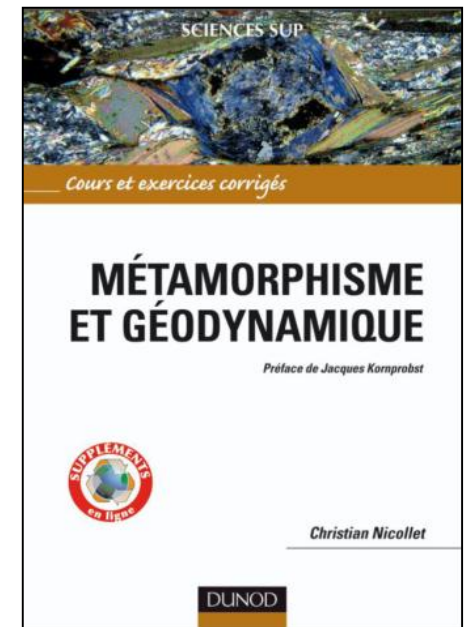
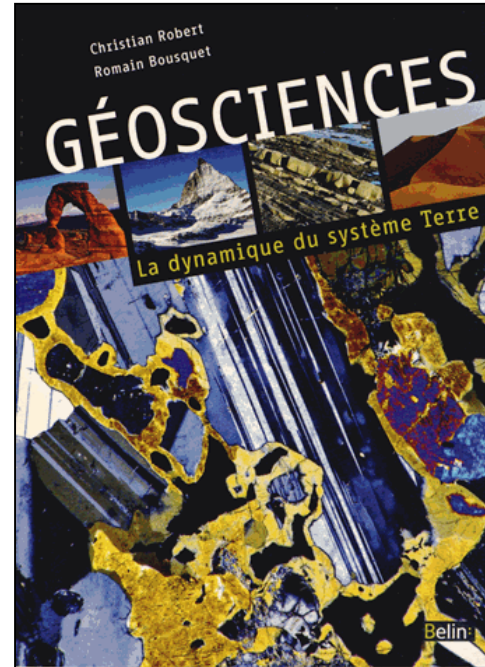
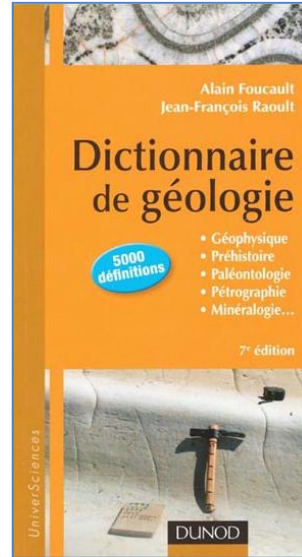
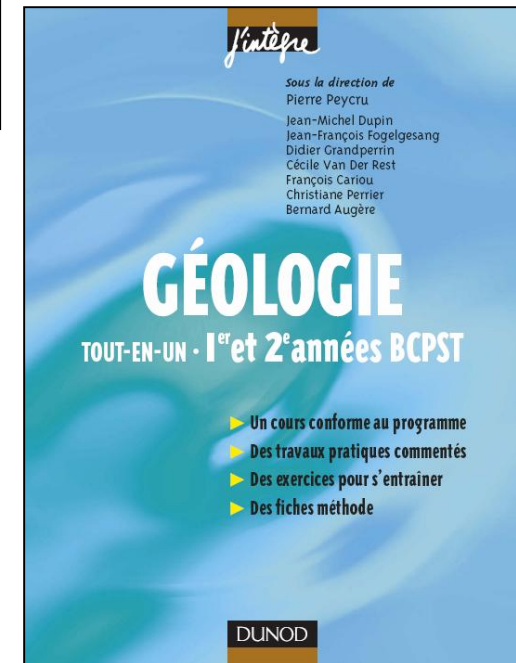
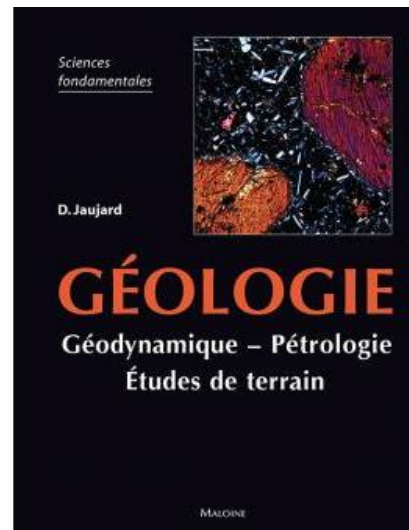




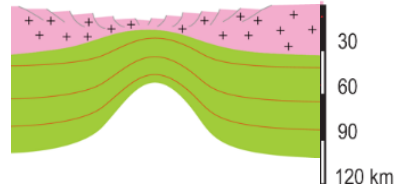
Sources et lectures (pas) obligatoires



+
Colloque du 14 Janvier 2014
« La croûte
continentale » (AFPSVT)
Conf. S. Duchene, J.F. Moyen, O.
Vanderhaege et P. Goncalves
<http://afpsvt.fr/la-croûte-continentale/>

