

The background features a stylized traffic light graphic. It consists of a yellow trapezoidal shape with a grey base. Overlaid on this are several overlapping circles in shades of yellow and red. The text 'LES PANACHES MANTELLIQUES' is centered horizontally across the middle of the image.

# LES PANACHES MANTELLIQUES

# **I – Caractéristiques des panaches mantelliques**

II – Conséquence d'une remontée mantellique

-Gravimétrie

-Volcanisme

-Tectonique

III – Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde

IV - Compléments

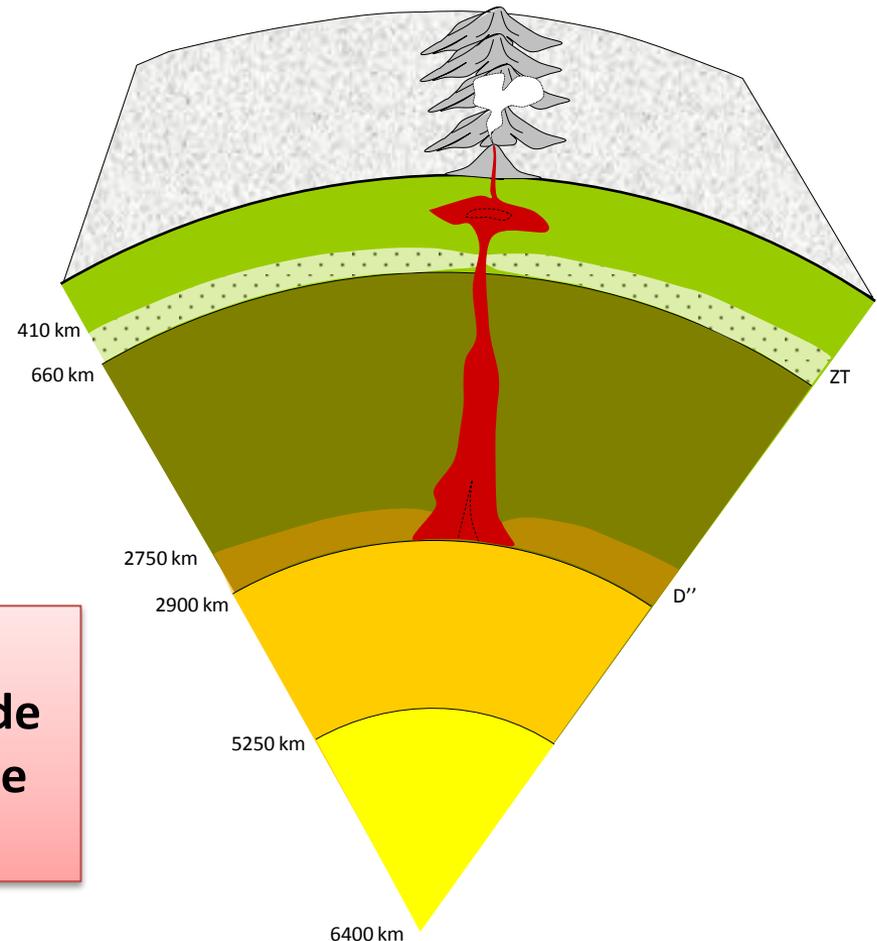
## Origine et formation d'un panache

Un panache mantellique est une remontée de matériau plus chaud, et donc moins dense, que le manteau environnant. La source la plus probable de ce matériau est une fine **couche limite thermique**, où la température varie rapidement sur une faible épaisseur.

La couche limite thermique la plus importante = **couche D''**

D'après les données sismiques:

- Atténuation des vitesses → viscosité plus faible et plus chaud (donc moins dense) que le manteau environnant
- Couche d'épaisseur irrégulière



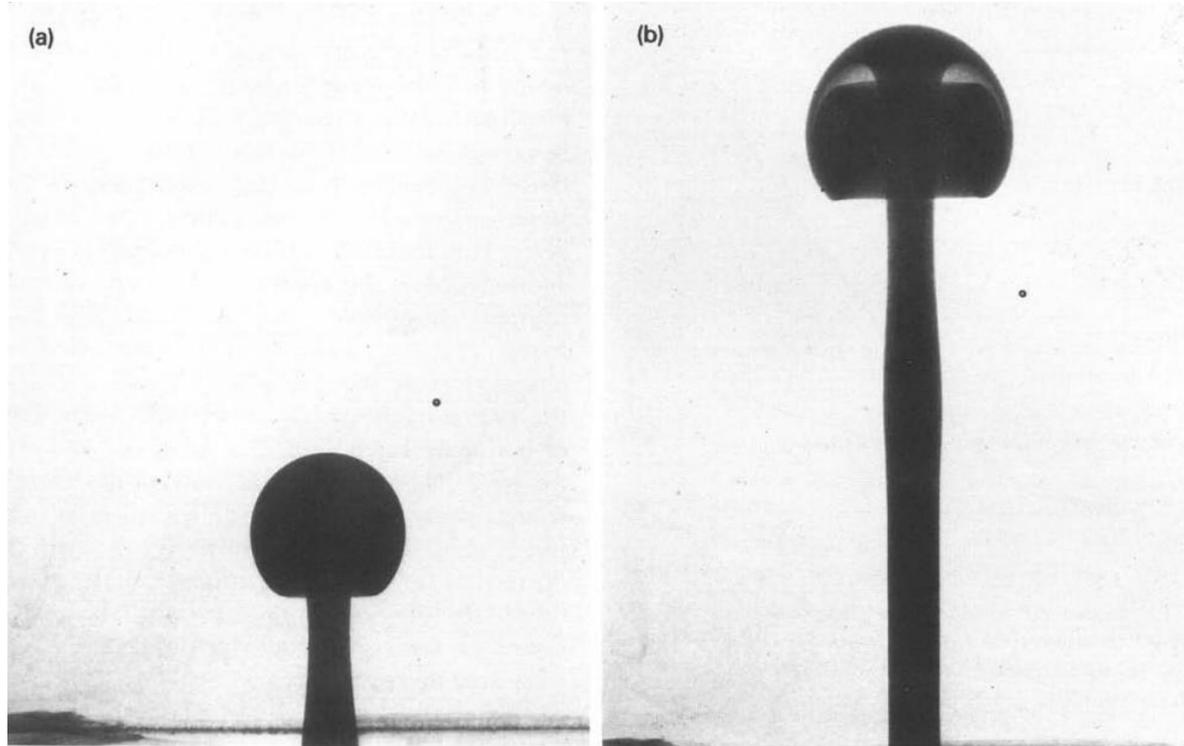
### ATTENTION :

**Panache = remontée de matériau solide (pas magma !). La fusion partielle ne se fait qu'en surface (-100 Km)**

# Modélisation d'un panache

## Forme déduite du modèle expérimental de Griffiths et Campbell (1990)

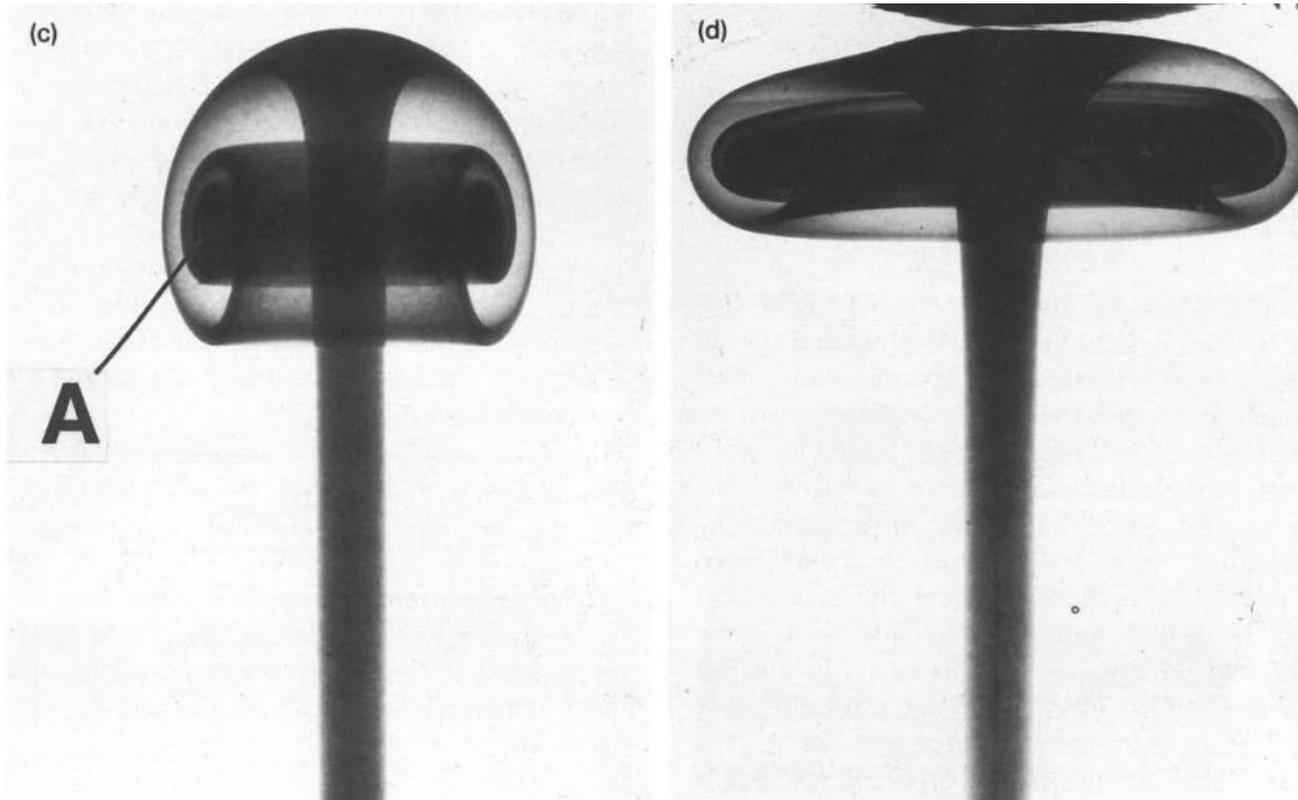
Fig. 1. Photographs of a starting plume in glucose syrup at several stages during its ascent. Times elapsed after the source is turned on are (a) 60 s; (b) 130 s; (c) 397 s; and (d) 540 s. Scale is identical in all frames and the head is 6.9 cm across in (c). The distribution of dye is axisymmetric.



- Flux de matière **ascendant** de matériau mantellique (faible diamètre, à 100 à 200 Km de diamètre = **queue** du panache)
- La remontée entraîne une baisse de la viscosité du manteau environnant → formation d'une grosse "**tête**" presque sphérique, (de quelques centaines de km de diamètre)
- La queue continue d'alimenter la tête du panache en matériau provenant de la couche thermique située au bas du manteau.

# Modélisation d'un panache

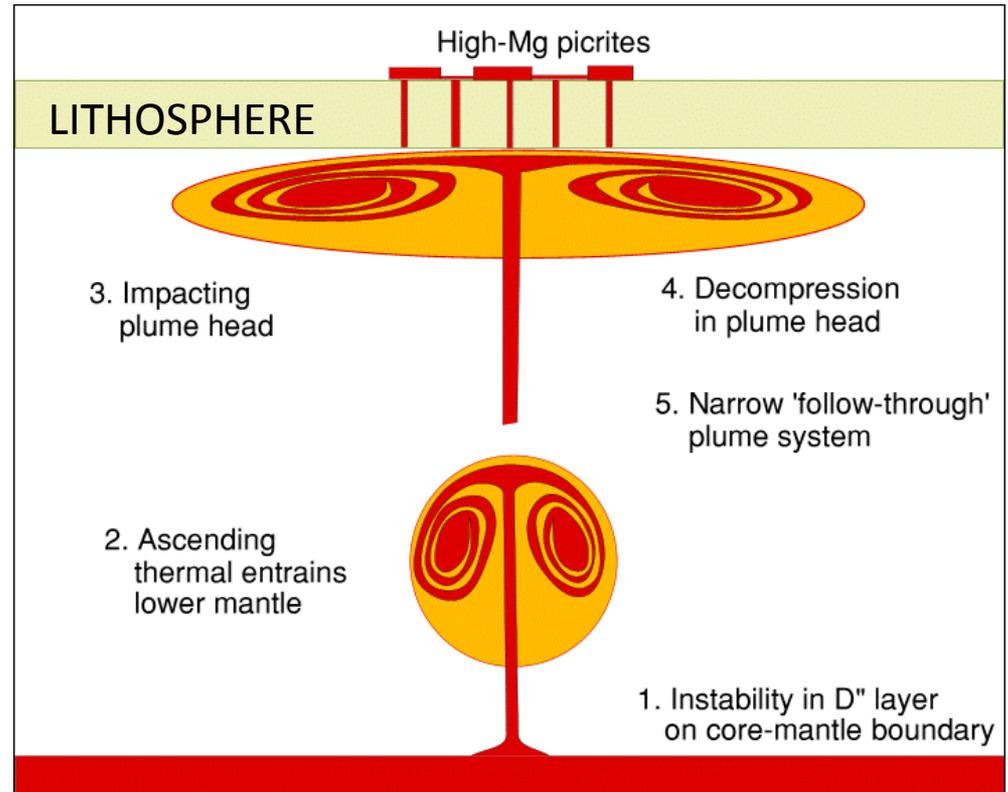
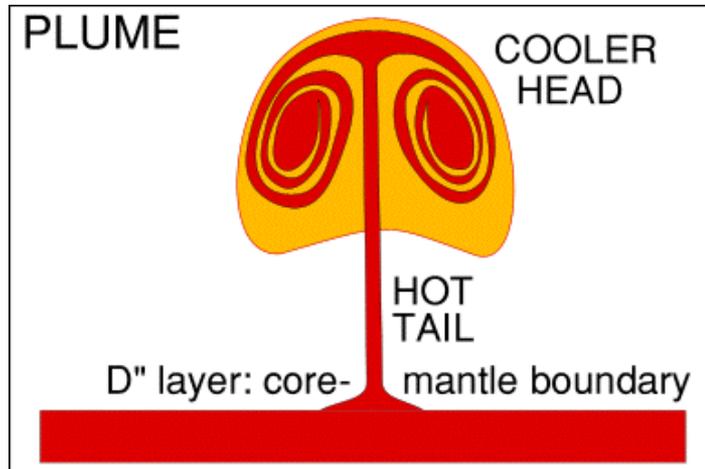
## Forme déduite du modèle expérimental de Griffiths et Campbell (1990)



- Flux de matière **ascendant** de matériau mantellique (faible diamètre, à 100 à 200 Km de diamètre = **queue** du panache)
- La remontée entraîne une baisse de la viscosité du manteau environnant → formation d'une grosse "**tête**" presque sphérique, (de quelques centaines de km de diamètre)
- La queue continue d'alimenter la tête du panache en matériau provenant de la couche thermique située au bas du manteau.

# Modélisation d'un panache

## Forme déduite du modèle expérimental de Griffiths et Campbell (1990)

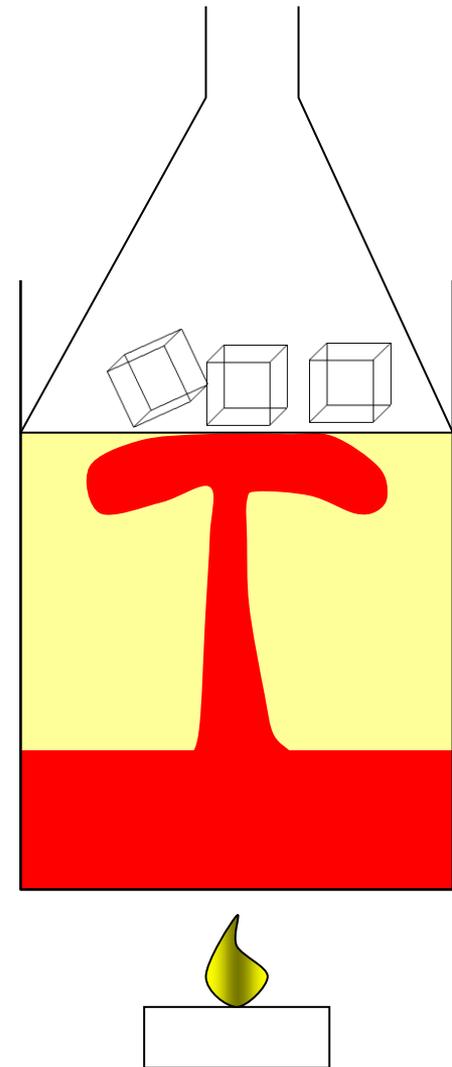
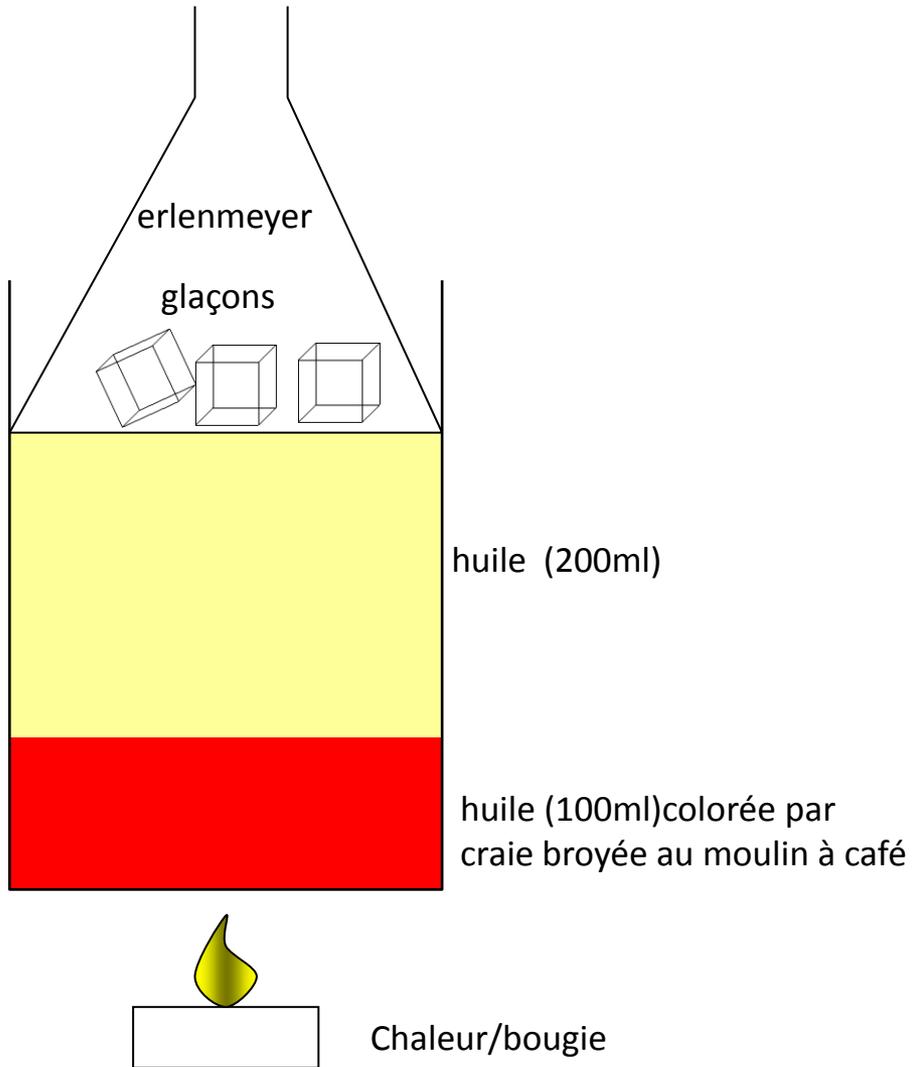


-Flux de matière **ascendant** de matériau mantellique (faible diamètre, à 100 à 200 Km de diamètre = **queue** du panache)

-La remontée entraîne une baisse de la viscosité du manteau environnant → formation d'une grosse "**tête**" presque sphérique, (de quelques centaines de km de diamètre)

-La queue continue d'alimenter la tête du panache en matériau provenant de la couche thermique située au bas du manteau.

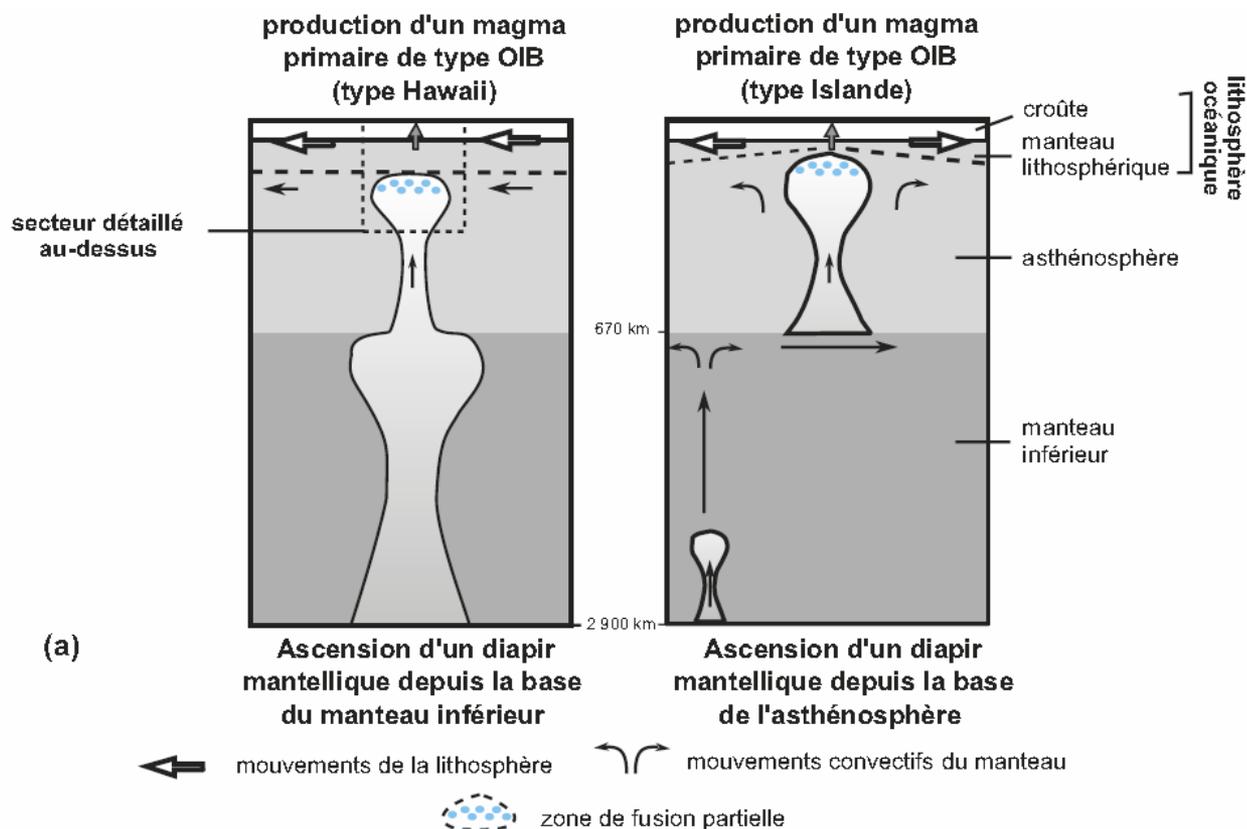
# Une modélisation réalisable en classe



# Différents types de panaches

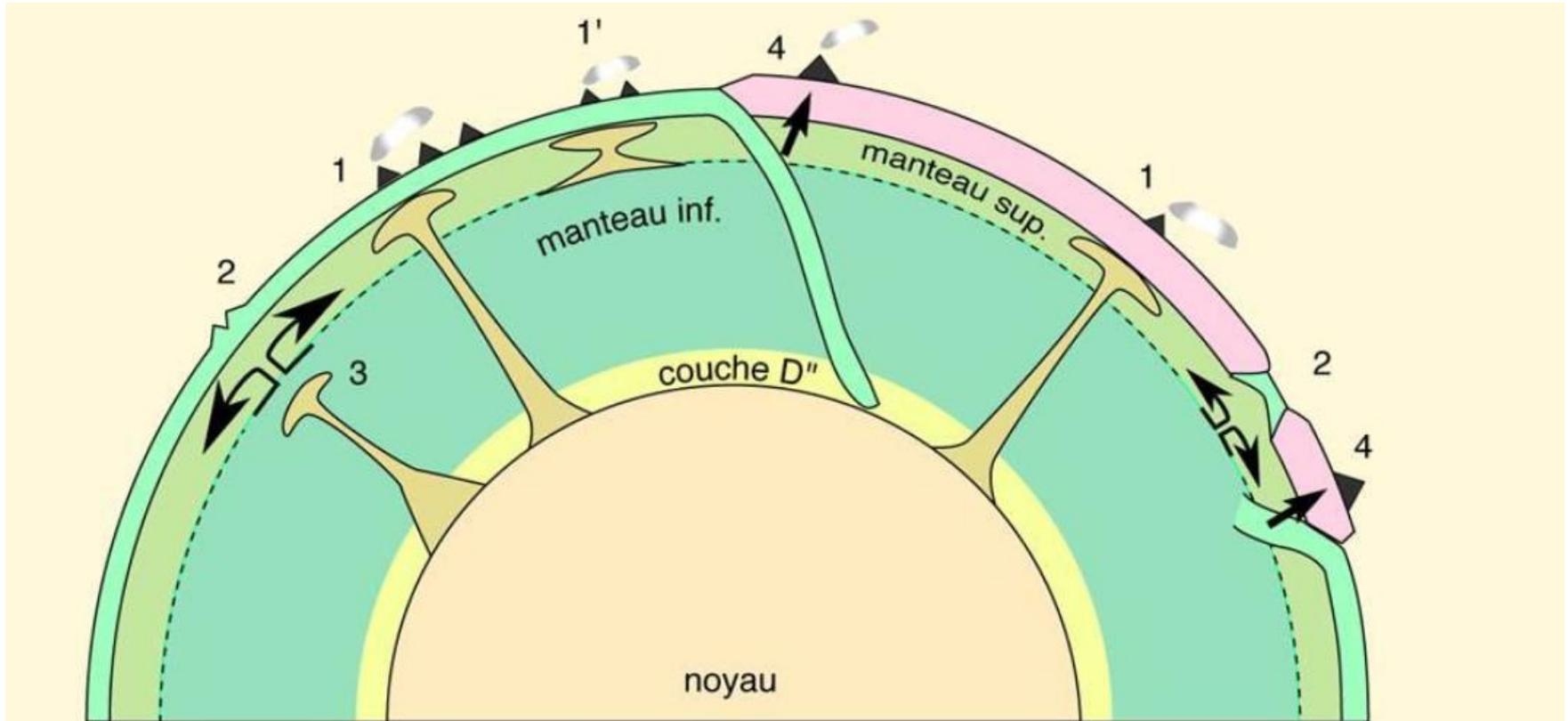
## Provenant de CLT différentes:

Un panache mantellique actif est déclenché par une **instabilité gravitaire** (contraste de densité lié à un échauffement plus ou moins étendu) au niveau d'une **zone de transition** jouant le rôle de **couche limite thermique** (couche D'' ou frontière manteau inf / sup). Ces infos peuvent être déterminées par les données de tomographie sismique.



