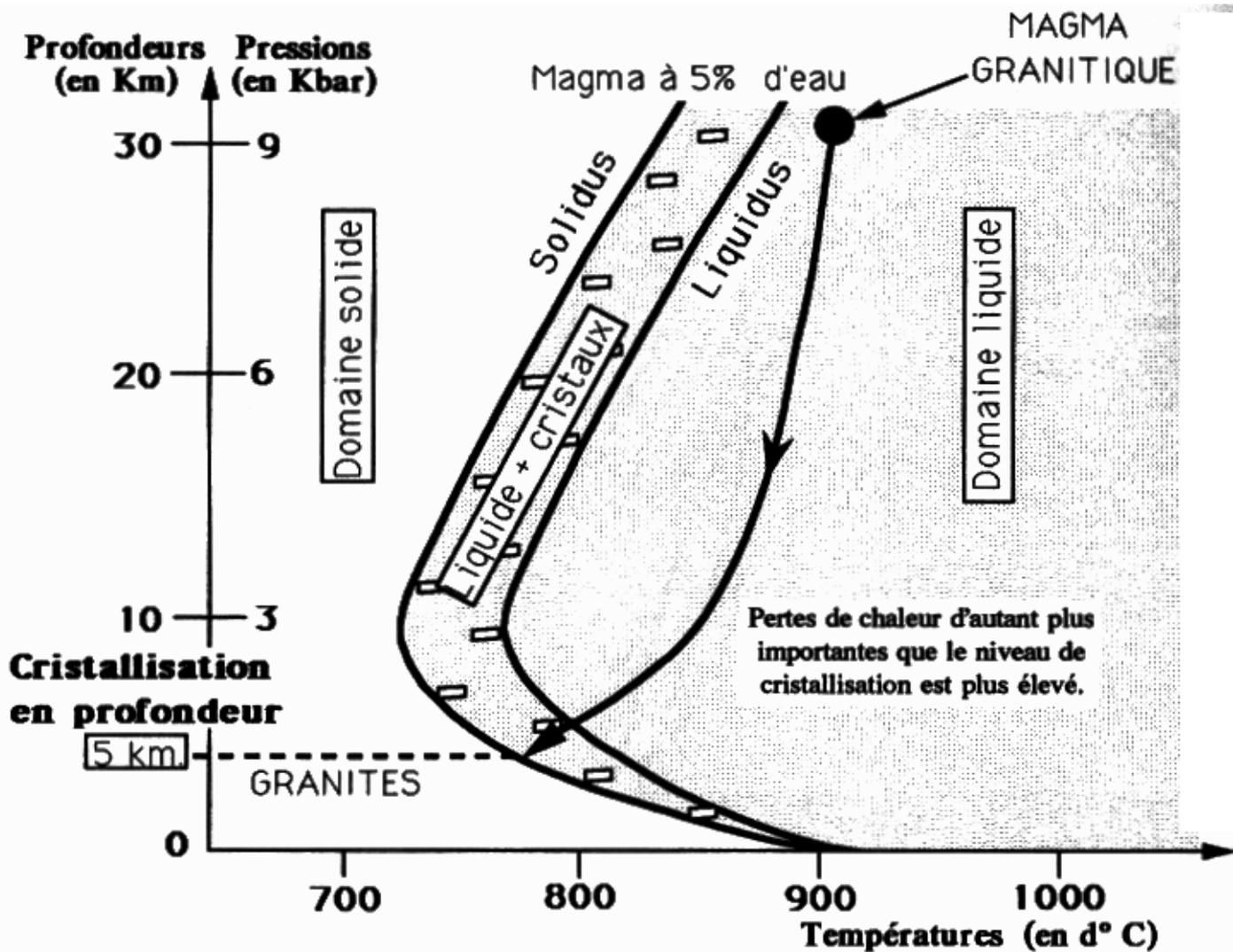
$$(2) \% \text{ de liquide} = MS_2/L_2S_2$$

$$(3) \% \text{ de liquide} = MS_3/L_3S_3$$

II.3.2. La remontée du magma



Les différentes étapes de la cristallisation d'un magma basaltique.



Trajectoire d'un magma granitique dans un champ pression-température, lors de son ascension vers la surface.

On constate que le liquide est entièrement cristallisé à 5 km de profondeur ; il n'apparaîtra en surface qu'à la faveur de l'érosion ou d'un phénomène tectonique.

III. L'ÉVOLUTION DES MAGMAS

III.1 Établir un ordre de cristallisation

III.2 Les processus d'évolution magmatique

III.3 Les mécanismes de cristallisation

III.3.1. La stabilité des minéraux

III.3.2. Cristallisation à l'équilibre et fractionnée dans un diagramme à solution solide

III.3.3. Cristallisation dans un diagramme binaire avec eutectique

III.3.4. Cristallisation dans un diagramme ternaire

III.4 Classification des roches magmatiques et notion de série magmatique

III.4.1. Texture, minéralogie et classifications

III.4.2. Séries magmatiques et contextes géodynamiques de leur mise en place

A. Les séries alcalines

B. Les séries tholéitiques

C. Les séries calcoalcalines (ou séries orogéniques)

D. Les granites

IV PRÉVENIR LE RISQUE VOLCANIQUE

IV.1. La notion de risque volcanique

IV.2. La gestion des risques volcaniques

CONCLUSION

III. L'EVOLUTION DES MAGMAS

III.1 Établir un ordre de cristallisation

III.2 Les processus d'évolution magmatique

III.3 Les mécanismes de cristallisation

III.3.1. La stabilité des minéraux

III.3.2. Cristallisation à l'équilibre et fractionnée dans un diagramme à solution solide

III.3.3. Cristallisation dans un diagramme binaire avec eutectique

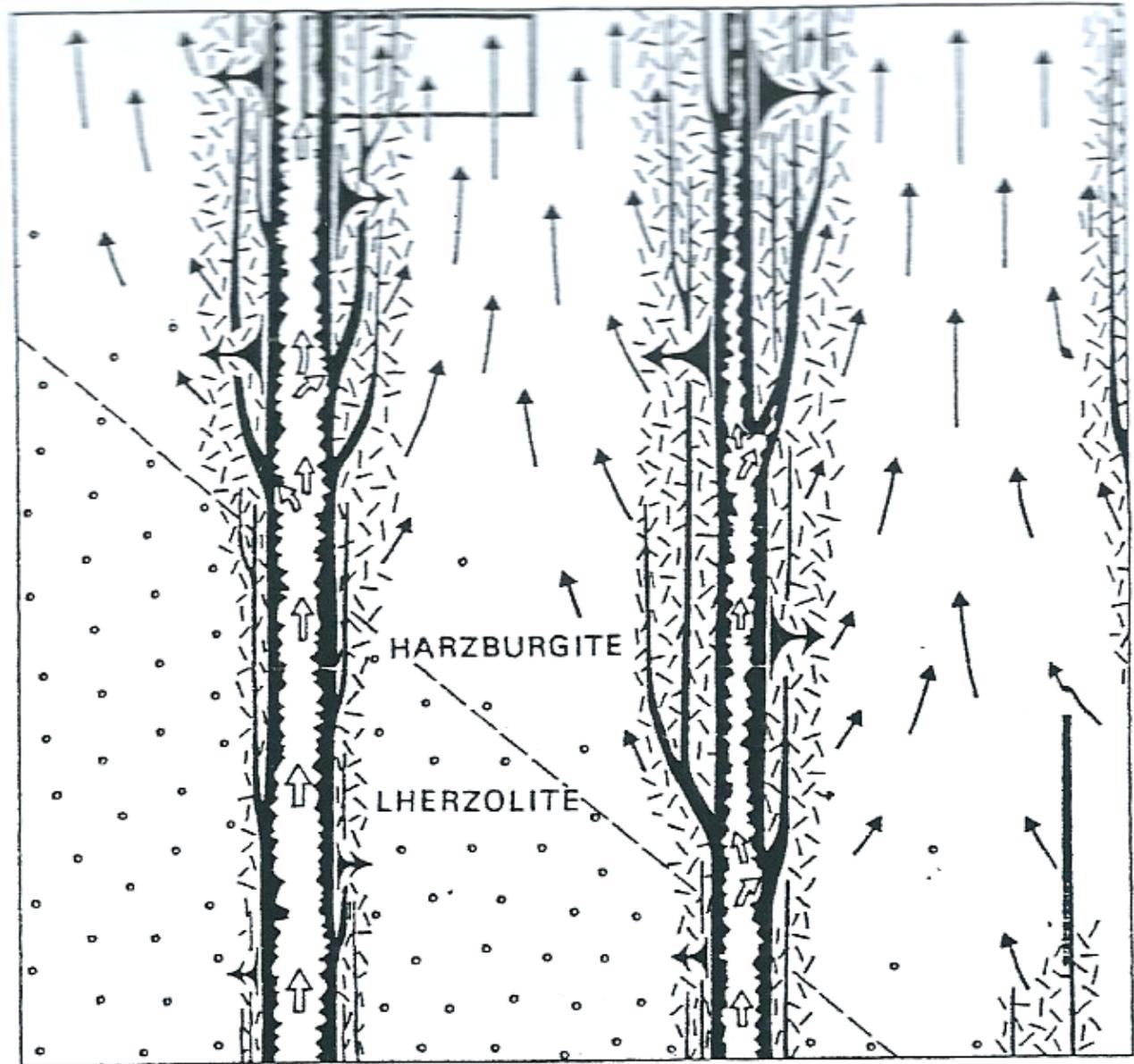
III.3.4. Cristallisation dans un diagramme ternaire

Magma 32 : Modèle explicatif du métasomatisme (in Bodinier)

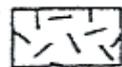
Le basalte alcalin s'infiltré dans des fractures au sein d'une harzburgite.

L'ordre de grandeur est la dizaine de centimètres en largeur.

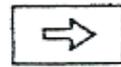
1. Séparation des minéraux dans le conduit.
2. Amphibole de la péridotite
3. Flux de magma dans le conduit.
4. Percolation dans la harzburgite de silicate en fusion.
5. Diffusion à travers la phase fondue.



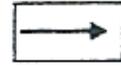
1



2



3

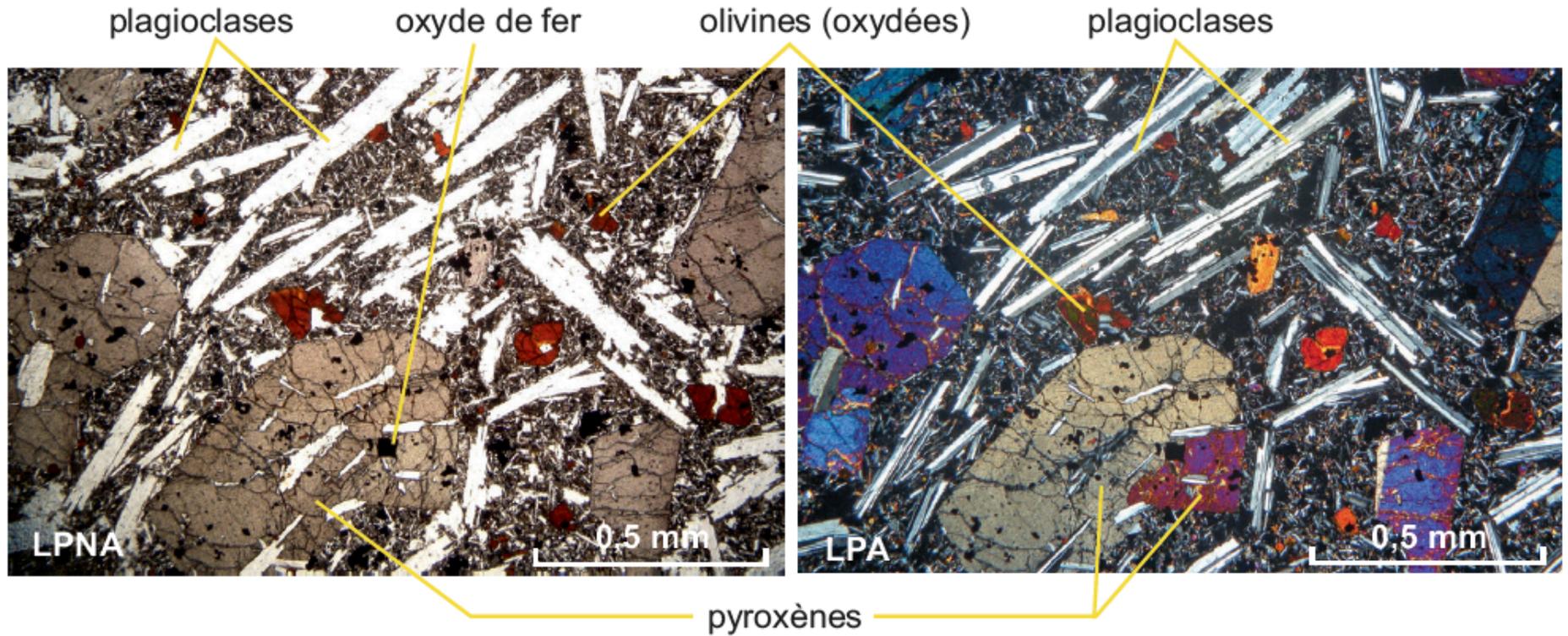


4



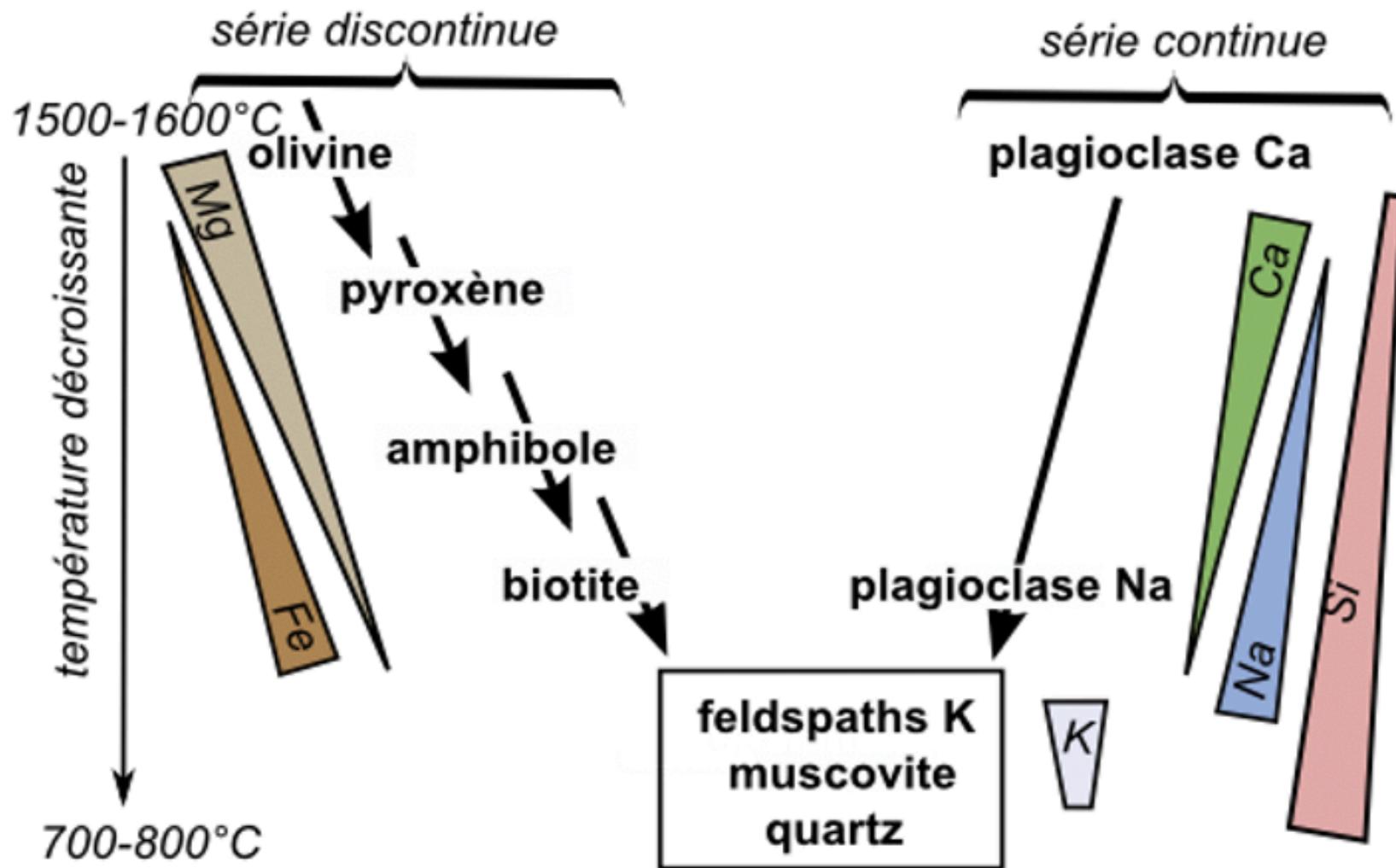
5

Magma 33a: Établir un ordre de cristallisation : les relations géométriques entre les minéraux