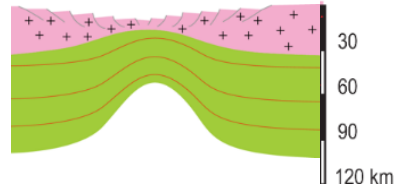


Cycle de Wilson

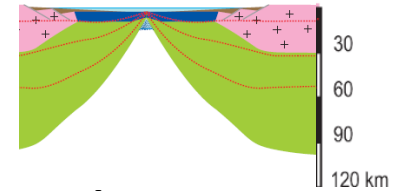


1. Rifting continental

Cycle de Wilson

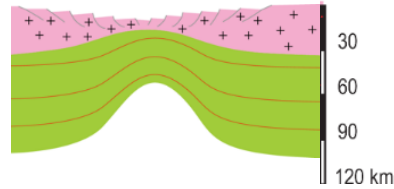


1. Rifting continental

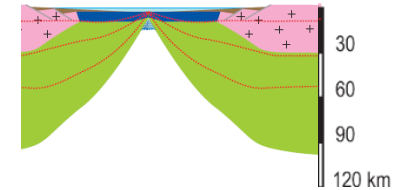


2. Océanisation

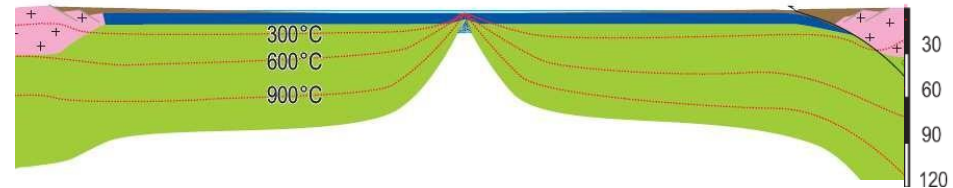
Cycle de Wilson



1. Rifting continental

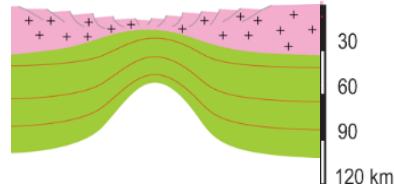


2. Océanisation

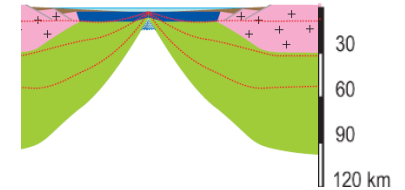


3. Expansion océanique

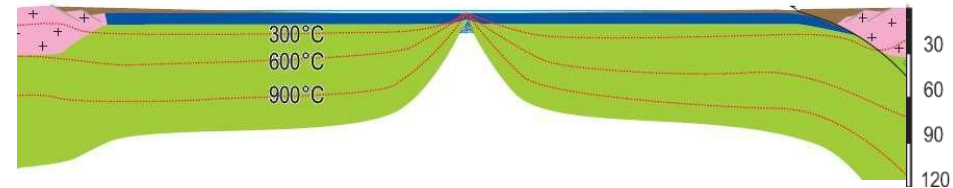
Cycle de Wilson



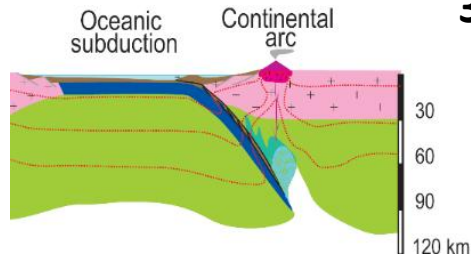
1. Rifting continental



2. Océanisation

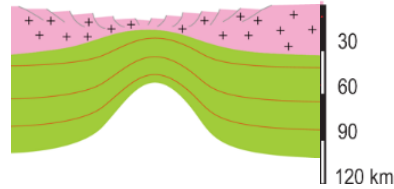


3. Expansion océanique

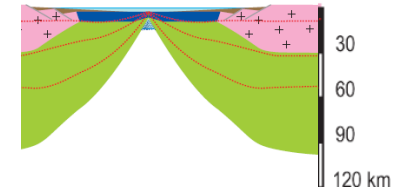


4. Subduction

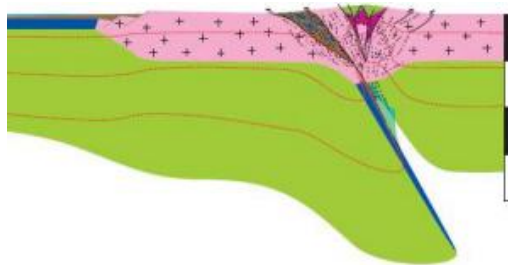
Cycle de Wilson



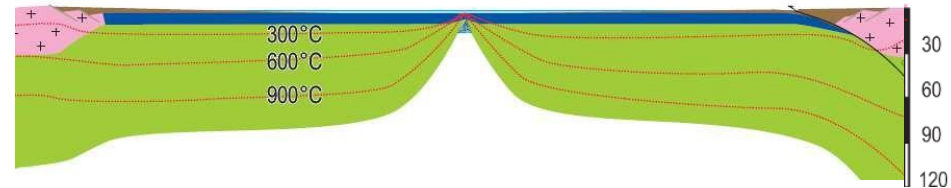
1. Rifting continental



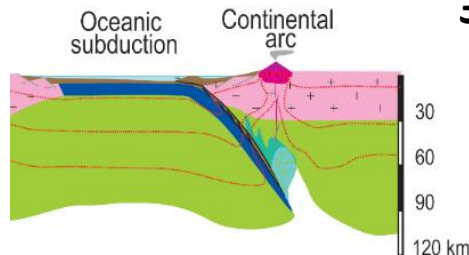
2. Océanisation



5. Collision

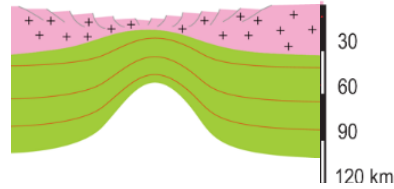


3. Expansion océanique

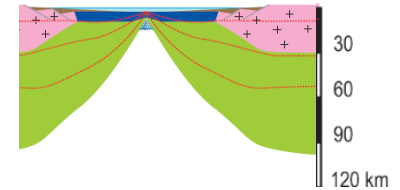


4. Subduction

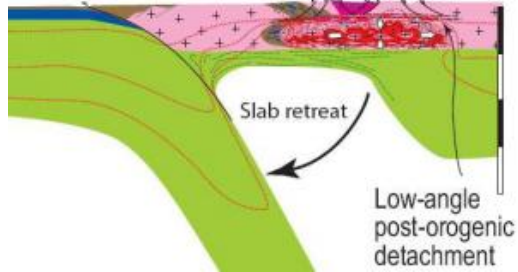
Cycle de Wilson



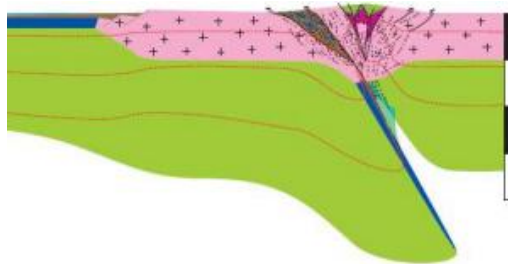
1. Rifting continental



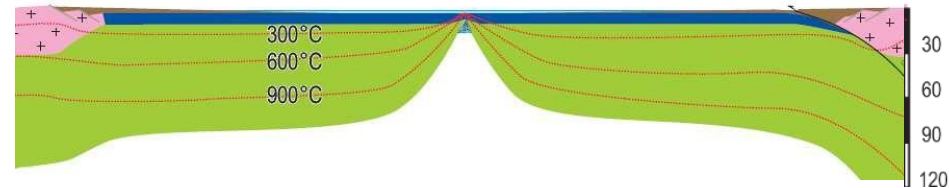
2. Océanisation



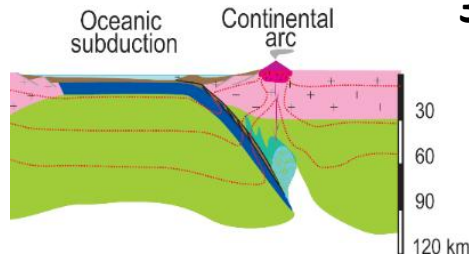
6. Effondrement gravitaire



5. Collision

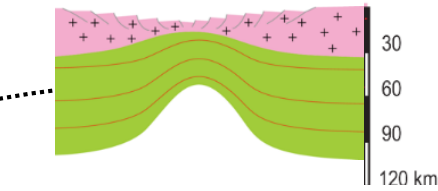


3. Expansion océanique

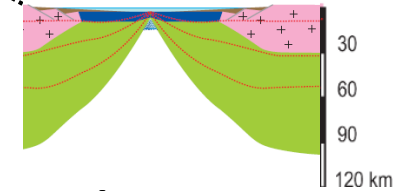


4. Subduction

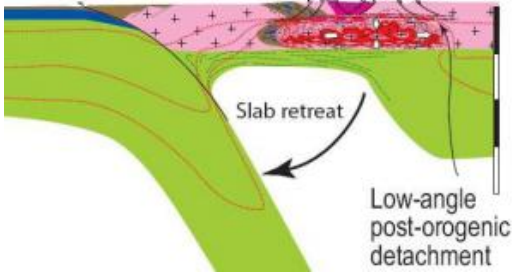
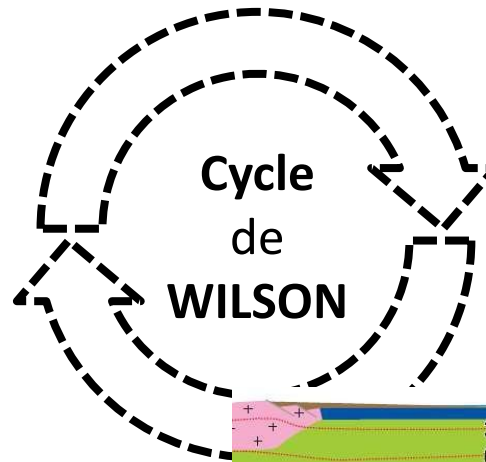
Cycle de Wilson



1. Rifting continental



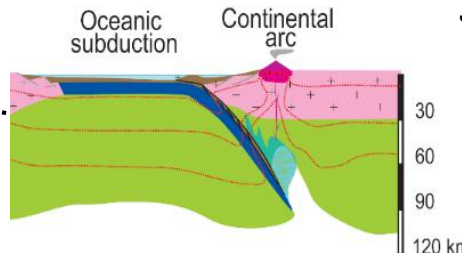
2. Océanisation



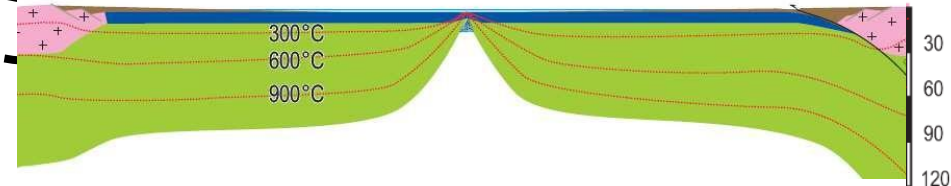
6. Effondrement gravitaire



5. Collision



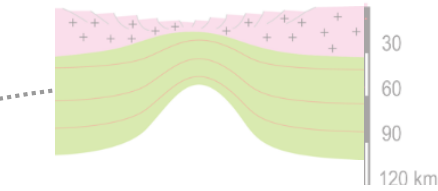
4. Subduction



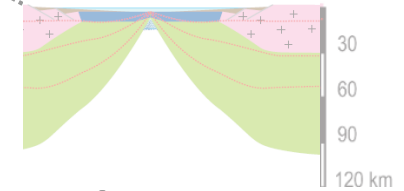
3. Expansion océanique

(Vanderhaeghe, 2012)

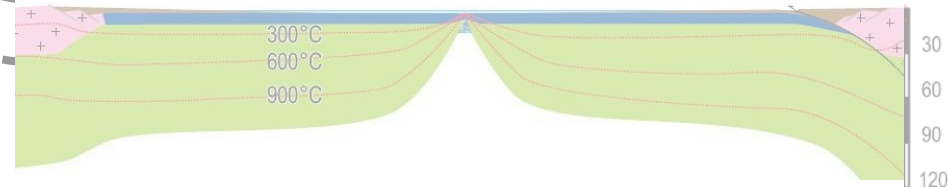
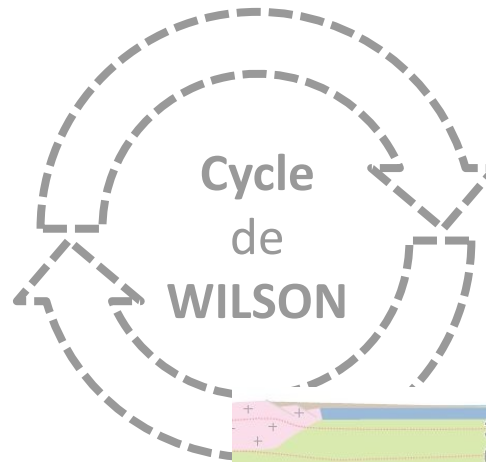
Cycle de Wilson



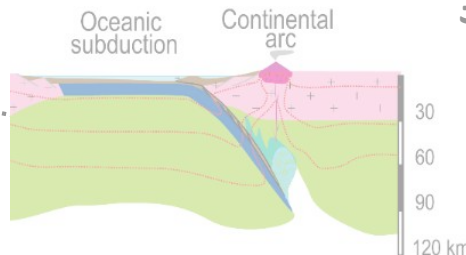
1. Rifting continental



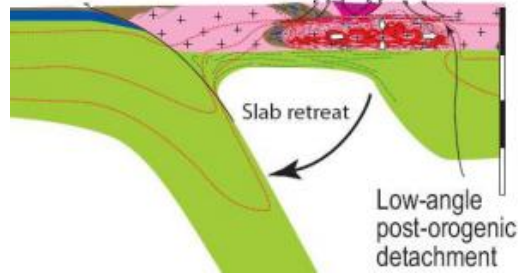
2. Océanisation



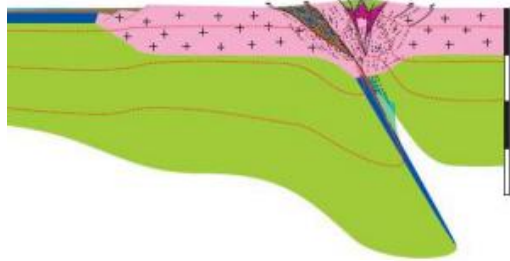
3. Expansion océanique



4. Subduction



6. Effondrement gravitaire



5. Collision

(Vanderhaeghe, 2012)

Origine de la chaleur et thermicité de la lithosphère

Radioactivité naturelle des roches:

Elément	Concentration des les différentes enveloppes (ppm)				Production de chaleur par unité de masse (mW.kg ⁻¹) par an
	Noyau	Manteau	Croûte cont.	Croûte oc.	
Uranium (²³⁵ U et ²³⁸ U)	10 ⁻⁵	0,015	1,6	0,9	162
Thorium (²³² Th)	10 ⁻⁴	0,08	5,8	2,7	6,6
Potassium (⁴⁰ K)	1	200	25 000	4 000	4,8
Masse des enveloppes (kg)	2,32.10 ²⁴	3,70.10 ²⁴	1,38.10 ²²	6,9.10 ²¹	

Isotope	Demi-vie (millions d'années)
⁴⁰ K	1280
²³² Th	14 000
²³⁵ U	707
²³⁸ U	4 470

Demi-vie des principaux isotopes radioactifs contribuant à la production de chaleur

Concentration des principaux isotopes radioactifs contribuant à la production de chaleur dans les enveloppes de la Terre et quantité de chaleur produit par ces éléments par unité de masse

+ Chaleur initiale (primordiale) + chaleur de différenciation (cristallisation du noyau solide)

