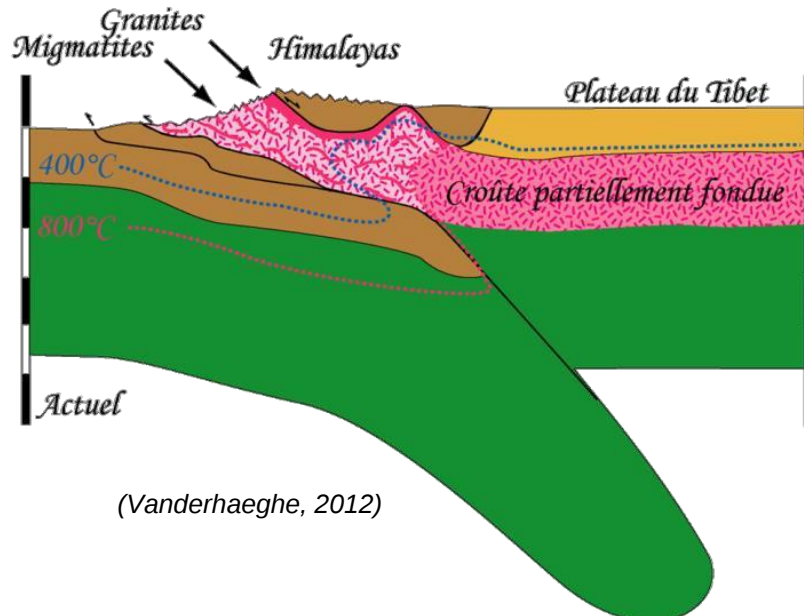


Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



Aurélien Eglinger
aurelien.eglinger@univ-lorraine.fr



Géodynamique:

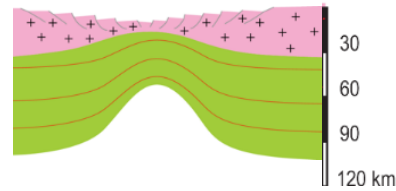
Tectonique des plaques et cycle orogénique



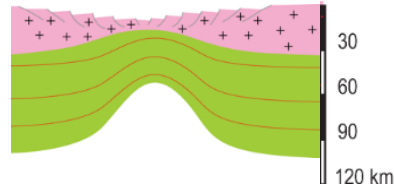
Aurélien Eglinger
aurelien.eglinger@univ-lorraine.fr

Sommaire

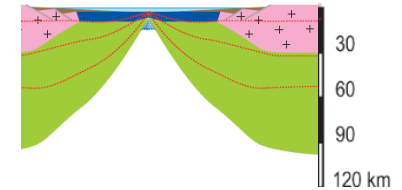
- I. Théories de la tectonique des plaques et cycles orogéniques
- II. Extension de la lithosphère continentale: du rift continental aux marges passives
- III. Ouverture et expansion des océans: relations divergence des plaques océaniques et magmatisme
- IV. Fermeture et subduction:** relations subduction océanique et magmatisme sur marge active
- V. Collision et subduction continentale: évolution thermomécanique de la lithosphère continentale dans les zones de convergence, mécanismes d'épaississement (A. Richard)
- VI. Effondrement des orogènes: de la formation d'un prisme à l'effondrement gravitaire – mécanismes d'exhumation et d'amincissement (A. Richard)



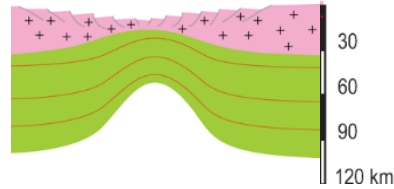
1. Rifting continental



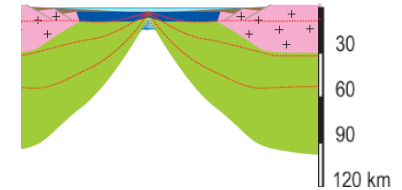
1. Rifting continental



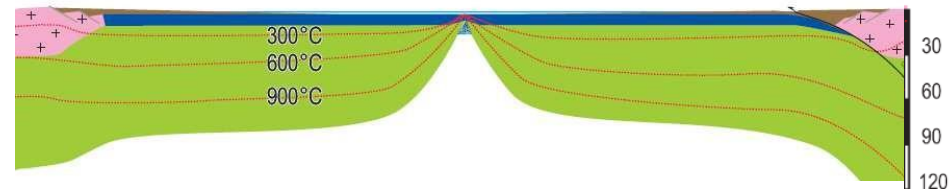
2. Océanisation



1. Rifting continental

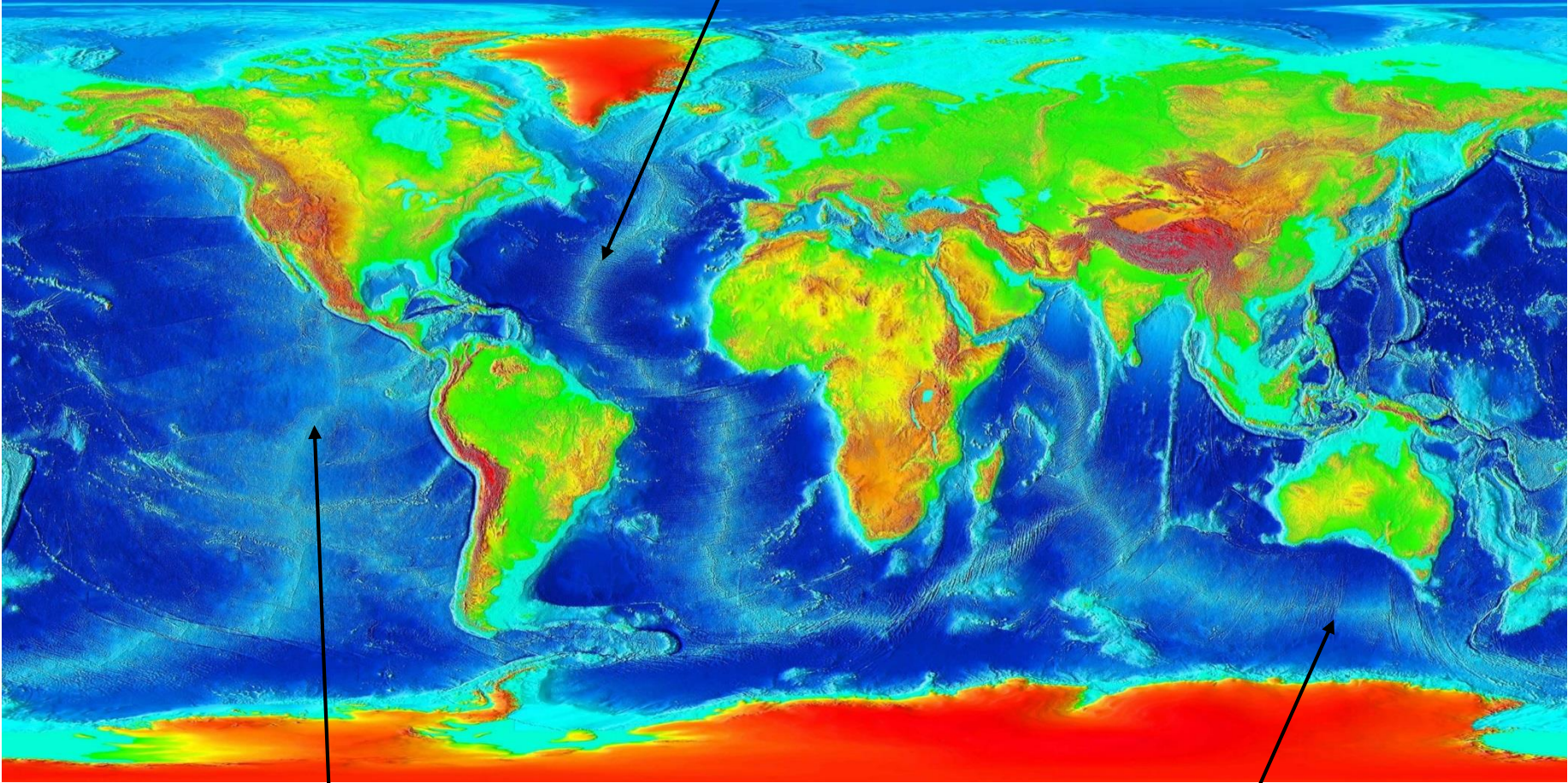


2. Océanisation



3. Expansion océanique

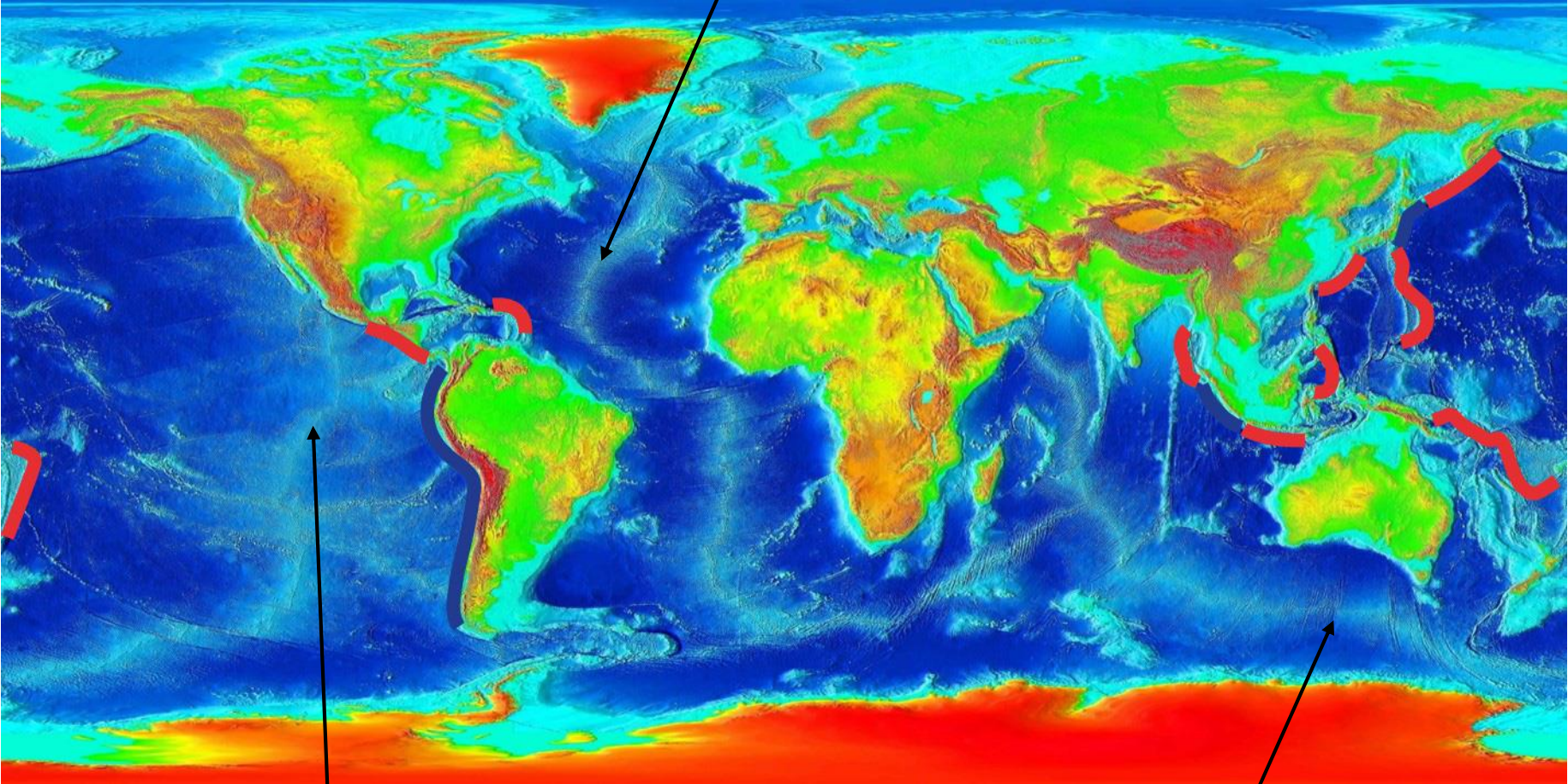
Dorsale **Atlantique: lente**
(< 5 cm/an)



Dorsale **Pacifique: rapide**
(> 9 cm/an)

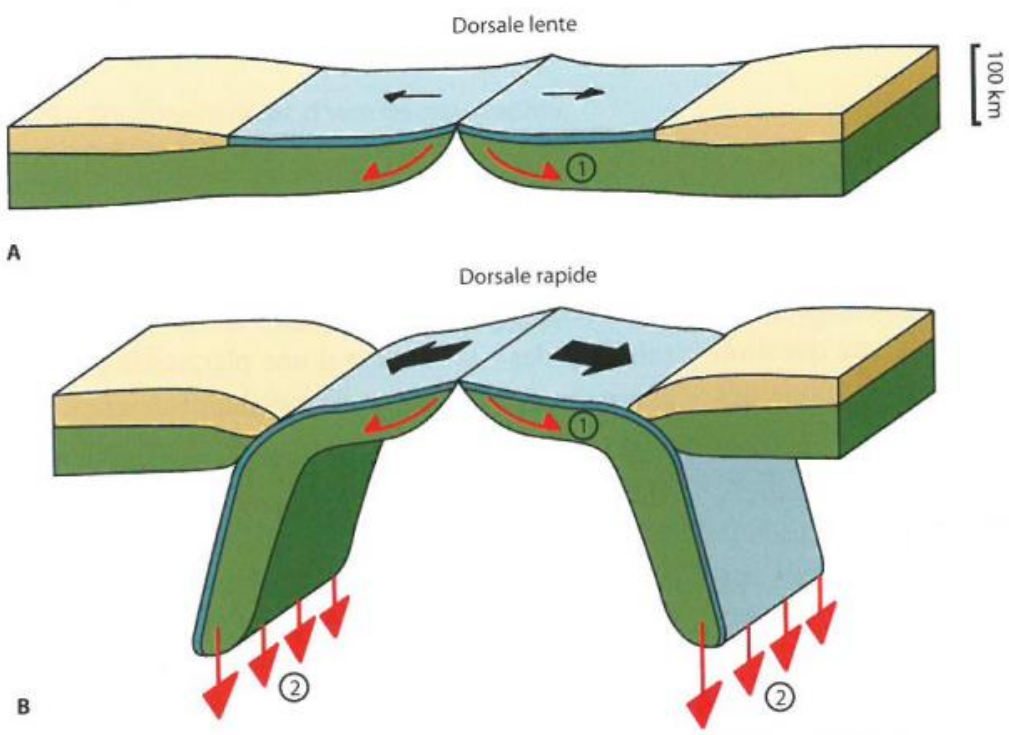
Dorsale **Indienne: intermédiaire**
($5-9$ cm/an)

Dorsale **Atlantique: lente**
(< 5 cm/an)



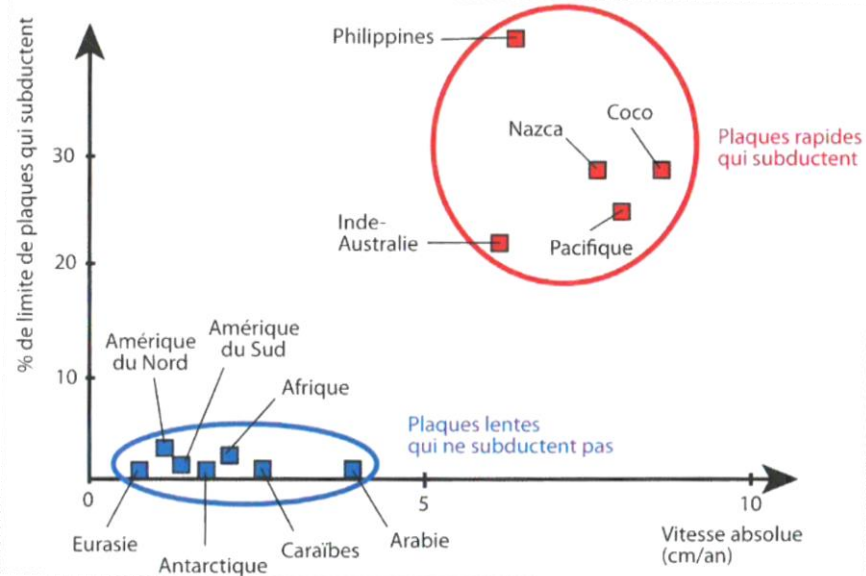
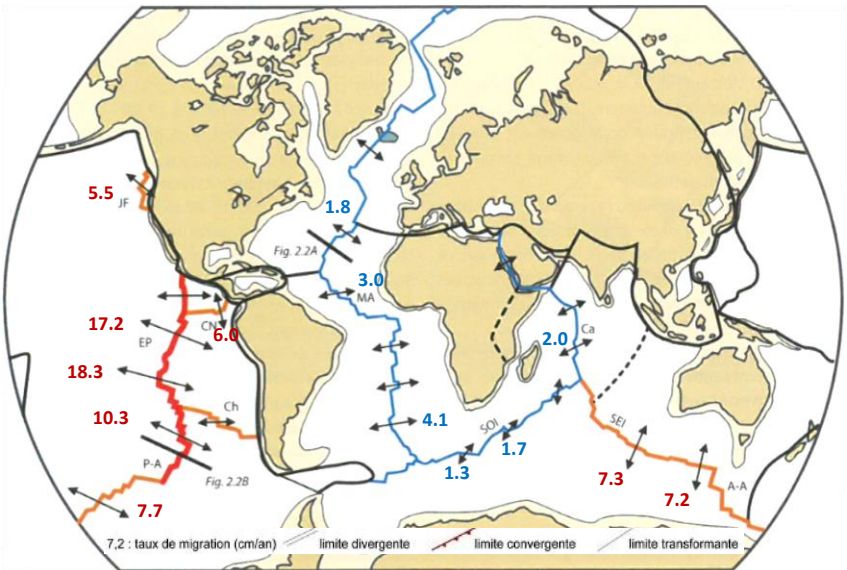
Dorsale **Pacifique: rapide**
(> 9 cm/an)

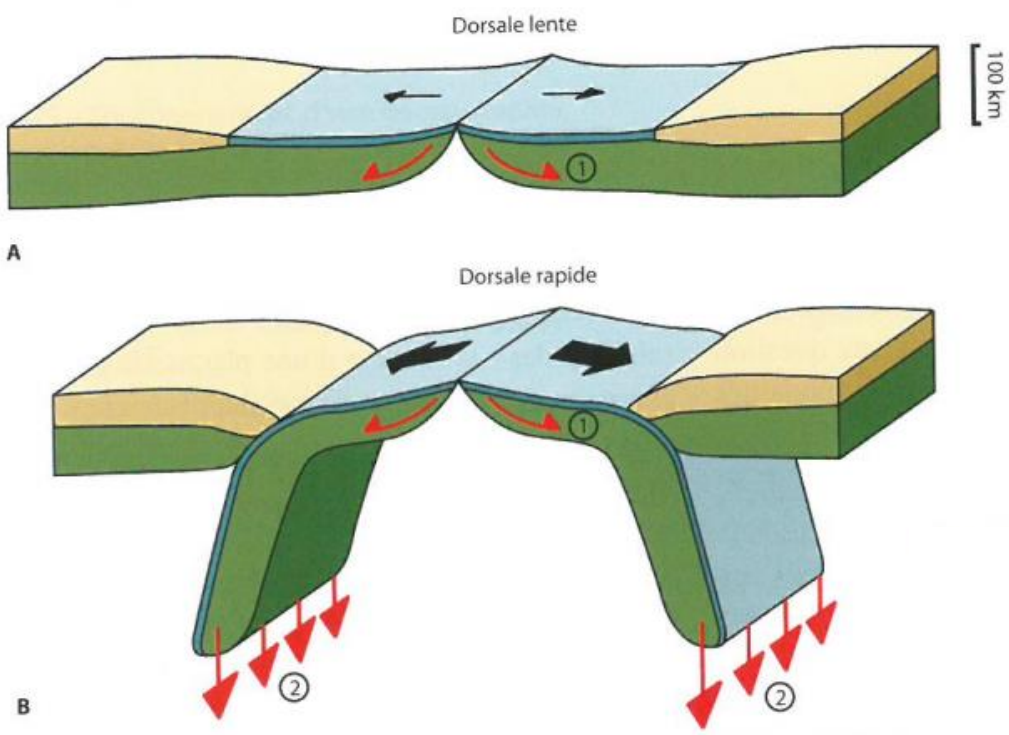
Dorsale **Indienne: intermédiaire**
(5-9 cm/an)



Dorsale lente: seul le glissement gravitaire de la base de la lithosphère sur l'asthénosphère (LVZ)

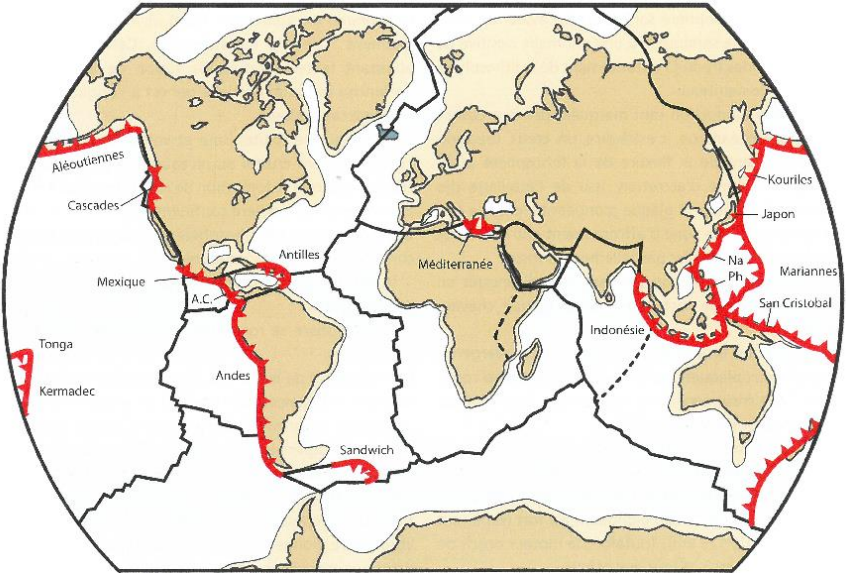
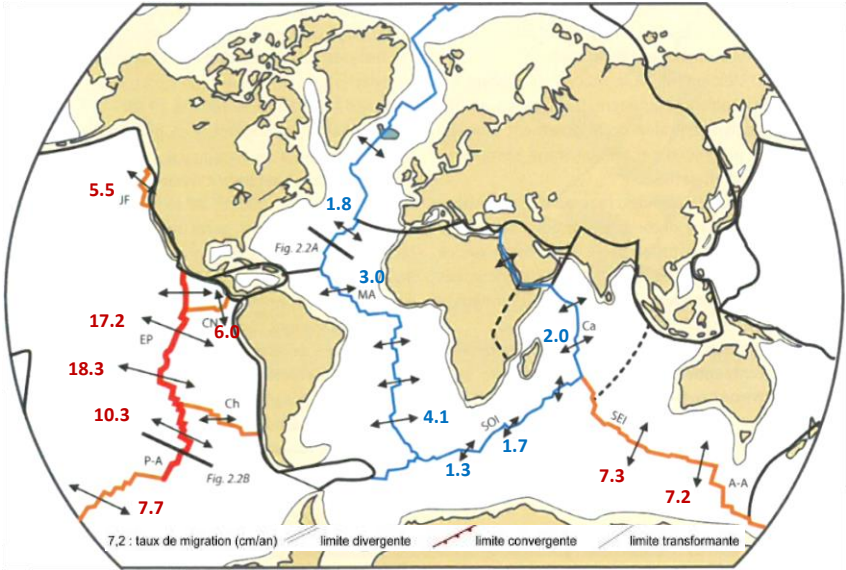
Dorsale rapide: glissement gravitaire + traction de la plaque en **subduction**

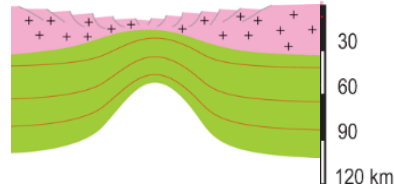




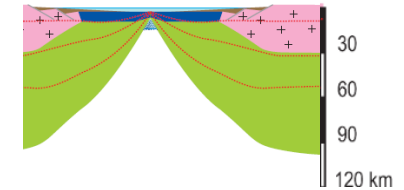
Dorsale lente: seul le **glissement gravitaire** de la base de la lithosphère sur l'asthénosphère (LVZ)

Dorsale rapide: **glissement gravitaire + traction** de la plaque en **subduction**

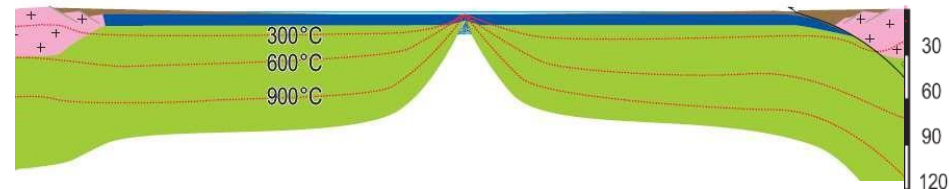




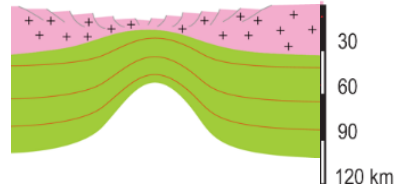
1. Rifting continental



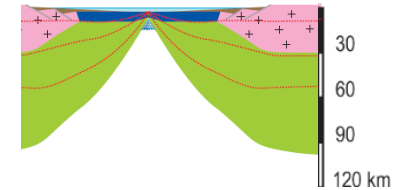
2. Océanisation



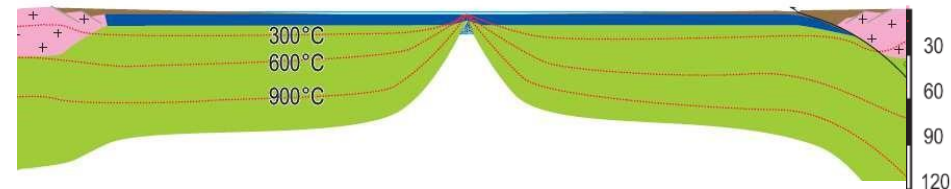
3. Expansion océanique



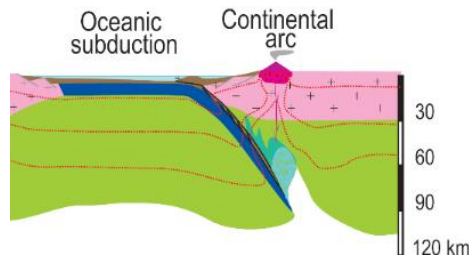
1. Rifting continental



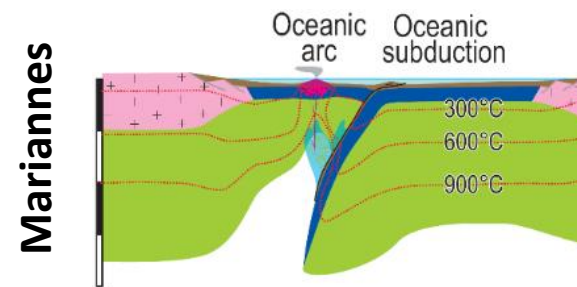
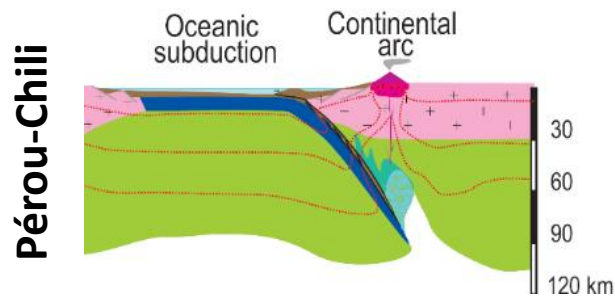
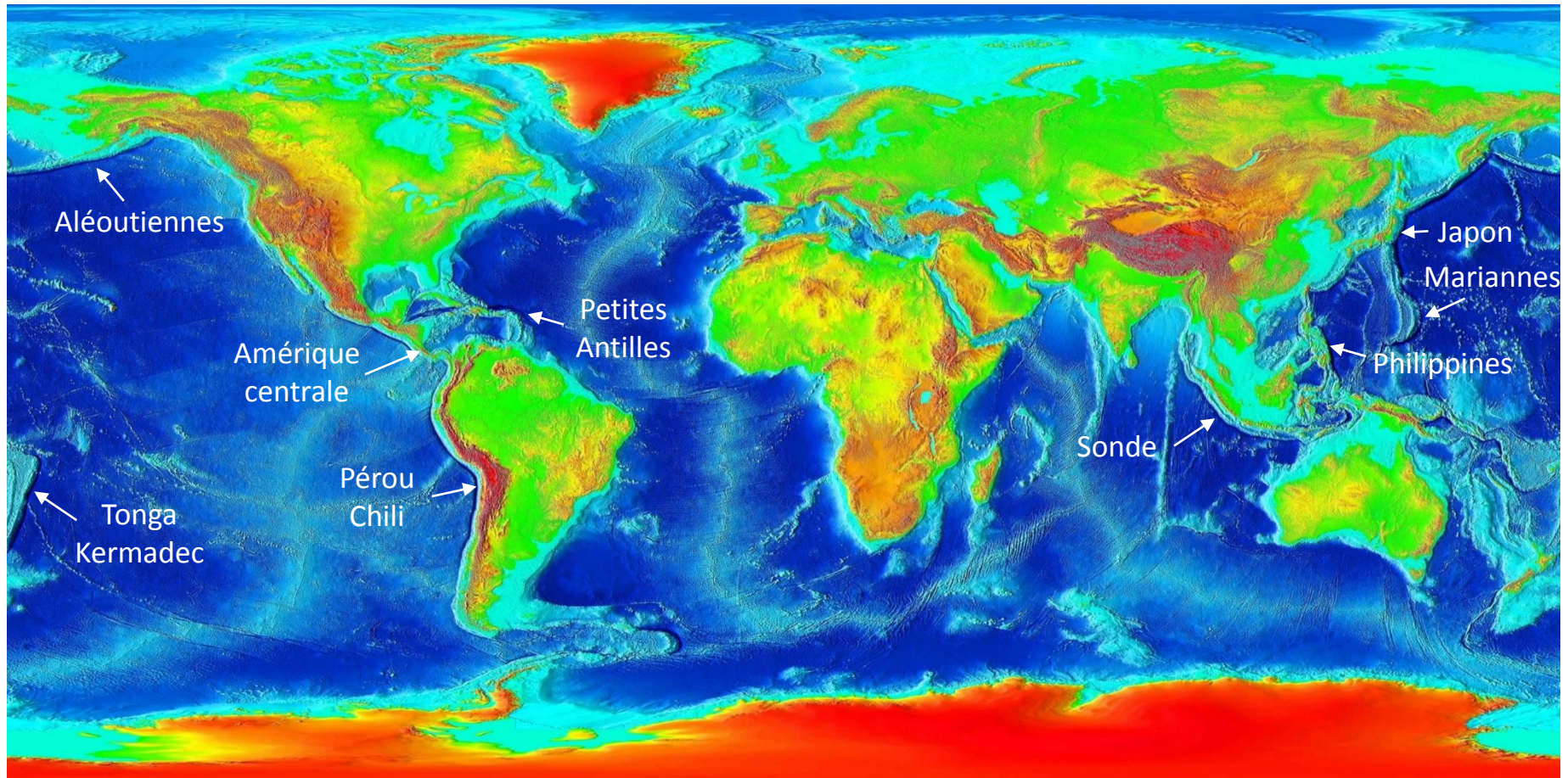
2. Océanisation