# Différents types de panaches

## Différentes sources magmatiques

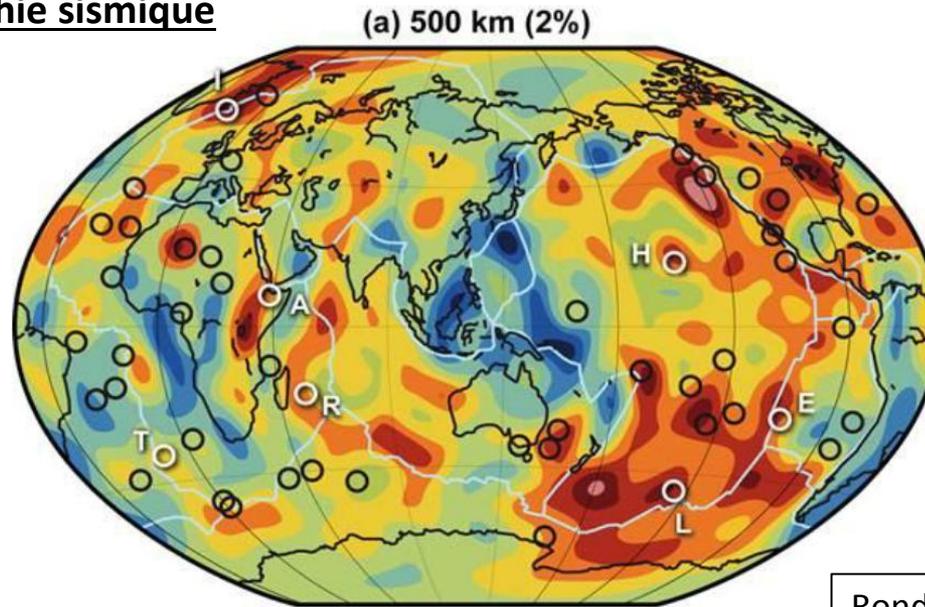


1. magmas des points chauds océaniques et continentaux (panaches profonds issus de la couche D'')
- 1'. magmas des points chauds superficiels naissant à la transition manteau inf.-manteau sup.
2. magmas des dorsales et des bassins arrière-arc
3. interaction panache/dorsale
4. magma des zones de subduction

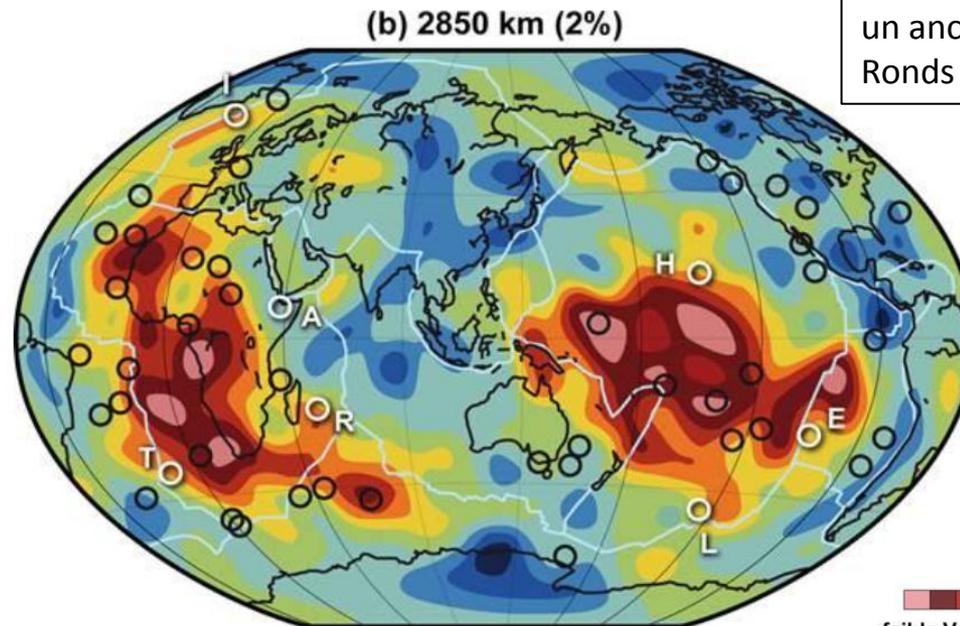
# Les super-panaches

## Apport de la tomographie sismique

Tomographie à  
500 Km  
(manteau sup)



Tomographie à  
2850 Km (base  
du manteau inf)



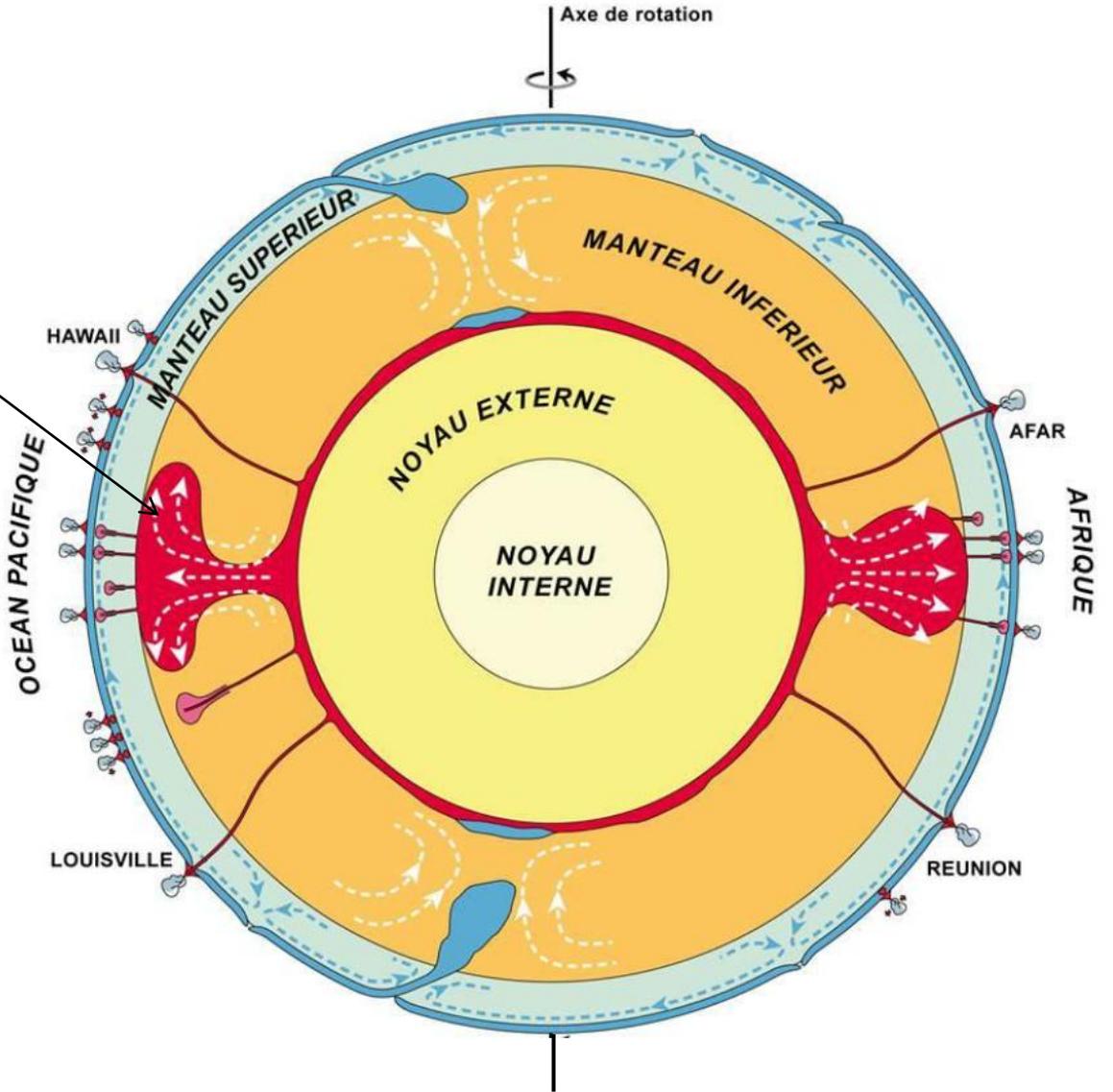
Ronds blancs: Points chauds qui ont  
un ancrage profond  
Ronds noirs: les autres

faible  $V_s$       haute  $V_s$

# Les super-panaches

## Modèle proposé

**Super panaches:**  
2 dômes sous l'Afrique et  
sous le Pacifique.

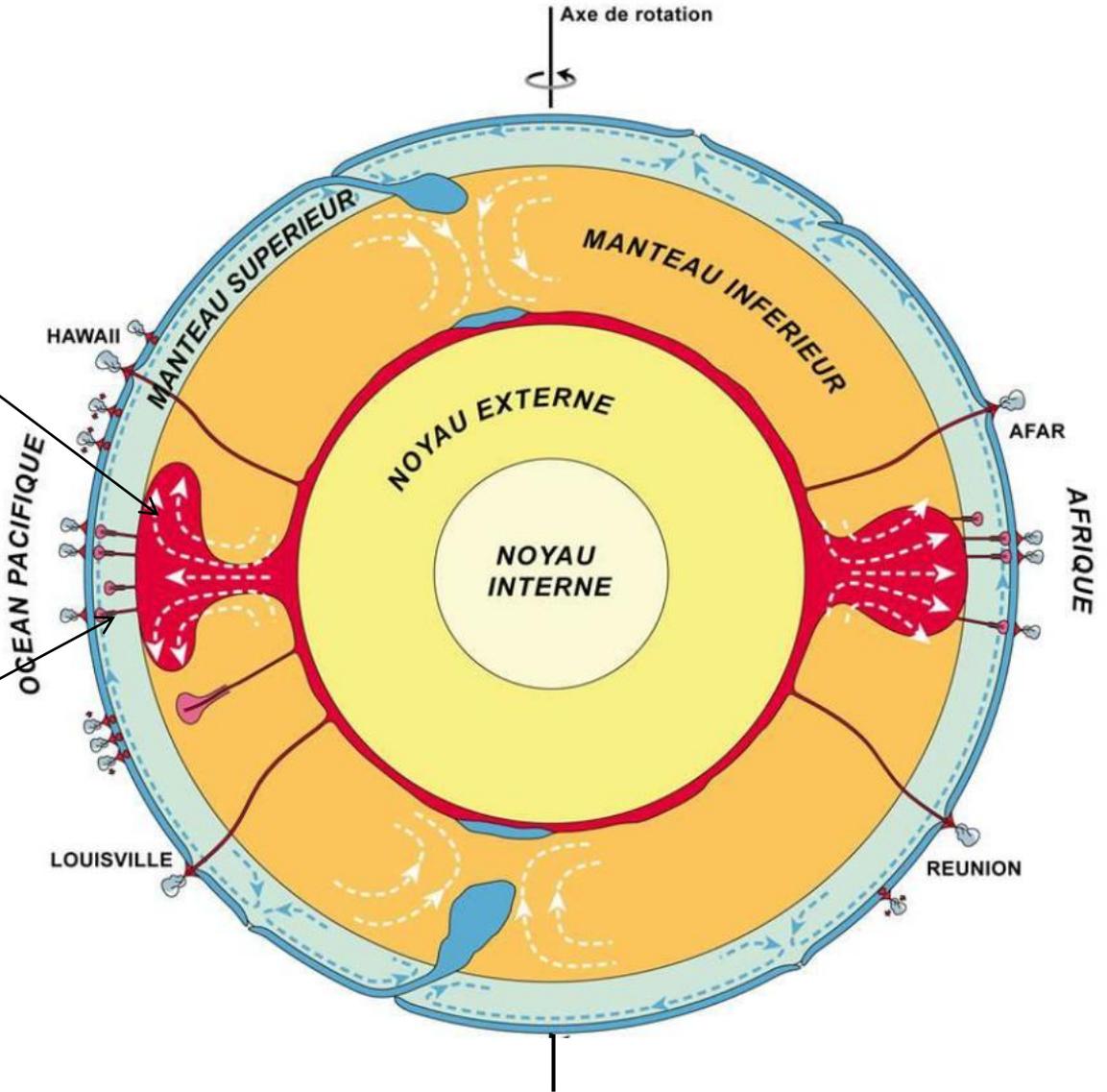


# Les super-panaches

## Modèle proposé

**Super panaches:**  
2 dômes sous l'Afrique et  
sous le Pacifique.

**Panaches secondaires:**  
Prennent naissance à  
l'endroit où les super-  
panaches s'écrasent au  
niveau de la limite manteau  
inf / sup



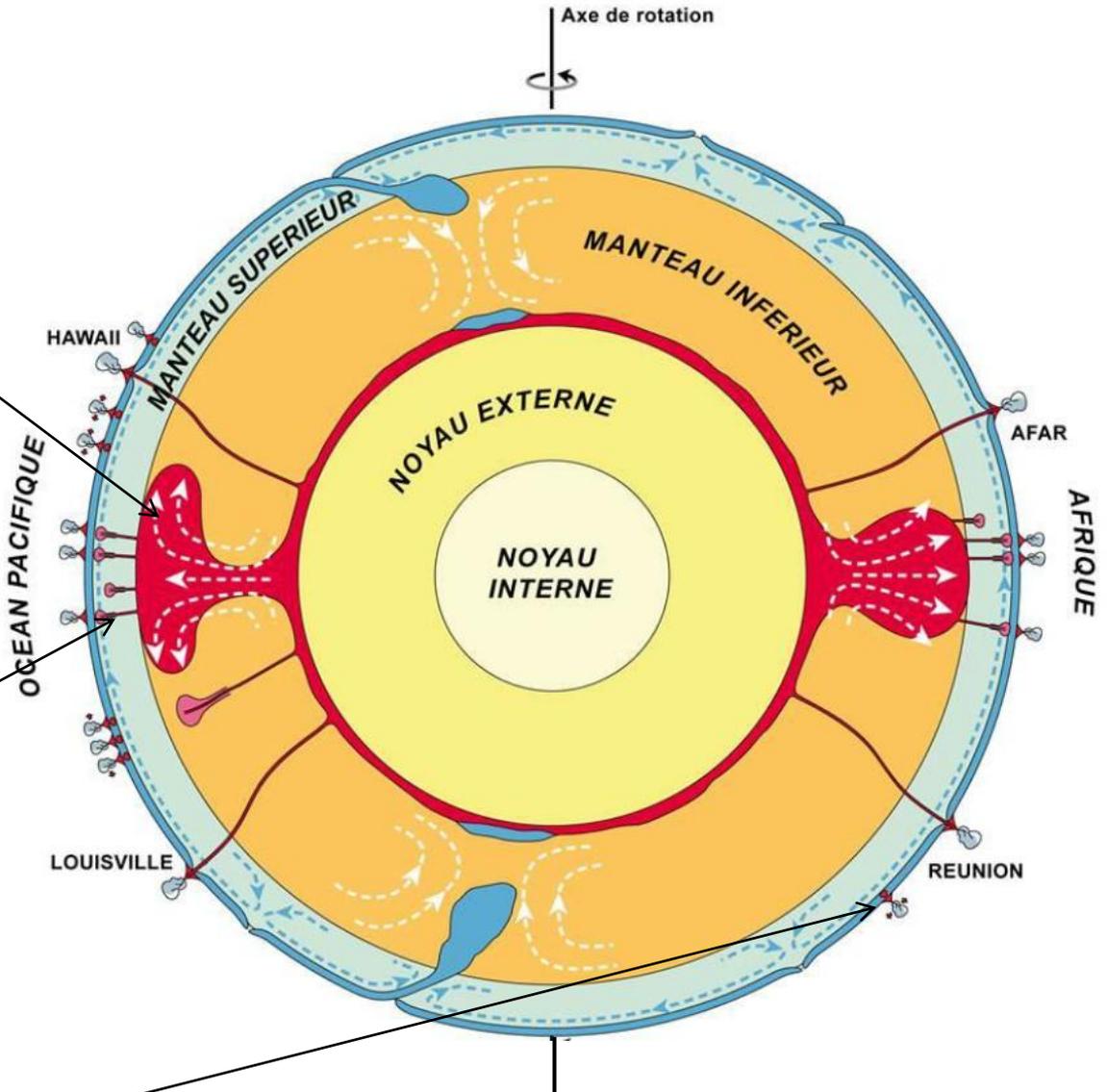
# Les super-panaches

## Modèle proposé

**Super panaches:**  
2 dômes sous l'Afrique et  
sous le Pacifique.

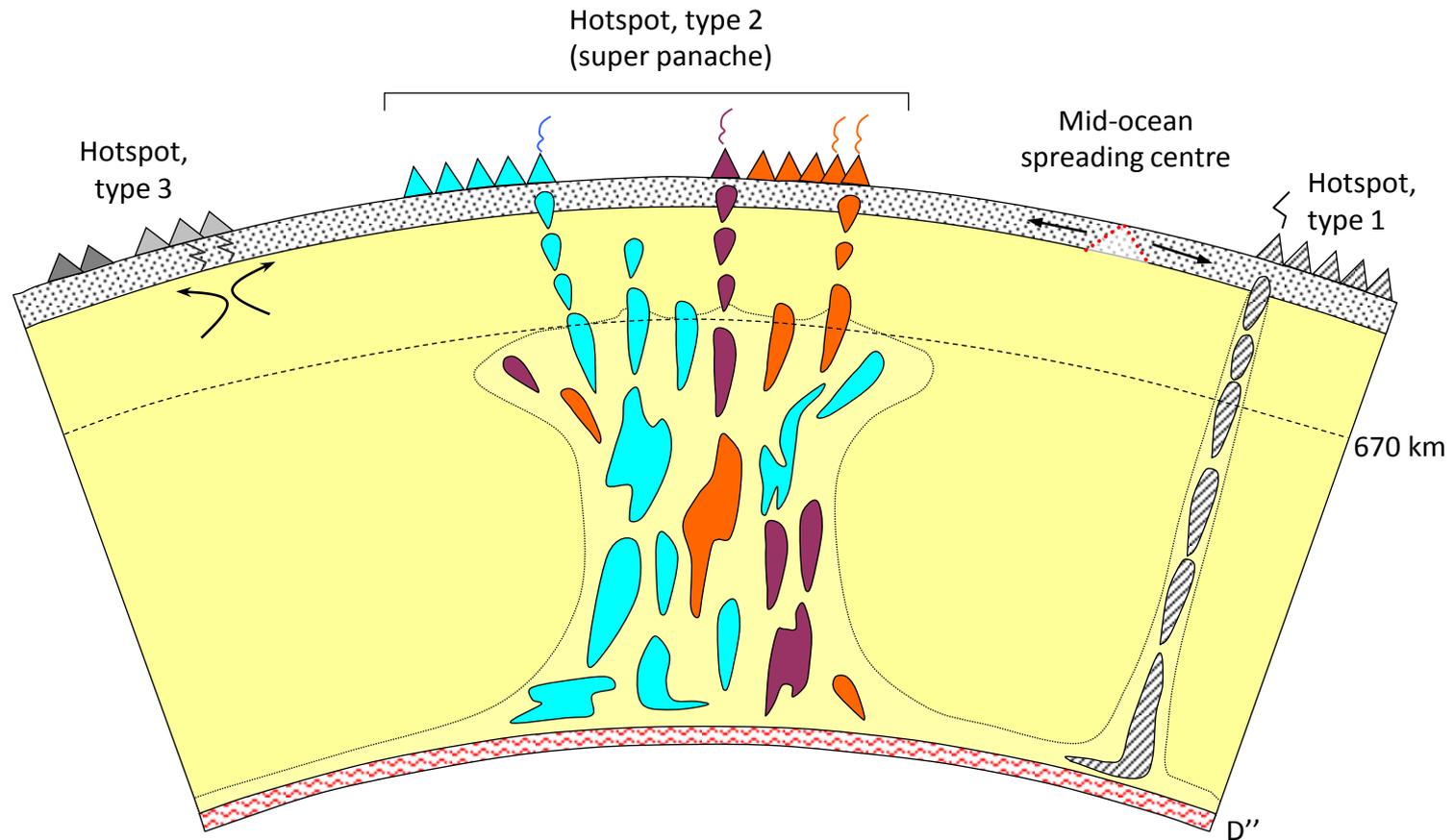
**Panaches secondaires:**  
Prennent naissance à  
l'endroit où les super-  
panaches s'écrasent au  
niveau de la limite manteau  
inf / sup

**Panaches superficiels:**  
Prennent naissance à la  
limite lithosphère /  
asthénosphère



# Différents types de panaches

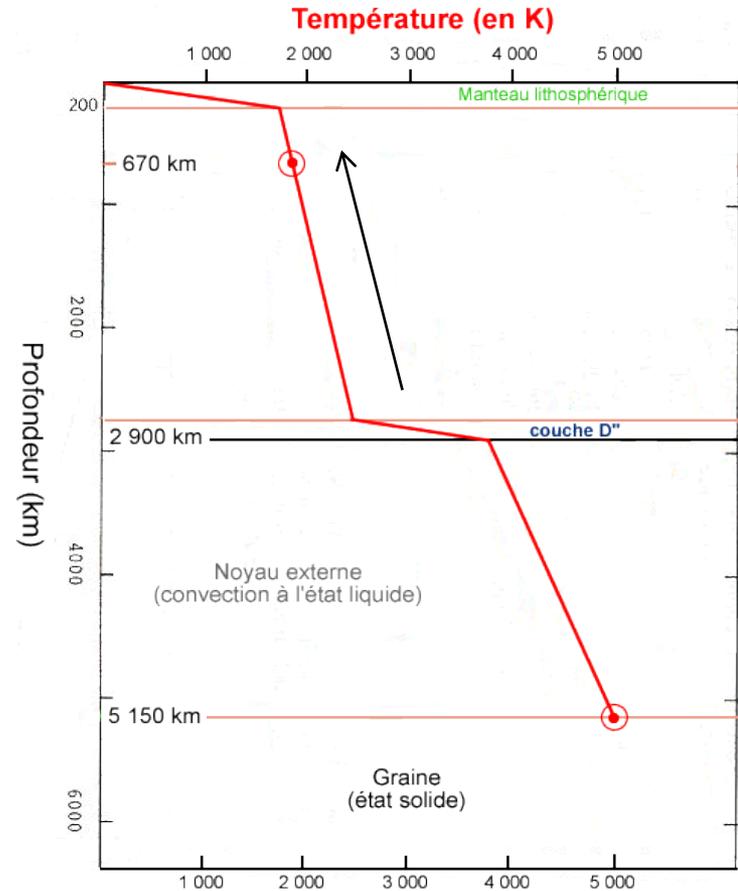
## 3 types de panaches d'après V. Courtillot



“The first, a classical Morgan-style long-lived mantle plume, originates from as deep in the mantle as the core–mantle boundary (CMB). The second hotspot type includes short-lived, smaller plumes originating from shallower parts of the mantle, probably as offshoots from large superplumes. These secondary hotspots are more common. The third type of hotspot is not related to any kind of mantle plume and may form where the oceanic lithosphere cracks or extends. This kind is the least investigated and may overlap considerably with the other hotspot types”

## Remarques

-La remontée mantellique se fait selon le principe de la convection, selon le **gradient adiabatique** (le panache atteint 300°C à la base de la lithosphère)



-**Vitesse estimée**: quelques décimètres par an (50 cm / an pour Hawaii)

-Les panaches permettent seulement d'évacuer 10% de la chaleur interne par convection (l'essentiel est réalisé par les **dorsales**)

I – Caractéristiques des panaches mantelliques

**II – Conséquence d'une remontée mantellique**

**-Gravimétrie**

**-Volcanisme**

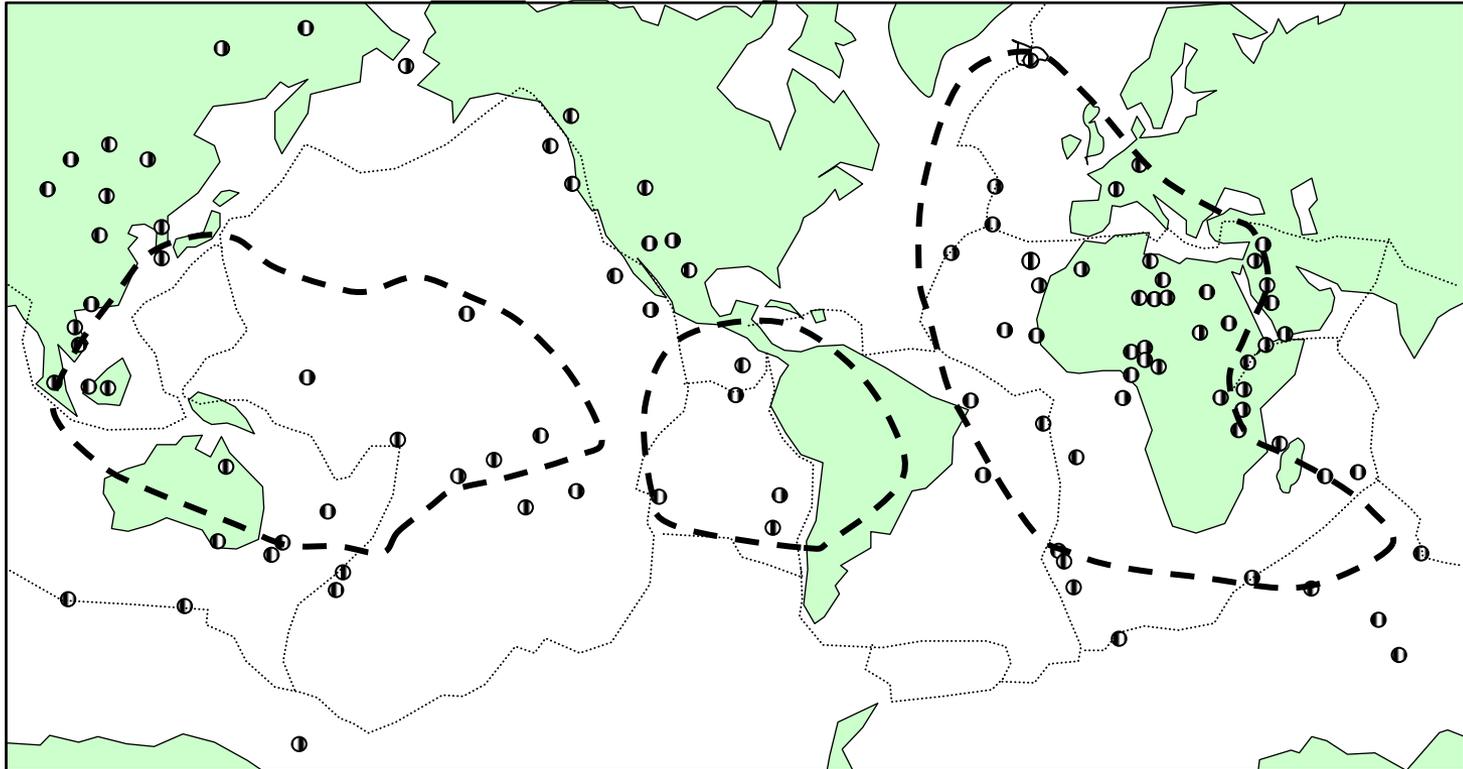
**-Tectonique**

III – Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde

IV - Compléments

# Conséquences de la remontée mantellique

## Bombement du géoïde



○ Point chaud  
- - - Anomalie du géoïde (+ 20 m)

Les points chauds sont concentrés dans des zones de **gonflement** de la lithosphère dues à des remontées de matériel mantellique profond.