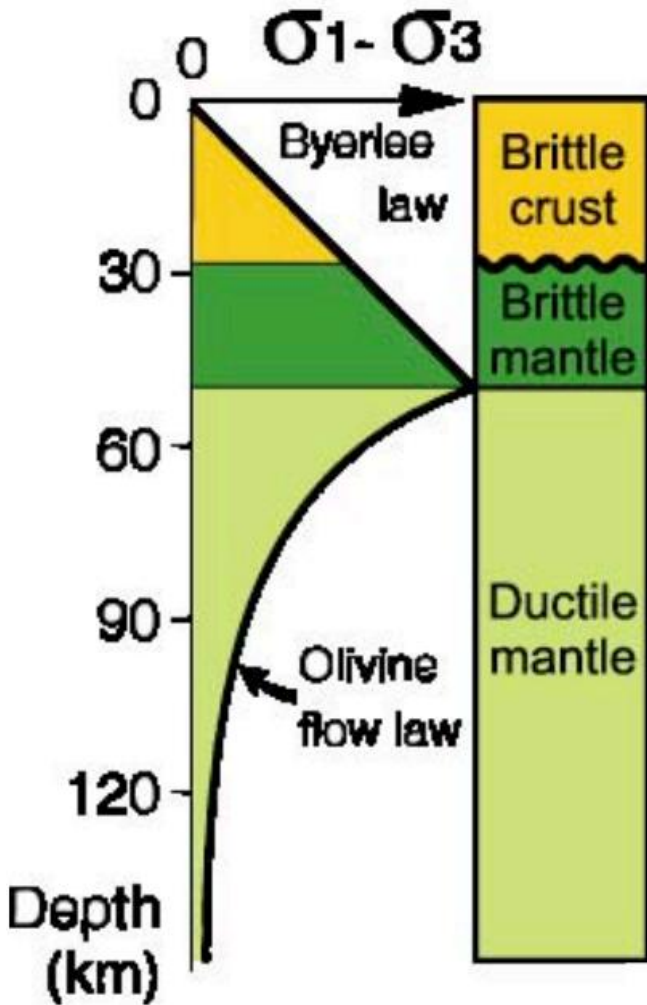
Source de chaleur	Puissance (TW)
Radioactivité du manteau actuel et des croûtes	26
Radioactivité du noyau	0 à 1
Chaleur initiale	12,3
Chaleur de différenciation	4,7
Total	43 à 44

Sources de chaleur dans le Terre et contribution à la puissance totale libérée en surface

Croûtes ≈ 1/3 ; Manteau ≈ 2/3

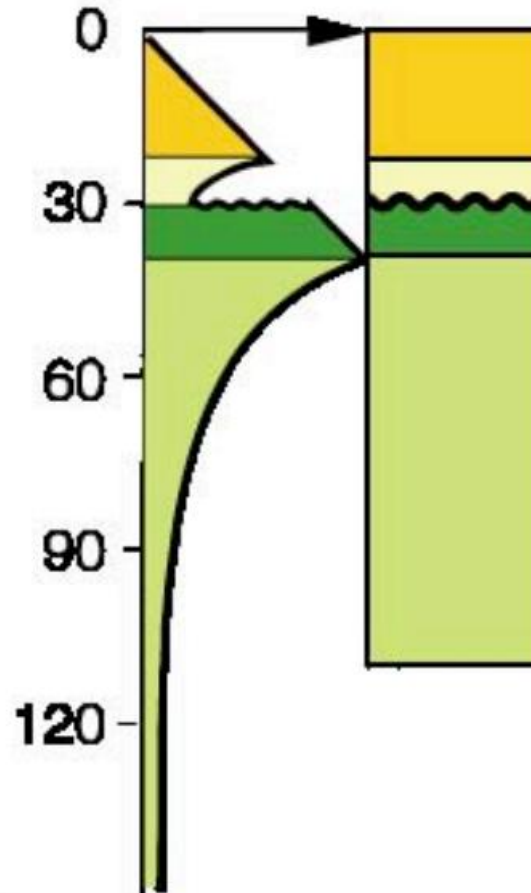
Profils rhéologiques et gradients géothermiques

Lithosphère vieille et stable



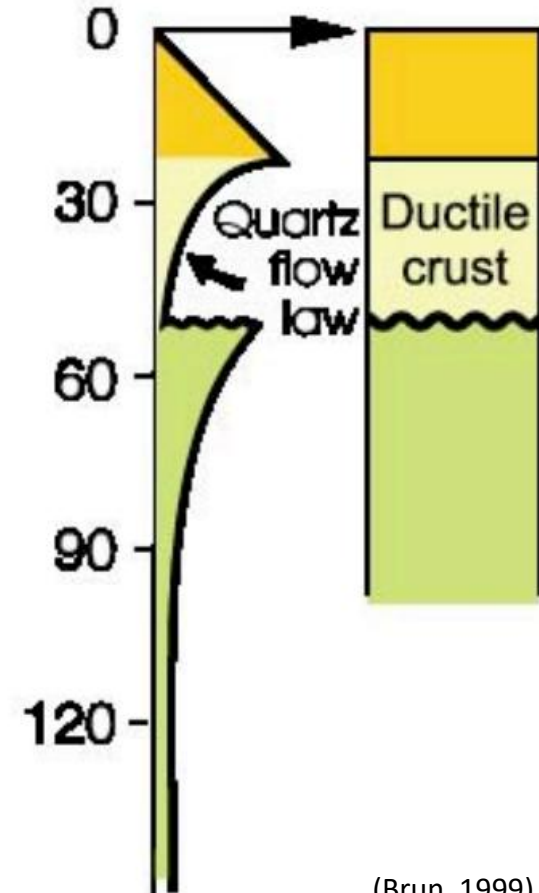
⇒ Gradient géothermique
froid

Lithosphère jeune et stable



⇒ Gradient géothermique
normal

Lithosphère épaissie

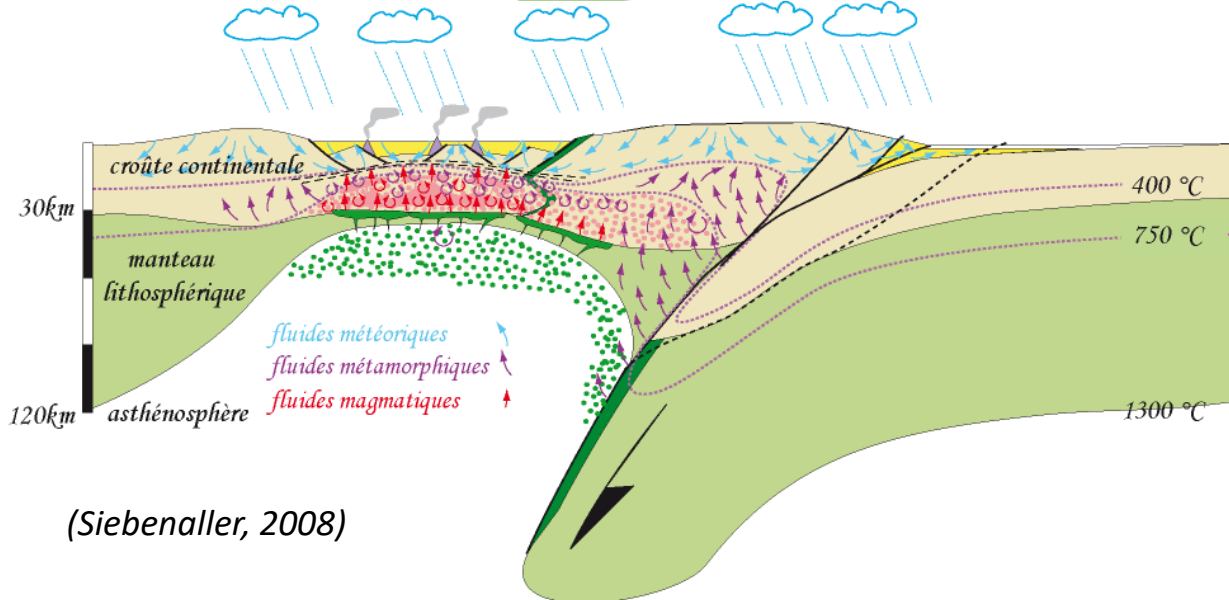
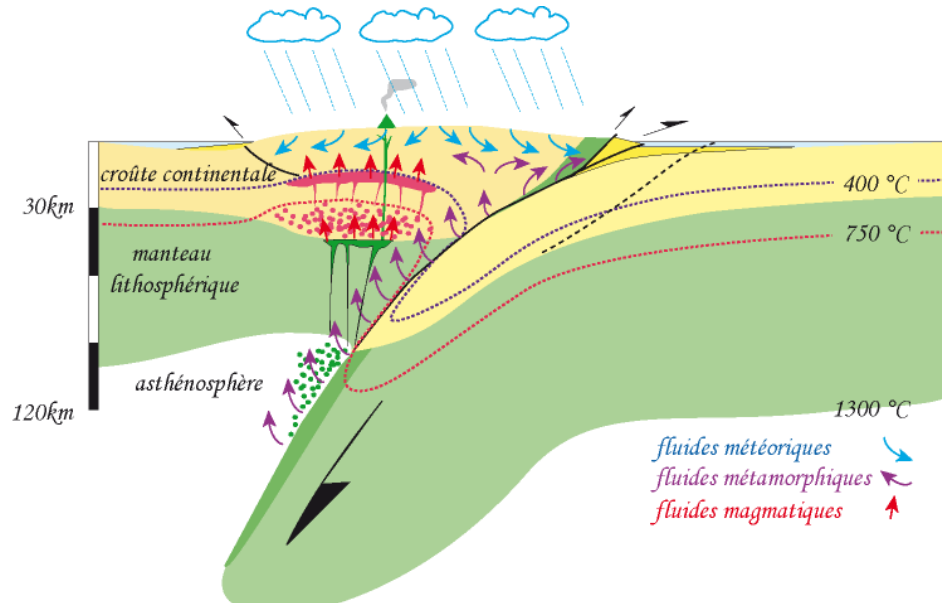


⇒ Gradient géothermique
chaud

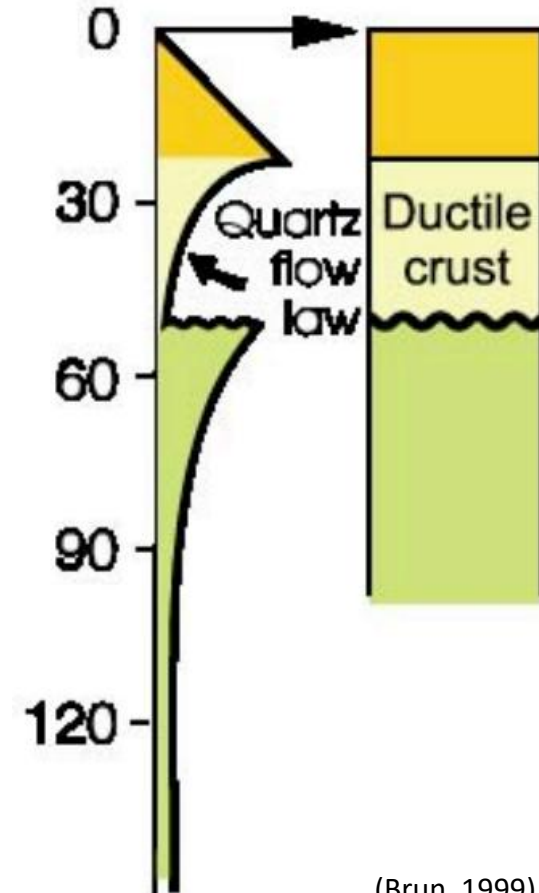
(Brun, 1999)