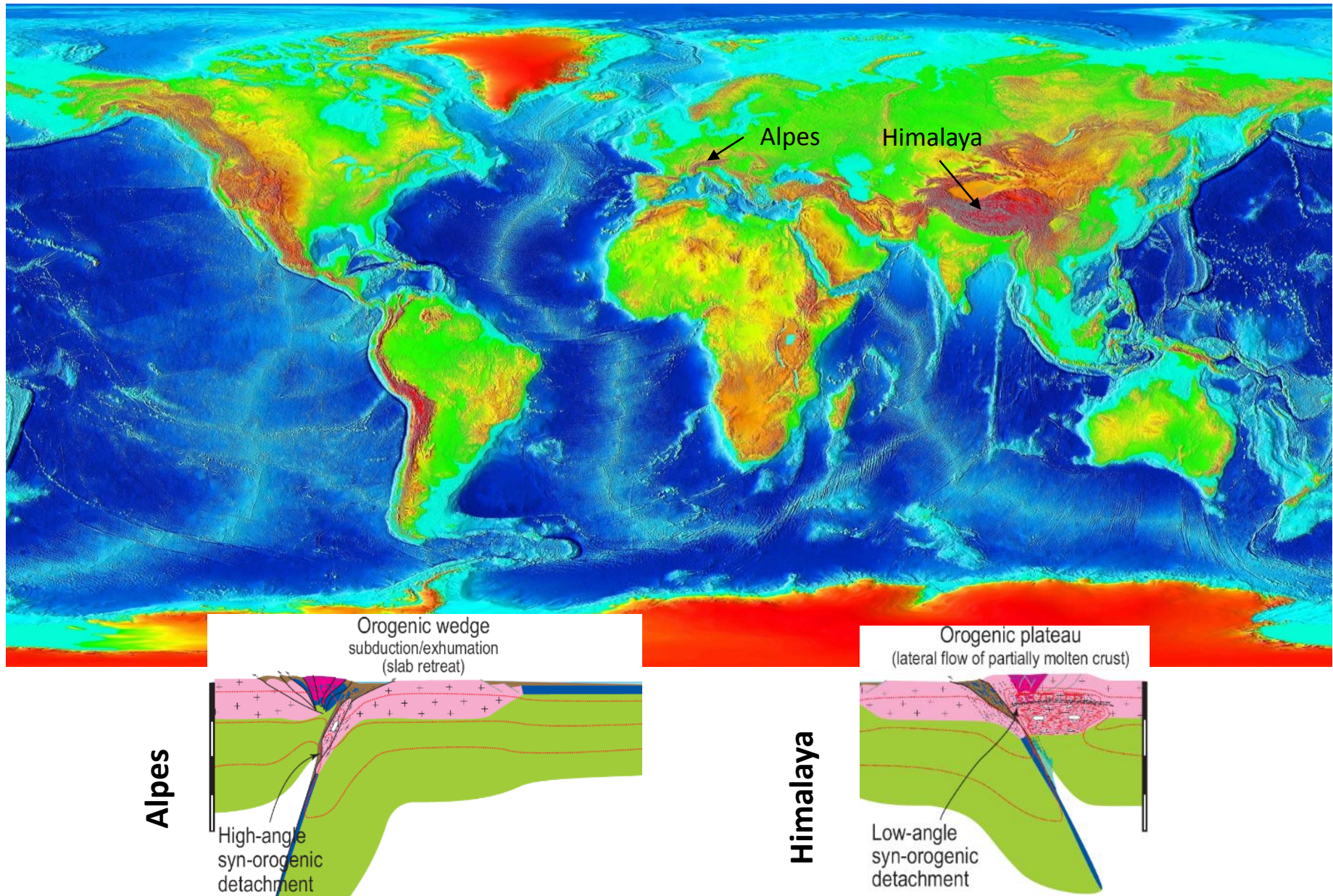


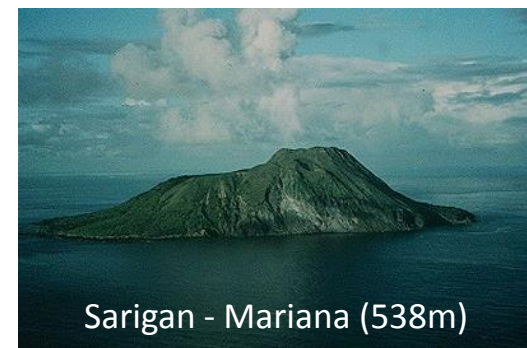
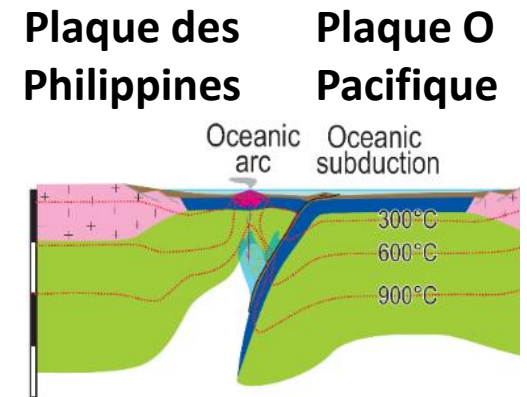
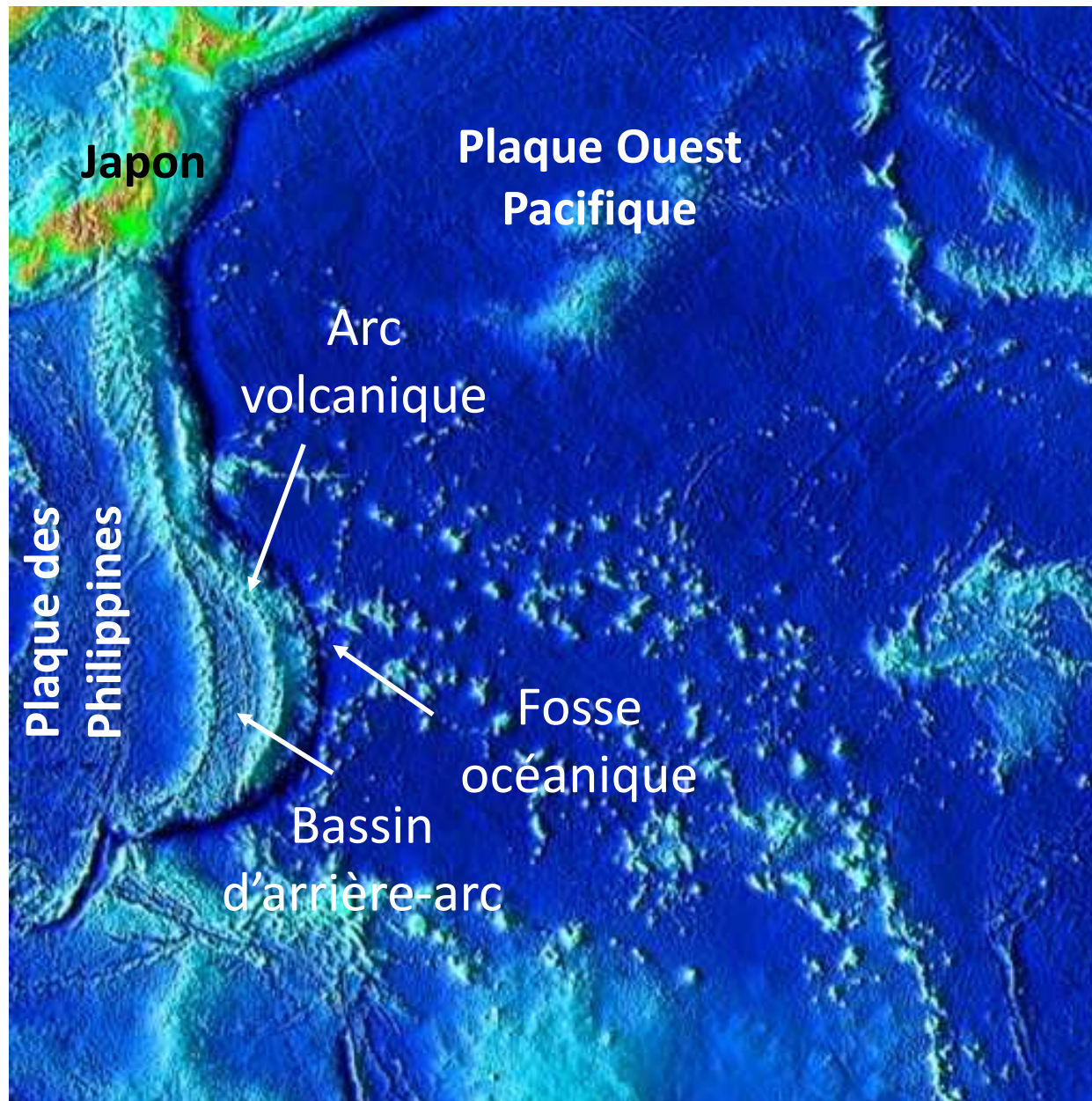
3. Expansion océanique



4. Subduction

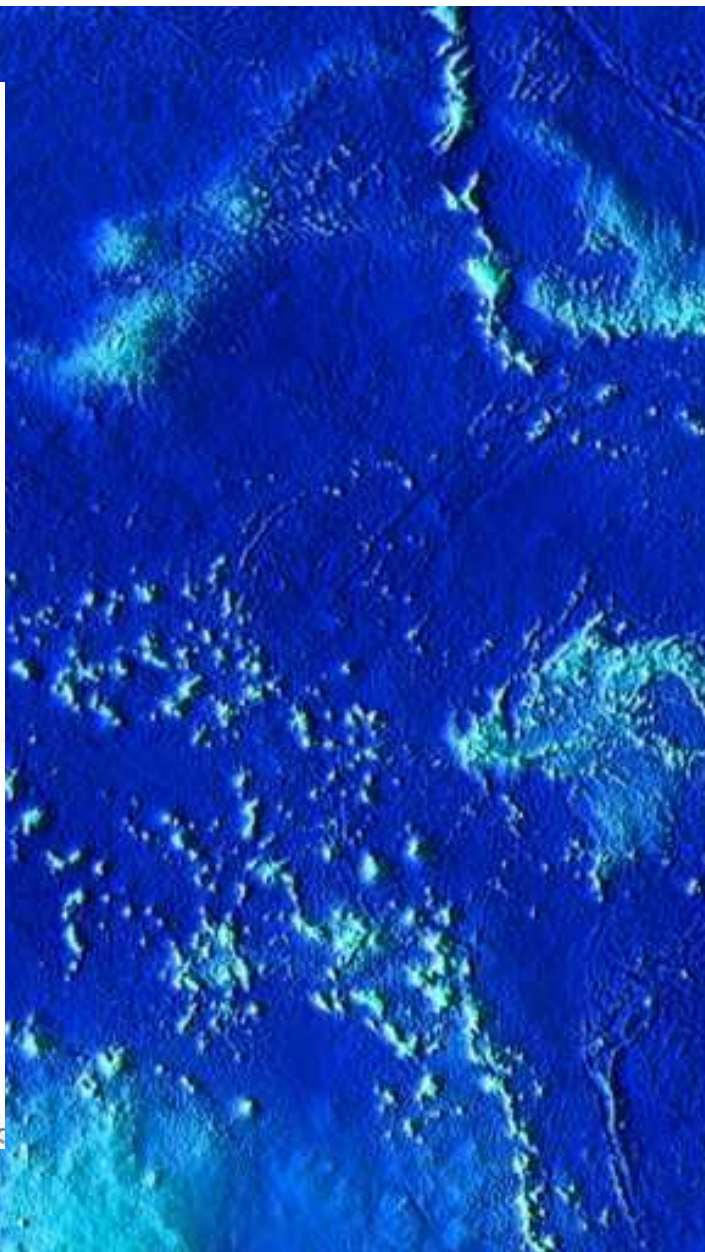
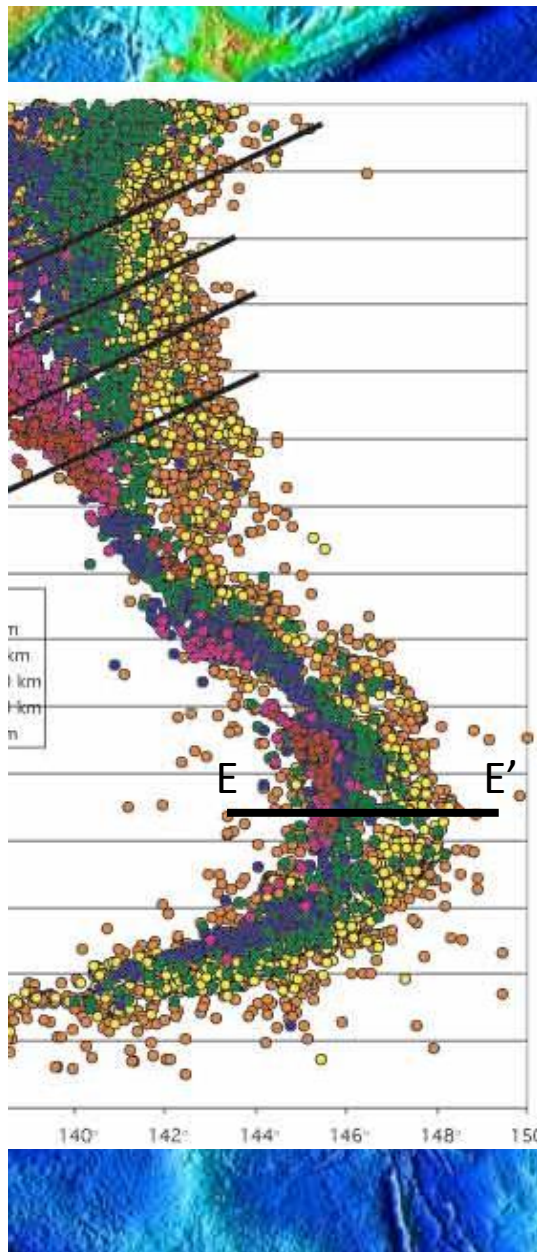




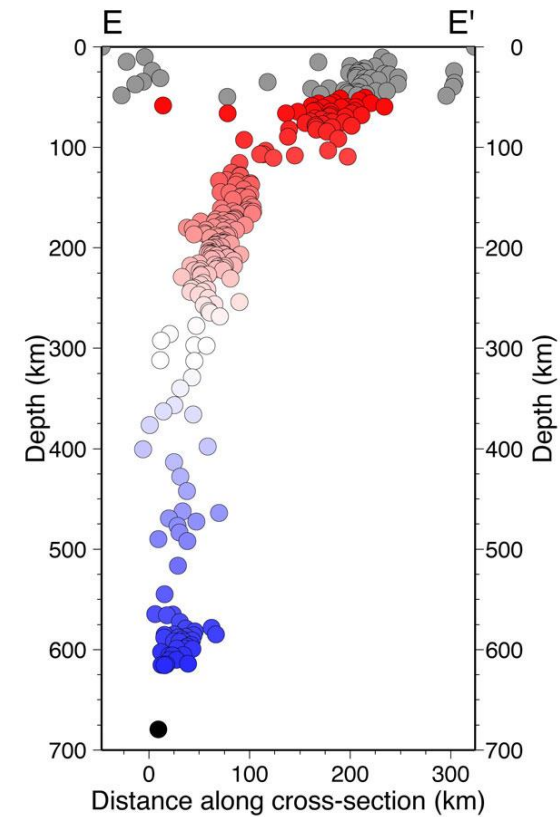
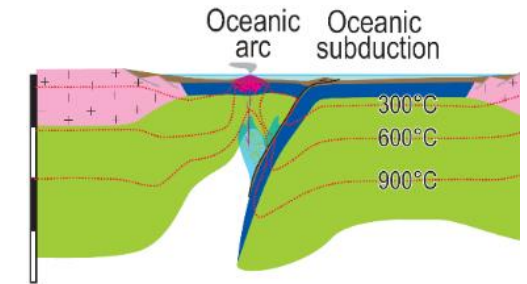


1. Définitions/Rappels

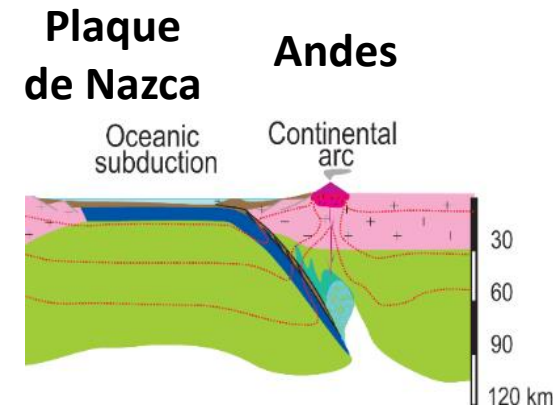
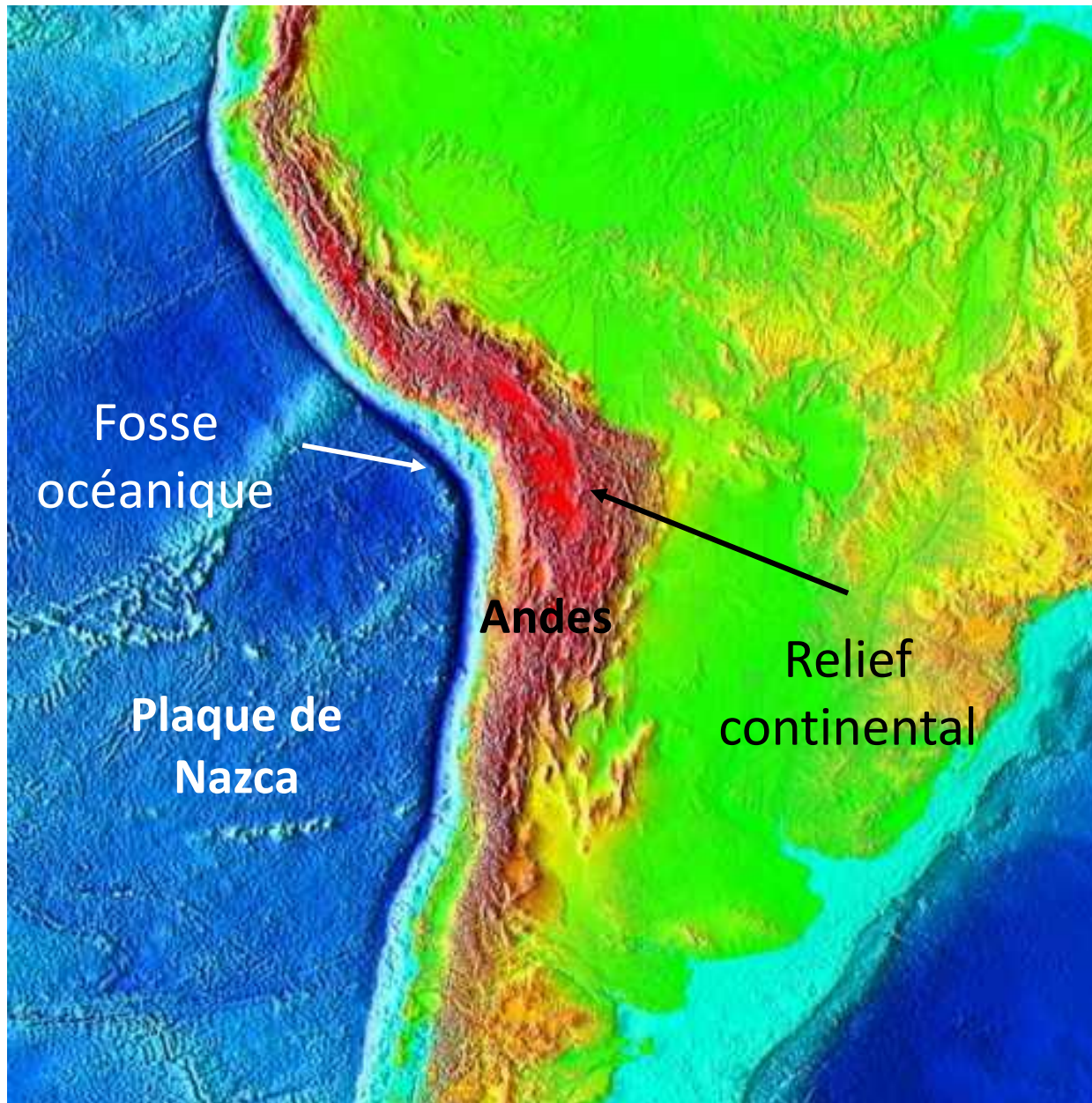
⇒ Marqueurs sismiques de la **subduction Océan-Océan**

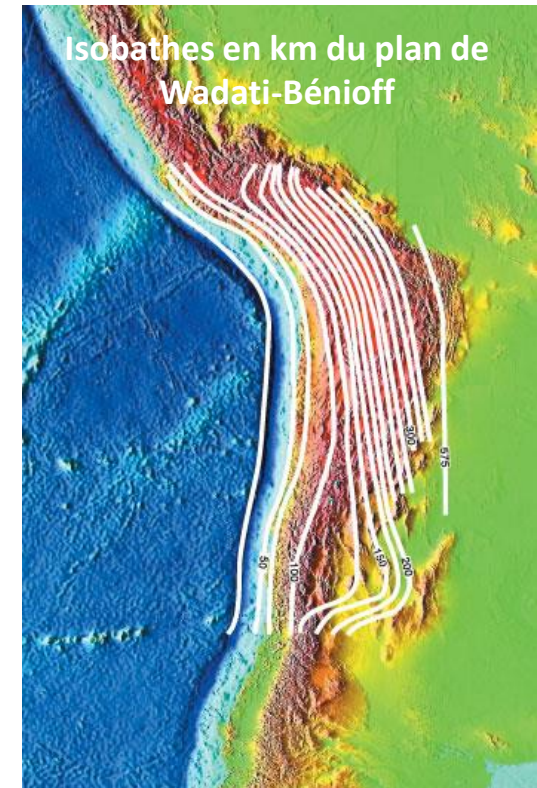
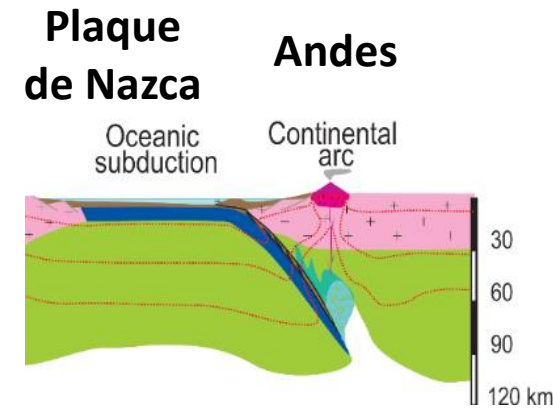
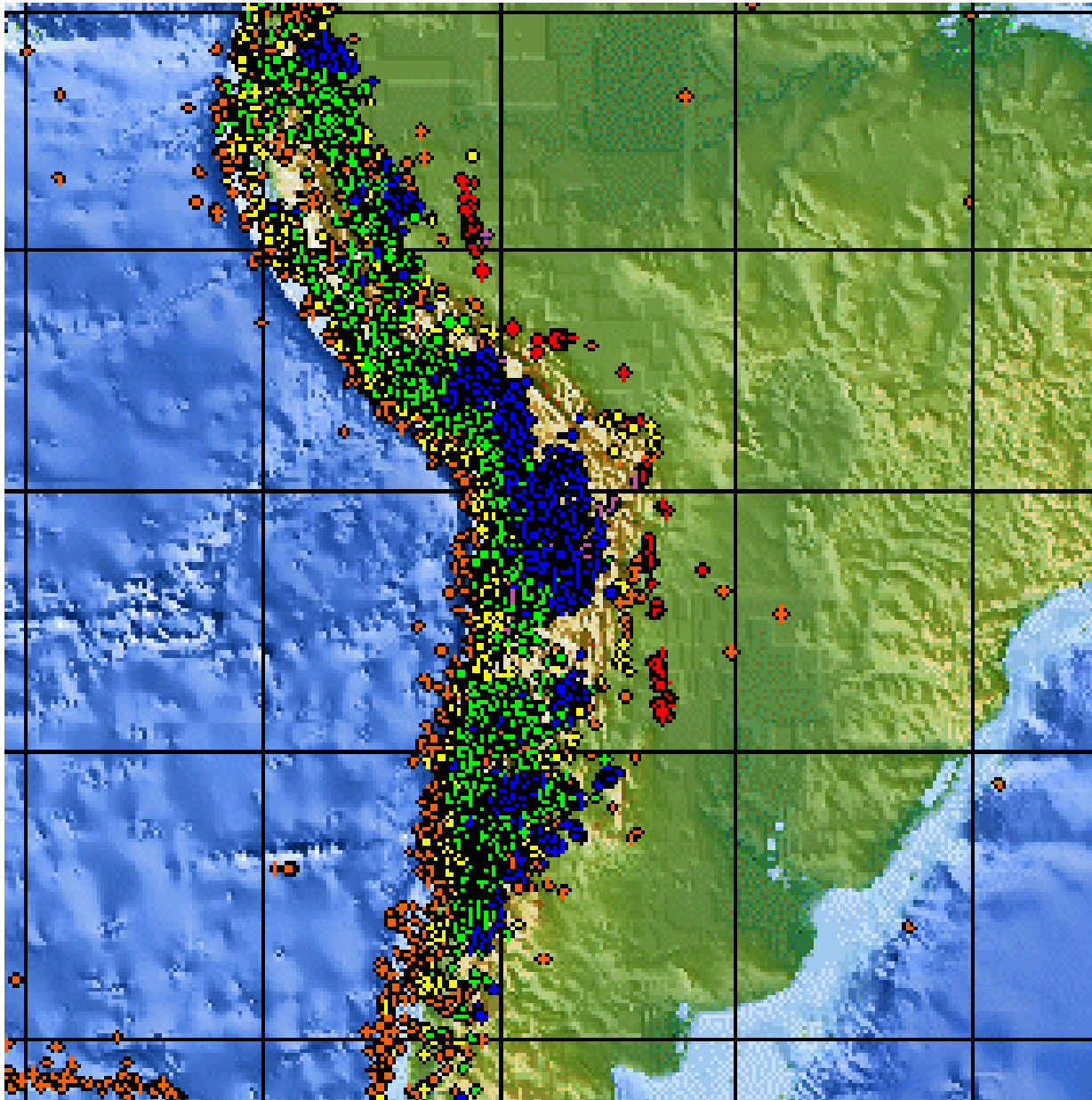


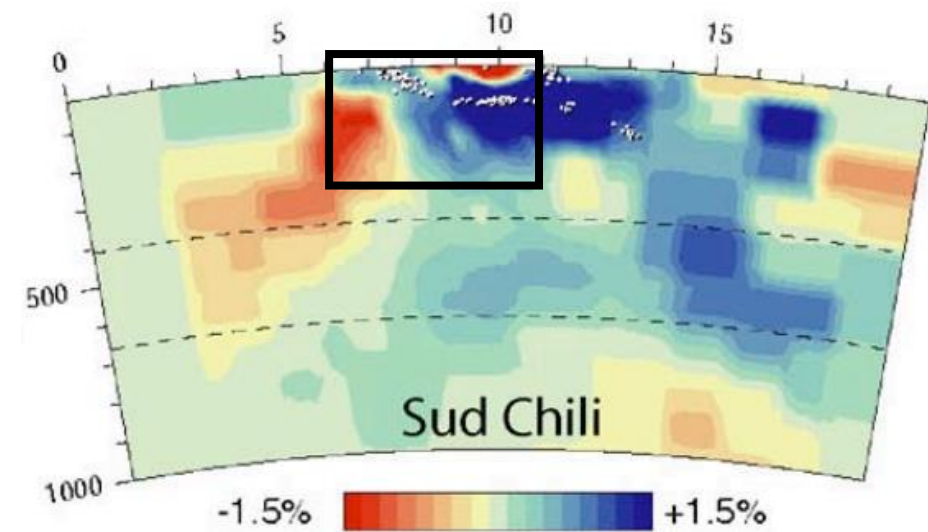
Plaque des Philippines **Plaque Océan Pacifique**



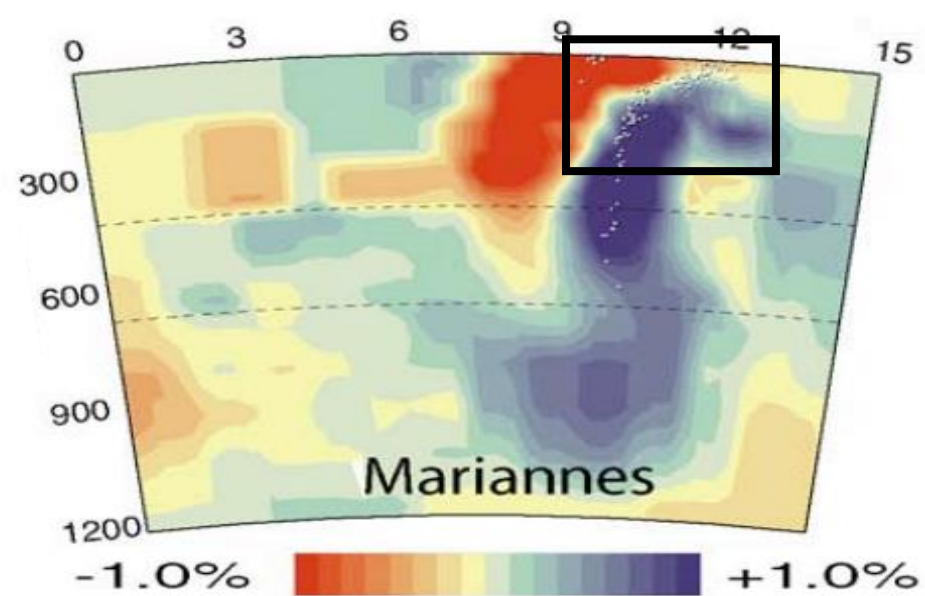
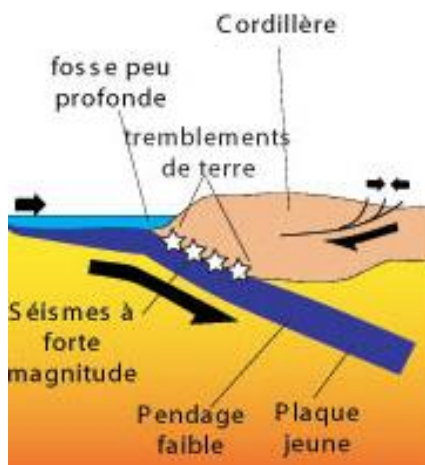
Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



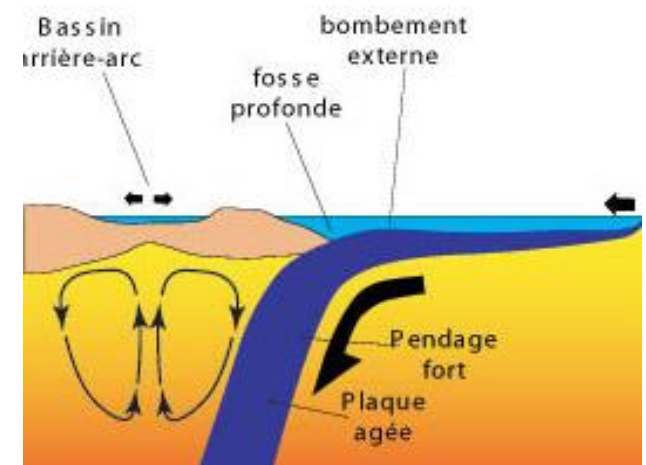


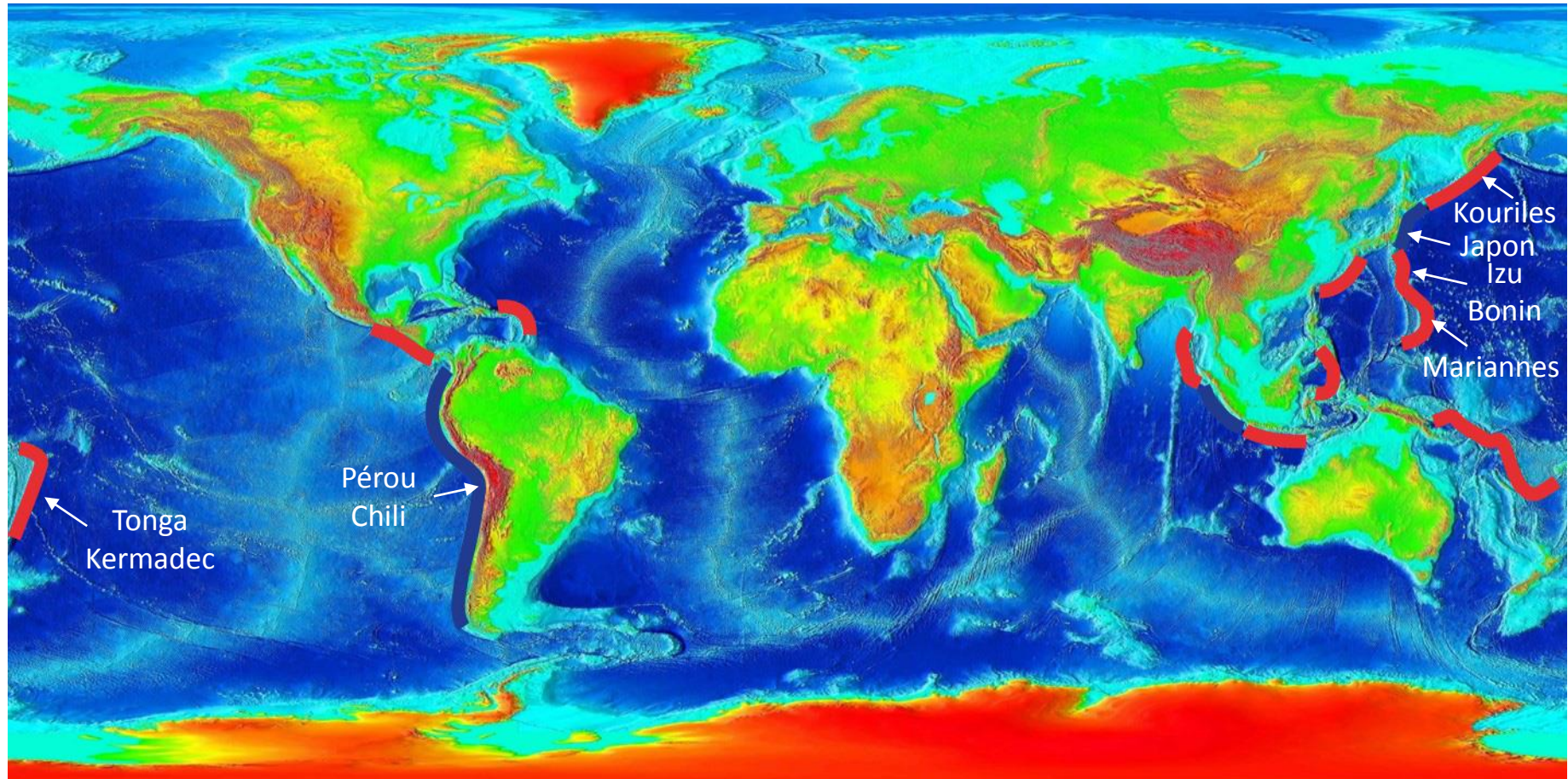


Type Pérou-Chili



Type Mariannes

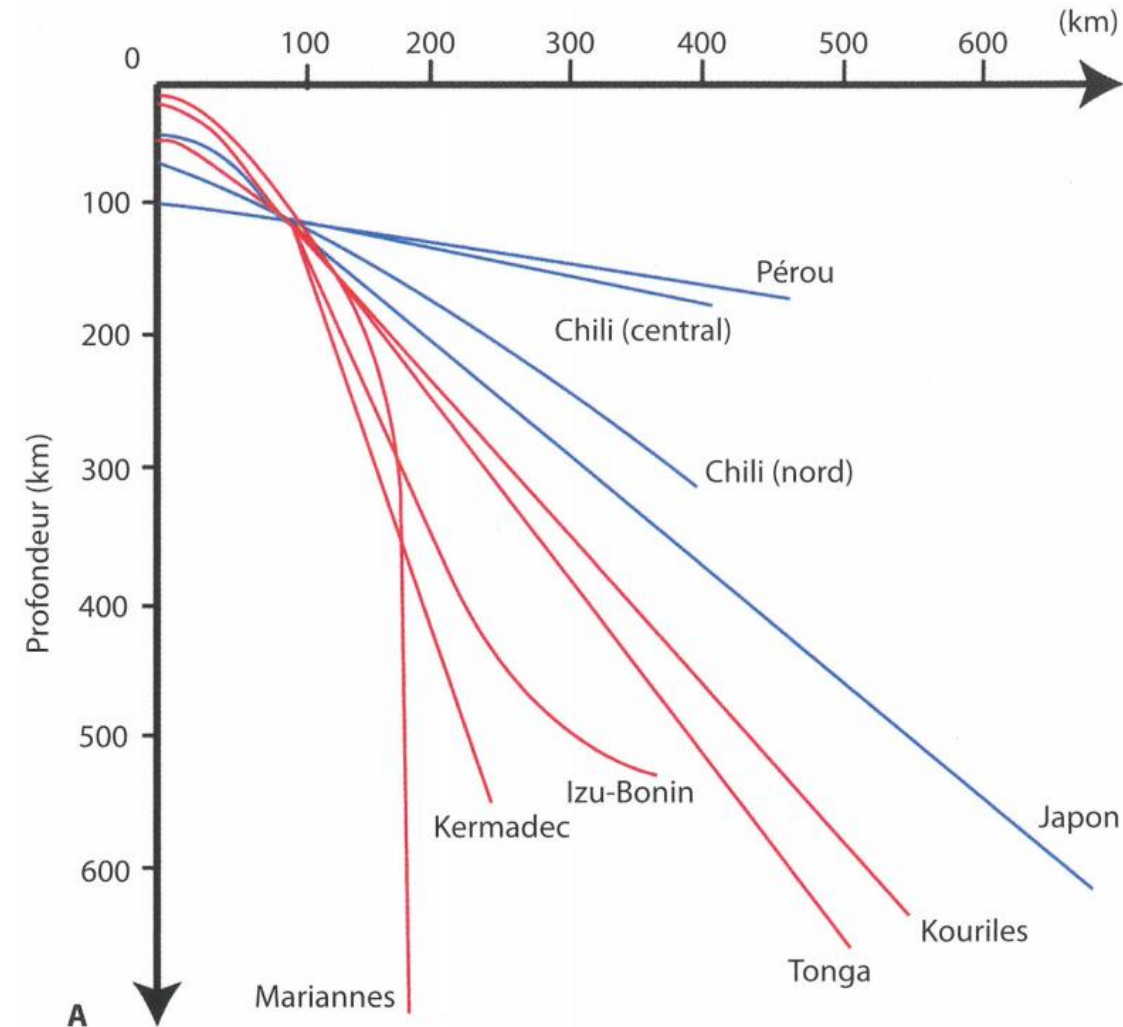




Pendage fort: Mariannes, Izu-Bonin, Tonga, Kermadec, Kouriles

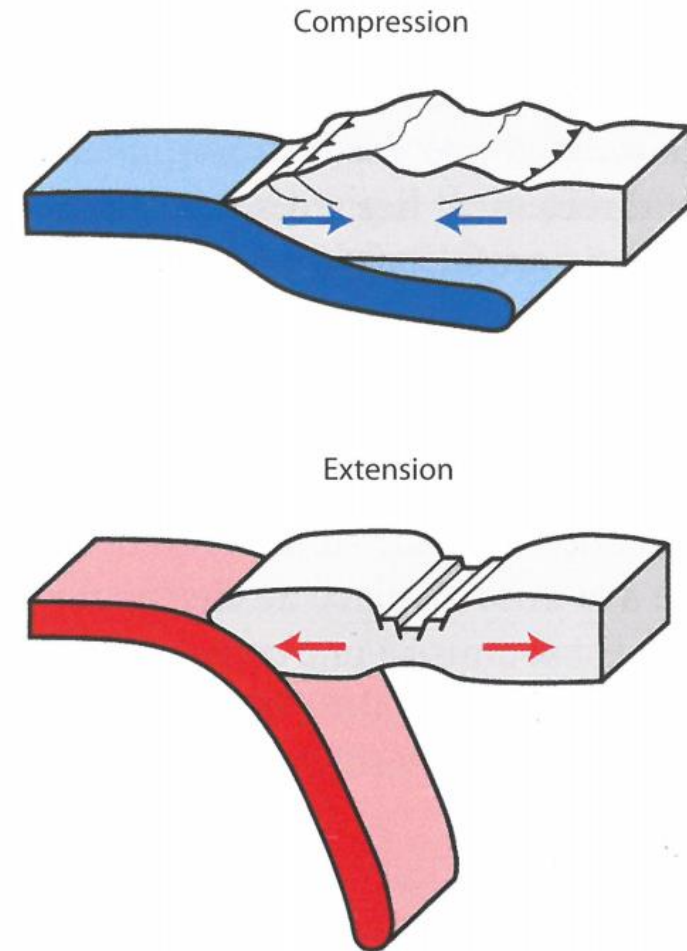
Pendage faible: Pérou, Chili, Japon

2. Données ⇒ Pendage du **slab** et régime **tectonique** de la plaque **chevauchante**

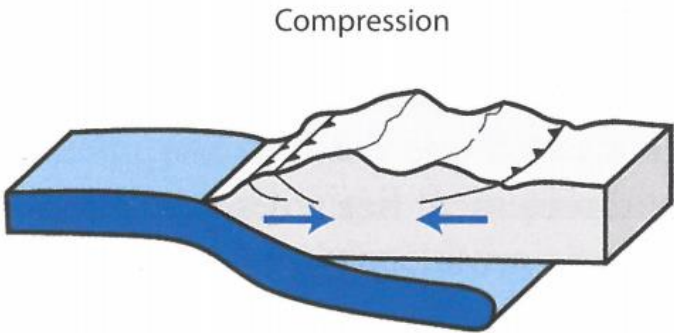
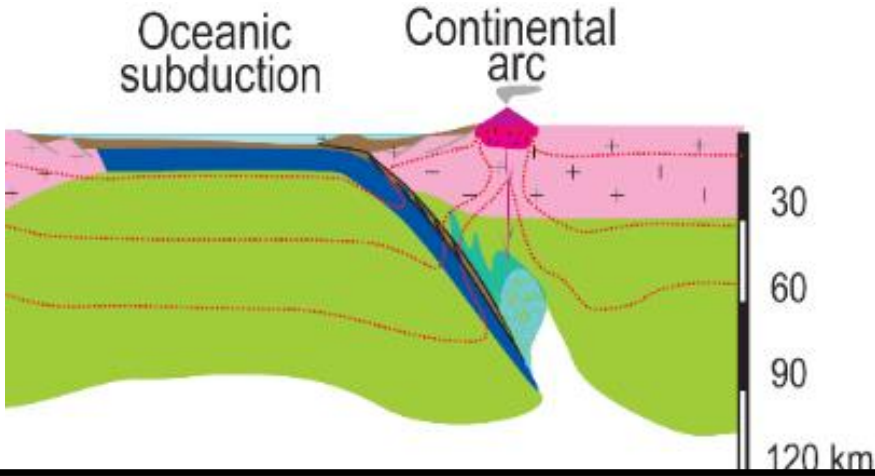