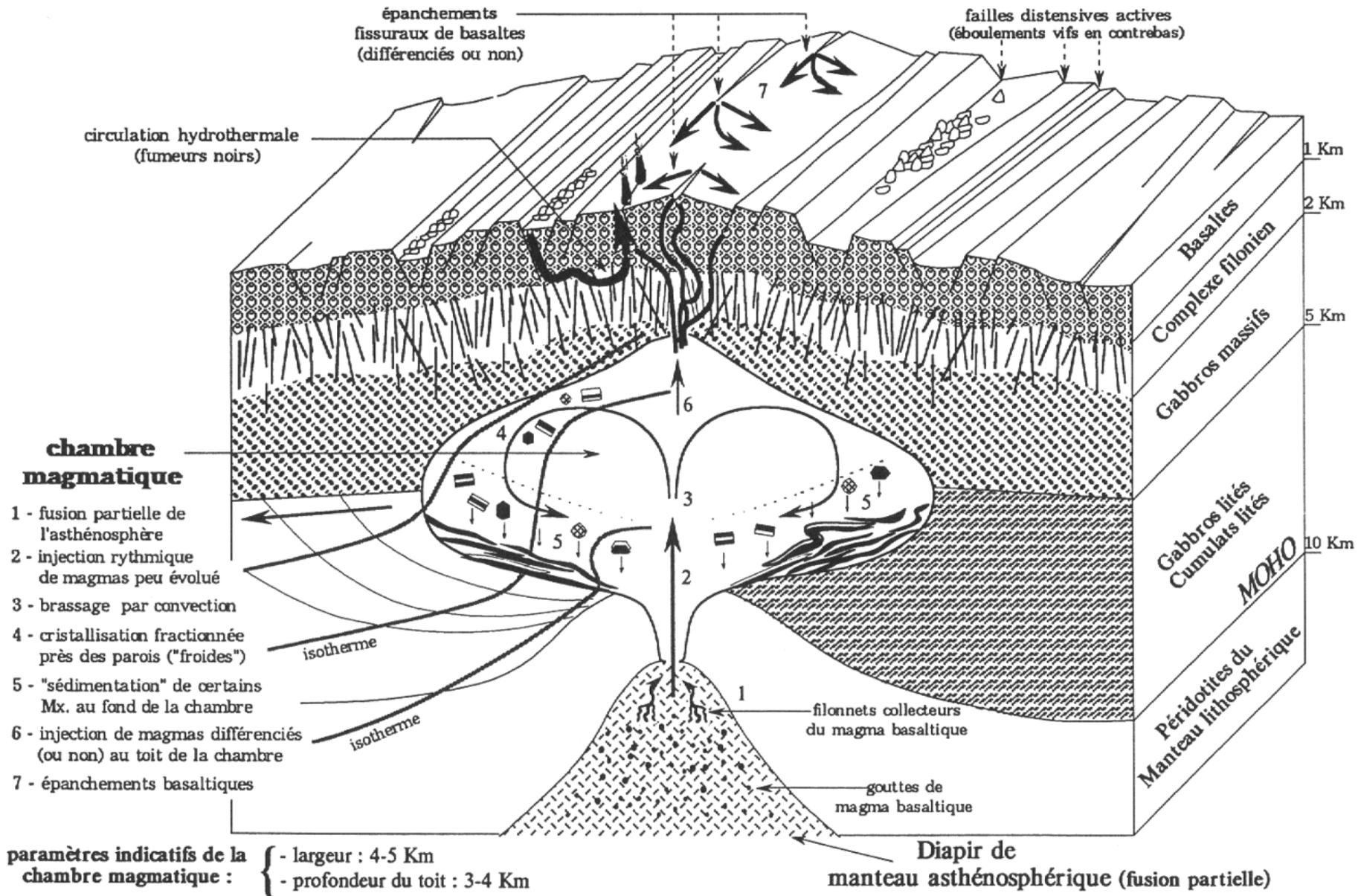


1. Forme des cristaux : les cristaux précoces sont souvent automorphes, les cristaux tardifs xénomorphes ;
2. Relations géométriques entre les cristaux : les cristaux automorphes inclus totalement ou partiellement sont précoces par rapport à ceux qui les contiennent ;
3. Taille des cristaux : les cristaux précoces ont généralement eu davantage de temps pour croître.

Magma 33b: Les séries de Bowen : ordre potentiel d'apparition des minéraux lors de la cristallisation (in Tout-En-Un, Géologie, Dunod)



Magma 34: Mise en en place et cristallisation de la chambre magmatique d'une dorsale rapide type Océan Pacifique (in Caron & al, modifié)



III.2 Les processus d'évolution magmatique

Σ processus \rightarrow formation de magma fils dont la composition chimique est différente de celle du magma originel. 4 Mécanismes :

La différenciation pneumatolytique

Magmas riches en gaz, les bulles (H_2O et CO_2) transportent des substances pneumatophiles : Na, K, Fe, Ti et P. La solubilité augmentant quand P diminue, ces éléments repassent en solution dans le magma dans les parties hautes du réservoir = processus de transferts gazeux \rightarrow plus grande diversité de lignées magmatiques que les magmas granitiques, plus visqueux.

L'assimilation

Contamination du magma par un encaissant de nature différente \rightarrow magma synthétique. Contamination est d'autant plus importante que:

- **contraste géochimique** entre le magma et son encaissant important
- encaissant présente une **température de fusion basse**. Cas du basalte recoupant une CC hydratée. Cas des séries calco-alcalines.

L'hybridisme

Mélange de deux magmas de compositions différentes. Magma acide + magma basique → magma hétérogène et la présence d'enclaves basiques dans le premier (St Arnac). Magma basaltique à 1200 °C vs magma granitique (750 °C): au contact, le premier cristallise très vite car il rencontre un milieu plus froid → microgabbro.

La cristallisation fractionnée évoquée (mécanismes seront vus plus loin).

III.3 Les mécanismes de cristallisation

III.3.1. La stabilité des minéraux

III.3.2. Cristallisation à l'équilibre et fractionnée dans un diagramme à solution solide

III.3.3. Cristallisation dans un diagramme binaire avec eutectique

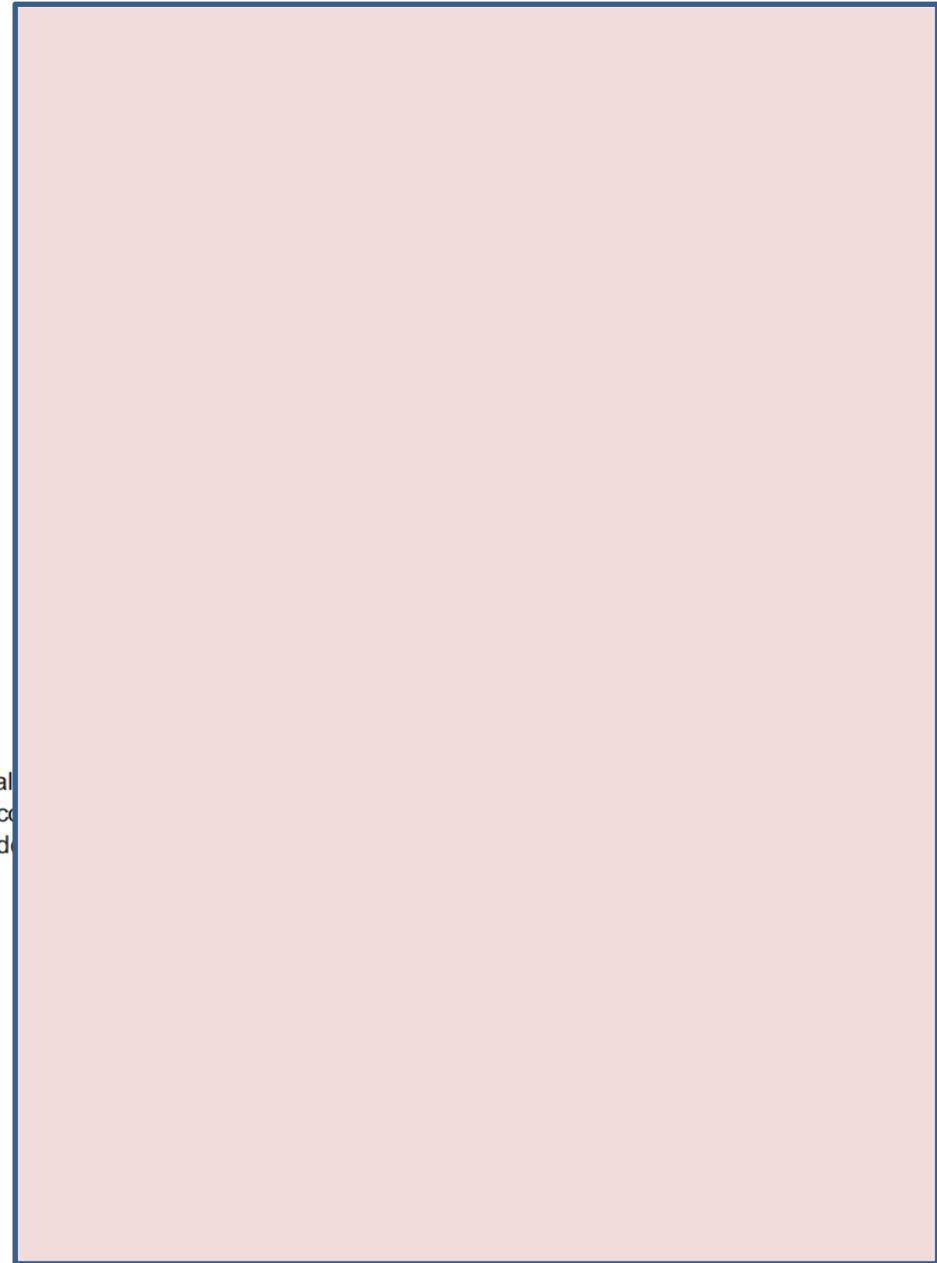
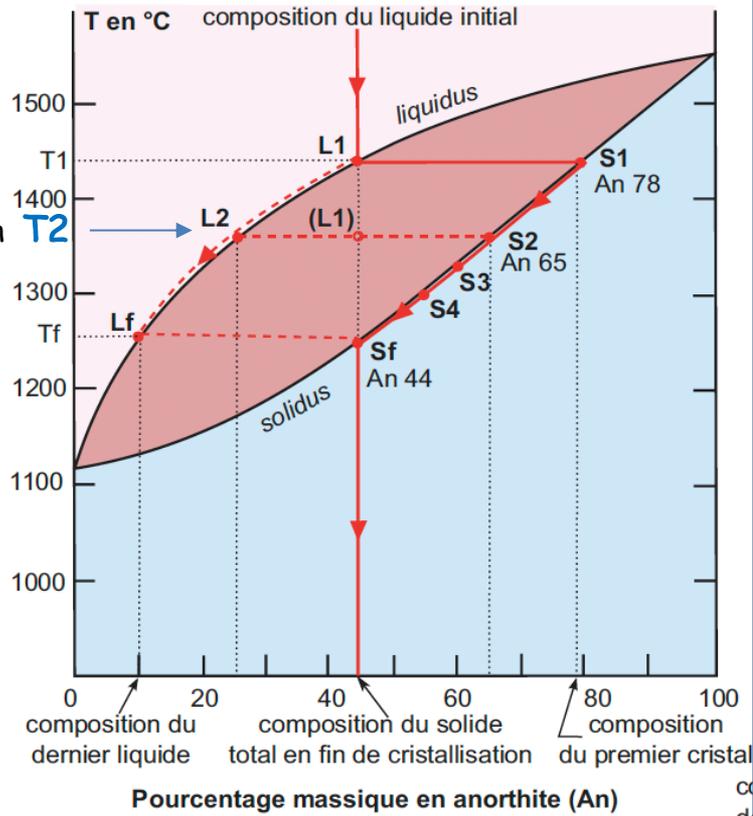
III.3.4. Cristallisation dans un diagramme ternaire

Magma 35 : Diagramme binaire avec solution solide : système des plagioclases (à 1 bar).

(cliché J-M Bardintzeff in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).