Profils rhéologiques et gradients géothermiques

Lithosphère épaissie



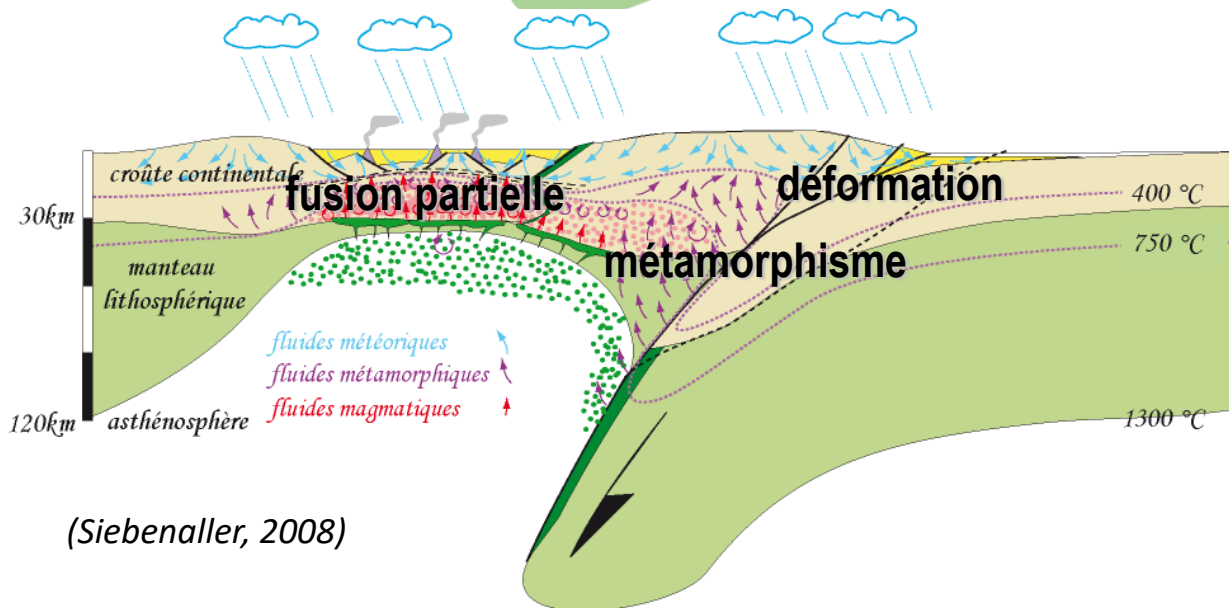
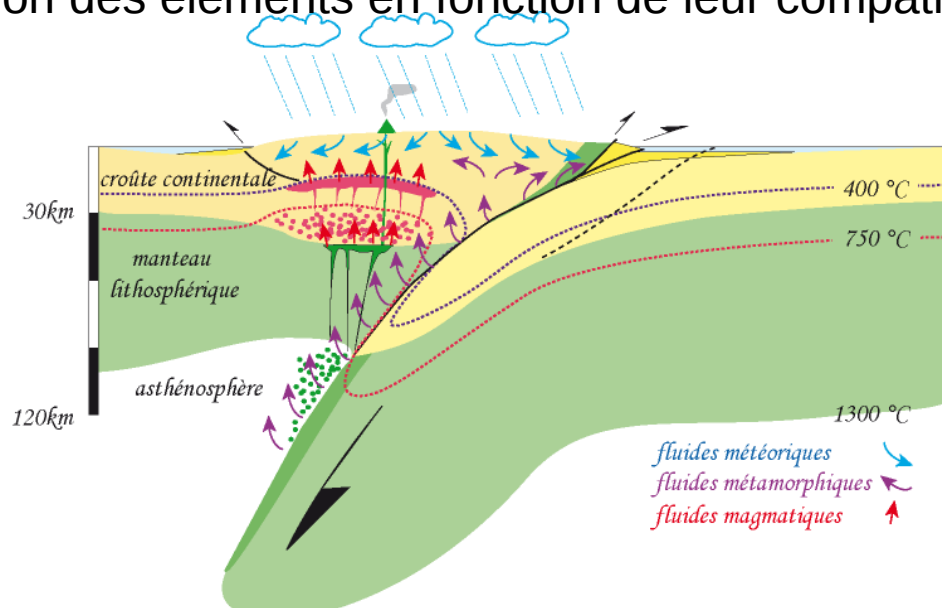
(Siebenaller, 2008)



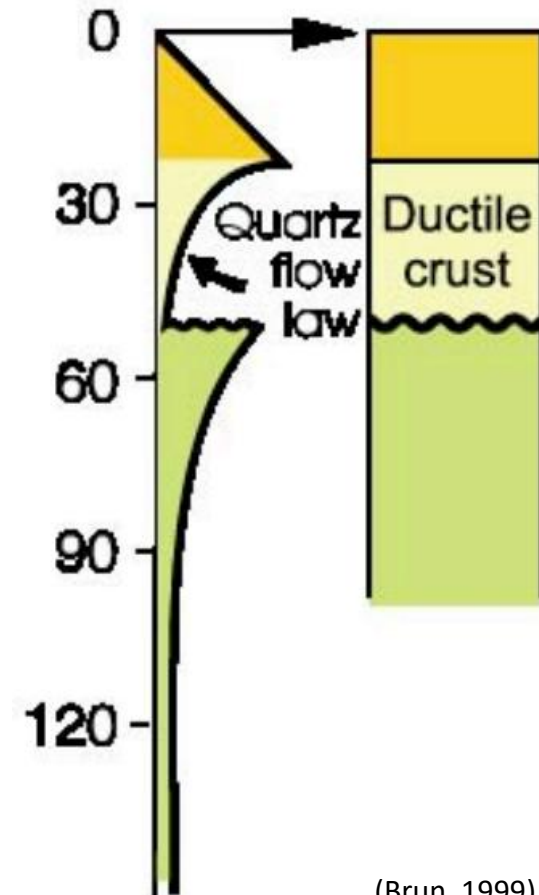
(Brun, 1999)

⇒ Gradient géothermique
chaud

- ✓ **Remobilisation crustale (crustal reworking) :**
déformation/métamorphisme/métasomatisme d'une croûte préexistante
- ✓ **Différentiation à l'échelle de la croûte (crustal differentiation):**
redistribution des éléments en fonction de leur compatibilité géochimique



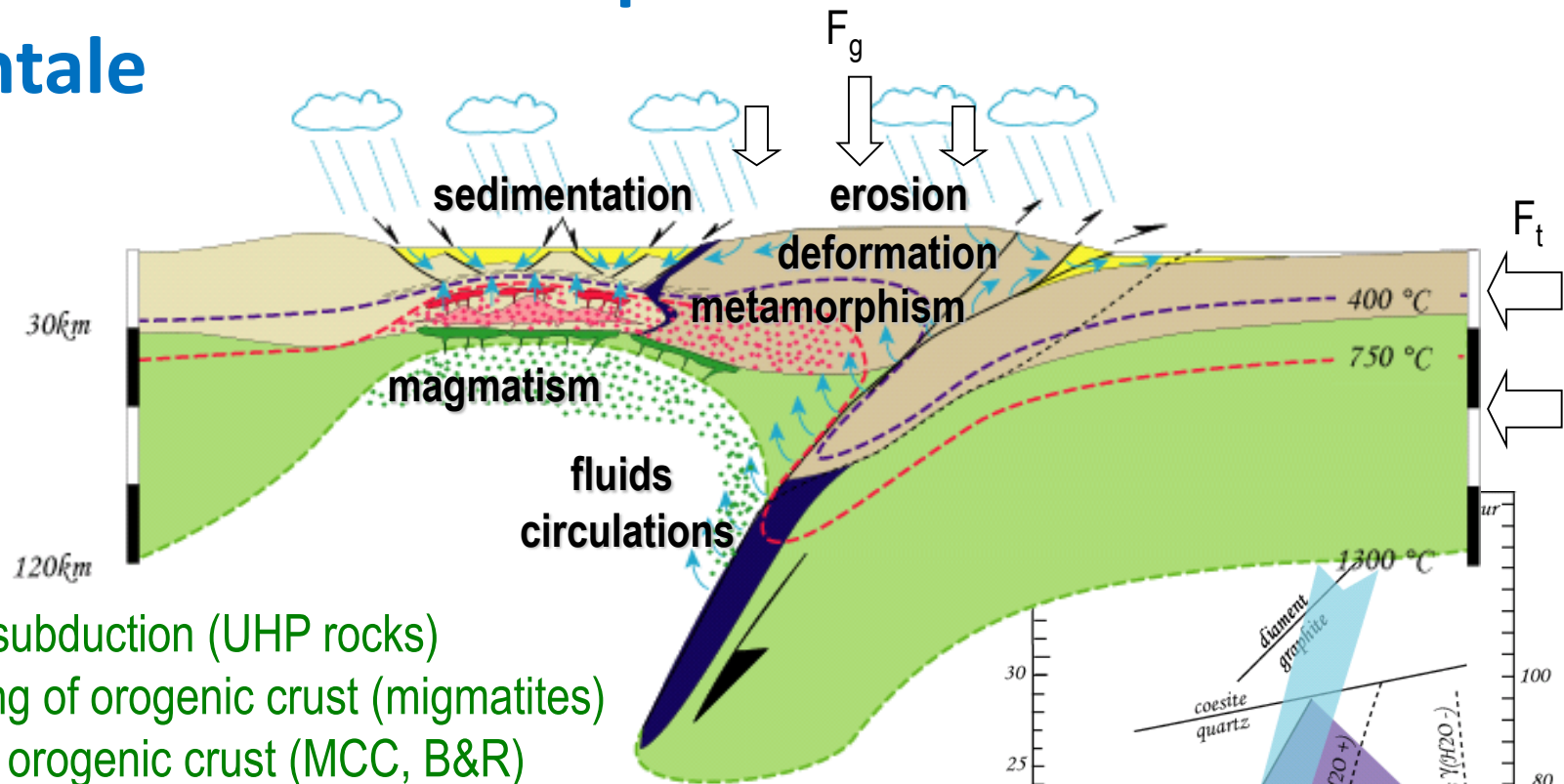
(Siebenaller, 2008)



(Brun, 1999)

