

Géologie Générale

Géotech 3

Stéphane SCHWARTZ
ISTerre - Polytech Grenoble

Géologie Générale
Géotech 3

→ Introduction

→ Partie I. Les matériaux de l'écorce terrestre

→ Partie II. Structure du globe

→ Partie III. Géodynamique interne

Géologie Générale
Géotech 3

→ Partie III. Géodynamique interne

→1. La tectonique des plaques

**→2. Tectonique des plaques et
ressources énergétiques**

Géologie Générale
Géotech 3

→ **Partie III. Géodynamique interne**

→ **1. La tectonique des plaques**

→ **1-1. La lithosphère : mosaïque de plaques**

→ **1-2. Moteur de la tectonique des plaques**

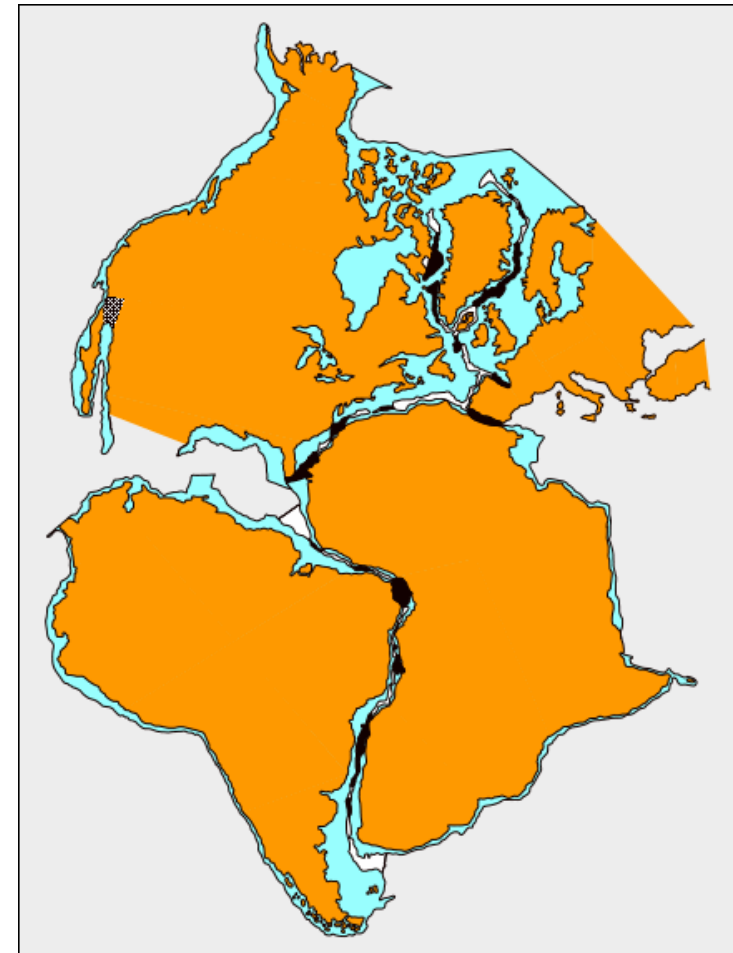
→ **1-3. Zones en divergence**

→ **1-4. Zones en convergence**



Wegener (1880-1930)

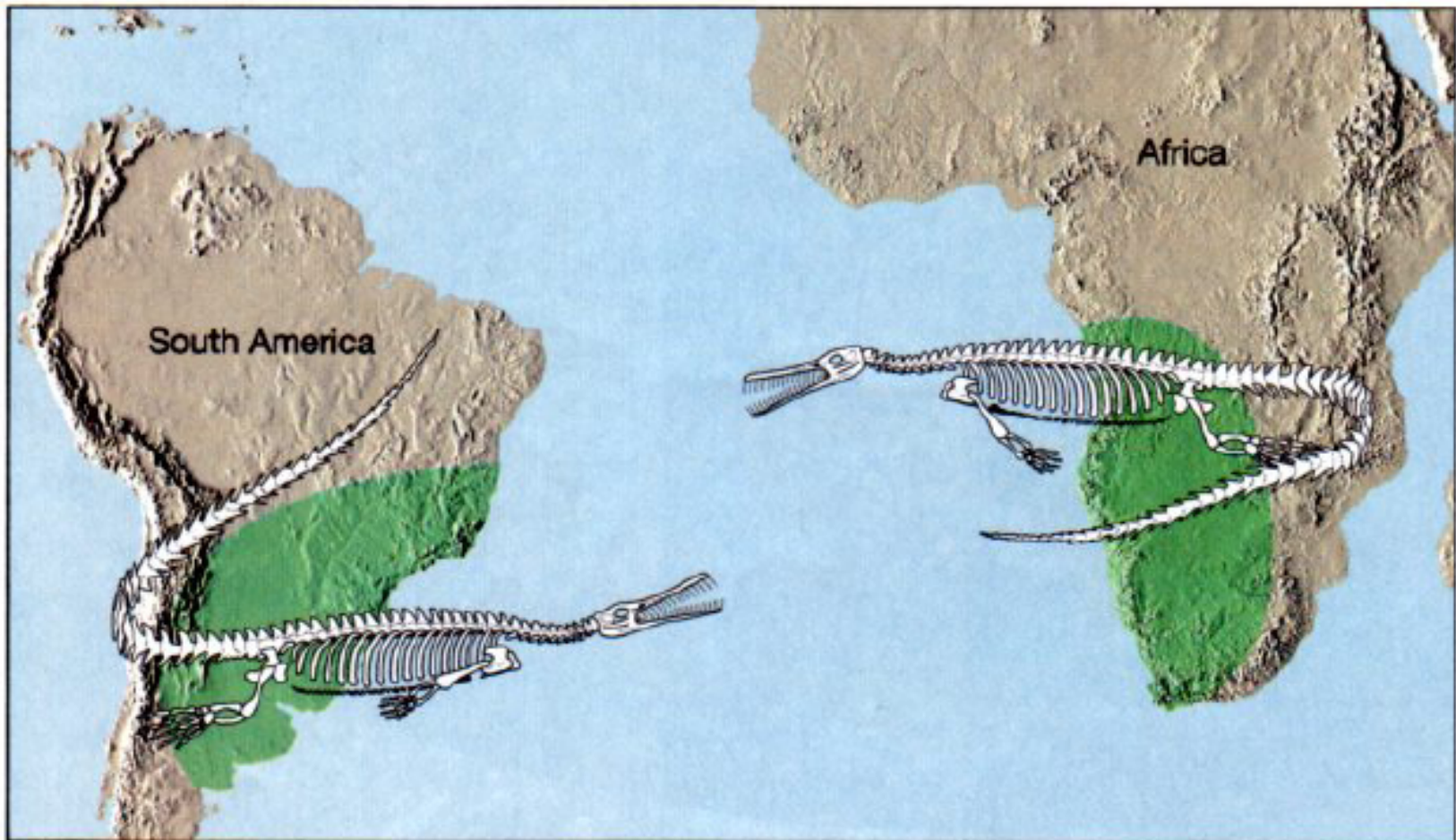
- première synthèse cohérente des observations basée sur la symétrie des limites des continents
- Théorie de la dérive des continents (1920)



Les observations de Wegener

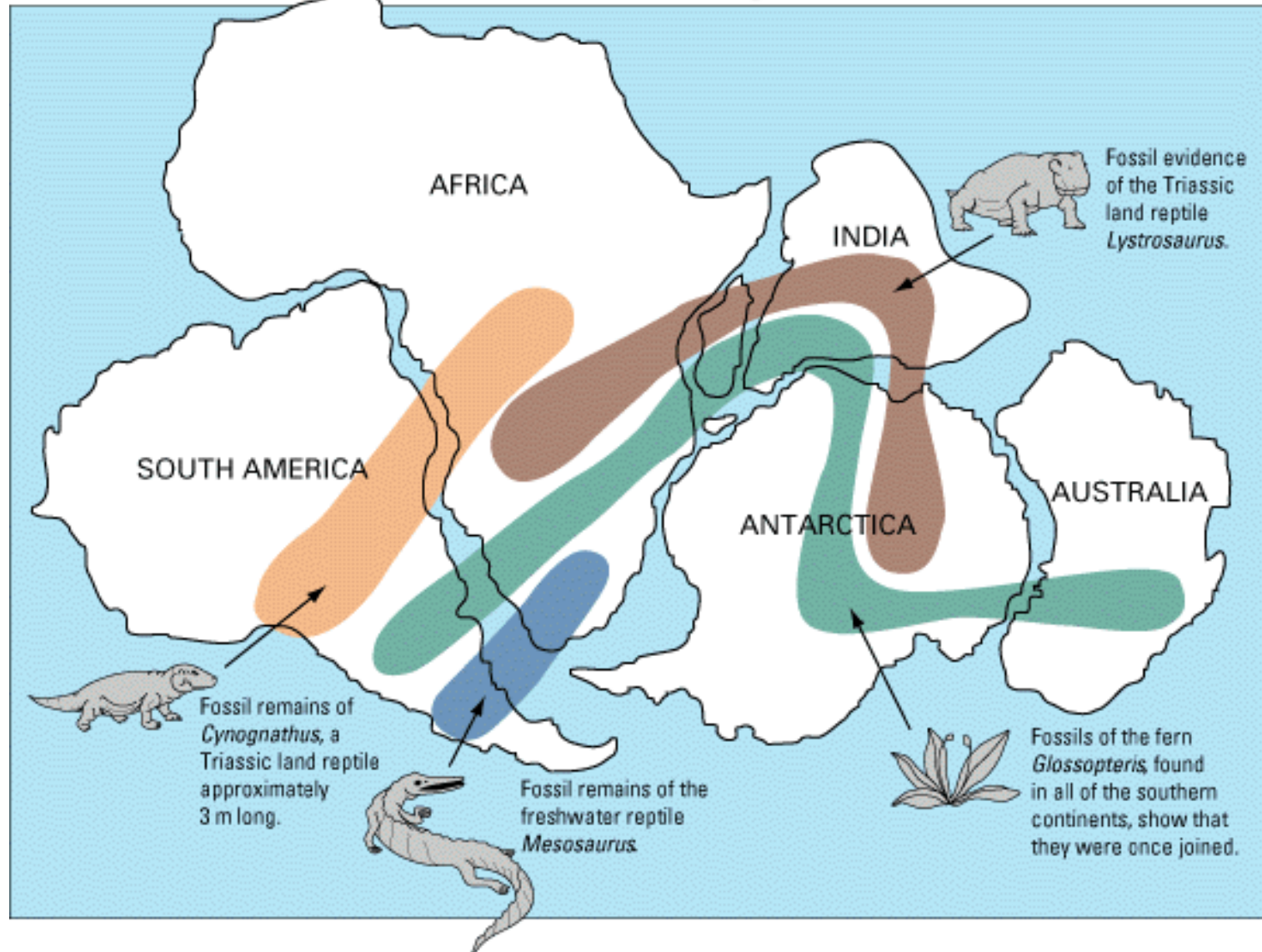
Distribution des espèces:

Ex: Mesosaurus, reptile d'eau douce du Permien (295-250Ma)



Les observations

Distribution des espèces



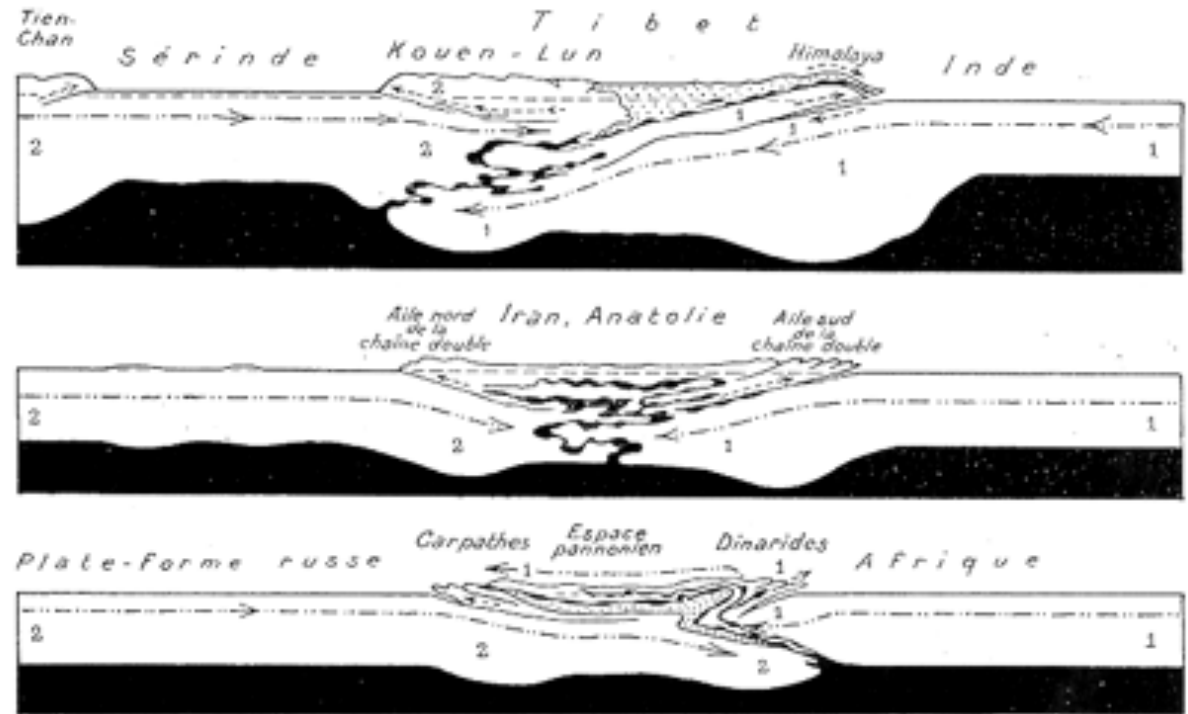
Les observations

Age de glace Paléozoïque (250Ma)



Les observations

Des mouvements latéraux, d'après le géologue suisse Argand



Continental collision is the best explanation for the formation of the Alps **(1916)**

→ Moteur de cette dérive ???

1^{er} élément de réponse

Arthur Holmes (1890-1965)



→ Géophysicien, date la Terre en utilisant la désintégration radioactive dès 1946

→ Son *Principles of Physical Geology* (1944), se termine avec un chapitre sur la dérive des continents.

→ Il propose que la chaleur radioactive produirait une convection dans le manteau et ferait bouger la surface.

Découverte du mécanisme Harry Hess (1906-1969)

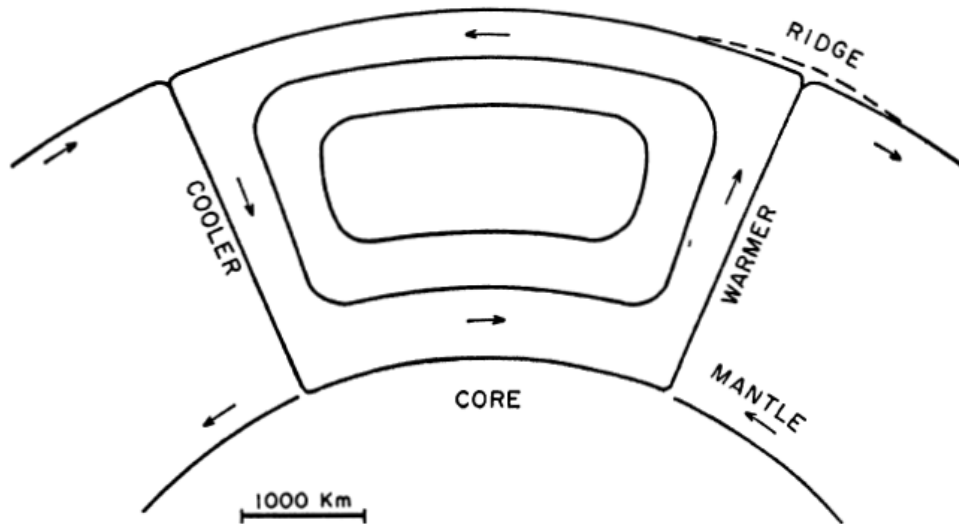
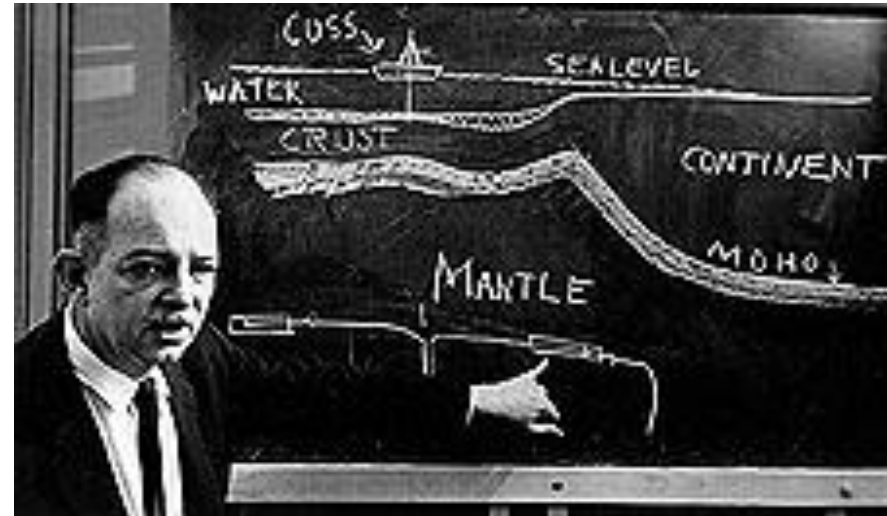
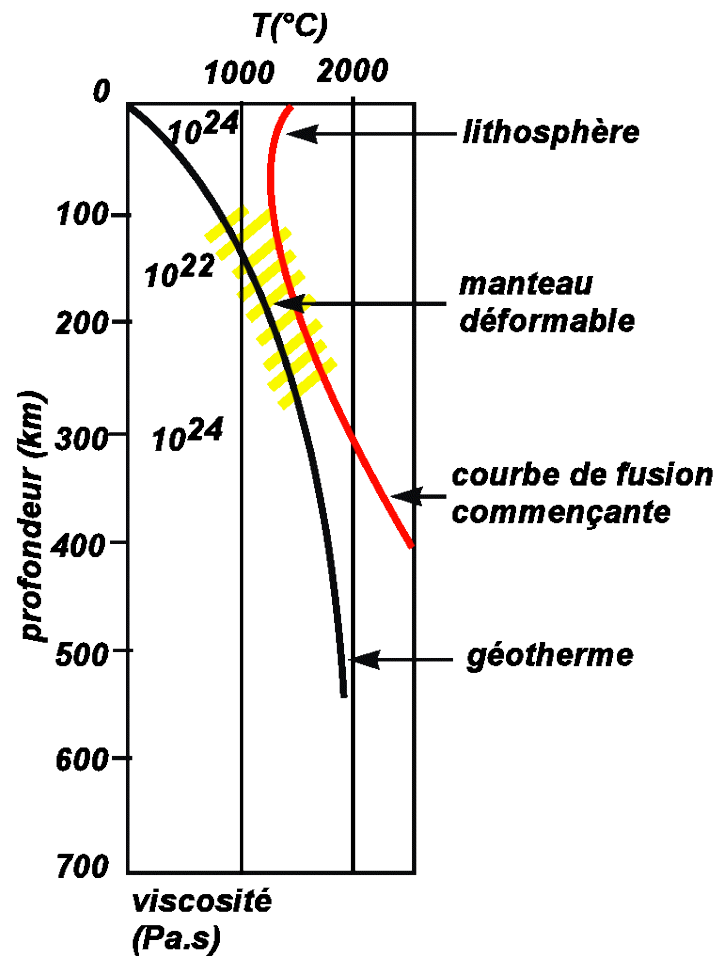
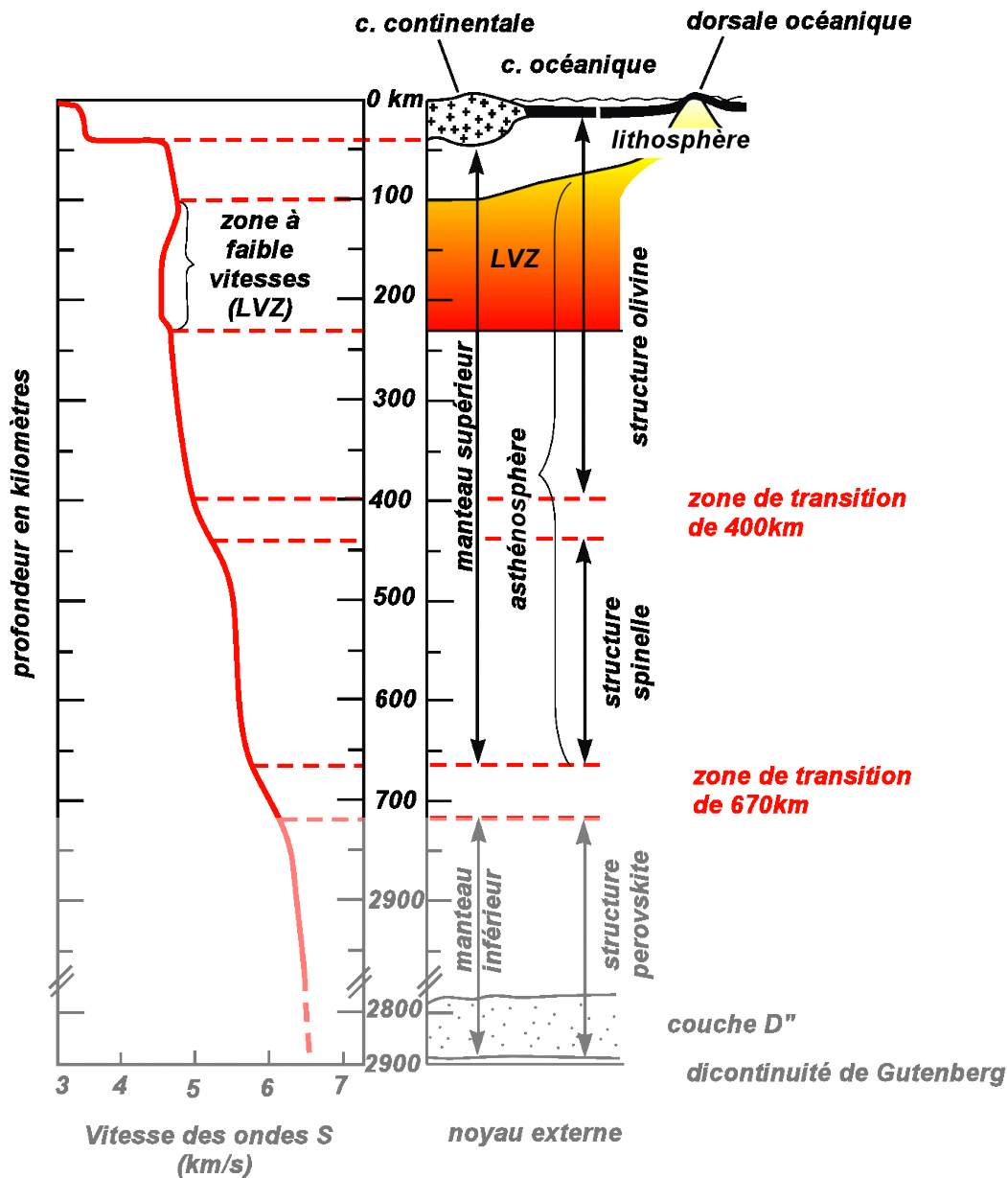