Le manteau profond étant plus dense → **anomalie positive** du géoïde

# Conséquences de la remontée mantellique

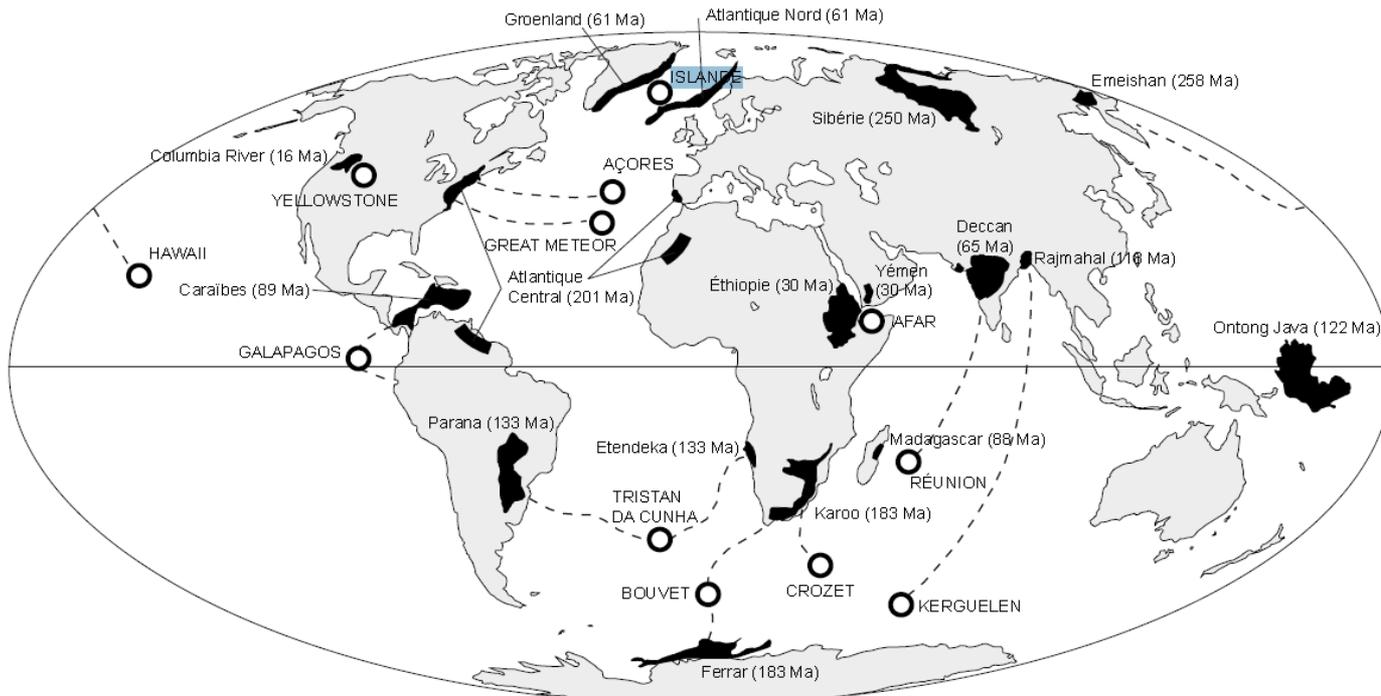
## Volcanisme

Quand la tête du panache parvient à la base de la lithosphère → **Fusion partielle** d'un volume conséquent de matériel mantellique → **épanchements importants** de basaltes qui forment de vastes plateaux : basaltes de plateaux ou **TRAPPS** ou **OIB** (Ocean Plateau Basalts)

Volume estimé : plusieurs millions de Km<sup>3</sup> en quelques MA

### EXEMPLES:

- Traps de Sibérie (249 Ma, à la limite Permien / Trias)
- Traps du Deccan, en Inde, (65 Ma, limite Crétacé / Paléocène).



# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

### Trapps du Deccan en Inde



# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

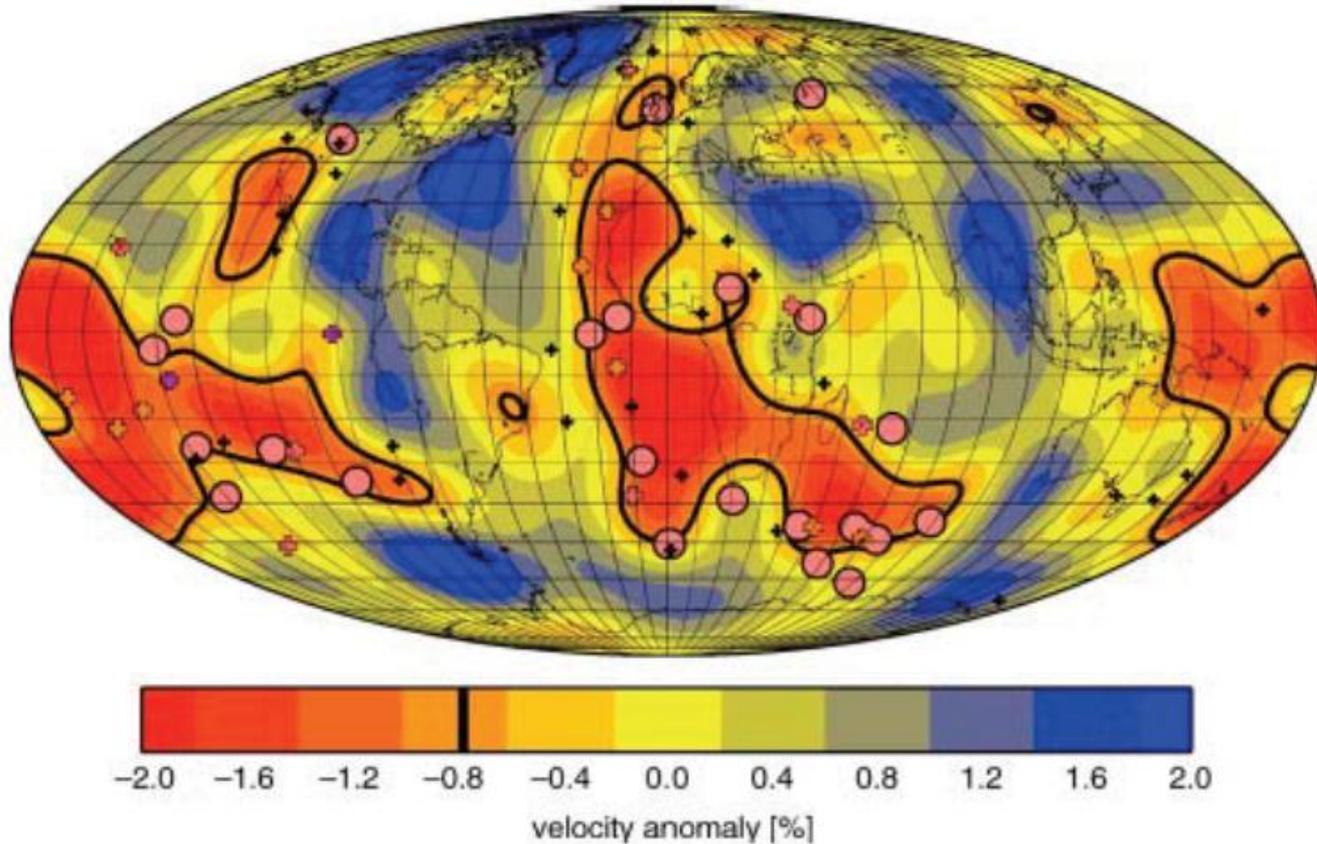
### Trapps de Sibérie



# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

**Corrélation** entre tomographie sismique au niveau de la couche D'', trapps et points chauds



Modèle tomographique dans la D'': Kuo et al. (2000)

- Trapps volcaniques
- + points chauds

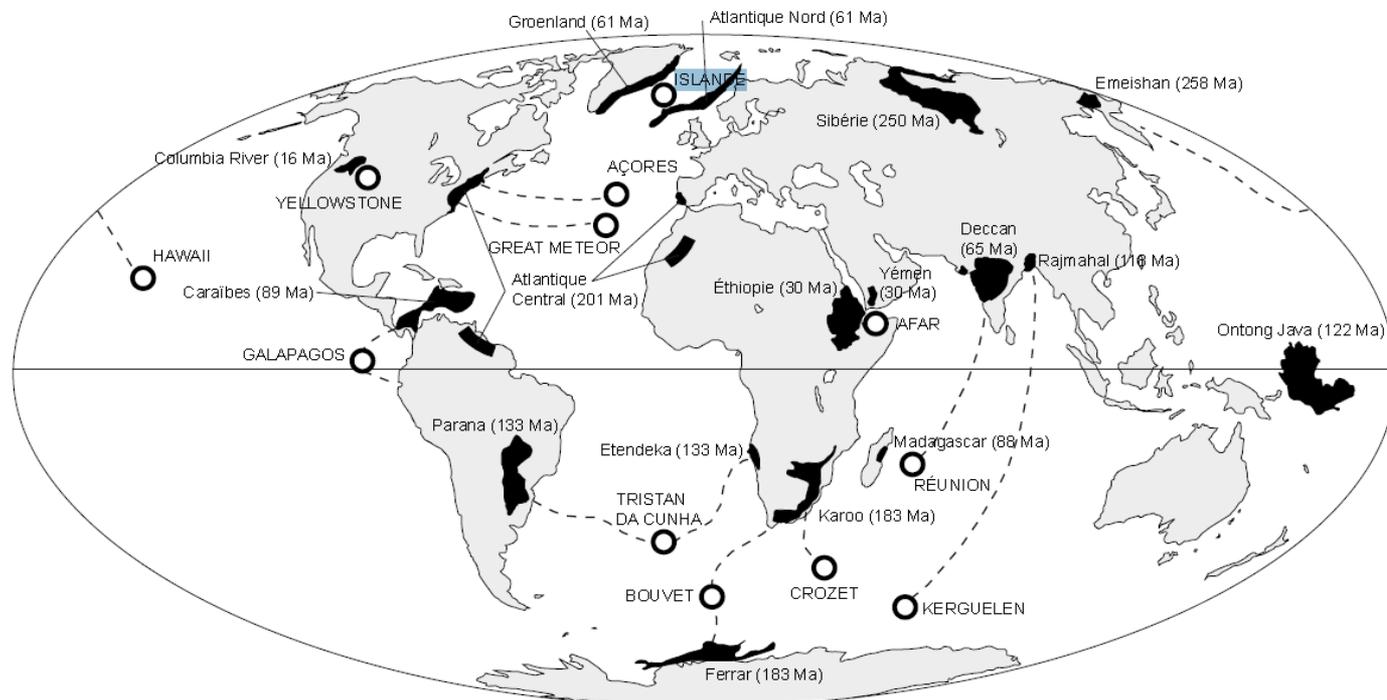
# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

### REMARQUE:

Si l'épaisseur de la lithosphère est **trop forte** (cas des zones cratoniques où cette épaisseur peut atteindre 200 à 250 km) la pression qui règne à la base de la lithosphère est trop élevée et **empêche la fusion partielle**.

Ceci explique pourquoi les trapps basaltiques ne sont pas situés sur des cratons, mais en **bordure** de ceux ci , là où l'épaisseur lithosphérique est moindre.



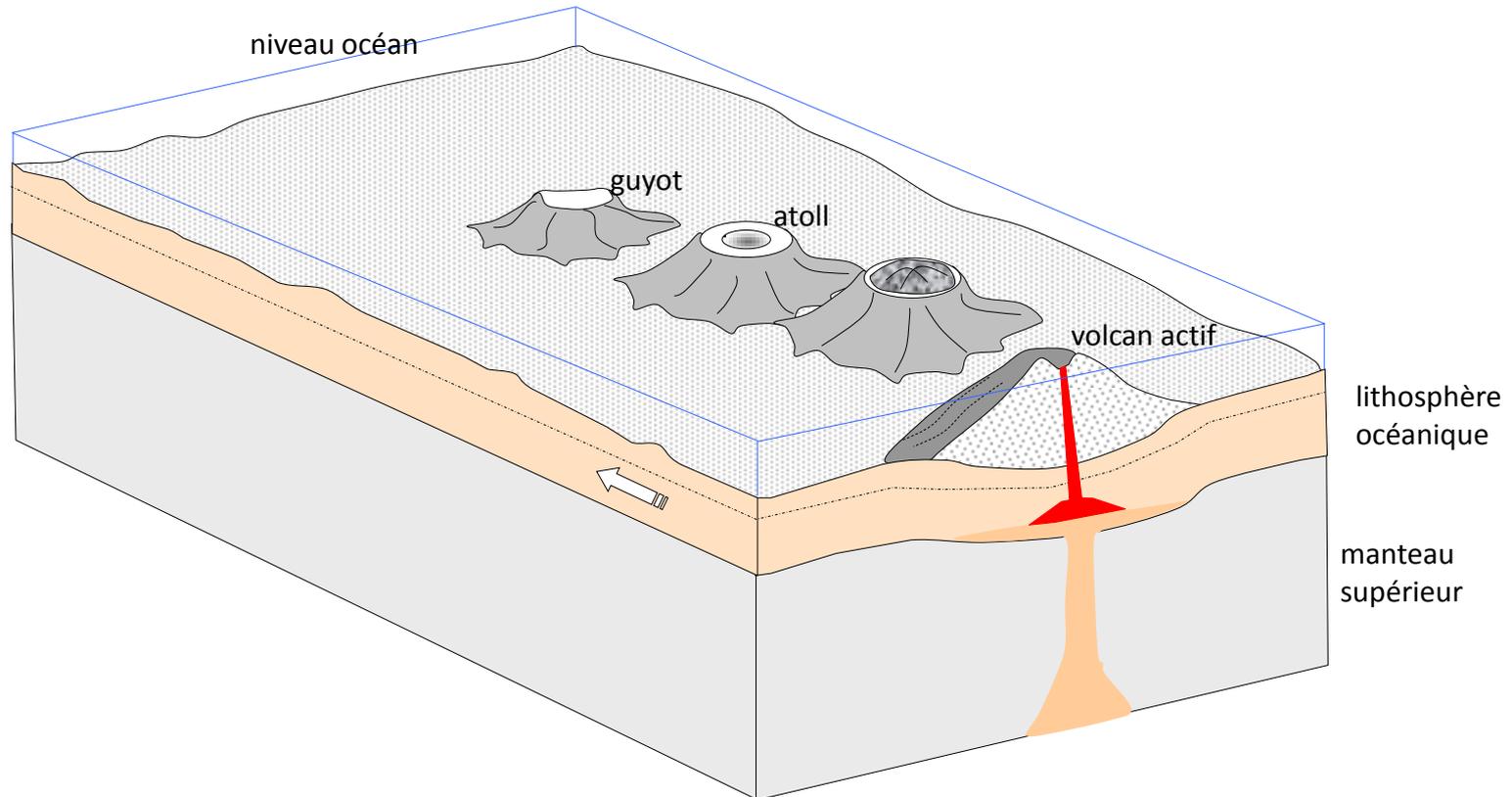
# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

Après l'éruption de type trapps, le matériel mantellique qui remonte dans la **queue** du panache donnera ensuite lieu à un **volcanisme plus faible**, mais qui peut perdurer pendant une centaine de millions d'années: C'est un **point chaud**.

Les émissions volcaniques peuvent être à l'origine de **reliefs importants**:

Hawaii : + 4200 m au dessus du niveau marin soit 10 000 m au dessus du plancher océanique



# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

### Piton de la Fournaise (Réunion)



Volcanisme

**Conséquences de la remontée mantellique**

Coulée de lave du Kilauea (Hawaii)

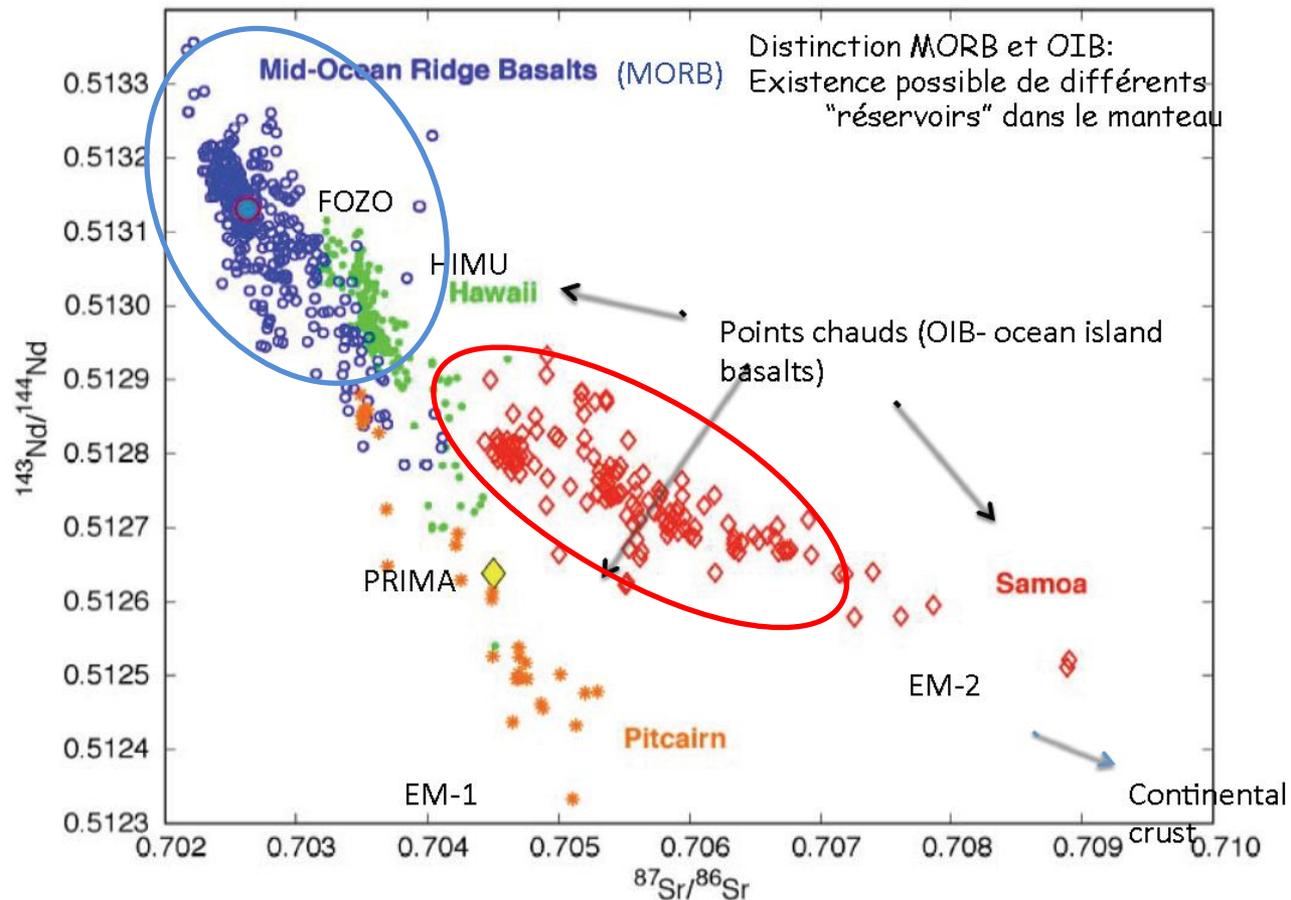


# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

### Signature géochimique des basaltes de points chauds:

Le magmatisme intraplaque des points chauds donne des basaltes de type **OIB** (Ocean Island Basalts). Sur le plan géochimique, ils diffèrent des MORB (basaltes des dorsales).



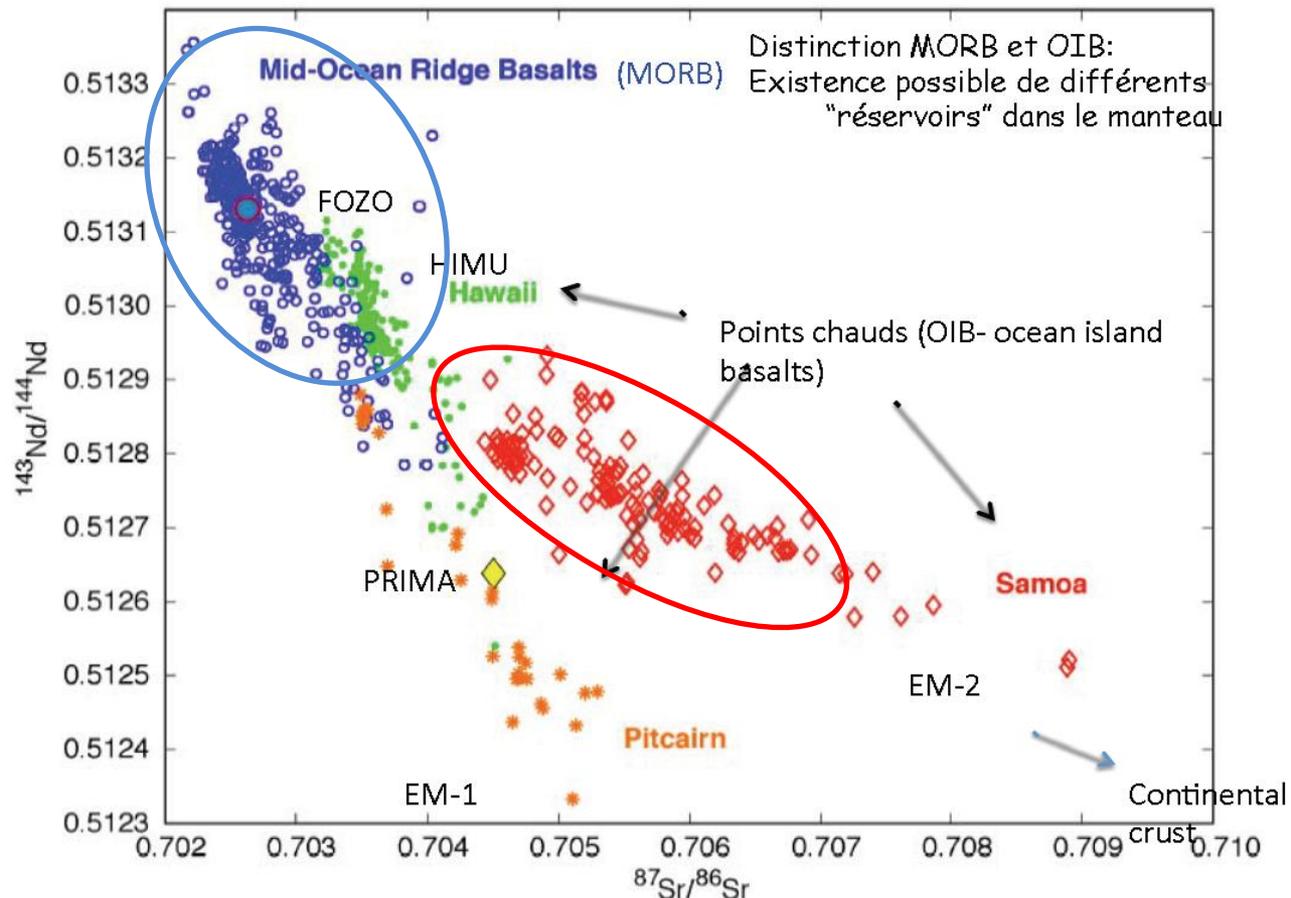
# Conséquences de la remontée mantellique

## Volcanisme

$^{87}\text{Rb} \rightarrow ^{87}\text{Sr}$  et  $^{87}\text{Sr}$  est un élément incompatible

$^{147}\text{Sm} \rightarrow ^{143}\text{Nd}$  et  $^{143}\text{Nd}$  est un élément compatible

Les OIB sont enrichis en incompatibles (manteau peu différencié) tandis que les MORBS sont appauvris en éléments incompatibles (proviennent de la fusion partielle d'un manteau superficiel qui a été appauvri par des fusions répétées)



## Variabilité des émissions volcaniques

### **-Variation liée à la nature de la source mantellique:**

Suivant le panache, la source mantellique peut être plus ou moins profonde. Les mesures des rapports isotopiques Nd / Sr montrent une certaine variabilité, ce qui semble montrer une structure hétérogène pour le manteau inférieur, soulignée par les données sismiques (comme un gâteau marbré)

## Variabilité des émissions volcaniques

### **-Variation liée à la nature de la source mantellique:**

Suivant le panache, la source mantellique peut être plus ou moins profonde. Les mesures des rapports isotopiques Nd / Sr montrent une certaine variabilité, ce qui semble montrer une structure hétérogène pour le manteau inférieur, soulignée par les données sismiques (comme un gâteau marbré)

### **-Variation latérale du degré de fusion partielle:**

Parvenu à une profondeur estimée à 150 km, le matériel du panache subit une fusion partielle avec un potentiel de production magmatique d'autant plus important qu'il se situe dans l'axe du panache.