(a)

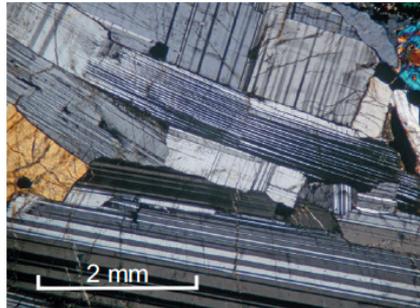
(c)



(a)
Cristallisation
à l'équilibre

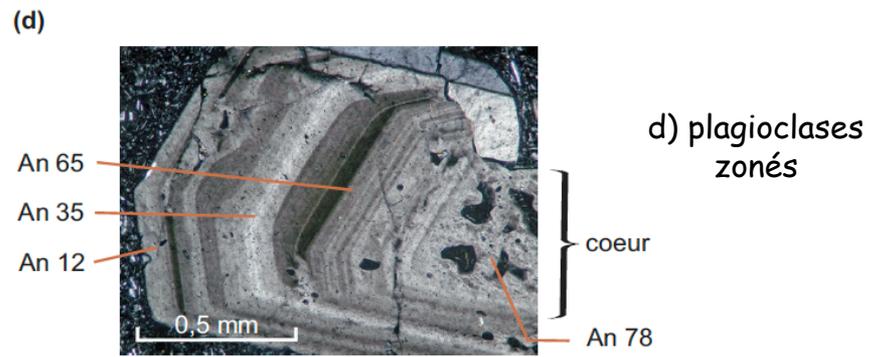
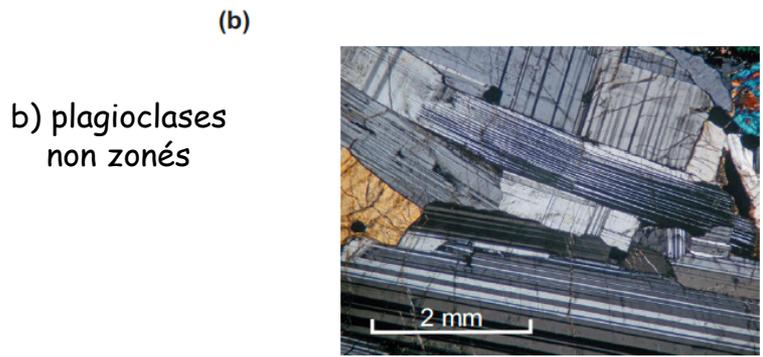
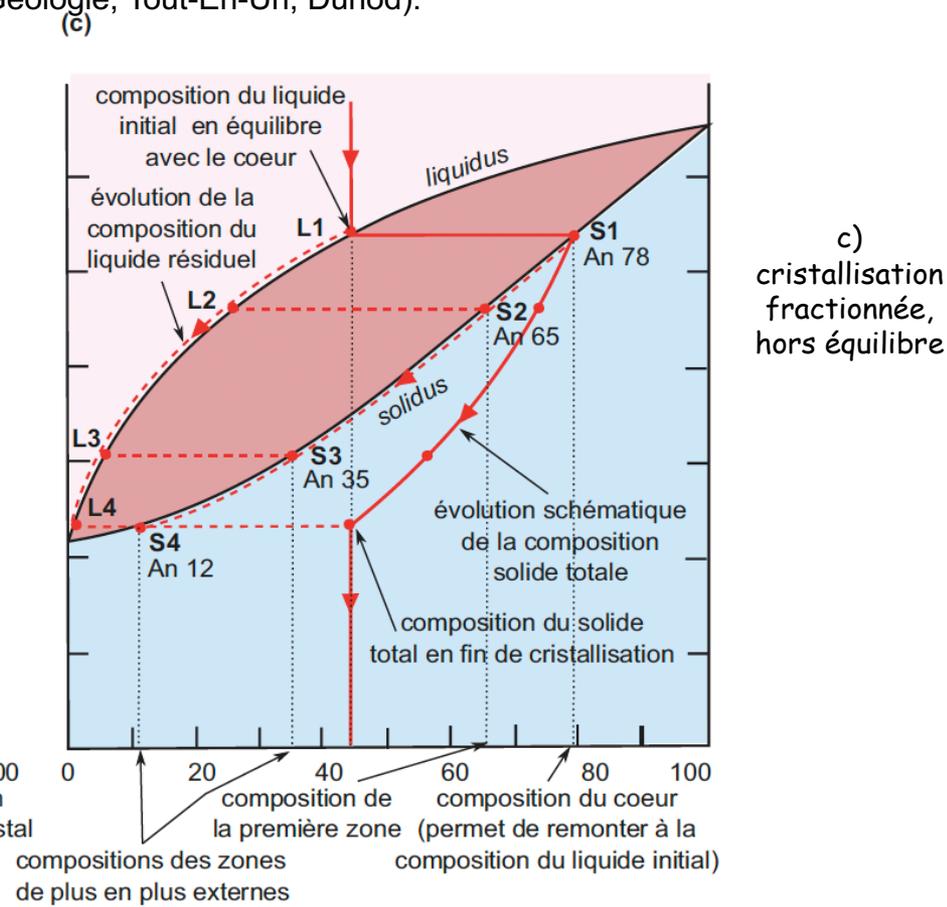
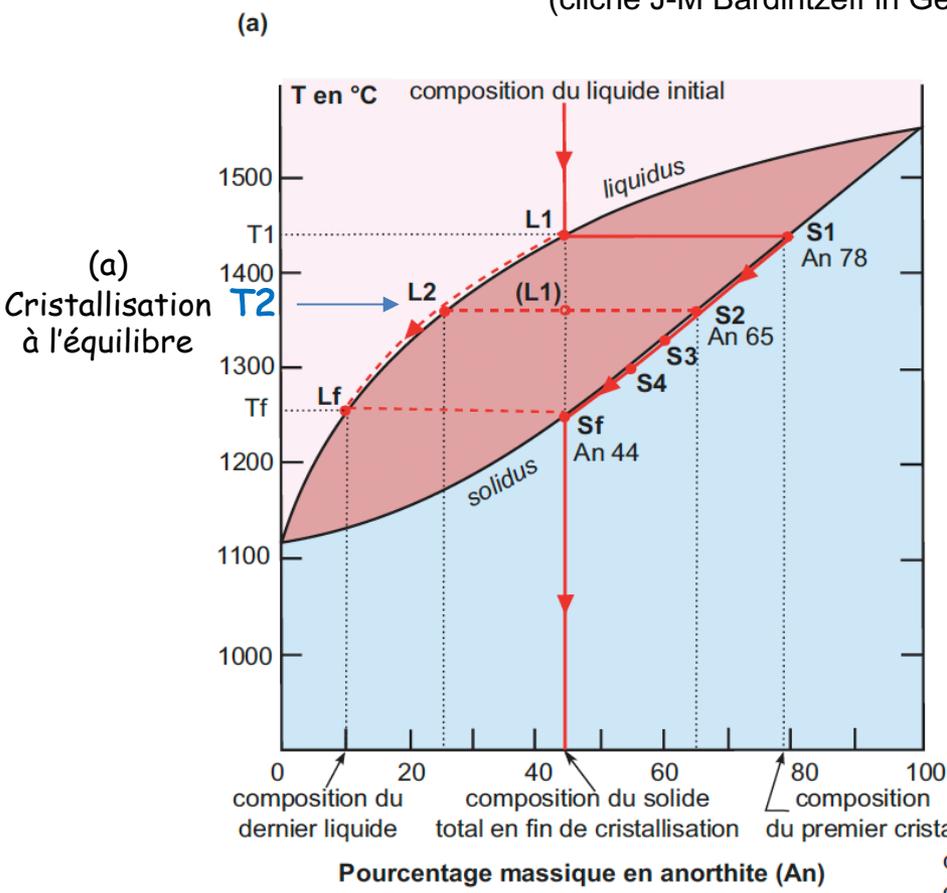
(b)

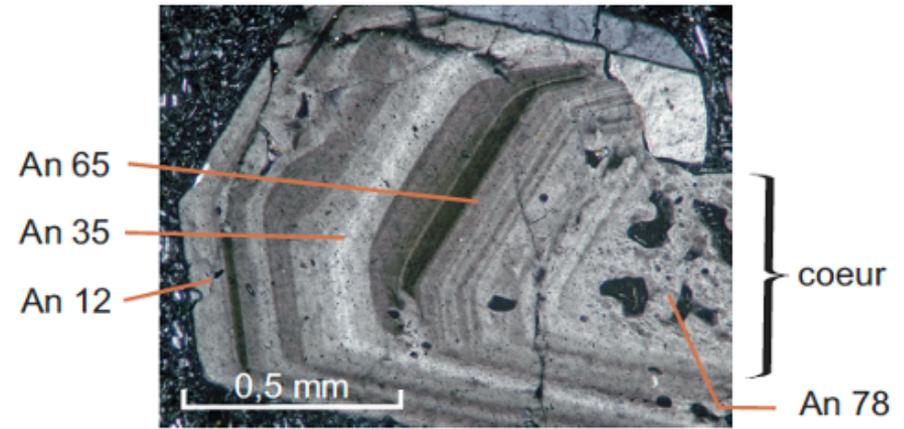
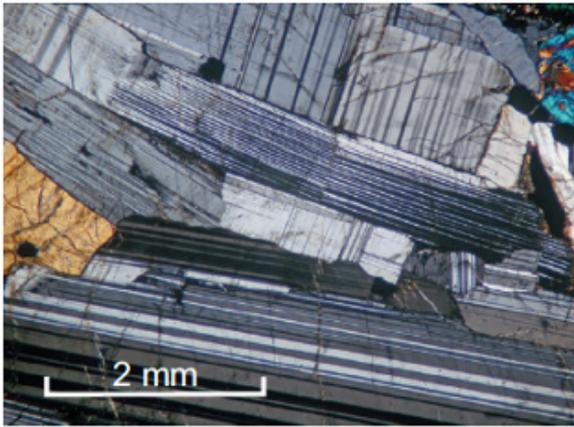
b) plagioclases
non zonés



Magma 35 : Diagramme binaire avec solution solide : système des plagioclases (à 1 bar).

(cliché J-M Bardintzeff in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).





Les analyses à la microsonde électronique révèlent que :

Si les premiers cristaux formés gardent une possibilité d'échanges par diffusion avec le liquide, ils se remettent à l'équilibre avec le liquide à toute température et leur composition, homogène, évolue selon la courbe du solidus.

Exple: à la température T_2 , le liquide de composition An 25 est en équilibre avec des cristaux de composition An 65.

Pour toute température, la proportion relative en liquide et solide est donnée par la règle des leviers.

Dans le cas d'une cristallisation en équilibre, la dernière goutte de liquide a la composition L_f à la température T_f ; tous les cristaux S_f sont homogènes et ont la composition du liquide initial.

Le coeur des cristaux est toujours plus calcique que la périphérie de en plus plus sodique vers l'extérieur.

Coeur du cristal = début de la cristallisation.

Le coeur du cristal a un indice An de 78 : il a donc cristallisé à partir d'un liquide initial de composition bien moins calcique que cette première phase cristalline.

Sa composition évolue sur le liquidus vers le pôle albite. À chaque instant, de nouvelles zones cristallisent, devenant de moins en moins calcique.

Ceci suppose que les zones initialement cristallisées ne soient pas ré-homogénéisées en permanence et rééquilibrées avec les nouvelles compositions du liquide : la fraction cristallisée se trouve donc isolée d'une évolution ultérieure : il s'agit d'une **cristallisation fractionnée** qui se distingue d'une cristallisation à l'équilibre.

Estimez de manière graphique ou par le calcul quelles sont les proportions relatives de liquide et de solide pour la température T2.

Application de la règle des leviers (proportion du segment opposé par rapport au segment total)

Proportion de liquide : $L1S2 \times 100/S2L2 = 21 \times 100/40 = 52,5 \%$;

Proportion de solide : $L2L1 \times 100/S2L2 = 19 \times 100/40 = 47,5 \%$.

Calcul du bilan de matière

Soit x la proportion de solide de composition An 65

$44 \times 100 =$ quantité de départ

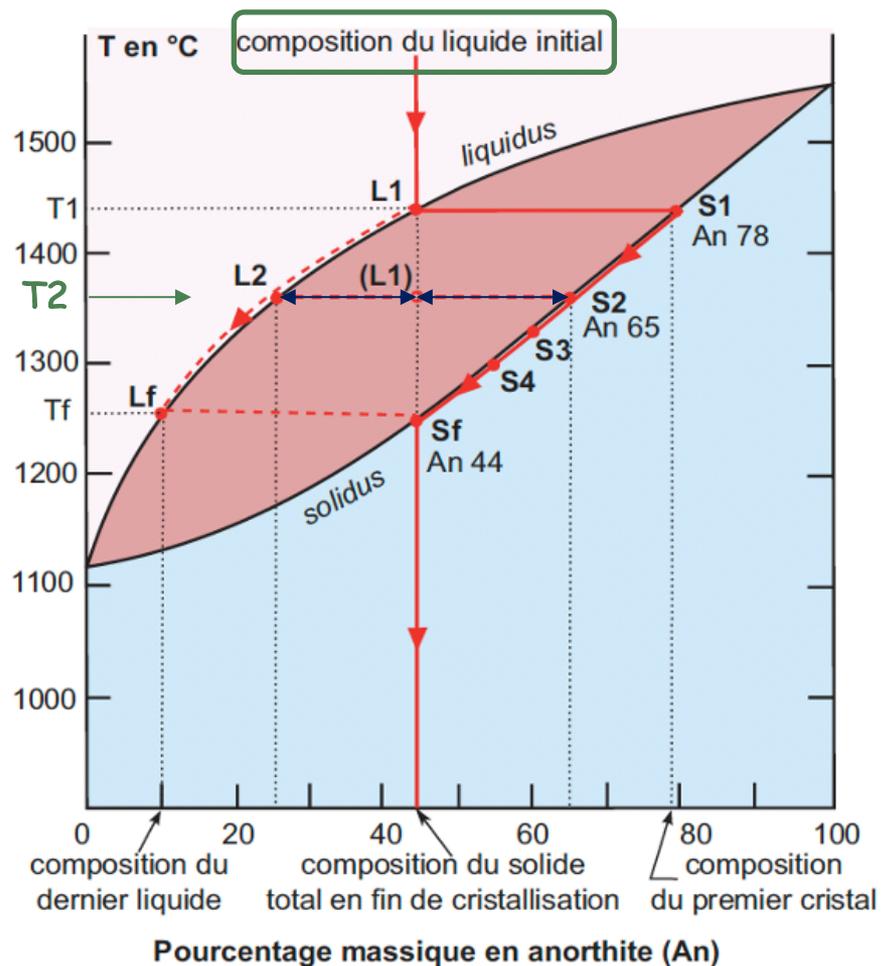
$65 =$ % de An65 solide à T2

$25 =$ % de An65 liquide à T2

$44 \times 100 = 65x + 25 \times (100 - x)$

$4400 - 2500 = 40x$

Soit $x = 1900/40 = 47,5 \%$



↑
25% de An65

↑
65% de An65

Bilan

L'absence de zonation dans un cristal de plagioclase indique qu'un état d'équilibre est réalisé pendant toute la cristallisation = cristallisation à l'équilibre.

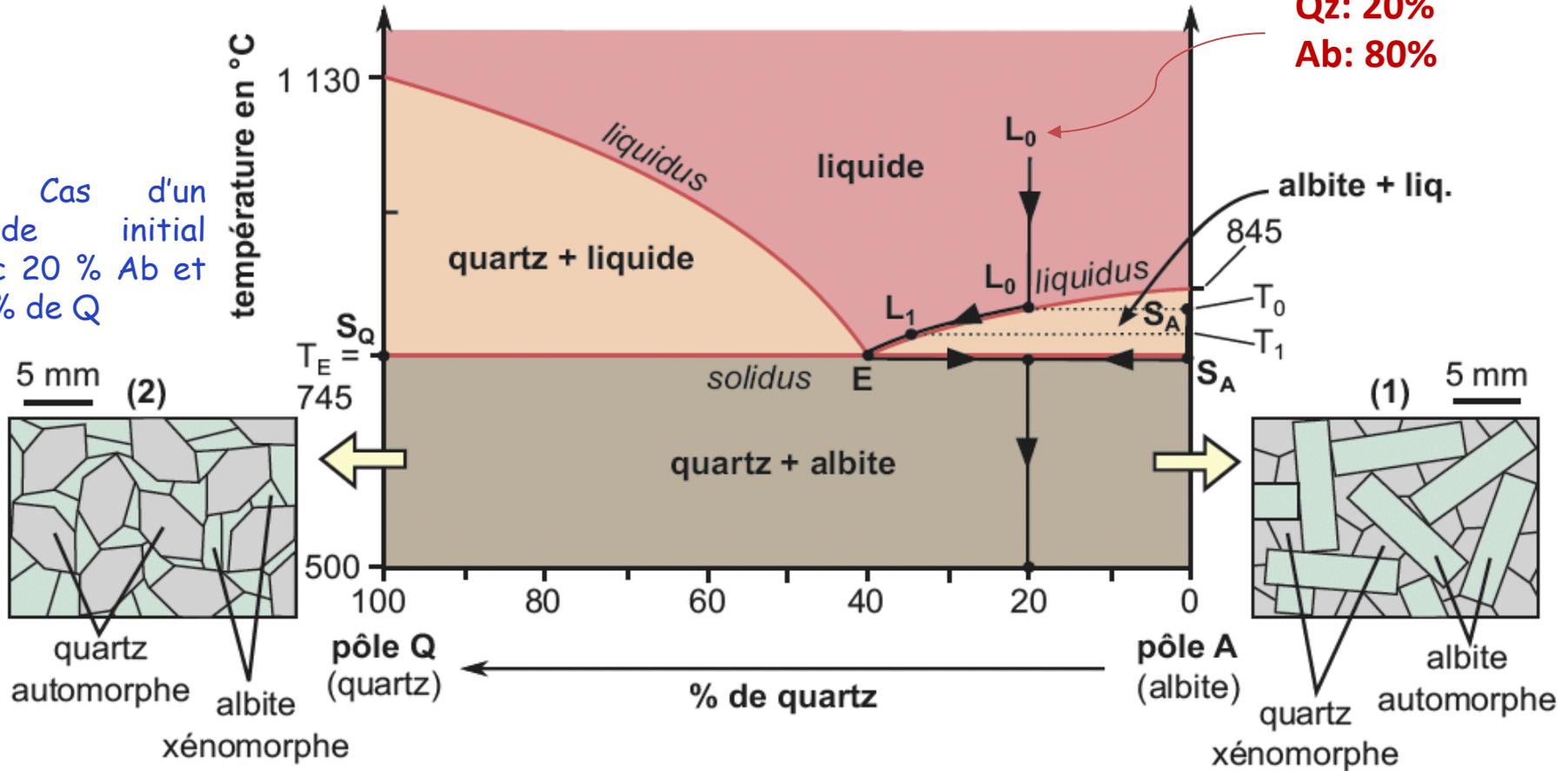
La diffusion des éléments dans le solide étant très lente, la vitesse de cristallisation à l'équilibre doit aussi être particulièrement lente.