Figure 8. Possible geometry of a mantle convection cell

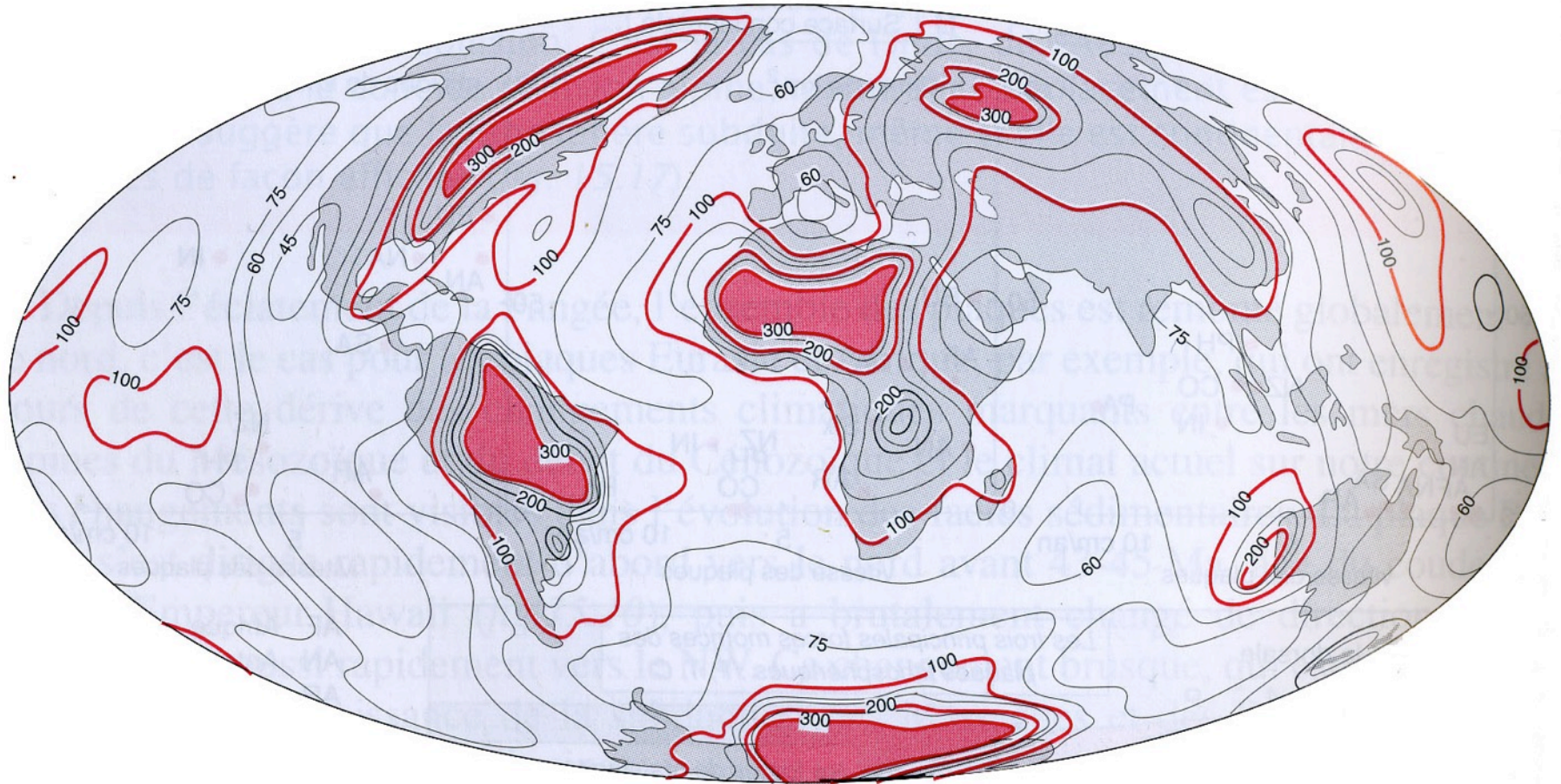


Hess démontre que le manteau convecte **(1962)**
→ phénomène susceptible de déplacer la lithospère...

Hess a résolu ainsi le plus gros problème de la théorie de Wegener, c'est la façon dont bougent les continents



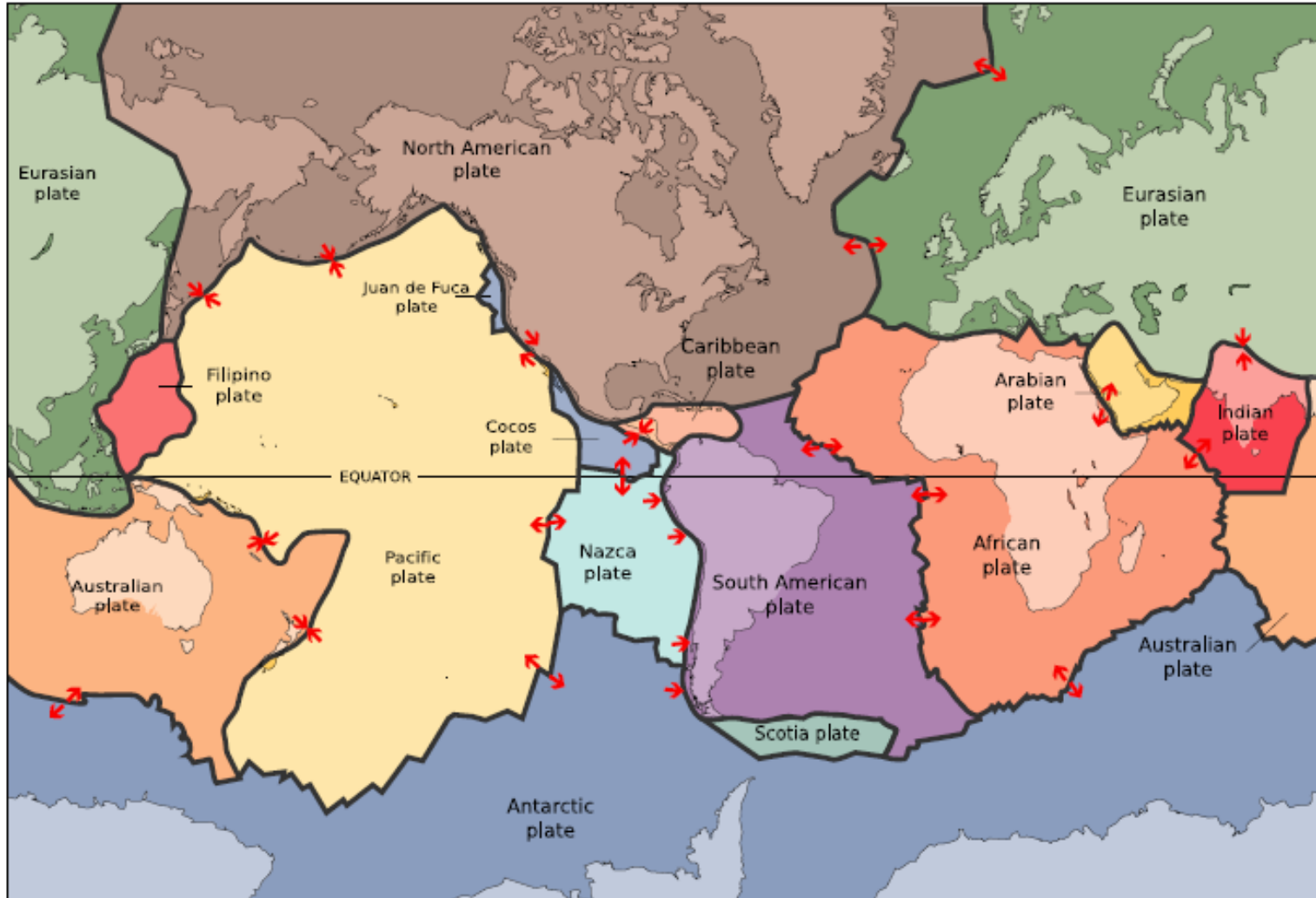
Définition d'une plaque lithosphérique



Carte mondiale de l'épaisseur de la lithosphère en km (Pomerol et al., 2011)

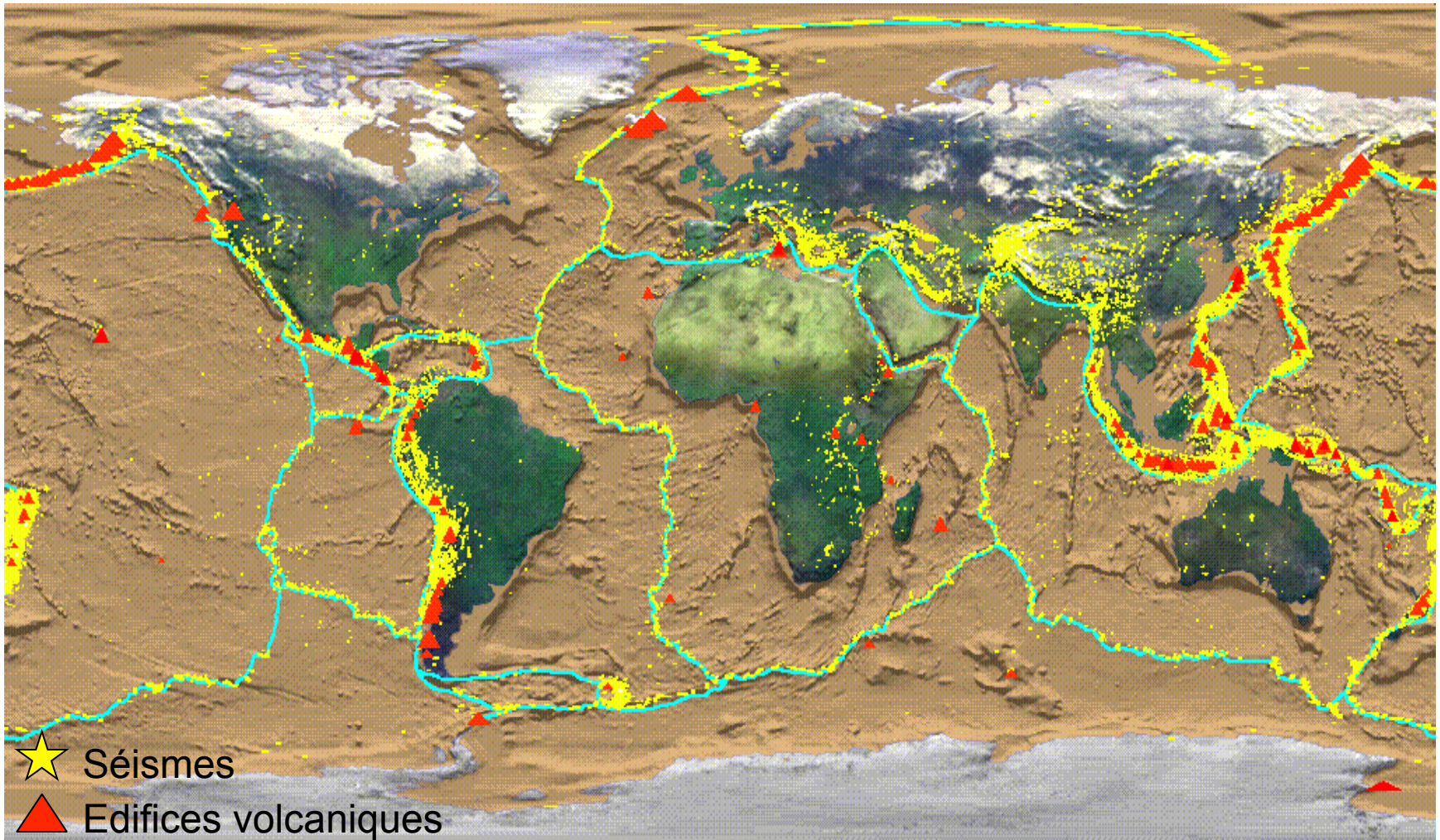
- Plaques lithosphériques continentales → épaisseurs importantes (>100km)
- Plaques lithosphériques océaniques → épaisseurs faibles (<80km)

La surface de la Terre est constituée d'une mosaïque de 12 plaques



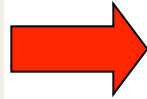
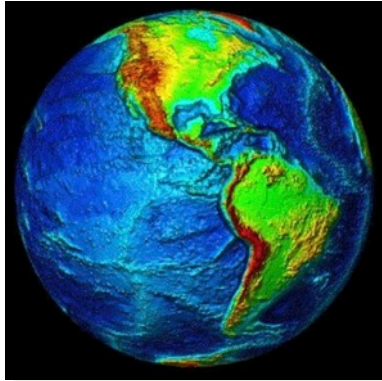
Tailles variables

- Croûte océanique et continentale
- Croûte océanique seule (Nazca)
- Croûte continentale (Plaque Arabique)



➡ Limites de plaque: instabilités thermiques et mécaniques...

Planète Terre

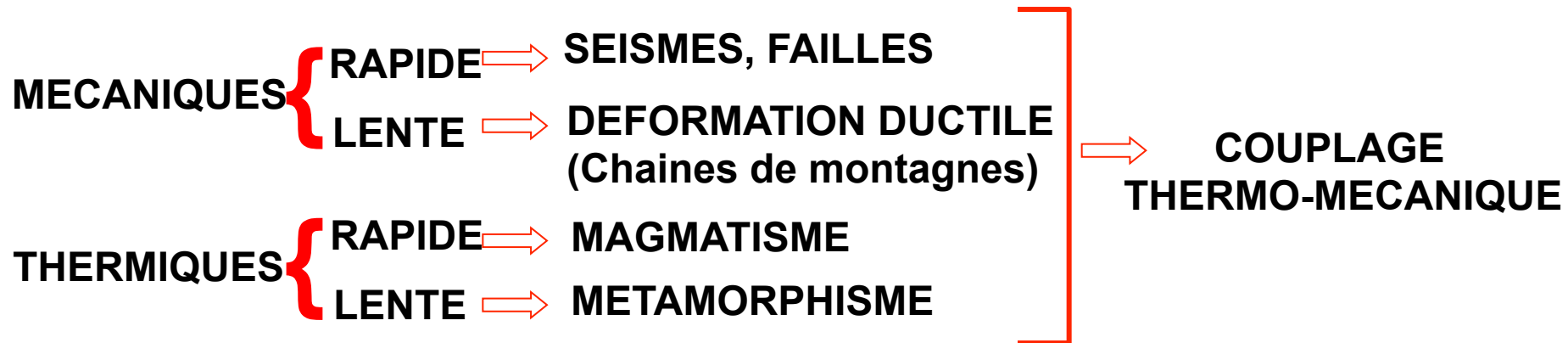


Limites de plaque

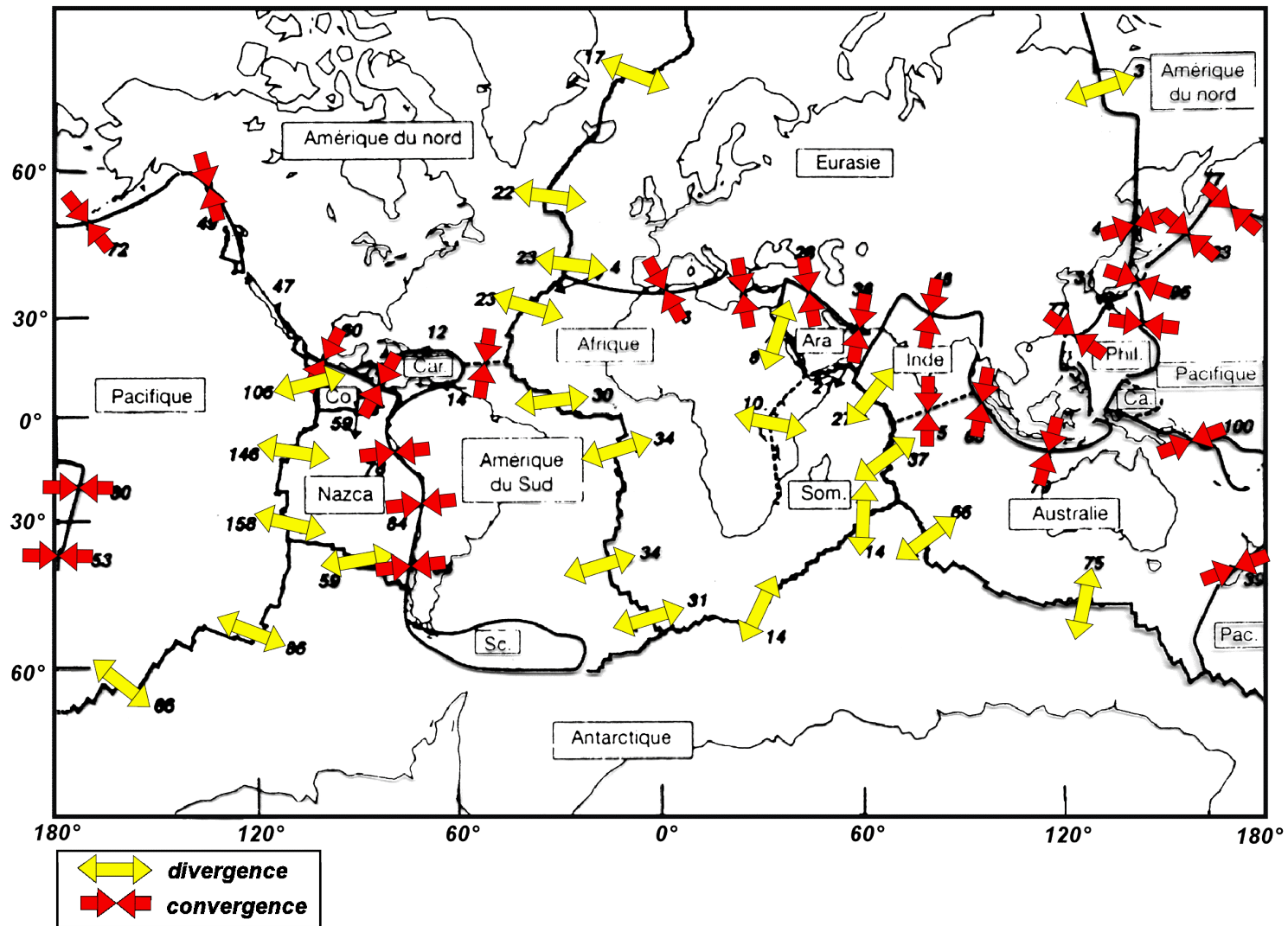


INSTABILITES MECANIKUES ET/OU THERMIQUES

Evacuation des perturbations :



géologie générale *Partie III - 1. La tectonique des plaques*



Géologie Générale
Géotech 3

→ **Partie II. Géodynamique interne**

→ **1. La tectonique des plaques**

→ **1-1. La lithosphère : mosaïque de plaques**

→ **1-2. Moteur de la tectonique des plaques**

→ **1-3. Zones en convergence**

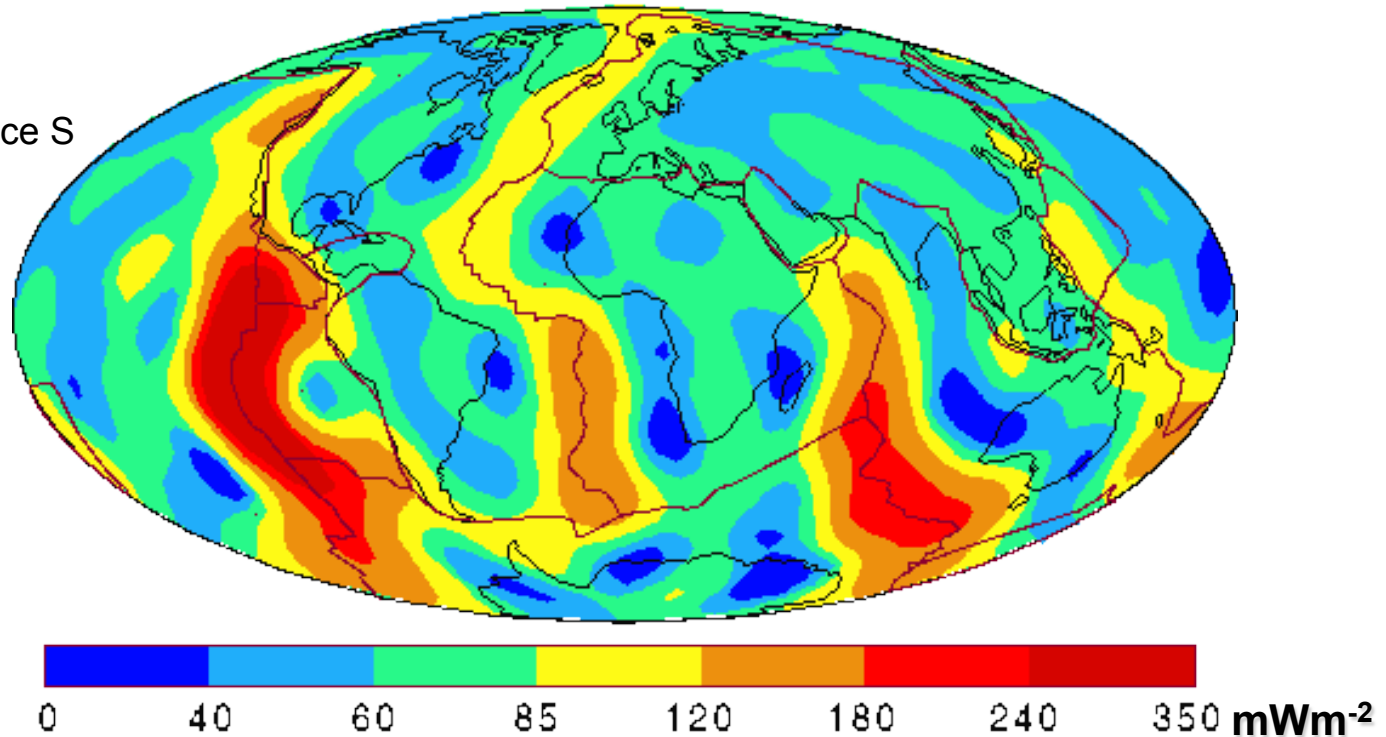
→ **1-4. Zones en divergence**

BILANS THERMIQUES

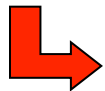
$$\vec{q} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\delta Q}{\delta t}$$

Quantité de chaleur δQ ,
passant à travers une surface S
pendant un temps donné δt