Ainsi à l'aplomb du panache → caractère tholéiitique (taux de fusion élevé) alors  
Volcans plus périphériques → série plus alcaline (faible taux de fusion).

## Variabilité des émissions volcaniques

### **-Variation liée à la nature de la source mantellique:**

Suivant le panache, la source mantellique peut être plus ou moins profonde. Les mesures des rapports isotopiques Nd / Sr montrent une certaine variabilité, ce qui semble montrer une structure hétérogène pour le manteau inférieur, soulignée par les données sismiques (comme un gâteau marbré)

### **-Variation latérale du degré de fusion partielle:**

Parvenu à une profondeur estimée à 150 km, le matériel du panache subit une fusion partielle avec un potentiel de production magmatique d'autant plus important qu'il se situe dans l'axe du panache.

Ainsi à l'aplomb du panache → caractère tholéiitique (taux de fusion élevé) alors  
Volcans plus périphériques → série plus alcaline (faible taux de fusion).

### **-Variation liée à la vigueur du panache :**

Panache peu actif → faible taux de fusion

Panache très actif → relèvement des isothermes → fusion plus près de la surface avec un taux plus élevé.

## Variabilité des émissions volcaniques

### **-Variation liée à la nature de la source mantellique:**

Suivant le panache, la source mantellique peut être plus ou moins profonde. Les mesures des rapports isotopiques Nd / Sr montrent une certaine variabilité, ce qui semble montrer une structure hétérogène pour le manteau inférieur, soulignée par les données sismiques (comme un gâteau marbré)

### **-Variation latérale du degré de fusion partielle:**

Parvenu à une profondeur estimée à 150 km, le matériel du panache subit une fusion partielle avec un potentiel de production magmatique d'autant plus important qu'il se situe dans l'axe du panache.

Ainsi à l'aplomb du panache → caractère tholéiitique (taux de fusion élevé) alors  
Volcans plus périphériques → série plus alcaline (faible taux de fusion).

### **-Variation liée à la vigueur du panache :**

Panache peu actif → faible taux de fusion

Panache très actif → relèvement des isothermes → fusion plus près de la surface avec un taux plus élevé.

### **- Variations par contamination des magmas:**

Echanges d'éléments chimiques entre le magma et l'encaissant, surtout si la croûte est de nature continentale

## Variabilité des émissions volcaniques

### -Variation liée à la nature de la source mantellique:

Suivant le panache, la source mantellique peut être plus ou moins profonde. Les mesures des rapports isotopiques Nd / Sr montrent une certaine variabilité, ce qui semble montrer une structure hétérogène pour le manteau inférieur, soulignée par les données sismiques (comme un gâteau marbré)

### -Variation latérale du degré de fusion partielle:

Parvenu à une profondeur estimée à 150 km, le matériel du panache subit une fusion partielle avec un potentiel de production magmatique d'autant plus important qu'il se situe dans l'axe du panache.

Ainsi à l'aplomb du panache → caractère tholéiitique (taux de fusion élevé) alors  
Volcans plus périphériques → série plus alcaline (faible taux de fusion).

### -Variation liée à la vigueur du panache :

Panache peu actif → faible taux de fusion

Panache très actif → relèvement des isothermes → fusion plus près de la surface avec un taux plus élevé.

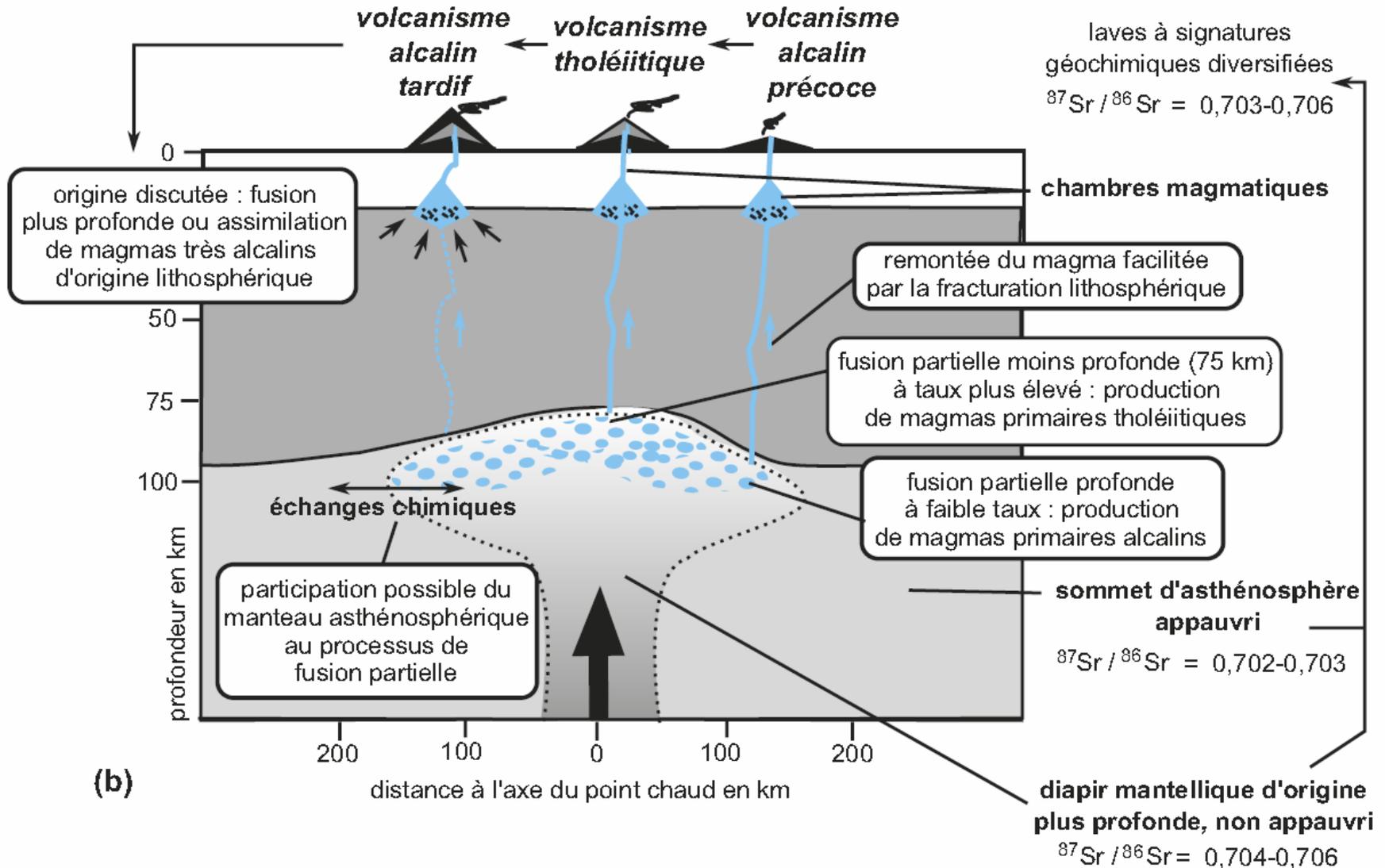
### - Variations par contamination des magmas:

Echanges d'éléments chimiques entre le magma et l'encaissant, surtout si la croûte est de nature continentale

- Variations par différenciation lors de séjours en chambres magmatiques (cristallisation fractionnée...)

# Variabilité des émissions volcaniques

*Évolution du magmatisme au cours du temps  
et du déplacement de la lithosphère à l'aplomb du point chaud*



# Variabilité des émissions volcaniques

## Exemple: diversité des émissions volcaniques pour l'archipel d'Hawaï

### Observatoire du Mauna Kea (Hawaii)



# Variabilité des émissions volcaniques

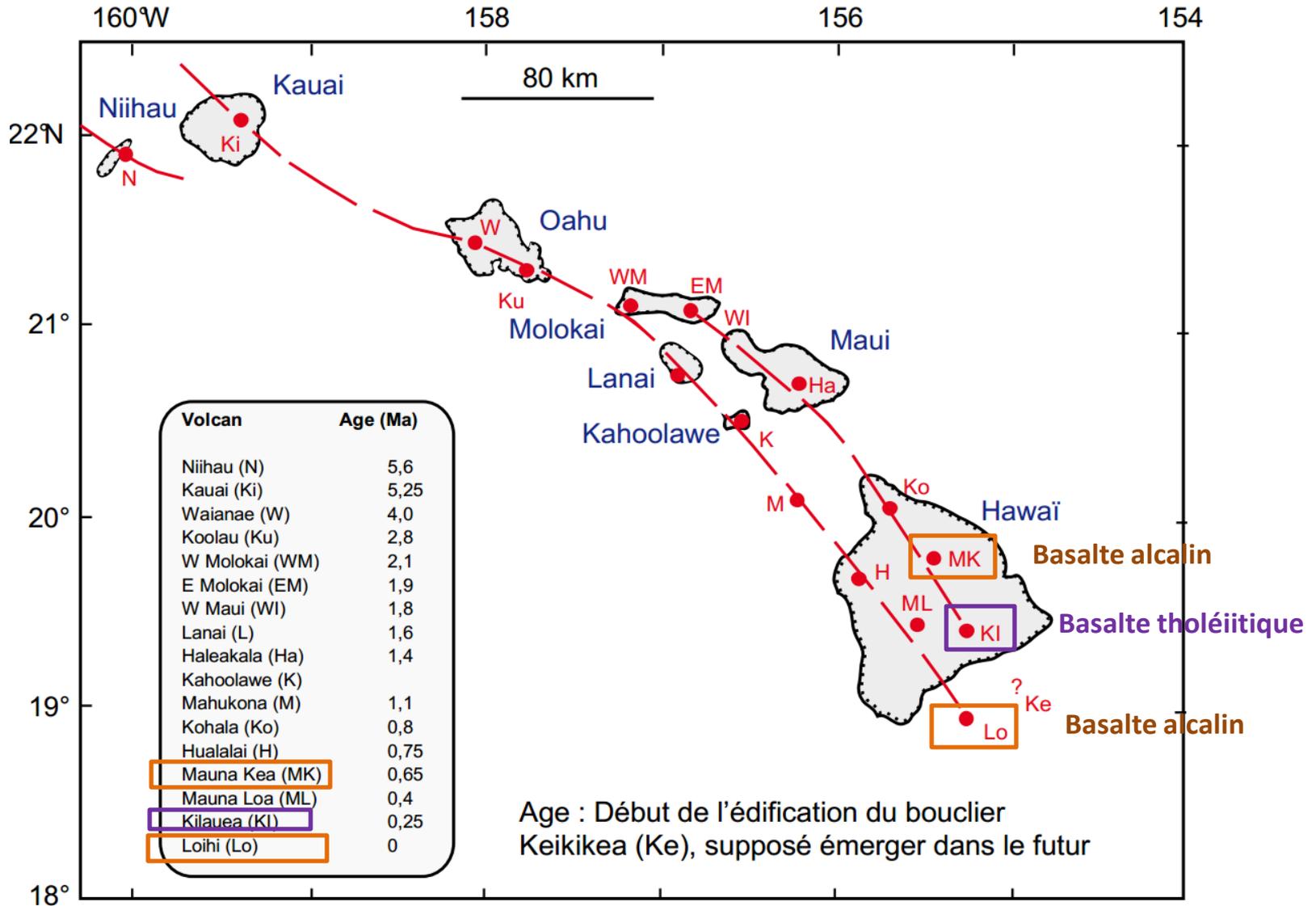
## Exemple: diversité des émissions volcaniques pour l'archipel d'Hawaï

Kilauea (Hawaii), 2011



# Variabilité des émissions volcaniques

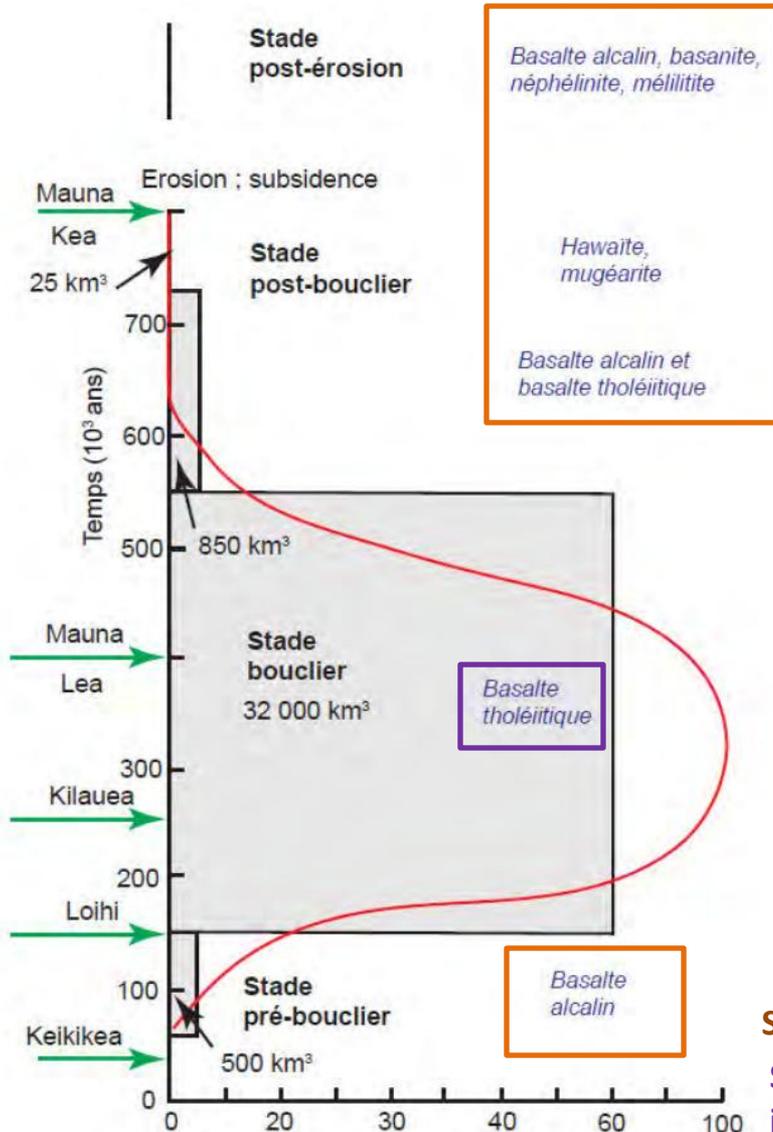
## Exemple: diversité des émissions volcaniques pour l'archipel d'Hawaï



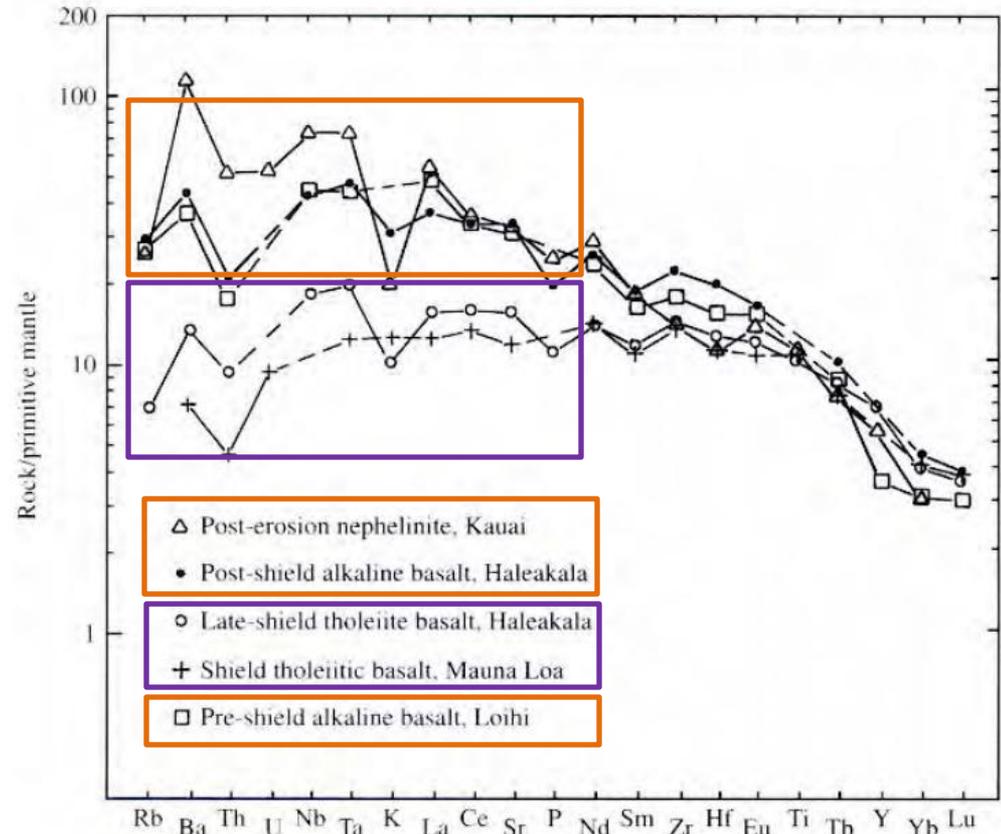
# Variabilité des émissions volcaniques

## Exemple: diversité des émissions volcaniques pour l'archipel d'Hawaï

### Composition des OIB



### Diagramme multi-élémentaire des OIB

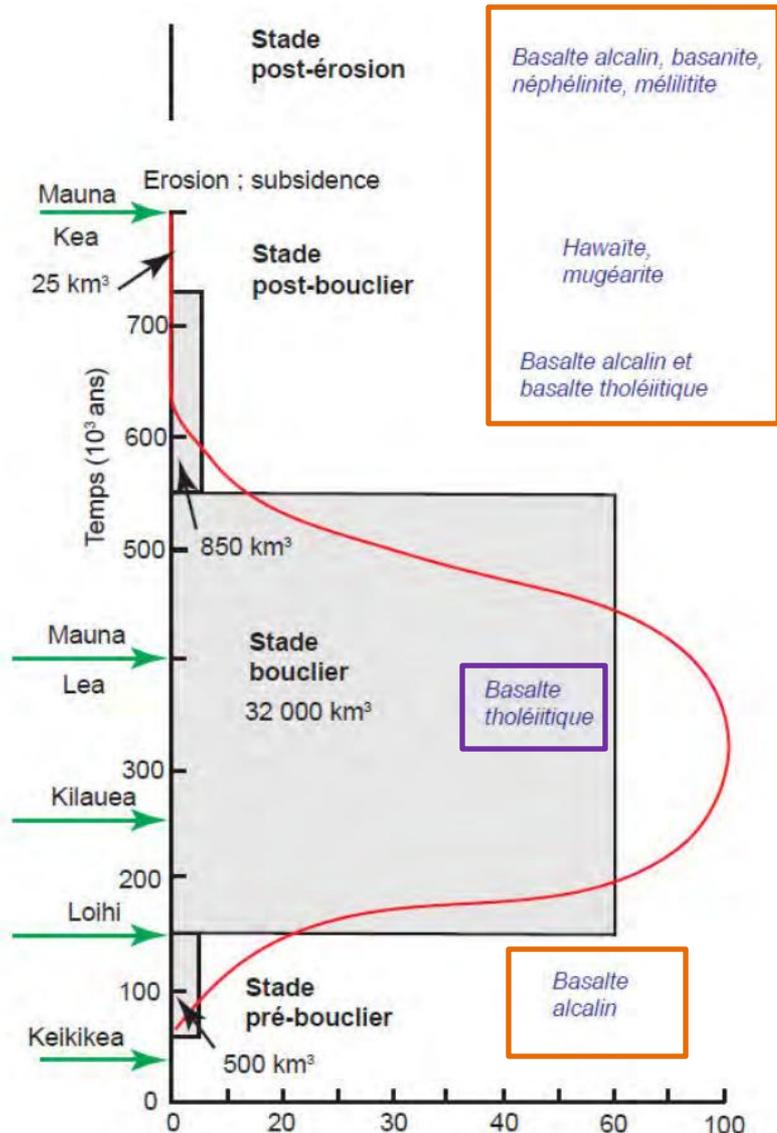


**Série alcaline : faible volume, taux élevé d'éléments incompatibles**

**Série tholéiitique : volume important, taux faible d'éléments incompatibles**

# Variabilité des émissions volcaniques

## Exemple: diversité des émissions volcaniques pour l'archipel d'Hawaï



A Hawaii, Les laves des stades précoces, boucliers et tardifs n'ont pas la même composition isotopique

### -Stade pré-bouclier :

Faible taux de fusion de manteau asthénosphérique appauvri entraîné par le panache ascendant.

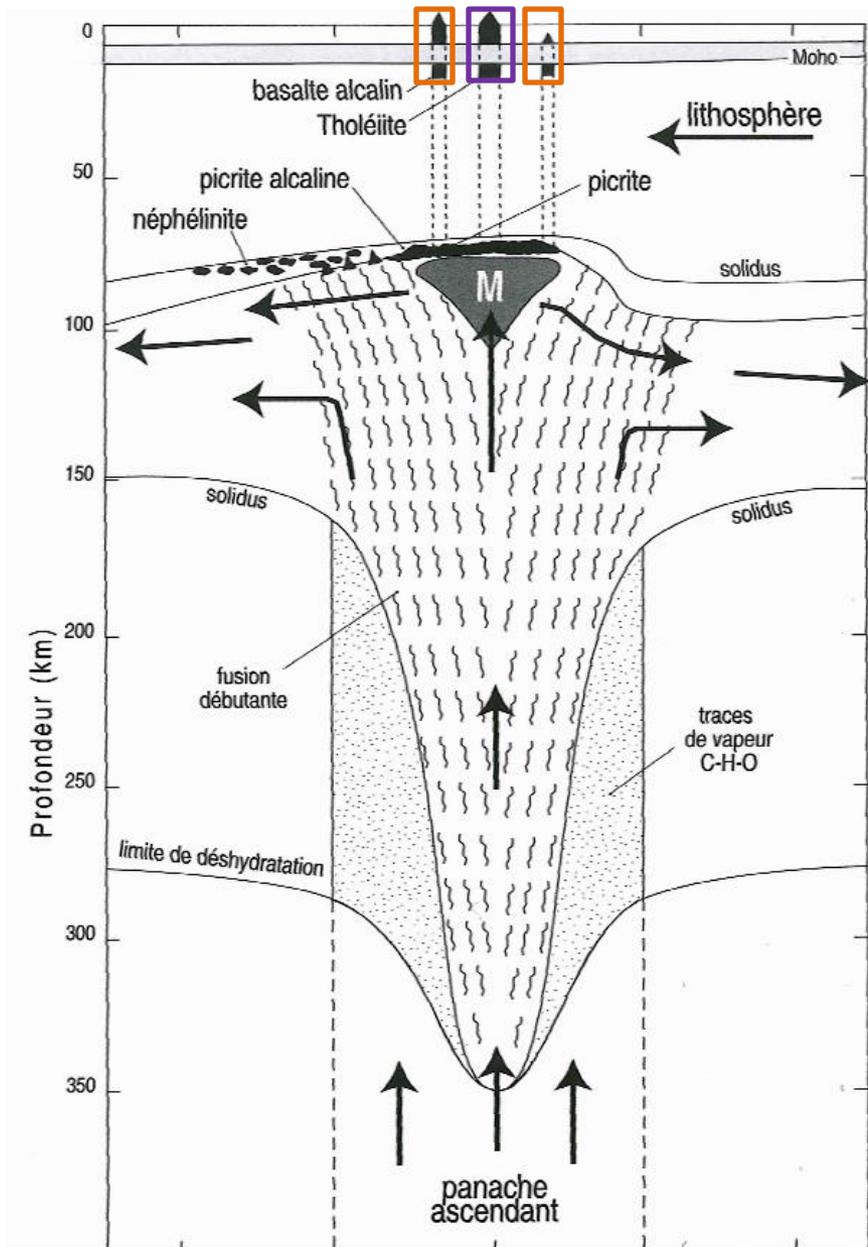
### -Tholéiites des stades boucliers :

Fort taux de fusion d'un manteau enrichi, mélangé à du manteau lithosphérique appauvri

### -Magmas alcalins des stades tardifs :

Faible taux de fusion d'un manteau appauvri, peut-être manteau lithosphérique.