⇒ Gradient géothermique
chaud

Evolution thermo-mécanique de la croûte continentale

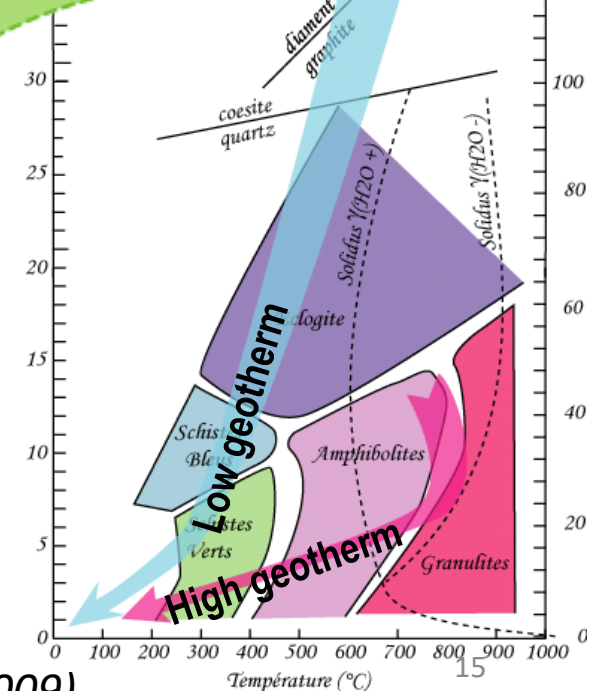


Results :

- Continental subduction (UHP rocks)
- Partial melting of orogenic crust (migmatites)
- Extension of orogenic crust (MCC, B&R)

Questions :

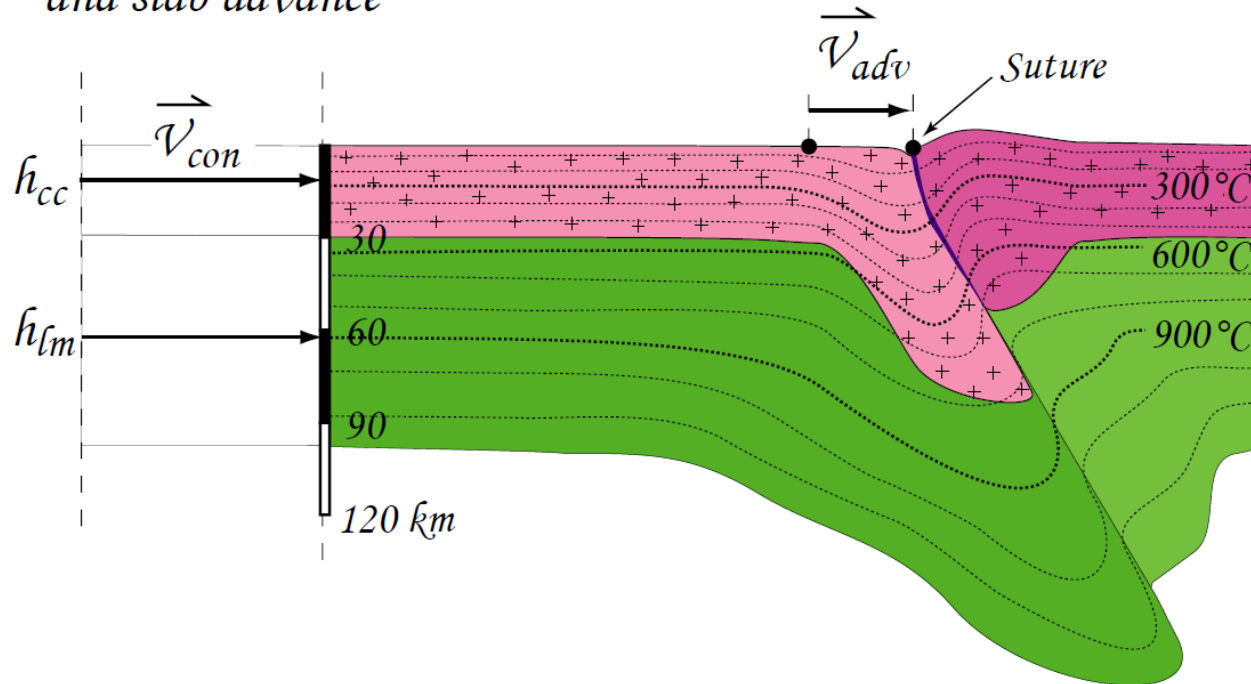
- Low to high geothermal gradient ?
- Crustal and lithospheric rheology ?
- Exhumation mechanisms ?
- Crustal thickening to thinning transition ?
- Earth topography? External vs internal dynamics
- Crustal mass balance : accretion/subduction ?



(Vanderhaeghe, 2009)

Comportement de la croûte aux limites de plaques

(a) *Crust-mantle coupling and slab advance*

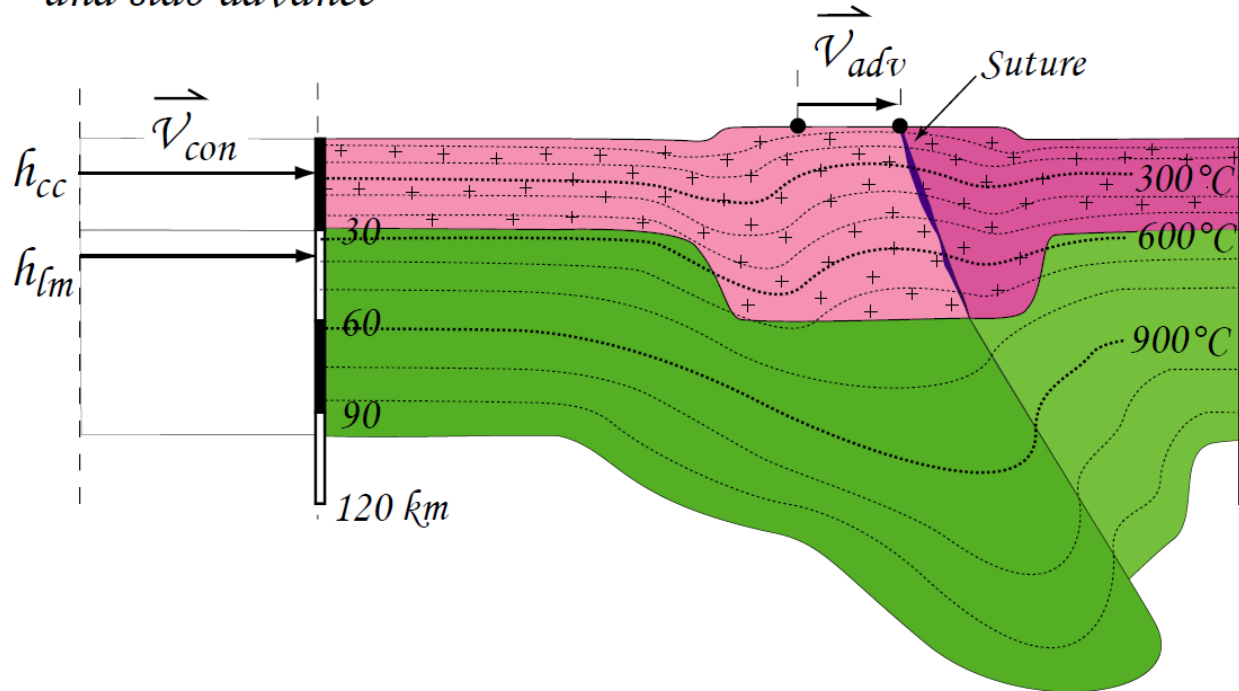


(Vanderhaegh)

Couplage / découplage manteau-croûte aux limites de plaques convergentes en avancement et retrait. Les isothermes sont dessinés sur la base de modèles thermiques unidimensionnels dans la figure suivante en tenant compte la production de chaleur par la radioactivité, l'advection et la conduction de chaleur et également d'après des résultats de modèles 2D (Huerta et al., 1998; Vanderhaeghe et al., 2003). La topographie est considérée comme étant compensée isostatiquement. (a) Le couplage manteau-croûte combiné à l'avancée du slab résulte en une subduction continentale et un épaissement de la plaque chevauchante.

Comportement de la croûte aux limites de plaques

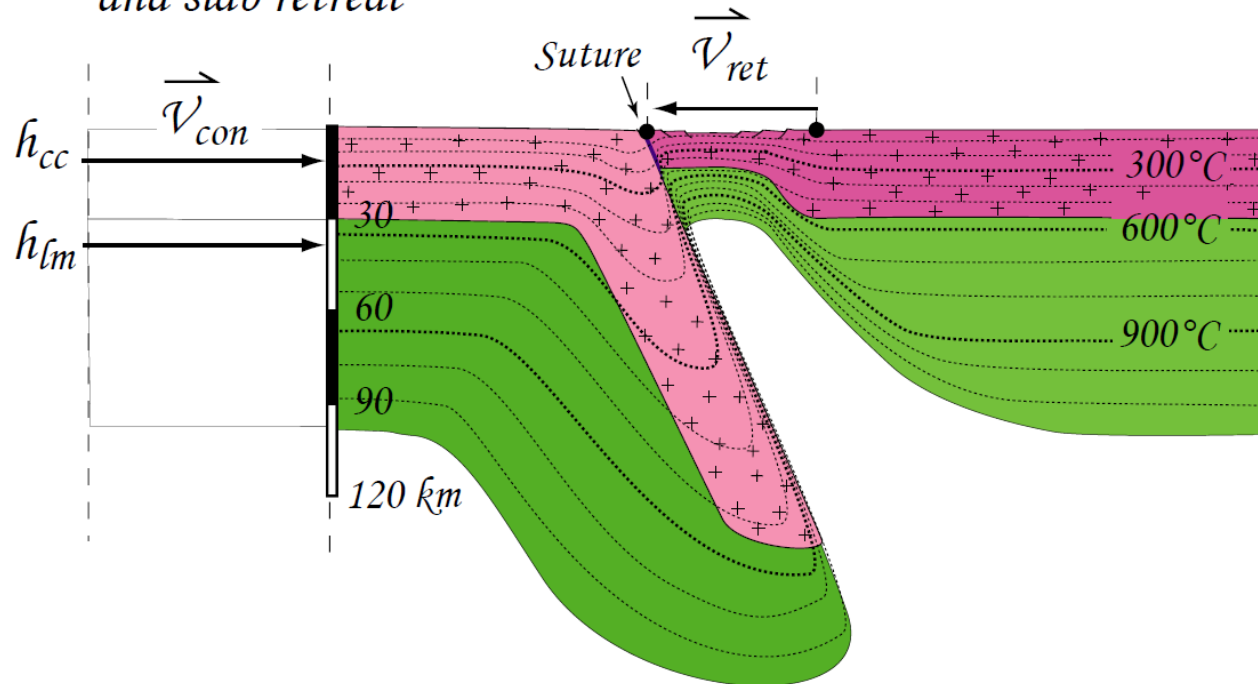
(b) *Crust-mantle decoupling
and slab advance*



Couplage / découplage manteau-croûte aux limites de plaques convergentes en avancement et retrait. Les isothermes sont dessinés sur la base de modèles thermiques unidimensionnels dans la figure suivante en tenant compte la production de chaleur par la radioactivité, l'advection et la conduction de chaleur et également d'après des résultats de modèles 2D (Huerta et al., 1998; Vanderhaeghe et al., 2003). La topographie est considérée comme étant compensée isostatiquement. **(b)** Le découplage manteau-croûte combiné à l'avancée du slab résulte en une accréction continentale de part et d'autre de la suture.