La zonation des cristaux traduit au contraire une absence d'homogénéisation des zones déjà cristallisées avec le liquide : celles-ci sont isolées du liquide qui évolue alors indépendamment : ceci définit une cristallisation fractionnée.

Magma 36: Diagramme de phases du système quartz-albite et cristallisations associées (1) et (2). (in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).

Qz: 20%
Ab: 80%

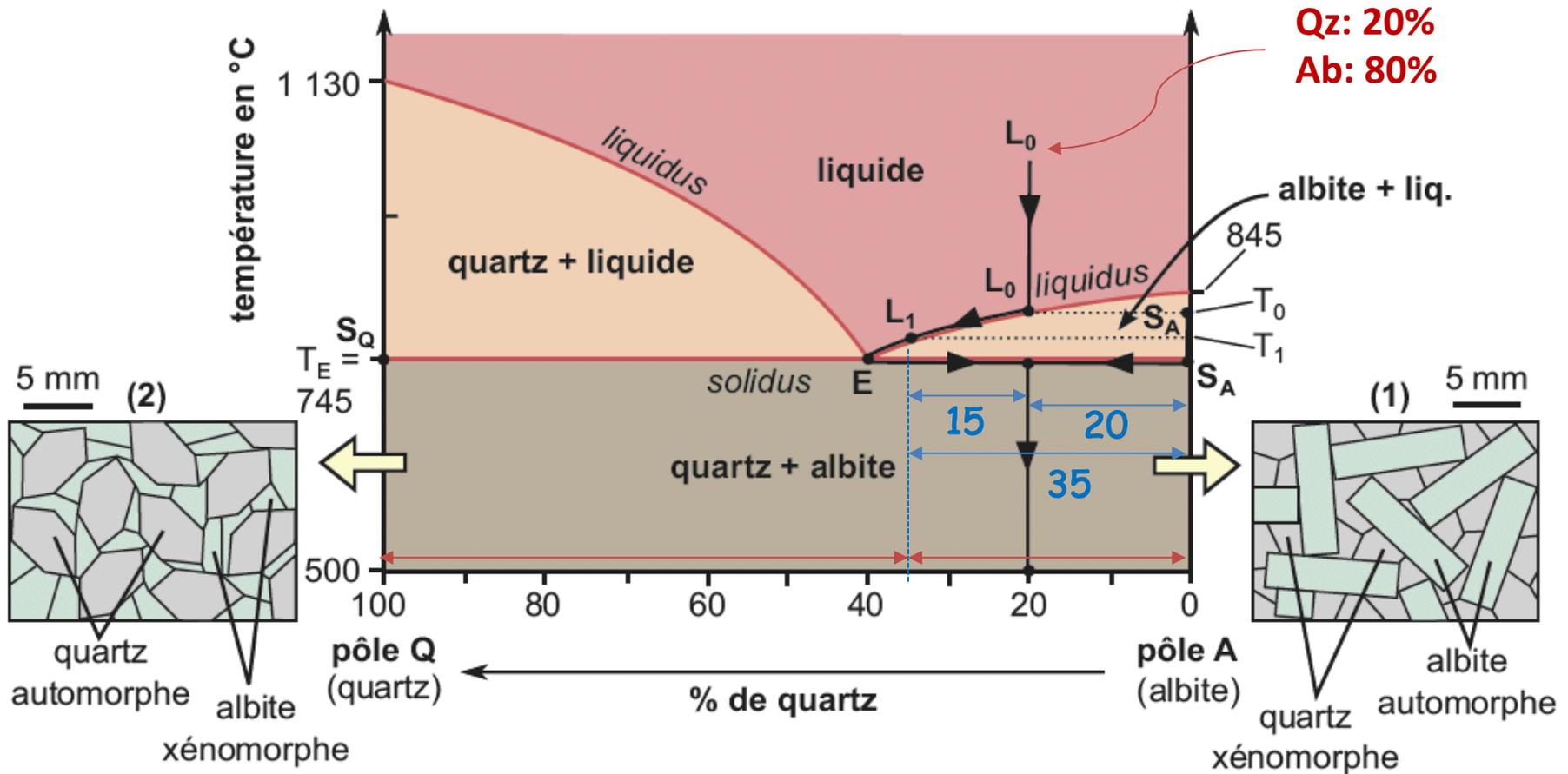
(2) Cas d'un liquide initial avec 20 % Ab et 80 % de Q



À l'eutectique TE, cristallisation conjointe de Q et Ab.
 Elle s'effectue à partir de la fraction de liquide résiduel et dans les proportions de l'eutectique.

Texture susceptible d'être obtenue schématisée en (1) : 1er cristaux apparus = phénocristaux automorphes, 2nd phase cristallise plus tardivement à l'eutectique = cristaux xénomorphes.
 Si cristallisation à l'équilibre, composition du mélange solide obtenu = celle du liquide initial.

Magma 36: Diagramme de phases du système quartz-albite et cristallisations associées (1) et (2). (in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).



Proportions et compositions des phases solide et liquide à la température T_1 .

Règle des leviers (proportion du segment ou bras de levier opposé / segment total) :

- proportion de solide = LOL_1/L_1S_A soit $15 \times 100/35 = 43 \%$;
- proportion de liquide = LOS_A/L_1S_A soit $20 \times 100/35 = 57 \%$.

Le solide n'est constitué que d'albite ; en projetant sur l'axe horizontal, on voit que le liquide L_1 a pour composition 35 % de constituant quartz et 65 % de constituant albite.

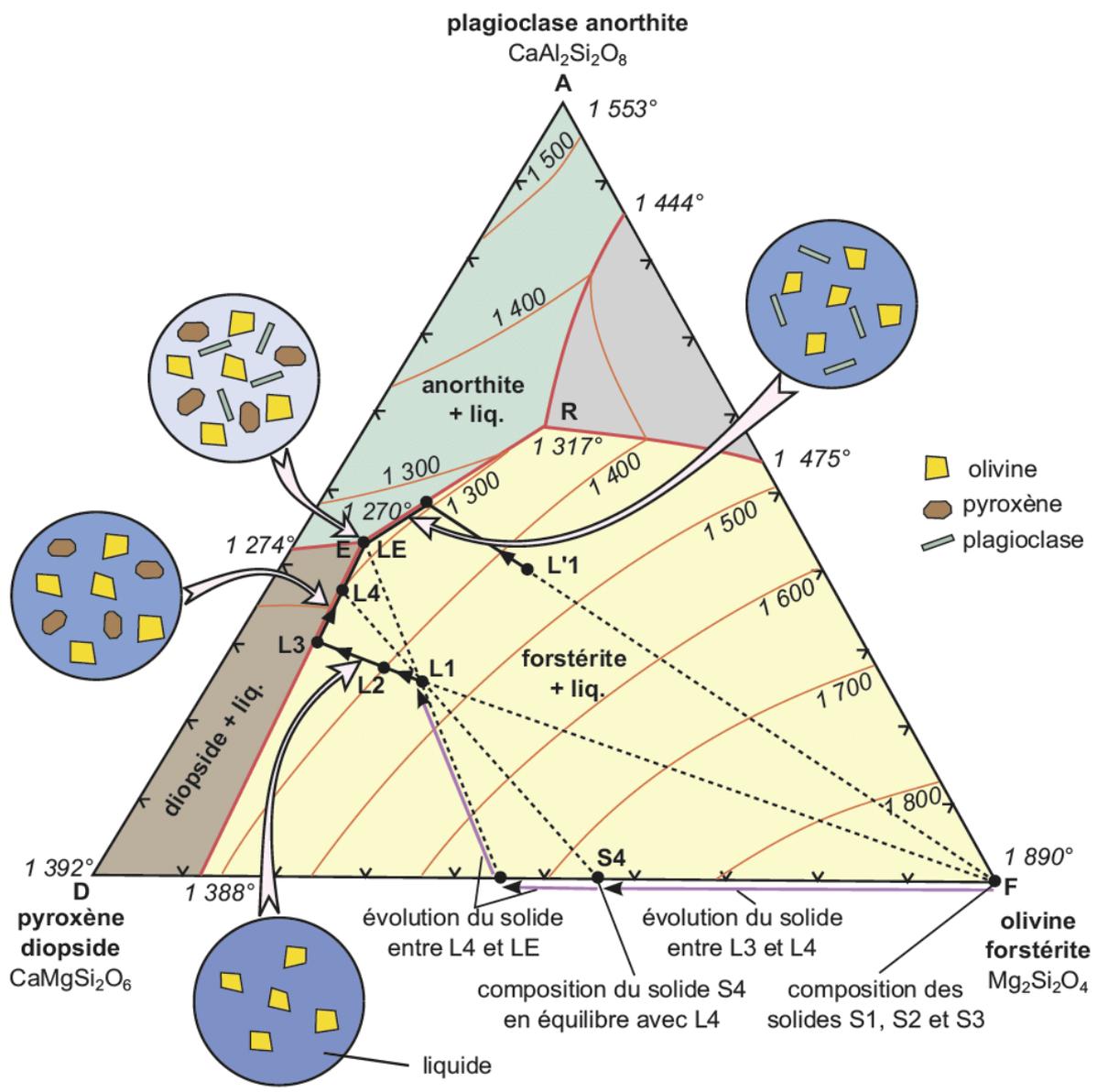
Magma 37: Évolution de la cristallisation dans le diagramme ternaire anorthite (plagioclase) – diopside (clinopyroxène) – forstérite (olivine) pour P = 0,1 MPa.
 (in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).

Liquide L1 de composition (F 25 % ; A : 25 % ; D : 50 %)

1^{er} cristaux apparaissent à 1450 °C : F (solide S1).

Le liquide évolue en direction de la ligne cotectique selon la droite F-L1 (perte en mg et conservation des % relatifs des autres éléments).

Composition du solide S2, formé uniquement d'olivine toujours au pôle F.

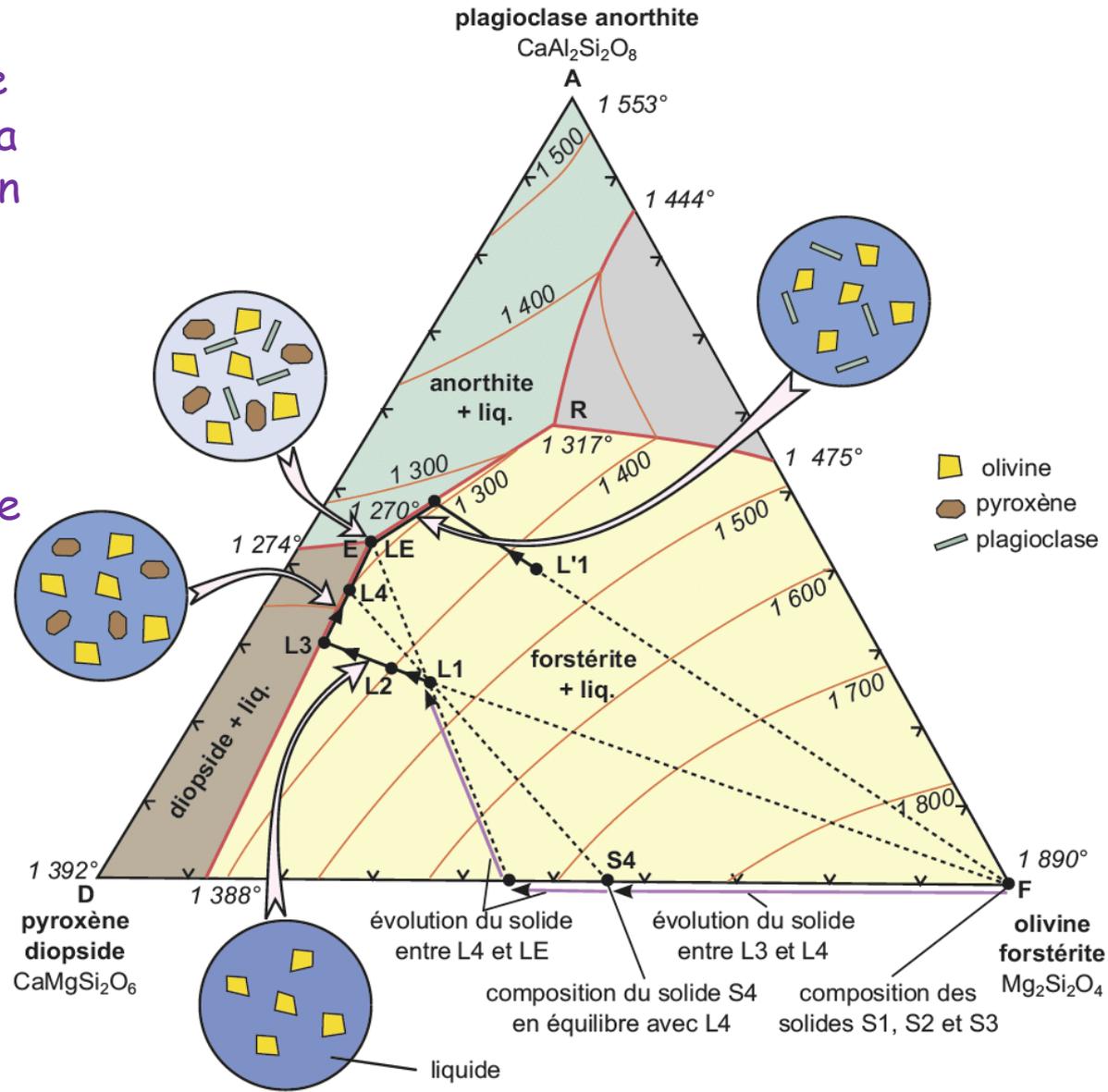


Le liquide atteint en L3 T°C de la ligne cotectique où débute la cristallisation du Di. L'évolution se fait alors selon la vallée thermique en direction du point E.

Durant cette évolution, le solide est constitué de F et D avec une composition qui évolue selon la ligne F-D.

Le liquide atteint enfin l'eutectique avec une composition LE.

A cristallise : la composition du solide quitte alors la ligne F-D jusqu'à retrouver la composition du liquide initial.



Au final, solide constitué des phases A-D-F dans les proportions initiales (F : 25 % ; A : 25 % ; D : 50 %).