Flux de chaleur en surface

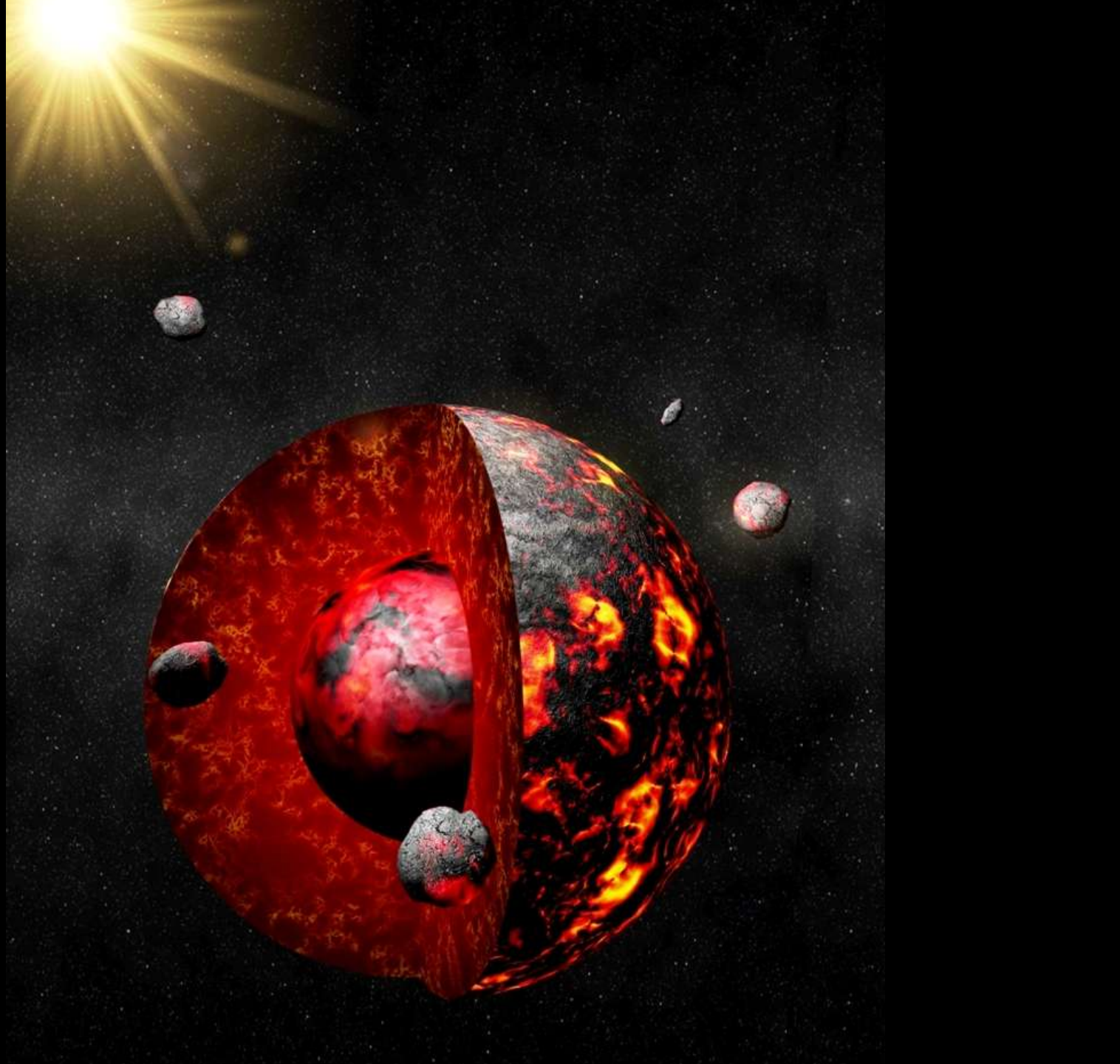


Géothermie des zones stables → existence d'un flux de chaleur (**40-85 mWm⁻²**)
→ Transfert de chaleur du noyau vers la surface (gradient de température)

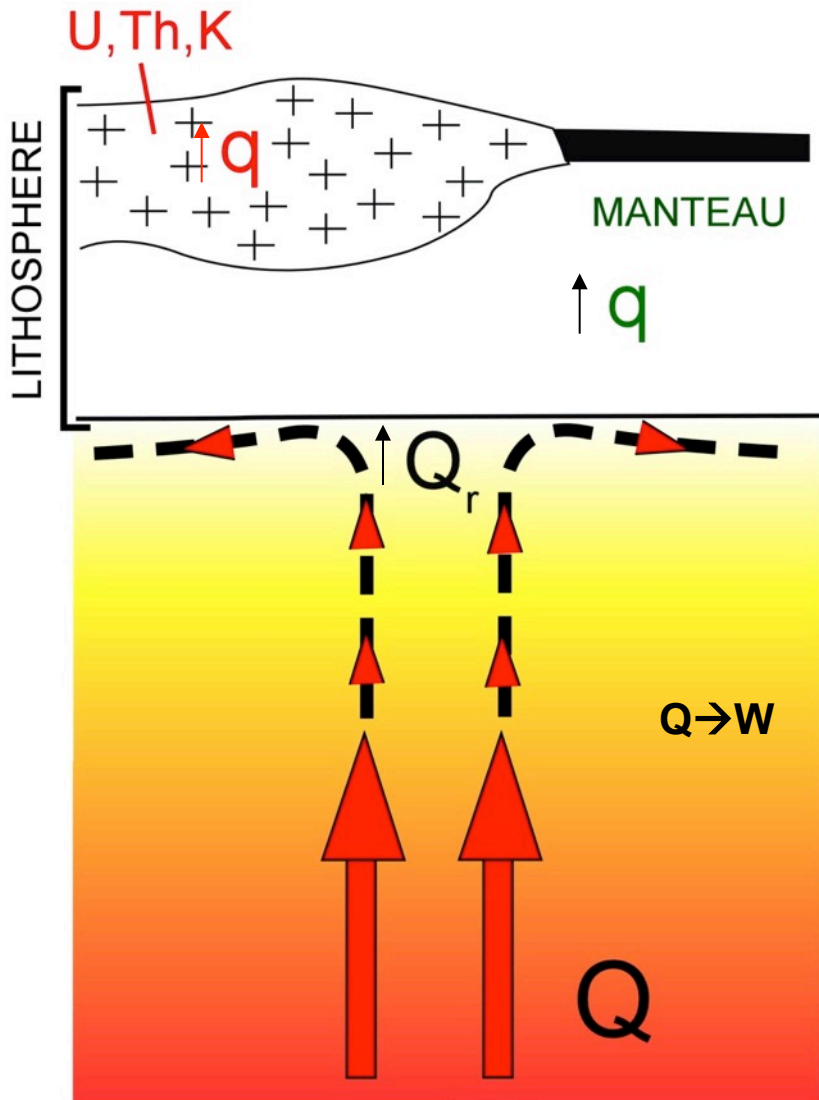


3 questions

- 1-Origine du flux de chaleur
- 2-Modes de transfert
- 3-Géométrie du gradient



1-Origine du flux observé en surface



CHALEUR par désintégration
des éléments radioactifs

CHALEUR DE FRICTION
+ chaleur radioactive

Q_r flux réduit en base de lithosphère
→ 1 partie de l'énergie est utilisée pour
la convection (W)

CHALEUR PRIMITIVE
CHALEUR DE CRISTALLISATION
CHALEUR DE FRICTION

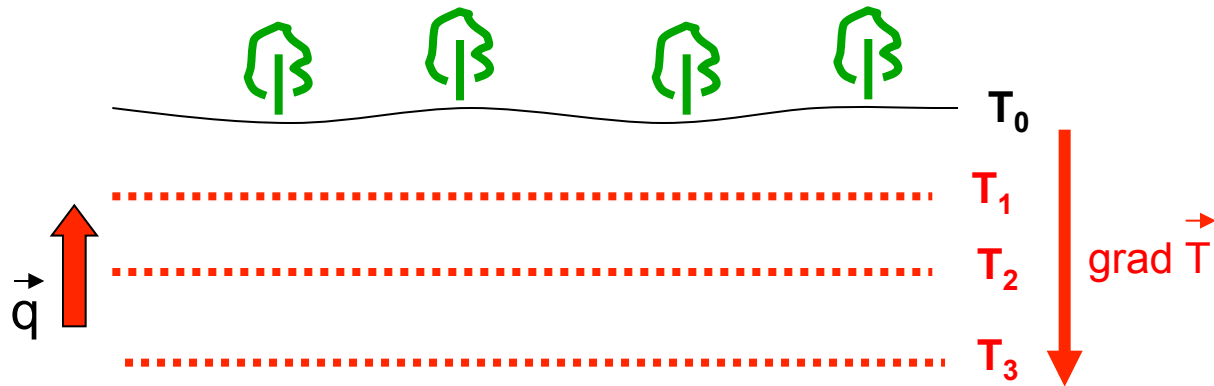
+
Chaleur radioactive

Flux et gradient

Flux :

$$\vec{q} = \frac{1}{S} \cdot \frac{\delta Q}{\delta t}$$

Quantité de chaleur δQ , passant à travers une surface S pendant un temps donné δt



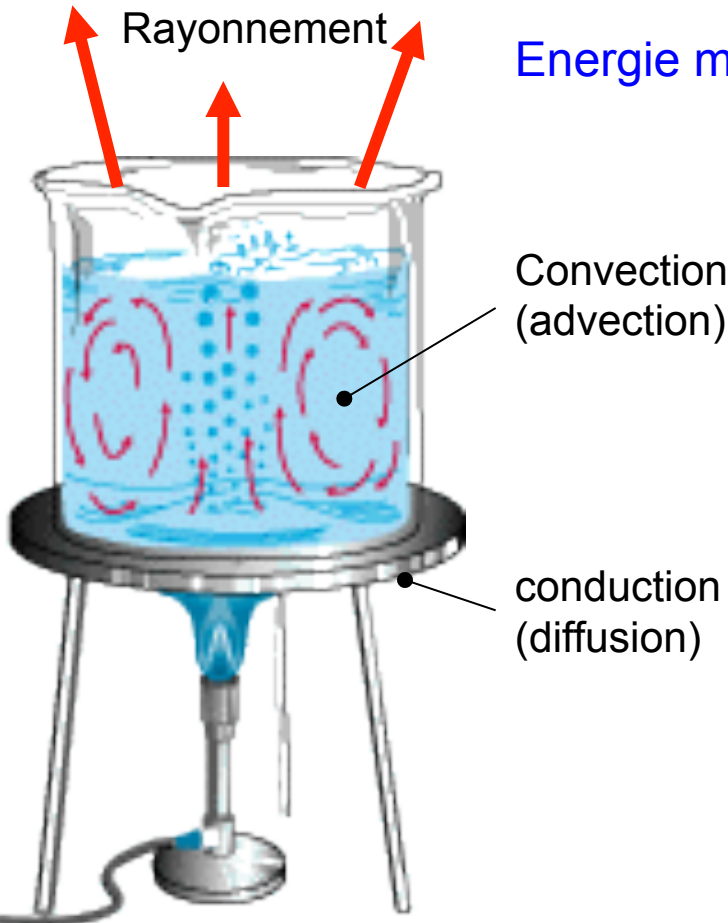
Gradient :

variation de température en fonction de la profondeur

Comment évacuer la chaleur ? → MODE DE TRANSFERT

2-Modes de transfert

Existence de **3 modes de transfert de la chaleur**



Comment passer de la conduction à la convection ?

→ **Nombre de Rayleigh**

permet également de définir la géométrie de la convection

Energie motrice

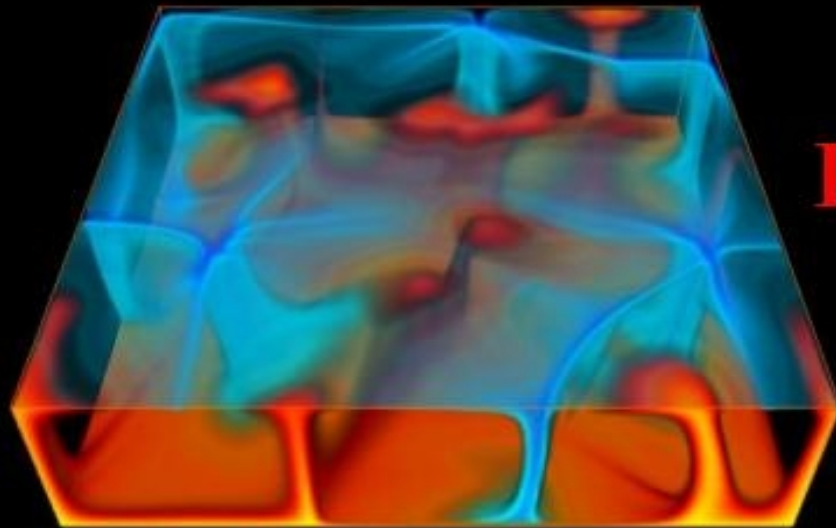
$$R_a = \frac{\alpha \cdot \Delta T \cdot g \cdot h^3}{\nu \cdot \kappa}$$

g constante de gravité
 α taux de dilatation thermique
 ΔT différence de température
h hauteur du volume considéré
 ν Viscosité
 κ Diffusivité

Dissipation énergie

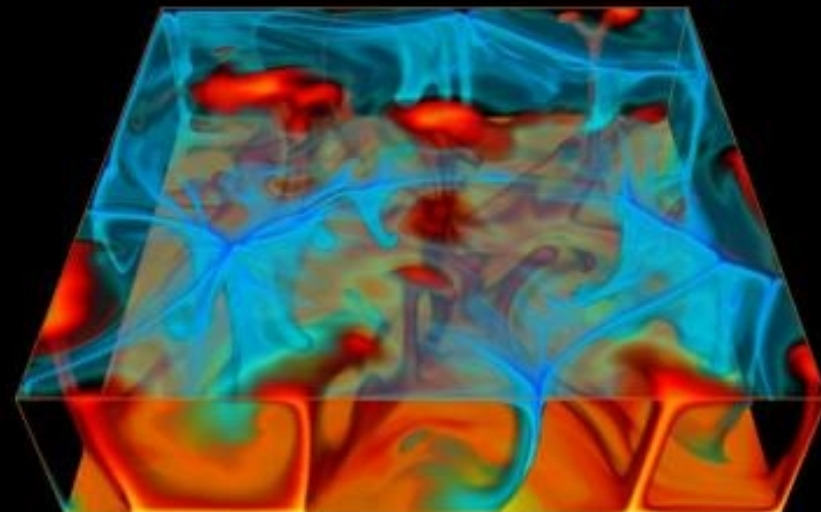
Rapport entre l'énergie motrice (convection) et les dissipations d'énergie visqueuses (ν) et par conduction de la chaleur (k)...

Pour $R_a > 2000$ → convection **plus efficace** que conduction



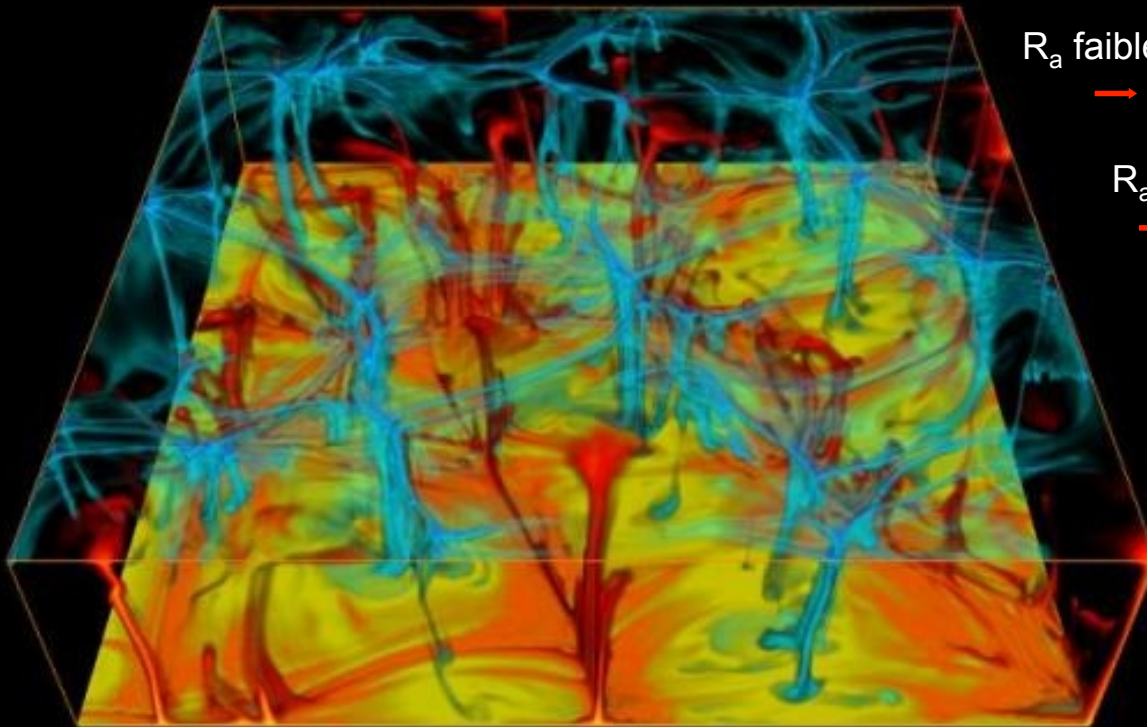
$$Ra = 10^6$$

Et plus Ra grand, plus la convection est « anarchique » !



$$Ra = 10^7$$

Plus R_a augmente plus la convection est diffuse et désorganisée



R_a faible ($2 \cdot 10^3 < R_a < 10^5$)
→ grands rouleaux stables

R_a moyen ($10^5 < R_a < 10^6$)
→ cellules + petites

R_a fort ($10^6 < R_a < 10^9$)
→ régime diffus changeant avec tps

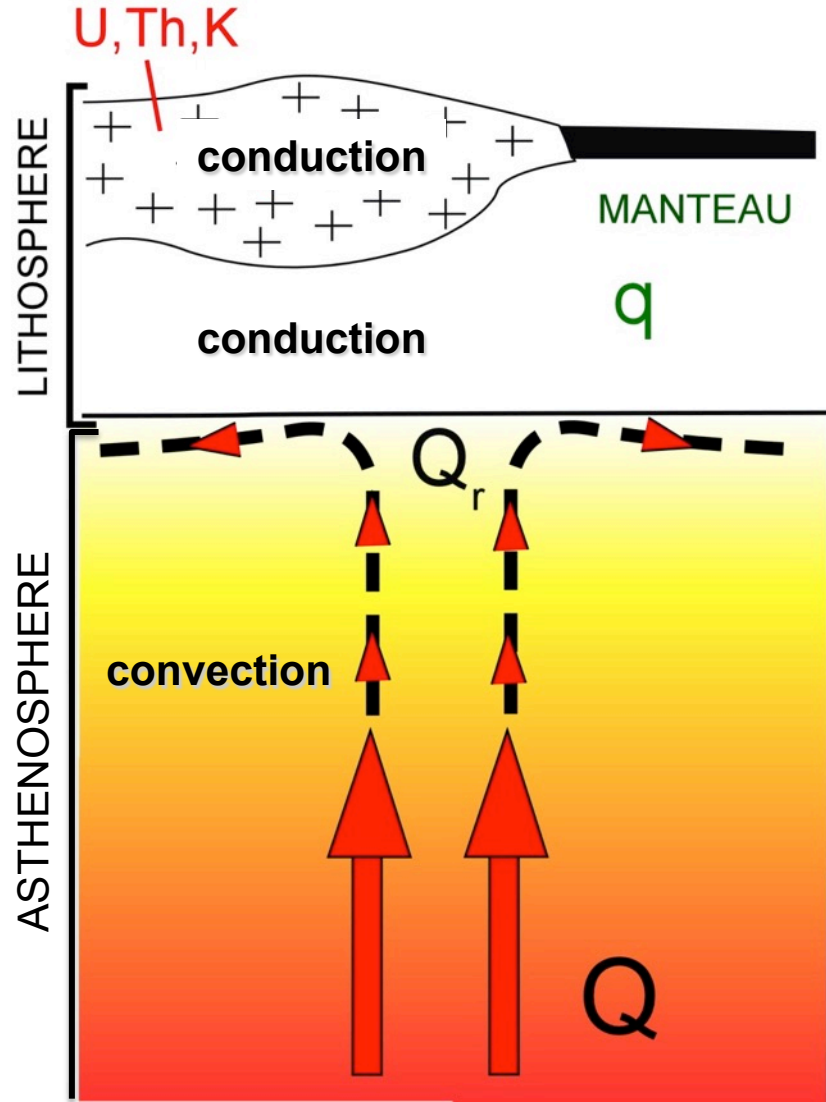
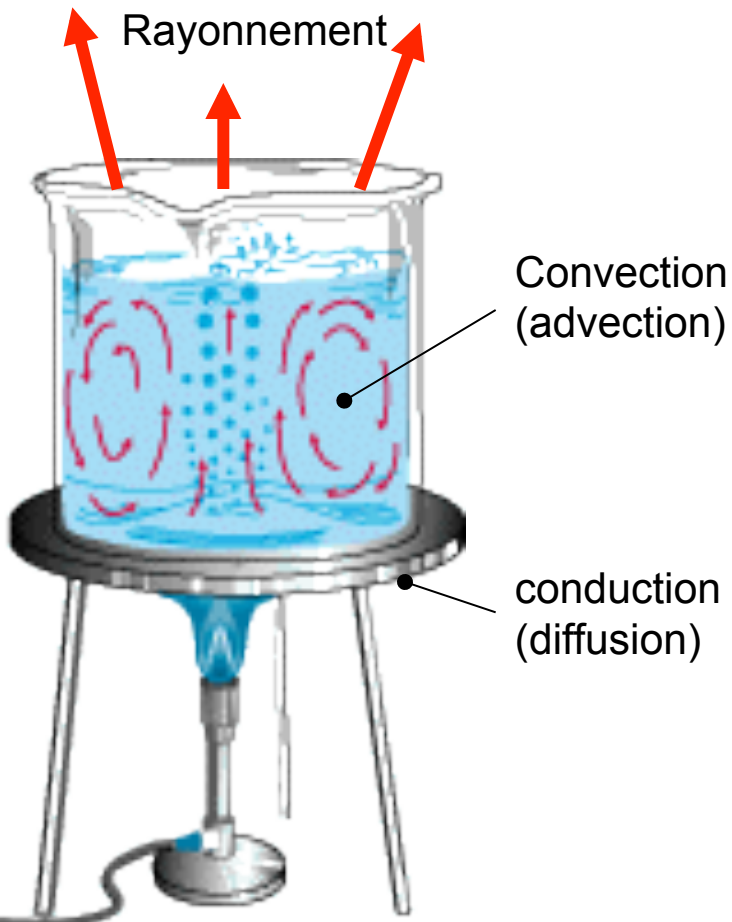
$R_a > 10^9$
→ régime turbulent

$R_a = 10^8$

Lithosphère $R_a < 2000$ → conduction
Asthénosphère $R_a > 10^5$ → convection

2-Modes de transfert

Existence de 3 modes de transfert de la chaleur



3-Géométrie du gradient

➡ Equation de conduction de la chaleur dans la **lithosphère**

Loi de Fourier (équation du transfert de chaleur)

$$\rho C_p \left[\vec{u} \cdot \frac{\delta T}{\delta z} + \frac{\delta T}{\delta t} \right] - K \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = A \quad (1)$$

CETTE EQUATION PREND EN COMPTE :

→ Variations de T avec la Profondeur
 δT par rapport à δz

→ Modifications de la température au cours du temps
 δT avec δt

→ Quantité de chaleur disponible
sources → A

→ Capacité de transfert de chaleur?
dépendant du milieu traversé

K : conductivité thermique

k : diffusivité thermique

(=10⁻⁶m²s⁻¹)

$$k = \frac{K}{\rho C_p}$$

→ Modifications de T quand le milieu se déplace
 δT par rapport à \vec{u} (vecteur déplacement)

Loi de Fourier (équation du transfert de chaleur)

$$\rho C_p \left[\vec{u} \cdot \frac{\delta T}{\delta z} + \frac{\delta T}{\delta t} \right] - K \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = A \quad (1)$$

Simplification ?

Zone stable (?)

$$\begin{aligned} \vec{u} &= 0, \text{ pas de mouvement} \\ \frac{\delta T}{\delta t} &= 0, T \text{ est constant} \\ &\text{(régime stationnaire)} \end{aligned}$$

(1) \leftrightarrow

$$\frac{\delta^2 T}{\delta z^2} = - \frac{A}{K}$$

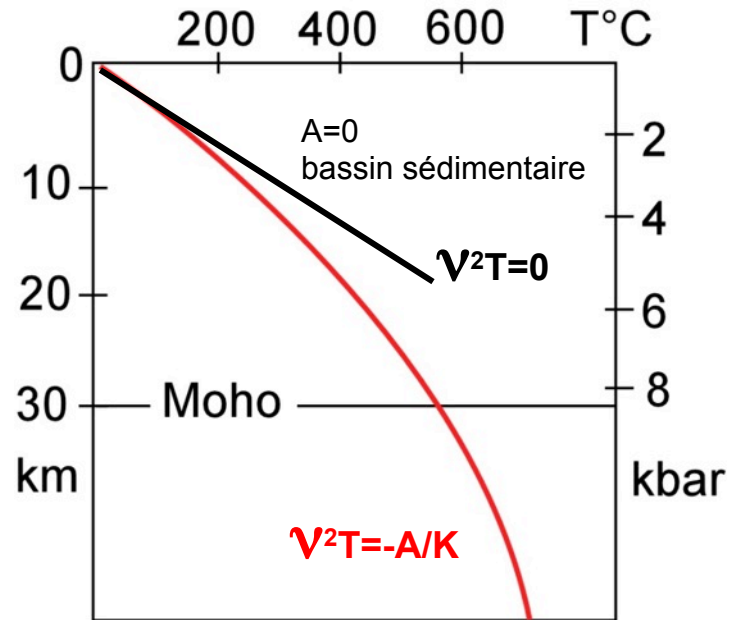
Toute solution sera de la forme :

$$T = - \frac{A_0}{2K} z^2 + \frac{q_0}{K} z + T_0$$

T_0 = température de surface
 q_0 = flux de chaleur en surface

$T = az^2 + bz + c \rightarrow$ équation d'une **parabole**
donc pas de relation linéaire entre la
profondeur et la température !!