# Variabilité des émissions volcaniques



## Modèle proposé par Wyllie, 1988

Au centre du panache:  
taux de fusion élevés → **tholéiites**

TF diminue vers la périphérie →  
**basaltes alcalins**, puis néphélinites.

## Placage sous magmatique et accréation crustale

De nombreux arguments géophysiques, pétrologiques et géochimiques prouvent que d'importants volumes de magmas basaltiques sont **piégés à la base de la croûte continentale** (sous placage) et au sein de celle-ci, sous forme de corps plutoniques gabbroïques, filons et sills basaltiques.

Ces magmas dont l'ascension est ralentie subissent plusieurs stades de **cristallisation fractionnée**. Les magmas parvenant à la surface ne sont donc pas primitifs, mais différenciés.

L'existence de ces corps magmatiques sous-plaqué est confirmée par les images de sismique-réflexion (aspect lité de la croûte inférieure).

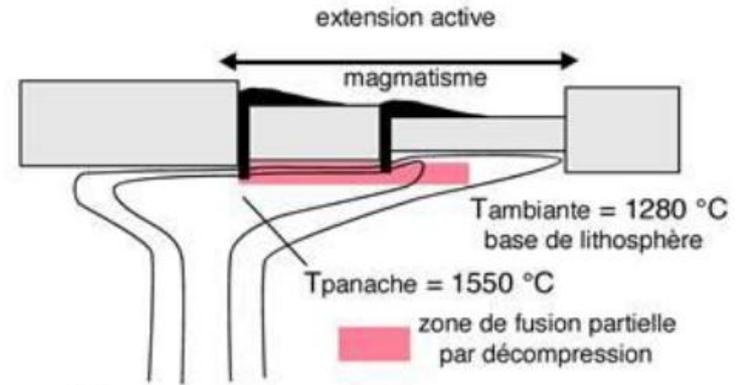
On estime que les volumes de basaltes stockés à la base et au sein de la croûte sont supérieurs aux volumes de basaltes épanchés en surface. Ainsi, dans l'Atlantique Nord (panache Islande), le matériel magmatique sous-plaqué a une épaisseur estimée à 15 km environ.

Ce processus est fondamental, car il conduit à rajouter d'importants volumes de matériel magmatique basique à la croûte continentale ; **les panaches constituent donc un agent de croissance de cette croûte. Leur rôle a sans doute été majeur lors de la formation de la croûte terrestre primitive.**

# Conséquences de la remontée mantellique

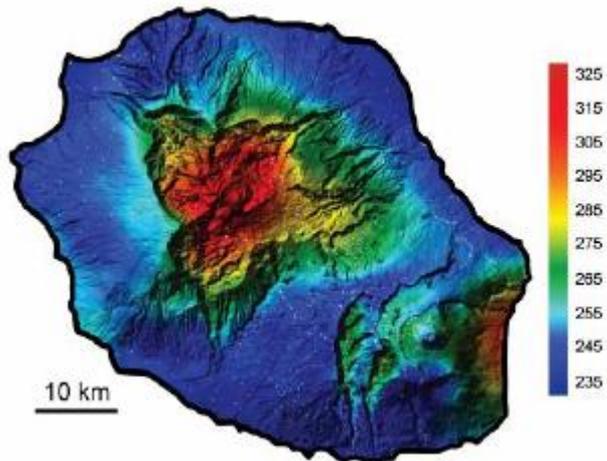
## Tectonique, isostasie

Le magmatisme de point chaud peut être associé à une **tectonique extensive**

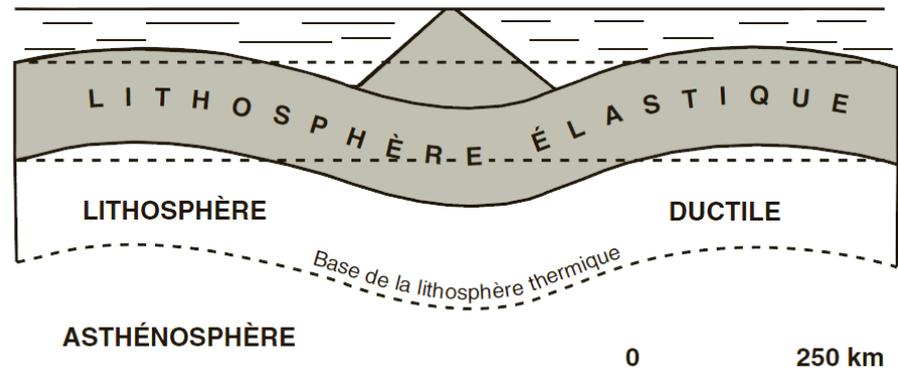


L'enfoncement de la lithosphère sous l'effet de la **surcharge** des produits volcaniques est facilitée par les températures élevées → La **flexure élastique** (réversible) de la lithosphère

Anomalies de Bouguer (*Levieux, 2004*)



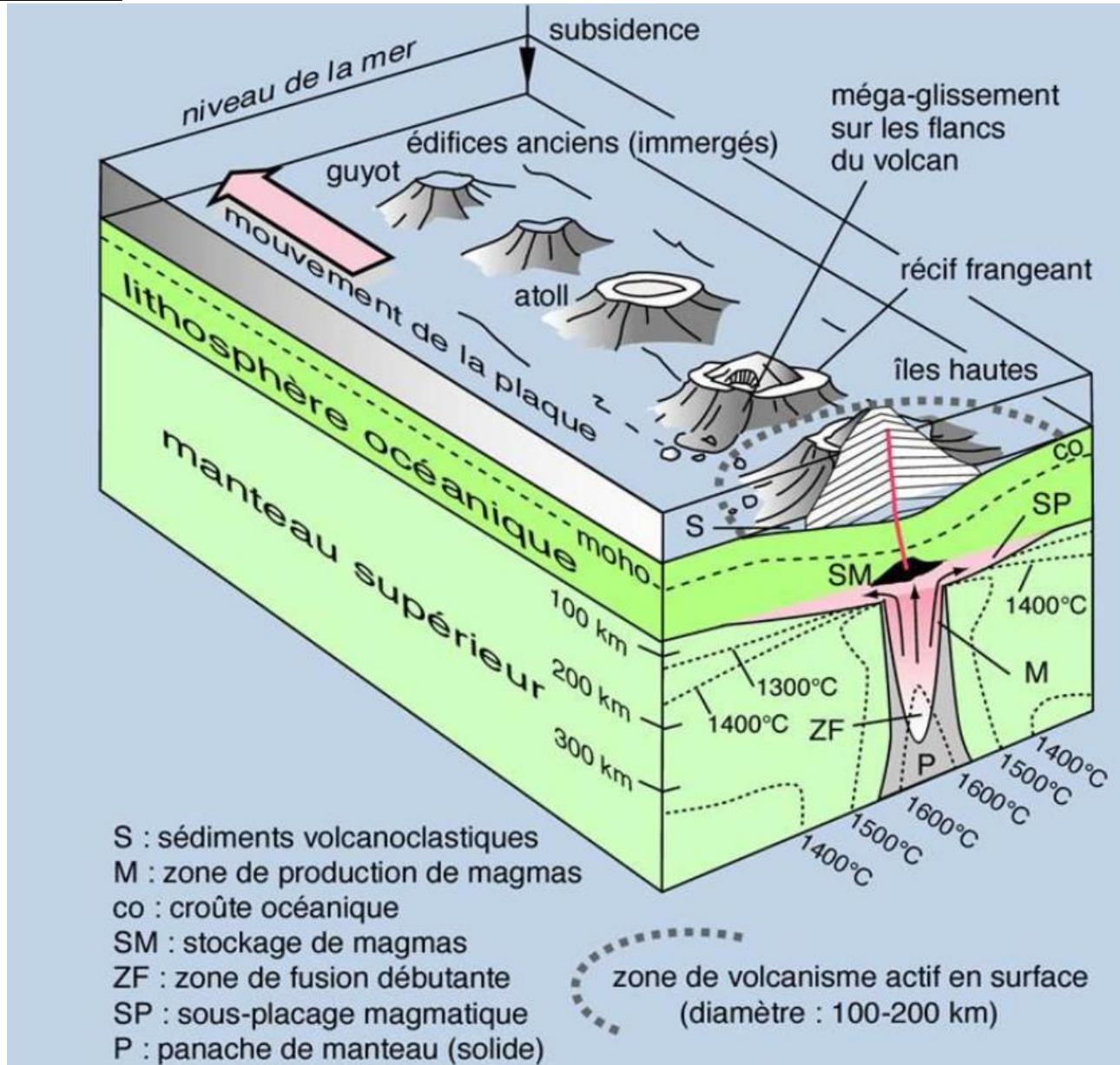
Gravité    +                    -                    ++                    -                    +  
                   C                    B                    A                    B                    C



Voir modèle isostatique de Vening Meinez

# Conséquences de la remontée mantellique

## Un point chaud en 3D



I – Caractéristiques des panaches mantelliques

II – Conséquence d'une remontée mantellique

-Gravimétrie

-Volcanisme

-Tectonique

**III – Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde**

IV - Compléments

## Arguments en faveur d'une origine profonde

Pour décompter des **points chauds profonds**, V. Courtillot et Coll ont établi 5 critères appliquée à 49 points chauds candidats:

-Existence de trapps

-Présence d'un chaîne de volcans

-Flux thermique élevé

-Rapport isotopique  $^3\text{He}/^4\text{He}$  élevé

-Zone à moindre vitesse des ondes S à la transition manteau sup / inf

→3 PC profonds dans l'hémisphère Pacifique: Hawaii, Ile de Pâques, Louisville

→4 PC profonds dans l'hémisphère Indo-Atlantique: Afars, Tristan da Cunha, Islande, Réunion

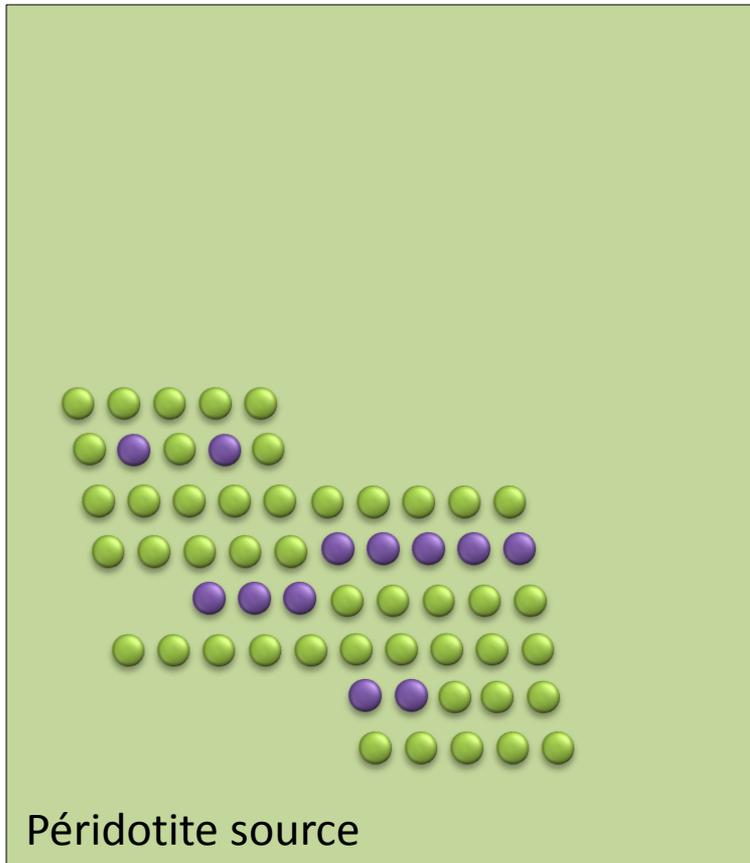
# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivré.**



- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

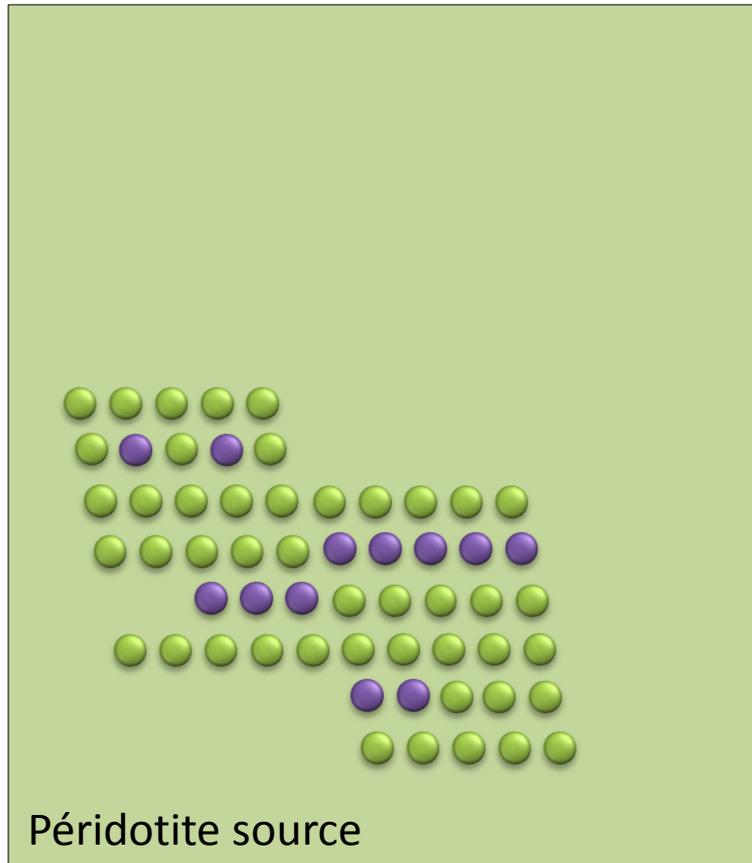
## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivré.**

### 1<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion faible



- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

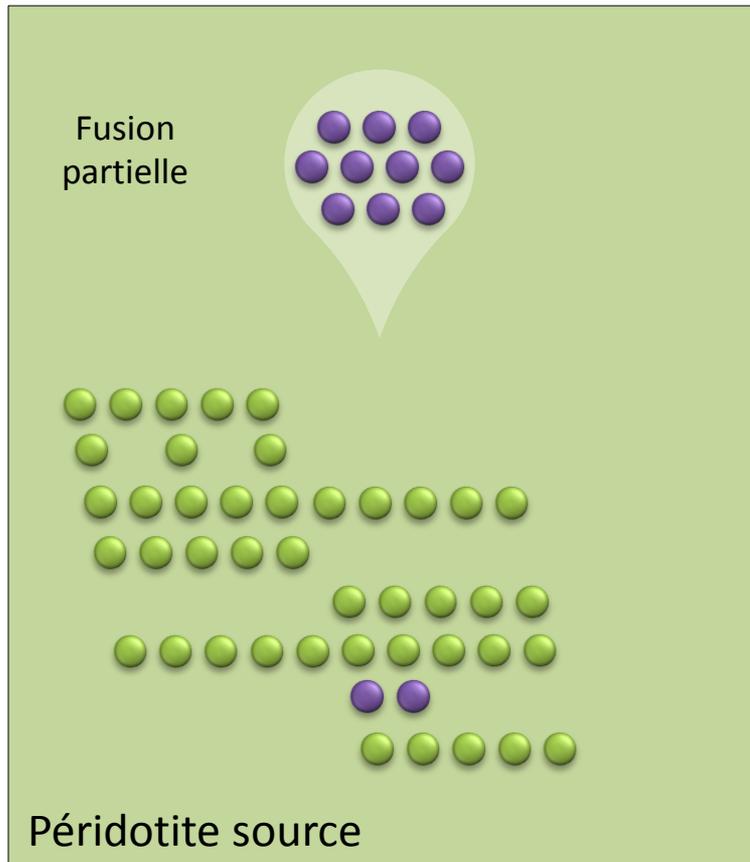
En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivré.**

### 1<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion faible

Fusion partielle

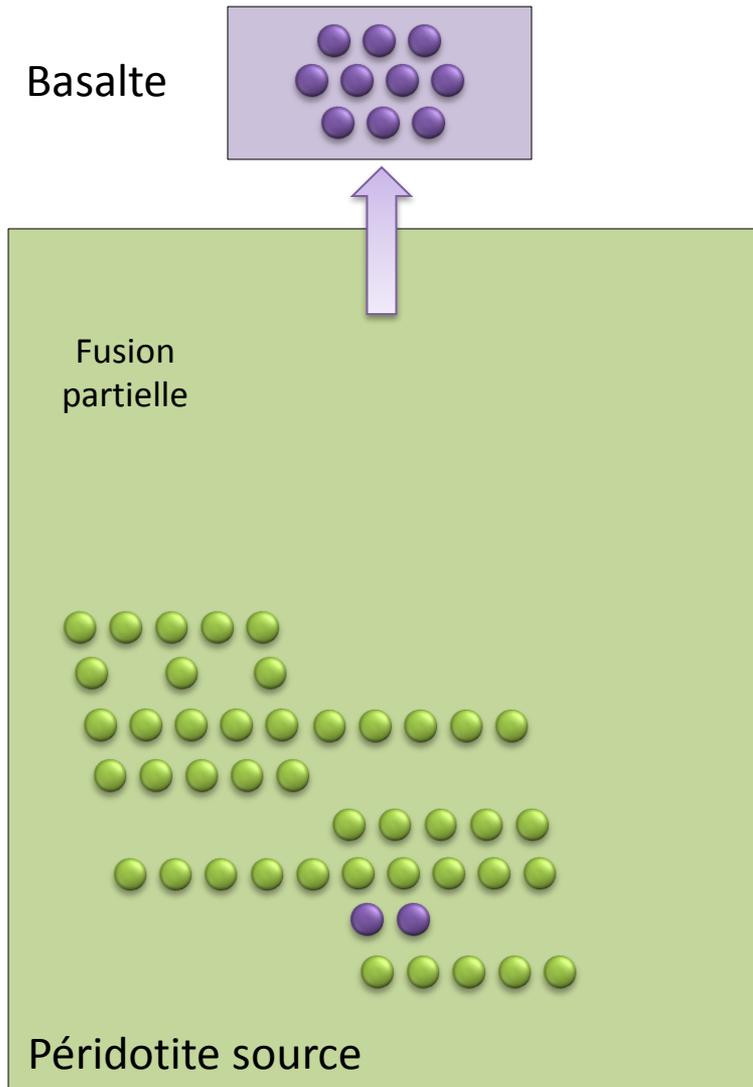
Passage des éléments incompatibles dans le liquide magmatique



- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivrés.**

### 1<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion faible

Fusion partielle

Passage des éléments incompatibles dans le liquide magmatique

Magma → Basalte (faible volume mais concentré en éléments incompatibles)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

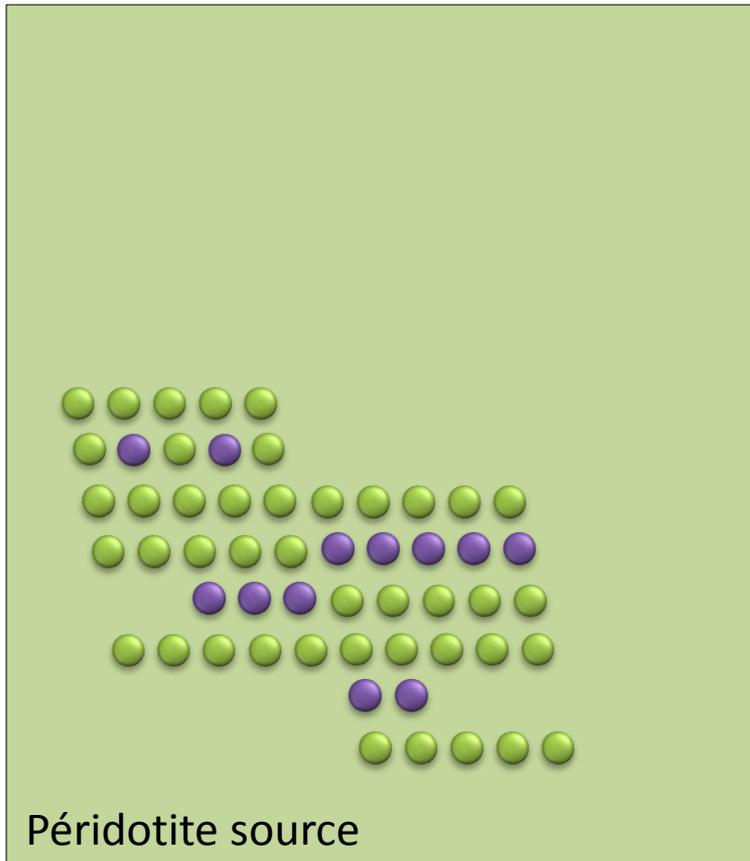
## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivrés.**

## 2<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion élevé



- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

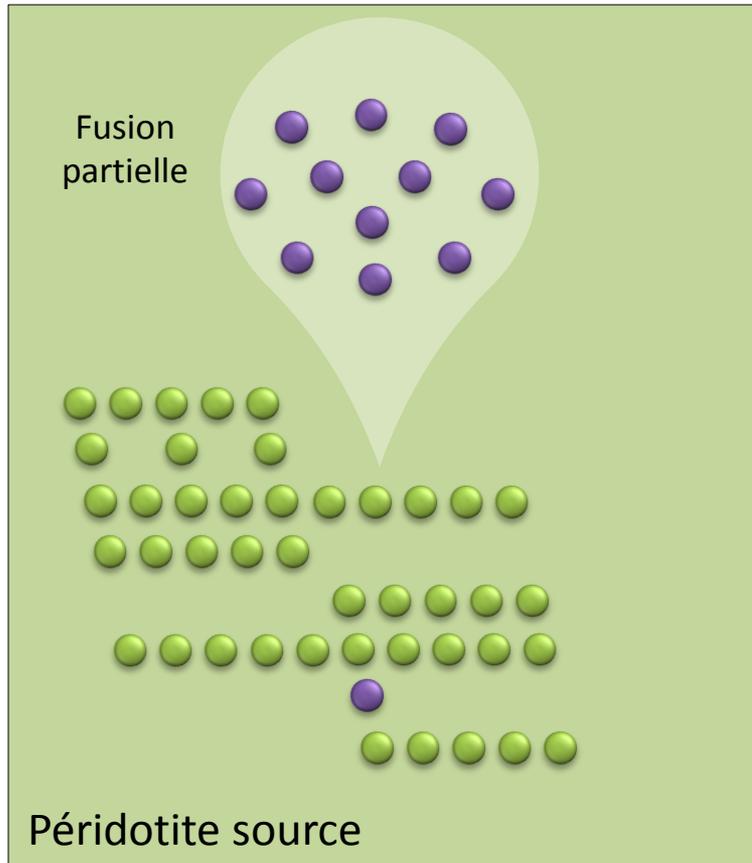
En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivrés.**

## 2<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion élevé

Fusion partielle importante

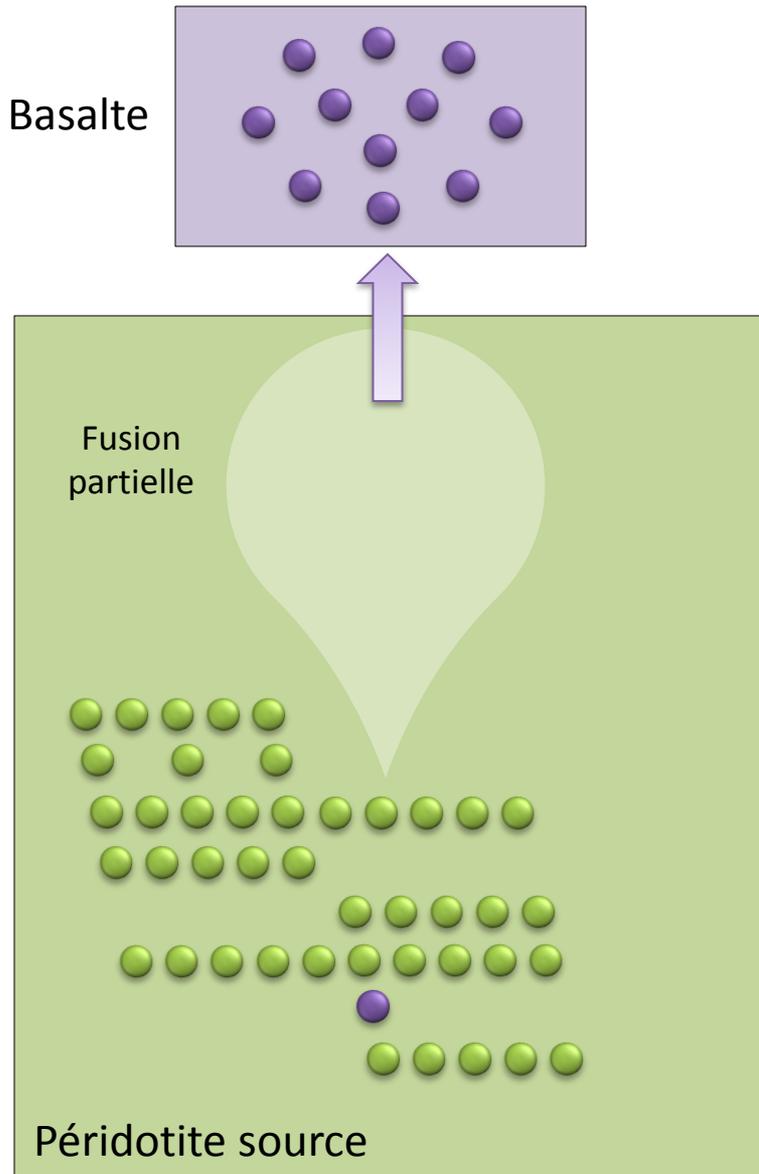
Passage des éléments incompatibles dans le liquide magmatique



- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



Lors de la fusion partielle d'un péridotite, il s'opère un tri géochimique:

En début de fusion, les **éléments incompatibles** sont les premiers à quitter la phase solide pour se concentrer dans le liquide magmatique.