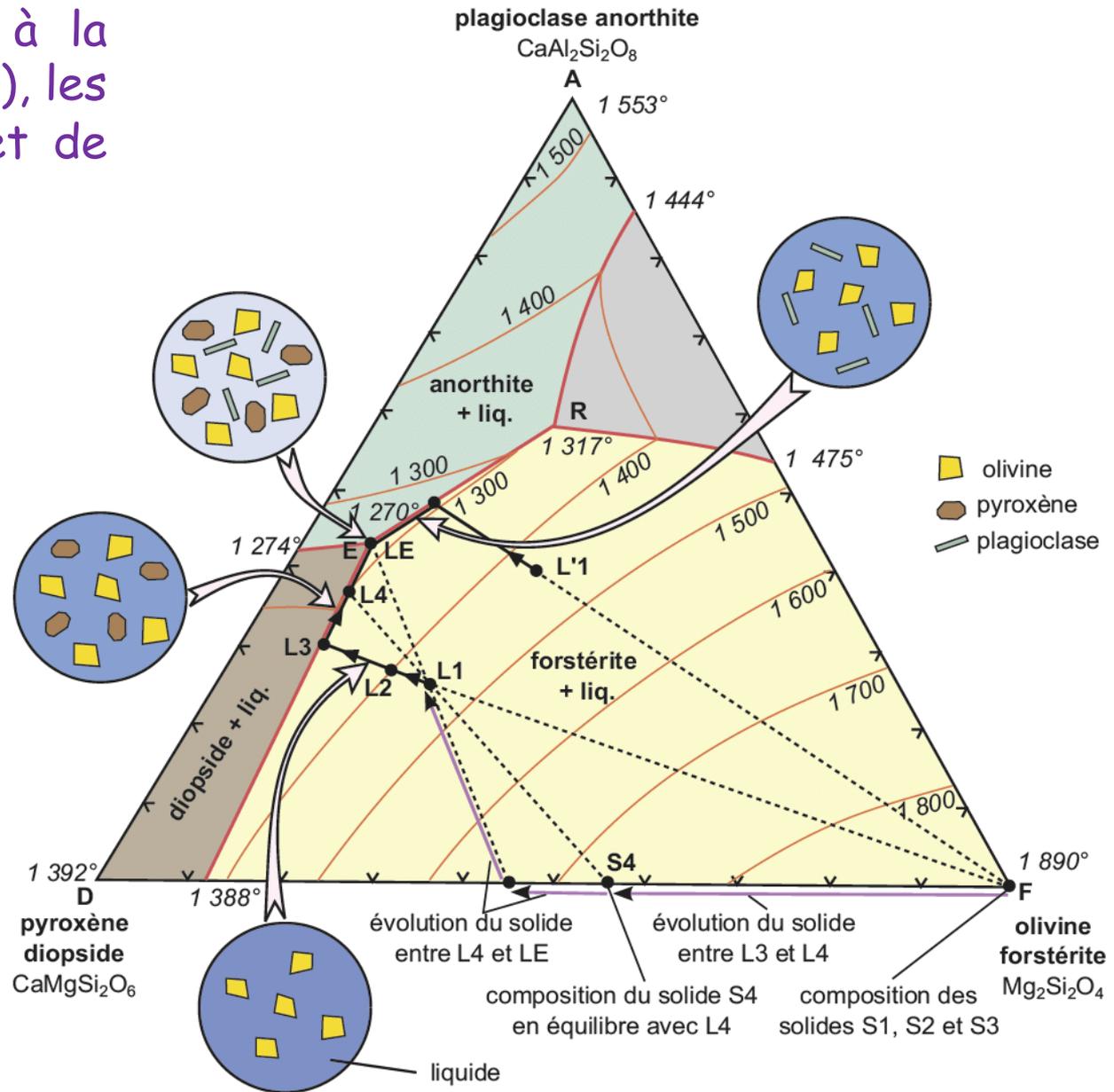
Proportion de liquide et de solide estimées par la règle des leviers.

Pour T correspondant à la composition L2 (1400 °C), les proportions de solide et de liquide sont:

Solide: : L1L2/FL2

Liquide: et FL1/FL2.

La composition du solide S2, formé uniquement d'olivine est toujours au pôle F.



III.4 Classification des roches magmatiques et notion de série magmatique

III.4.1. Texture, minéralogie et classifications

III.4.2. Séries magmatiques et contextes géodynamiques de leur mise en place

A. Les séries alcalines

B. Les séries tholéitiques

C. Les séries calcoalcalines (ou séries orogéniques)

D. Les granites

Roches classées selon leur:

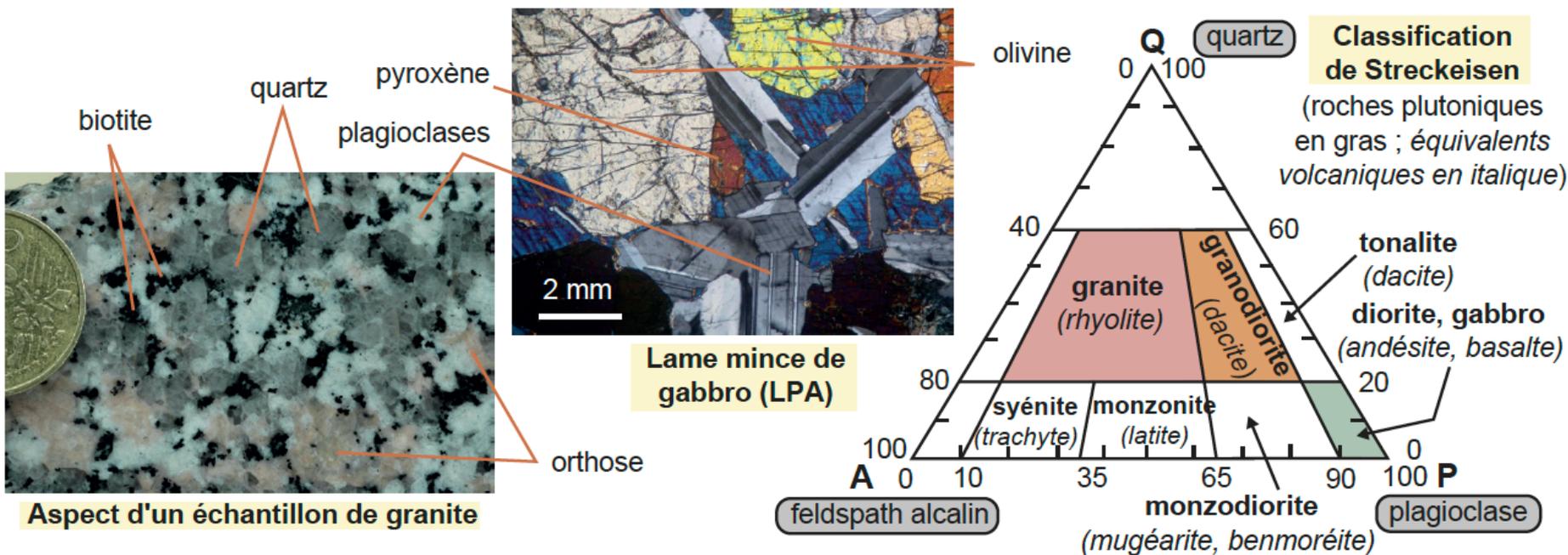
- texture : grenue, microgrenue et microlithique.
- % des minéraux cardinaux.

Minéraux essentiels : olivines, pyroxènes, amphiboles, micas, feldspaths, feldspathoïdes, quartz.

Magma 38 : Exemples de texture grenue et classification de Streckeisen des roches plutoniques (in Géologie, Tout-En-Fiches, Dunod)

Roches plutoniques : texture grenue (100 % de cristaux visibles à l'oeil nu, dits phénocristaux) :

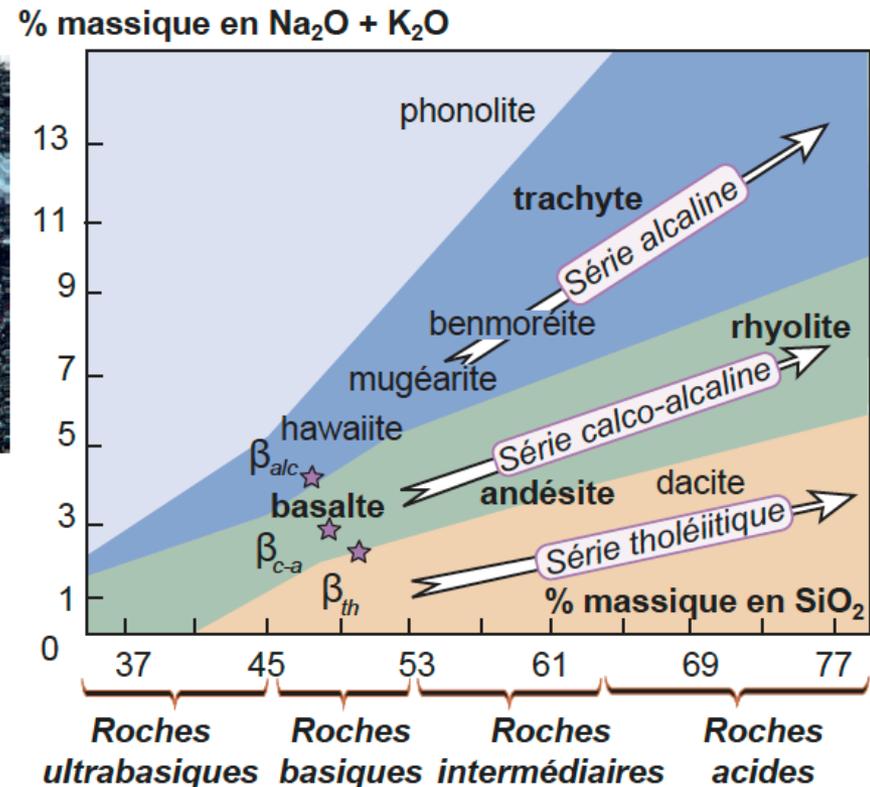
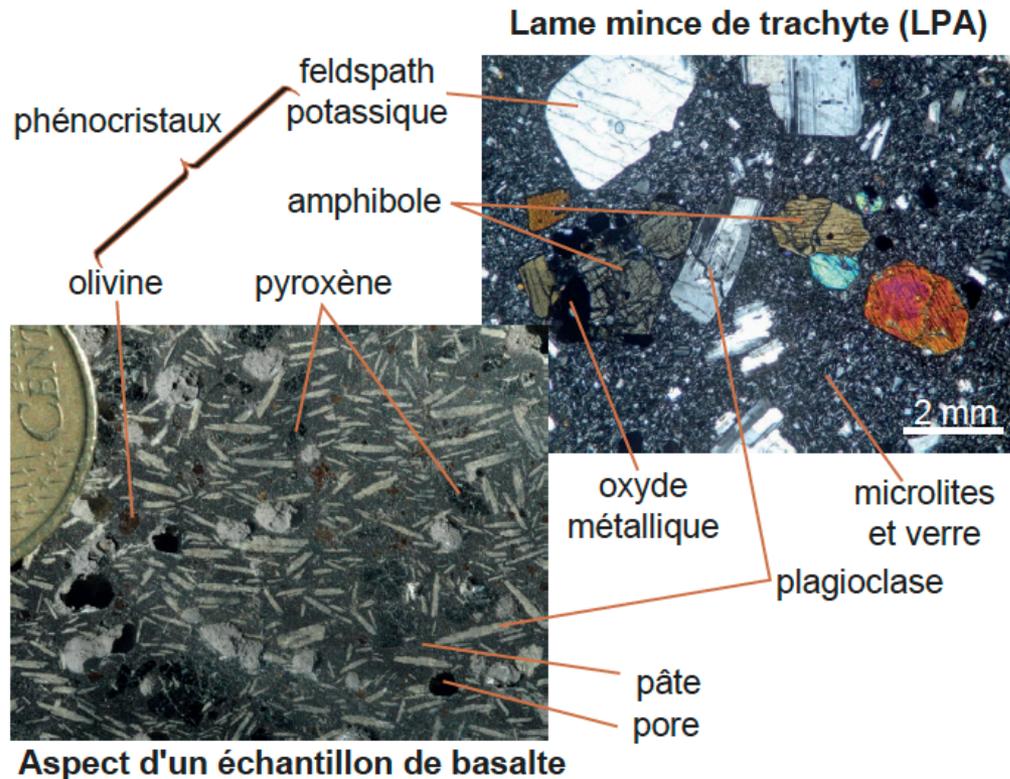
- classification de Streckeisen fondée sur les proportions de minéraux clairs (quartz, feldspaths alcalins, plagioclases) ramenées à 100 % ;
- distinction selon la teneur en silice (roches acides : $\text{SiO}_2 > 63\%$; roches intermédiaires : $53\% < \text{SiO}_2 < 63\%$; roches basiques : $\text{SiO}_2 < 53\%$).



Magma 39 : Exemples de texture microlitique et classification TAS des roches volcaniques (in Géologie, Tout-En-Un, Dunod).

Roches volcaniques : texture microlitique (microlites visibles au microscope, verre, % variable de phénocristaux).

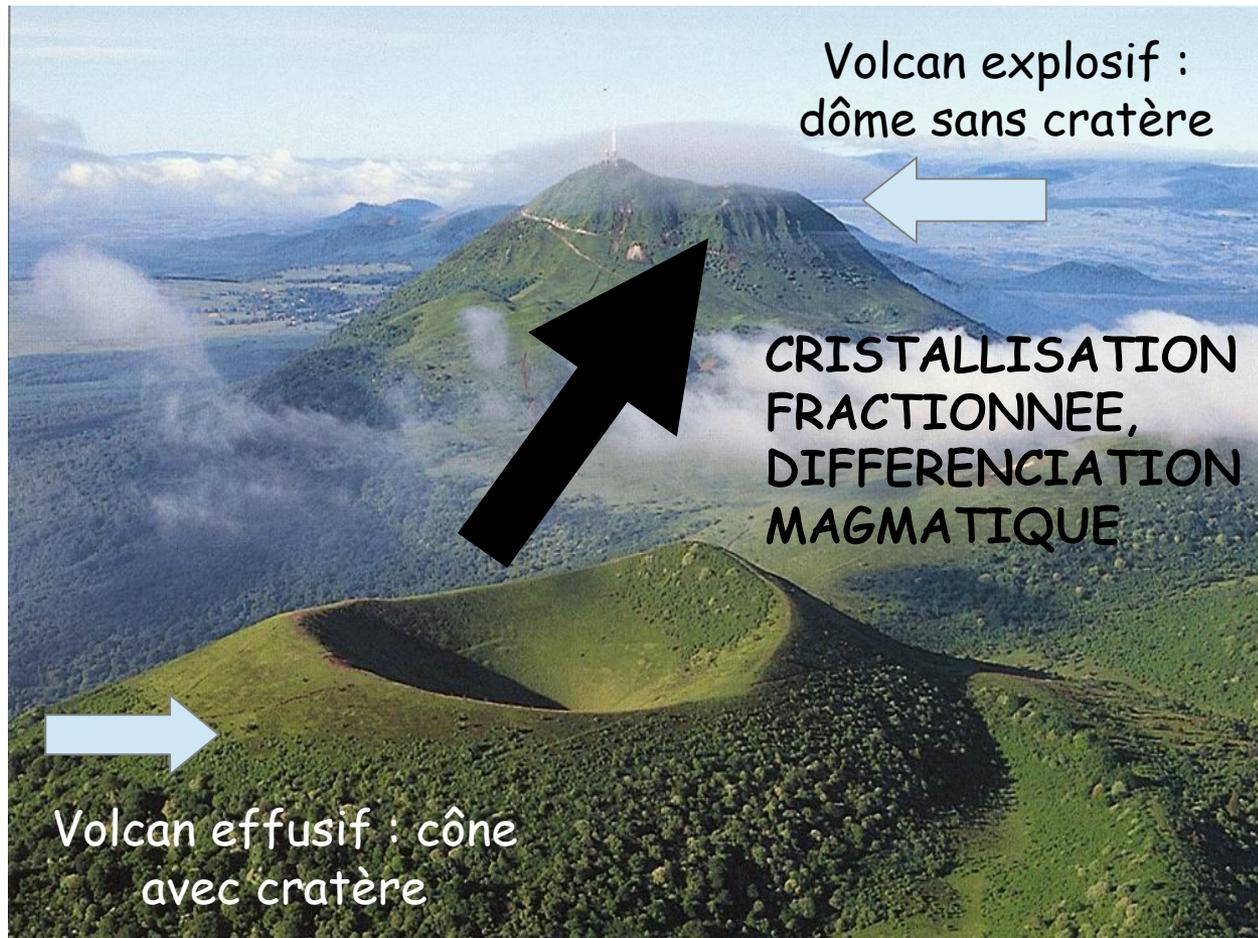
Classification selon la chimie car cristallisation incomplète ; critères retenus : évolution de la teneur en alcalins ($K_2O + Na_2O$) en fonction de la teneur en silice (SiO_2) - diagramme TAS (Total Alkalies versus Silica).