Pendage fort: Mariannes, Izu-Bonin, Tonga, Kermadec, Kouriles

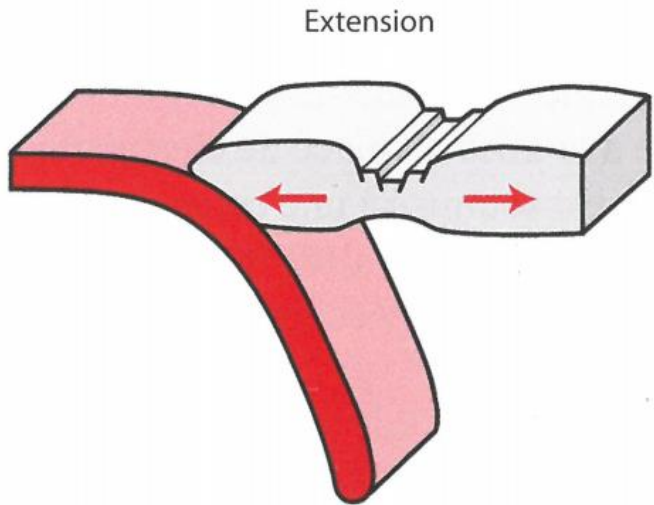
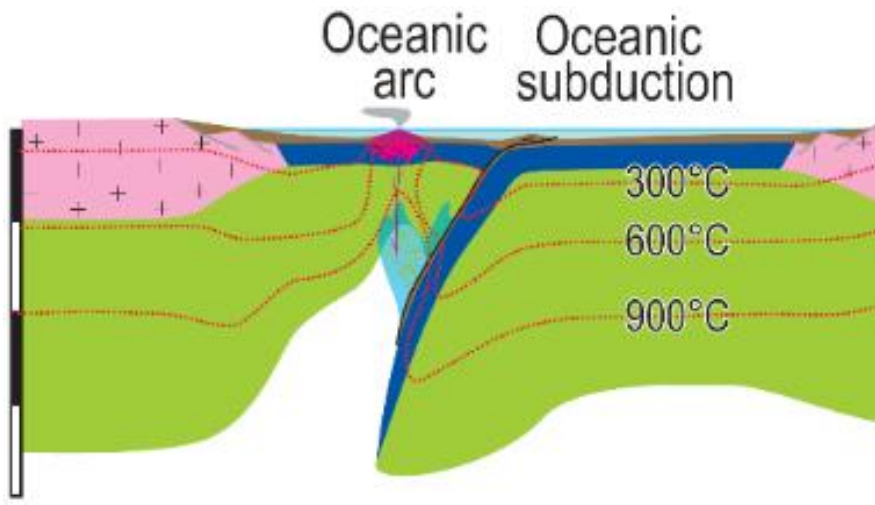
Pendage faible: Pérou, Chili, Japon



Pérou-Chili



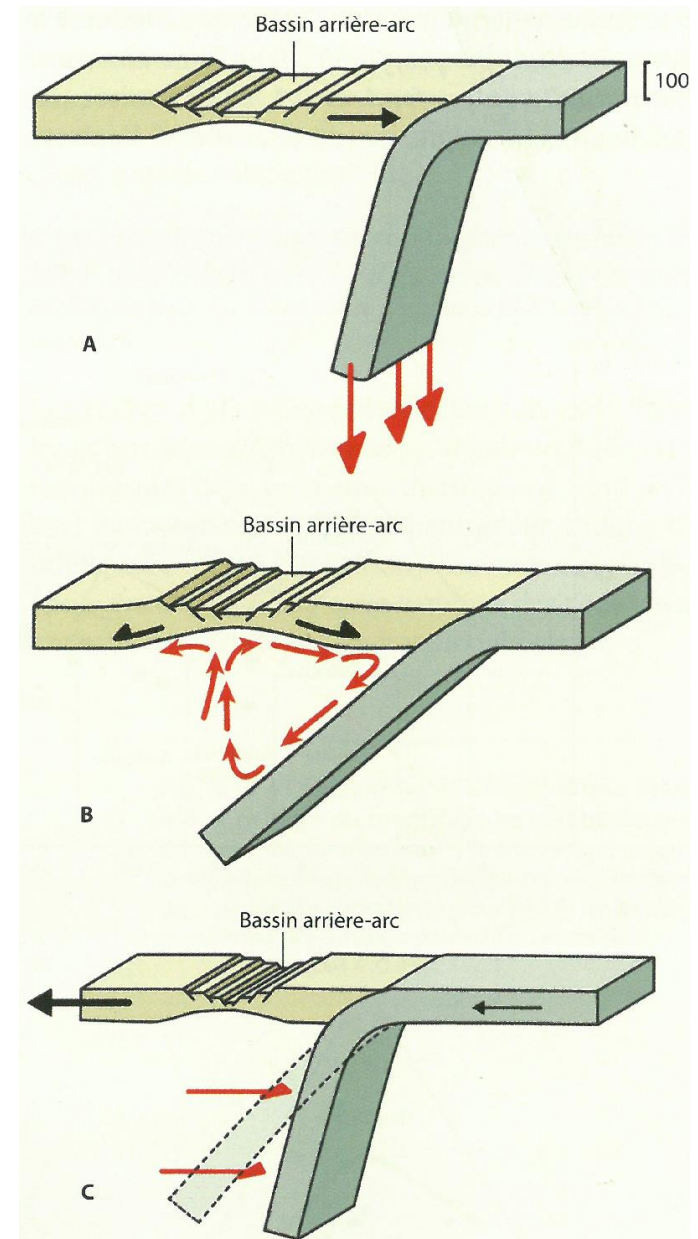
Mariannes

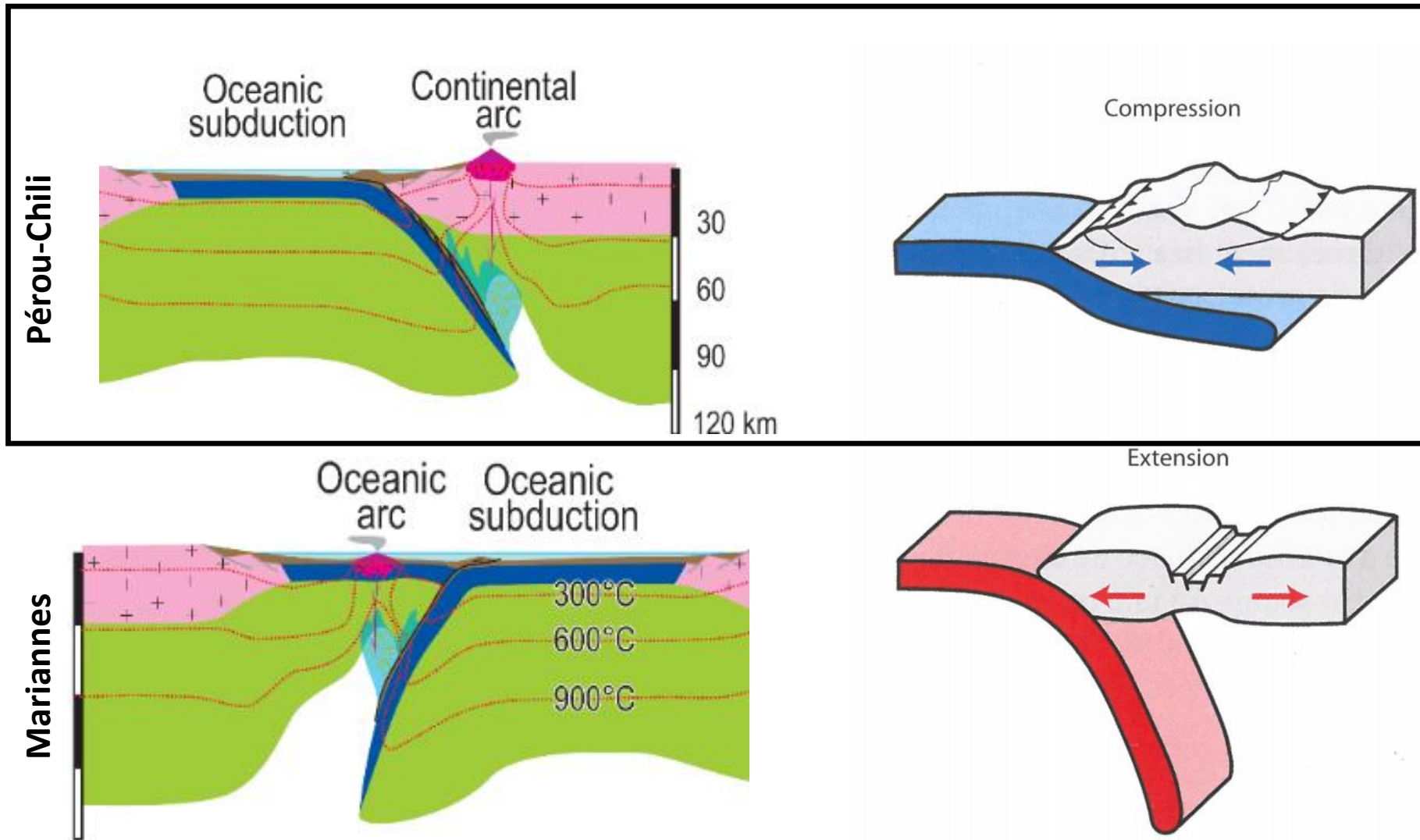


Pendage fort: Mariannes, Izu-Bonin, Tonga, Kermadec, Kouriles

Pendage faible: Pérou, Chili, Japon

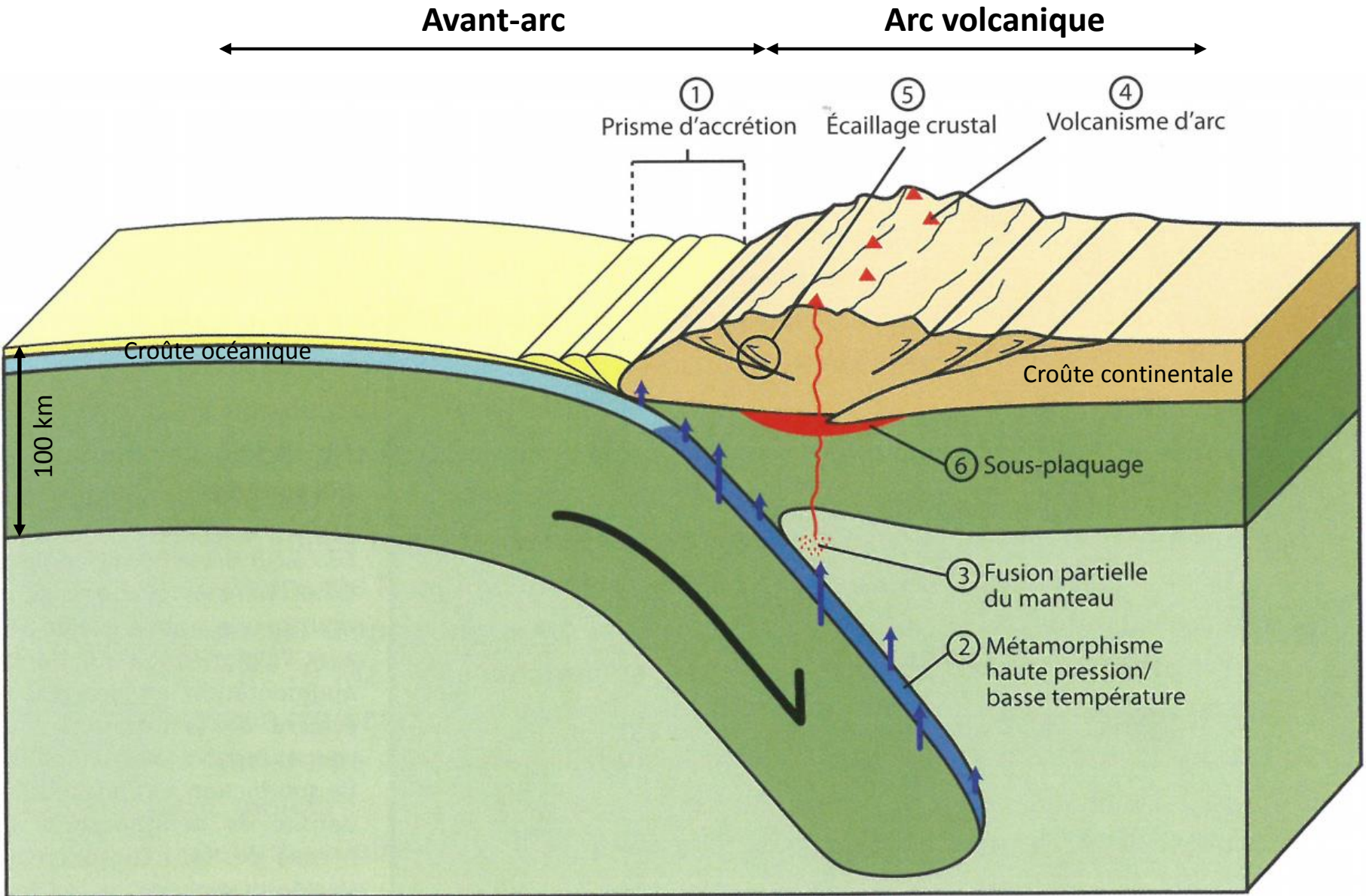
- (A) La **traction** exercée par le panneau plongeant ou slab pull: le slab, lors de son plongement, exercerait une force de succion sur la plaque chevauchante qui se traduirait par une extension arrière-arc (force trop faible).
- (B) La **convection asthénosphérique** ou mantle flow: le plongement de lithosphère rigide induirait des mouvements de convection dans le coin de manteau asthénosphérique et le glissement gravitaire de lithosphère suite au bombement thermique.
- (C) L'**ancrage du panneau** plongeant ou sea anchor: l'extension arrière-arc résulterait ici du mouvement différentiel de la plaque chevauchante et de la plaque plongeante. Le panneau plongeant exercerait une résistance importante (freinage) par son inclinaison et sa portance.

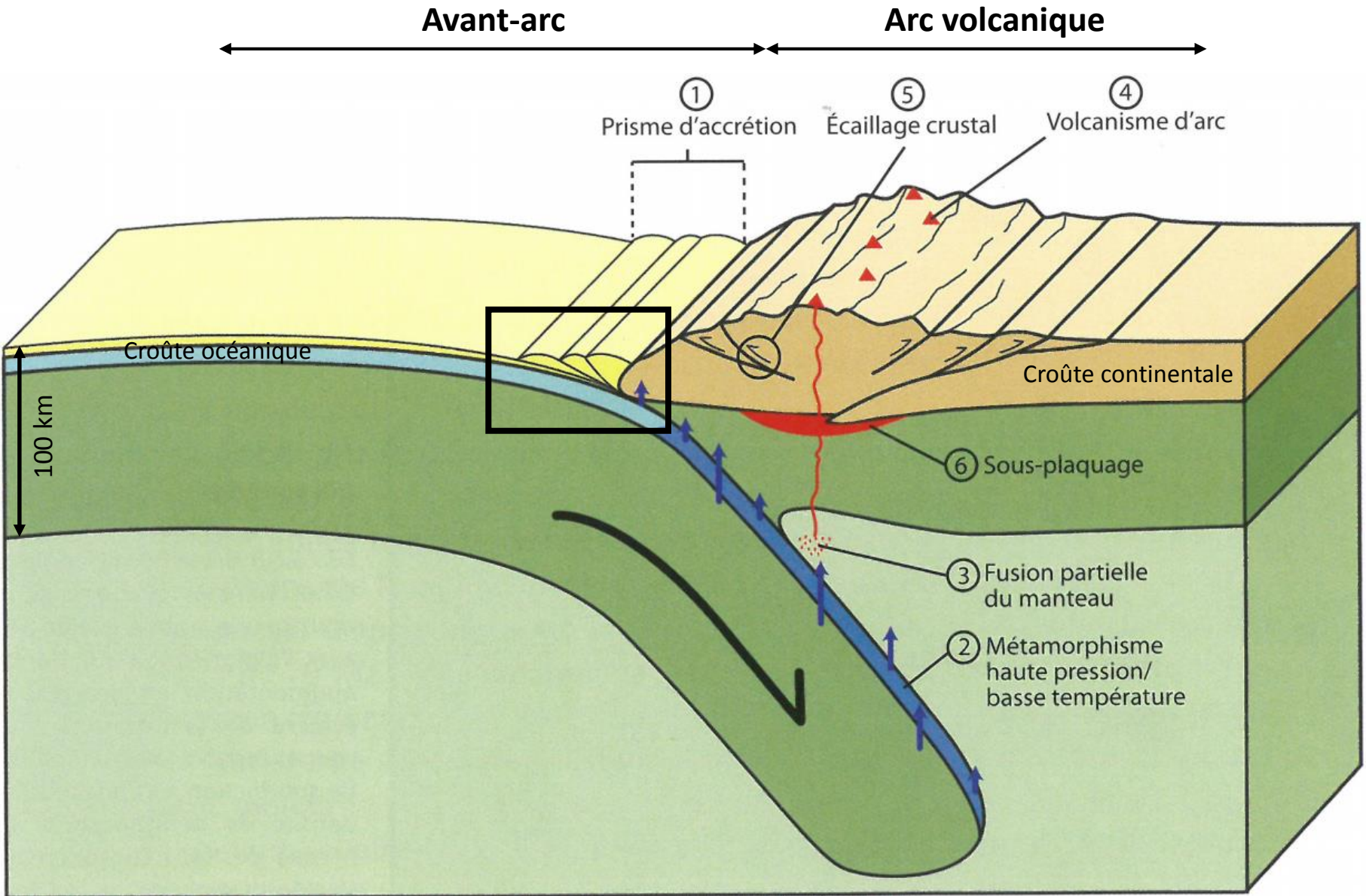


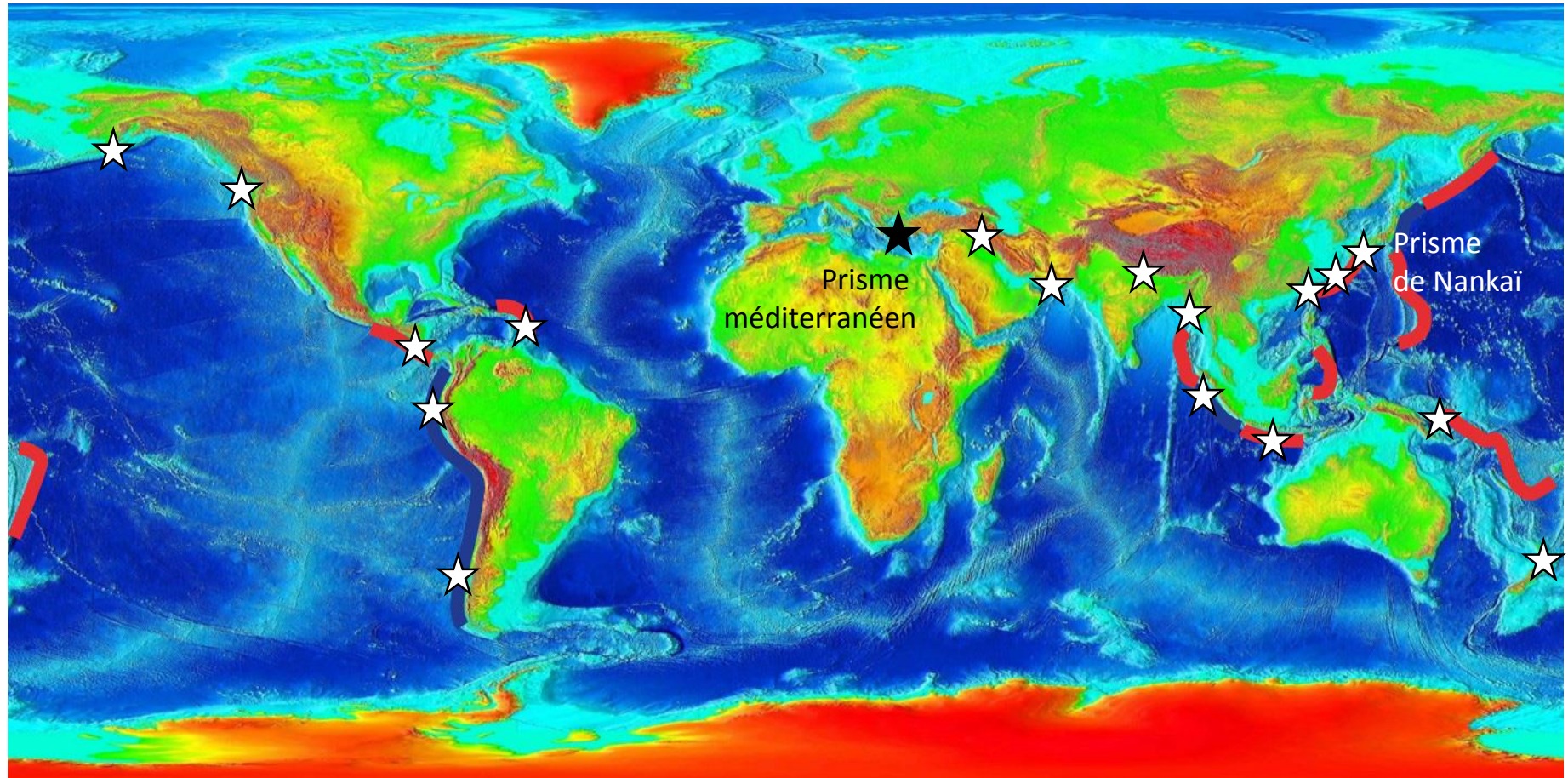


Pendage fort: Mariannes, Izu-Bonin, Tonga, Kermadec, Kouriles

Pendage faible: Pérou, Chili, Japon

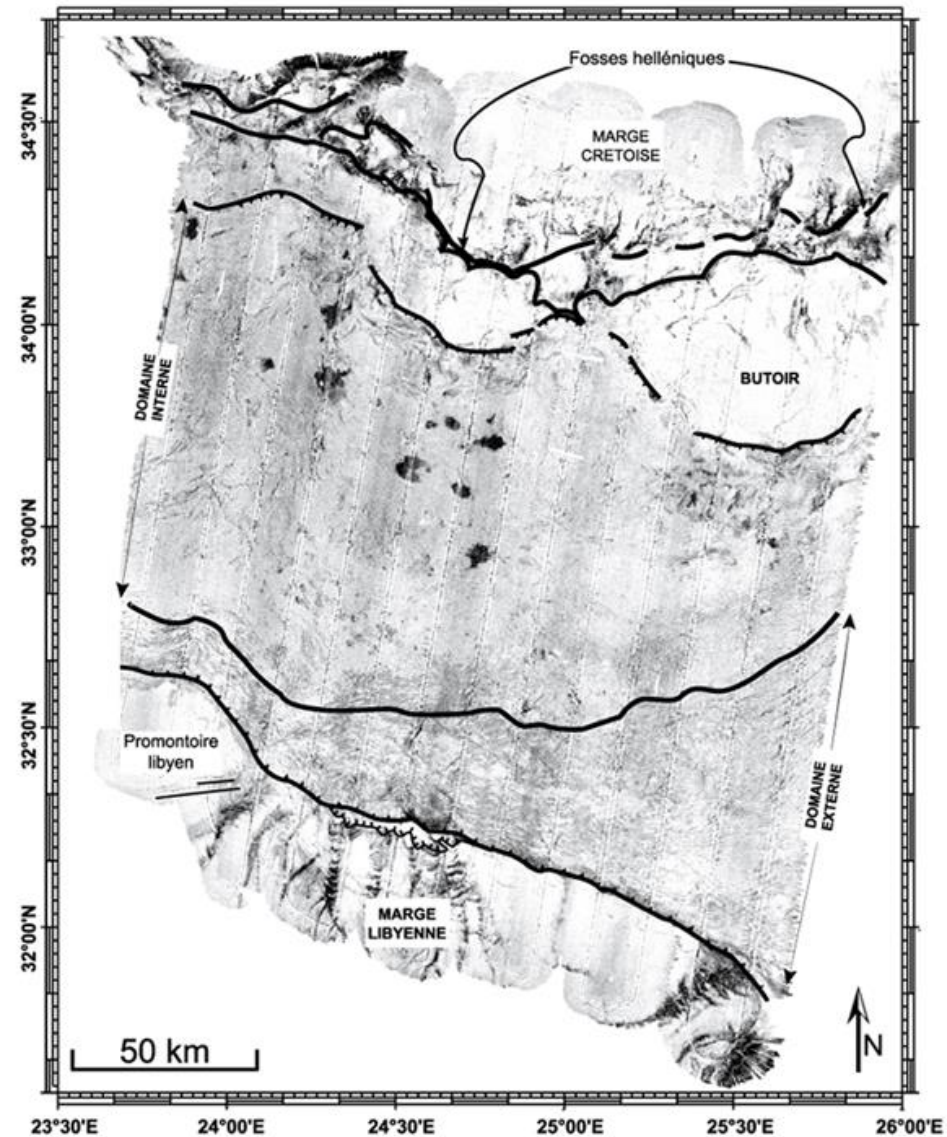
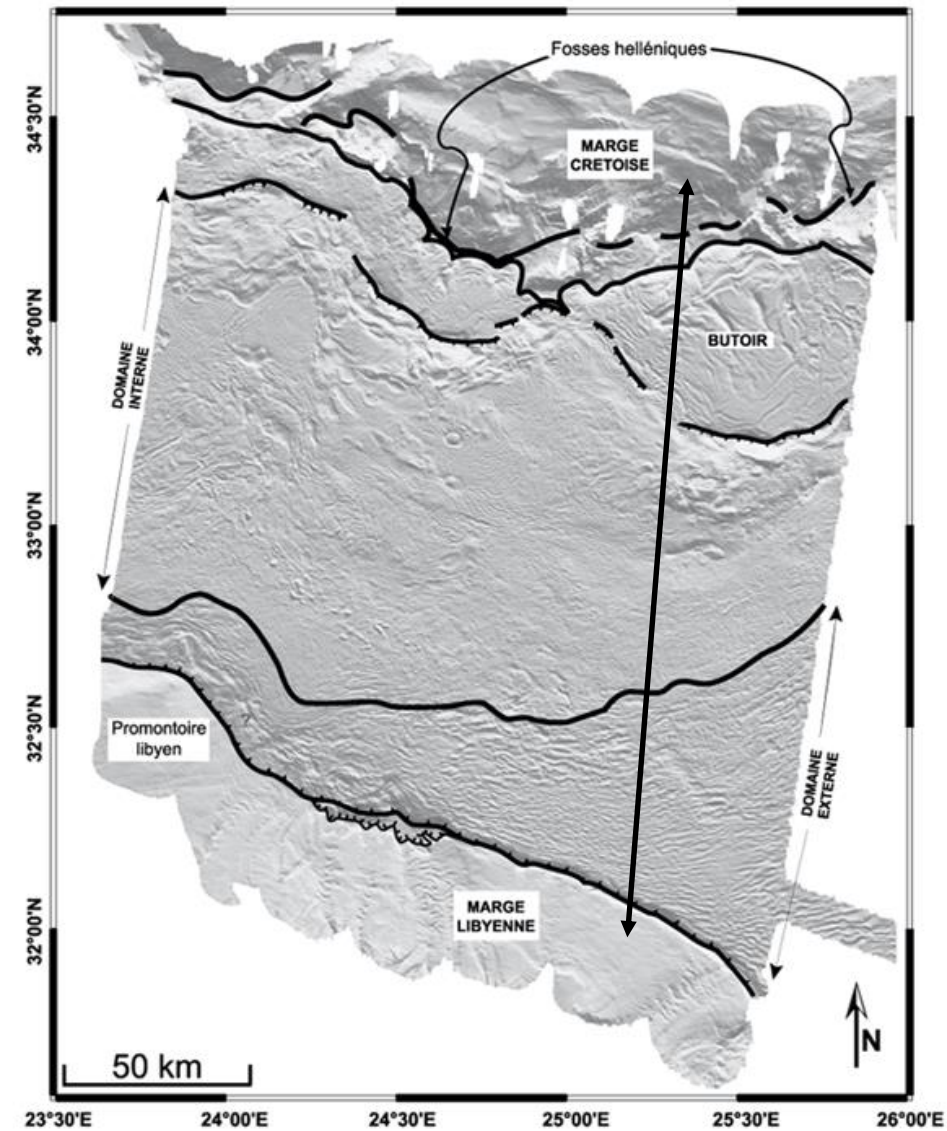