*Linéaire pour les 30 premiers km
gradient de 27-30°C/km*



\rightarrow Au niveau des limites de plaque le gradient sera fortement perturbé

Géologie Générale
Géotech 3

→ **Partie II. Géodynamique interne**

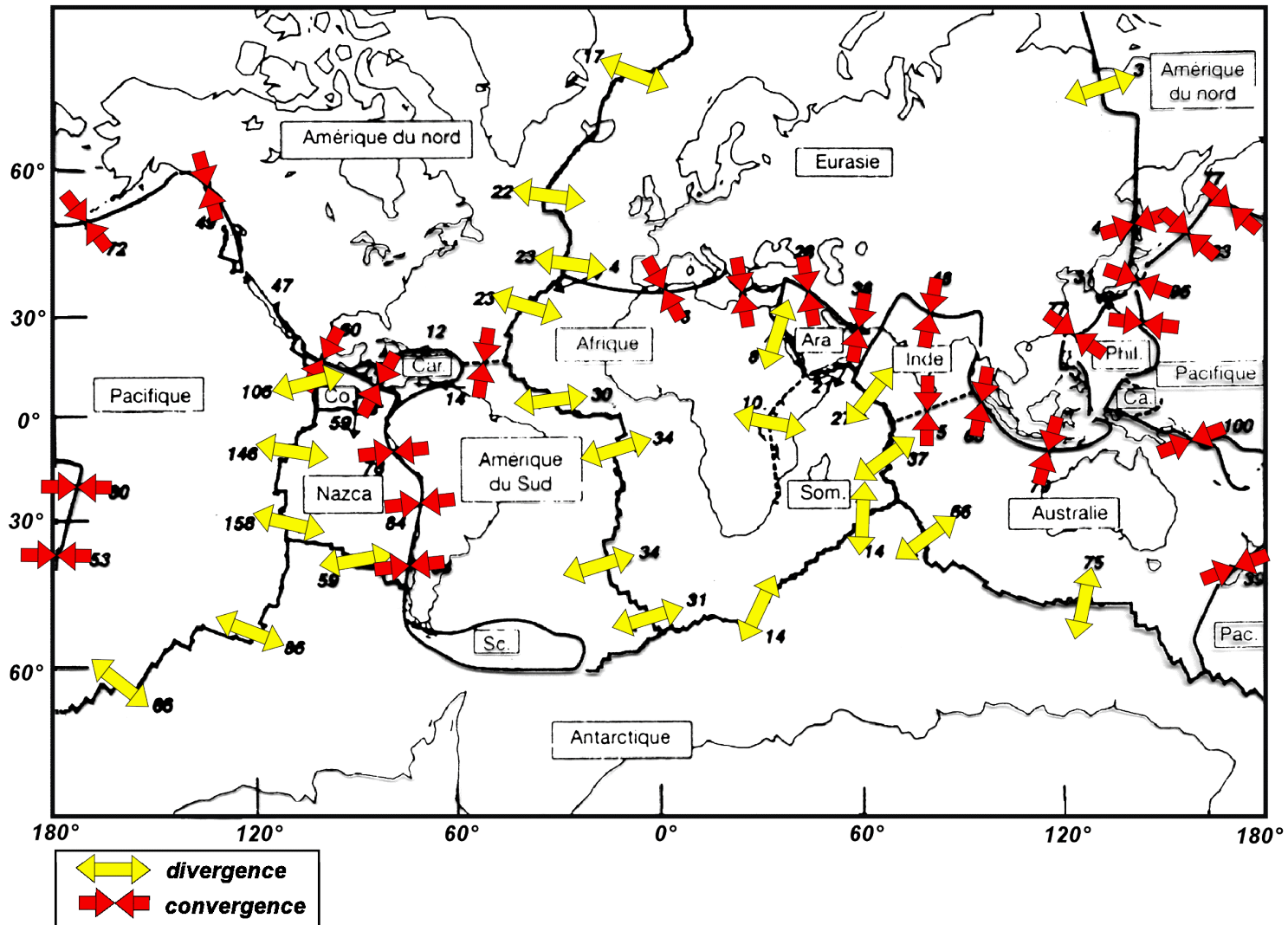
→ **1. La tectonique des plaques**

→ **1-1. La lithosphère : mosaïque de plaques**

→ **1-2. Moteur de la tectonique des plaques**

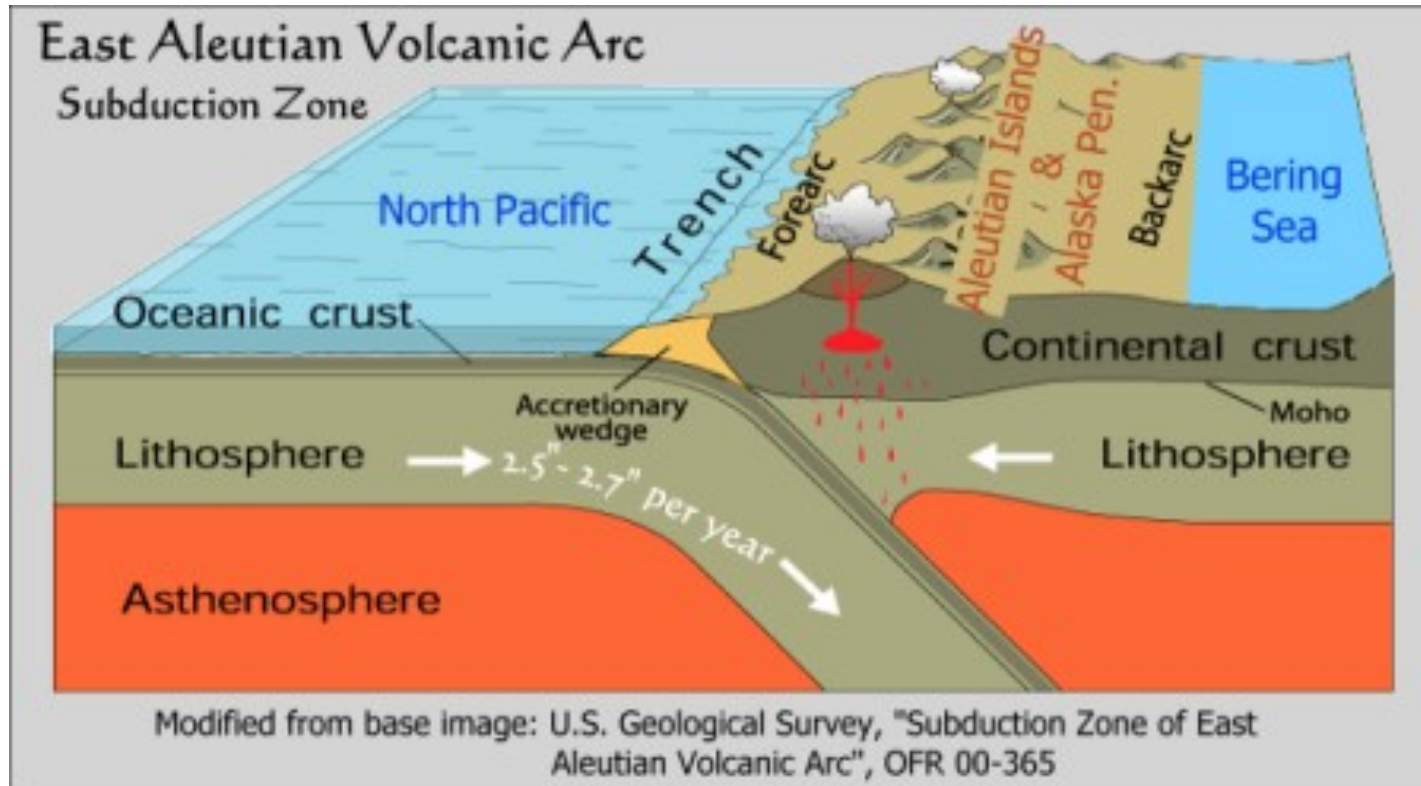
→ **1-3. Zones en convergence**

→ **1-4. Zones en divergence**

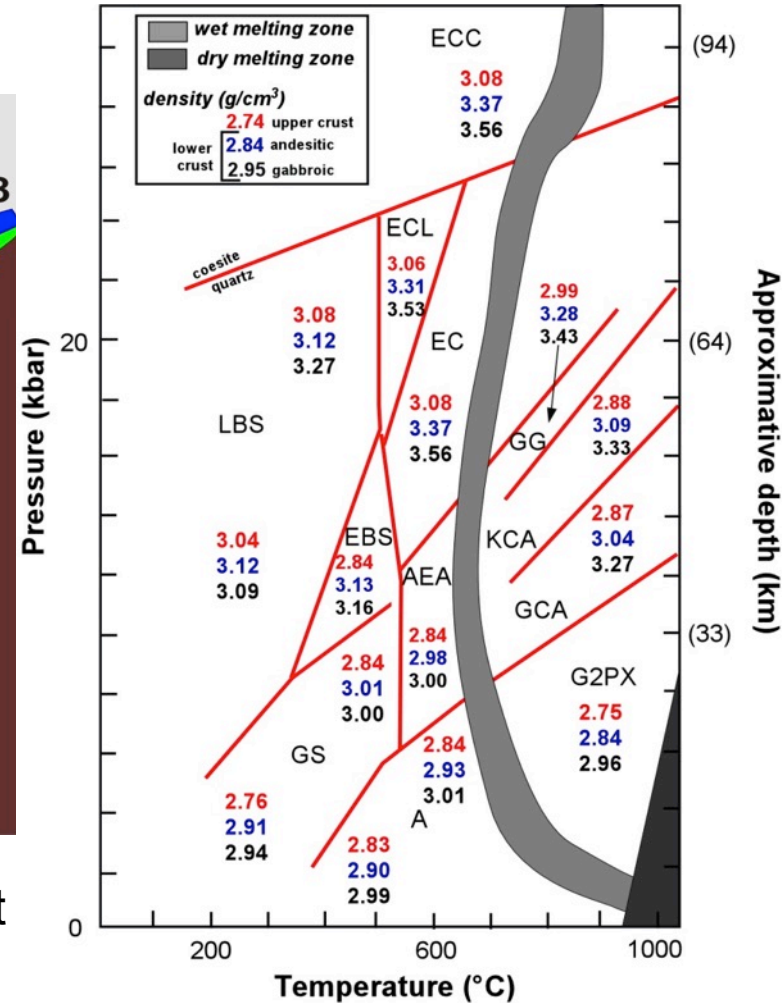
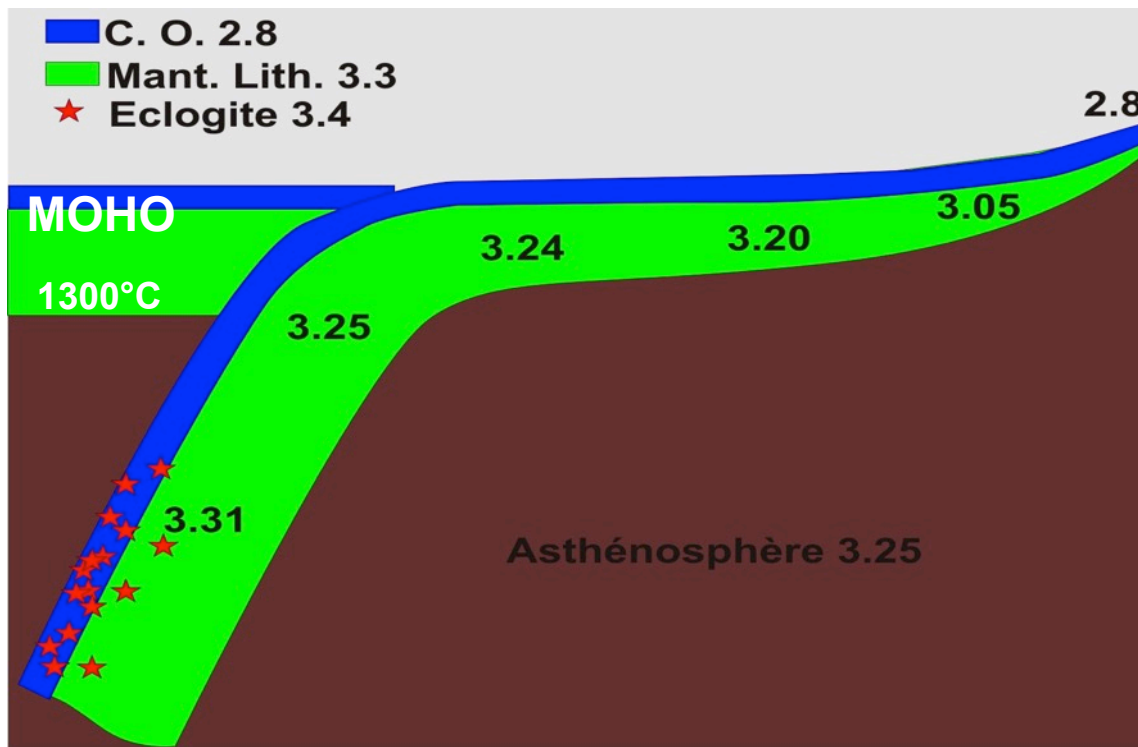


Zones de convergence correspondent à du raccourcissement liée à un phénomène initial de subduction.... (disparition de lithosphère océanique dans le manteau)

Zone de subduction océan / continent



Pourquoi la lithosphère océanique plonge ???

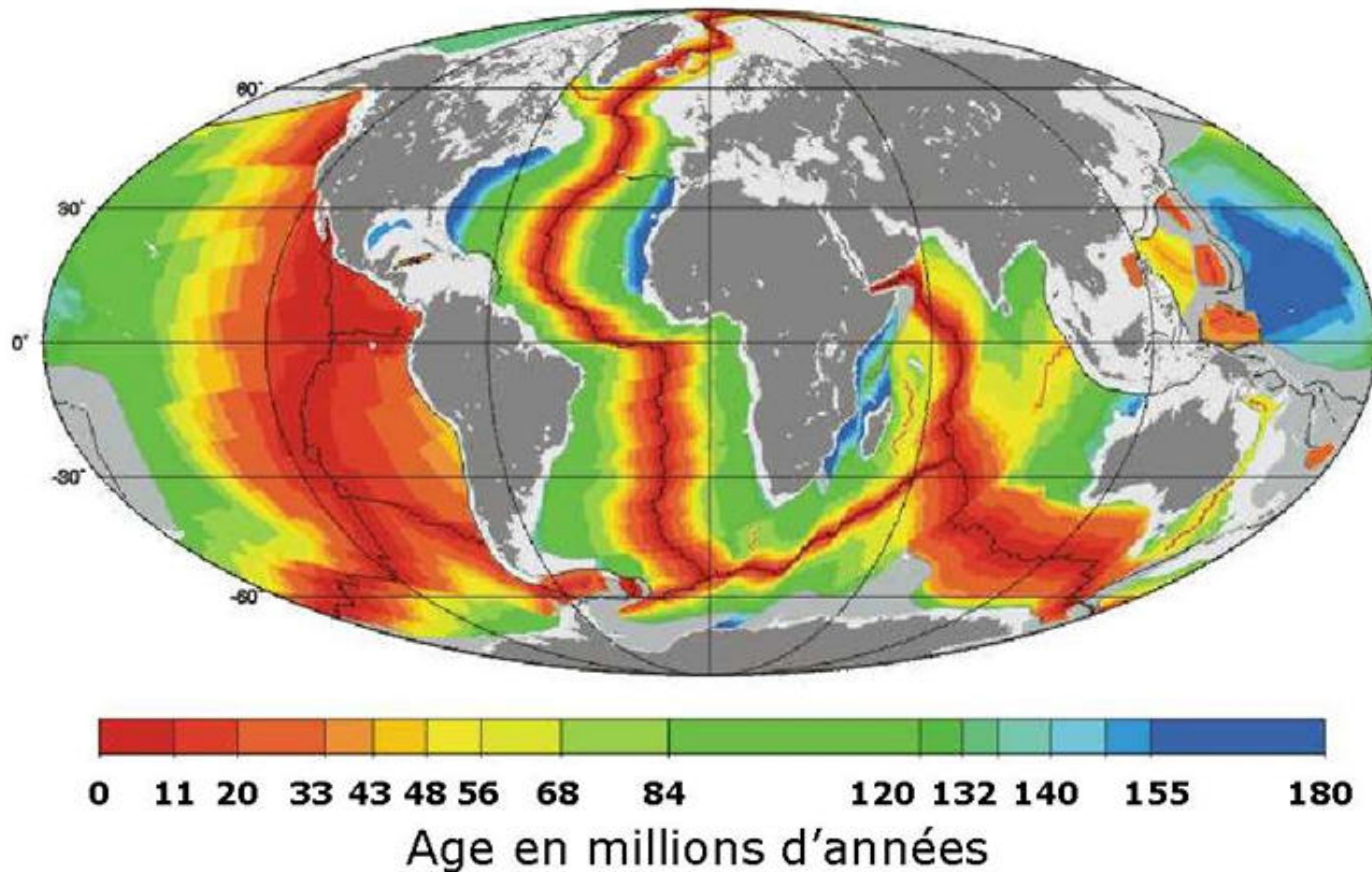


Plus la croûte devient « **vieille** » plus elle se refroidit et plus elle devient **dense**.

Lorsqu'elle s'enfonce dans les conditions du manteau se métamorphose (éclogites) et devient encore plus dense!! 2.8 → > 3.31

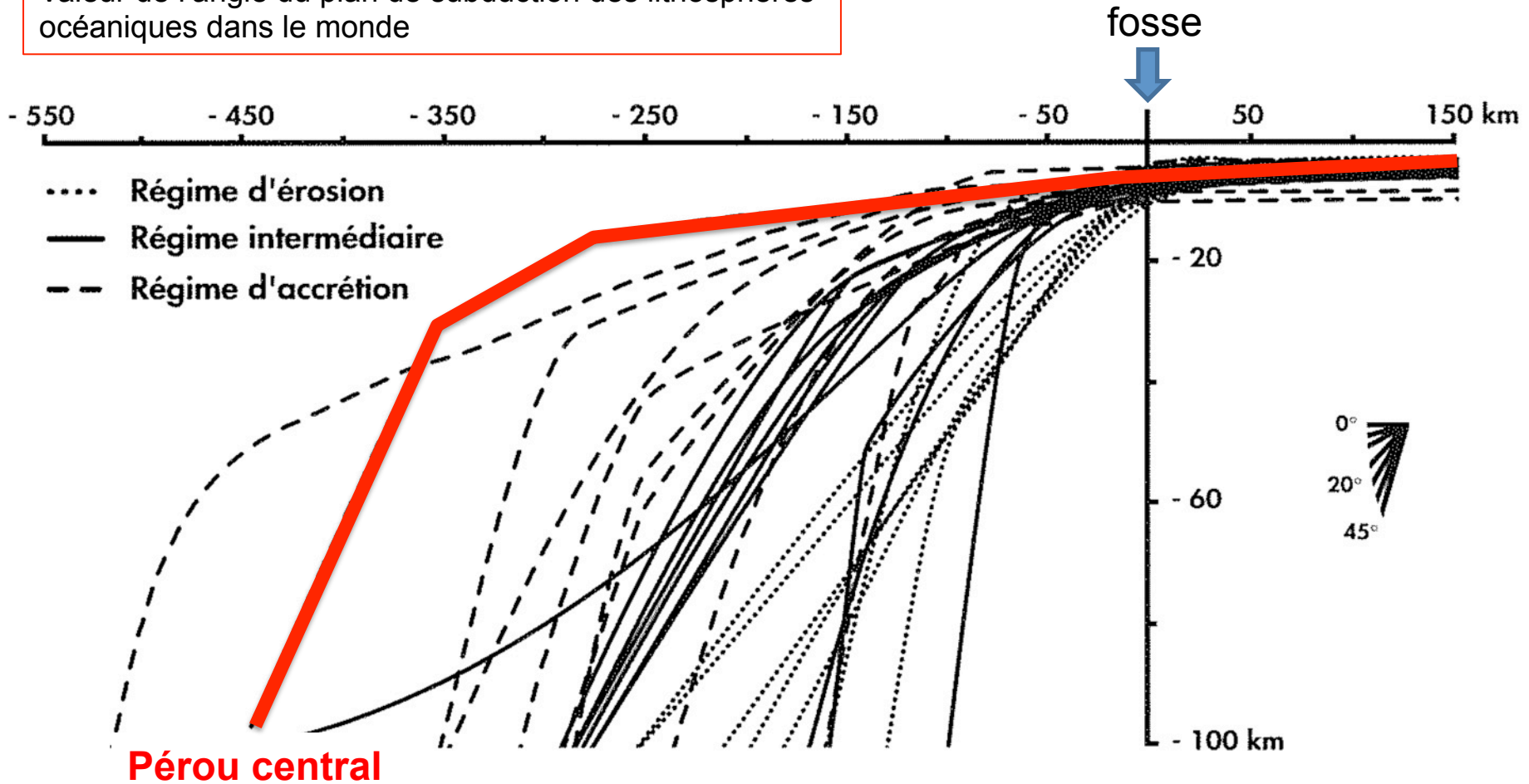
La densité dépasse alors celle du manteau.....
 Moteur majeur de la tectonique des plaques....

Conséquence : il n'y a pas de lithosphère océanique plus ancienne que 180 Ma



La lithosphère océanique plonge t-elle toujours avec le même angle ?