**Ainsi la concentration en éléments incompatibles dans un magma est inversement proportionnelle au taux de fusion partielle qui les a délivré.**

## 2<sup>er</sup> Cas: Taux de fusion élevé

Fusion partielle importante

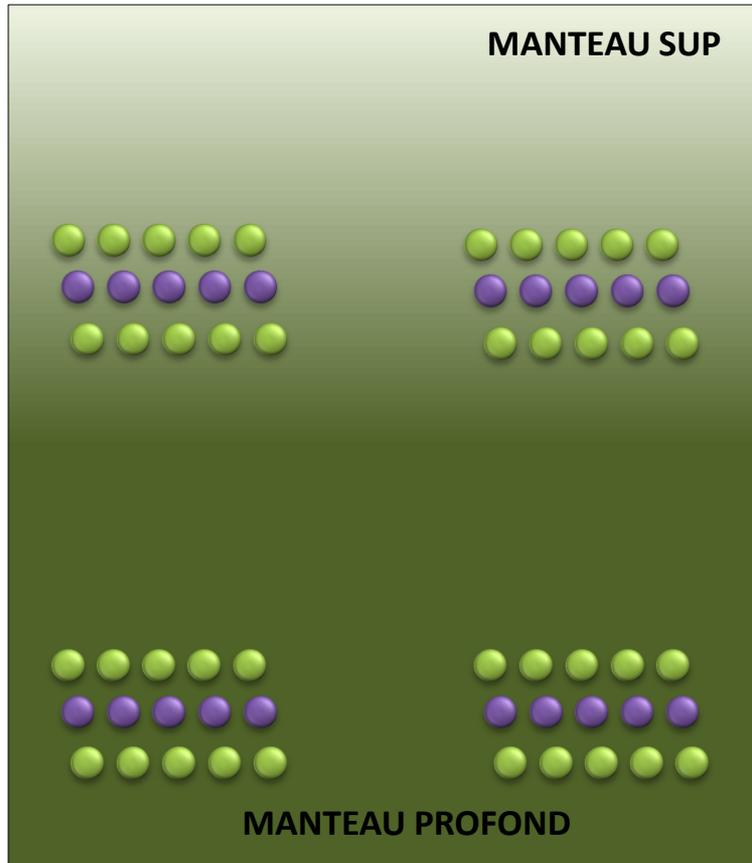
Passage des éléments incompatibles dans le liquide magmatique

Magma → Basalte (volume plus important, moins concentré en éléments incompatibles)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



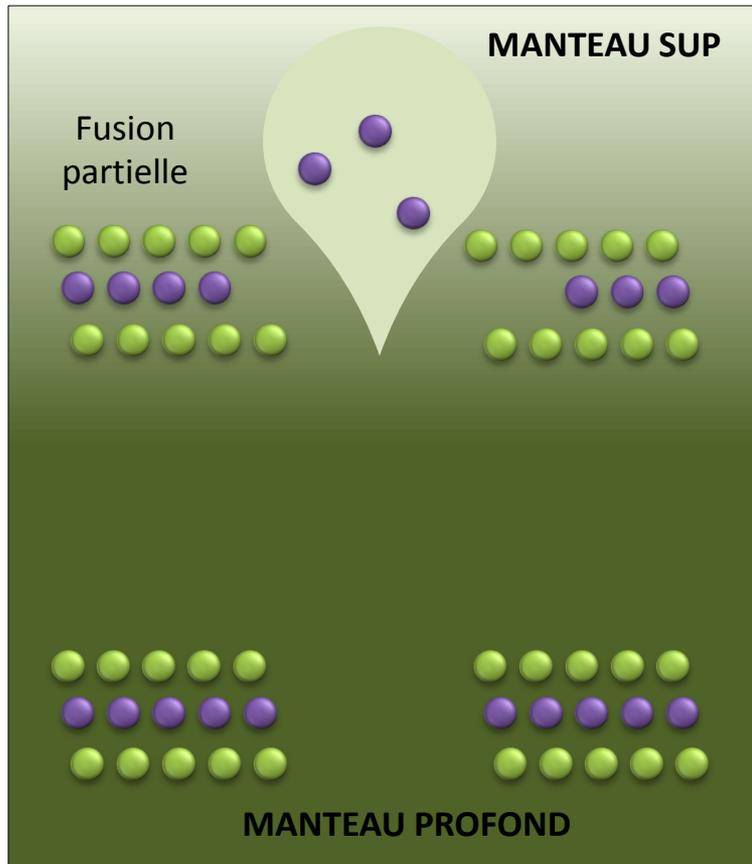
Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



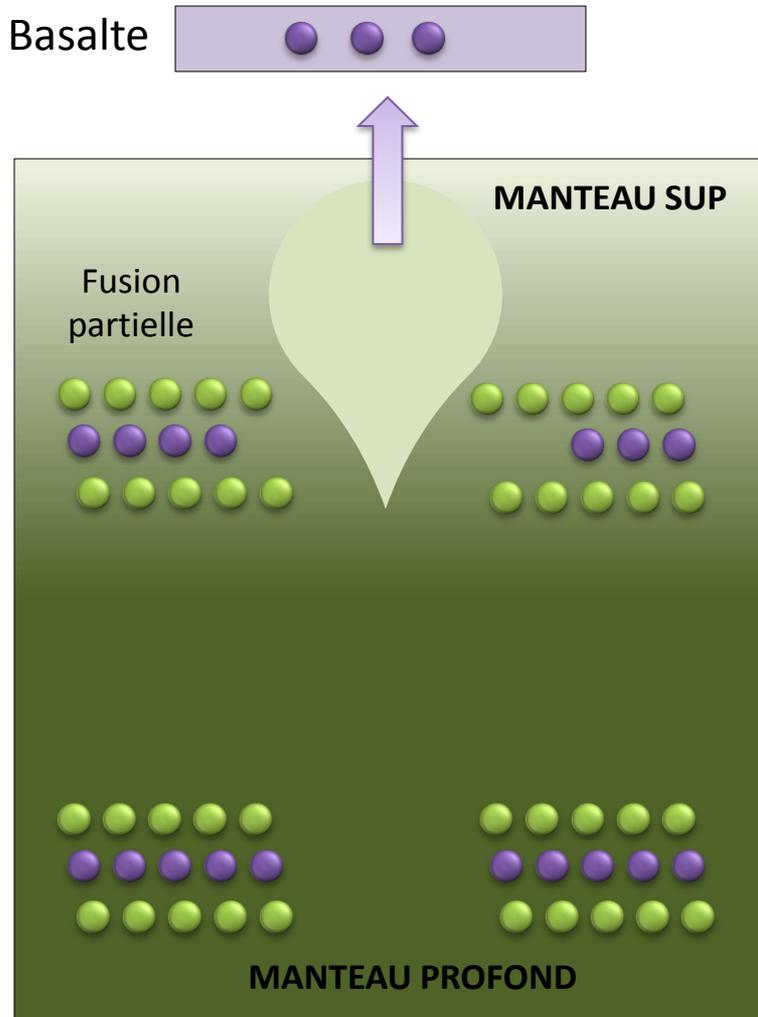
Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

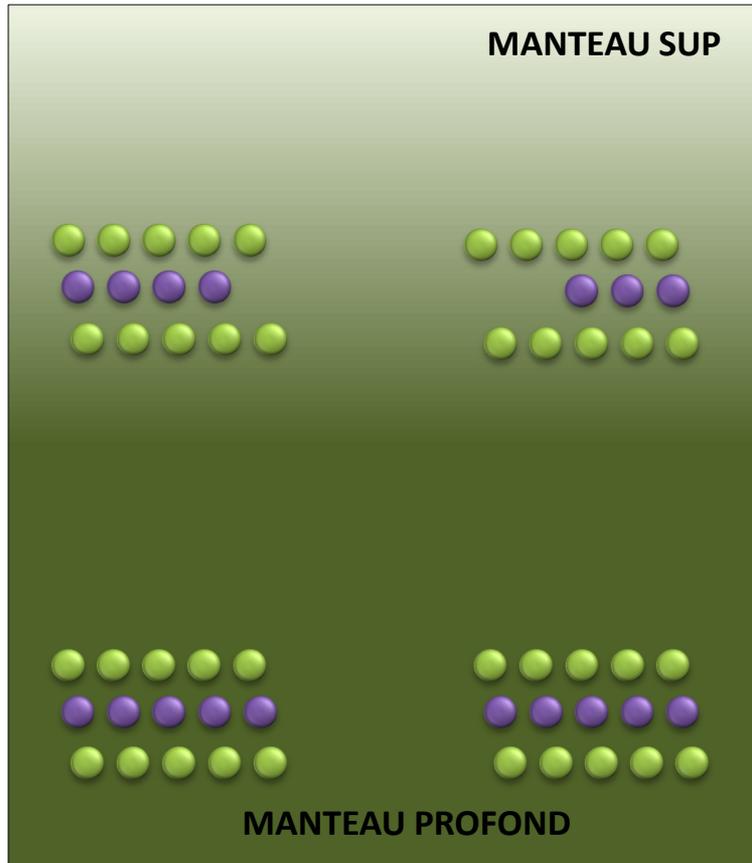
La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Basalte



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

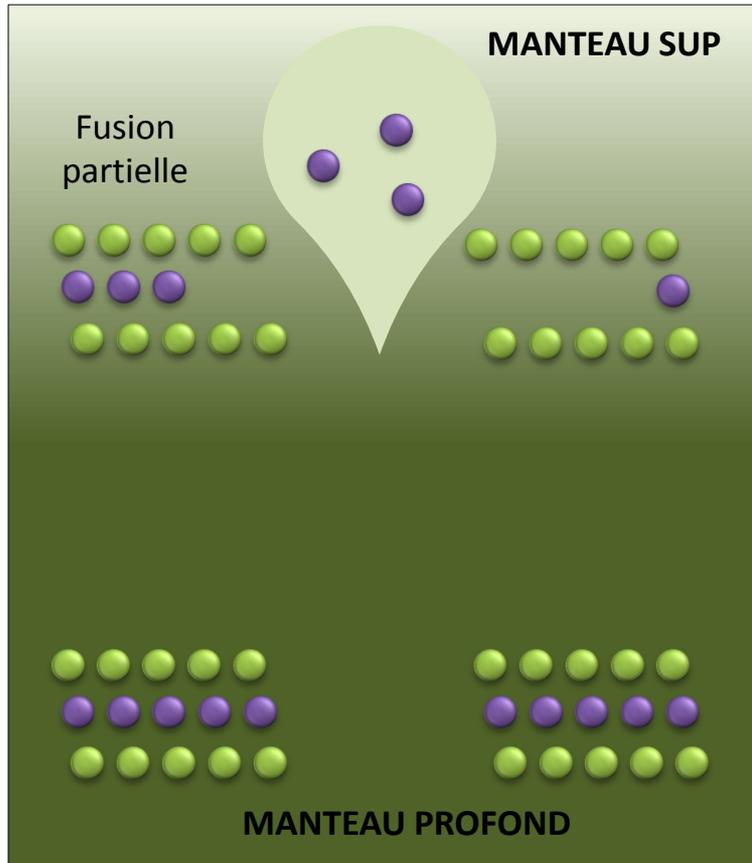
La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Basalte



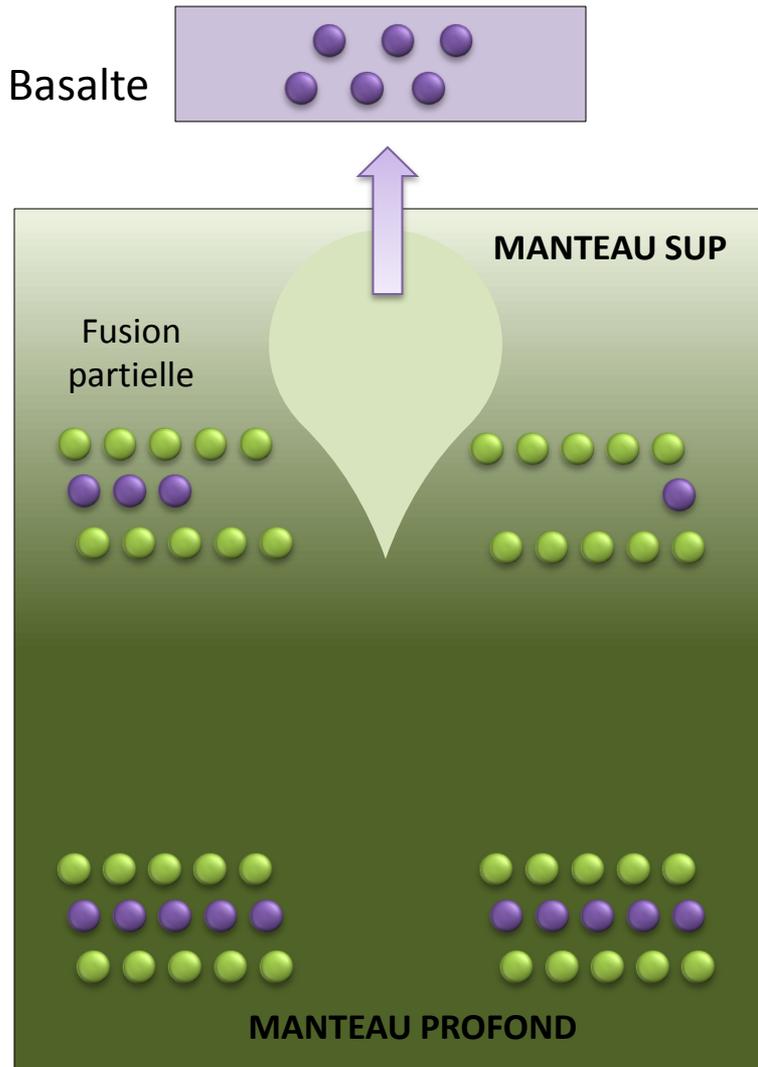
Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

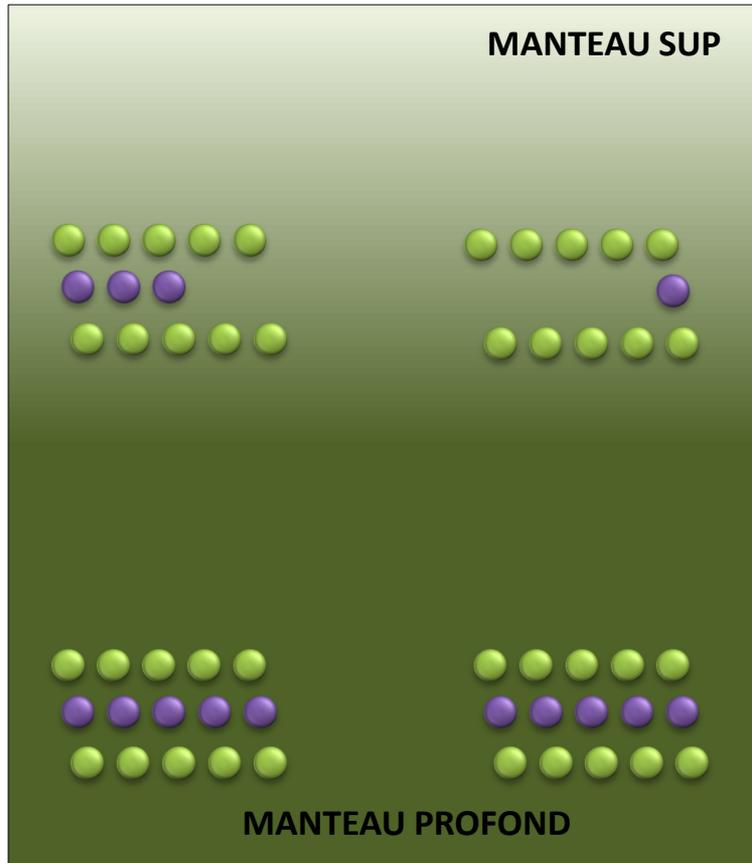
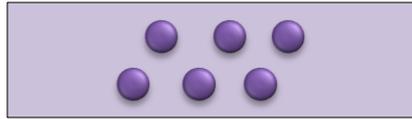
La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Basalte



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

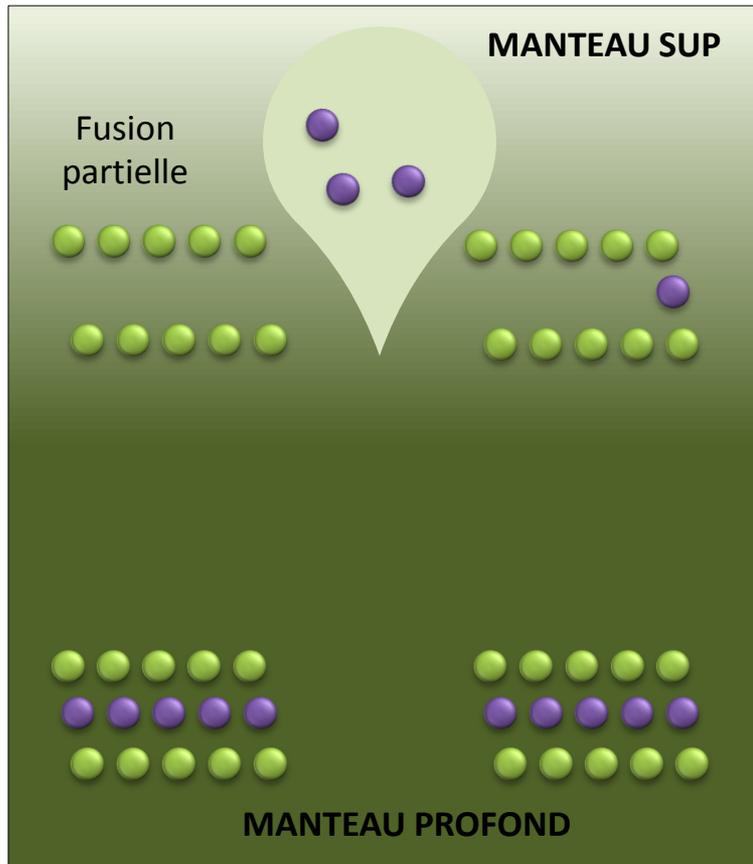
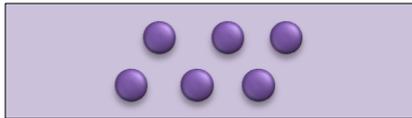
La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Basalte



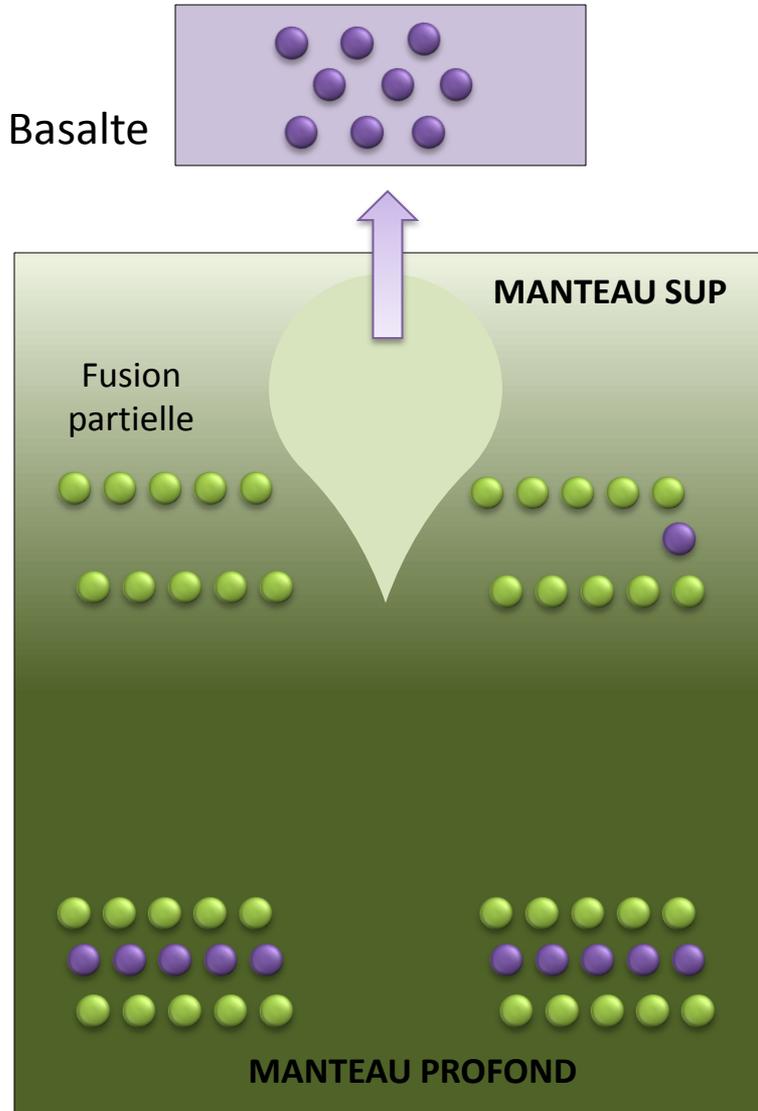
Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

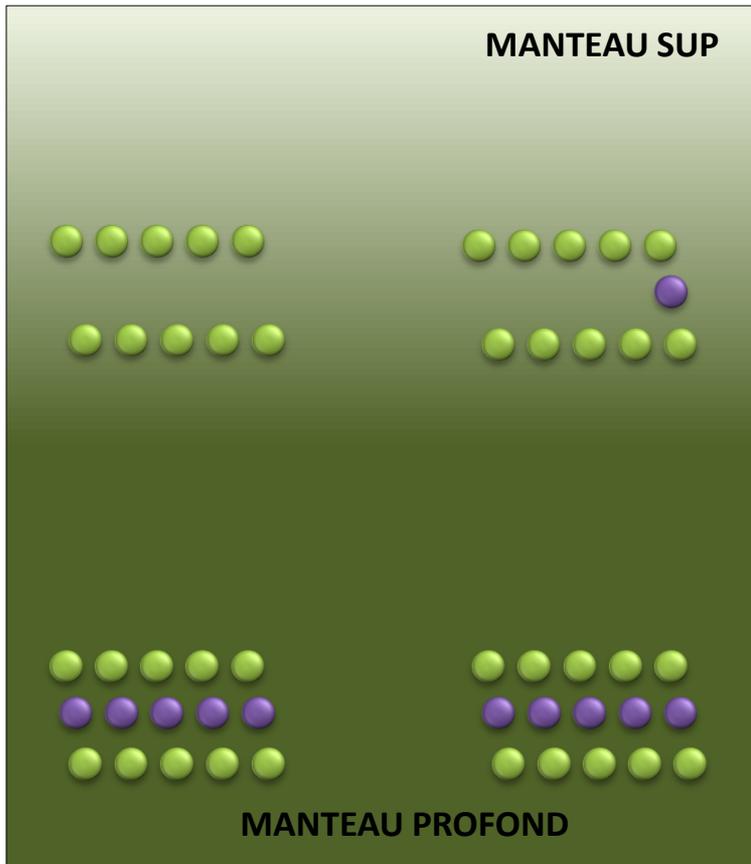
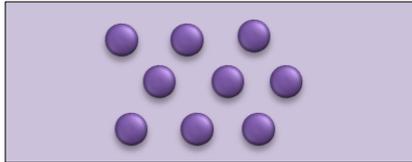
La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

Basalte



Au cours de fusions partielles successives, la **péridotite supérieure** s'appauvrit peu à peu en éléments incompatibles → Péridotite **appauvrie** (Harzburgite)

La **péridotite plus profonde**, préservée de la fusion partielle, conserve ses éléments incompatibles (Lherzolite)

- = élément compatible (Mg, Fe, Ni, Co...)
- = élément incompatible (K, Na, Rb...)

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Rappels sur les éléments compatibles / incompatibles

### Éléments incompatibles (= hygromagmatophiles):

Ces éléments sont préférentiellement **concentrés dans le liquide** lors de la **fusion partielle** d'une roche ou de la **crystallisation fractionnée** d'un magma. Ces éléments sont incompatibles vis-à-vis de minéraux typiques du manteau (olivine, spinelle, pyroxène, grenat) car ils s'intègrent mal dans le réseau solide silicaté.

- *Large ion lithophile element*, éléments à grand rayon ionique, (**LILE**) ; K, Rb, Sr, Ba,
- Terres rares légères (**LREE**), La, Ce, Pr, Nd, Th, U, Cs
- *High Field Strength Elements*, éléments à faible rayon ionique, mais à fort potentiel ionique (**HFSE**), Ti, Zr, Nb, Ta, Hf)

### Éléments compatibles:

Lors de la fusion partielle d'une roche, ces éléments sont préférentiellement **retenus dans les minéraux résiduels**. Lors de la **crystallisation fractionnée**, ils sont préférentiellement extraits du liquide et incorporés dans les minéraux qui se forment.

Exemples: Mg, Fe, Ni, Co, Cr, V, Sc

# Arguments en faveur d'une origine profonde

## Mesure des éléments incompatibles:

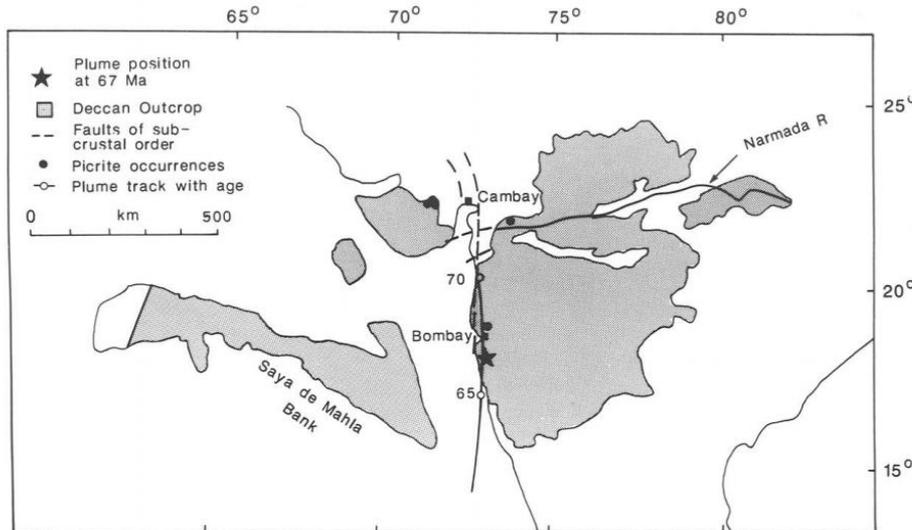


Fig. 2. A map of the Deccan Traps prior to the separation of the Saya da Malha Bank from India after [8] showing the extent of basaltic outcrop, known occurrences of picrite (from [21]), the track of the Reunion hotspot (from [47]), and the hotspot location at the time the Deccan Traps were forming.