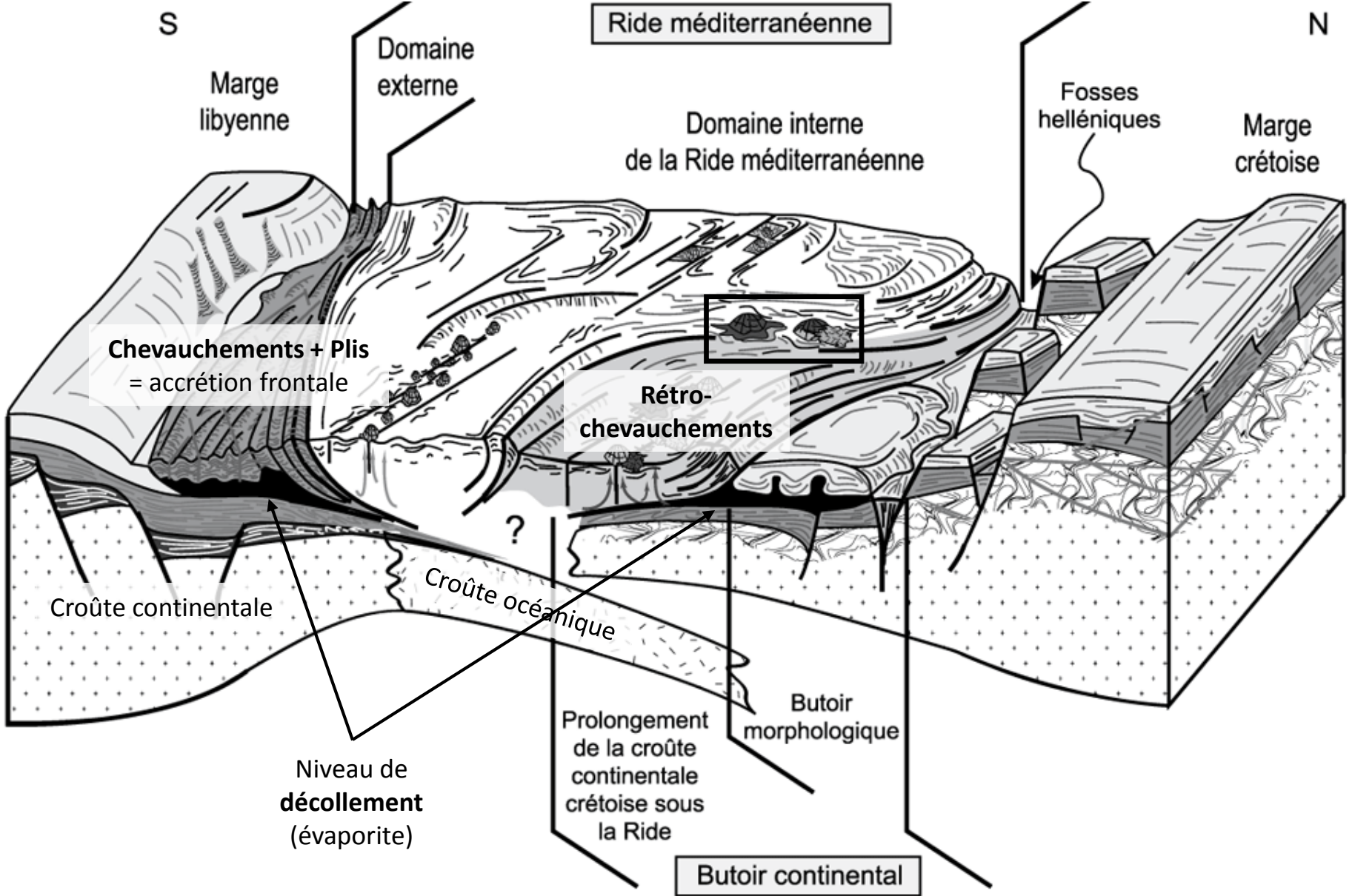


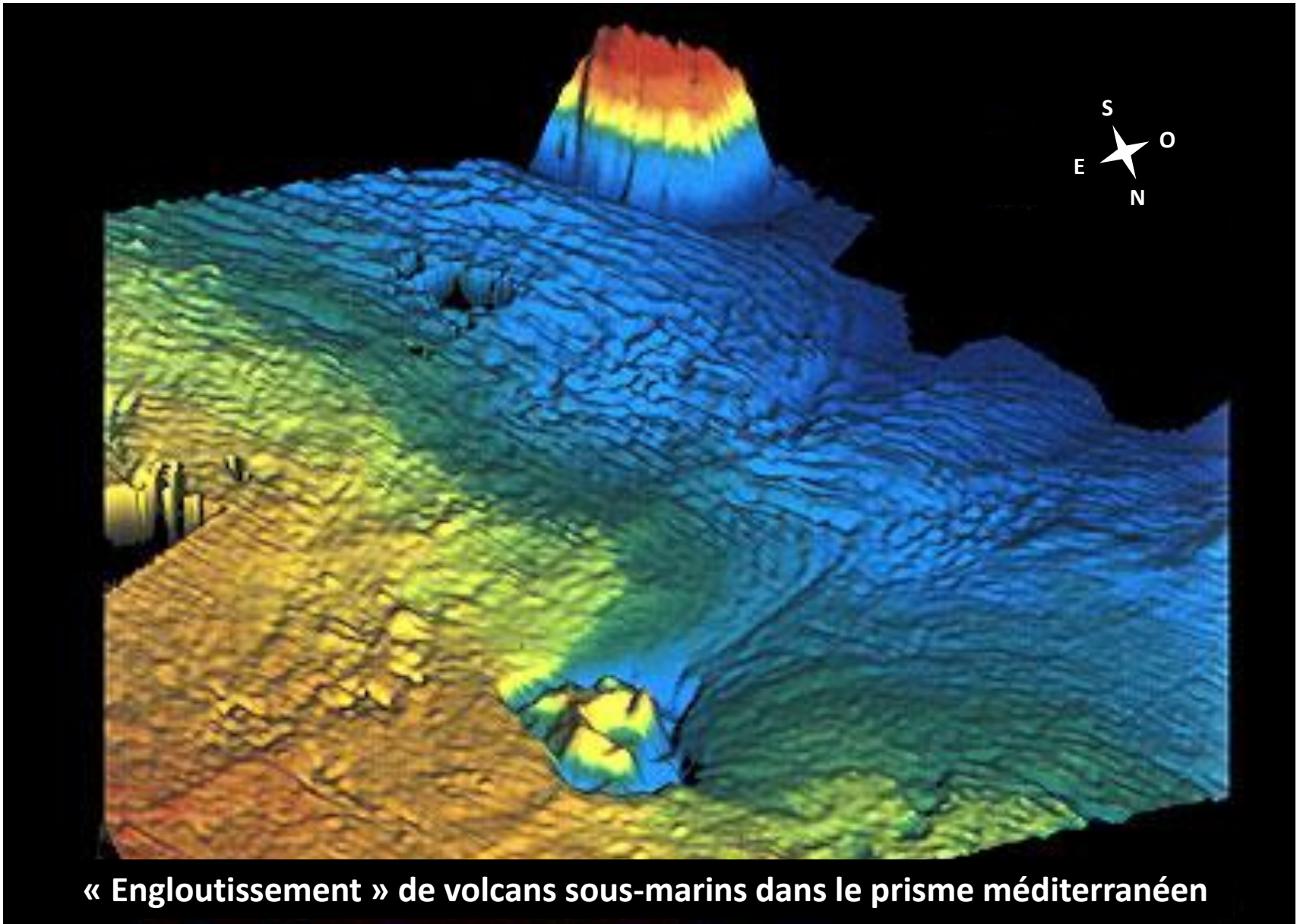
2. Données

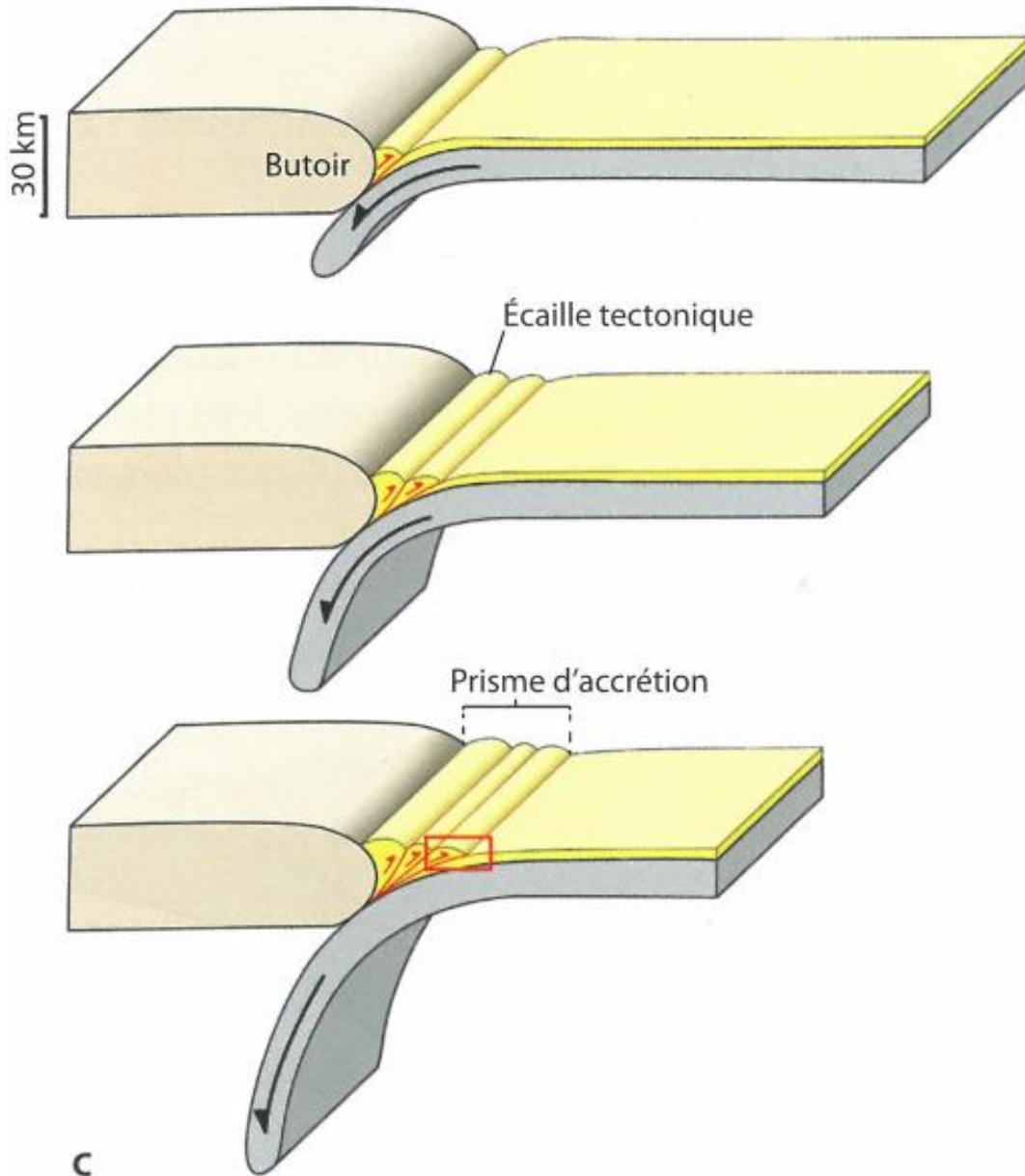
⇒ Formation d'un **prisme d'accrétion**



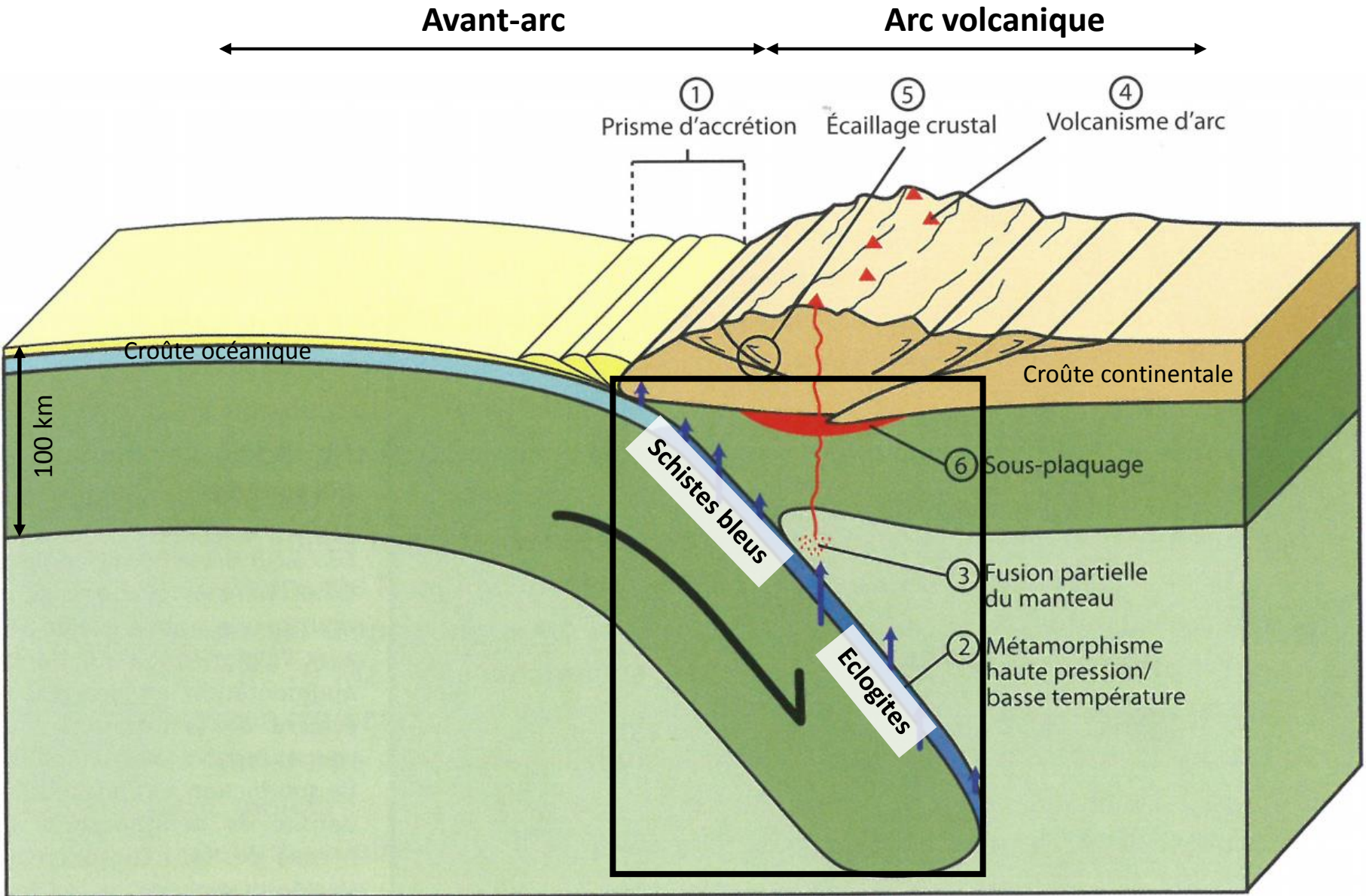
Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique







- ✓ Plaque chevauchante = **butoir** pour les sédiments portés par la plaque plongeante (sous-charriage)
- ✓ **Empilement tectonique** par chevauchements et rétro-chevauchements sur le butoir
- ✓ **Niveau de décollement** facilitant le glissement relatif des sédiments en accrétion (évaporites, marnes...)
- ✓ Deux processus en compétition:
 - **empilement tectonique:** (accrétion): augmentation de l'épaisseur du prisme
 - **érosion tectonique:** diminution du prisme
- ✓ Taille du prisme fonction épaisseur des sédiments de la plaque plongeante

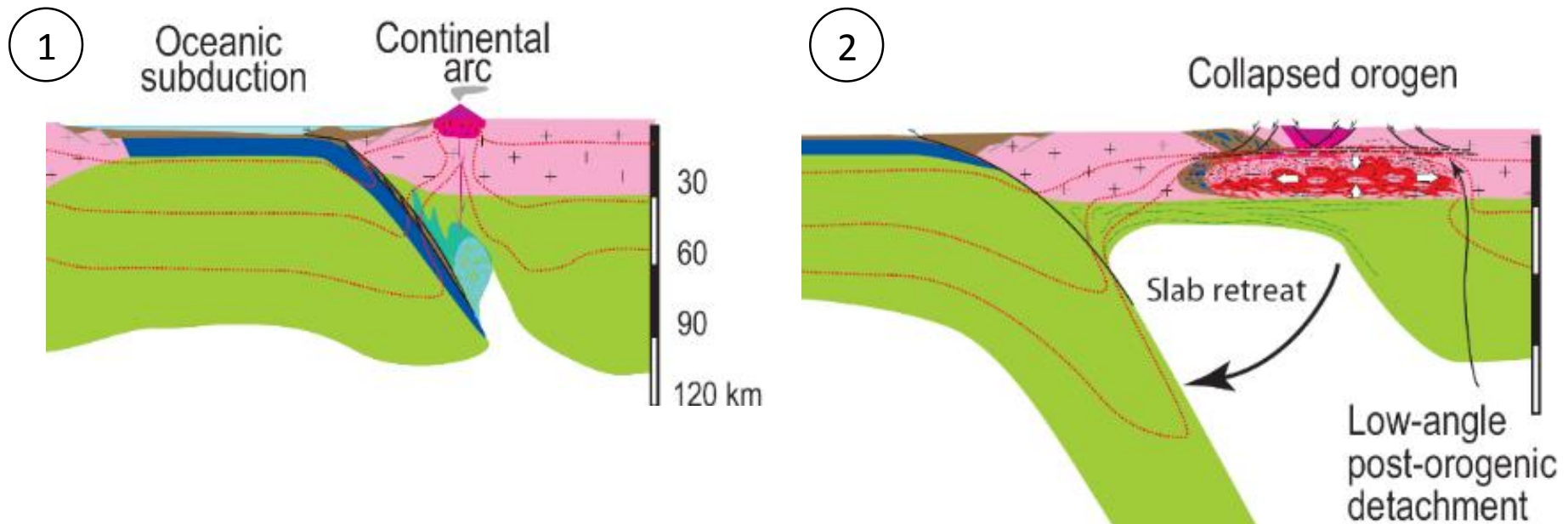


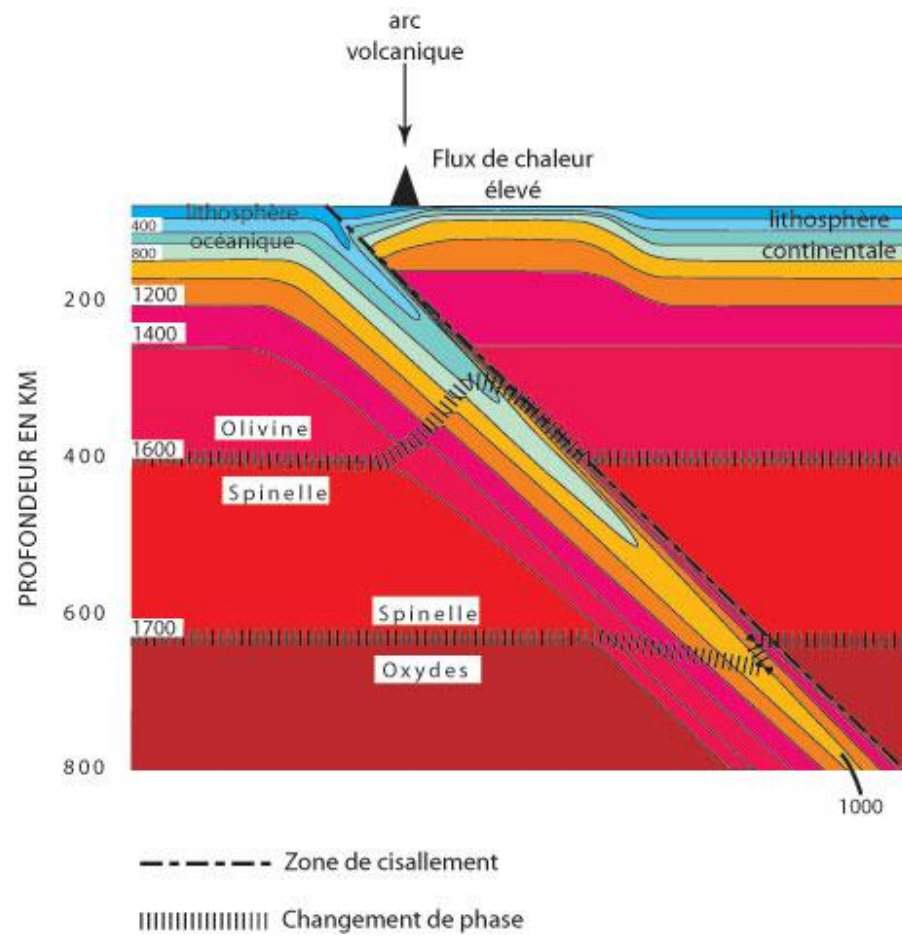
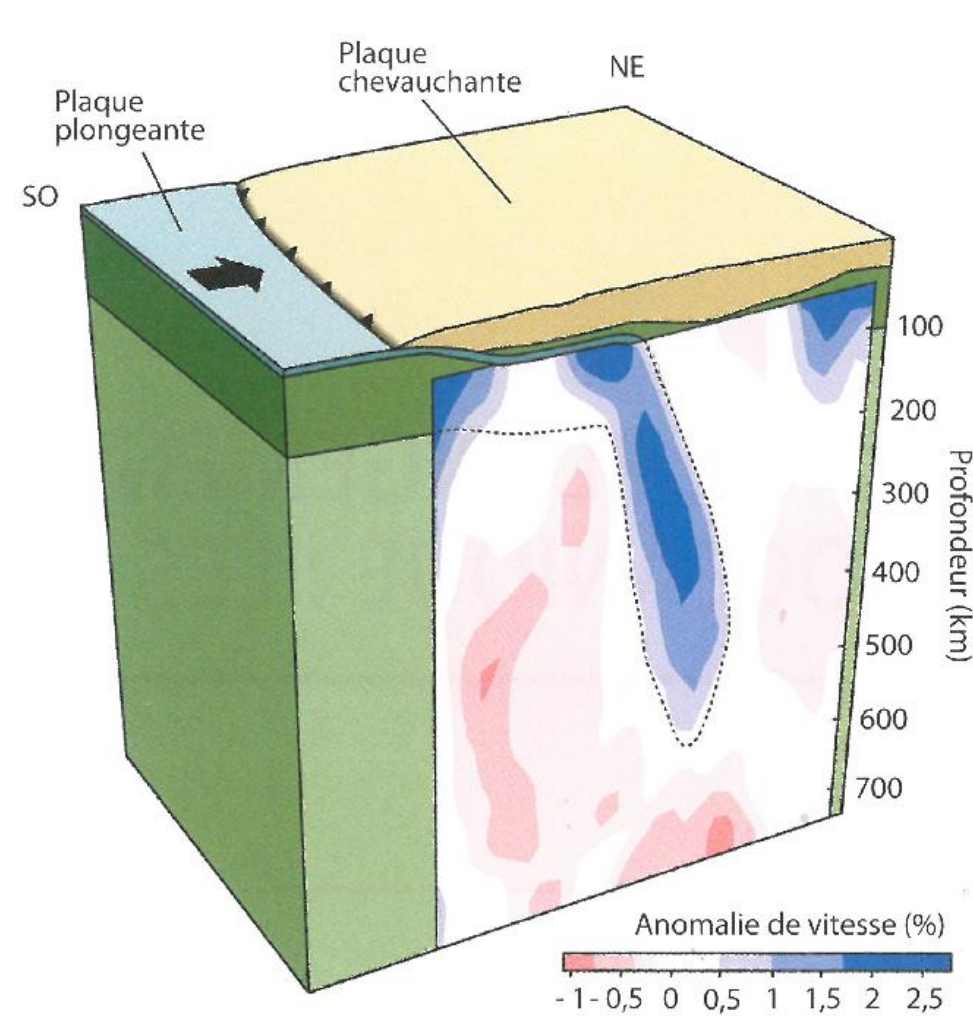
Sur Terre, l'évolution thermique est principalement fonction de ces deux processus **en compétition** : la **conduction** (diffusion) d'une part, la **convection** de l'autre (advection).

L'évolution **métamorphique** dépend également de ces deux processus.

1- les zones de **subduction** et les **chaînes de montagnes jeunes** (stades précoces) où la **convection** l'emporte sur la conduction (mouvements tectoniques rapides).

2- les **chaînes de montagne** dans leur stade **final** et les **rifts continentaux**, où le rééquilibrage thermique par **conduction** l'emporte sur la convection.

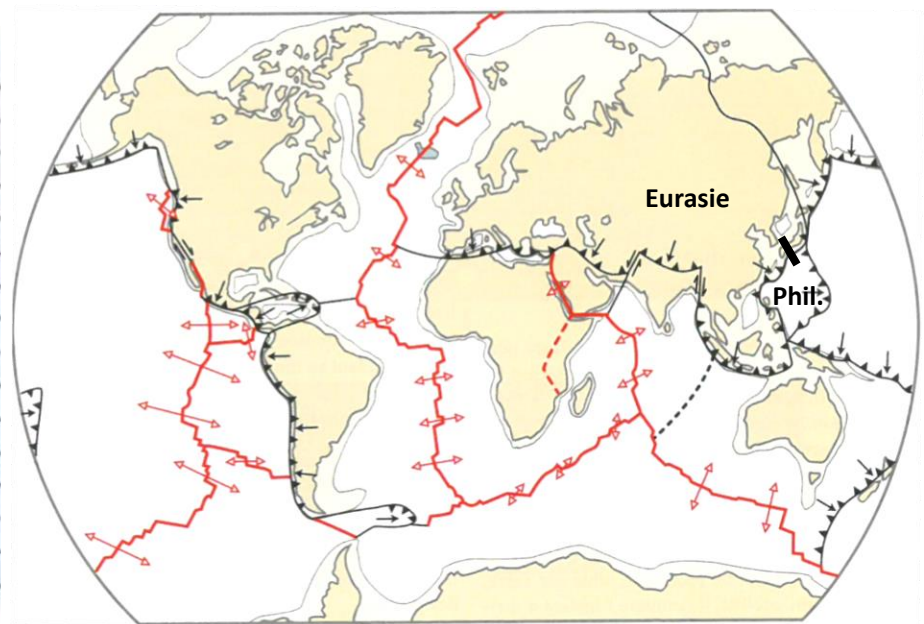
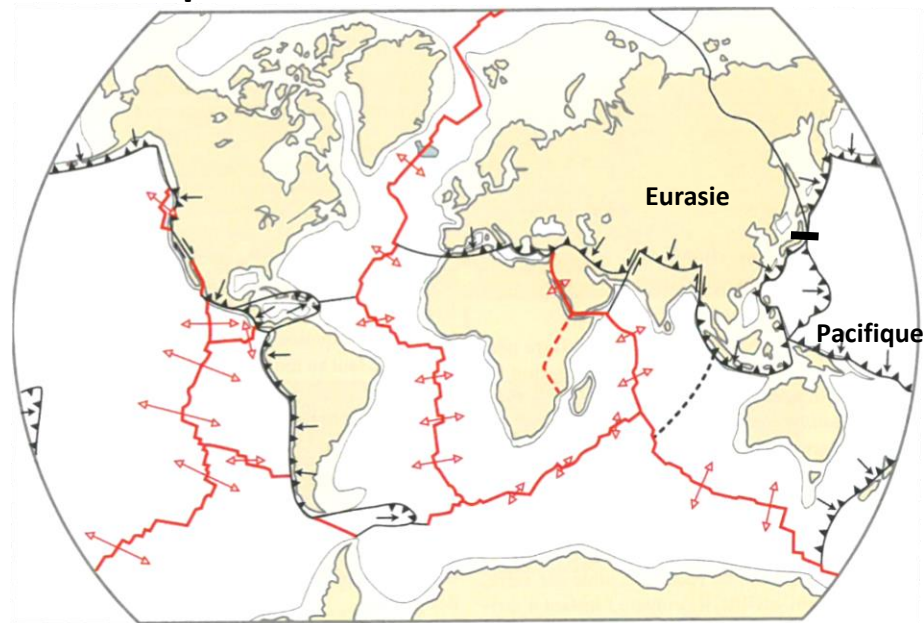
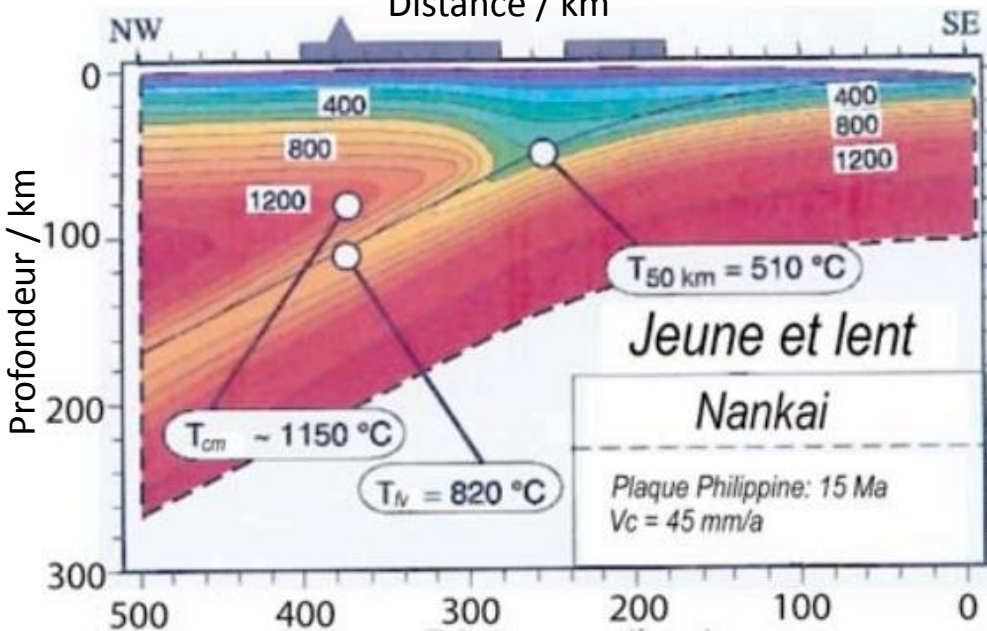
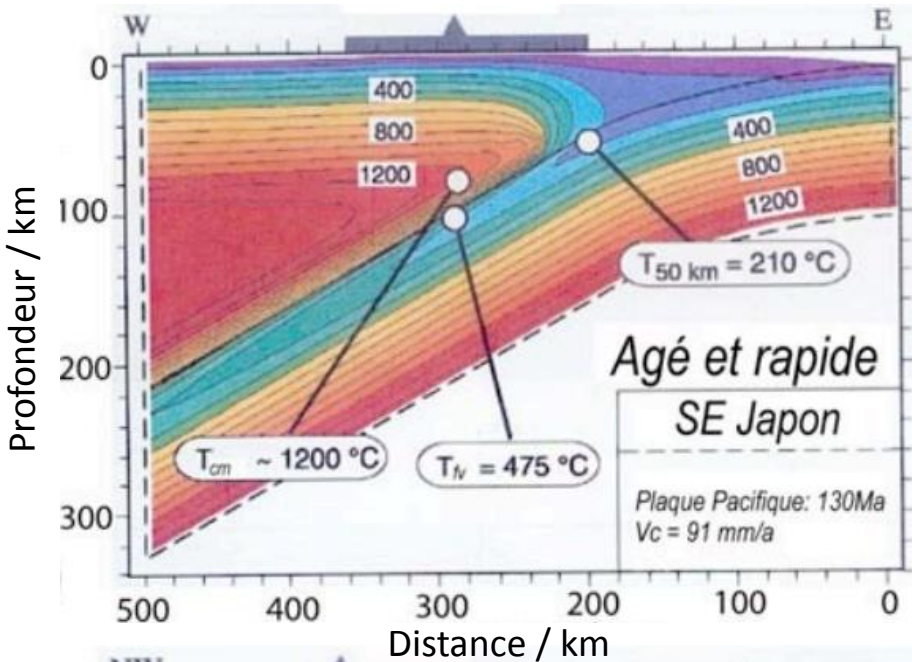




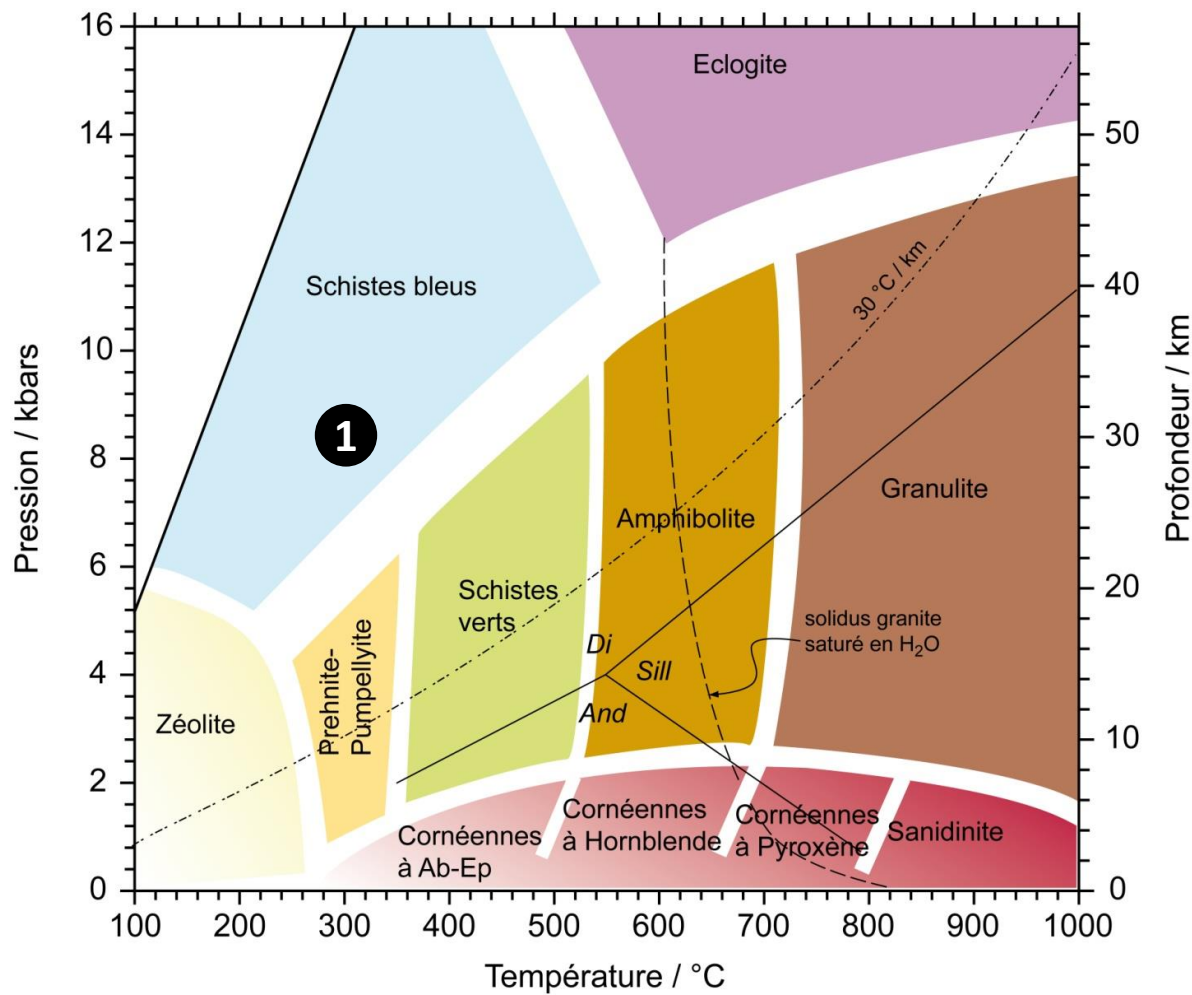
Invagination des isothermes

2. Données

⇒ Caractéristiques du **métamorphisme HP-BT**



Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



Faciès métamorphiques

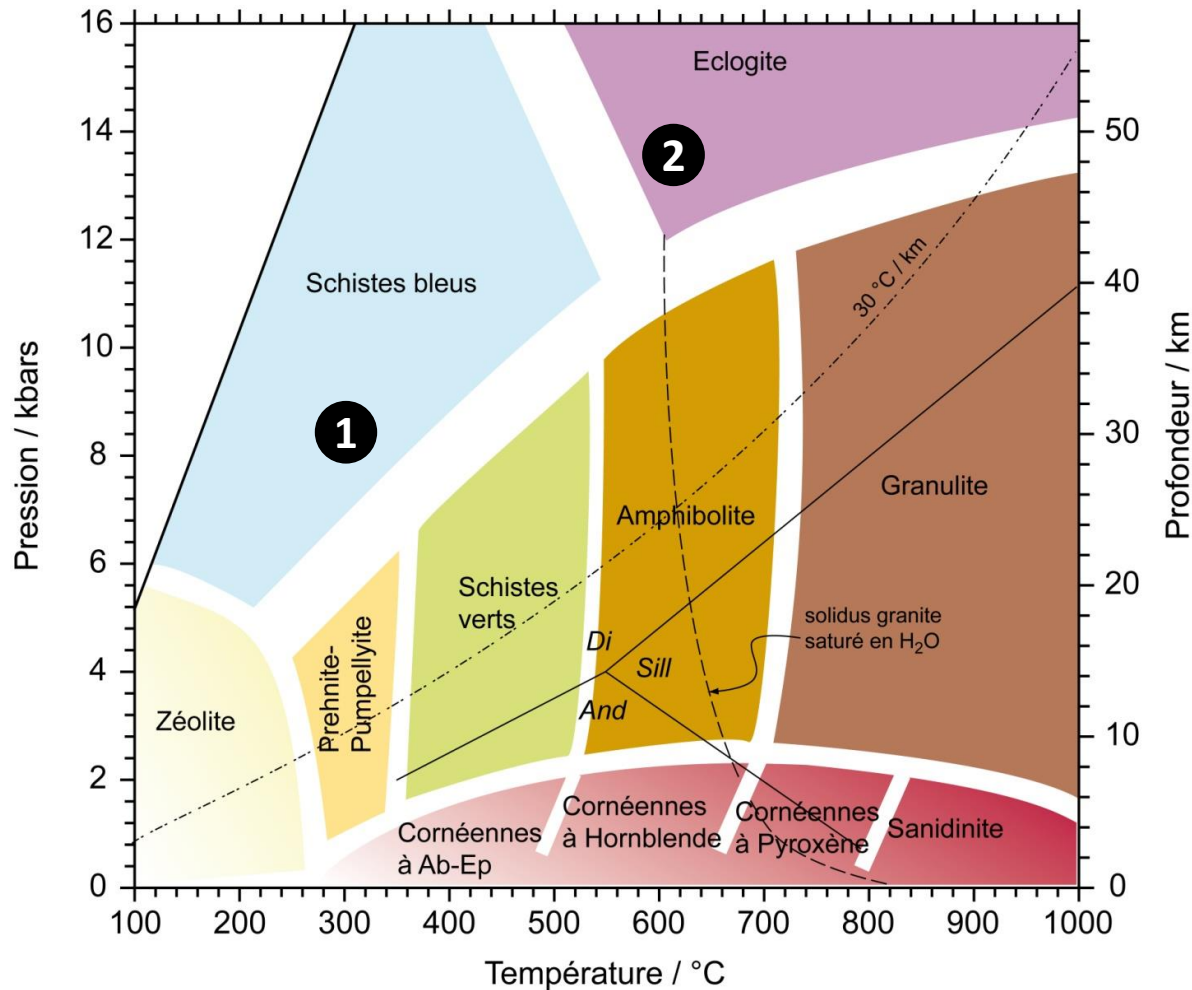
(1) Schistes bleus:

- **basiques**: glaucophane (amphibole sodique) + lawsonite, albite
- **pélitiques**: quartz, plagioclase, muscovite, talc, disthène, chloritoïde

Schistes bleus

Assemblage : glaucophane (amphibole bleue) + lawsonite + albite

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



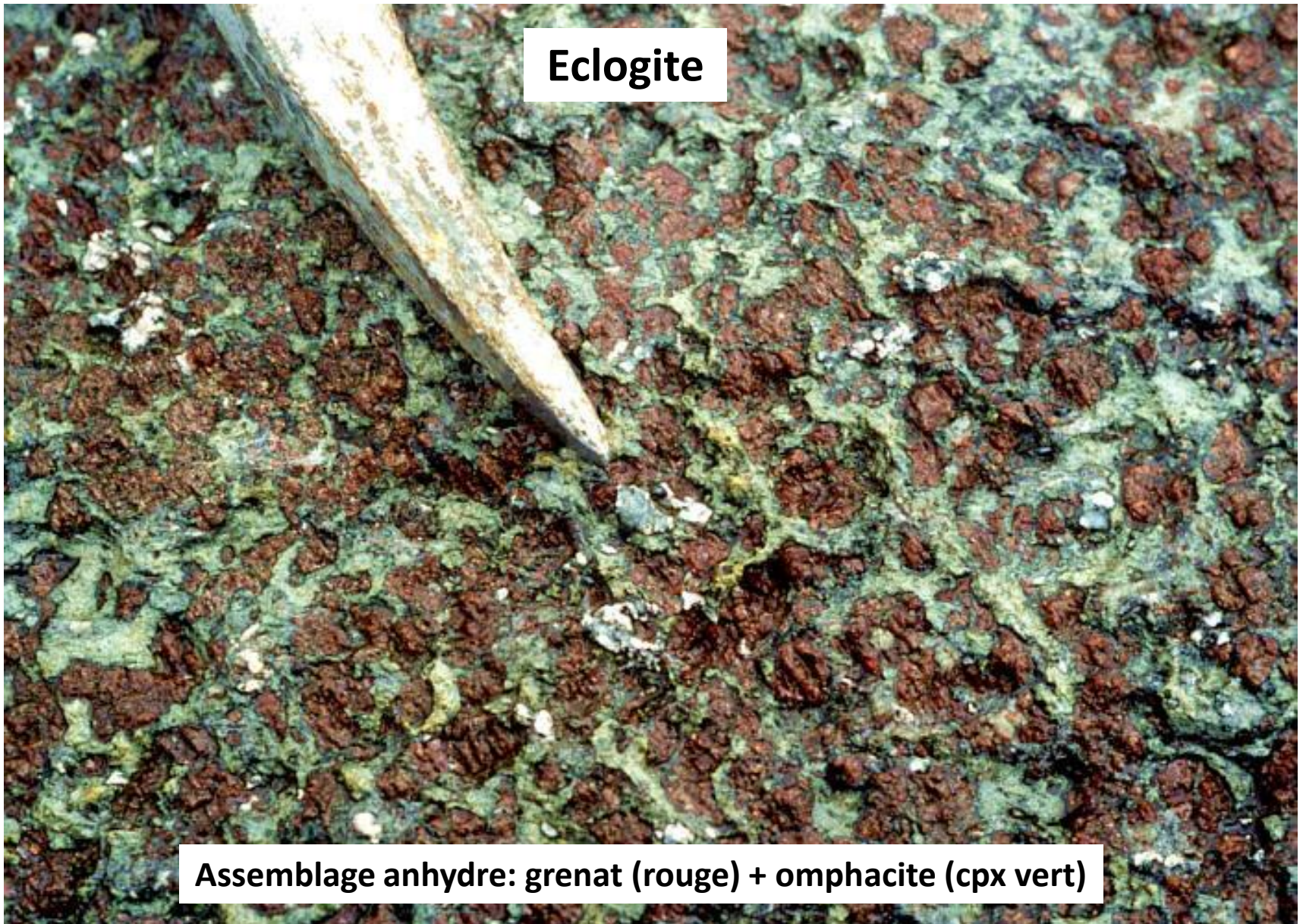
Faciès métamorphiques

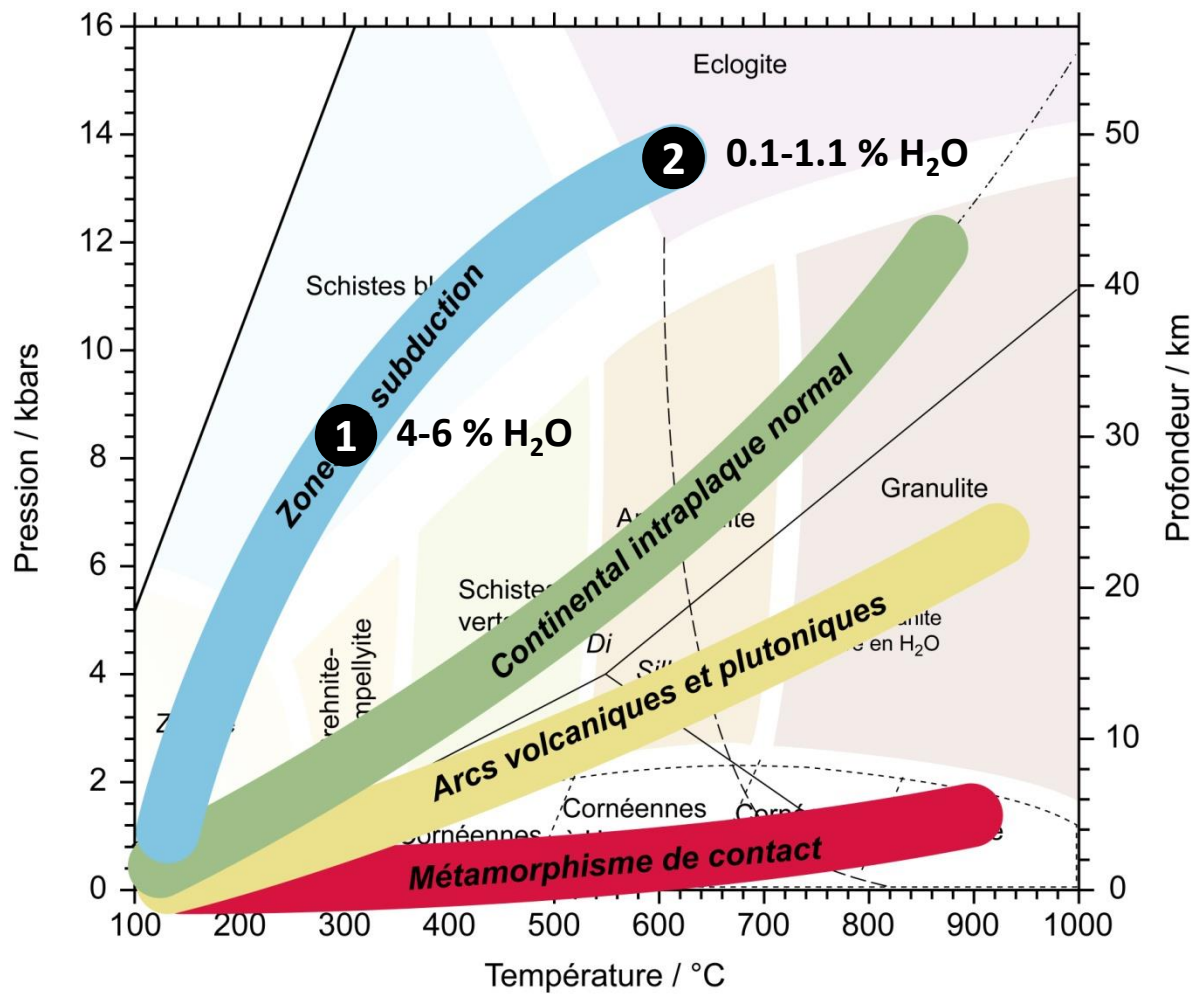
(1) Schistes bleus:

- **basiques**: glaucophane (amphibole sodique) + lawsonite, albite
- **pélitiques**: quartz, plagioclase, muscovite, talc, disthène, chloritoïde

(2) Eclogites:

- **basiques**: omphacite (solution solide entre jadéite, cpx sodique, et diopside, cpx calcique) + grenat (riche en Mg)
- **pélitiques**: grenat, phengite, talc, disthène, coésite





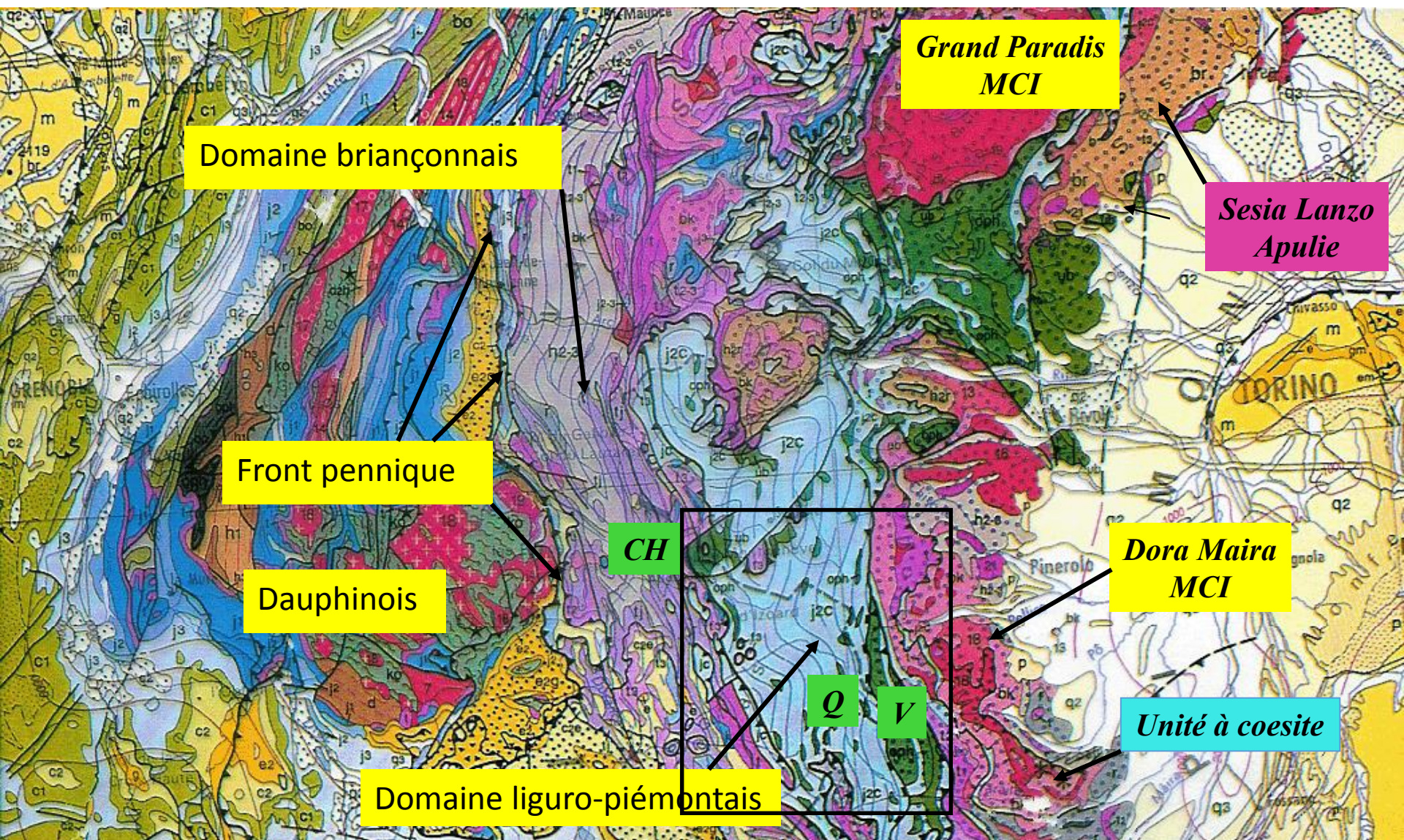
Gradients métamorphiques

- 1. Type **Franciscain** **HP – BT**
- 2. Type **Barrovien** (ou **dalradien**) **MP - MT**
- 3. Type **Abukuma** **BP - HT**

⇒ **Déshydratation du slab:**
diminution des teneurs en eau contenue dans les minéraux hydroxylés (ex. pour un metabasalte) le long d'un gradient de 6-10°C/km

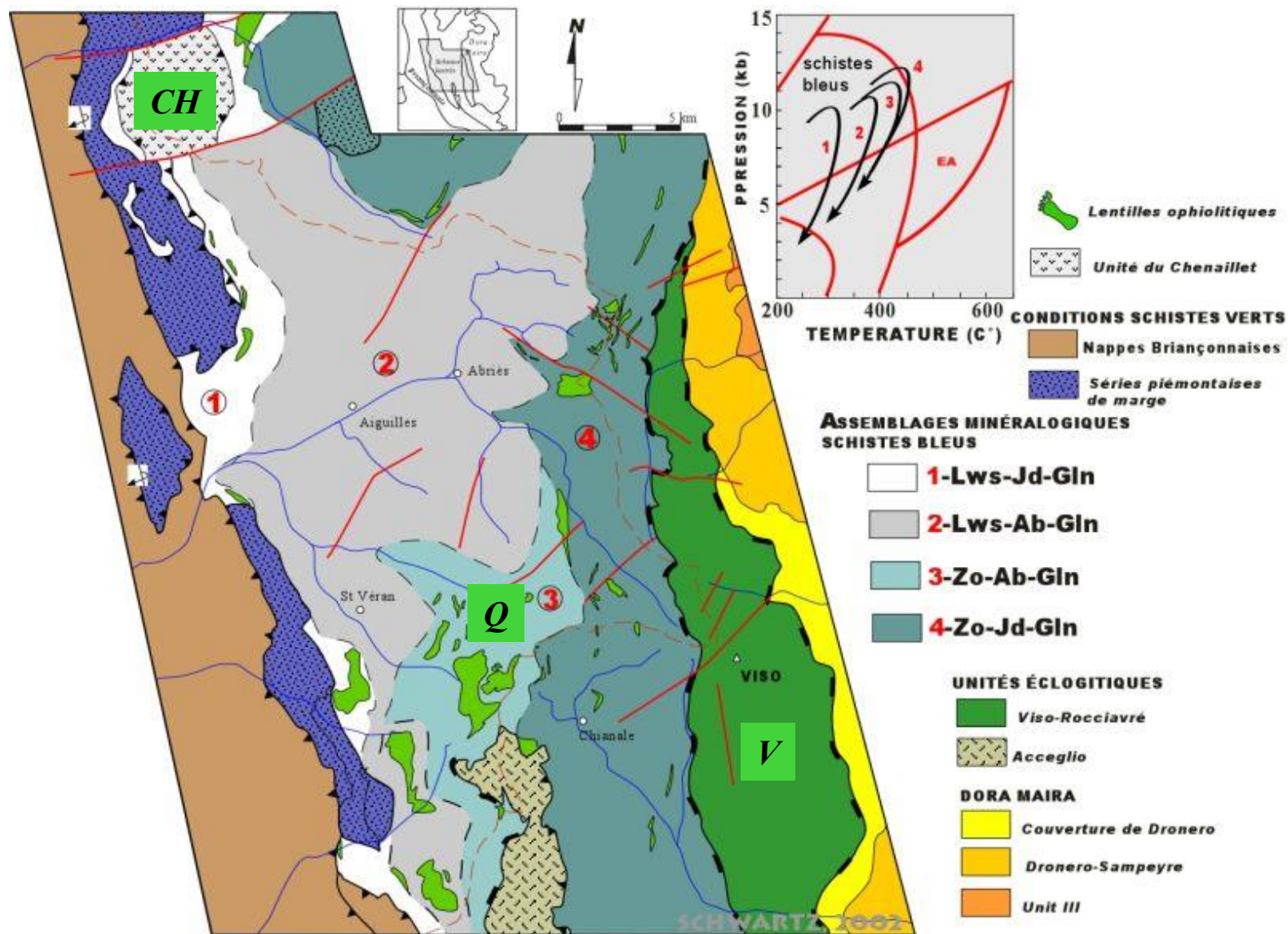
⇒ Zones de subduction caractérisées par des gradients **géothermiques froids** (6-12 °C/km)

Faciès	Roches basiques	Roches ultra-basiques	Roches silto-argileuses	Roches calcaires
Zéolite	Analcime, zéolites, prehnite, zoïsite, albite	Serpentine, brucite, chlorite, dolomite, magnésite	Quartz, argiles, illite, albite, chlorite	Calcite, dolomite, quartz, talc, argiles
Prehnite-pumpellyite	Chlorite, prehnite, albite, pumpellyite, épidote	Serpentine, talc, forstérite, trémolite, chlorite	Quartz, illite, muscovite, albite, chlorite, (stilptomélane)	Quartz, illite, muscovite, albite, chlorite, (stilptomélane)
Schistes verts	Chlorite, actinolite, épidote ou zoïsite, albite	Serpentine, talc, trémolite, brucite, diopside, chlorite, (magnétite)	Quartz, plagioclase, chlorite, muscovite, biotite, grenat pyrophyllite, (graphite)	Calcite, dolomite, quartz, muscovite, biotite
Épidote-amphibolite	Hornblende, actinolite, épidote ou zoïsite, plagioclase, (sphène)	Forstérite, trémolite, talc, serpentine, chlorite, magnétite	Quartz, plagioclase, chlorite, muscovite, biotite, (graphite)	Calcite, dolomite, quartz, muscovite, biotite, trémolite
Amphibolite	Hornblende, plagioclase, (sphène), (ilmenite)	Forstérite, trémolite, talc, anthophyllite, chlorite, orthopyroxène, (magnétite)	Quartz, plagioclase, chlorite, muscovite, biotite, grenat staurolite, kyanite, sillimanite, (graphite), (ilmenite)	Calcite, dolomite, quartz, biotite, trémolite, forstérite, diopside, plagioclase
Granulite	Hornblende, augite, orthopyroxène, plagioclase, (ilménite)	Forstérite, orthopyroxène, augite, hornblende, grenat, spinelle	Quartz, plagioclase, orthoclase, biotite, grenat, cordiérite, sillimanite, orthopyroxène	Calcite, quartz, forstérite, diopside, wollastonite, humite-chondrodite, grenat plagioclase
Schistes bleus	Glaucophane, lawsonite, albite, aragonite, chlorite, zoïsite	Forstérite, serpentine, diopside	Quartz, plagioclase, muscovite, carpholite, talc, kyanite, chloritoïde	Calcite, aragonite, quartz, forstérite, diopside, trémolite
Éclogite	Grenat riche en Mg, omphacite, kyanite, (rutile)	Forstérite, orthopyroxène, augite, grenat	Quartz, albite, phengite, talc, kyanite, grenat	Calcite, aragonite, quartz, forstérite, diopside



CH = ophiolite du Chenaillet, **Q** = schistes bleus du Queyras, **V** = éclogeite du Mont Viso

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

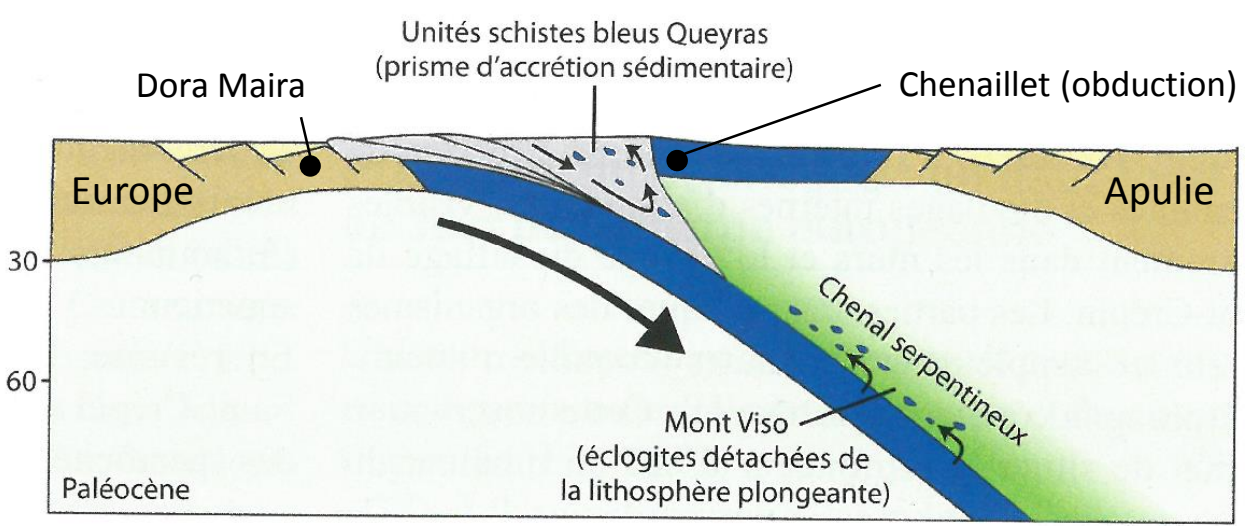
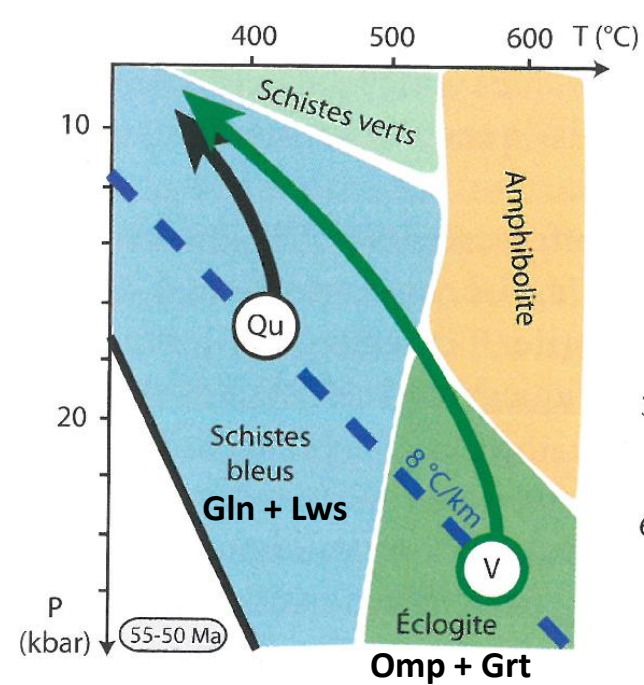
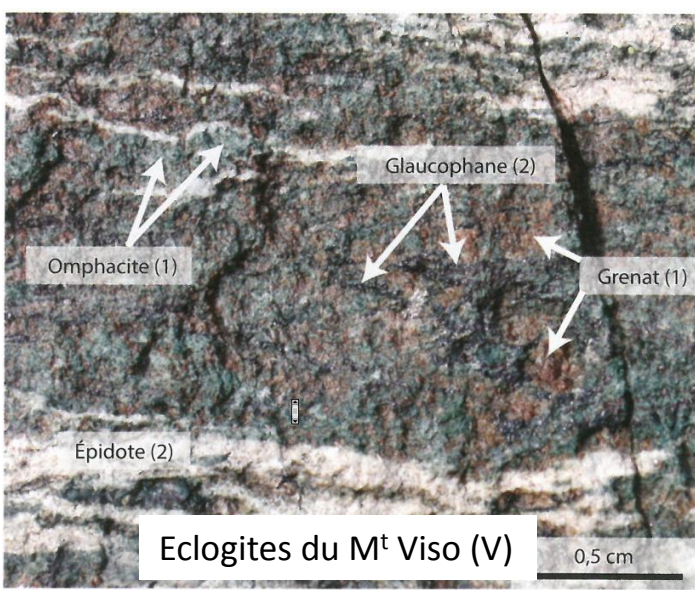


CH = ophiolite du Chenaillet, **Q** = schistes bleus du Queyras, **V** = éclogite du Mont Viso

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

2. Données

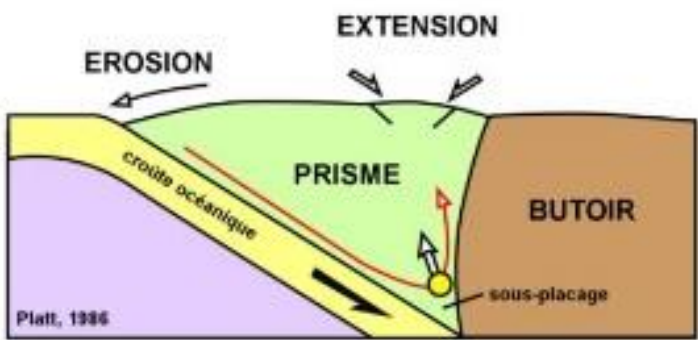
⇒ Caractéristiques du **métamorphisme HP-BT**: ex. Queyras-Mont Viso



⇒ Indices d'une **subduction océanique** au **Paléocène** (55 Ma) dans la zone interne des Alpes

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

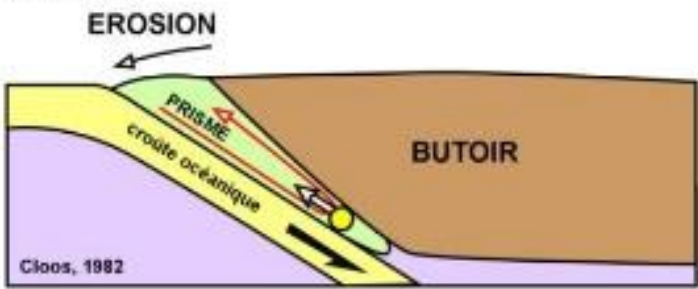
sous-placage - extension / érosion



Prismes d'accrétion = (i) lieu de **genèse** de certaines roches HP, (ii) lieu d'**exhumation** des roches de **HP-BT**.

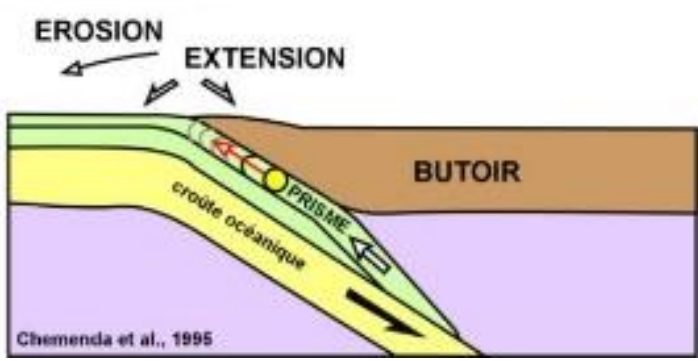
(1) Sous-placage de matériel sédimentaire au cours du temps => épaissement du prisme => soulèvement accommodé par de l'extension puis de l'érosion.
Moteur exhumation=couple **extension/érosion**.

"corner flow"

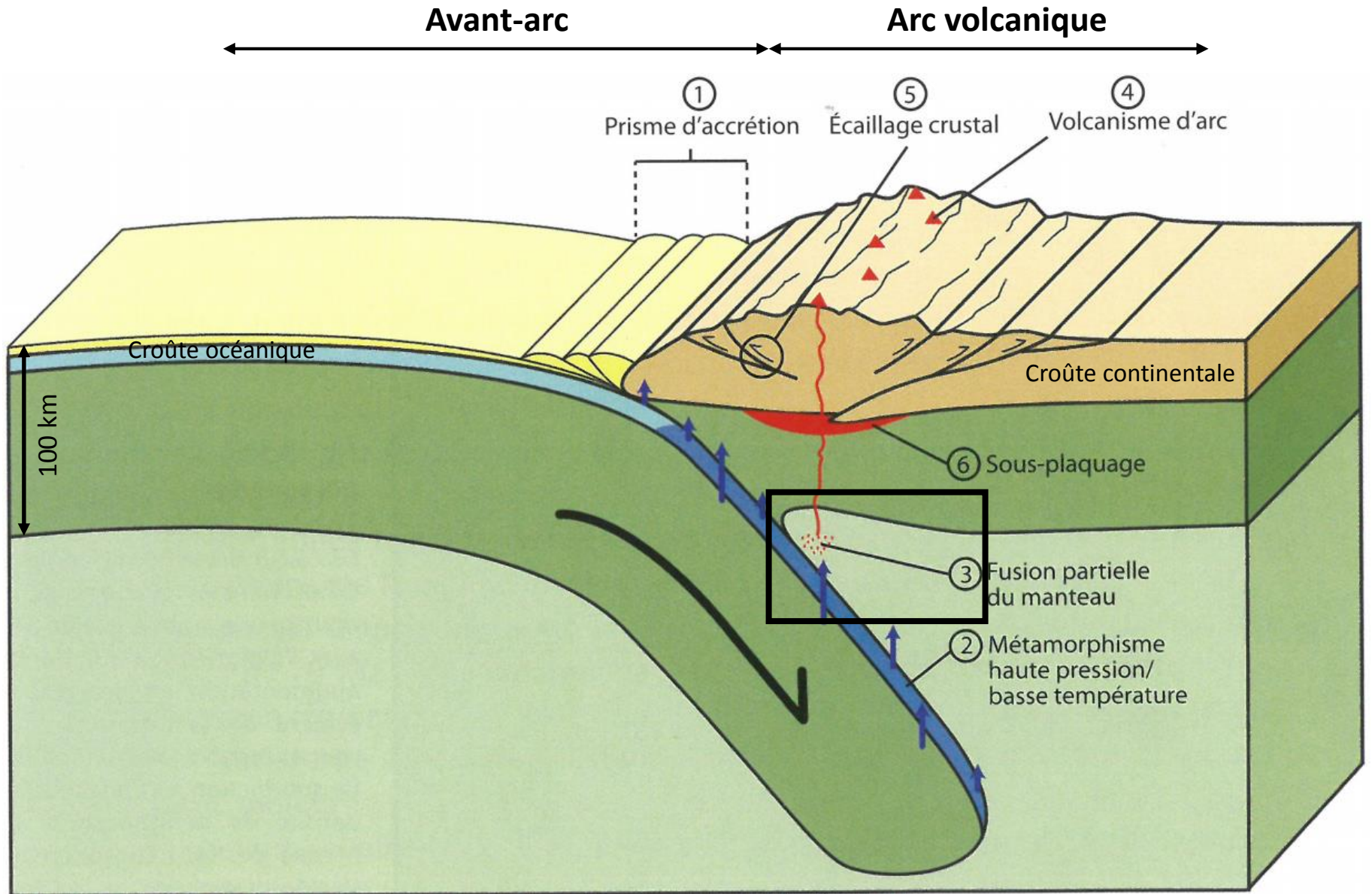


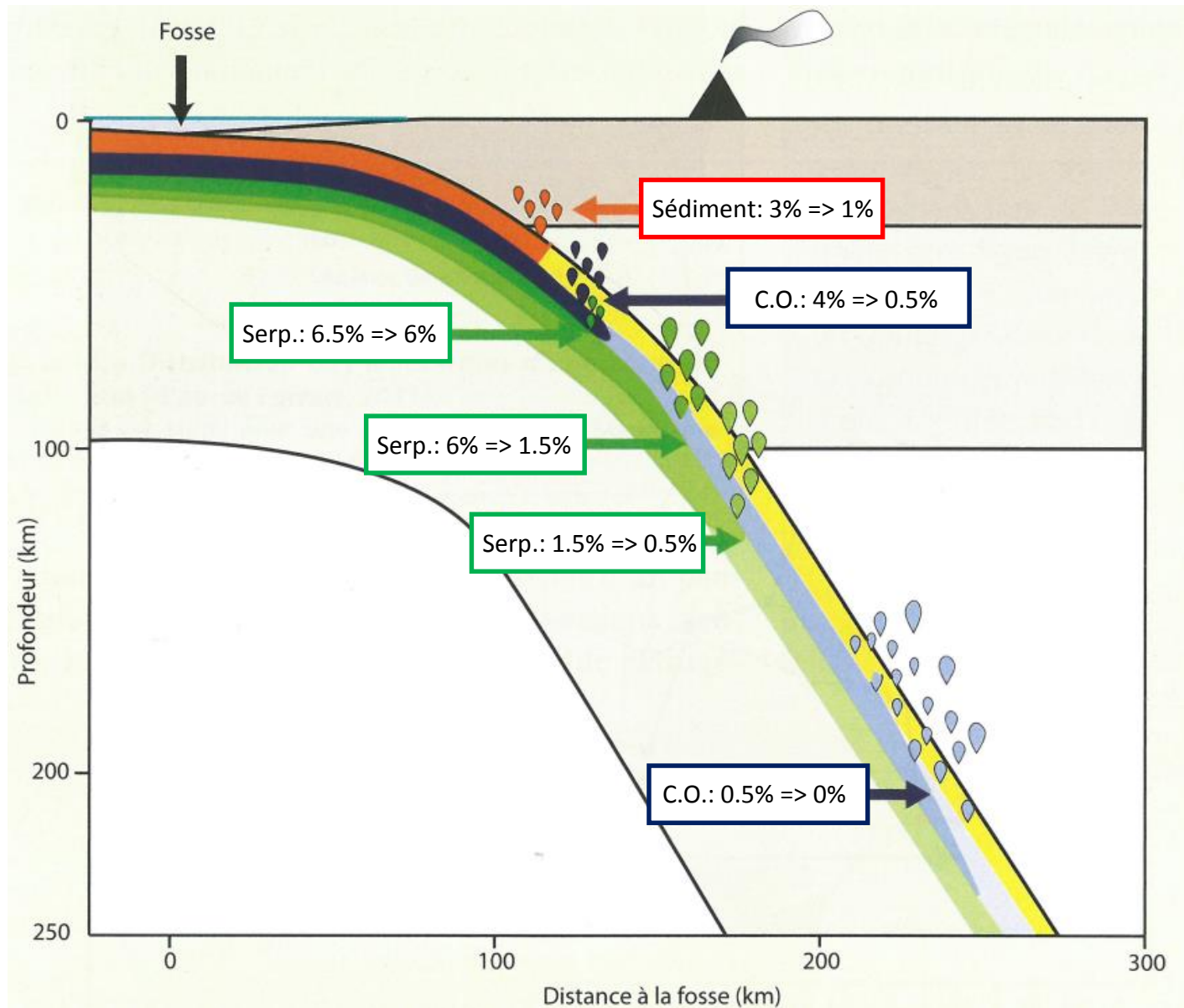
(2) Création d'un courant de retour dans un matériel de faible viscosité coincé entre deux plaques dans une zone de subduction.
Moteur exhumation=**convection**.