Valeur de l'angle du plan de subduction des lithosphères océaniques dans le monde



Angle très variable (0-45°)

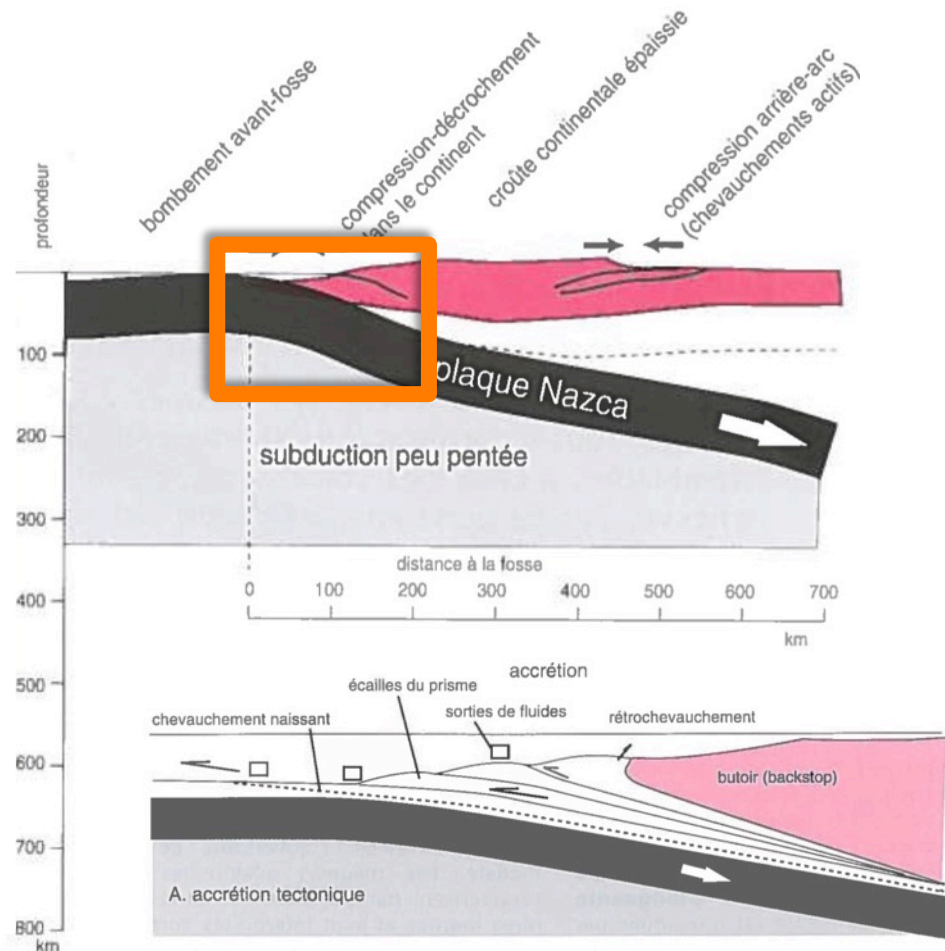
→ contrôle le régime tectonique et sédimentaire de la zone de subduction (Accrétion ou Erosion)

Pérou central

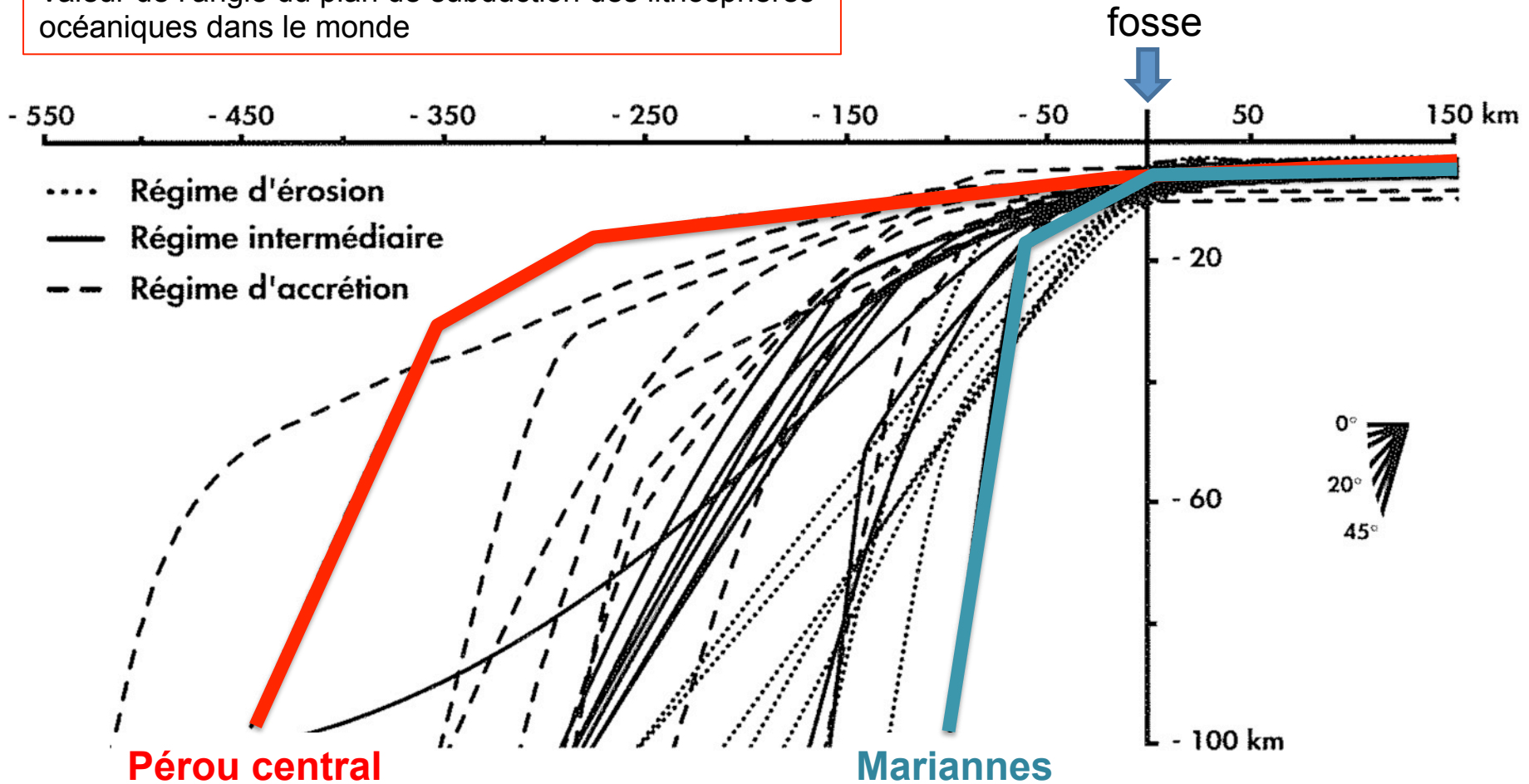
Angle de subduction **faible**

→ Formation d'un prisme sédimentaire et accumulation de sédiments au niveau de la fosse

→ **Régime d'accrétion**



Valeur de l'angle du plan de subduction des lithosphères océaniques dans le monde

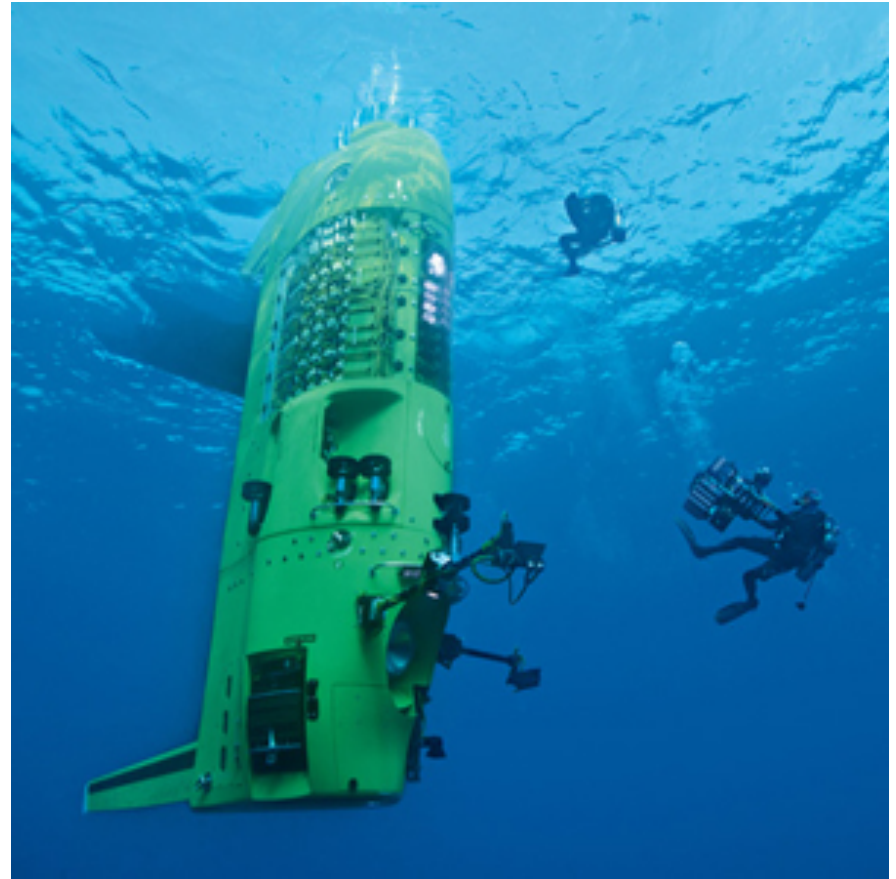


Angle très variable (0-45°)

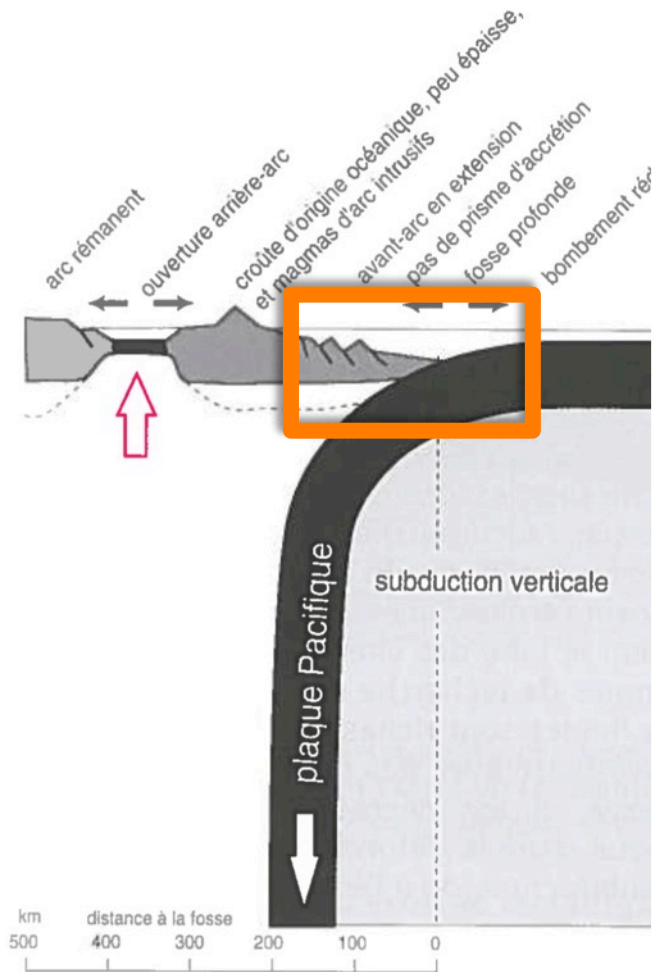
→ contrôle le régime tectonique et sédimentaire de la zone de subduction (Accrétion ou Erosion)



Mission Deep Sea Challenger - 2012
(James Cameron 10898m après 6h de descente)



- Subduction de la plaque Pacifique sous la plaque Philippine
- Zone la plus profonde sur Terre (10994m)

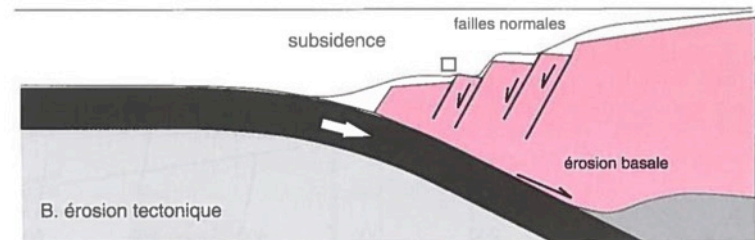


Mariannes

Angle de subduction **fort**

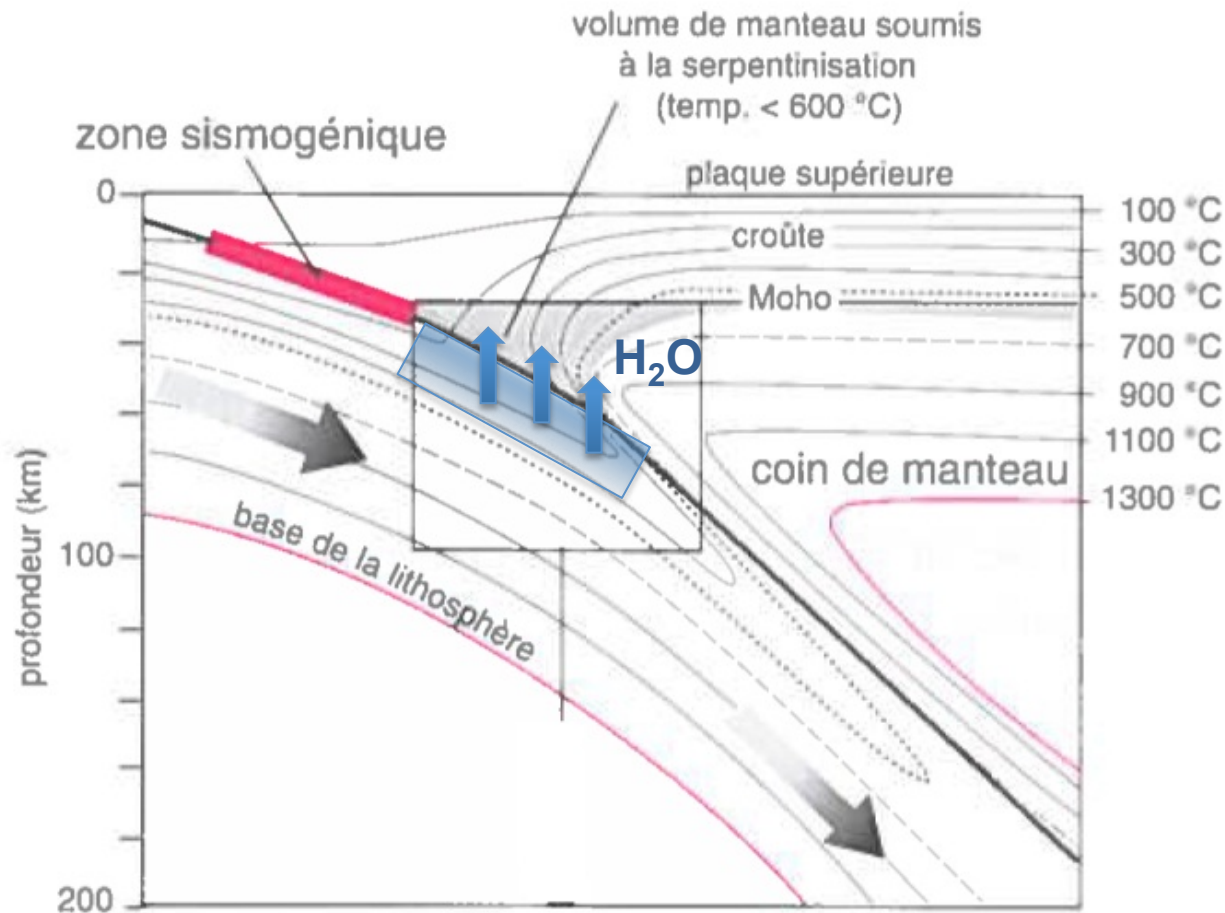
→ Les sédiments rentrent en subduction pas ou peu de sédiments stockés dans la fosse

→ **Régime d'érosion**



→ Matériel rentrant en subduction contrôle la chimie du magmatisme de subduction....

Régime thermique d'une zone de subduction



Les isothermes sont entraînés par la plaque lithosphérique qui plonge.

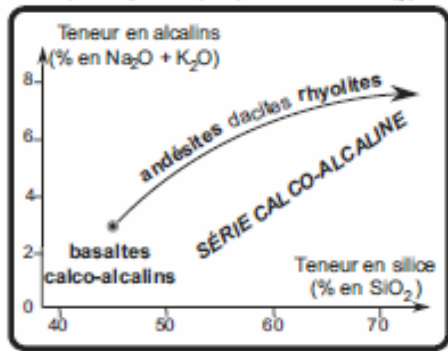
→ Entrée de matériel froid dans le manteau...

→ Libération H₂O le long du plan de subduction (déshydratation de la C.Océanique).

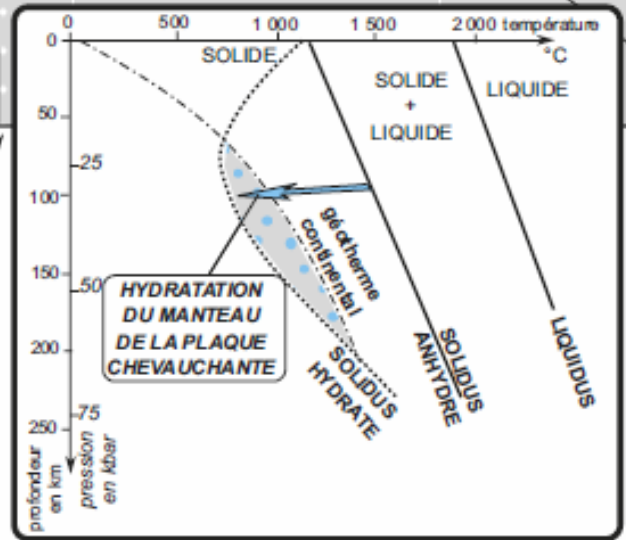
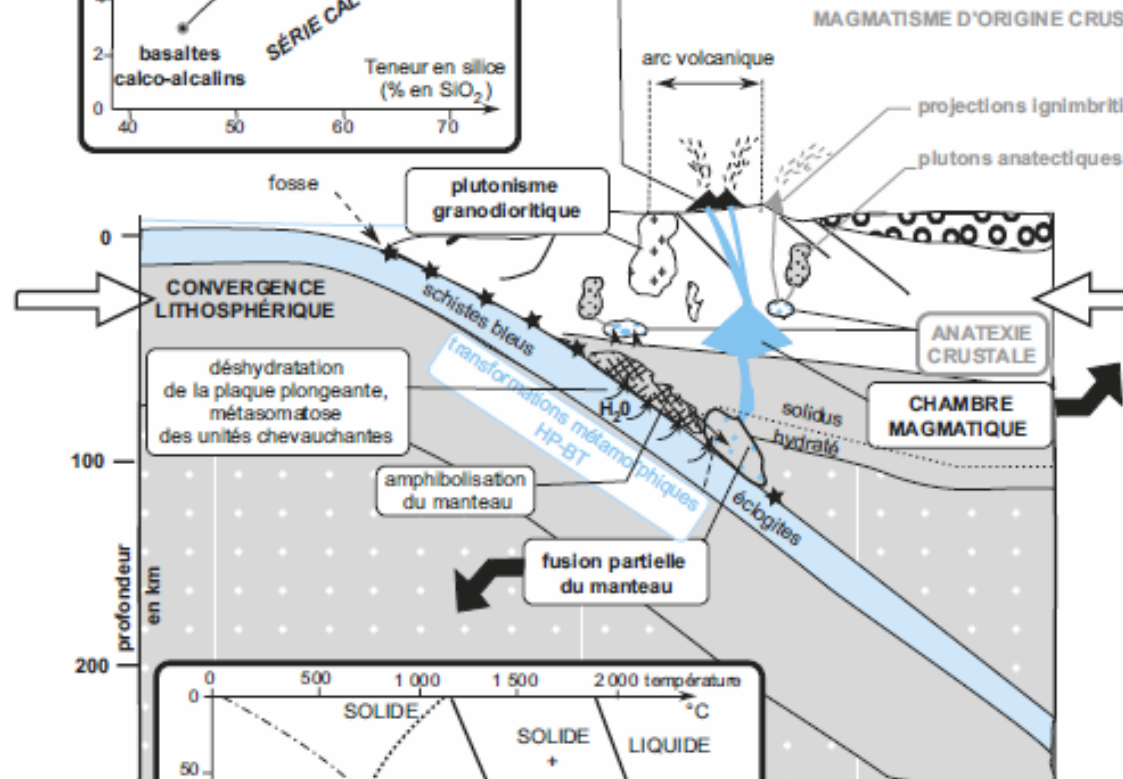
→ Hydratation du coin mantellique (serpentinisation) entre 80 et 100km.

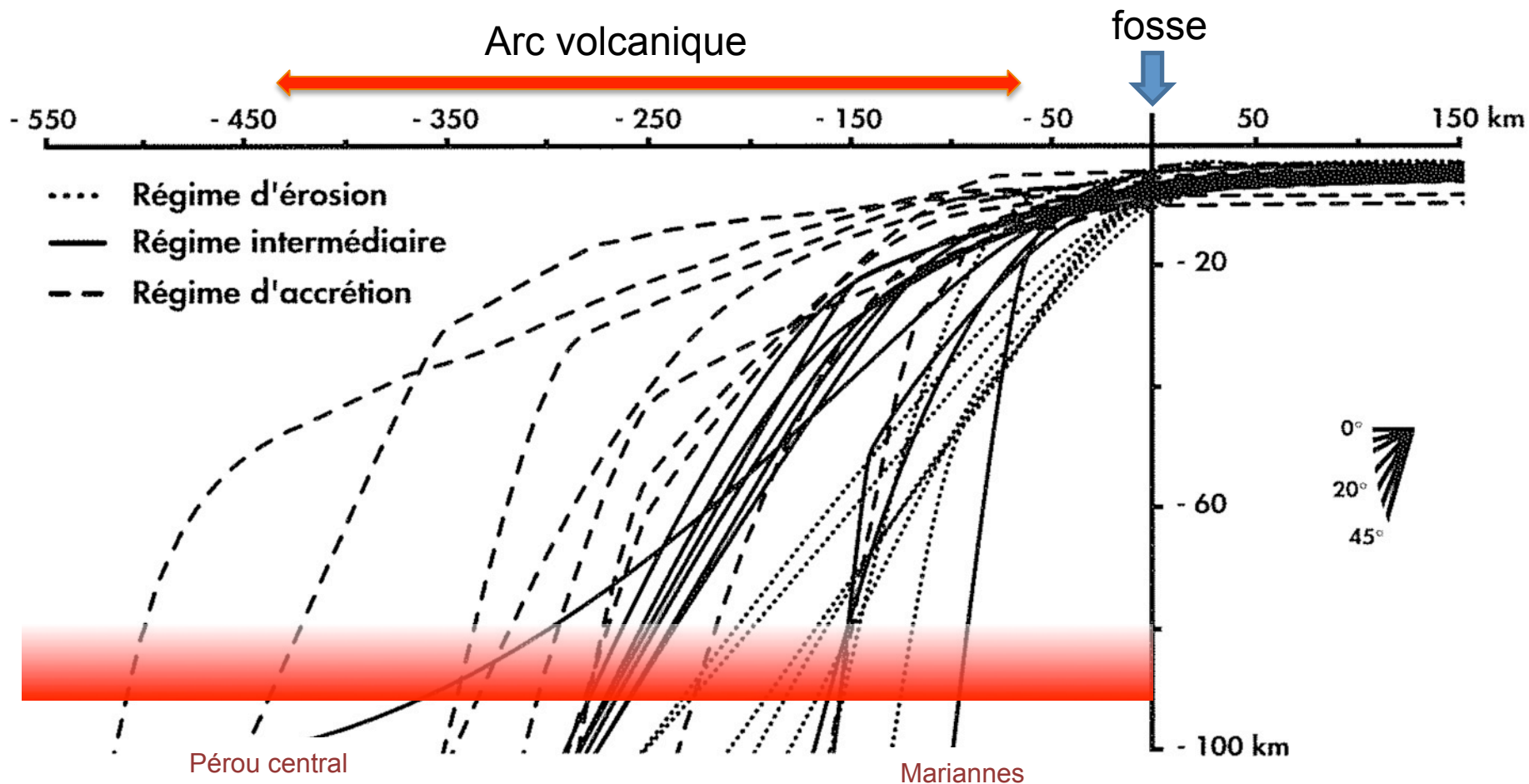
(a)

MAGMATISME D'ORIGINE MANTELLIQUE



→ Hydratation du coin mantellique permet de produire du magmatisme entre 80 et 100km de profondeur...