Comportement de la croûte aux limites de plaques

(c) *Crust-mantle coupling
and slab retreat*

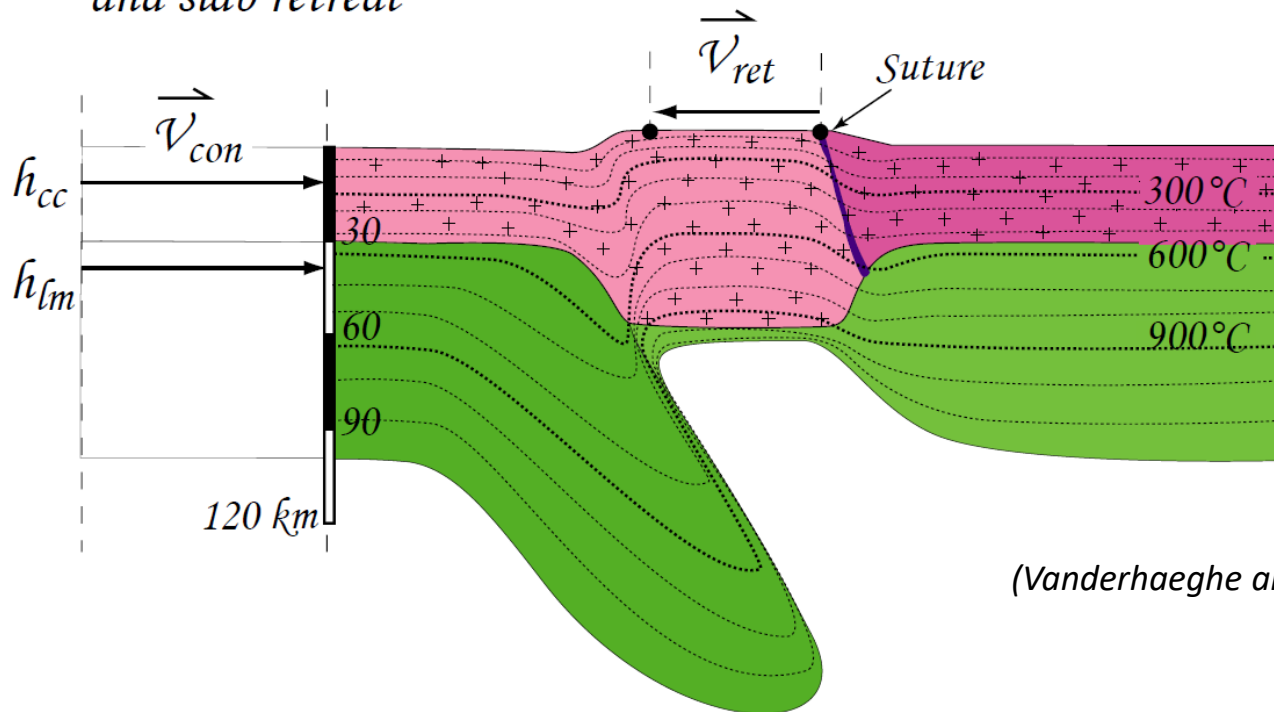


(d Duchêne, 2009)

Couplage / découplage manteau-croûte aux limites de plaques convergentes en avancement et retrait. Les isothermes sont dessinés sur la base de modèles thermiques unidimensionnels dans la figure suivante en tenant compte la production de chaleur par la radioactivité, l'advection et la conduction de chaleur et également d'après des résultats de modèles 2D (Huerta et al., 1998; Vanderhaeghe et al., 2003). La topographie est considérée comme étant compensée isostatiquement. (c) Le couplage manteau-croûte combiné au retrait du slab résulte en une subduction continentale associée à un amincissement de la plaque chevauchante.

Comportement de la croûte aux limites de plaques

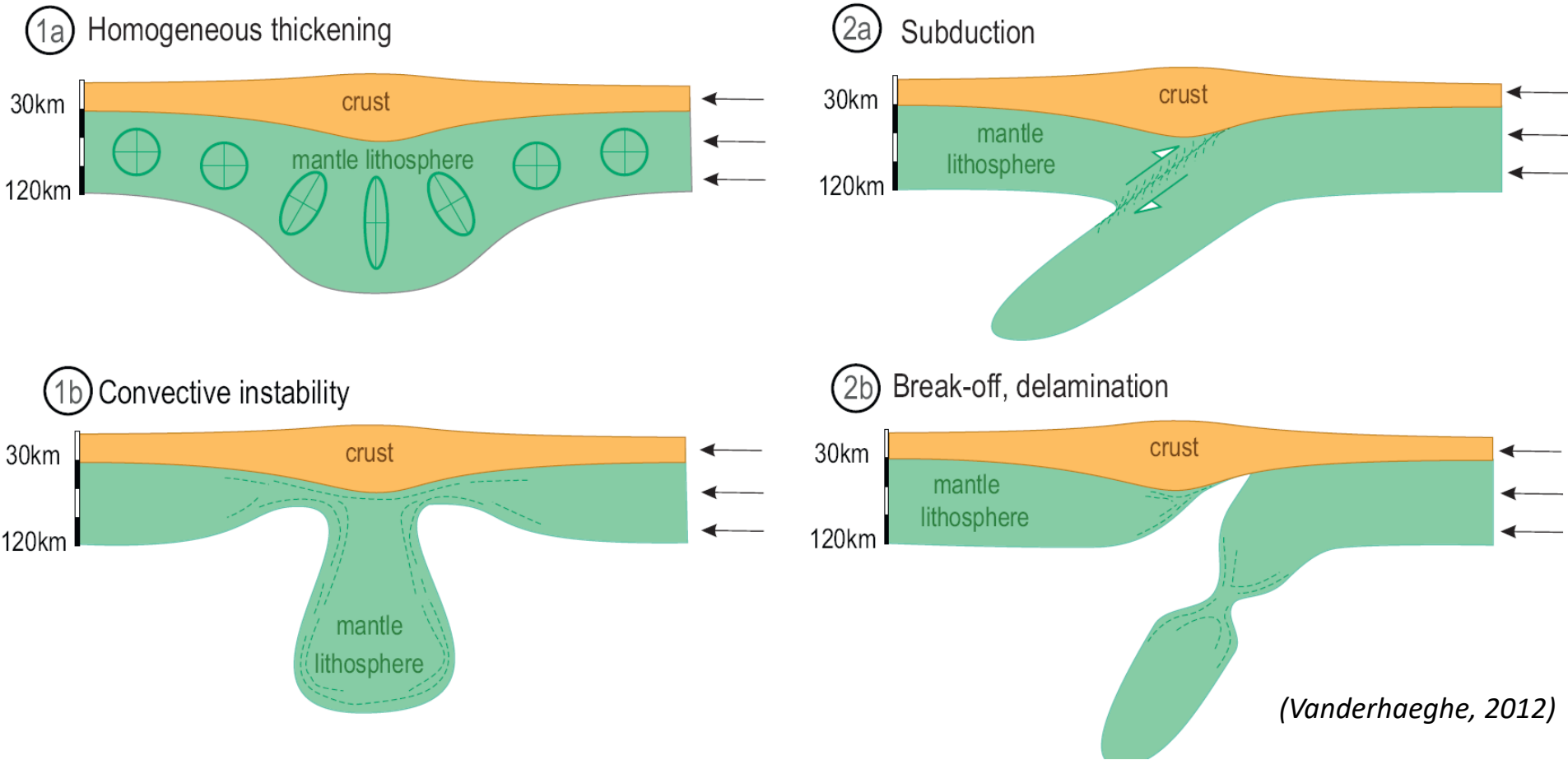
(d) *Crust-mantle decoupling
and slab retreat*



(Vanderhaeghe and Duchêne, 2009)

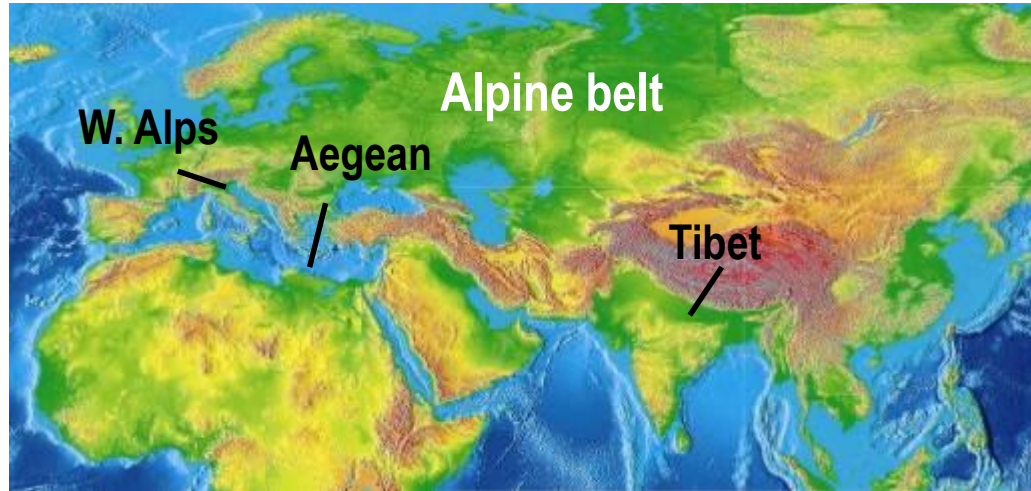
Couplage / découplage manteau-croûte aux limites de plaques convergentes en avancement et retrait. Les isothermes sont dessinés sur la base de modèles thermiques unidimensionnels dans la figure suivante en tenant compte la production de chaleur par la radioactivité, l'advection et la conduction de chaleur et également d'après des résultats de modèles 2D (Huerta et al., 1998; Vanderhaeghe et al., 2003). La topographie est considérée comme étant compensée isostatiquement. (d) Le découplage manteau-croûte combiné au retrait du slab résulte en une accrétion crustale caractérisée par un transfert d'unités crustales de la plaque plongeante vers la plaque chevauchante et d'un amincissement du manteau lithosphérique de la plaque chevauchante.