force de flottabilité



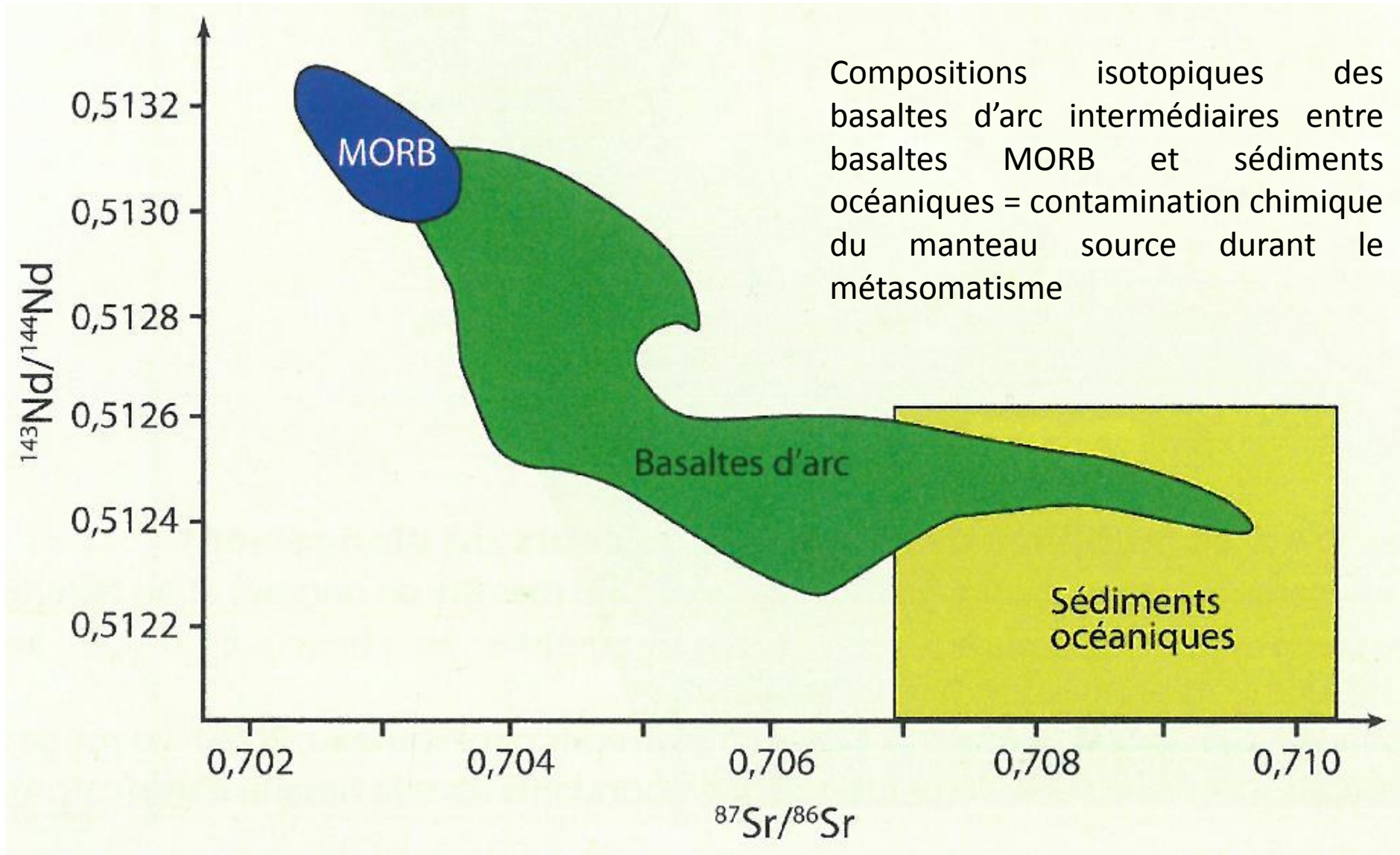
(3) Modèle basé sur des différences de densité entre le matériel HP-BT accrété à la base du prisme et son encaissant => accumulation d'écailles successivement sous charriées.
Moteur exhumation=force de **flottabilité**.



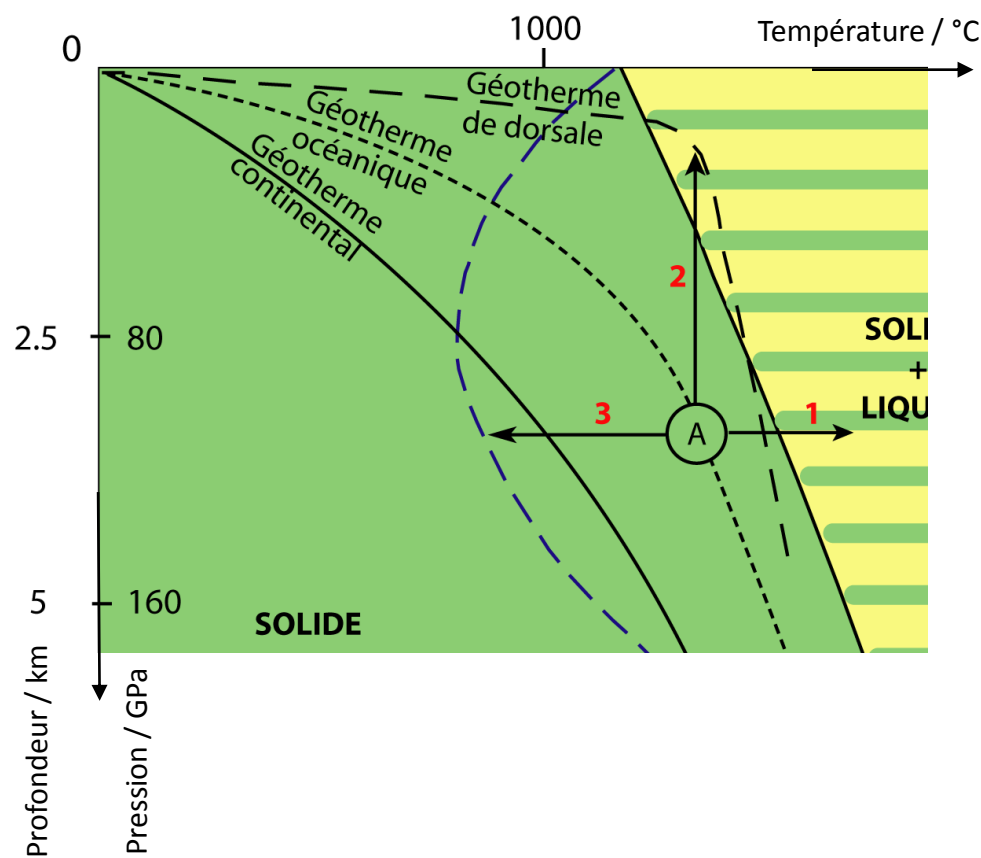


Déshydratation C.O. basaltique + sédiments + manteau lithosphérique = lithosphère océanique

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique

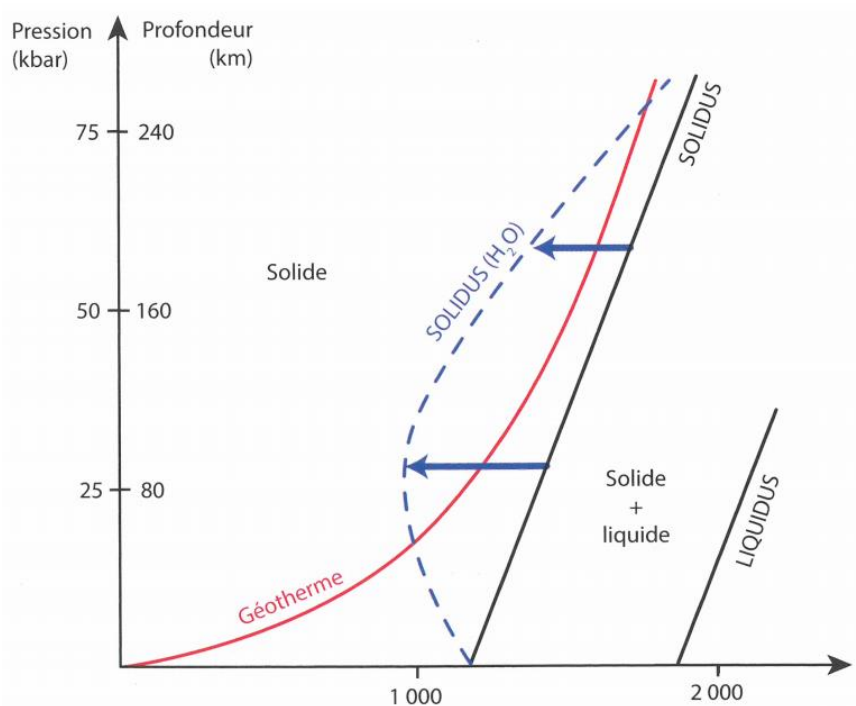
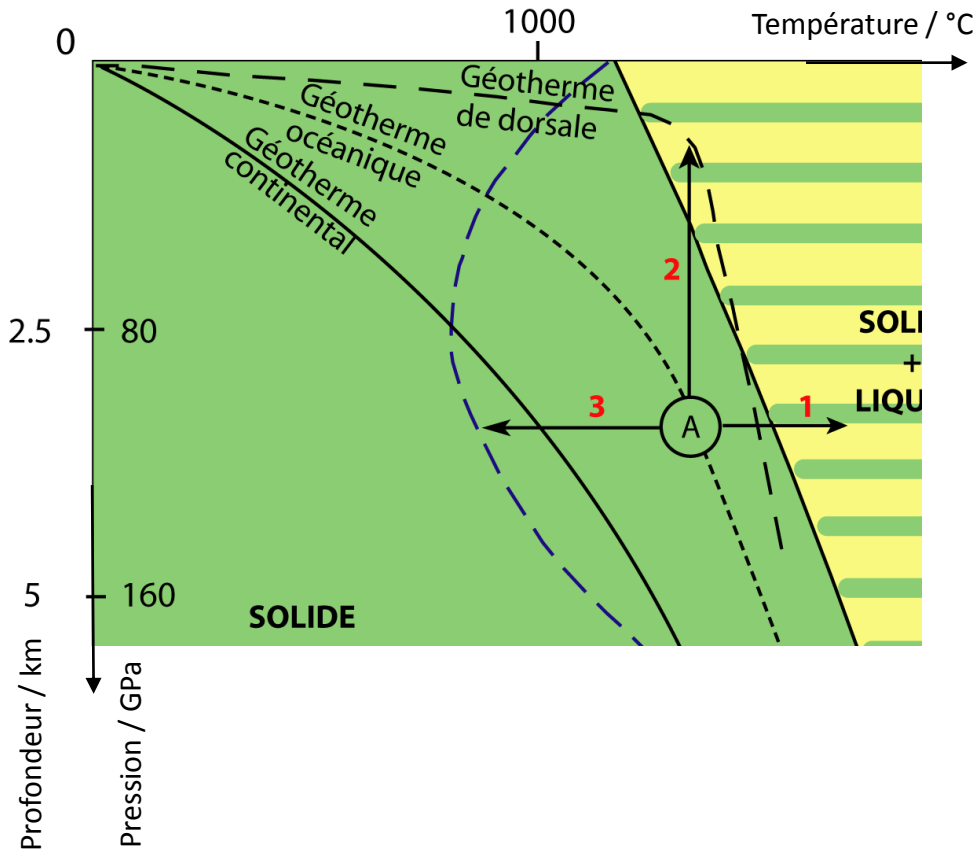


Rapports isotopiques constants au cours de la fusion et la cristallisation => **traçage source**



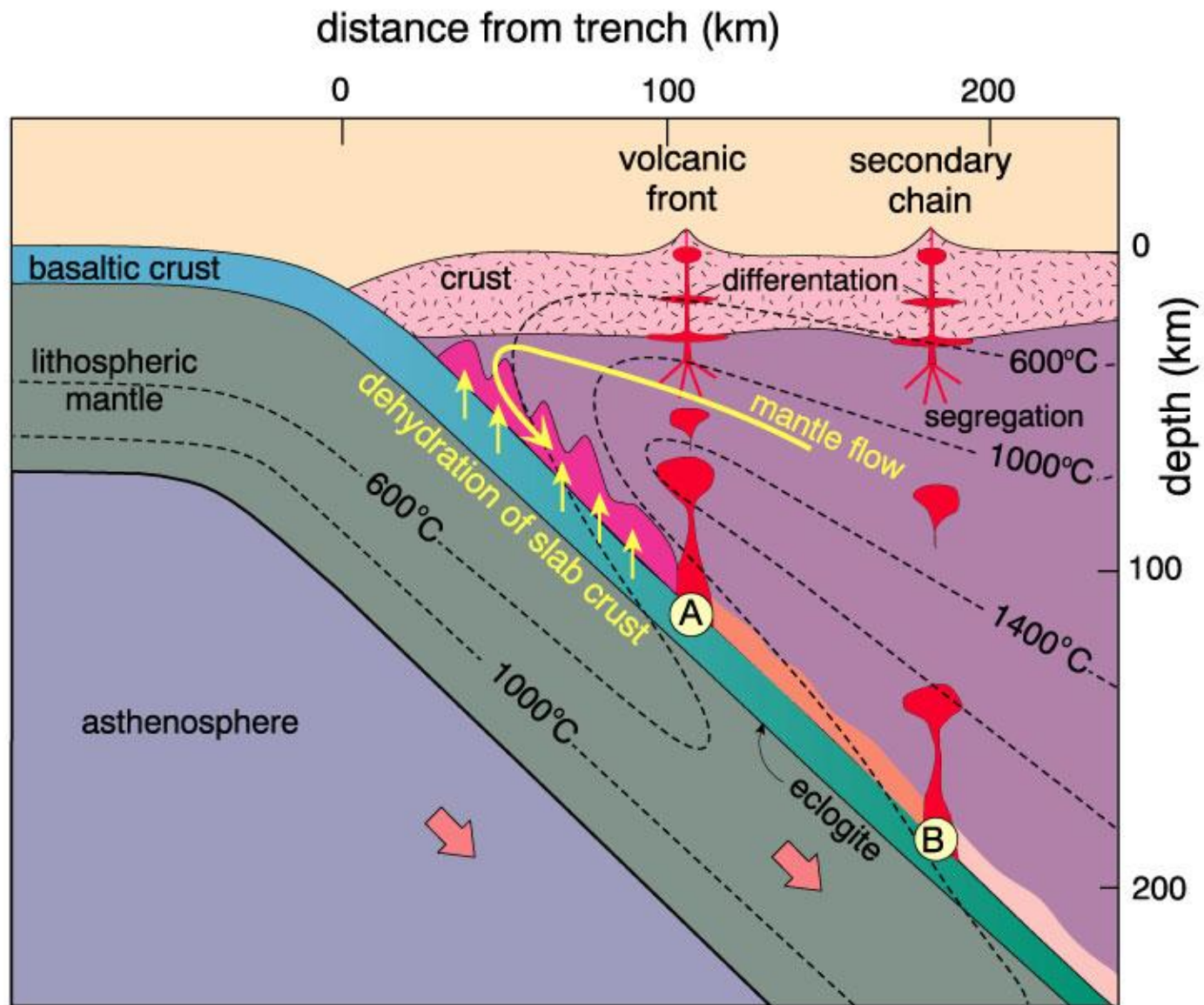
Conditions de **fusion partielle du manteau**:

- 1. Augmentation T °C
- 2. Remontée adiabatique
- 3. Hydratation



- Conditions de **fusion partielle** du manteau:
- 1. Augmentation T °C
 - 2. Remontée adiabatique
 - 3. Hydratation

- Conditions de **fusion partielle** du manteau:
- 1. Augmentation T °C
 - 2. Remontée adiabatique
 - 3. **Hydratation**



A = déshydratation **amphibole** (100-200 km); **B** = déshydratation **phlogopite** (200 km)

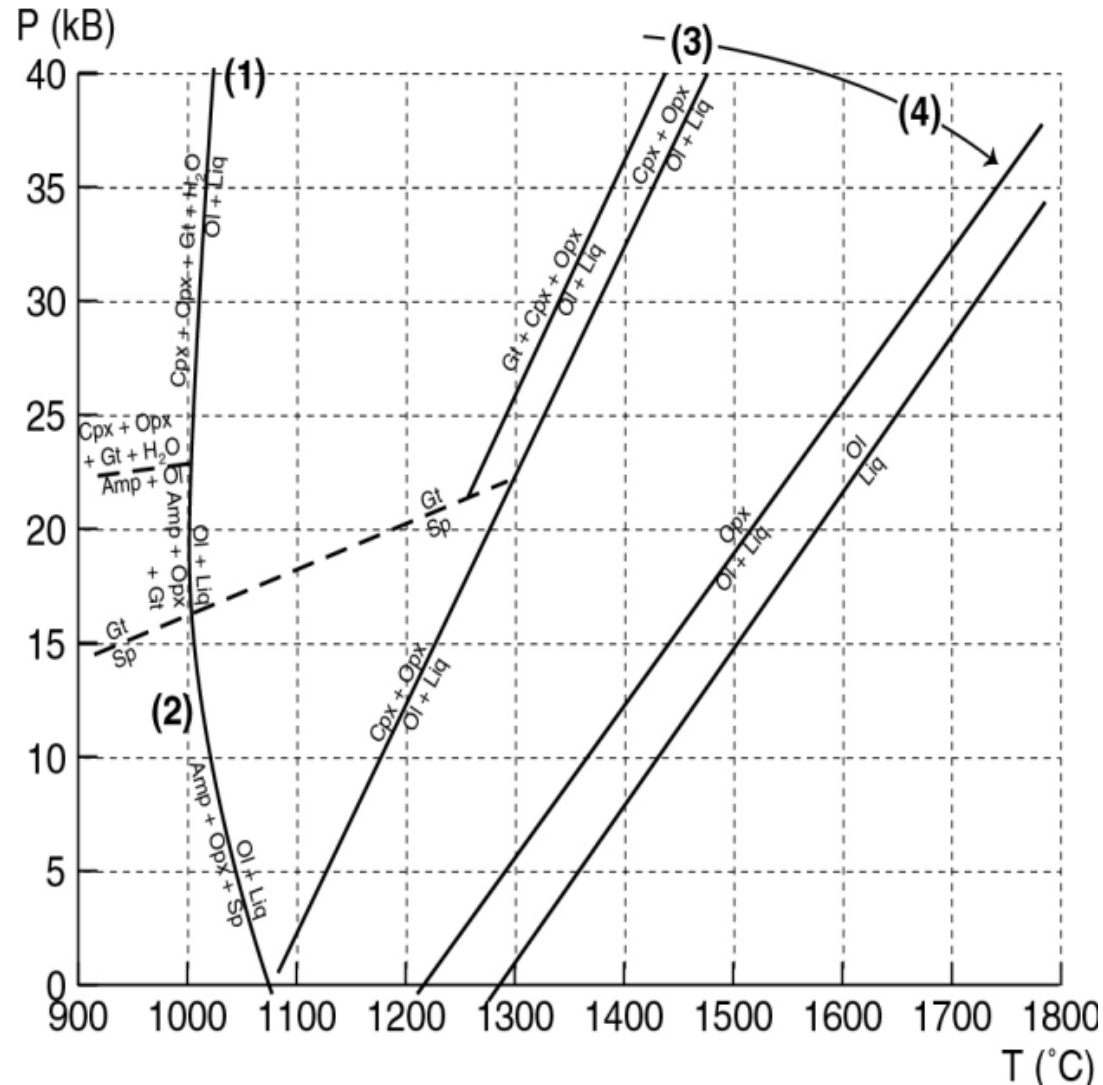
(1)&(2): réactions de fusion hydratée.

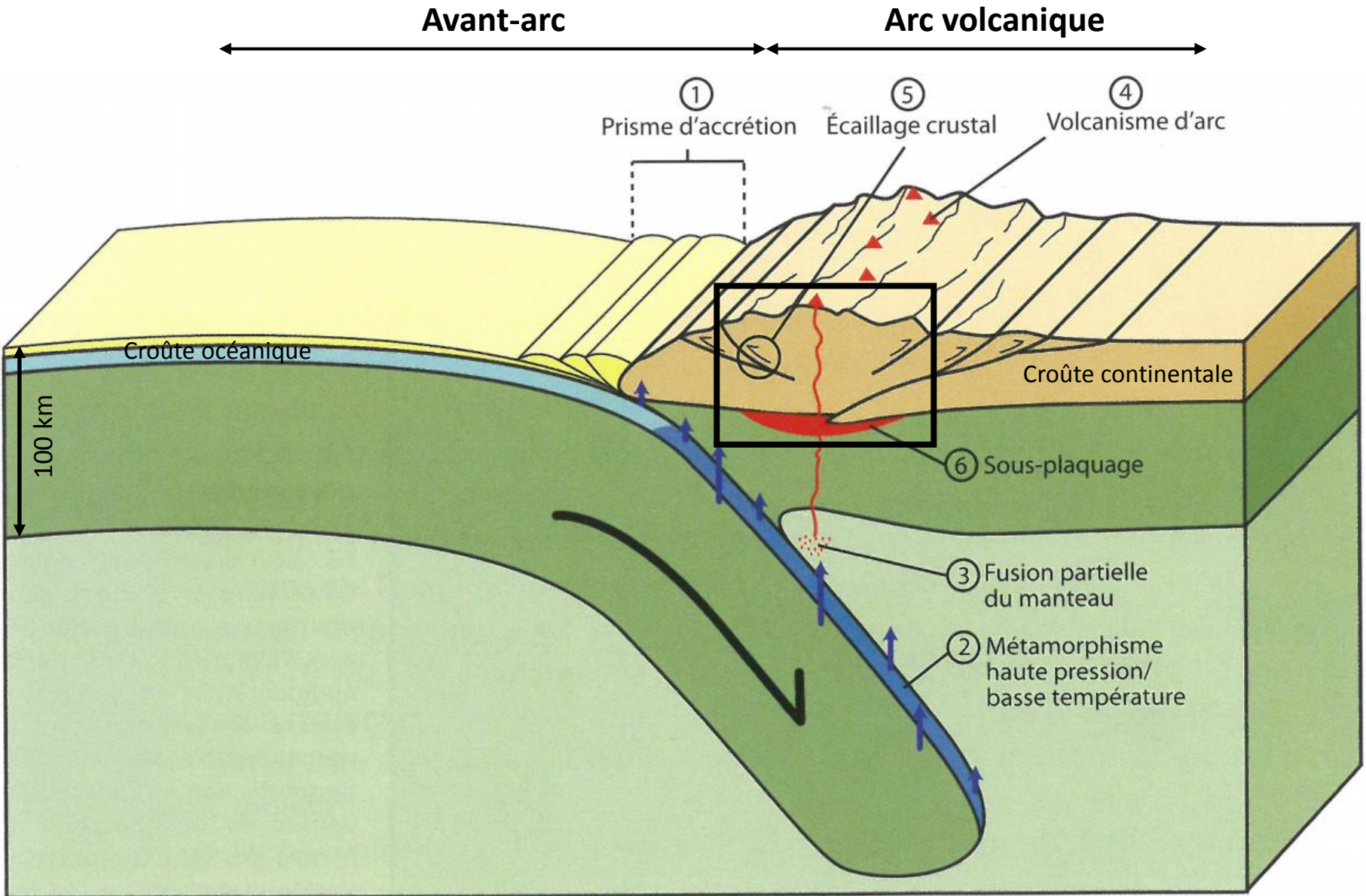
(1): se situe au dessus de la limite de stabilité de l'amphibole, de l'eau libre est présente au solidus.

(2): fusion-déshydratation de l'amphibole.

(3): solidus sec.

(4): augmentation du taux de fusion par implication successive de minéraux de plus en plus réfractaires.



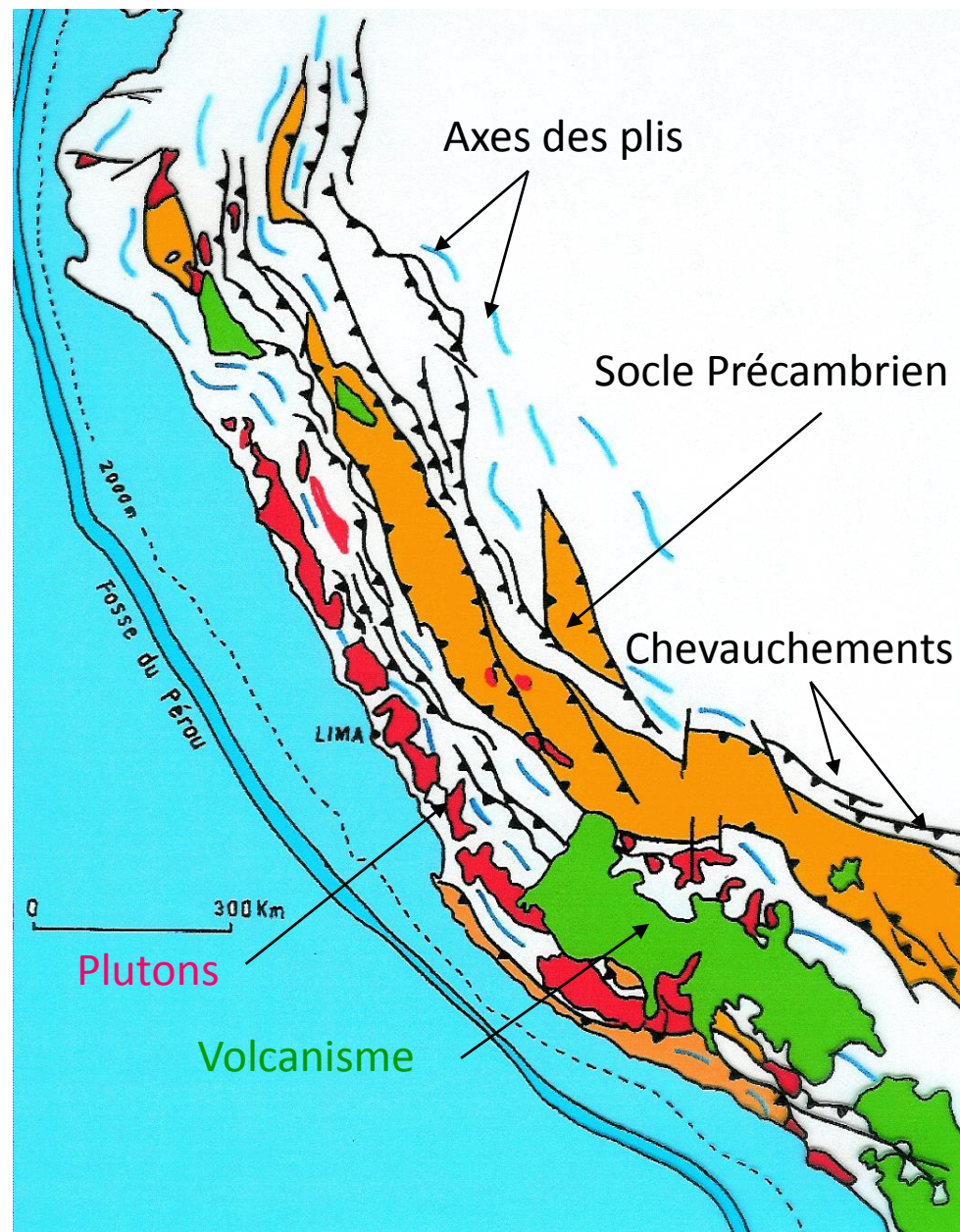
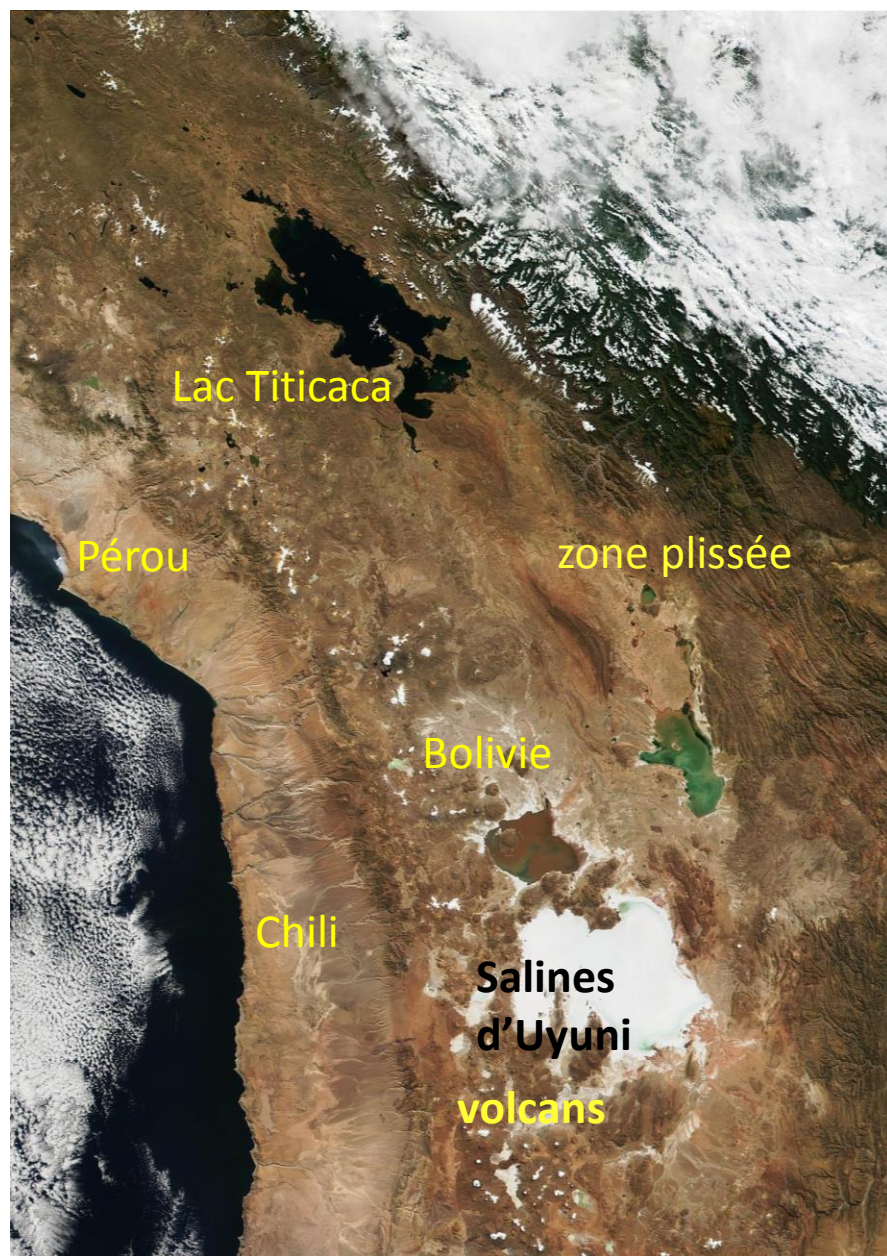




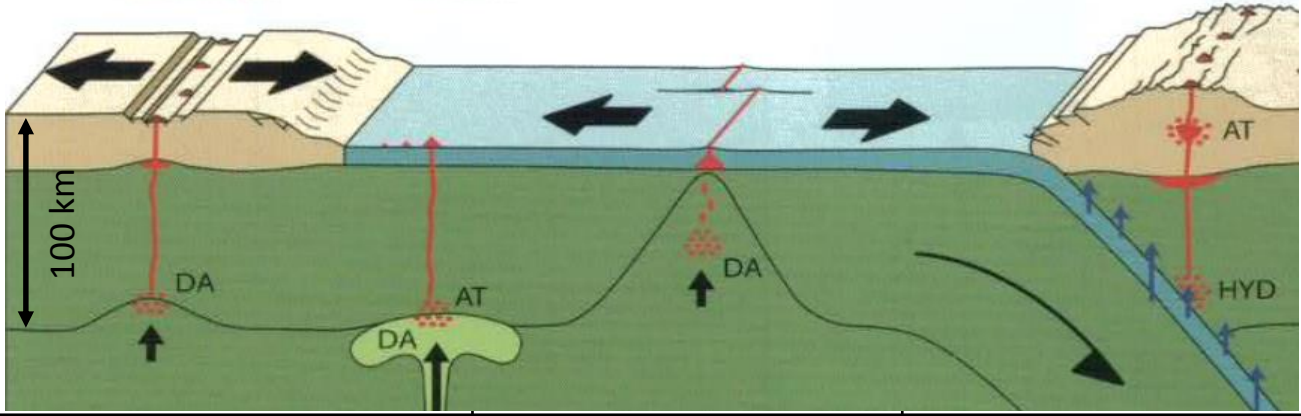
Redoubt, 4/21/90

Stratovolcan de la chaîne des Aléoutiennes (Alaska)