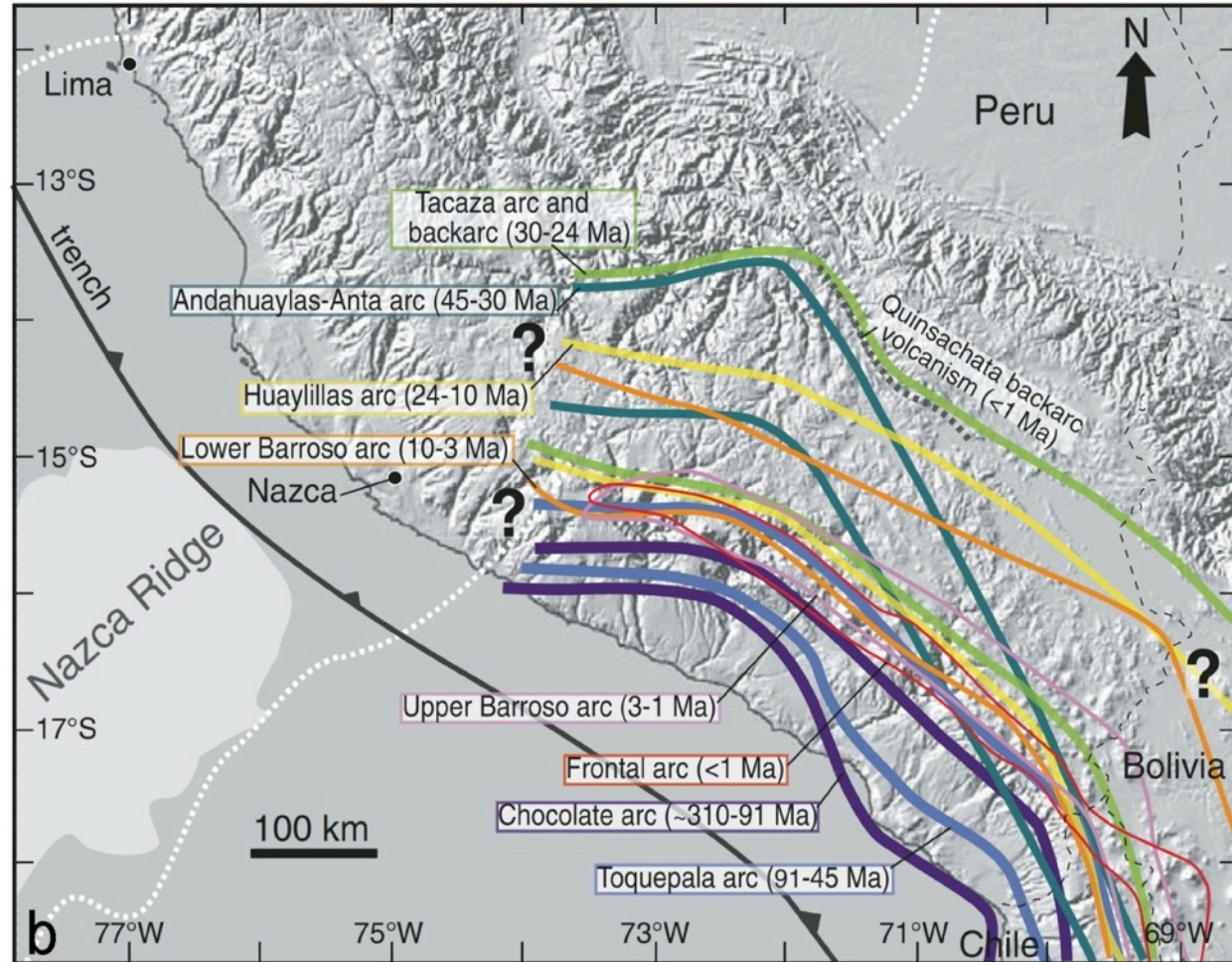
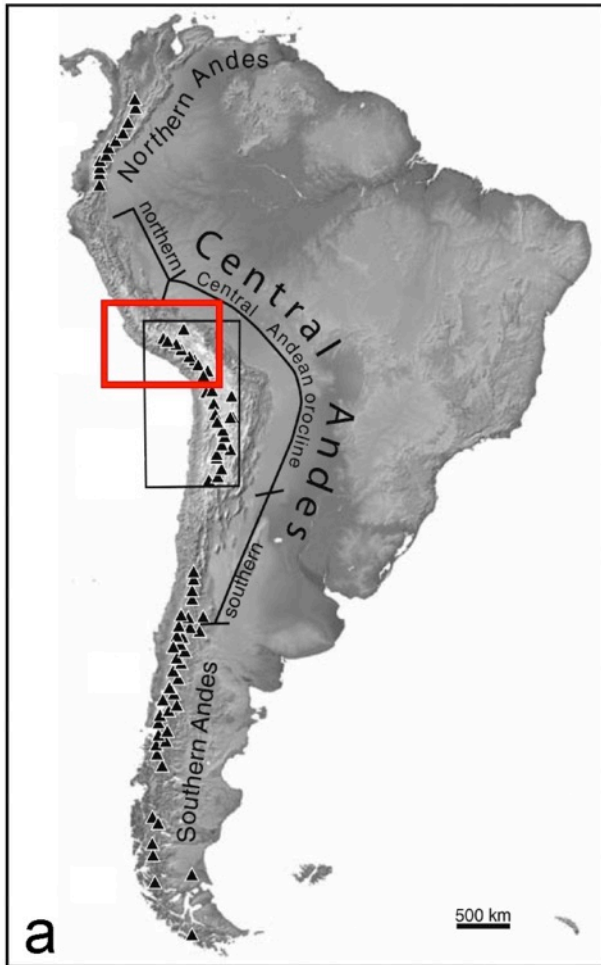




Magmatisme : fusion partielle du manteau entre 80 et 100 km

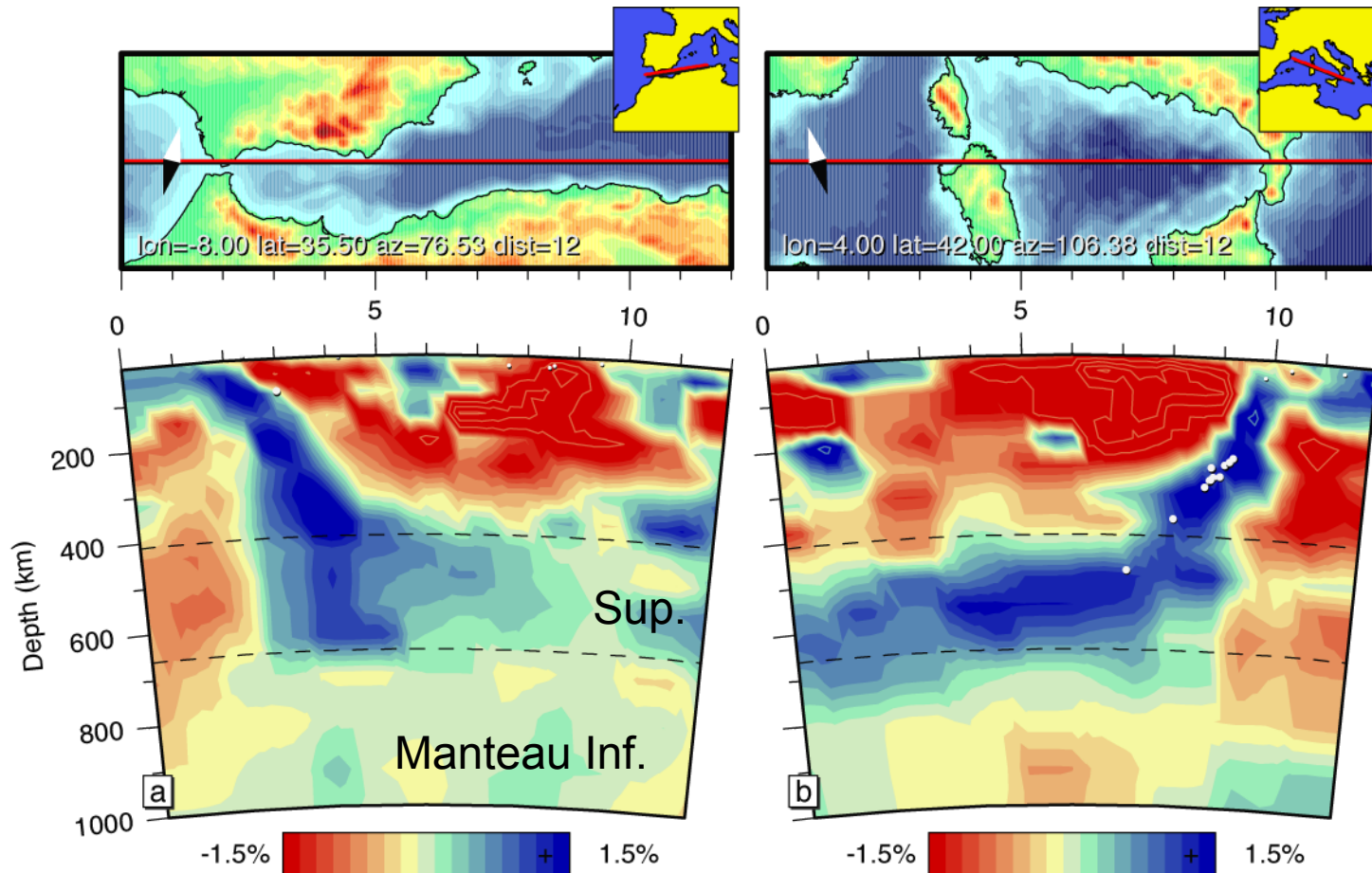
→ Arc volcanique localisé plus ou moins loin de la fosse suivant l'angle de subduction.

Position de l'arc volcanique au cours du temps (310 Ma à actuel).



- Dans la cas des Andes l'angle de subduction a changé au cours de temps.
- Comment faire varier l'angle de subduction au cours du temps ?
Densité, âge de la plaque, zone de transition de phase dans le manteau...

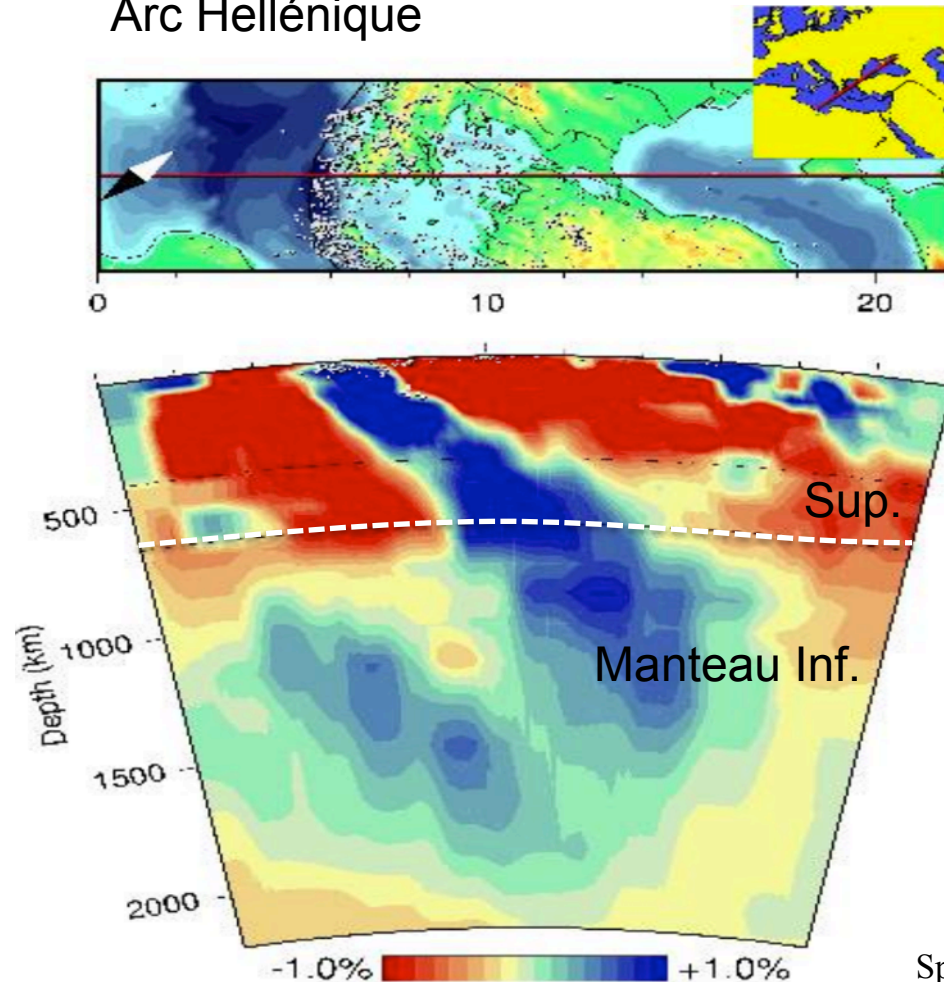
Tomographie sismique (Spakman and Wortel, 2004)



Spakman & Wortel, 2004

→ Couche à 670 km peut jouer le rôle de couche limite

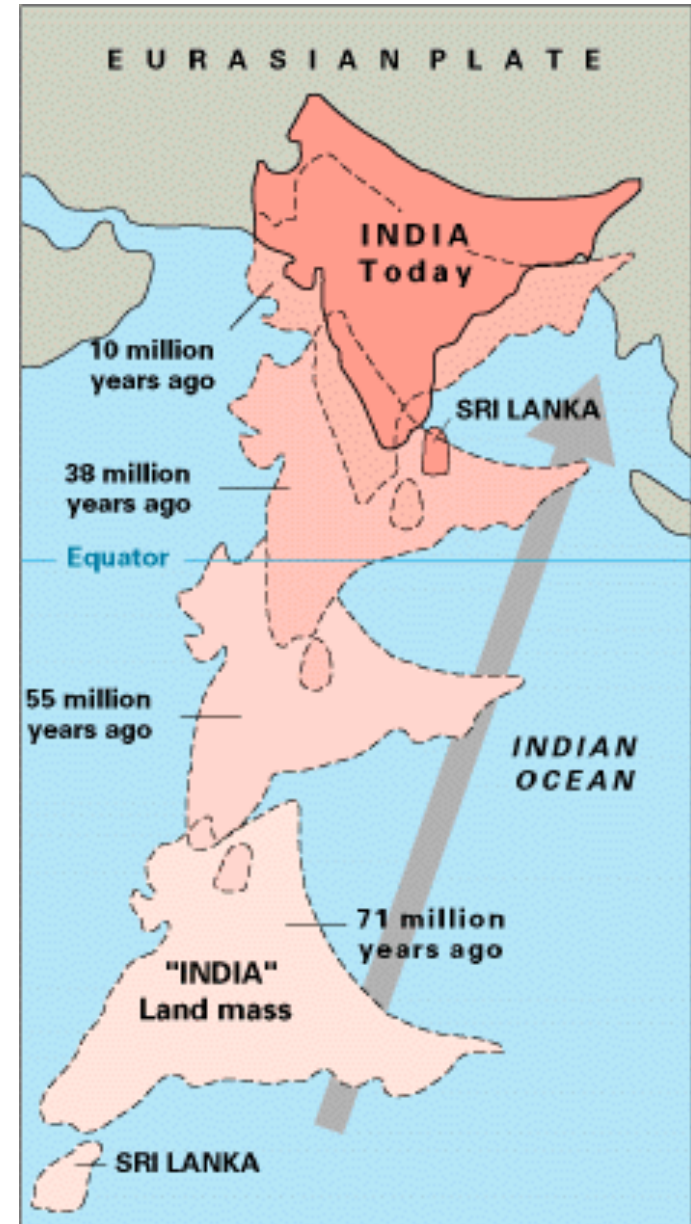
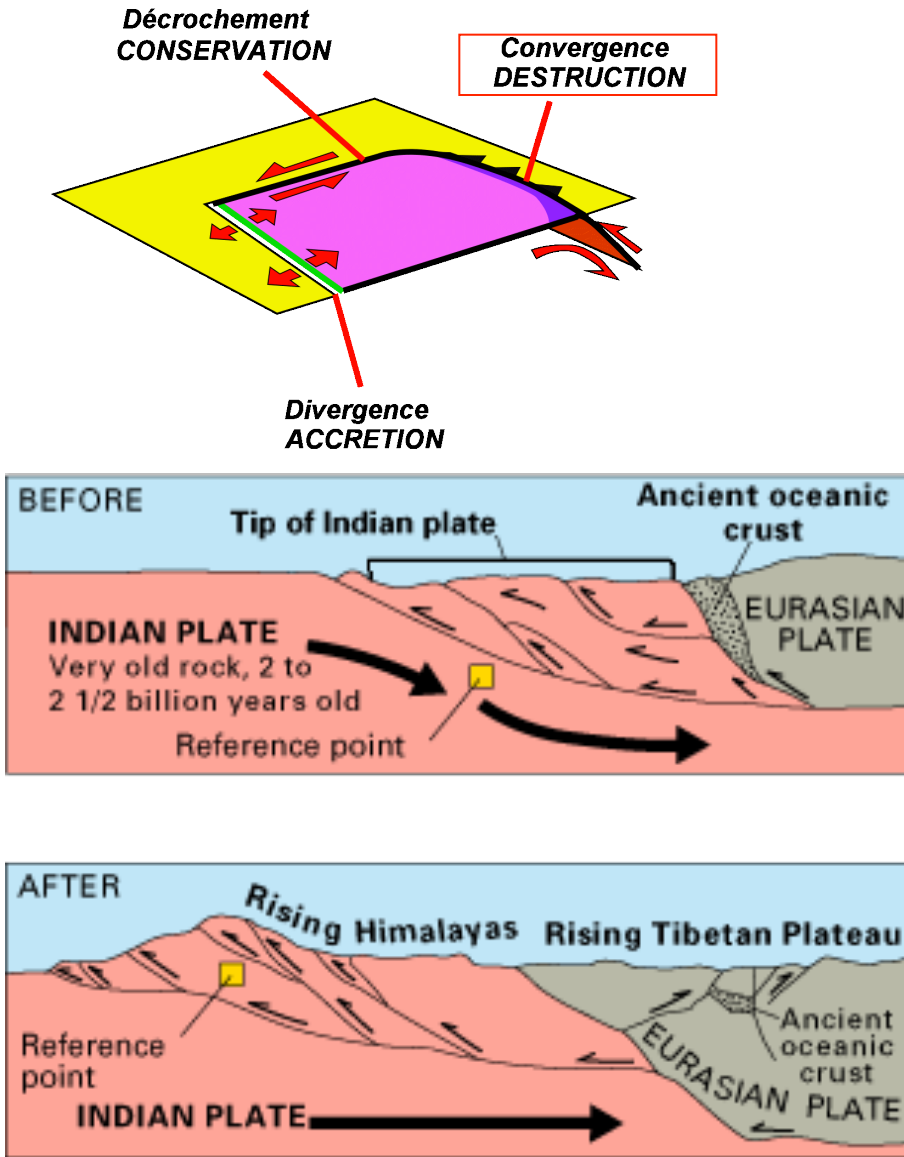
Arc Hellénique



Spakman & Wortel, 2004

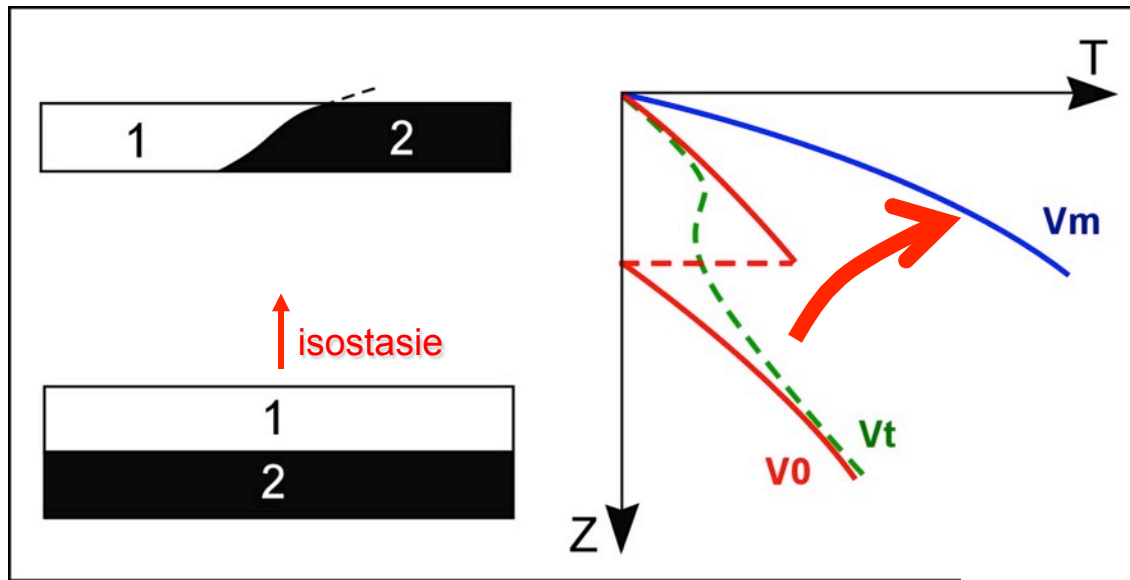
- Dans certains cas la lithosphère passe à travers....
- Il peut y avoir localement une déchirure de la plaque (densité trop importante)

géologie générale *Partie III - 1. La tectonique des plaques*



Subduction peut conduire au phénomène de collision → épaissement crustal (sous-placage)

Evolution du gradient dans le cas d'un épaissement



Epaissement perturbe le gradient :

→ V_0 pas de rééquilibrage

→ V_t gradient en cours de rééquilibrage

→ V_m gradient infiniment relaxé

→ V_t dépend de la compétition entre érosion et relaxation thermique

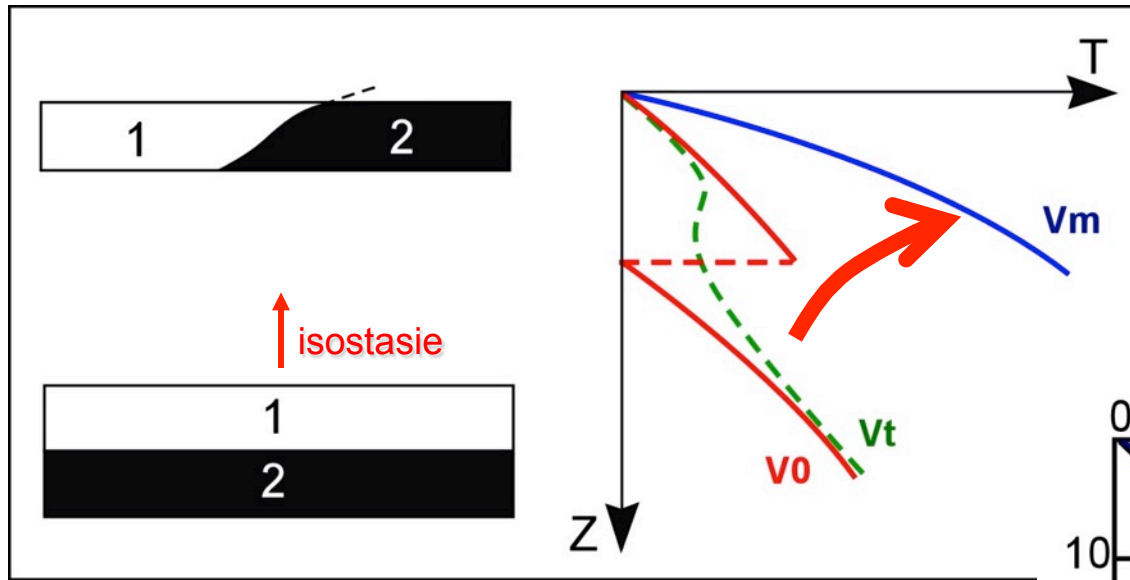
→ 2 possibilités pour obtenir V_m

- Erosion faible
- Sous placage continu du matériel crustal qui compense l'érosion

Pourtant dans le Massif Central assemblage **cordiérite + andalousite !!**



Evolution du gradient dans le cas d'un épaissement



Epaissement perturbe le gradient :