Comportement du manteau aux limites de plaques

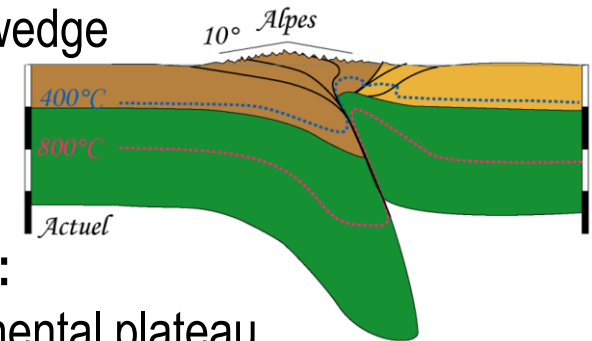


Comportement du manteau lithosphérique aux limites de plaques convergentes. Les différents comportements possibles du manteau aux limites de plaques convergentes sont représentés schématiquement. Epaississement homogène (1a) conduisant à une delamination par convection (1b). Subduction (2a) suivie par une délamination et rupture (2b).

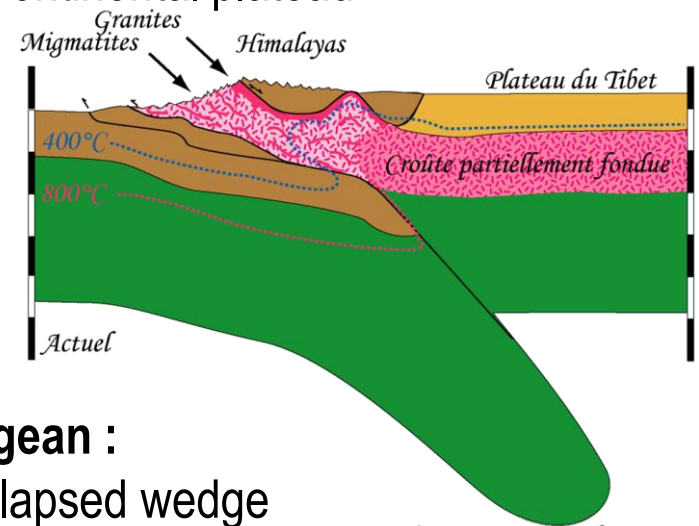
Styles orogéniques



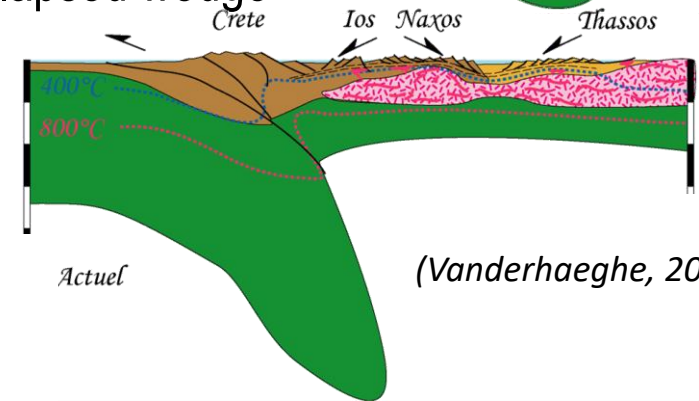
W-Alps :
Crustal wedge



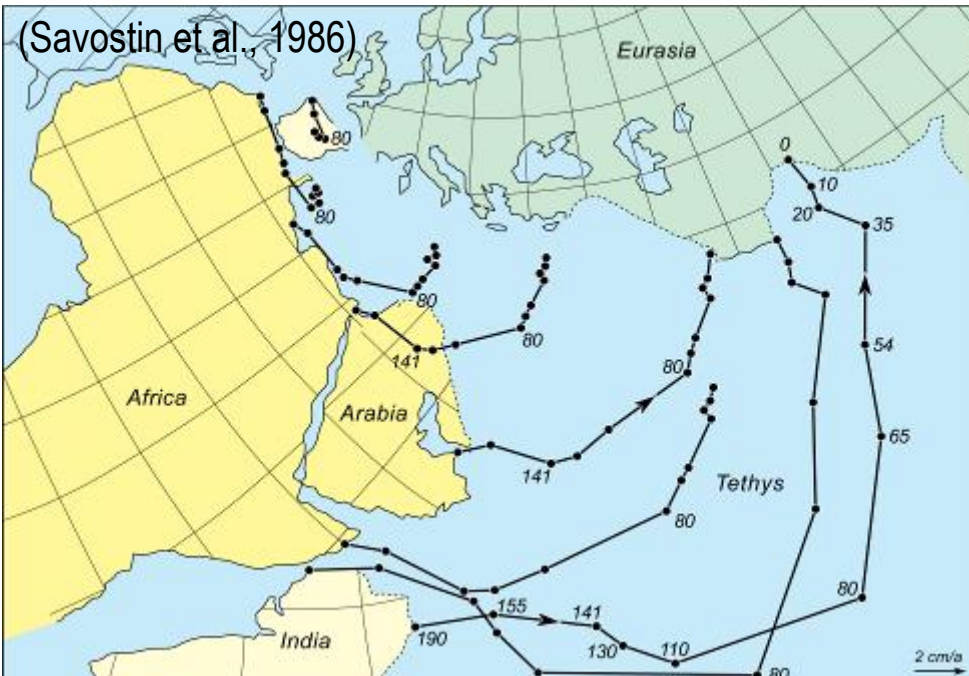
Tibet :
Continental plateau



Aegean :
Collapsed wedge

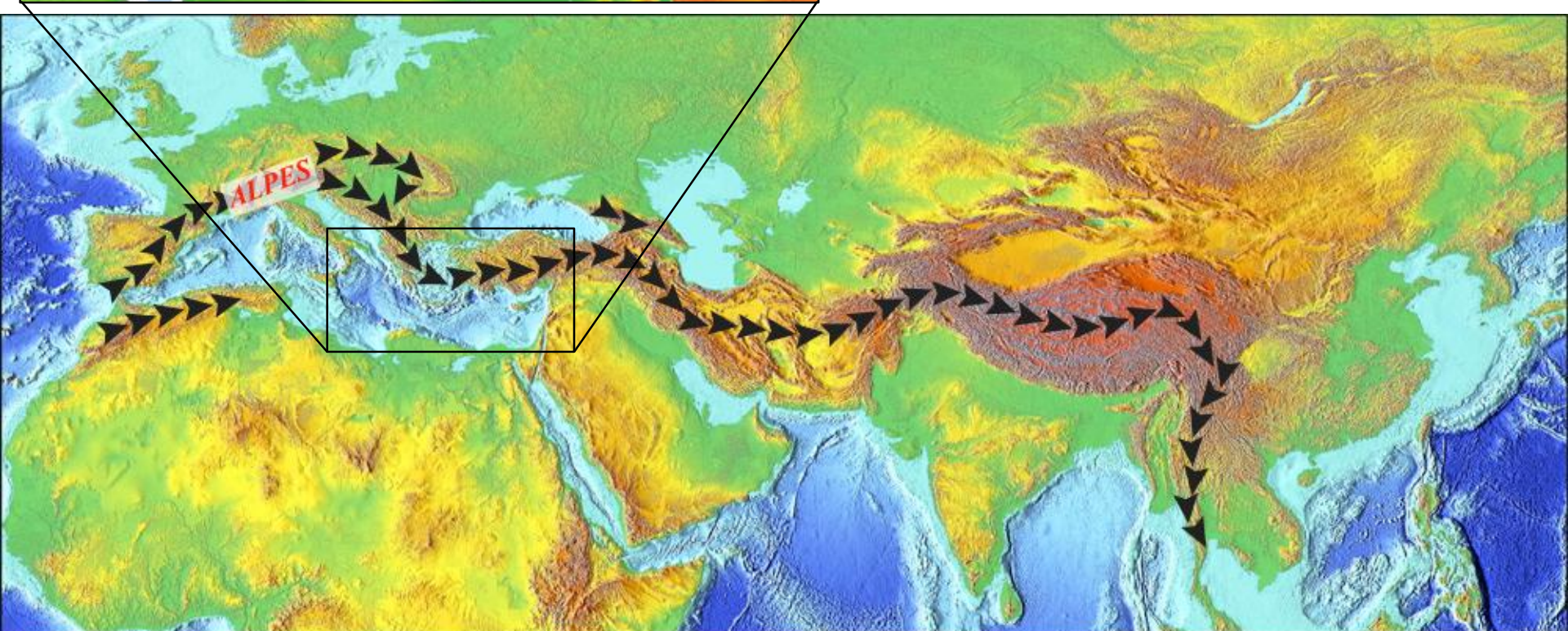
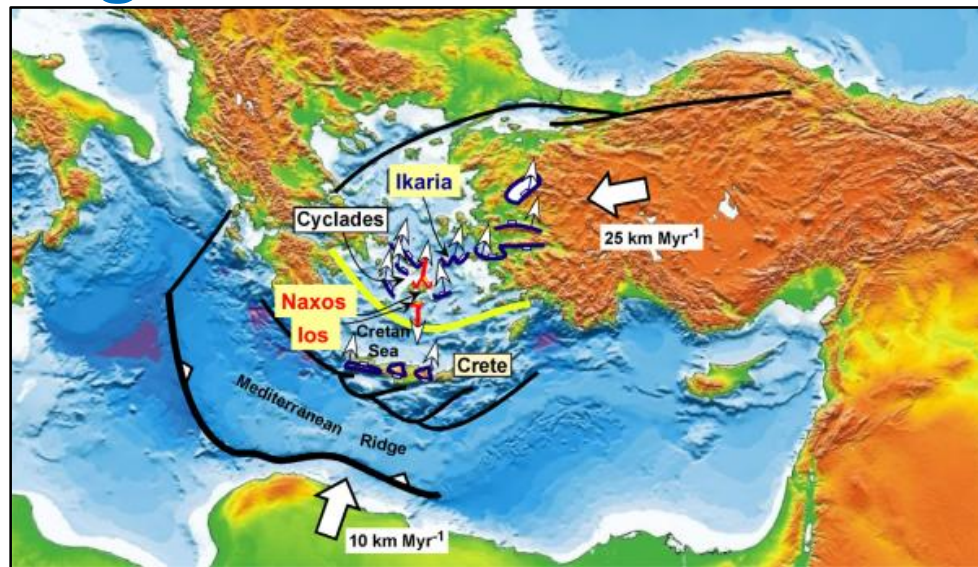


(Vanderhaeghe, 2009)