R. Clucas



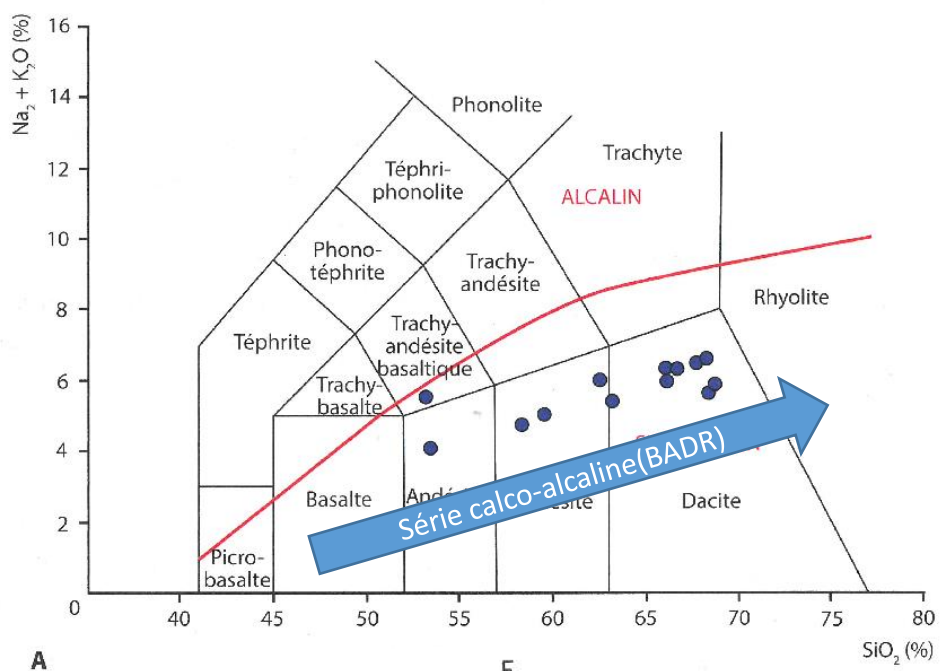
Condition d'hydratation	Anhydre		Hydratée
Condition de pression	Haute	Faible	Faible
Minéraux impliqués	Grenat	Clinopyroxène Plagioclase	Amphibole ou Jadéite
Richesse en Ca-Na-K	Très riche	Pauvre	Assez riche
Teneur en SiO ₂	48 %	51 %	55 % (Andésite)
Type de magma formé	Basalte alcalin	Basalte tholéiitique	Calco-alcalin (BADR)
Contexte géodynamique	Rifting/Point chaud	Accrétion océanique	Subduction



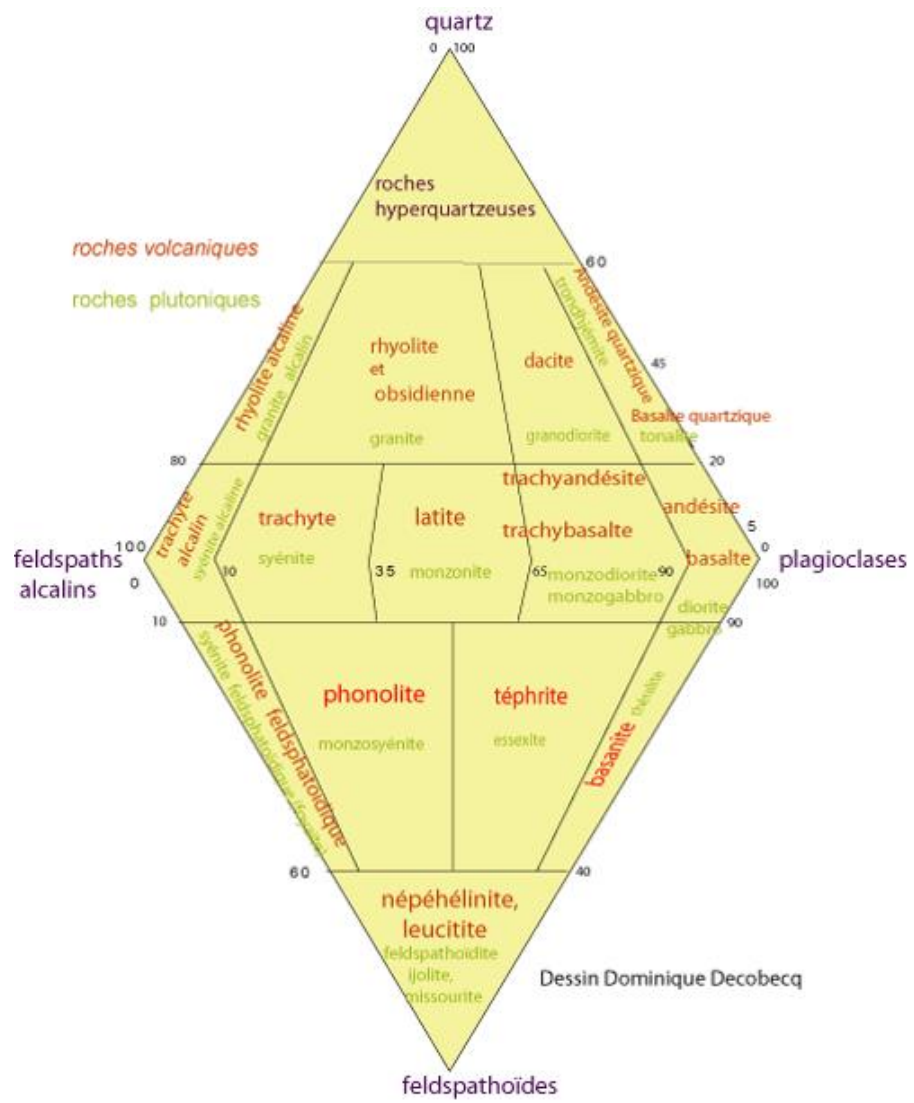
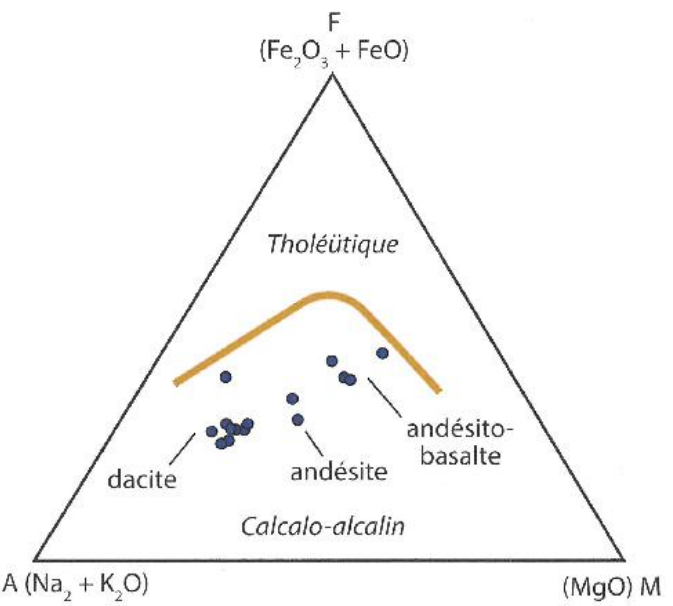
	Fusion du manteau			Fusion de la croûte	
	Andésite	Basalte alcalin	Basalte tholéitique	Granite à 2 micas	Granite à cordiérite
SiO ₂	59.89	47.52	48.77	73.83	68.76
Al ₂ O ₃	17.07	15.95	15.90	14.57	15.08
Fe ₂ O ₃	6.64	13.04	10.90	1.32	3.30
MgO	3.25	5.18	9.67	0.62	1.31
CaO	5.67	8.96	11.16	0.83	1.56
Na ₂ O	3.95	3.56	2.43	4.32	3.85
K ₂ O	2.47	1.29	0.08	3.81	4.18
TiO ₂	0.95	3.29	1.15	0.14	0.57
[(Al)/(Ca+ Na + K)]	0.88	0.68	0.65	1.15	1.10
[(K)/(Na)]	0.41	0.24	0.02	0.58	0.75
Mg #	49	44	64	47	43

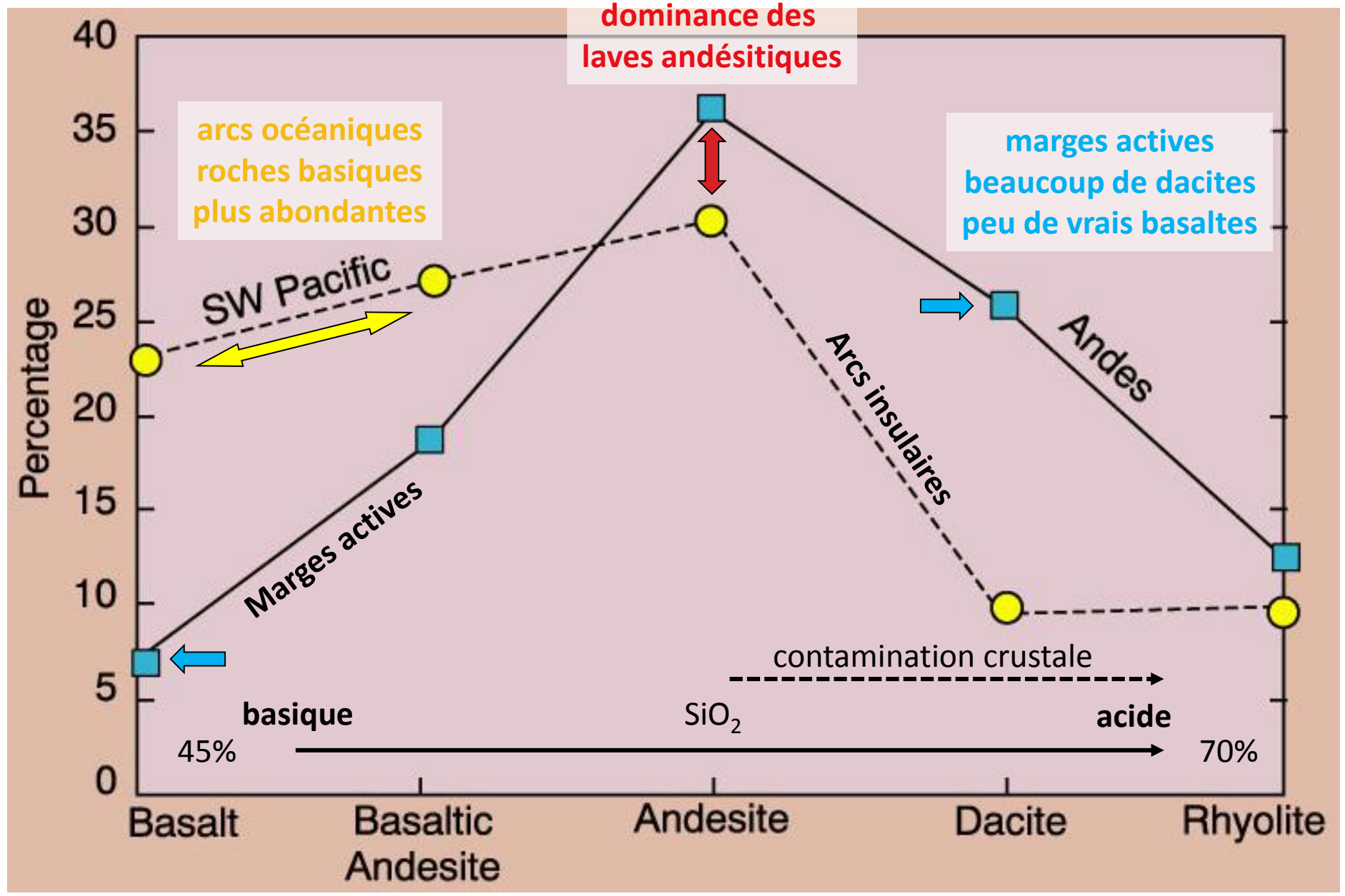
2. Données

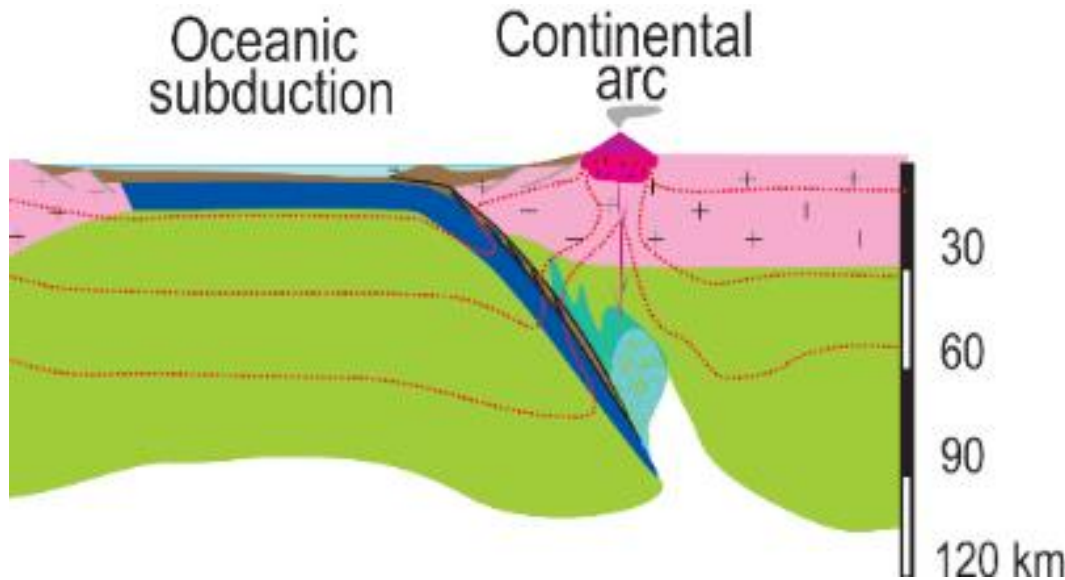
⇒ Caractéristiques du magmatisme calco-alcalin



A

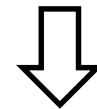




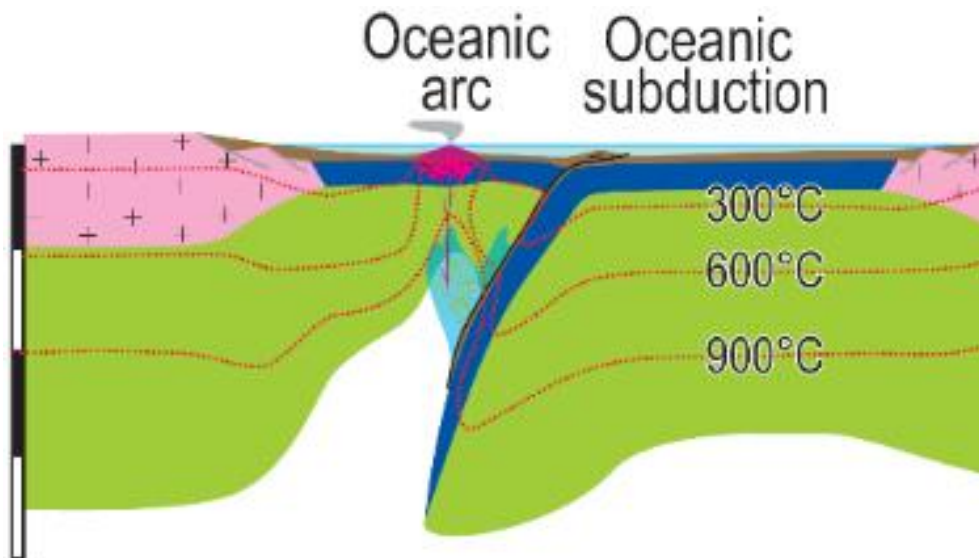


Marge active: Andes

Croûte continentale épaisse

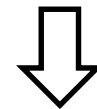


Différentiation poussée et contamination forte



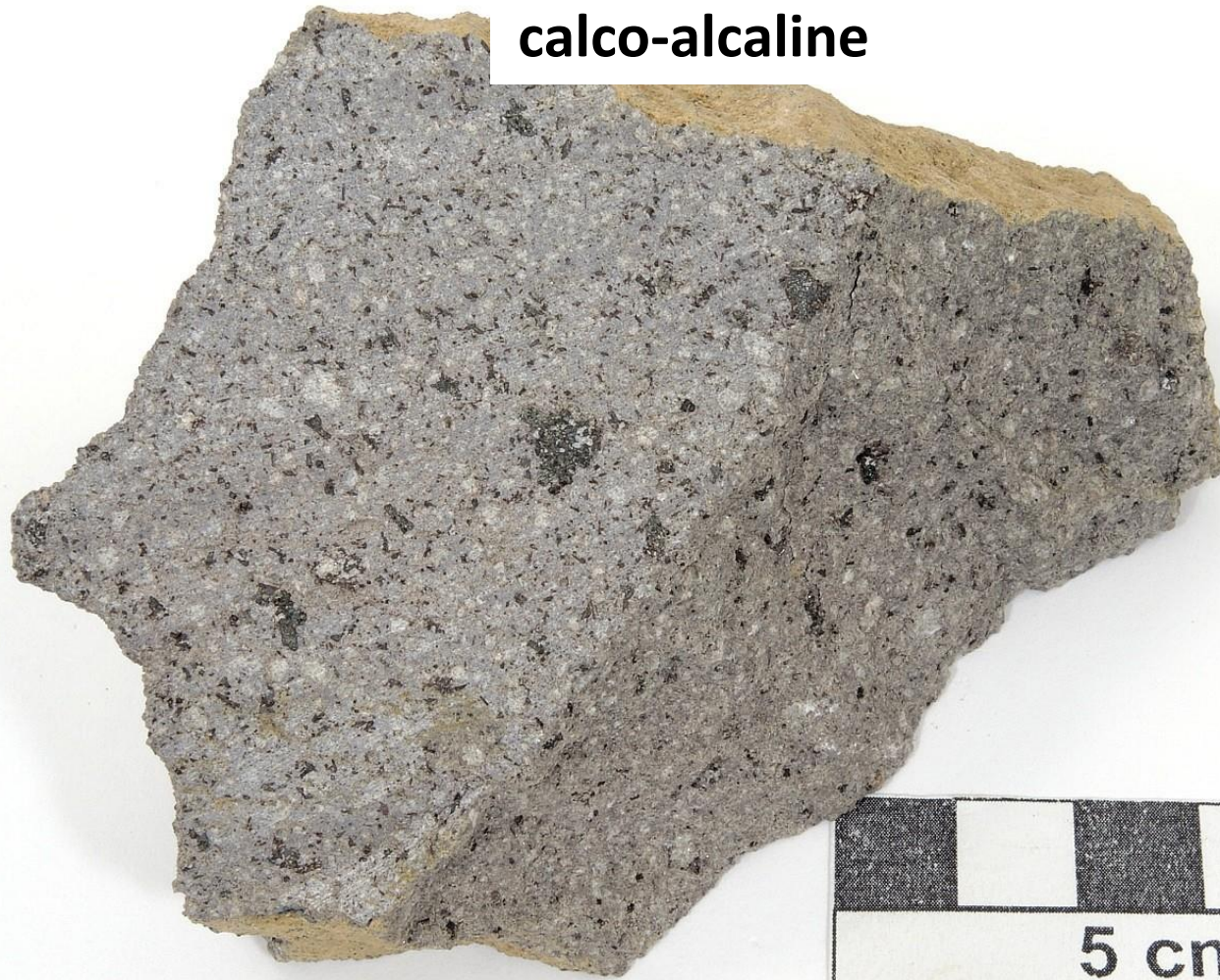
Arc insulaire: Mariannes

Croûte mince de nature **océanique**

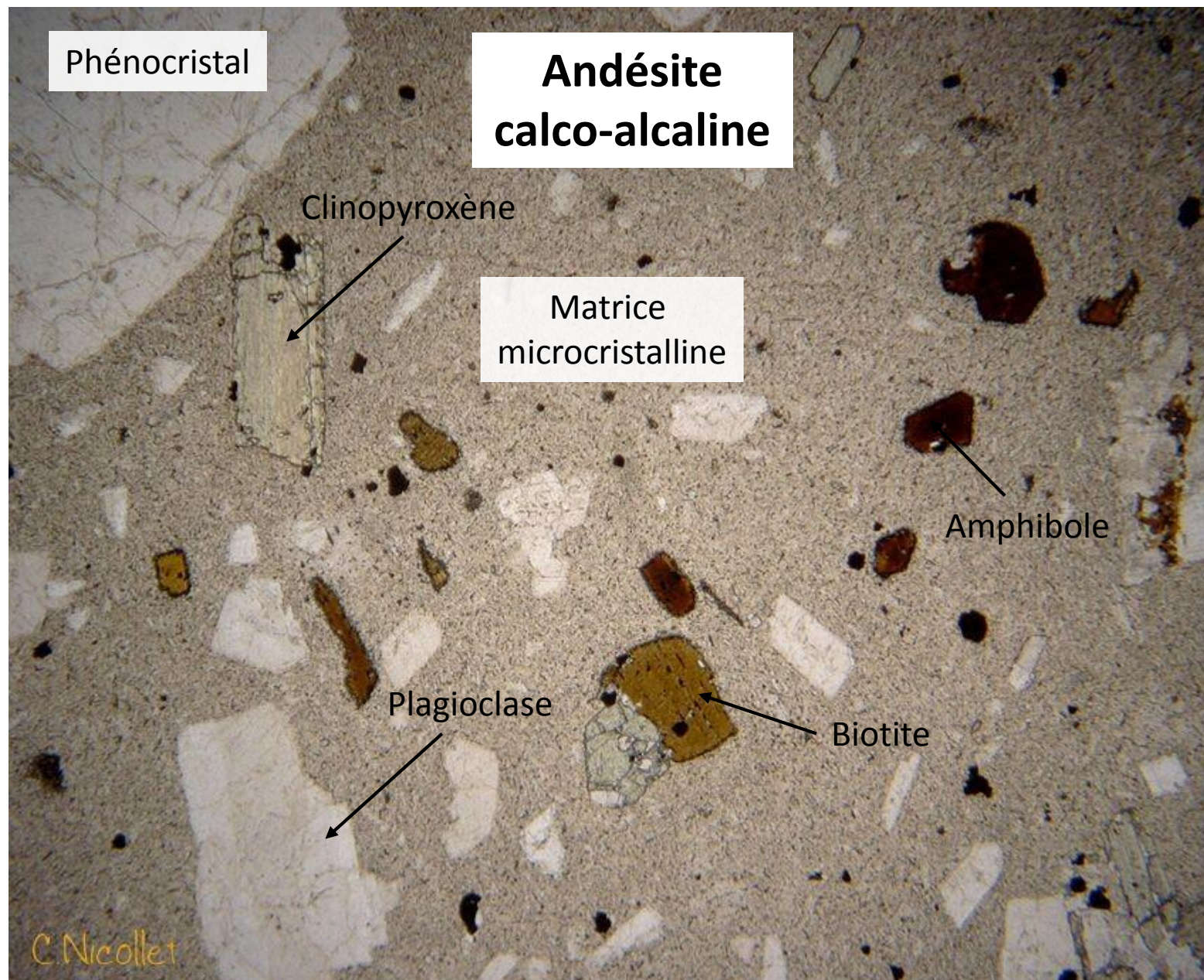


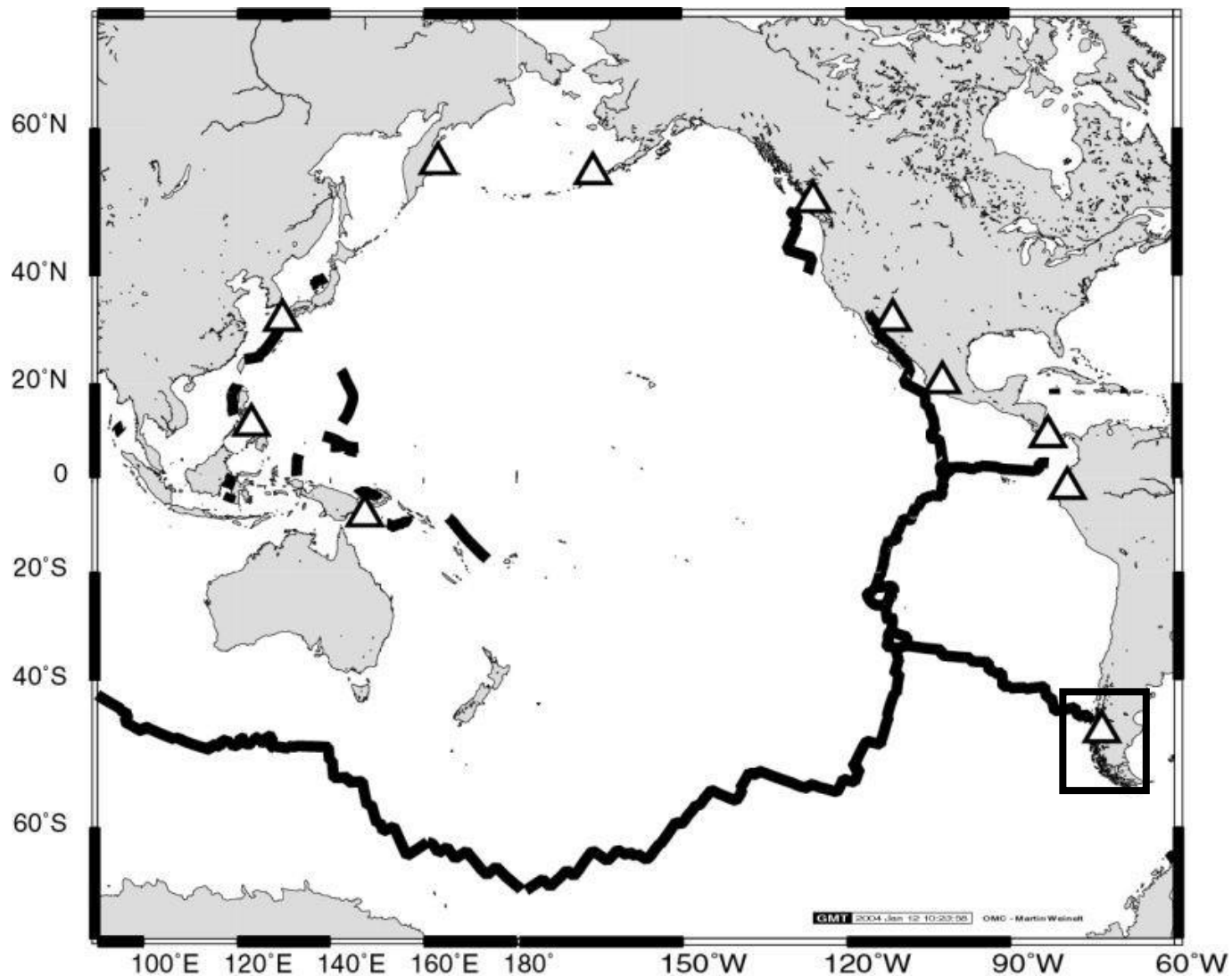
Différentiation modérée et contamination faible

**Andésite
calco-alcaline**



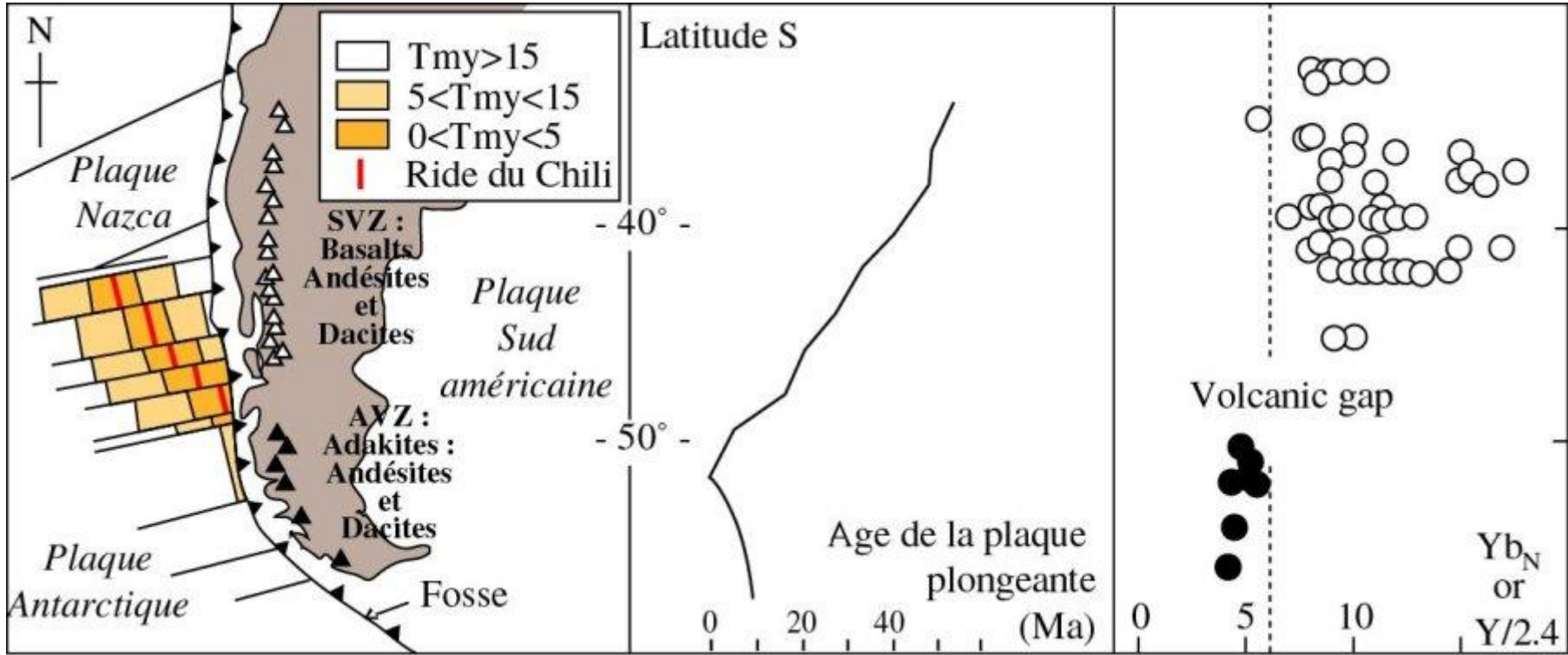






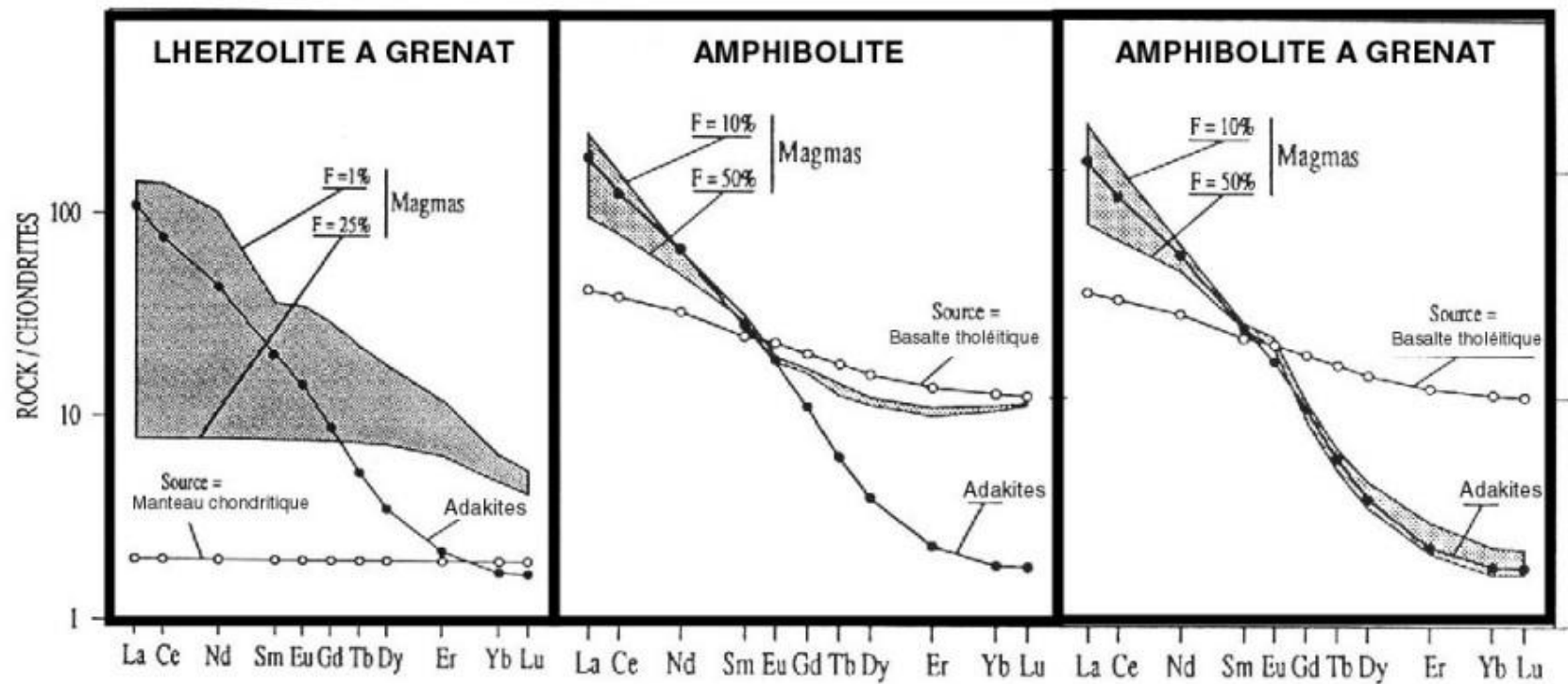
Distribution mondiale des adakites: laves particulières se formant aussi en contexte de subduction représentées par andésite et dacite (pas de termes basiques) ≠ BADR

Géodynamique: Tectonique des plaques et cycle orogénique



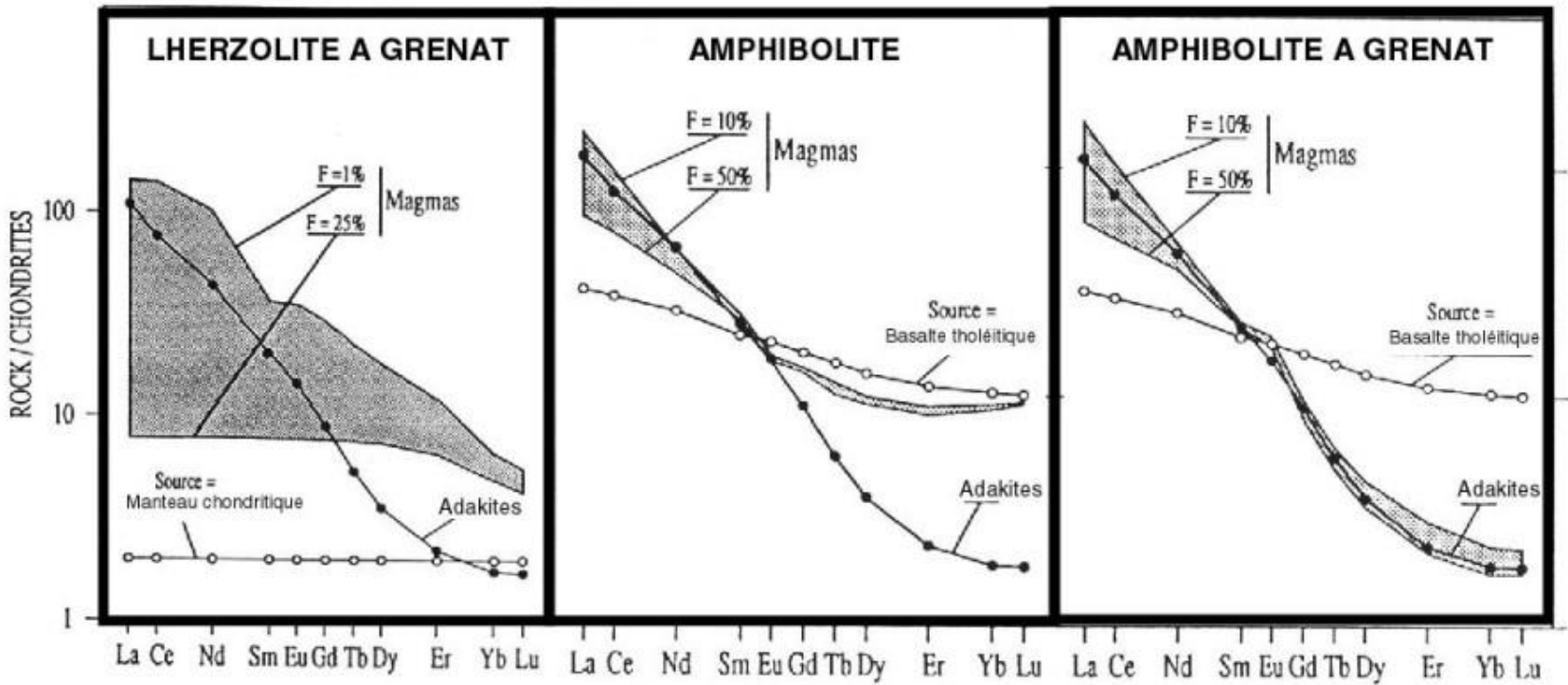
En Patagonie, la plaque Nazca (au Nord) et la plaque Antarctique (au Sud) séparées par la dorsale (active) du Chili entrent en subduction sous la plaque sud-Américaine. Cette subduction est oblique ce qui fait que l'âge de la croûte qui entre en subduction varie du Nord au Sud.