Les picrites et komatiites sont des roches volcaniques formées à partir de la fusion partielle du manteau provenant de la **queue** des panaches

## Abondance en **éléments incompatibles** (Rb, Ba, K... ) dans les picrites:

Signature géochimique qui montre que la source mantellique est proche du manteau source, **non différencié**, donc **profond** (le manteau superficiel est appauvri en éléments incompatibles car ceux-ci ont migré dans la magmas lors de la fusion partielle au niveau des dorsales ou zones de subduction)

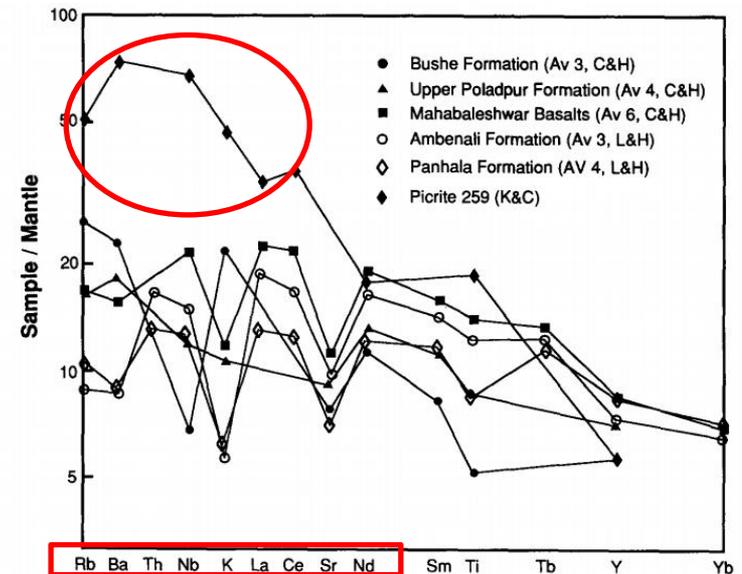


Fig. 3. Mantle normalized trace element abundance patterns for the Bushe, Upper Poladpur, Mahabaleshwar, Ambenali and Panhala Formations and a picrite from the Deccan Traps. Mantle normalizing values from Sun and McDonough [48]; data from [17,18,21].

## Arguments en faveur d'une origine profonde

### Mesure des éléments incompatibles:

La richesse en éléments incompatibles des basaltes de points chaud (OIB) peut s'expliquer par:

- La péridotite source qui est **profonde** donc « non appauvrie »
- Le **faible** taux de fusion partielle de ces péridotites (en général), ce qui concentre dans les liquides magmatiques les éléments incompatibles.

#### REMARQUE:

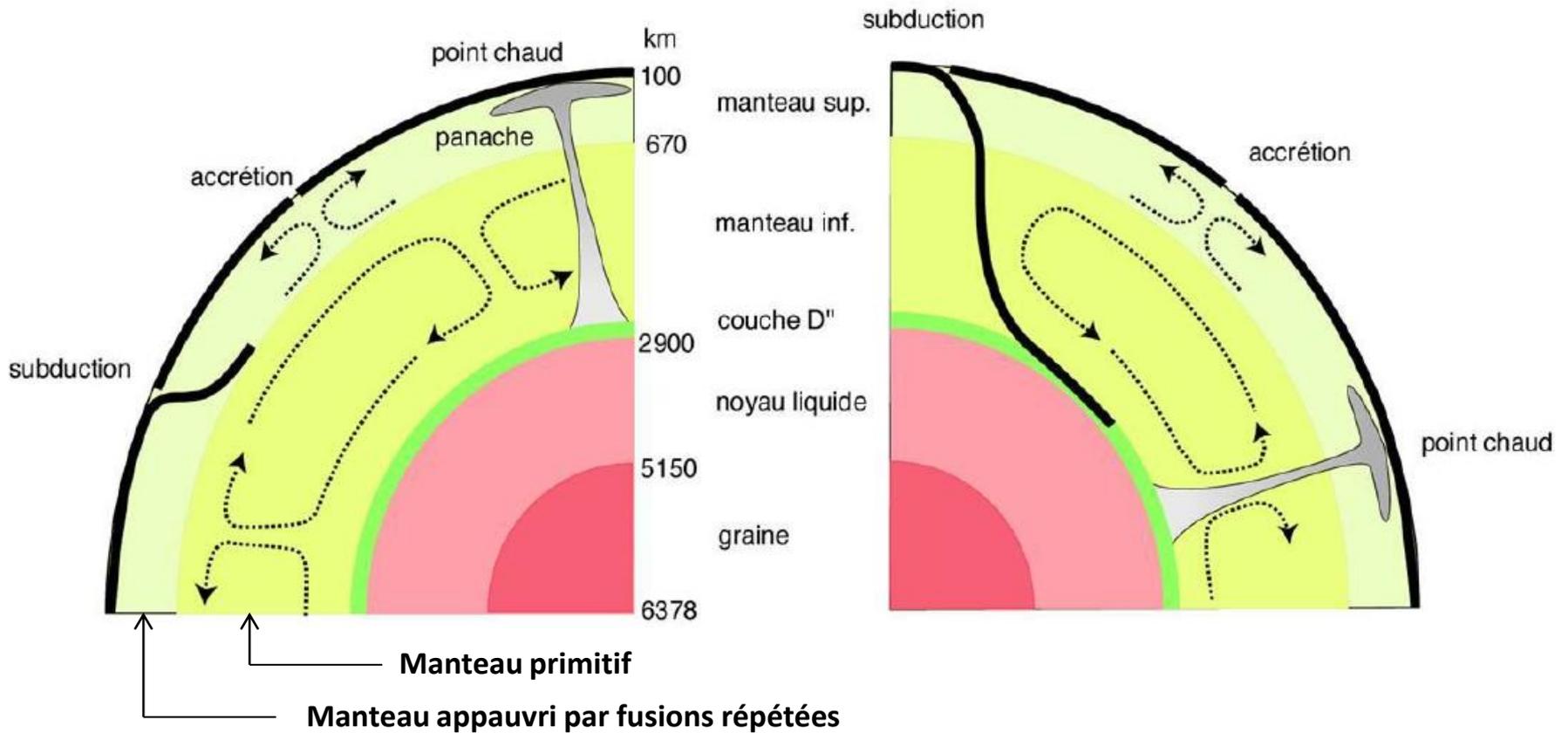
Des mesures géochimiques montrent aussi que les panaches contiennent une partie de croûte océanique subductée (→ cette croûte ayant une origine magmatique, cela entraîne un enrichissement du manteau en éléments incompatibles)

Cette croûte est stockée dans le manteau pendant un temps très long, pouvant atteindre jusqu'à 1 à 2 milliards d'années, et retourne ensuite à la surface grâce à la remontée dans les panaches.

→ Cela renforce l'idée d'une descente des slabs lithosphériques jusqu'à la couche D''

# Arguments en faveur d'une origine profonde

Modèle théorique à 2 couches avec 2 configurations possibles : les slabs traversent ou pas la zone de transition manteau sup / inf



# Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde

## Etude du rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$

### DONNEE:

Le manteau contient  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$

Dans le manteau, on a :

$^{234}\text{U} \rightarrow ^4\text{He}$  et

$^{240}\text{Th} \rightarrow ^4\text{He}$

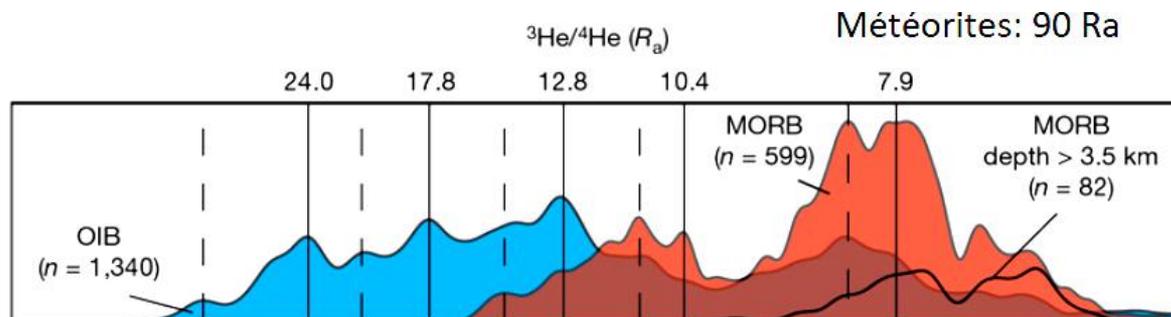
La quantité de  $^4\text{He}$  peut donc augmenter mais pas celle de  $^3\text{He}$  qui est quasiment fixe depuis la formation de la planète

Au cours du volcanisme, le magma transporte  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$  vers la surface puis ces gaz sont libérés par dégazage.

La volcanisme appauvrit donc le rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  du manteau car  $^4\text{He}$  peut être régénéré mais pas  $^3\text{He}$ .

### MESURE:

Les mesures du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  dans les basaltes OIB des points chauds (Hawaï, Islande) montrent des rapports particulièrement **élevés** par rapport aux autres laves.



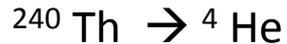
# Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde

## Etude du rapport $^3\text{He}/^4\text{He}$

### **DONNEE:**

Le manteau contient  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$

Dans le manteau, on a :



La quantité de  $^4\text{He}$  peut donc augmenter mais pas celle de  $^3\text{He}$  qui est quasiment fixe depuis la formation de la planète

Au cours du volcanisme, le magma transporte  $^4\text{He}$  et  $^3\text{He}$  vers la surface puis ces gaz sont libérés par dégazage.

La volcanisme appauvrit donc le rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  du manteau car  $^4\text{He}$  peut être régénéré mais pas  $^3\text{He}$ .

### **MESURE:**

Les mesures du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  dans les basaltes OIB des points chauds (Hawaï, Islande) montrent des rapports particulièrement **élevés** par rapport aux autres laves.

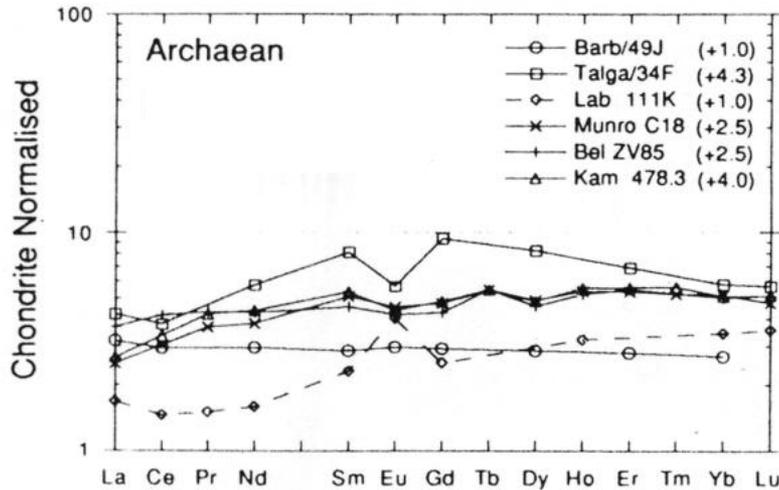
### **INTERPRETATION:**

Cela montre que la source mantellique de ces laves est probablement située dans la manteau profond: partie du manteau la mieux préservée du dégazage puisque c'est surtout le manteau supérieur est à l'origine du magmatisme (subduction, accréation)

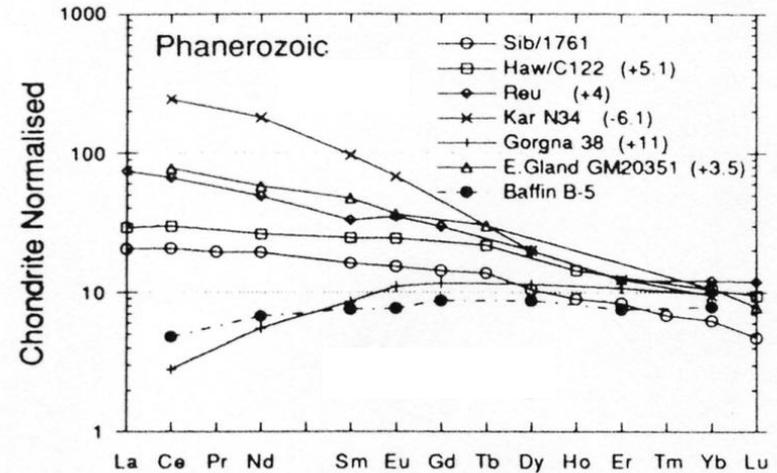
## Arguments géochimiques qui montrent une évolution dans le temps

D'après Campbell et Griffith, 1992, les Komatiites archéennes (> 2,5 Ga) provenant de la fusion partielle du manteau provenant de la queue des panaches sont appauvries en terres rares légères (éléments incompatibles), tandis que les komatiites et picrites actuelles sont enrichies en éléments incompatibles

Komatiites > 2500 Ma



Picrites < 550 MA



→ A l'Archéen, le Manteau est appauvri en éléments incompatibles. Après l'Archéen, le Manteau est enrichi.

Cette observation est en accord avec l'absence de basaltes alcalins (alcalins = éléments incompatibles) à l'Archéen. Ils n'apparaissent au Protérozoïque.

**Le manteau qui a donné naissance aux picrites et komatiites a changé de composition au cours de l'histoire de la Terre.**

# Arguments géochimiques qui montrent une évolution dans le temps

## INTERPRETATION

- A l'archéen : Manteau plus chaud

Conséquence: fusion partielle importante → croûte océanique plus épaisse que la C.O. actuelle.

Cette lithosphère était difficilement subductable (effet bouchon identique aux plateaux océanique actuels) ; Il a fallu plus de 700 Ma pour débiter la subduction (début de la tectonique des plaques).

- Par conséquent, la formation de la croûte continentale a débuté vers 3.8 Ga
- L'arrivée de matériel lithosphérique subducté à la limite manteau / noyau va enrichir cette zone en éléments incompatibles et provoquer une baisse de température.
- Ce n'est que depuis 2 Ga que les panaches prennent naissance dans ce Manteau enrichi

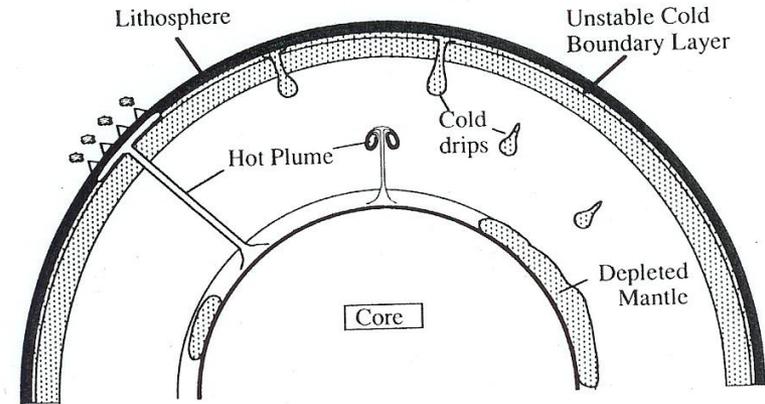
# Arguments géochimiques qui montrent une évolution dans le temps

## INTERPRETATION

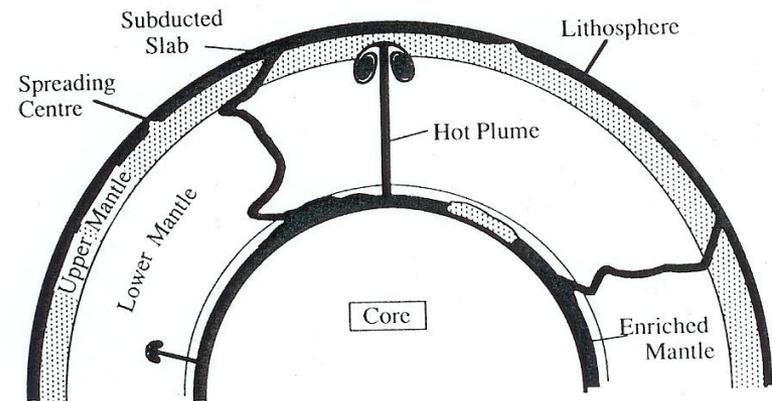
-Entre 4,5 et 4 Ga :  
convection vigoureuse ( $Ra \gg$ ) ;  
croûte basaltique épaisse  
( $>20\text{km}$ )  $\rightarrow$  pas de subduction

- Début de la subduction  
vers 4 - 3,8 Ga ; subduction peu  
profonde (plate)

- A partir de 2,5 Ga :  
subduction profonde.



PRE-ARCHAEAN 4.0 - 4.5 Ga



POST - ARCHAEAN 0 - 2.0 Ga

I – Caractéristiques des panaches mantelliques

II – Conséquence d'une remontée mantellique

-Gravimétrie

-Volcanisme

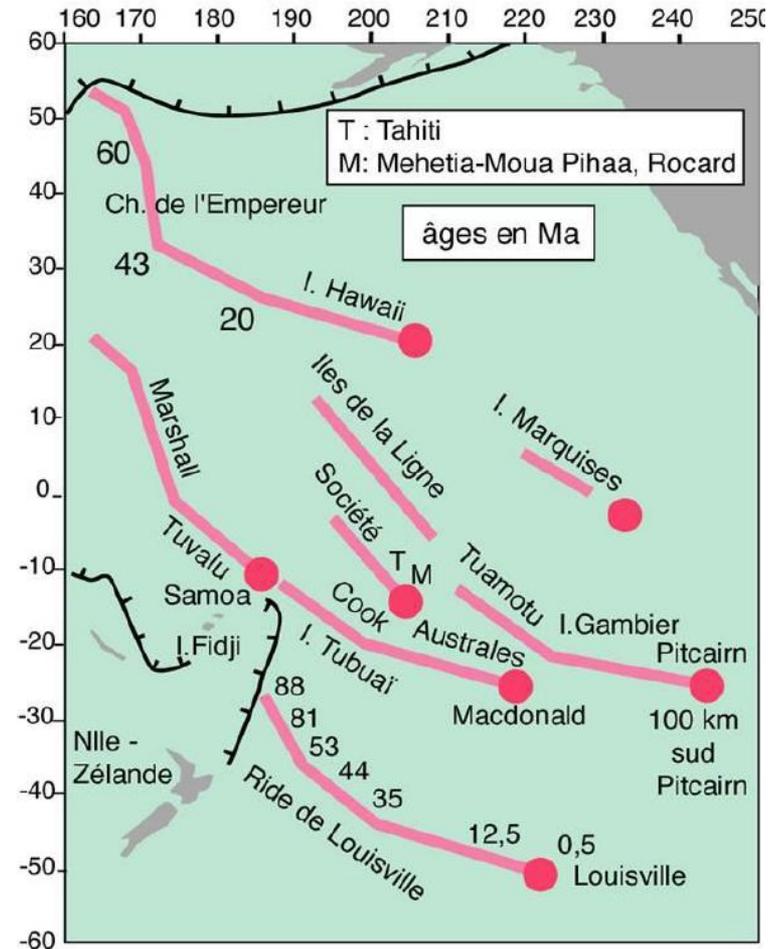
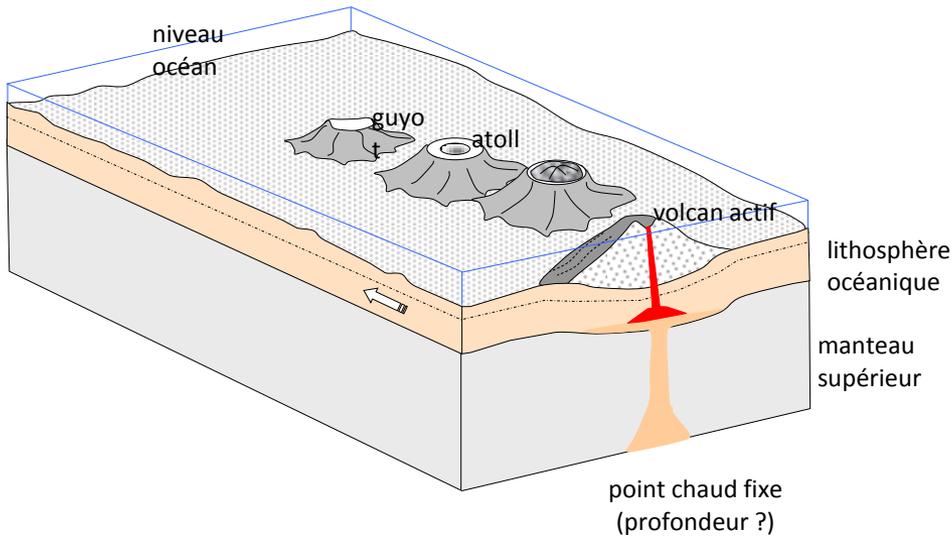
-Tectonique

III – Arguments géochimiques en faveur d'une origine profonde

**IV - Compléments**

# Les points chauds, un référentiel fixe ?

Peut on vraiment considérer les points chauds comme des référentiels fixes (pour mesurer direction et vitesses de déplacement de plaques lithosphériques par exemple) ?

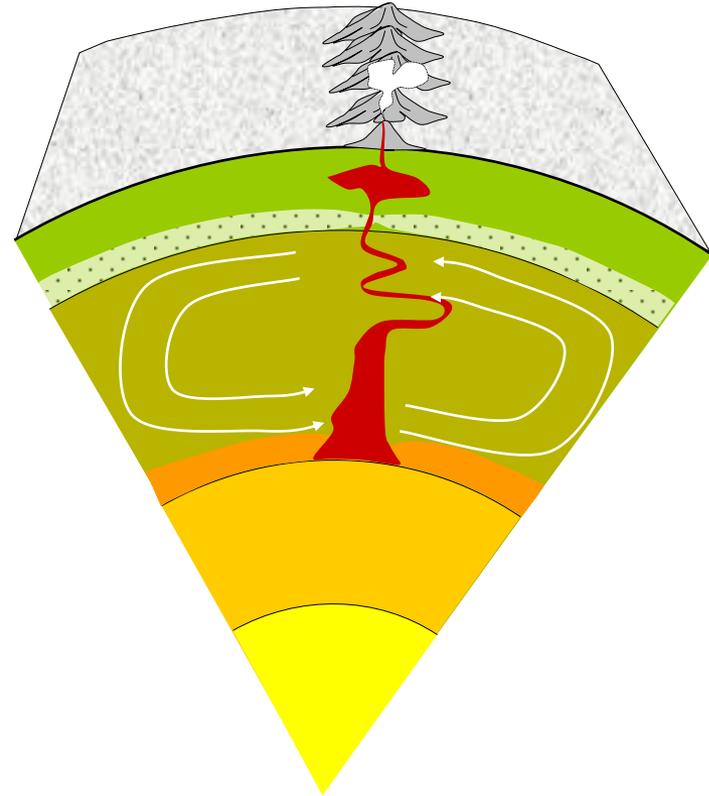


## Les points chauds, un référentiel fixe ?

Peut on vraiment considérer les points chauds comme des référentiels fixes (pour mesurer direction et vitesses de déplacement de plaques lithosphériques par exemple) ?

- Diverses études montrent des **déplacements relatifs** entre points chauds de l'ordre de 1,5 à 2 cm / an

-Durant les 2900 Km de son ascension, il est raisonnable de penser que la direction du panache puisse être **déviée** par la convection mantellique



modèle avec panache déstabilisé  
par la convection

→ Le référentiel des points chauds n'est valable que pour un intervalle de temps court (moins de 10 MA)

# Compléments

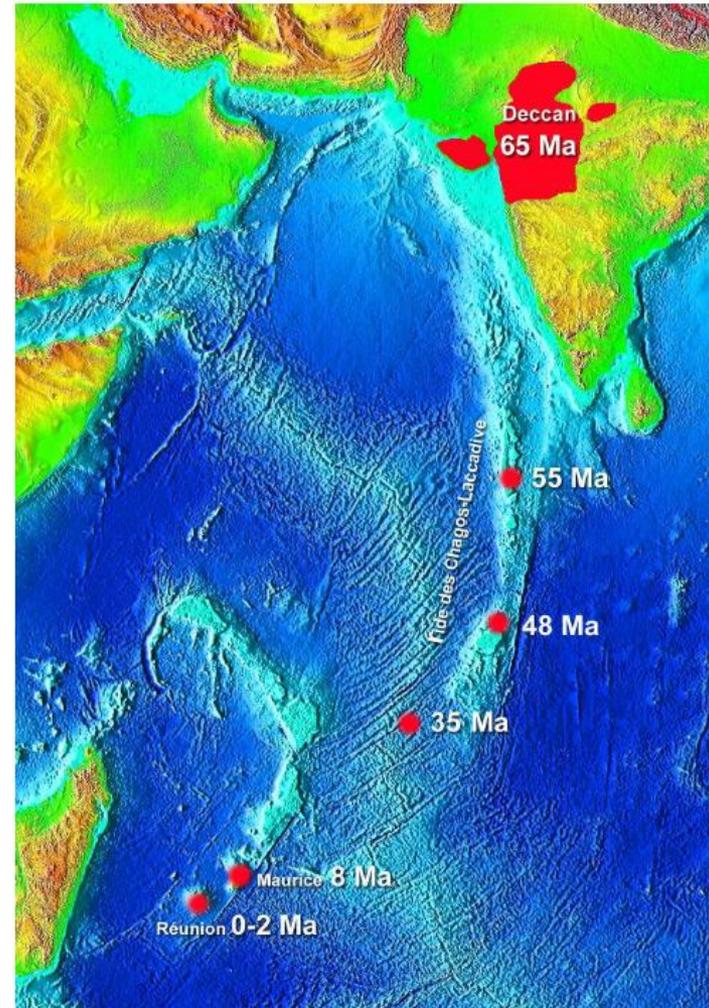
## La Réunion

L'île se trouve à l'extrémité sud-ouest d'un grand alignement volcanique qui recoupe l'ensemble de l'Océan Indien jusqu'à la province volcanique du Deccan en Inde (mise en place il y a 65 MA).