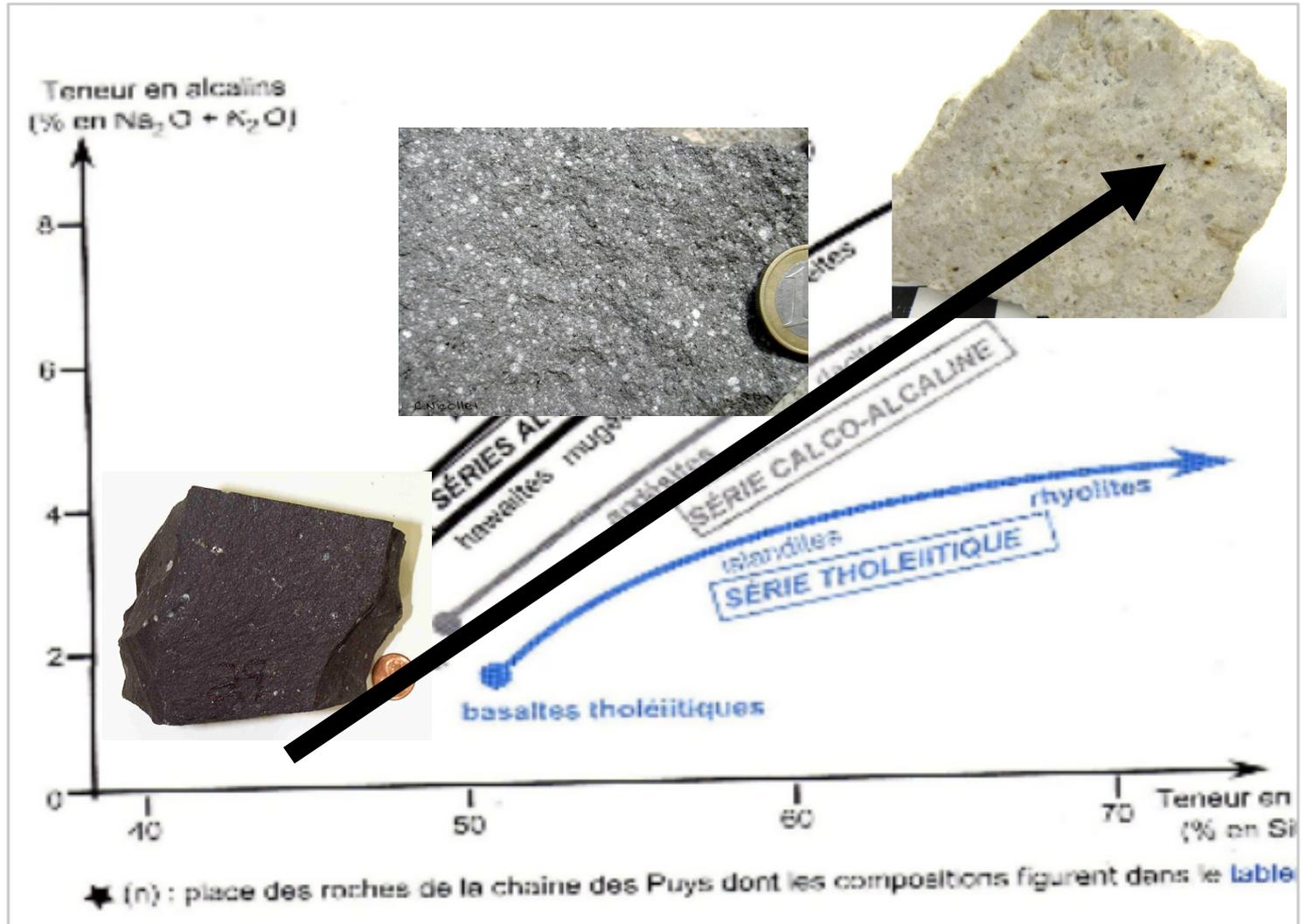
III.4.2. Séries magmatiques et contextes géodynamiques de leur mise en place

Série magmatique = 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.

Evolution des termes basiques vers des termes différenciés, de volumes respectifs souvent très différents et attestant d'une différenciation magmatique.



Enrichissement en alcalins et en silice au fil du temps



A. Les séries alcalines

Magmas alcalins prennent naissance par FP faible (5 à 10%), sous de forte pression, de la péridotite mantélique.

Origine très profonde favorable à la CF car la remontée est longue. Roches qui en dérivent liées génétiquement mais très variées.

Magmatisme typique de point chaud intraplaque océanique (Hawaï, La Réunion, Kerguelen, Mururoa) ou continental (Cantal, Mont-Dore, Sancy).

Dans les séries alcalines continentales, en plus de la CF il y a hybridation :

- Contamination par le socle (15 % max)
- Cristallisation tardive de minéraux hydroxylés, amphiboles et biotites qui prennent le relais des pyroxènes. Ces minéraux consommant moins de silice, le magma est enrichi en SiO_2 .

La nomenclature de ces roches est très compliquée.

B. Les séries tholéitiques

Tholéites se mettent en place dans les dorsales océaniques (MORB), les zones de subduction en début de fonctionnement et les rifts continentaux en voie d'ouverture. Dans ce dernier cas, les volumes de laves sont énormes et forment d'immenses plateaux (Trapps du Deccan, Ethiopie..)

Magma tholéitique obtenu par FP importante (15 à 20%) d'une péridotite de type lherzolite ou harzburgite sous faible pression donc à faible profondeur. Les roches de cette série sont :

- les basaltes tholéitiques (roches basiques)
- les islandites ou ferrobasaltes (roches intermédiaires)

Roches obtenues présentent un faible rapport alcalin/silice et :

- un rapport Opx/Cpx élevé (donc peu de Cpx, pauvre en Ca) pour les termes basiques .
- beaucoup de Q et F.alcalin pour les termes acides : fusion de l'encaissant du réservoir ou de l'hybridation.

Composition très constante des MORB : régulièrement expulsés ils n'ont pas le temps d'évoluer. Le magma qui reste en profondeur évolue par CF vers des plagiogranites. On distingue des MORB N (dorsale lente type atlantique) et les MORB P (dorsale rapide type pacifique)

C. Les séries calco-alkalines (ou séries orogéniques)

Caractéristiques des zones de subduction : arcs insulaires (CO/CO) et marges continentales actives (CO/CC).

Différent par leur teneur en potassium:

- séries calco-alkalines pauvres en K ou séries tholéitiques d'arc (CO/CO) : Basaltes > Andésites
- séries calco-alkalines modérément potassiques : Andésites > Basaltes
- séries calco-alkalines fortement potassiques : shoshonites

Roches plus spécifiques et plus rares comme les :

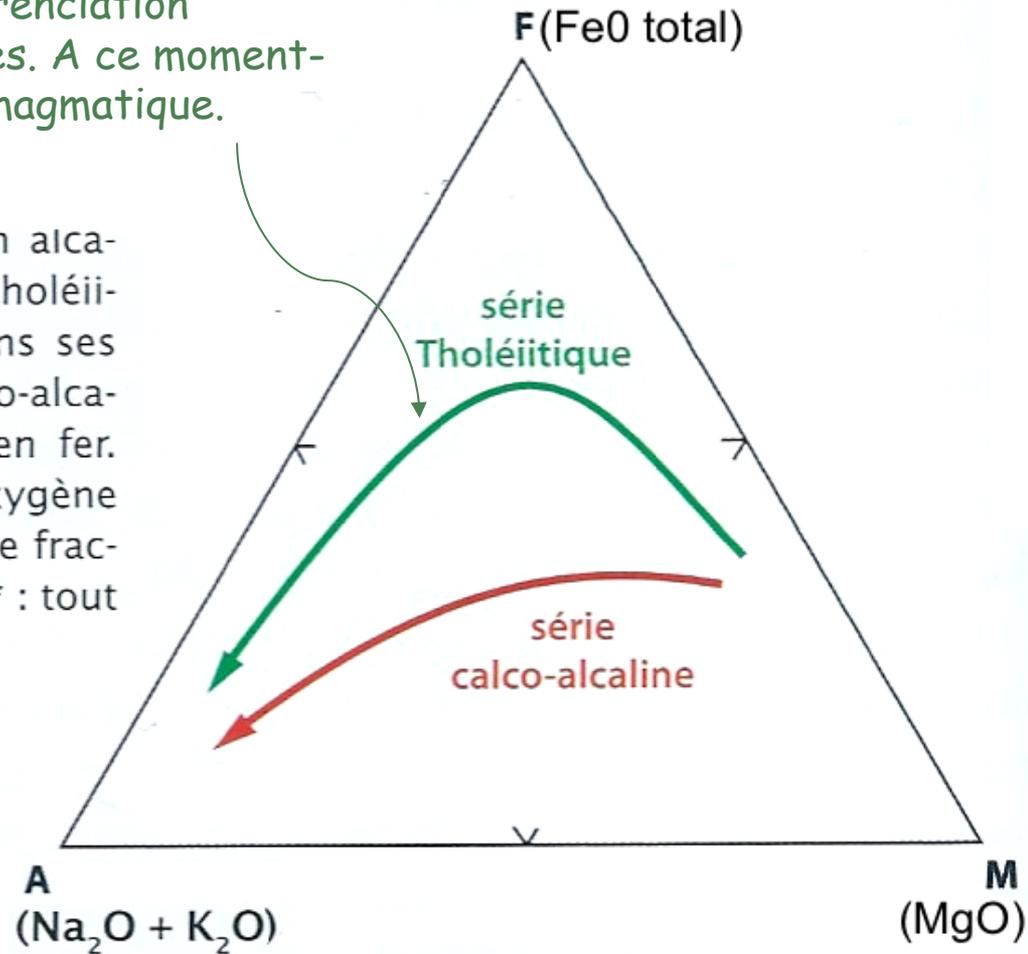
- **Adakites**, riches en Na et pauvres en HREE indiquant qu'elles dérivent de la FP d'une source contenant du grenat, seul minéral à les concentrer. Source = CO métamorphisée (faciès éclogite ou amphibolite à grenat).
- **Boninites**, roches volcaniques d'arc insulaires résultant de la FP d'un manteau très hydraté par fluides issus de la plaque subductée < 50 km de profondeur.
- **Shoshonites** roches basiques à forte teneur en K, uniquement en domaine continental (marges actives) et en fin de subduction. Elles proviennent d'une fusion profonde du manteau.

Magma 40 : Le diagramme AFM (in *Eléments de Géologie*, Lagabrielle & al, Dunod).

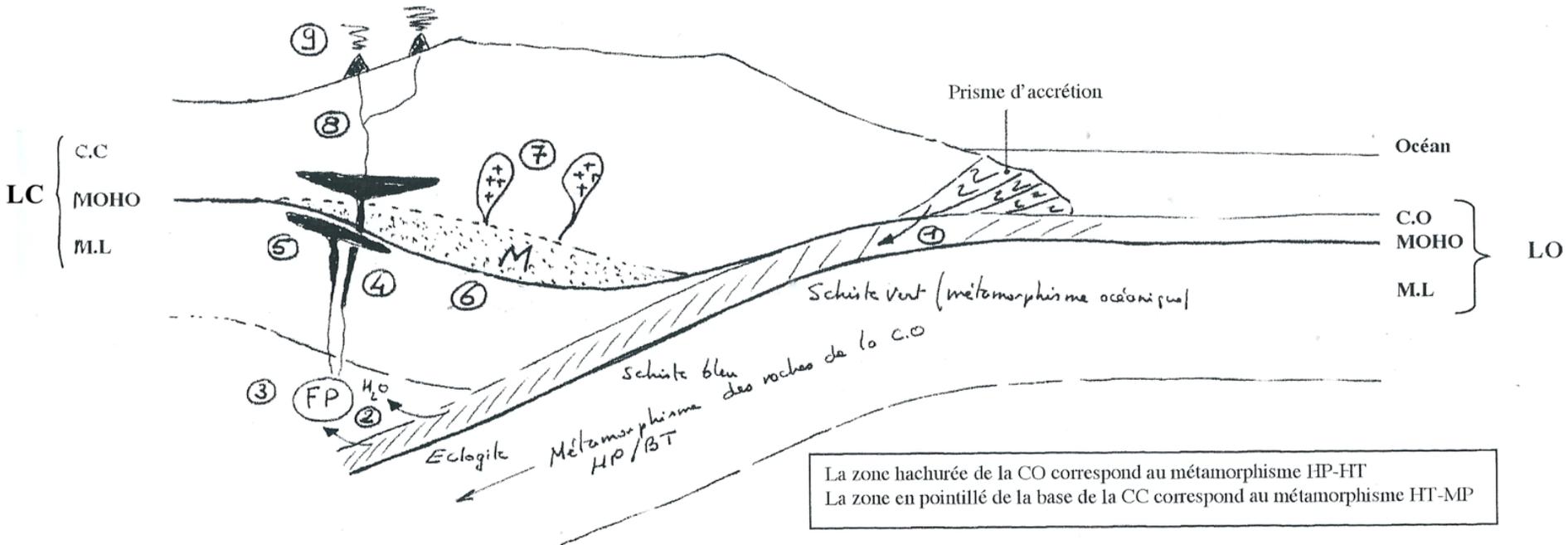
Teneur en eau du magma faible donc faiblement oxydant (fugacité en O_2 faible). Conditions peu propices à la formation d'oxydes → augmentation de la teneur en fer dans le liquide magmatique lors de la différenciation jusqu'au seuil de fractionnement des oxydes. A ce moment-là la teneur en fer diminue dans le liquide magmatique.

Lors de la différenciation (enrichissement en alcalins et appauvrissement en MgO), la série tholéitique présente un enrichissement en fer dans ses termes intermédiaires alors que la série calco-alcaline présente un appauvrissement continu en fer. Cela résulte des différences de fugacité d'oxygène (pouvoir oxydant) des magmas qui favorise le fractionnement d'oxydes de fer et fer-titane (FeO^* : tout le fer est considéré comme FeO).

Forte teneur en eau liée à la FP du coin de manteau métasomatisé. Liquide magmatique très oxydant (fugacité en O_2 élevée) → oxydes ferro-titanés fractionnés dès le début de la différenciation → teneurs en fer diminuent tout le long de la différenciation.