Adakites => partie méridionale de l'arc chilien = croûte **océanique** subductée **jeune**!



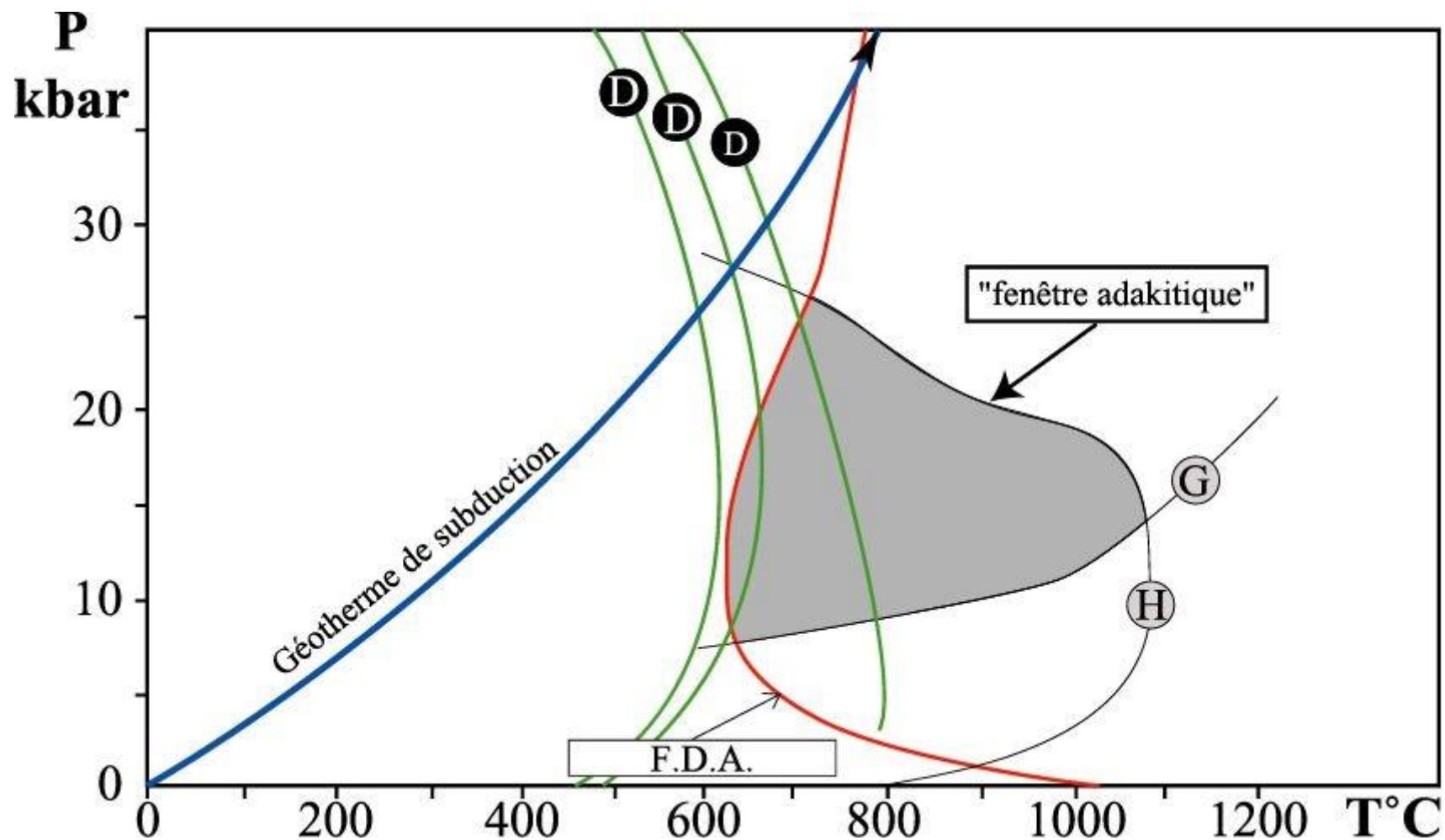
Comportement des éléments en trace obéit à des lois chimiques dépendant:

- De la teneur en cet élément dans la roche source
- De la nature des minéraux qui restent au résidu
- Du taux de fusion partielle

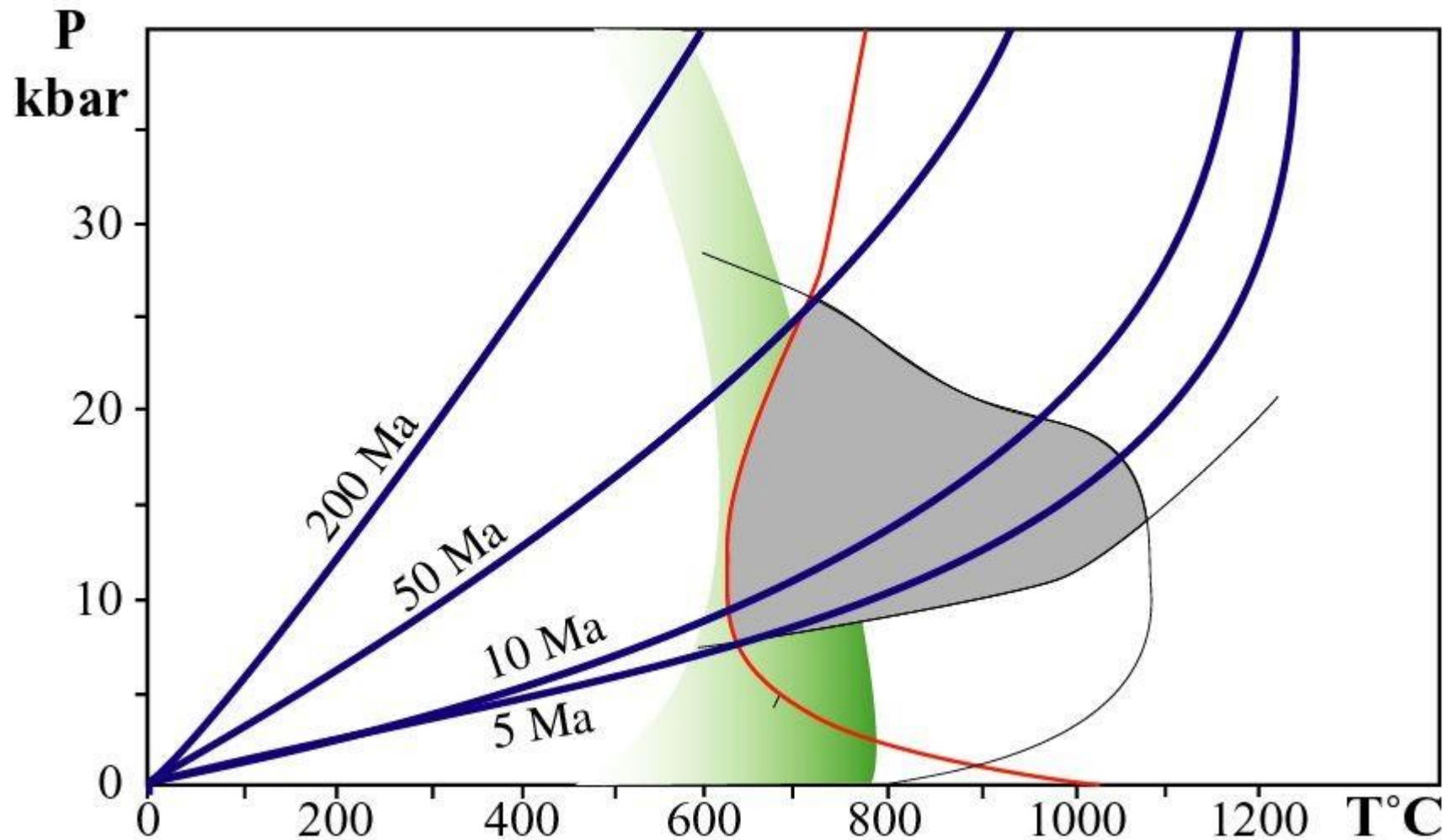


Seule la fusion partielle d'une amphibolite (basalte métamorphisé) dans des conditions où le grenat est présent au résidu permet de former des liquides adakitiques (fort coefficient de partage du grenat pour les terres rares lourdes).

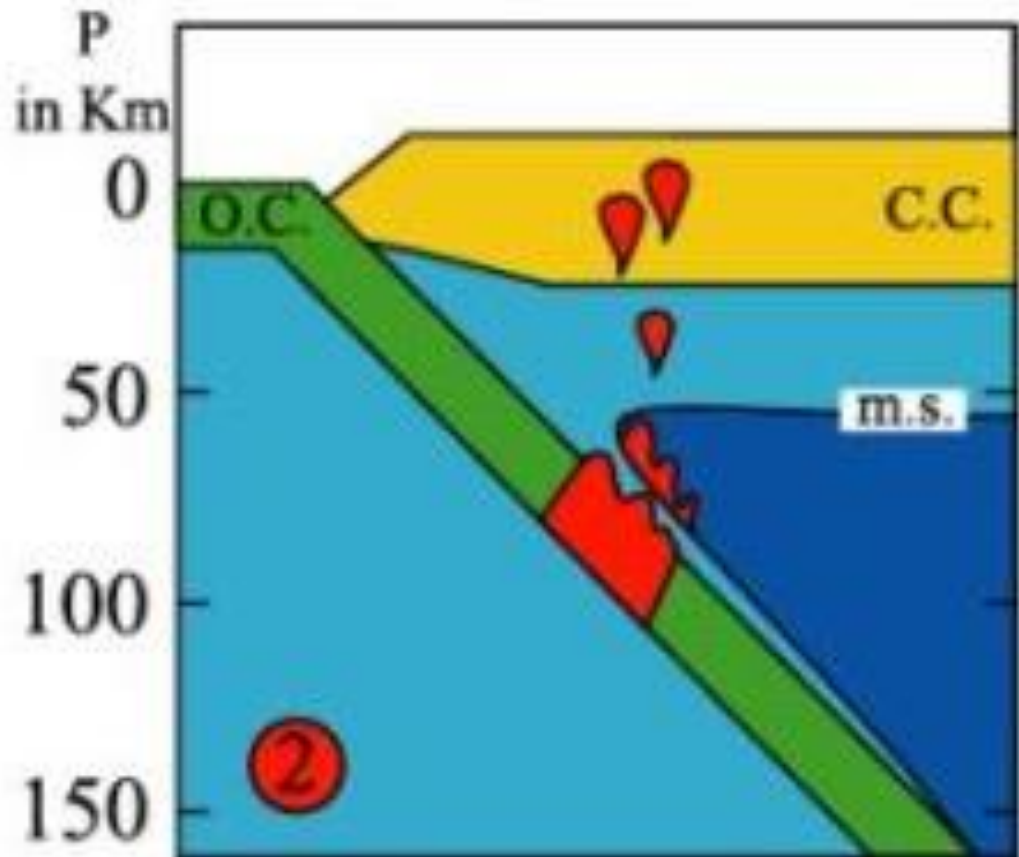
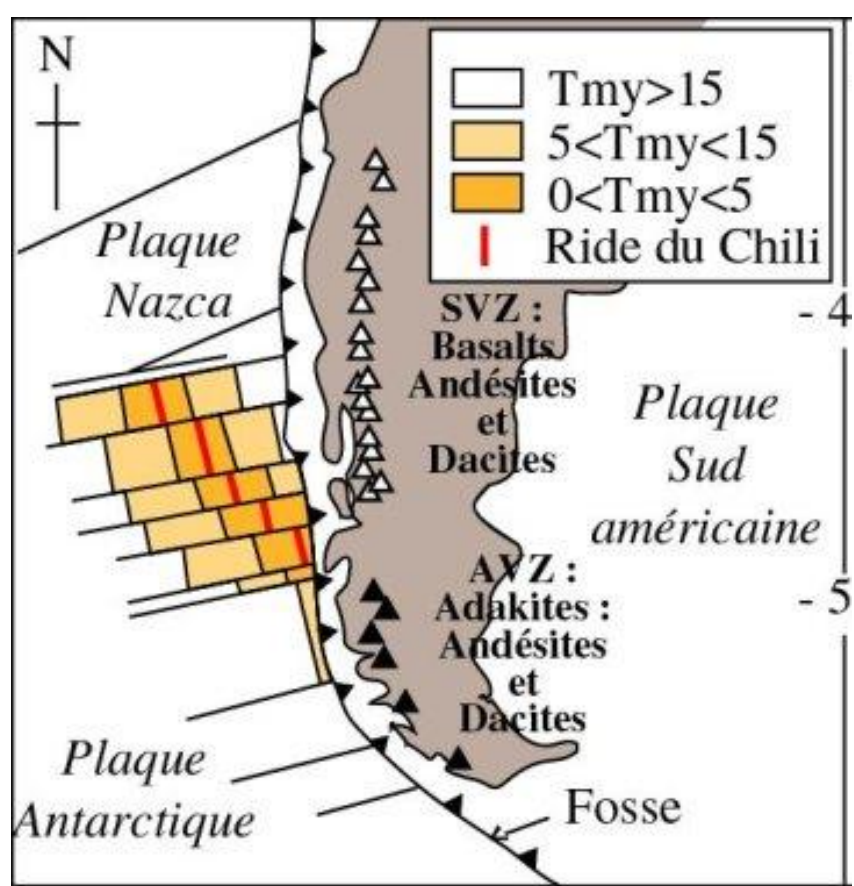
⇒ Source probable des adakites = **amphibolite à grenat**



Quelles sont les conditions pour créer des **amphibolites à grenat** dans la croûte océanique plongeante? A faire **fondre** ces **amphibolites** pour former des adakites?
⇒ Réaction de fusion-déshydratation de l'amphibole (FDA) dans un basalte hydraté



Subduction **normale** => gradients **géothermiques** trop **froids** (ne rentre jamais dans la fenêtre adakitique)

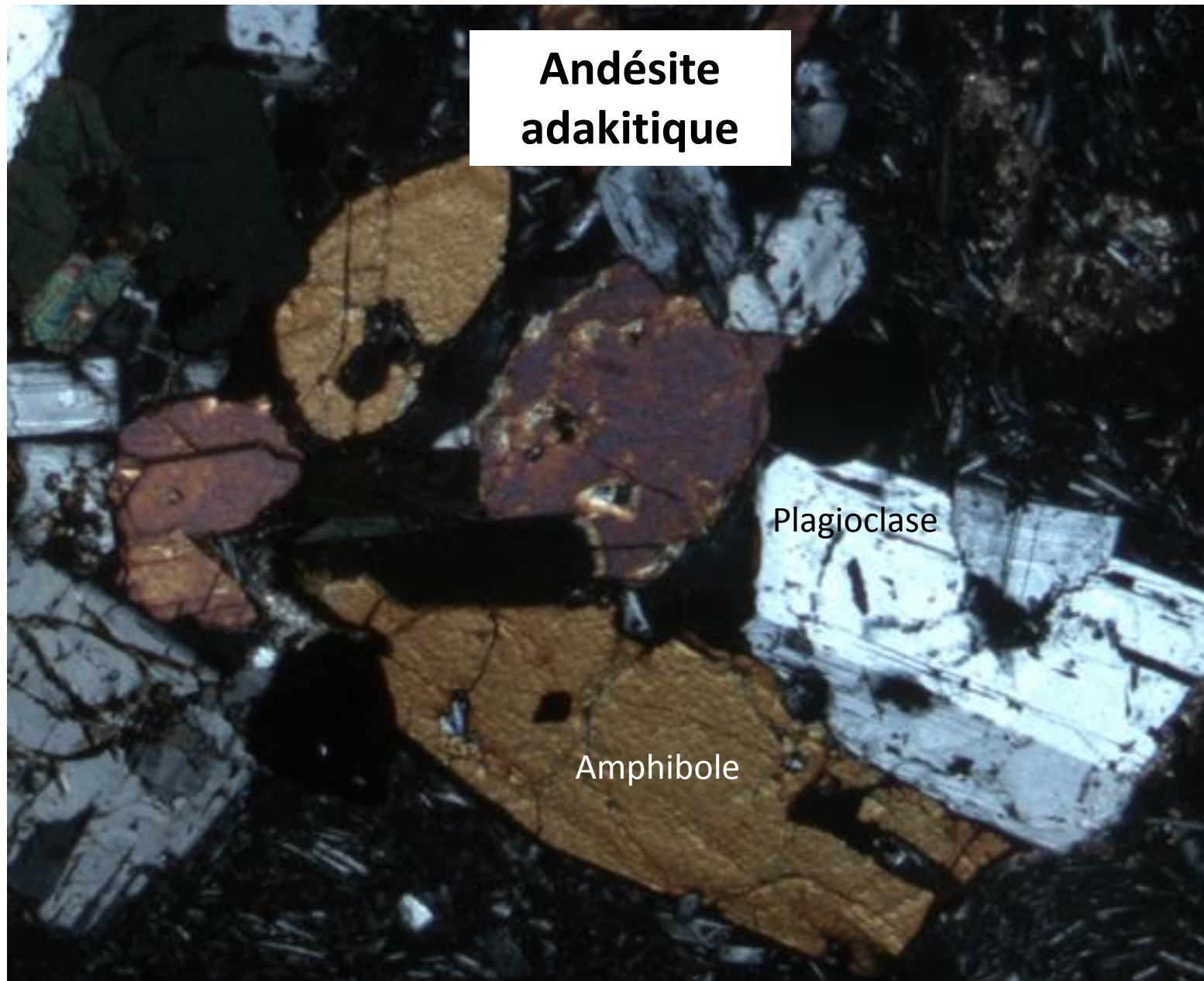


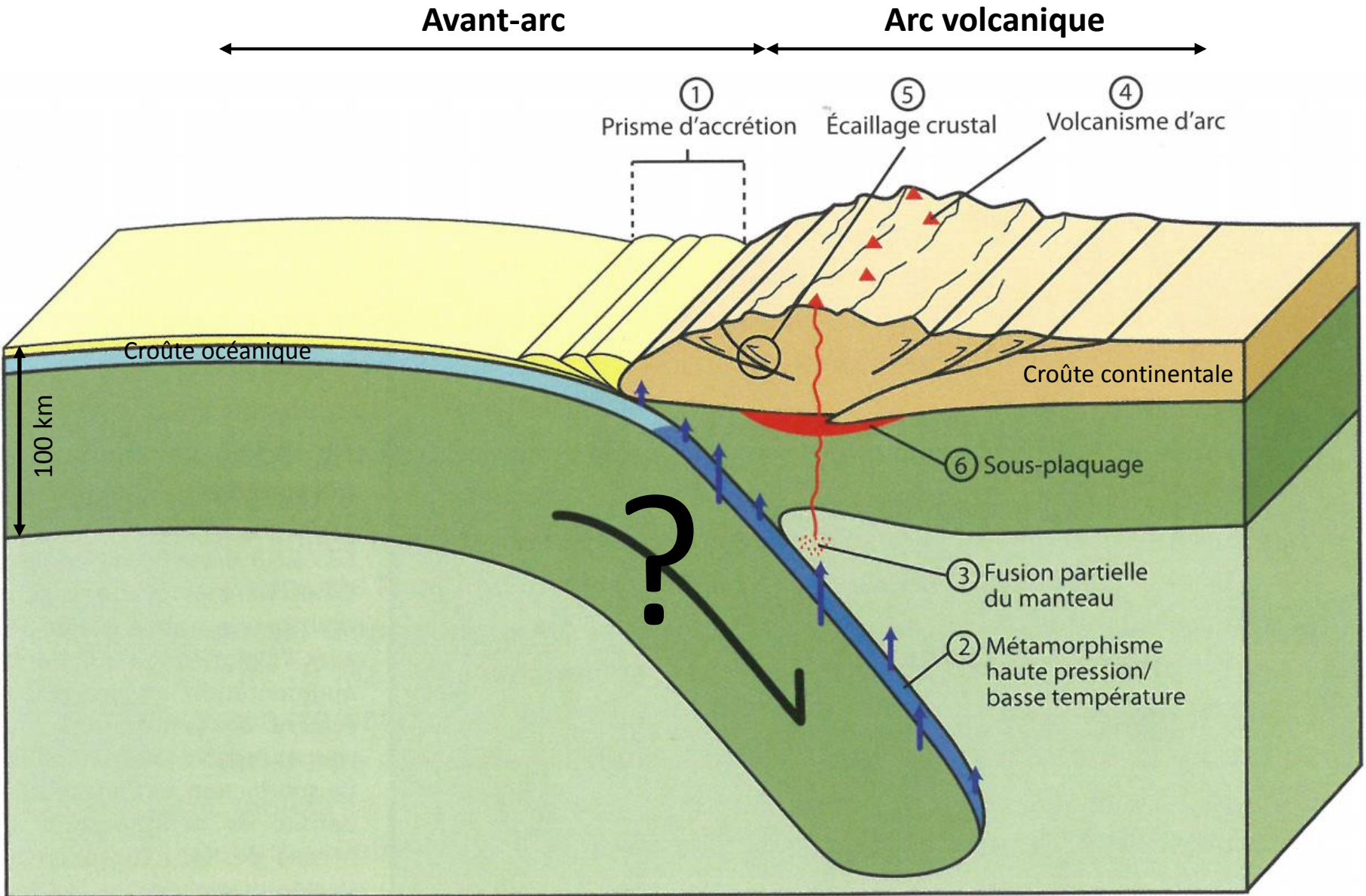
Subduction normale => gradients géothermiques trop froids (ne rentre jamais dans la fenêtre adakitique)

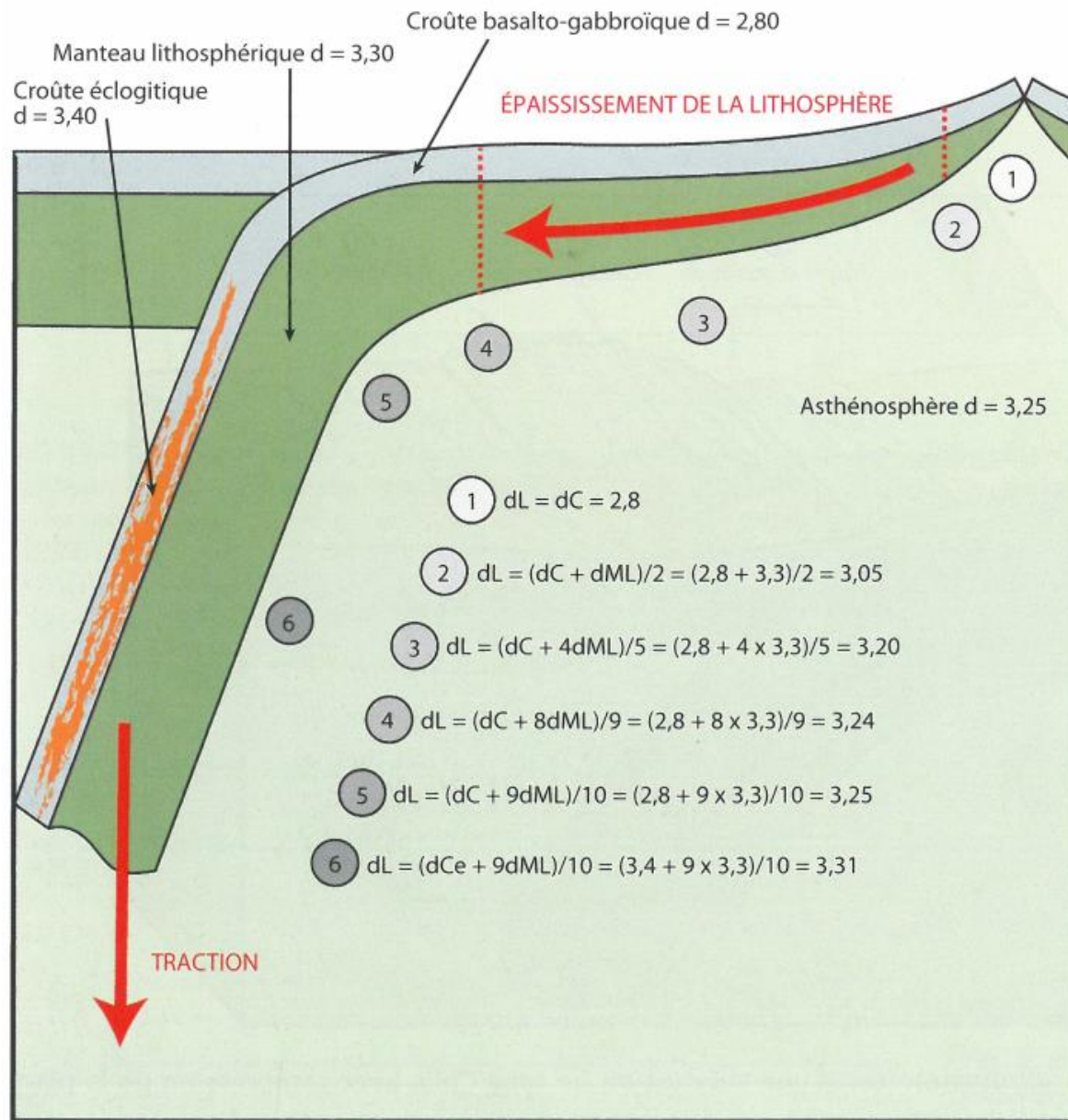
⇒ **Subduction chaude** donc **lithosphère** océanique **jeune** (+ proche dorsale): **fusion de C.O.**



**Andésite
adakitique**







1. Refroidissement et rupture:

✓ Moteur gravitaire

Lithosphère suffisamment refroidie donc âgée ≈ 70 Ma

$$\rho_{\text{lithosphère}} > \rho_{\text{asthénosphère}}$$

✓ Moteur mécanique

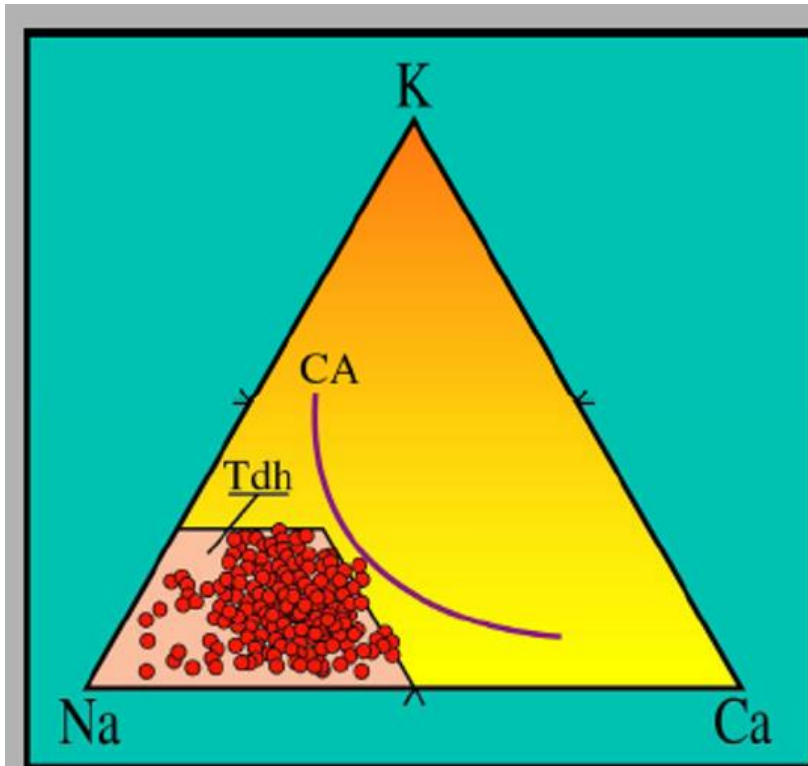
Contraintes tectoniques permettant la rupture de la lithosphère

2. Eclogitisation de la plaque

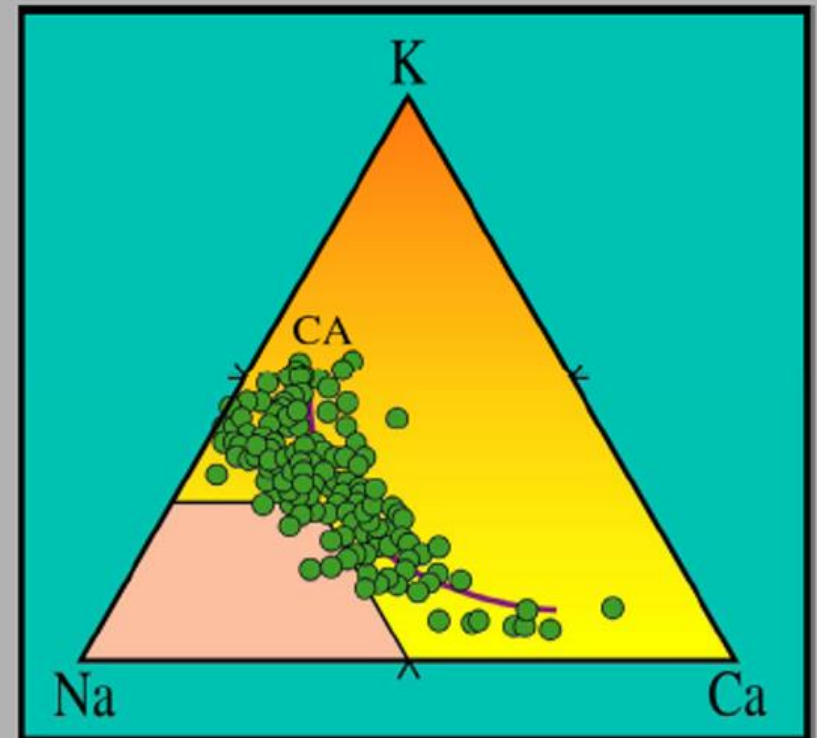
Densité de 3.4 dès 45km $\Rightarrow$ traction supplémentaire

3. Pendage de la plaque

- Age du slab
- Mouvements asthénosphériques
- Rigidité de la lithosphère

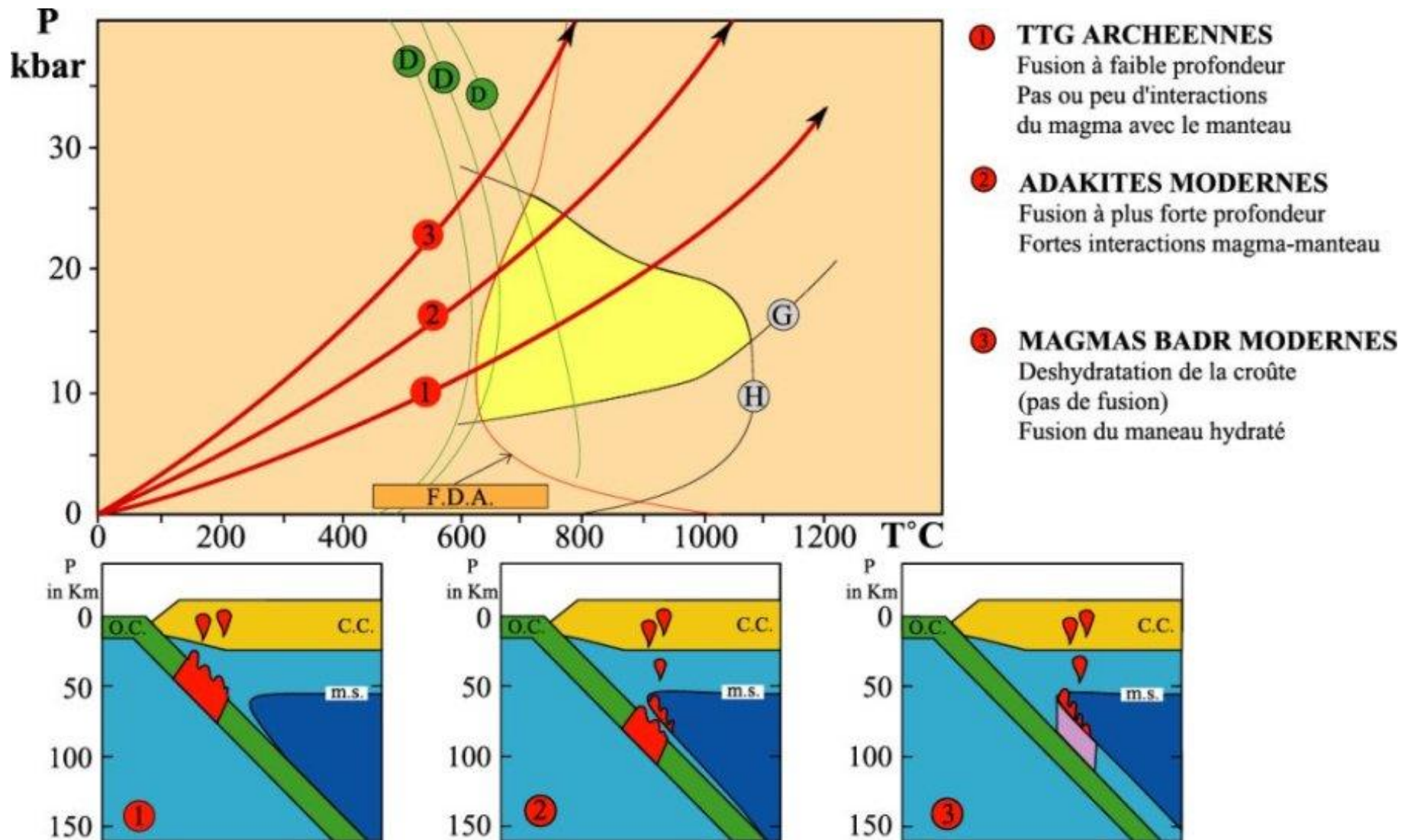


**Croûte continentale
archéenne = TTG**



**Croûte continentale moderne
= calco-alkaline**

Adakites ont des compositions chimiques voisines de celles des TTG (Tonalite-Trondhjémite-Granodiorite), les roches dominantes de la croûte archéenne



F.D.A.: fusion-déshydratation de l'amphibole; D: déshydratation; G: limite inférieur de stabilité du grenat; H: correspond à la disparition de l'amphibole

**Contexte de subduction
d'une plaque océanique moins chaude**

BADR/Adakites

Sanukitoïdes, Adakites LSA

TTG tardi-Archéenne

TTG Archéenne

**Contexte de subduction
d'une plaque océanique plus chaude**

Contexte de plateaux océaniques