- V_0 pas de rééquilibrage
- V_t gradient en cours de rééquilibrage
- V_m gradient infiniment relaxé

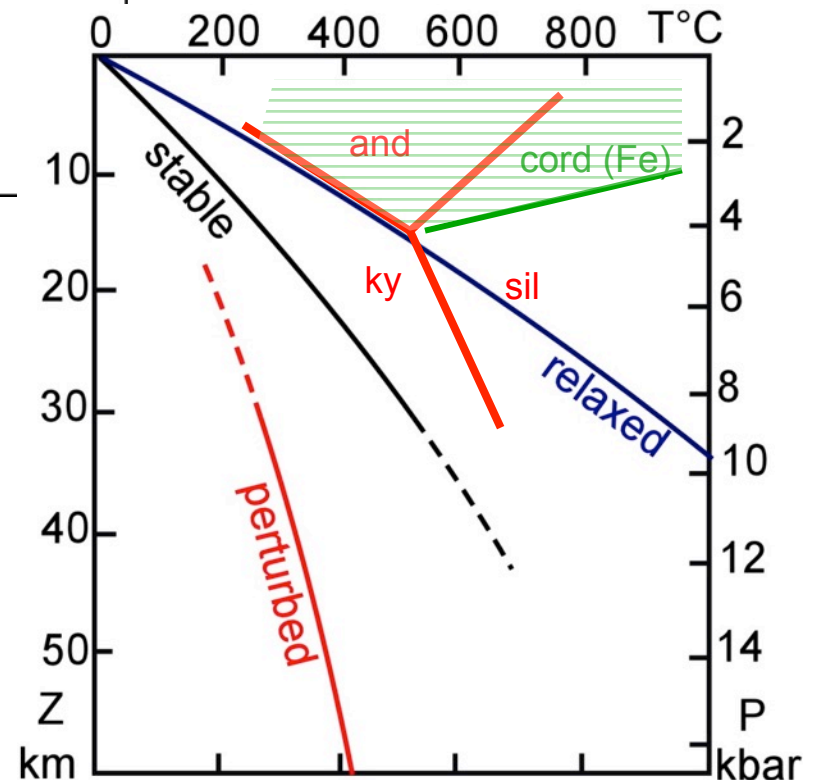
→ V_t dépend de la compétition entre érosion et relaxation thermique

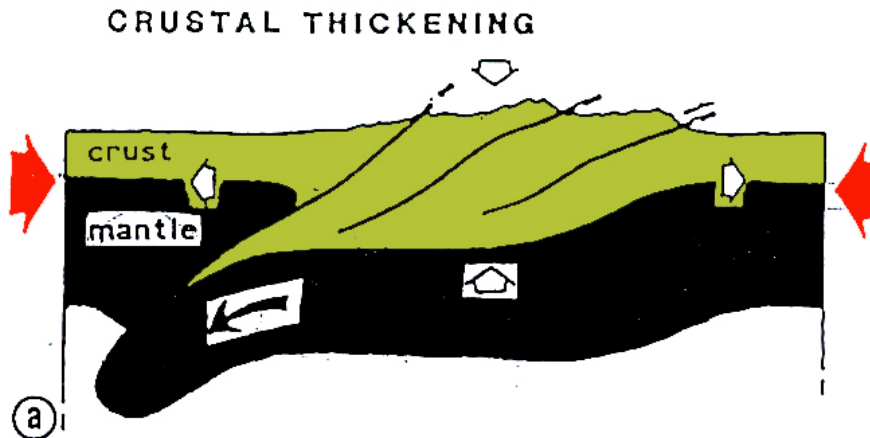
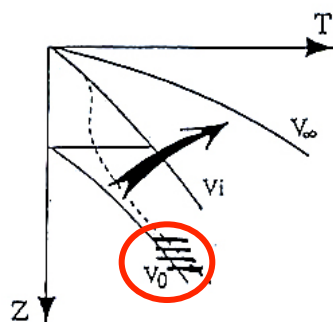
→ 2 possibilités pour obtenir V_m

- Erosion faible
- Sous placage continu du matériel crustal qui compense l'érosion

Pourtant dans le Massif Central assemblage **cordiérite + andalousite !!**

Impose de dépasser V_m → comment faire?



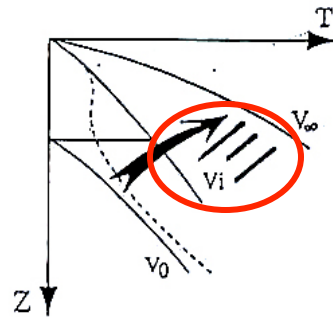
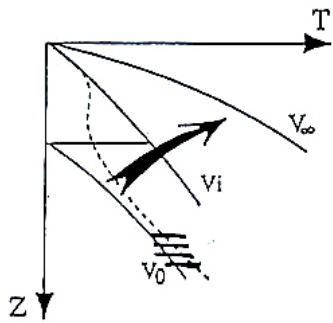


**1-Epaississement crustal
perturbation du gradient
géothermique....**

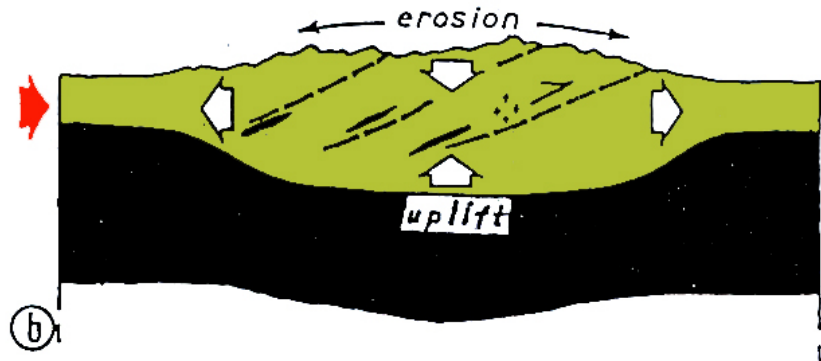
**Dans une chaîne de montagne existence d'une compétition
entre forces aux limites (tectonique) et forces de volume (gravité)**

**Forces aux limites > Forces de volume
→ épaississement du système**

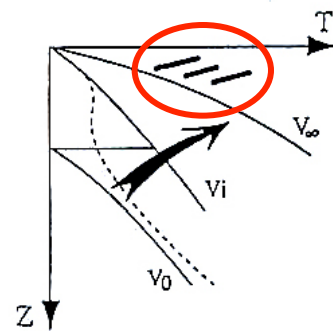
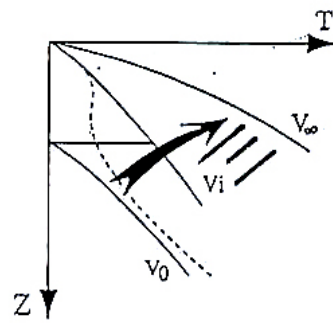
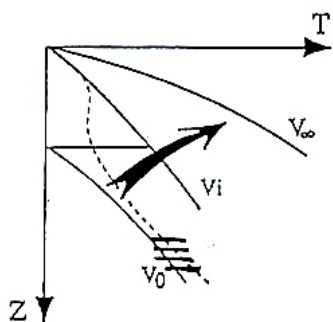
CRUSTAL THICKENING



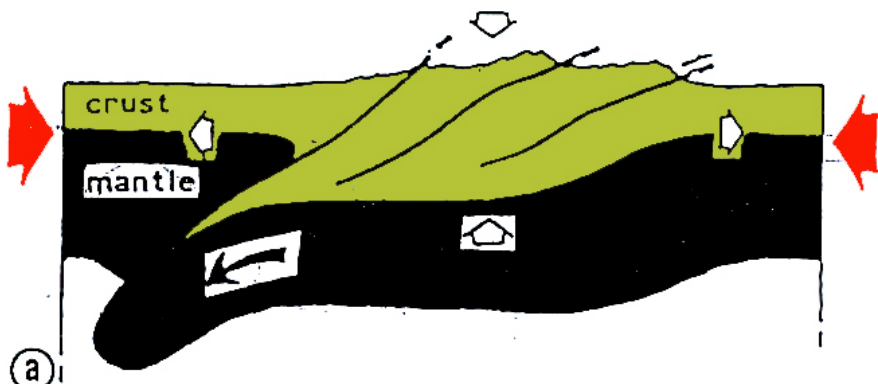
1-Epaississement crustal
perturbation du gradient



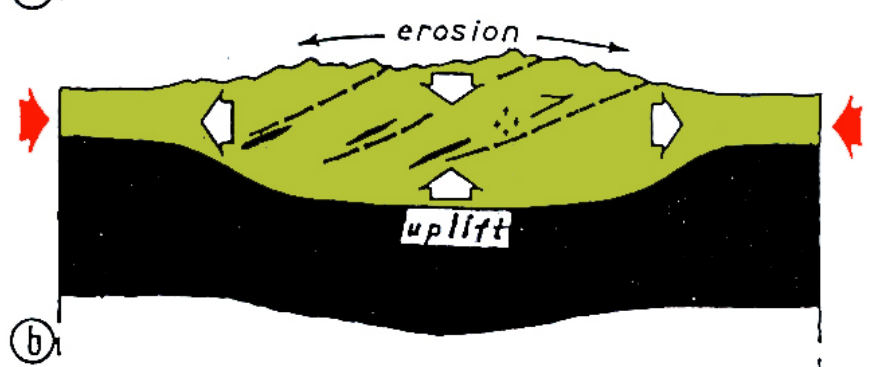
2-Compétition entre relaxation
et érosion, dépassement
du gradient stable



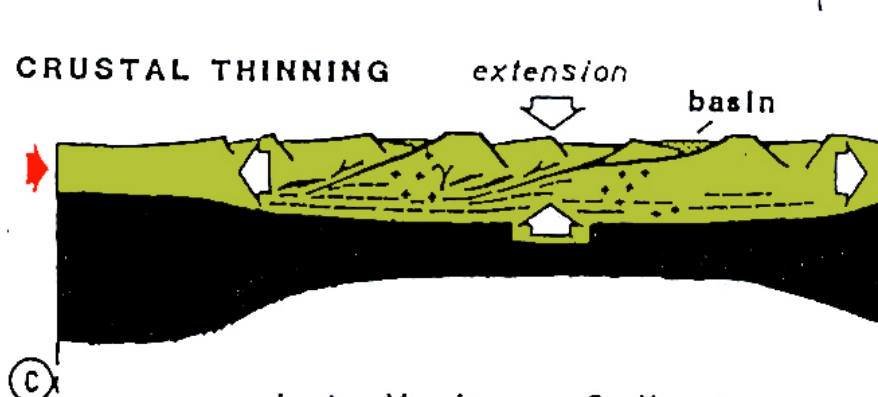
CRUSTAL THICKENING



1-Epaississement crustal
perturbation du gradient



2-Compétition entre relaxation
et érosion, dépassement
du gradient stable



**3-Amincissement de la
zone préalablement
épaissie et relaxée
thermiquement !**
Remontée de manteau
profond → zone de
détachement ductile

Late Variscan Collapse

Géologie Générale
Géotech 3

→ **Partie II. Géodynamique interne**

→ **1. La tectonique des plaques**

→ **1-1. La lithosphère : mosaïque de plaques**

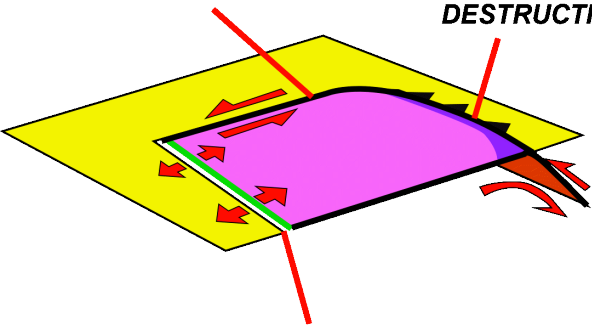
→ **1-2. Moteur de la tectonique des plaques**

→ **1-3. Zones en convergence**

→ **1-4. Zones en divergence**

Décrochement
CONSERVATION

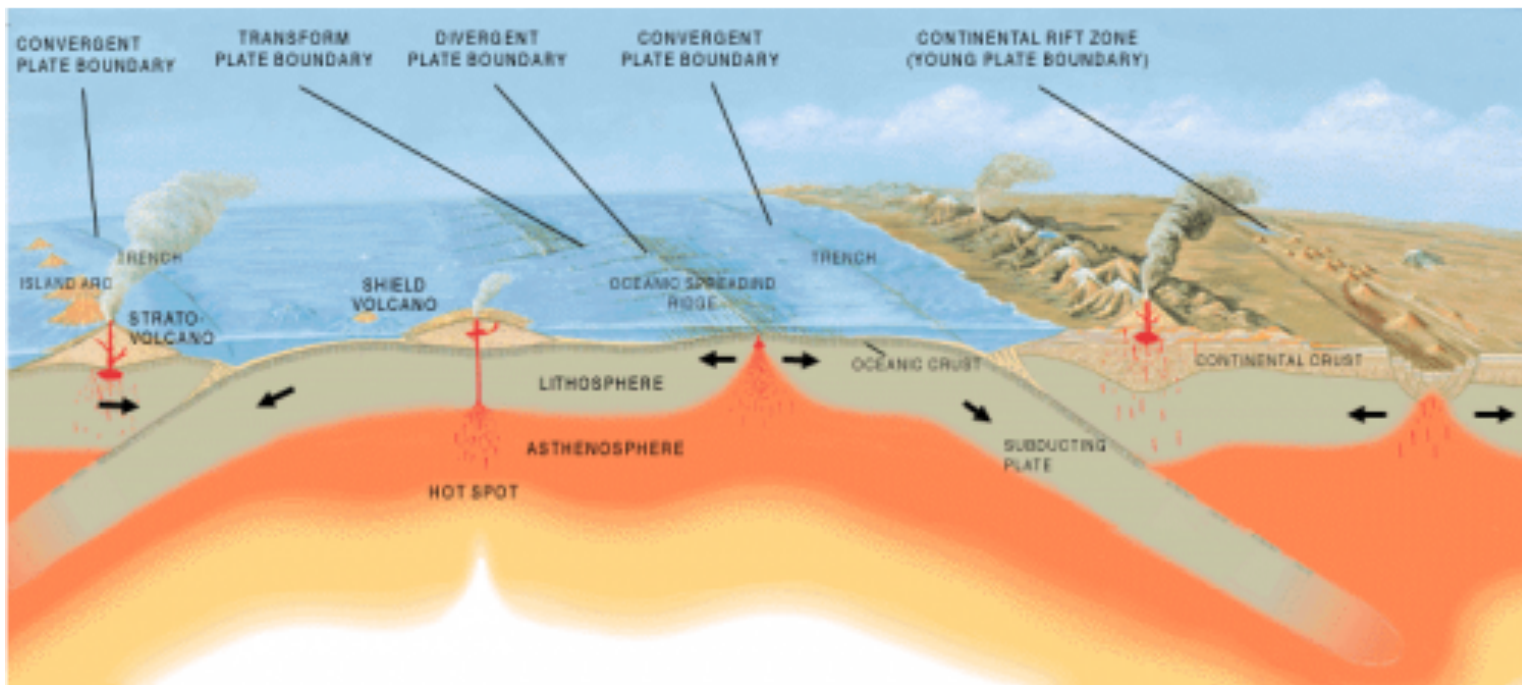
Convergence
DESTRUCTION

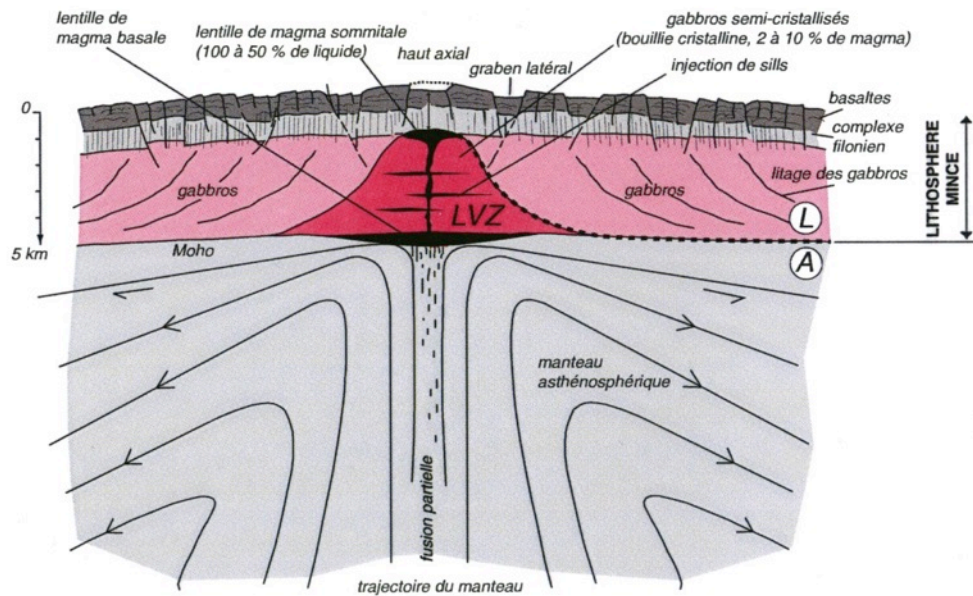


Divergence
ACCRETION

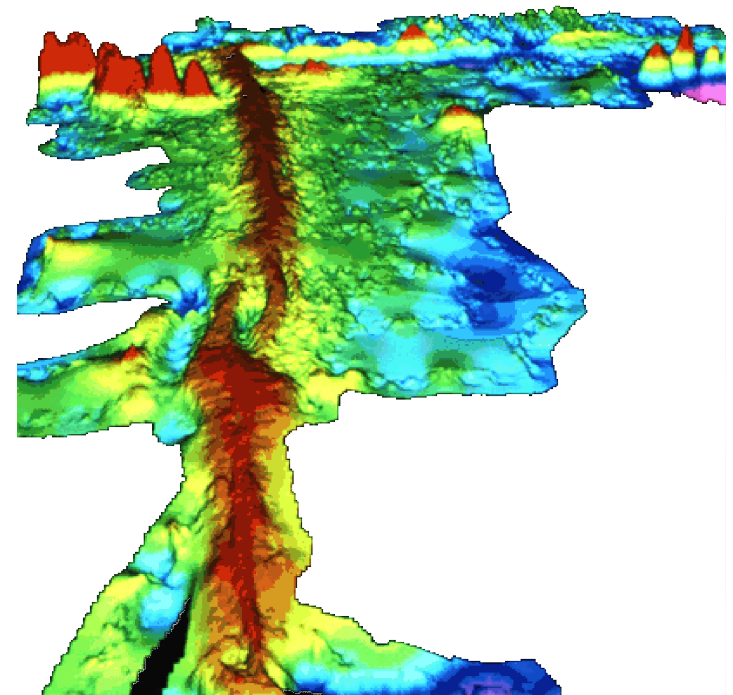
Domaines de formation de la lithosphère océanique....

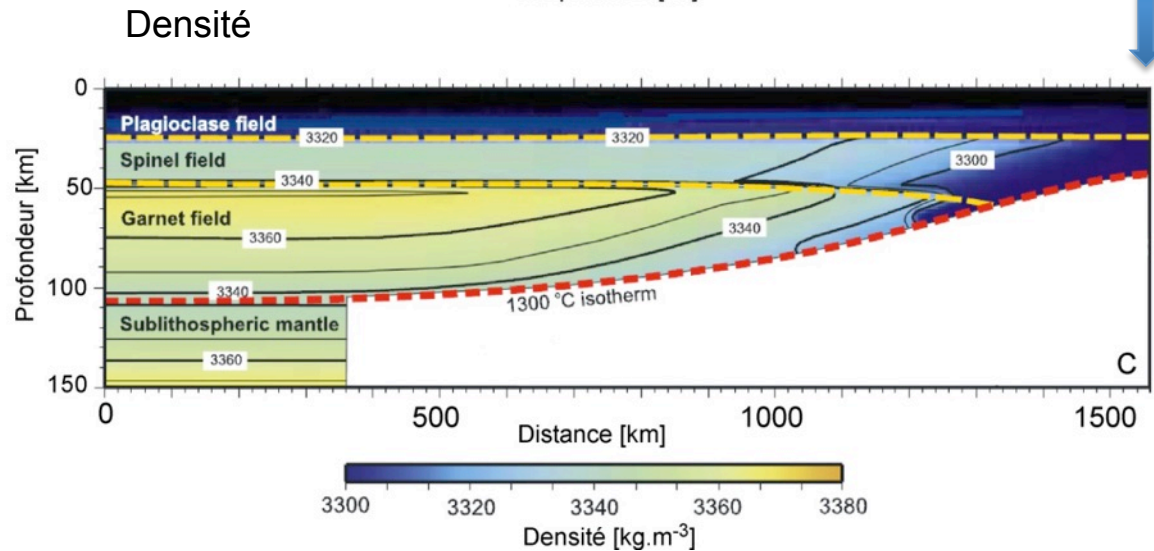
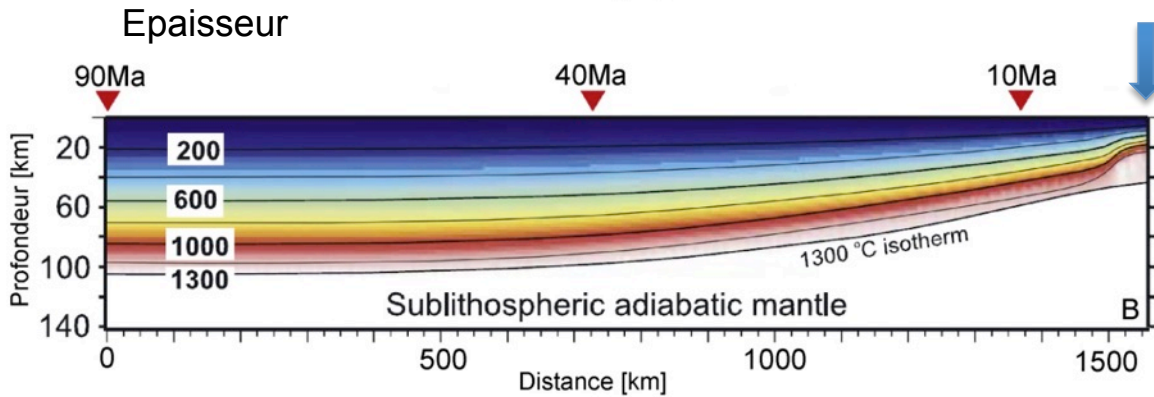
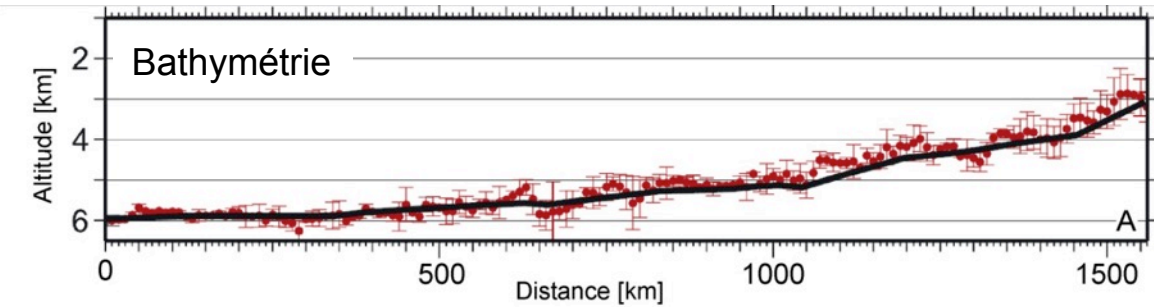
Fusion partielle du manteau liée à un gradient thermique fort... amincissement et remontée de L'asthénosphère (1300°C entre 5 et 8 km)





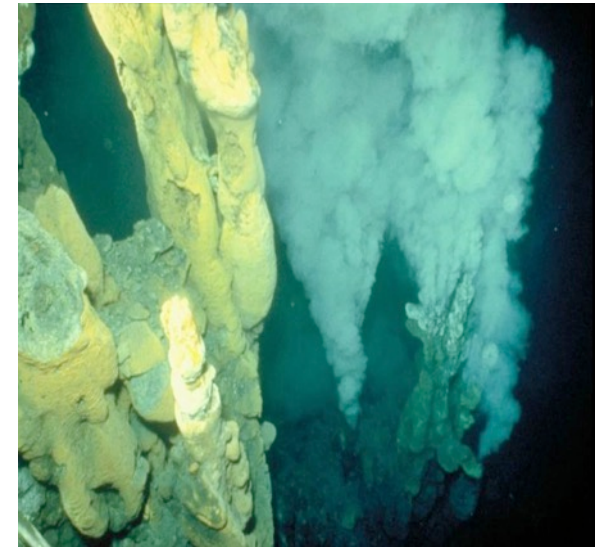
Fusion partielle jusqu'à 15%
→ Série magmatique tholéitique.
(basalte de type MORB)





Refroidissement de la lithosphère
Plus on s'éloigne de la ride
subsidence thermique,
épaississement et densification...