Magma 41 : Couplage magmatisme-métamorphisme dans une zone de subduction



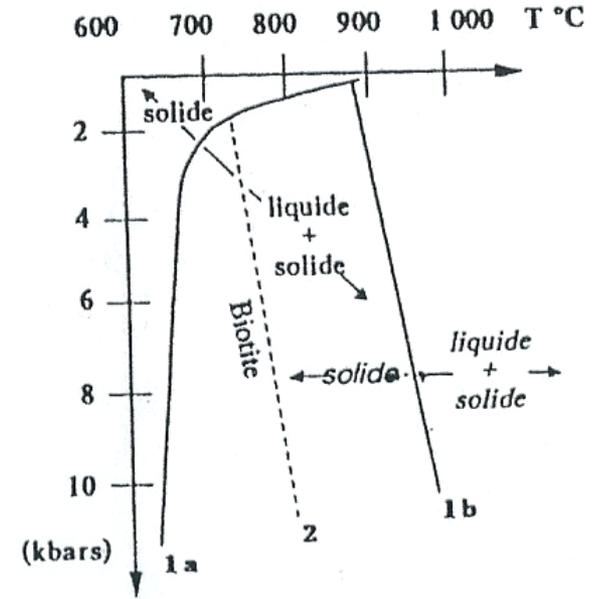
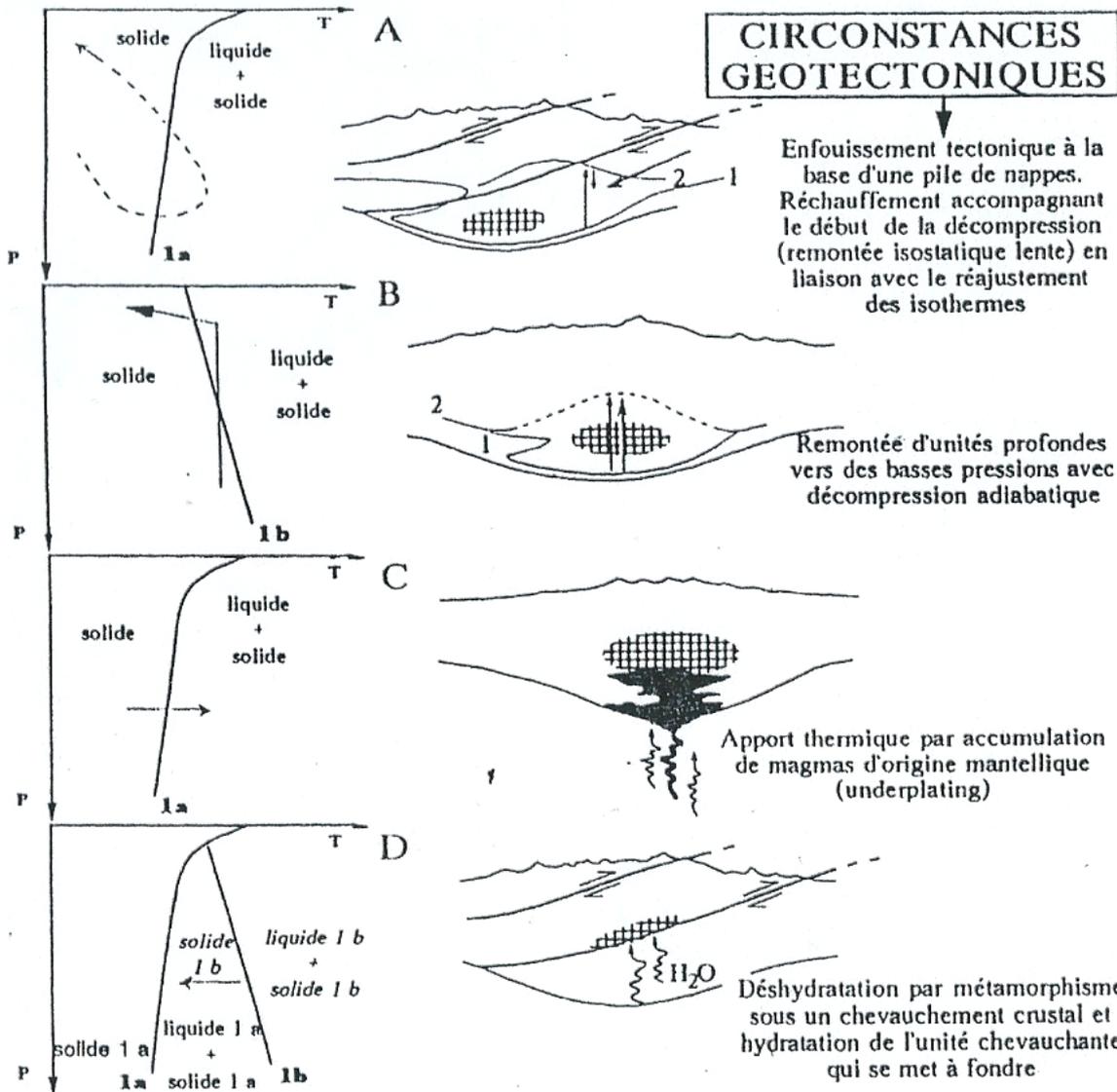
1. Perte d'eau par déshydratation des sédiments et des minéraux hydratés de la croûte océanique (CO)
2. Libération d'eau lors du métamorphisme des minéraux hydratés (amphiboles)
3. Fusion partielle (FP) des péridotites mantelliques
4. Advection par le magma
5. Ralentissement et stockage en base de croûte continentale (CC) = underplating. Cristallisation de gabbros.
6. Apparition de migmatites (M) par métamorphisme HT-BP affectant la base de la CC
7. Fusion crustale provoquant l'apparition de granitoïdes.
8. Emission de magma calco-alcalin, contaminé par les roches de la CC
9. Volcanisme andésitique explosif typique d'une marge active

D. Les granites

En 1957, série d'expériences sur des sédiments pélito-gréseo-feldspathiques enfermés dans des bombes hermétiques dont on contrôle la pression ($P = 0,2 \text{ Gpa}$ soit 7 à 8 km de profondeur) et $T = 700$ à $800 \text{ }^\circ\text{C}$.

La FP ou anatexie conduit à une phase liquide de composition quartzo-feldspathique enrichie par rapport à la roche de départ et une restite riche en minéraux ferro-magnésiens.

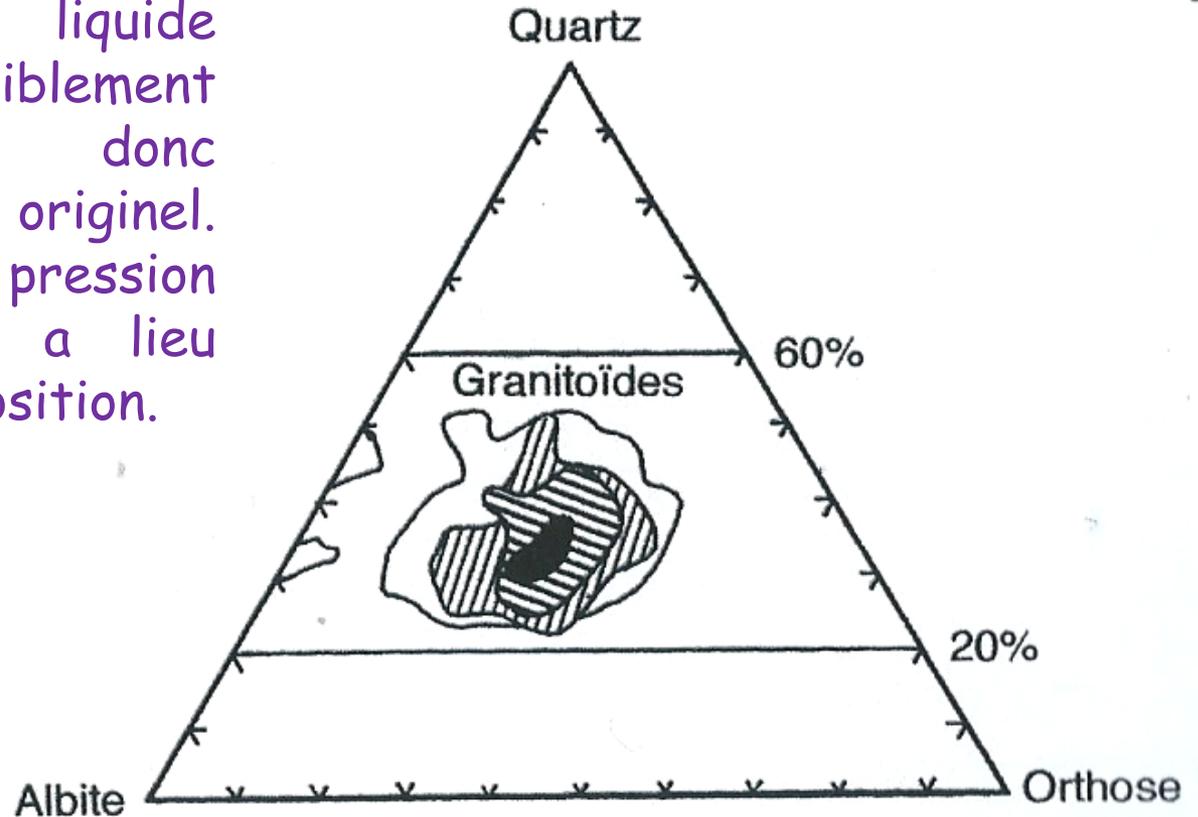
Magma 42a : Les différentes modalités de fabrication d'un granite (in Mehier, Ellipses).



- Solidus (fusion commençante) de divers magmas granitiques**
- 1a** : Mélange hydraté Q, Ab, Or (eau en excès)
 - 1b** : Mélange anhydre Q, Ab, Or
 - 2** : Granite anhydre à biotite

Magma 42b : Analyse modale des granites mondiaux (in Pons La pétro sans peine, Focus).

La composition du liquide anatectique est sensiblement constante et est donc indépendante du liquide originel. Le rapport Na/Ca et la pression à laquelle la fusion a lieu influencent cette composition.



Cette analyse effectuée sur 7500 échantillons montre que la majorité des granites sont composés de 1/3 d'orthose, 1/3 d'Albite et 1/3 d'anorthite, résultat du processus d'anatexie.

Le magma granitique résulte donc de la fusion de roches de surface à des températures et pressions relativement faibles alors que le magma basaltique est juvénile car il se forme à partir du manteau et atteint la surface pour la première fois.

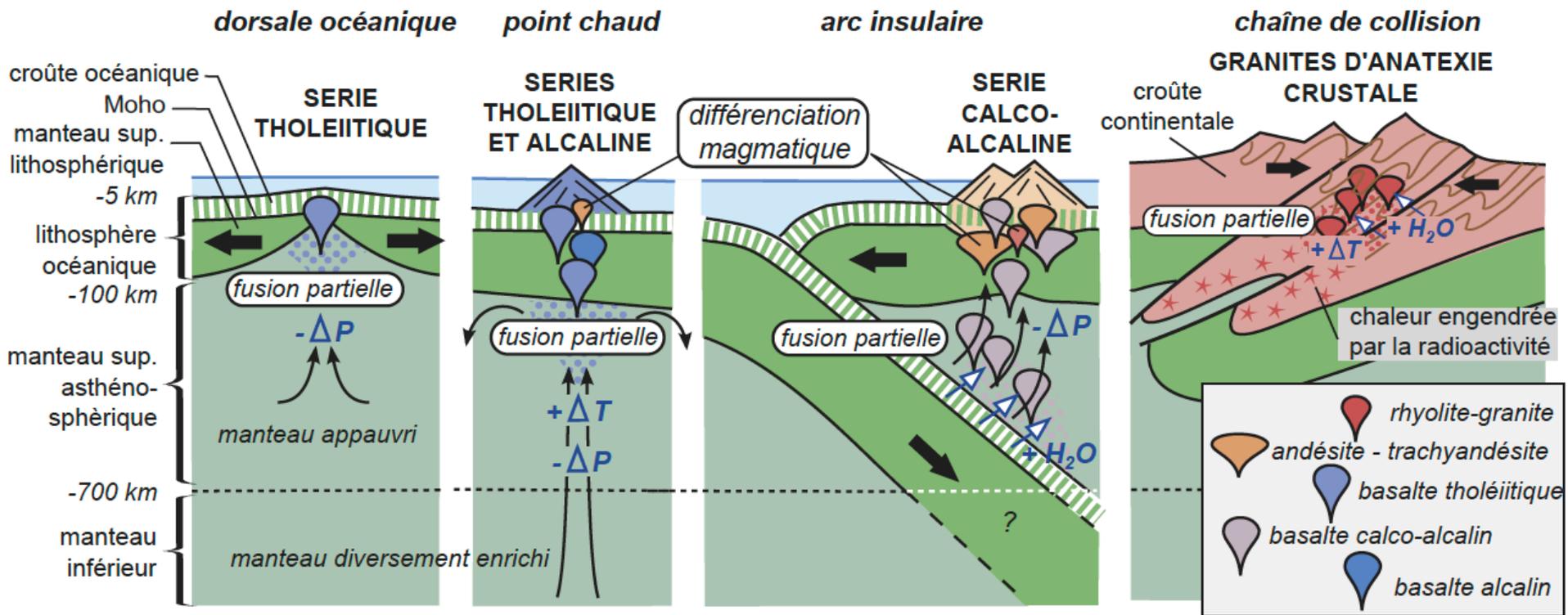
Dans le cas de magmas granitiques obtenus par anatexie, la présence d'eau (zone de subduction par exemple) leur permet de fondre à basse température. La présence de silice le rendant visqueux, ils ne se déplacent pas et cristallisent sur place en granite.

Si l'anatexie a lieu en condition anhydre (contexte anorogénique ou post-orogénique), la température de fusion est de 850-900°C. Cette forte température favorise sa mobilité et son accès en surface : il donne des rhyolites.

Rhyolites = équivalents effusifs des granites, présentent une variété et un nombre de minéraux plus réduites, une pauvreté en biotite et une absence de muscovite qui ne peut cristalliser que sous forte pression d'eau donc en profondeur.

Les rhyolites peuvent aussi avoir une origine mantellique comme en Islande où elles sont associées aux basaltes. C'est un basalte tholéitique dont la richesse initiale en silice permet l'élaboration d'un liquide rhyolitique peu abondant à la fin du processus de différenciation.

Magma 43 : Distribution des séries magmatiques et contextes géodynamiques (in Tout-En-Fiches, Dunod).