L'activité actuelle de La Réunion (0,01 km<sup>3</sup> de lave émise par an) est 100 à 1000 fois plus faible que celle qui a donné naissance aux trapps du Deccan dans le centre de l'Inde.

**Trajet du point chaud à l'origine de La Réunion depuis les trapps du Deccan en Inde.**

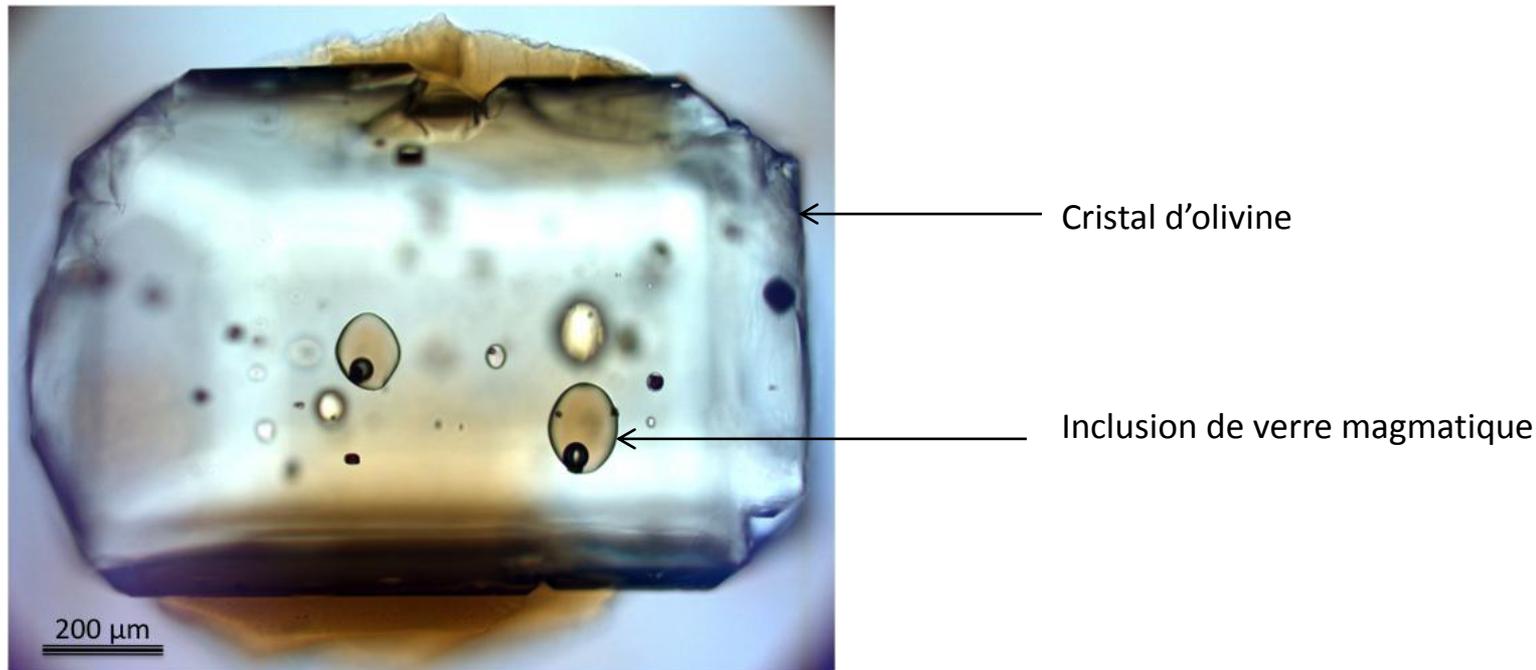
Les produits volcaniques de La Réunion recouvrent une grande diversité pétrologique : des basaltes, des hawaiiites, des mugéarites, des benmoréites, des trachytes à néphéline, des trachytes quartzifères et des comendites. Les basaltes sont produits par fusion partielle du manteau. Les autres sont les produits de la cristallisation fractionnée dans des chambres magmatiques sous l'édifice volcanique.



## Compléments

Hawaii (Nature, 25/08/2011)

En analysant la composition isotopique du strontium des verres magmatiques emprisonnés en inclusion dans des cristaux d'olivines contenus dans les laves du Mauna Loa, volcans d'Hawaii, un chercheur de Grenoble (IsTerre, CNRS-INSU, Univ Joseph Fourier) et ses collègues du Max Planck Institute for Chemistry (Germany), de l'Académie des sciences de Russie (Moscou, Novosibirsk) et du Lamont Doherty Earth Observatory (USA) montrent que les roches qui ont alimenté le panache du manteau, responsable des volcans d'Hawaii, sont héritées de roches océaniques contaminées par de l'eau de mer pas plus ancienne que 200 à 650 millions d'années. Ces travaux ont été publiés dans la revue Nature le 25 août 2011.



Source: **A young source for the Hawaiian plume**

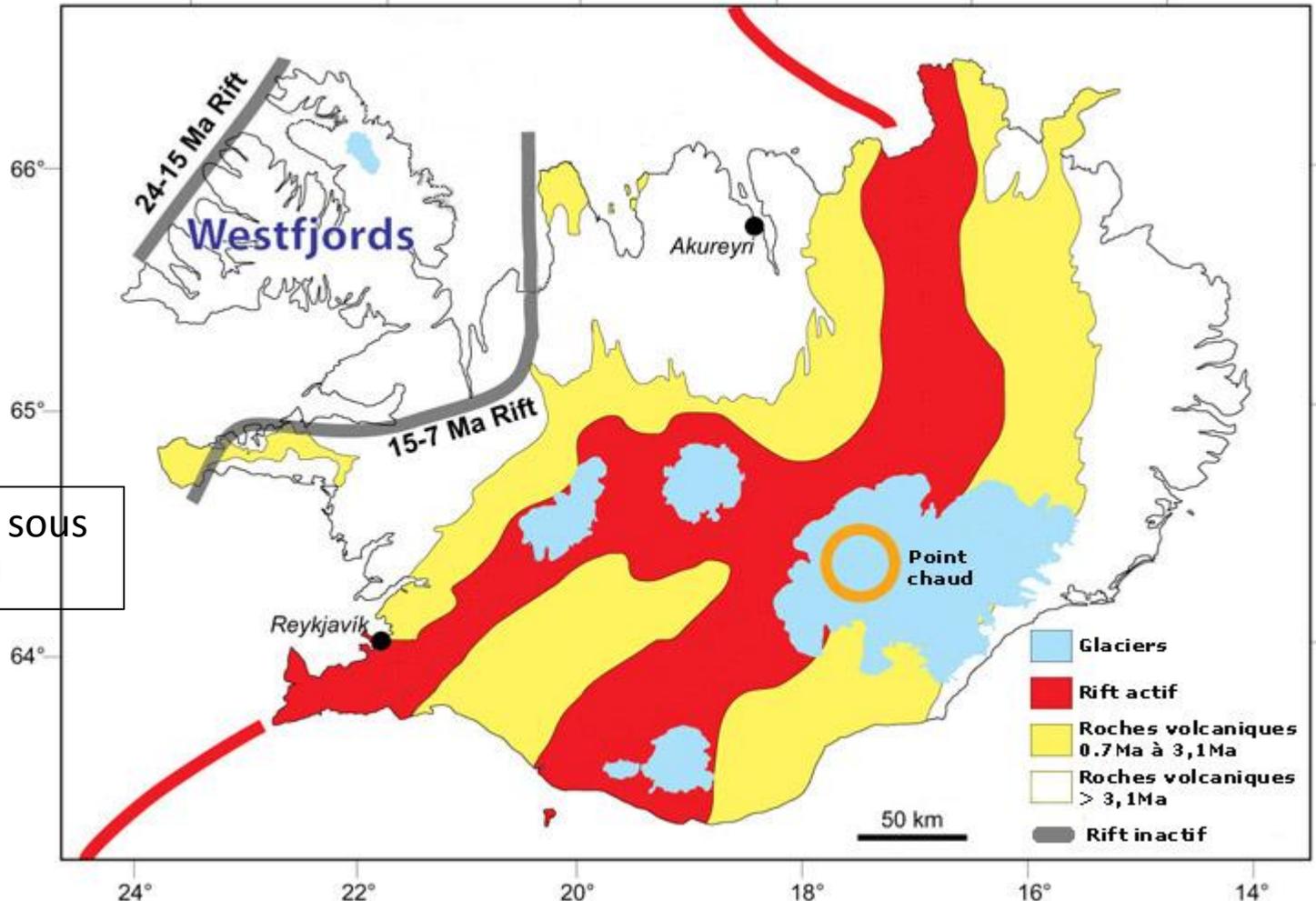
Alexander V. Sobolev<sup>1,2,3</sup>, Albrecht W. Hofmann<sup>2,4</sup>, Klaus Peter Jochum<sup>2</sup>, Dmitry V. Kuzmin<sup>2,5</sup> & Brigitte Stoll<sup>2</sup>

# Compléments

## Islande

**L'Islande = partie émergée d'un vaste plateau de 500 à 700 km de diamètre**

Cette émergence est la conséquence du taux élevé de production magmatique du panache ; → La vitesse verticale de croissance de la pile volcanique > vitesse d'ouverture de la dorsale Atlantique (dorsale lente)



Epaisseur crustale sous l'Islande = 20 Km !

# Compléments

## Islande

**Forte production magmatique** (pourcentage de fusion partielle élevé) favorisée par :

- la température élevée du panache
- la faible profondeur de fusion partielle (épaisseur lithosphérique nulle à l'aplomb de la dorsale)
- le caractère hydraté du manteau du panache

→ La conséquence est donc la formation d'une croûte épaisse (20-40 km environ).

**D'après les données géophysiques (gravimétrie, sismique) et géochimiques** (rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  des basaltes récents de la zone axiale active):

-l'**axe du panache se situe actuellement dans une zone de 100 km de diamètre, au Sud Est de l'île, sous le glacier Vatnajökull.**

-Durant l'ouverture océanique, **la tête du panache se serait principalement « écoulee »** dans le sens Nord-Sud, en étant chenalisée le long de la dorsale Atlantique tandis que l'étalement Est-Ouest, - moins prononcé-, pourrait être la conséquence de l'éloignement des deux plaques lithosphériques Europe et Amérique, par un effet d'entraînement du panache à la base de ces plaques.



# Compléments

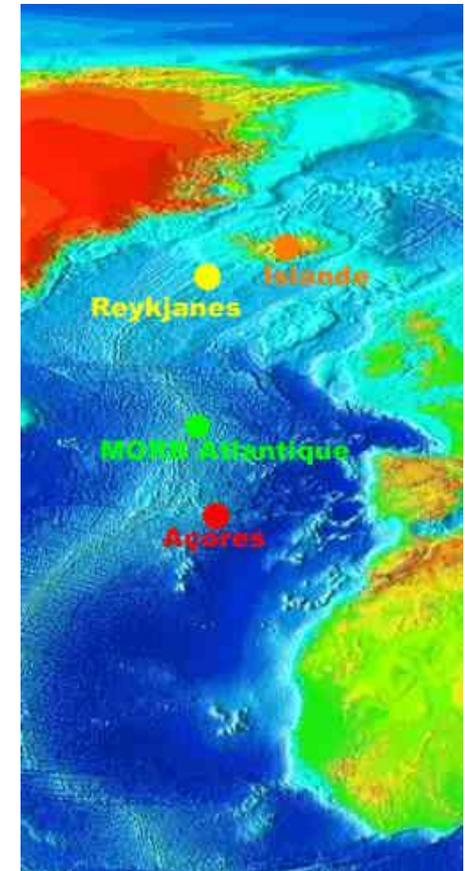
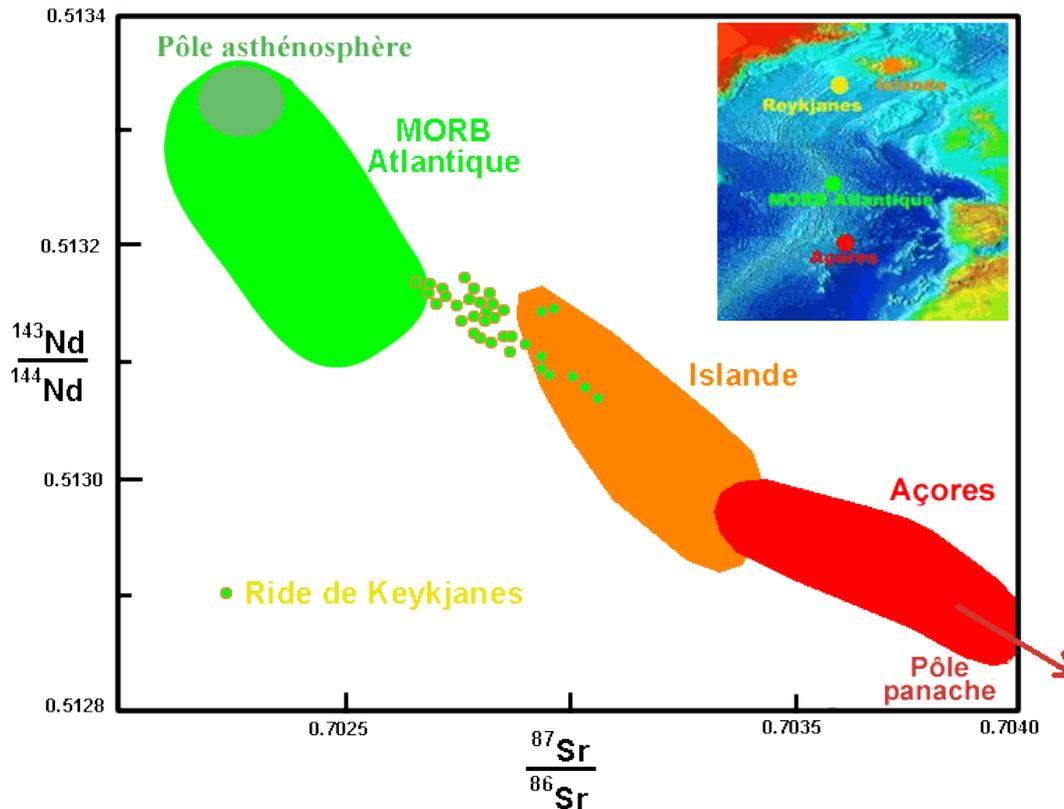
## Islande

L'étude géochimique montre pour les basaltes islandais une composition isotopique intermédiaire entre 2 pôles:

- MORB : Manteau source appauvri asthénosphérique (type dorsale)

- Açores: Manteau source plus primitif type point chaud

→ dilution du panache par l'asthénosphère (s'explique par la position de l'Islande à l'aplomb de la dorsale). Cette dilution augmente progressivement le long de la dorsale de Reykjanes, lorsqu'on s'éloigne du point chaud islandais.



# Compléments

## Les volcans sous glaciaires

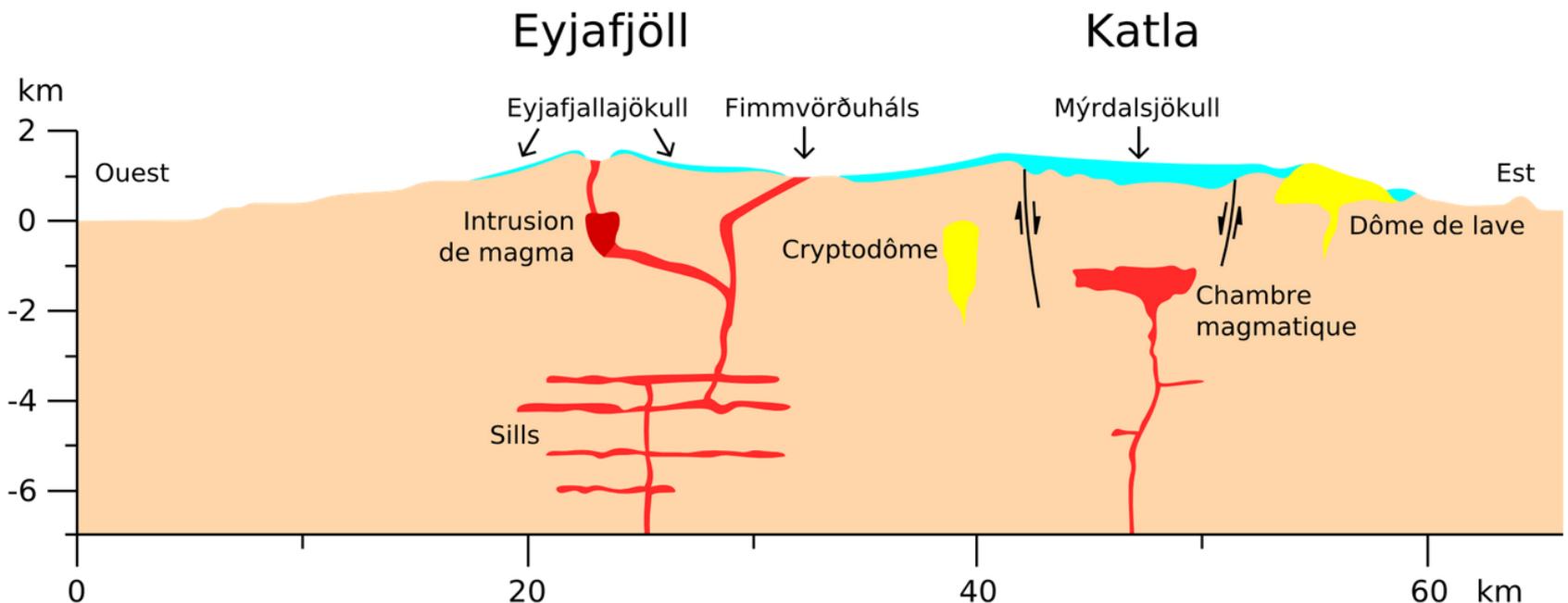


# Compléments

## Les volcans sous glaciaires

- Eruption → fonte du glacier → **débâcles importantes de lahars (cendres + eau)**, appelées jökulhlaup.

- Rencontre entre **l'eau de fonte** (infiltrations) et le **magma** (ou la lave à la surface) → production de grandes quantités de vapeur d'eau (en profondeur, cette vaporisation provoque des **explosions**) : c'est un cas particulier de **phréatomagmatisme** (rencontre entre un magma ascendant chaud et un nappe phréatique). Ces explosions provoquent l'éjection de morceaux d'encaissant et de morceaux de lave refroidis.



# Compléments

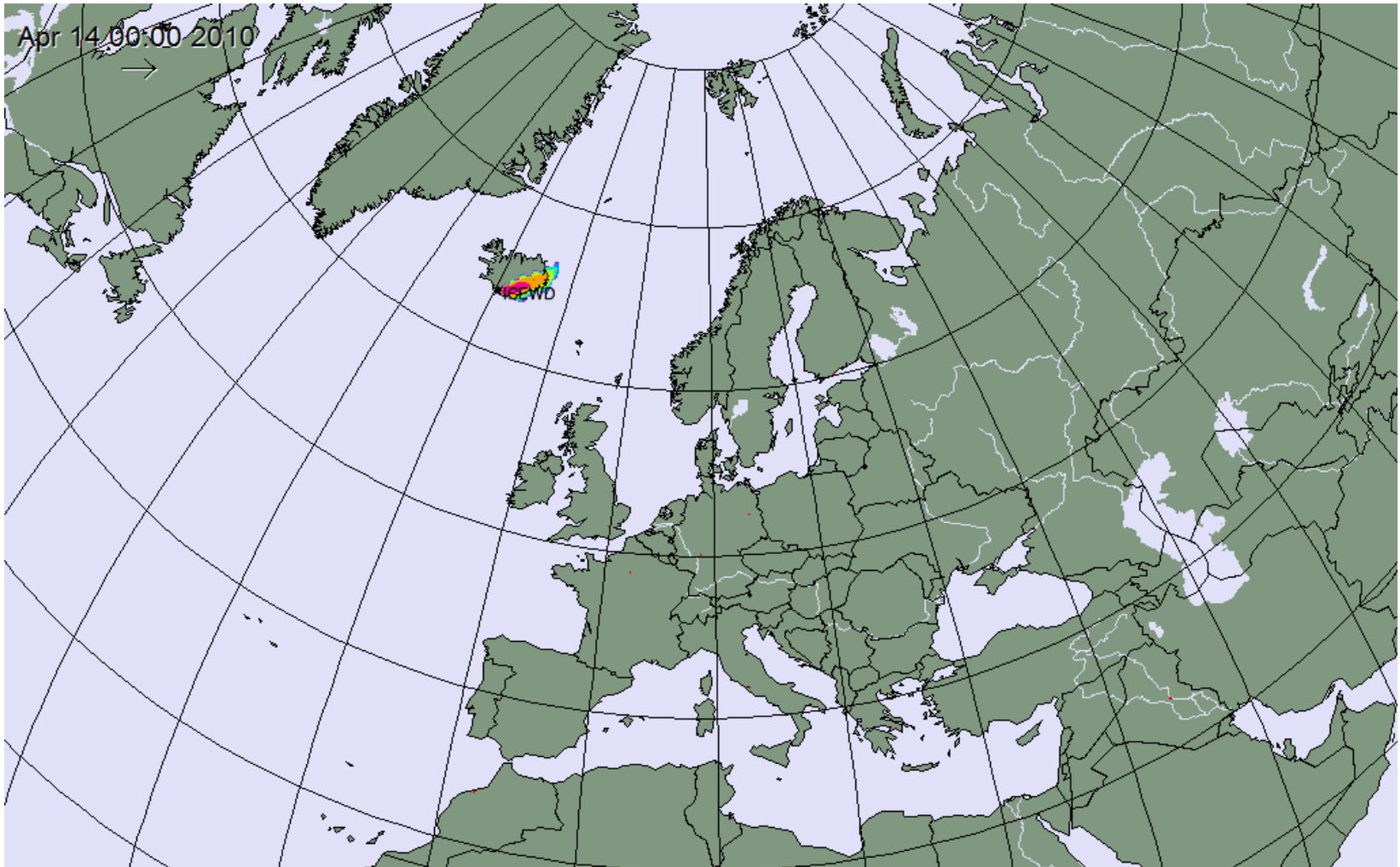
## Le volcan Eyjafjöll



# Compléments

## Le volcan Eyjafjöll

Conséquence inhabituelle de cette éruption: fermeture de l'espace aérien au-dessus d'une partie de l'Europe du fait de la présence de nuages de poussières, nuages poussés par les vents d'Ouest



# Compléments

## La fissure éruptive de Lakagigar

Située dans le **rift islandais**, à l'Ouest du glacier Vatnajökull.

Longueur = 25 km; 115 cônes de scories

Fissure qui s'est ouverte dans l'axe du rift, en se propageant du SW vers le NE du 8 juin à fin juillet 1783.

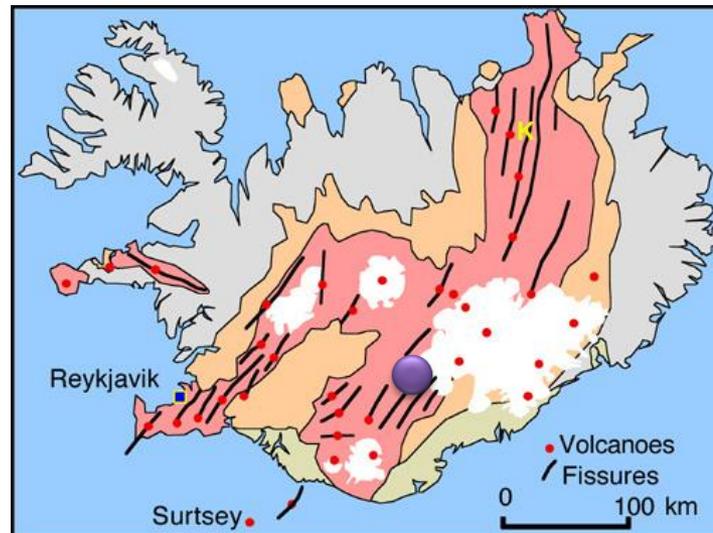
Elle est à l'origine de la **plus importante coulée de lave historique sur Terre** (12 km<sup>3</sup> ayant recouvert 570 km<sup>2</sup>)

Laves = **basaltes tholéitiques**

**Cendres volcaniques:** estimés à 0.3 km<sup>3</sup> (l'équivalent de l'éruption du St Helens de 1980)

**Gaz volcaniques:** SO<sub>2</sub> a été estimée de 1,3 à 6,3 .10<sup>7</sup> tonnes)

**Conséquences:** disparition de 25% de la population, 75% du cheptels islandais, abaissement de la **température** lors de l'hiver 1783-1784 de 4 à 5°C. Il s'agit de la première relation d'un effet climatique global provoqué par une éruption volcanique, effectuée par Benjamin Franklin.



# Compléments

## La fissure éruptive de Lakagigar



# Compléments

## La fissure éruptive de Lakagigar



## Compléments

### La fissure éruptive de Lakagigar



FIN