→ subduction



Géologie Générale
Géotech 3

→ **Partie III. Géodynamique interne**

→ **1. La tectonique des plaques**

→ **2. Tectonique des plaques et
ressources énergétiques**

Environnement géologique fournit à l'humanité des gisements de **matières premières**...

→ Eaux

→ Sols

→ Matières énergétiques fossiles (charbon, pétrole, gaz)

→ Matières premières minérales

→ Minerai ? :

→ Métallogénie ? :

Éléments chimiques métalliques utilisés par l'industrie :

→ Métaux sidérurgiques : Fe, Mn, Cr, Co, V, Nb, Ta...

→ Métaux de base : Cu, Sn, Pb, Zn, Al, Mg, Ti...

→ Métaux précieux: Au, Ag, Pt, Pd, Rh, Ir...

Minéraux non-métalliques utilisés par l'industrie :

→ Minéraux de l'industrie chimique : soufre, carbonates, Halite, fluorite...

→ Engrais : phosphates, nitrates, sels de potasse (KOH)...

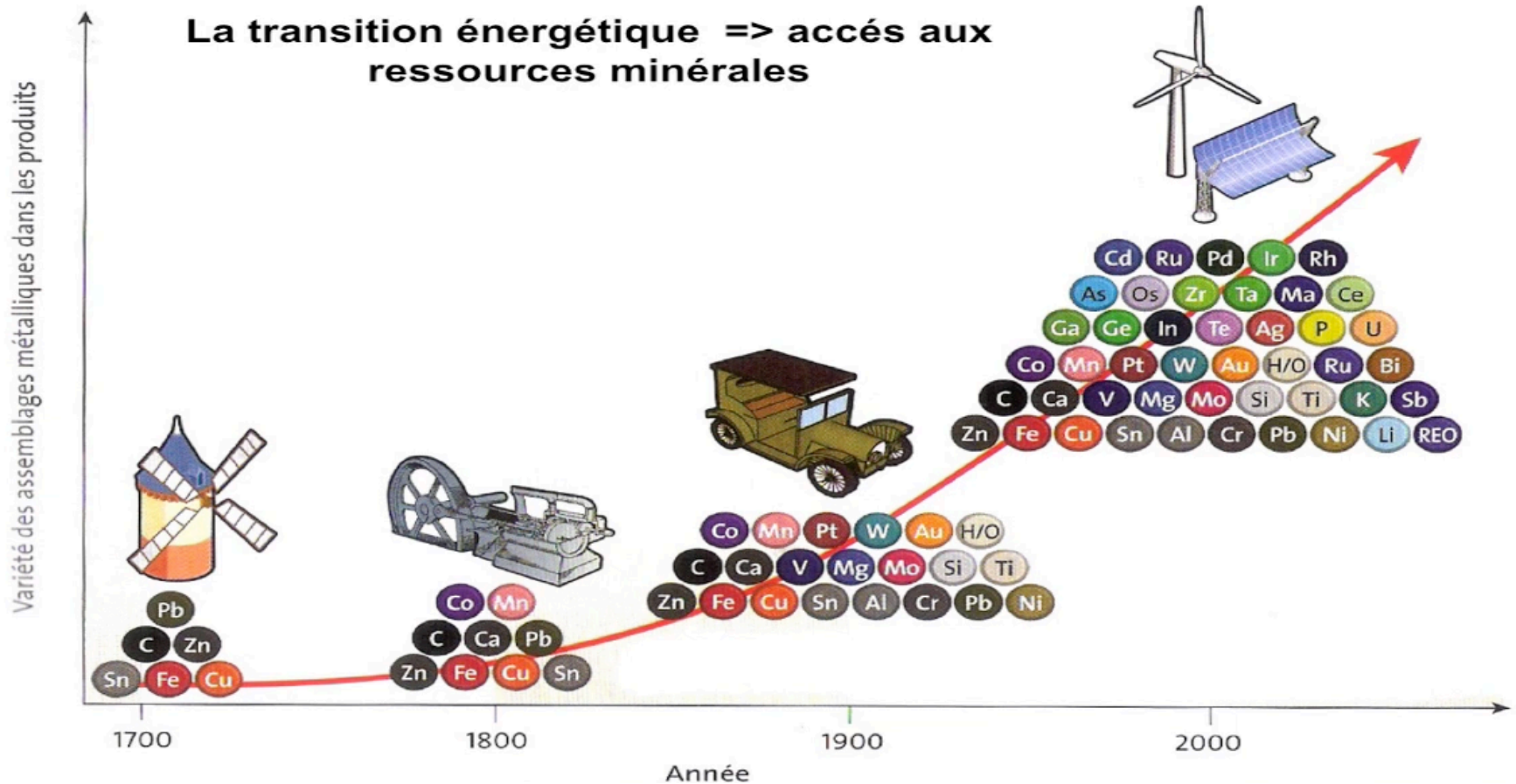
→ Isolants et réfractaires : amiante, magnésite, graphite, kaolin...

→ Pierres précieuses : diamant, saphir, émeraudes...

Ressources minérales consommées par un américain durant sa vie :

- 730 tonnes de roches, sables et graviers
 - 30 tonnes de ciment
 - 15 tonnes de minerais de fer
 - 14 tonnes de sel
 - 9 tonnes de phosphate
 - 2,7 tonnes de bauxite (Al)
 - 600kg de Cu, 420kg Pb, 300kg Zn, 50kg Au...
 - 30 tonnes de métaux industriels (Si, calcite, gallium, germanium...)
- Les besoins en métaux dans les 30 prochaines années (2050 : 9 milliards d'humains) **égaleront** l'ensemble de la consommation mondiale cumulée depuis l'apparition de l'homme !**
- Enjeu fondamental... nécessite une transition énergétique**

Problème de la transition énergétique :



➔ Nécessite l'utilisation considérable de ressources minérales rares (métaux spéciaux)...



→ Répartition inégales des ressources minérales rares.... Enjeux considérables : Impacts sur le développement, environnementaux, géopolitiques...

→ Rôle des professionnels en géosciences : découvrir, évaluer, modéliser et gérer...

Gisements, réserves et ressources :

- **Au sens géologique**, un gisement est une accumulation d'une substance à des teneurs anormales par rapport à la teneur moyenne au sein de la lithosphère → **Anomalie de concentration**

- **Au sens économique**, un gisement est une masse de substance susceptible d'être exploitée → notion de rentabilité.

L'exploitabilité dépend de facteurs naturels (tonnage, localisation...) et de facteurs techniques, économiques et géopolitiques fluctuants...

- **Réserves** : quantité de substance contenue dans un gisement suffisamment connu pour que l'on puisse assurer son exploitation dans les conditions techniques et économiques actuelles.

- **Ressources** : réserves (plus ou moins bien connues) dont on peut estimer qu'elles pourraient être exploitables suite à des évolutions techniques ou économiques.

Pour générer un gisement → besoin **de concentrer** les éléments chimiques...

Chimie moyenne de la croûte continentale

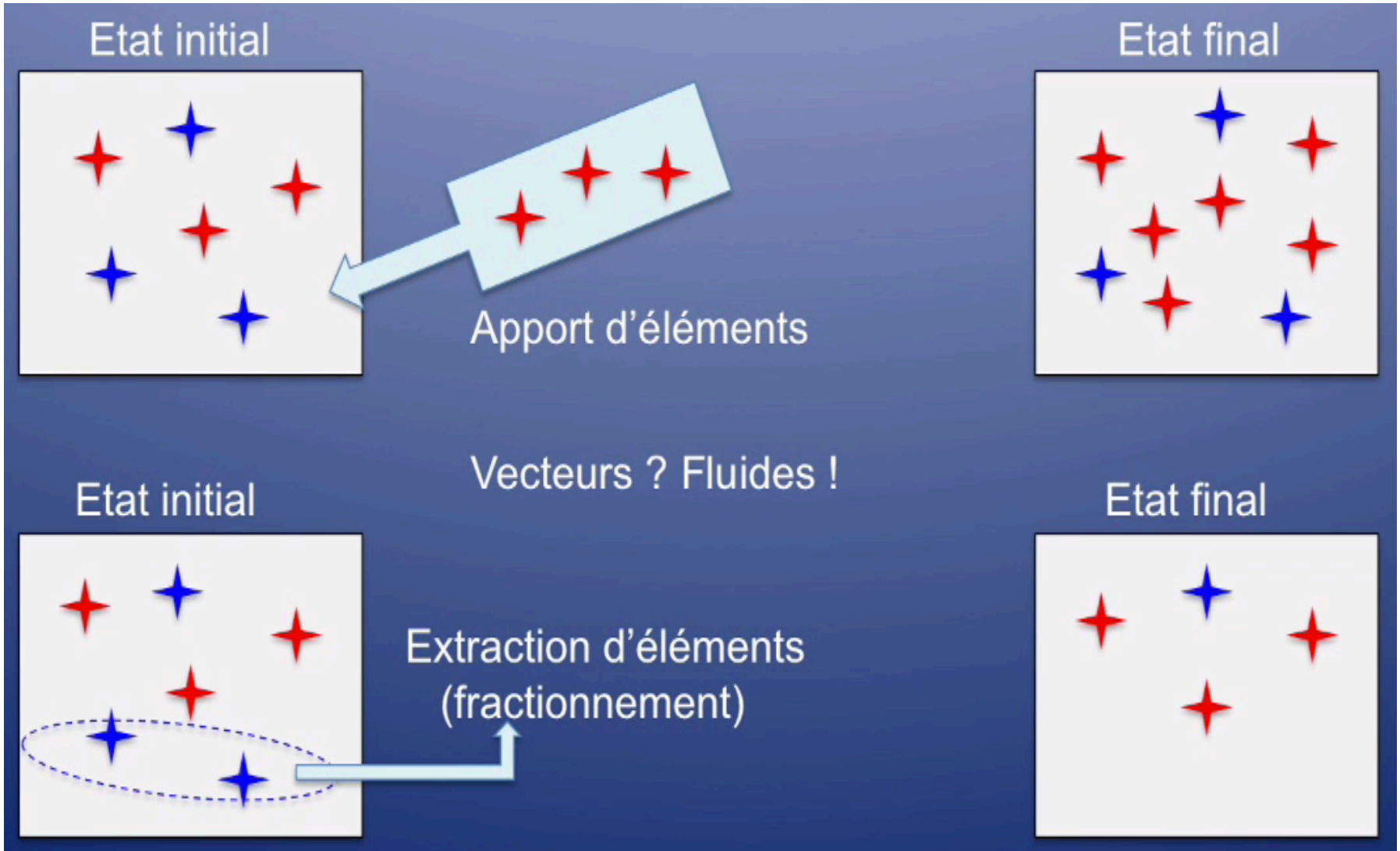
Elément	wt%	Minerai	Facteur de concentration
O	46,60		
Si	27,72		
Al	8,13	22%	X 2,7
Fe	5,0	30%	X 6
K	2,59	20%	X 7,7
Ti	0,44	30%	X 68
Mn	0,095	40%	X 420
Au	0,0000004	0,06%	X 500
Sn	0,0002	1,5%	X 7500

Gisement = Anomalie géochimique

→ Processus géologiques qui permettent la concentration ???

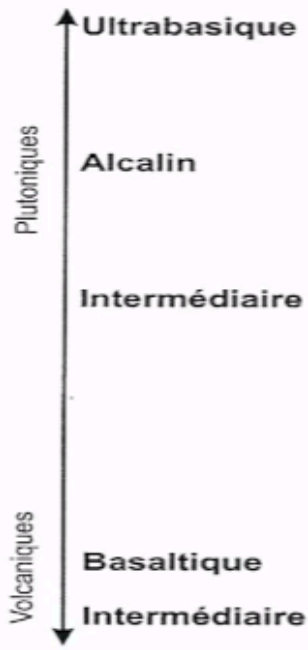
→ Processus géologiques qui permettent la concentration ???

→ 2 possibilités : apport contrôlé par des fluides et extraction contrôlée par la fusion partielle et la cristallisation fractionnée..



Environnement géologique

Gisements Exemples



continents

Océans

granitoïdes

- Cr - Ni - PGE LMI
- Cr - Ophiolites
- PGE Carbonatites
Diamants Kimberlites
- Be-Li et Sn-Nb-Ta dans pegmatites
Dépôts granites : W, Sn, skarns et greisens
- Porphyres cuprifères
Cu, Mo
Cu, Zn-Pb Fe skarn
Veines polymétalliques
- Cu, Zn-Pb VHMS
- Epithermal : H et LSulf.
Cu, Au, Ag, Hg
- SEDEX Zn - Pb
- MVT Zn-Pb-Ba-F
- Nodules Mn,Fe
Phosphates, evaporites
- Au, veines Quartz
- Au, shear zones
- Ni latéritique - Bauxites
- Au, diamants... PLACERS

Roches Magmatiques

Roches Sédimentaires

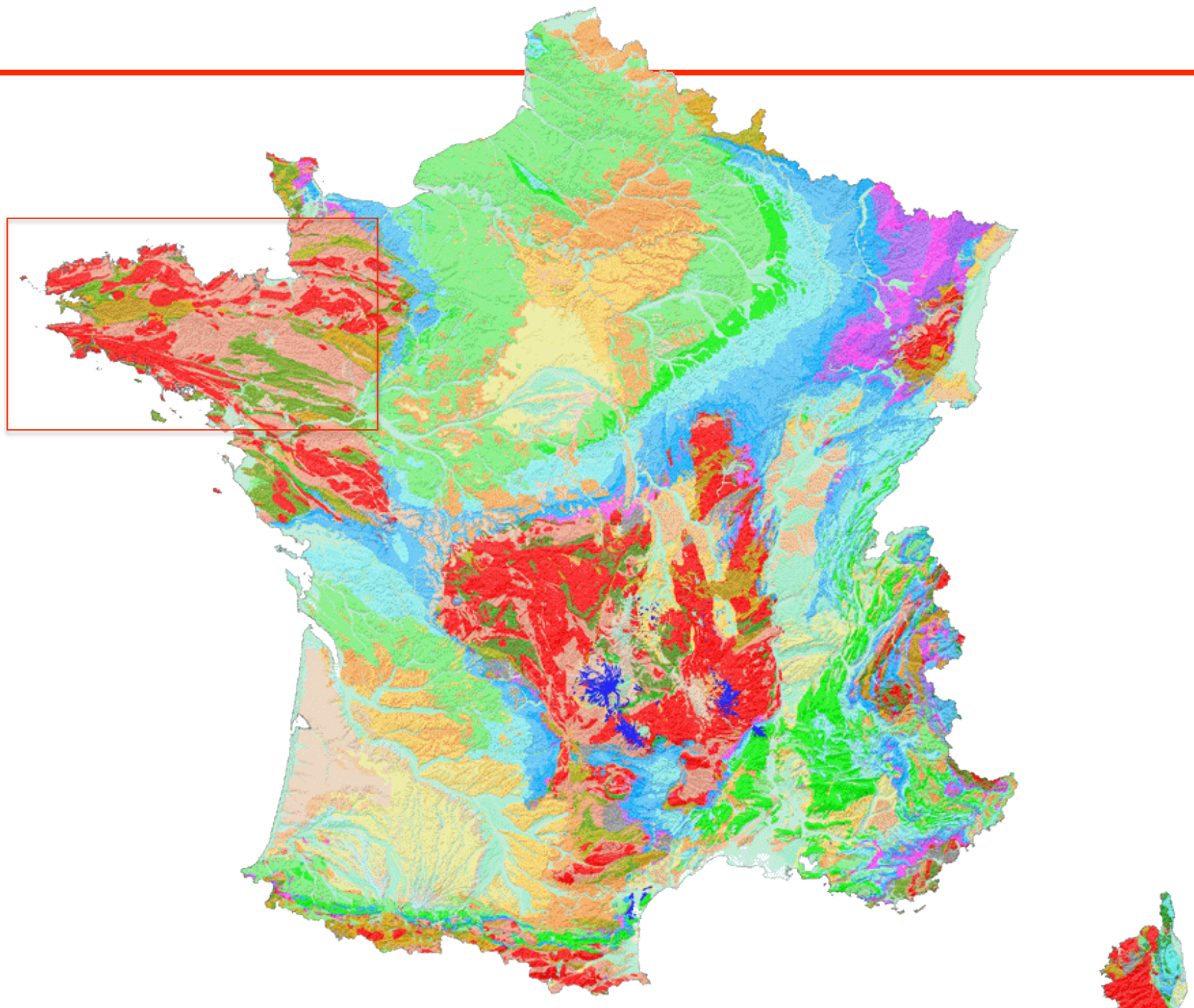
- Détritiques
- Carbonates
- Sediments chimiques

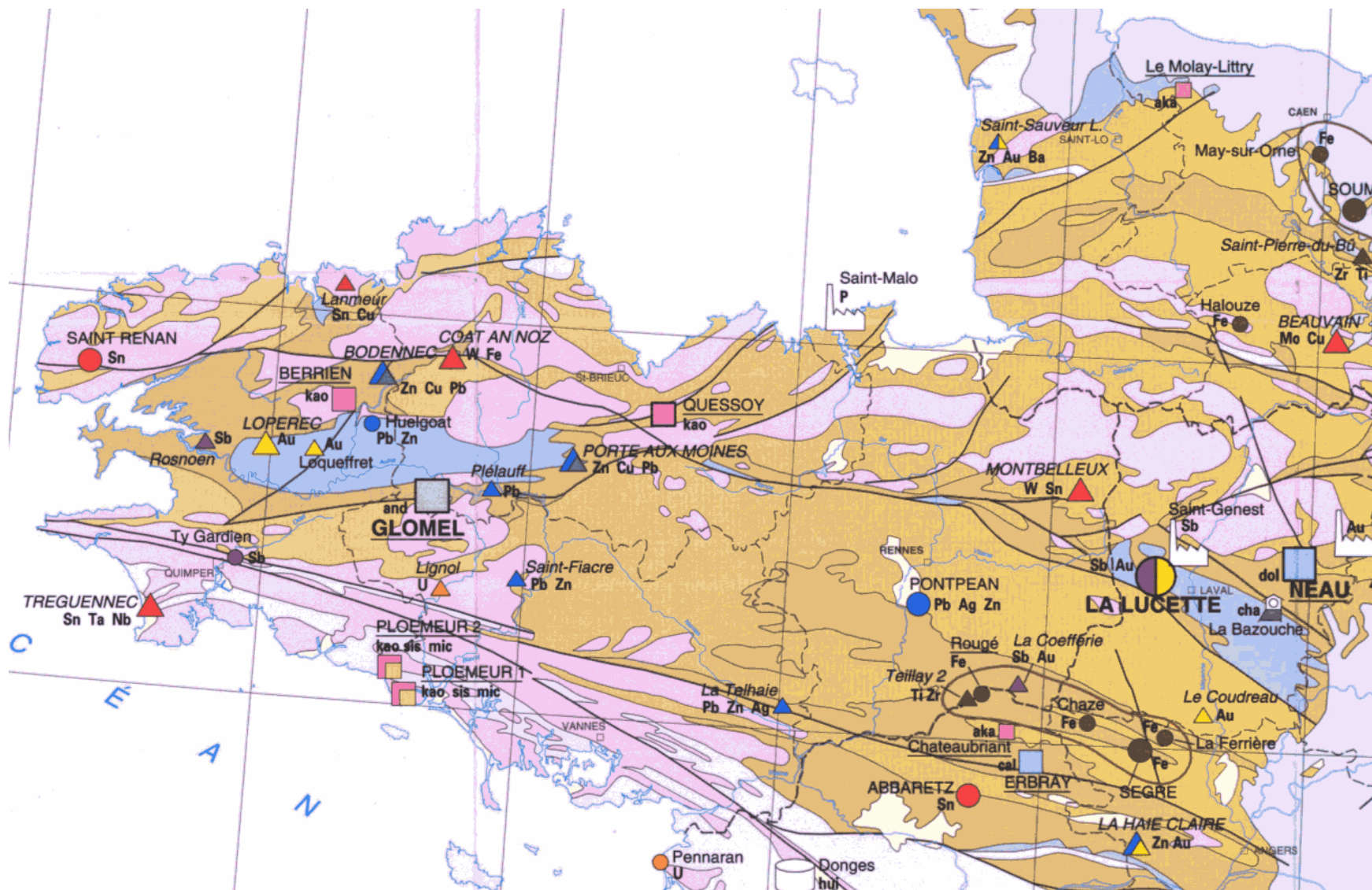
Métamorphisme général

- Métavolcaniques
- Métasédimentaires
- Métapélites
- Métarénites

Surface

- Résiduels
- Depôts

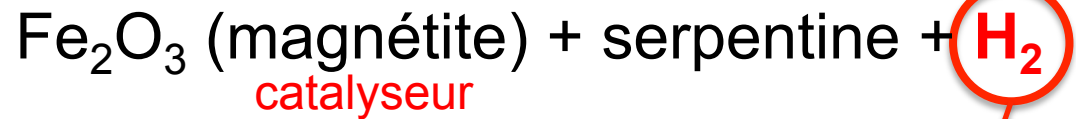
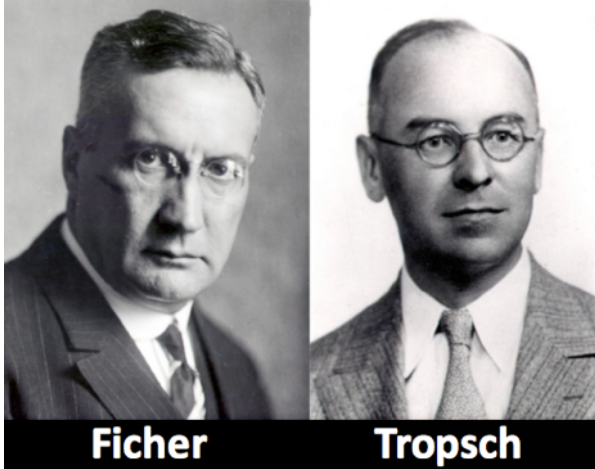




Extrait de la carte minière de la France 1/1.000.000 BRGM

Production H₂

PRINCIPE → Dès qu'il y a Fe²⁺ (contenu dans les minéraux silicatés) au contact de l'eau (gaz ou liquide) à une température > 50°C, il se produit des réactions de connues sous le nom de réaction de type Fischer-Tropsch (1923)...



catalyseur

et



C'est comme cela que les Allemands faisaient leur essence à la fin de la seconde Guerre mondiale !

→ Utilisation actuelle de l'H₂ pour les piles à combustible