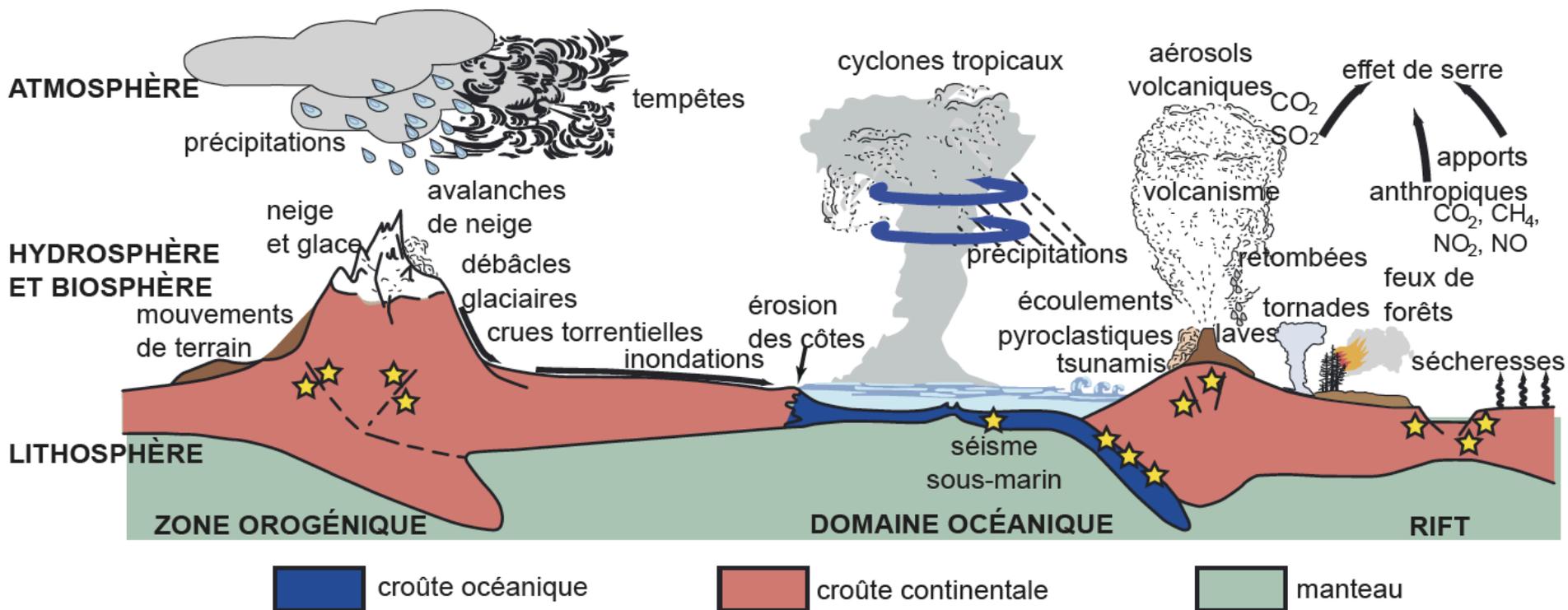


IV PRÉVENIR LE RISQUE VOLCANIQUE

IV.1. La notion de risque volcanique

IV.2. La gestion des risques volcaniques

Magma 44 : Différents types d'aléas en fonction de la géodynamique de la Terre (in Tout-En-Fiches, Dunod).



Différents types d'aléas en fonction de la géodynamique de la Terre (d'après Lefèvre et Schneider, 2003)

Aléa sismique : échelle de Richter
(à partir de sismogrammes
ou des déplacements
co-sismiques mesurés par GPS)

Aléa volcanique : échelle d'indice
d'explosivité volcanique
(à partir du volume magmatique émis,
de la durée des éruptions)

Mesures physiques
(unités logarithmiques)

MAGNITUDE

Analyse historique
de la répétition d'évènements)

RECURRENCE

Dangerosité

magnitude x probabilité
de réalisation
de l'aléa

Caractéristiques

Intensité

indice fondé sur la perception
de l'évènement, des dégâts
et des victimes

RISQUE = aléa x

vulnérabilité des enjeux

résilience

Gestion des risques naturels

PREVENTION

PREVISION

spatiale

temporelle

détermination des zones
les plus vulnérables

CARTES DE RISQUES

en fonction des évènements
passés (détermination des
zones de blocage d'une faille
en fonction des mesures GPS
et des évènements sismiques
antérieurs et voisins

➔ **carte de risque sismique**

fondée sur **récurrence**,
observations en temps réel,
application de **modèles prévisionnels**
(risques météorologiques et inondations)
approche quasi-impossible pour le risque
sismique, parfois possible pour le risque
volcanique

MISE EN PLACE D'UNE CULTURE DU RISQUE

Préparation des populations :

informations , exercices de secours

Gestion de situation de crise :

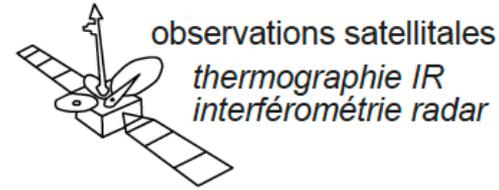
organisation prévisionnelle des
plans de secours

Aménagement du territoire :

application des normes
parasismiques, paracycloniques
ou paravalanches au niveau
adapté localement
non installation d'enjeux vulnérables
sur les zones à haut risque

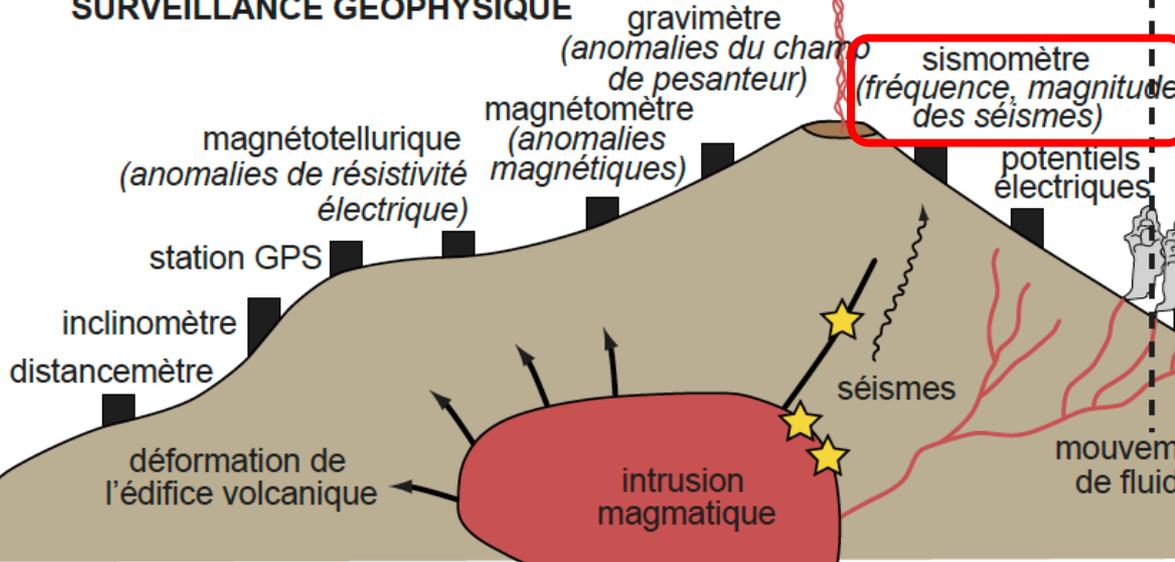
Risques naturels : paramètres descriptifs des aléas, prévision et prévention

Magma 45 : Dispositifs utilisés pour la prévision des éruptions volcaniques (in Tout-En-Fiches, Dunod).



Trémor: activité sismique pré-éruptive

SURVEILLANCE GÉOPHYSIQUE



SURVEILLANCE GÉOCHIMIQUE

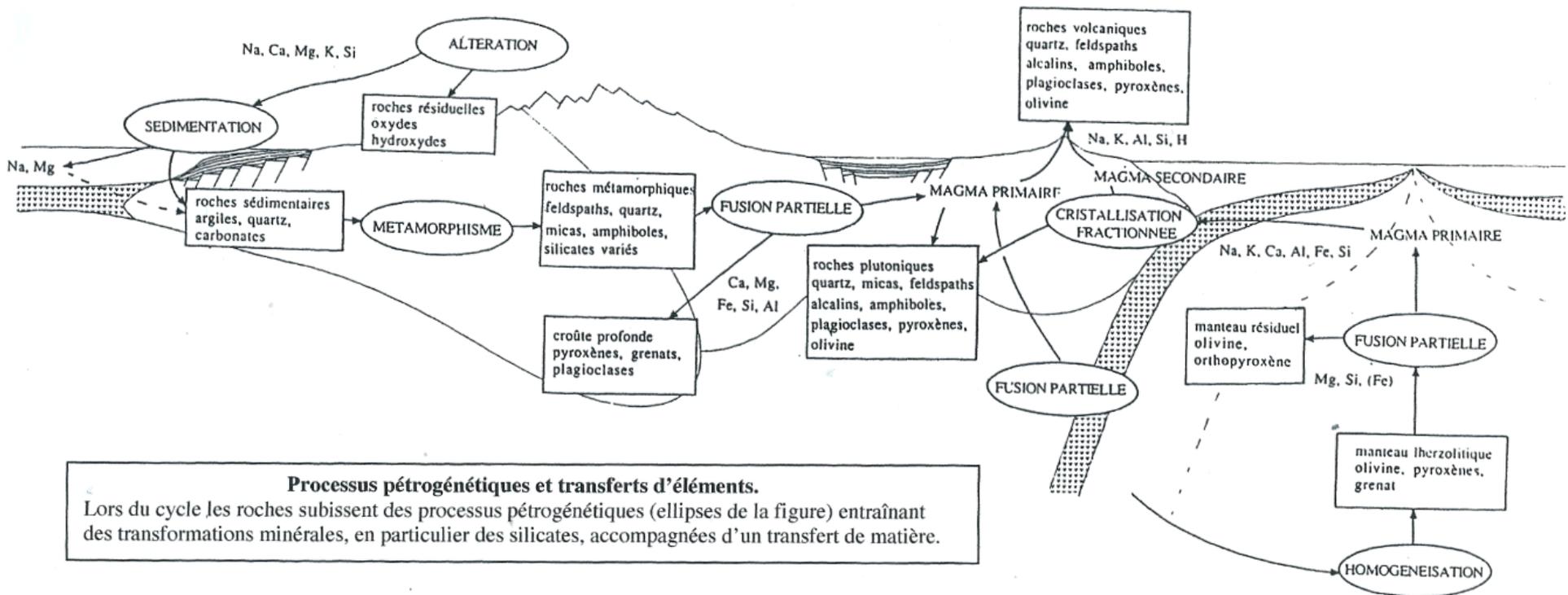
analyse (gaz, eaux)

APPROCHE GÉOLOGIQUE

- cartographie
- analyse et datation des produits éruptifs

L'étude du magmatisme est le carrefour d'un ensemble de disciplines géologiques aussi diverses que la pétrographie, la minéralogie, la géochimie et la géophysique.

Le magmatisme s'exprime aussi bien en zone de convergence qu'en zone de divergence et son expression la plus spectaculaire est le volcanisme. Toutefois, les continents sont largement constitués de socle granitique intrusif d'origine magmatique. Le magmatisme ne saurait donc se limiter au seul volcanisme.



Le point de départ de la formation d'un magma est la **fusion partielle fractionnée** de roches préexistantes.

La **diversité** des roches ignées est la **conséquence d'un ensemble de paramètres** comme la nature de la roche qui fond, le taux de fusion partielle, les modalités de cette fusion partielle, la cristallisation fractionnée, la température, la pression, la présence d'eau, la contamination éventuelle de l'encaissant.

Les roches ignées sont donc le résultat d'une série de **tris minéralogiques complexes**, difficiles à reconstituer en laboratoire. La modélisation tient donc une grande place dans l'approche scientifique du magmatisme.

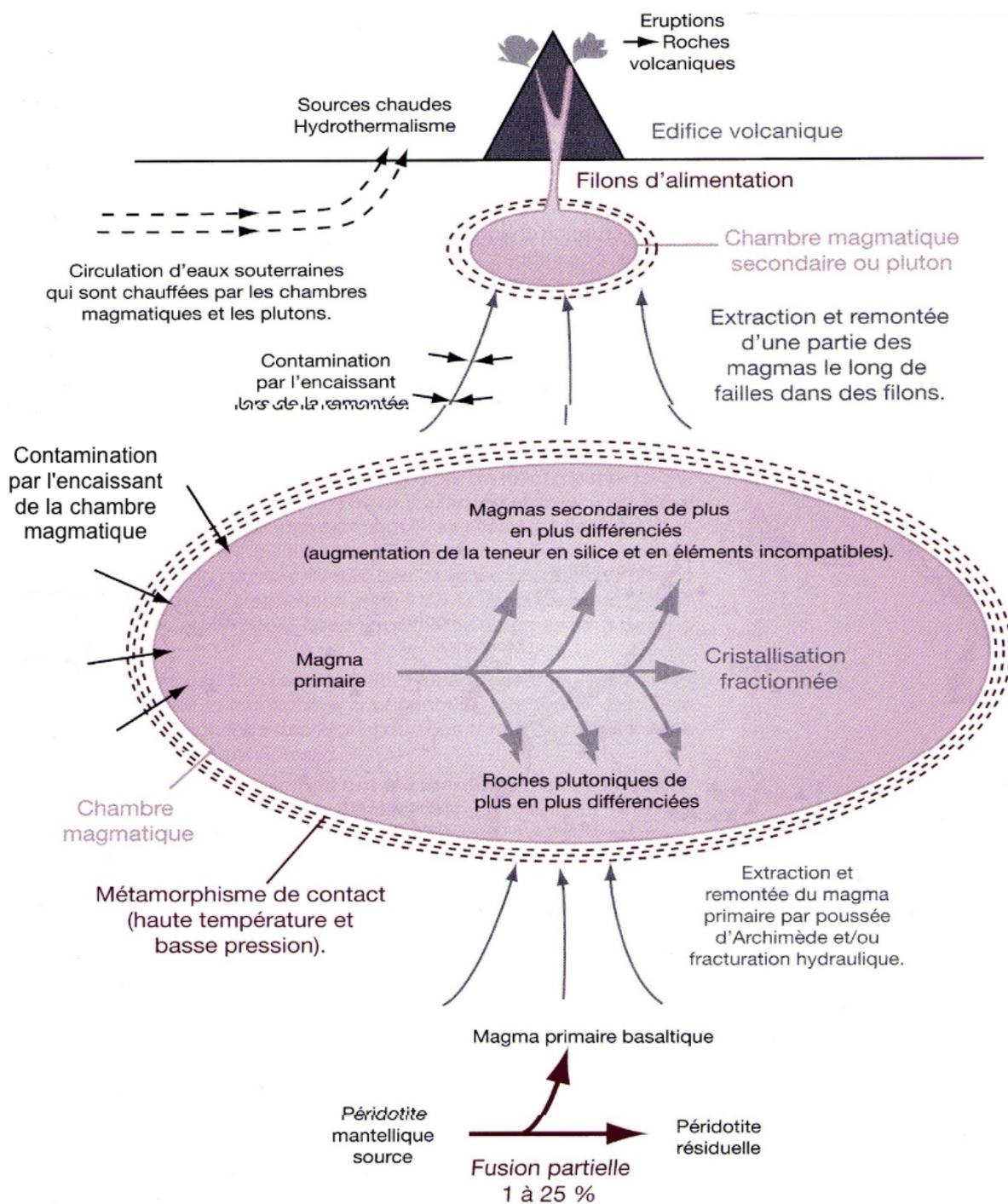
A l'échelle des temps géologiques, le magmatisme est l'**agent principal de la croissance crustale**, océanique et continentale. Concernant cette dernière, les modalités ont changé entre l'archéen et la période actuelle.

Le magmatisme est indissociable de la convection mantélique dont plusieurs modèles explicatifs (une couche, deux couches ou une couche et demi) sont proposés.

Le magmatisme participe largement au cycle pétrographique des roches, au transfert de matière et d'énergie au sein du globe avec un couplage fréquent avec le métamorphisme dont les zones de subduction constituent une excellente illustration.

Le magmatisme peut être source de vie comme le montre les champs hydrothermaux avec les fumeurs noirs. Des bactéries chimiolithotrophes symbiotiques d'un vers du genre *Riftia* réalisent l'oxydation exergonique d' H_2S libérés par ces « cheminées sous la mer » permettant l'autotrophie au carbone, sans lumière, par 2500 m de fond. Il en résulte un écosystème tout à fait inattendu qui a été révélé à l'occasion de campagnes océanographiques désormais célèbres.

Bilan



Les différenciations magmatiques

La cristallisation fractionnée