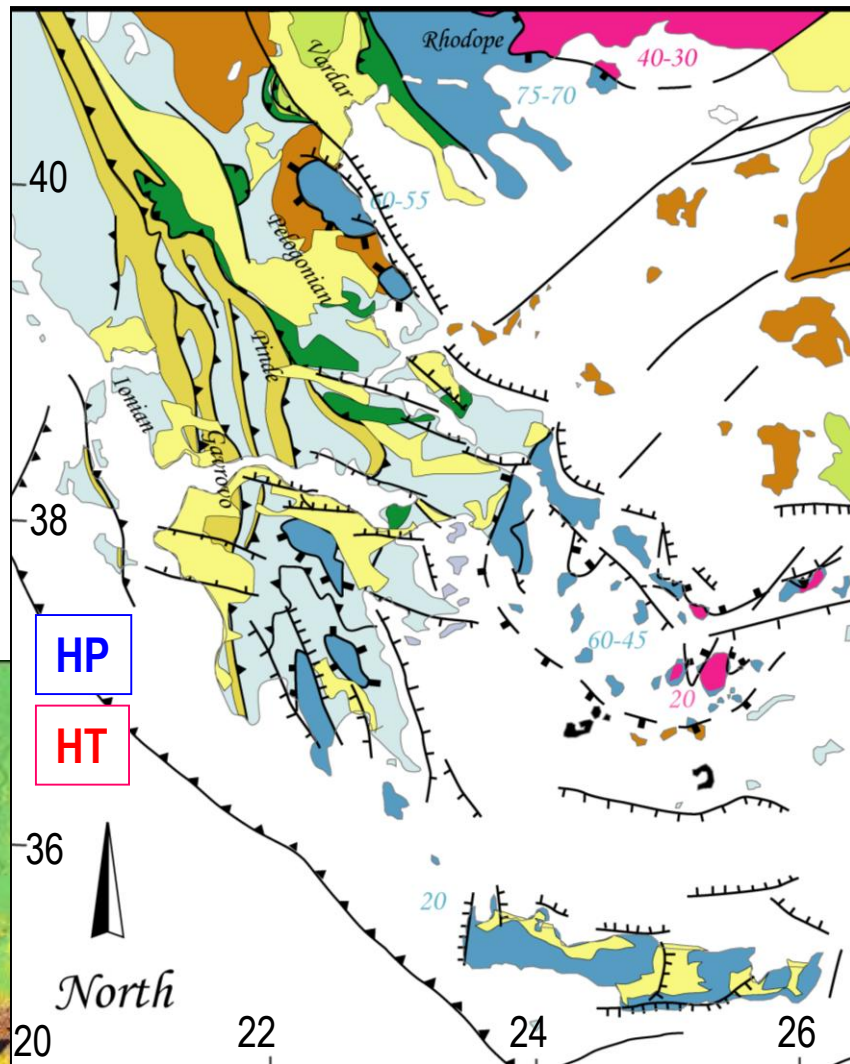


(Savostin et al., 1986)

Aegean



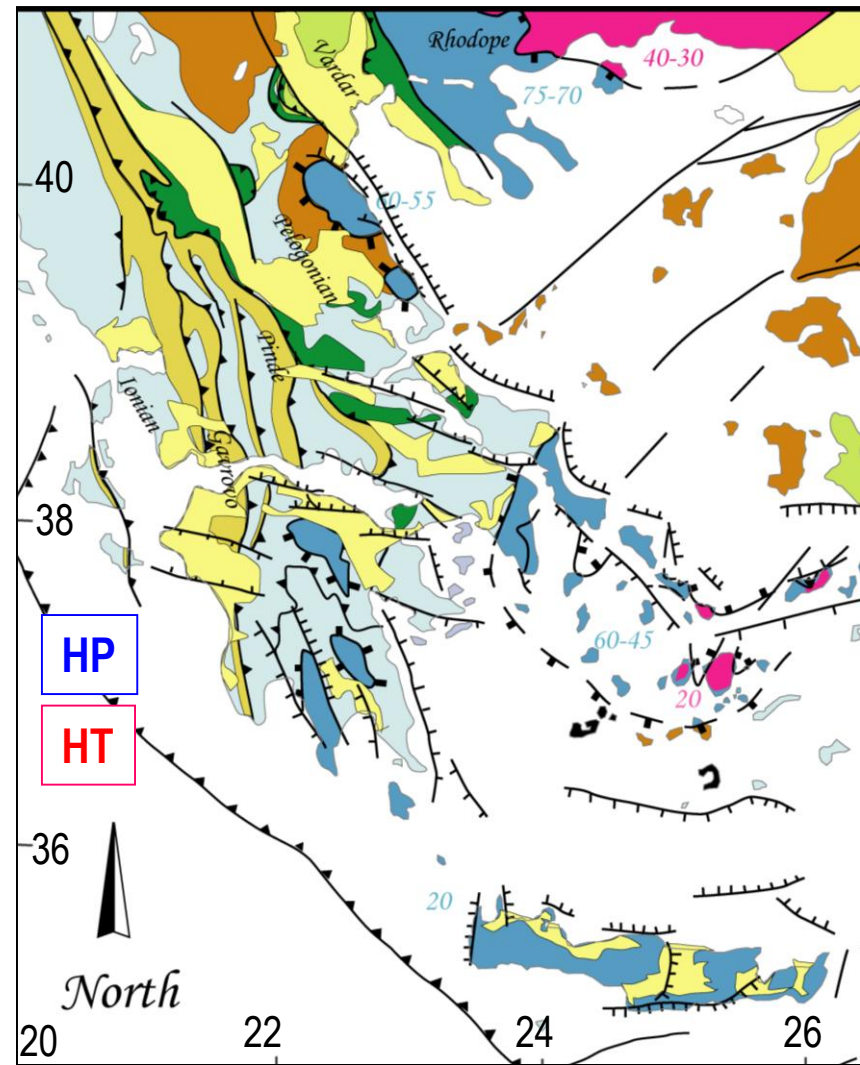
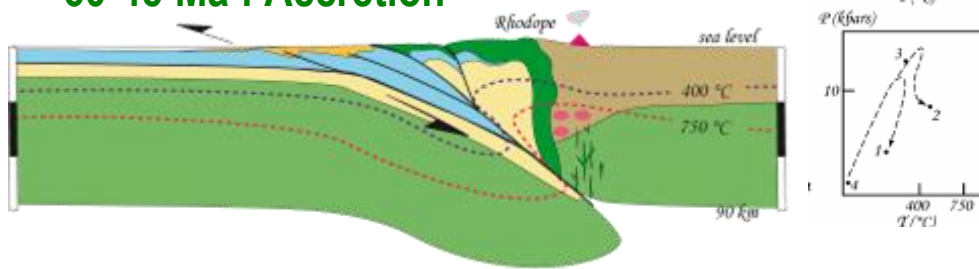
Aegean



Aegean

(Vanderhaeghe et al., 2007)

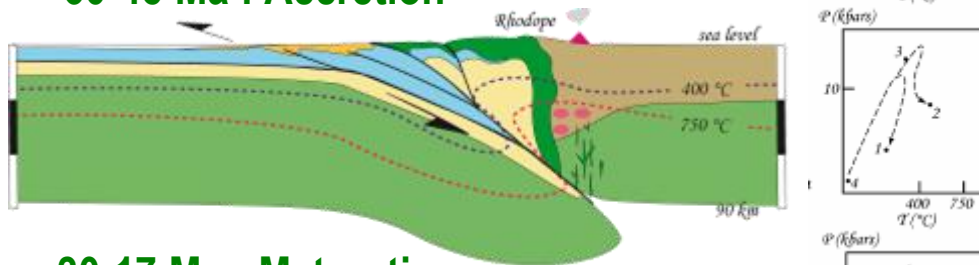
60-45 Ma : Accretion



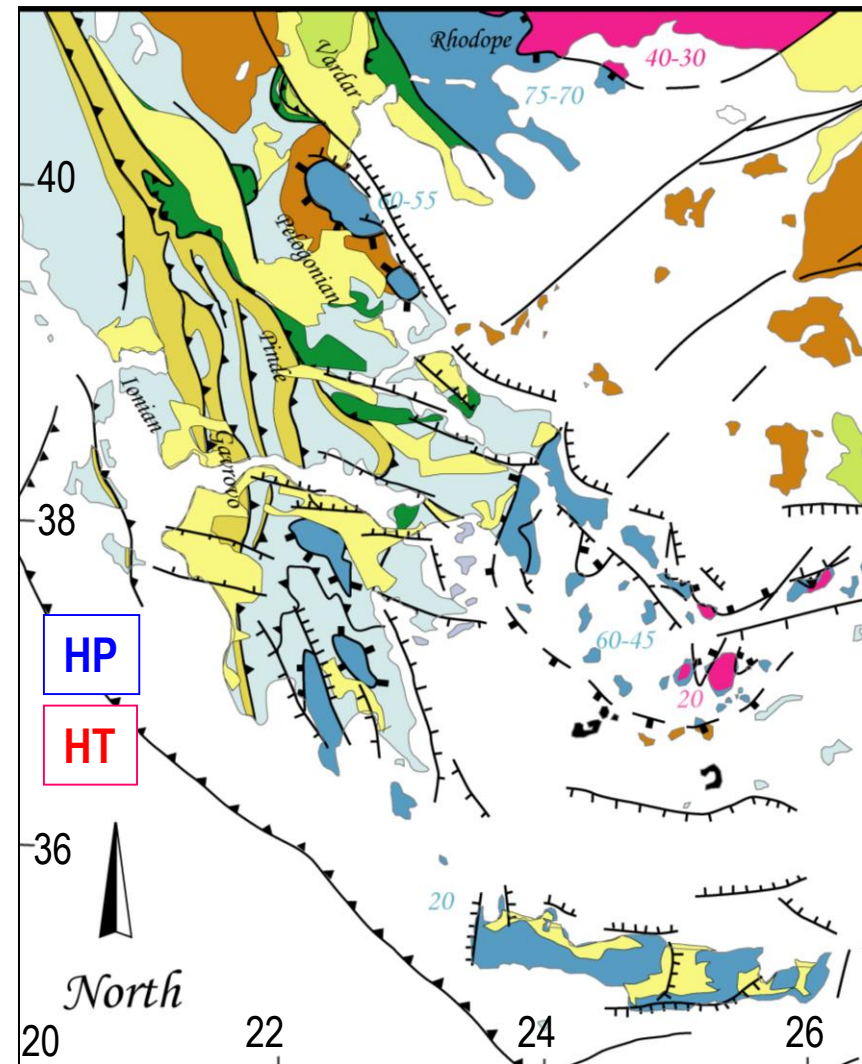
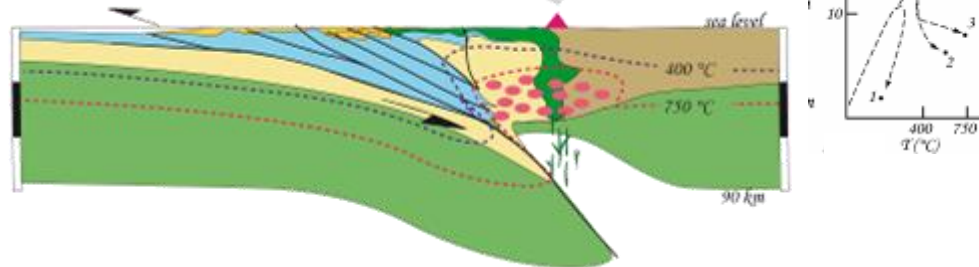
Aegean

(Vanderhaeghe et al., 2007)

60-45 Ma : Accretion



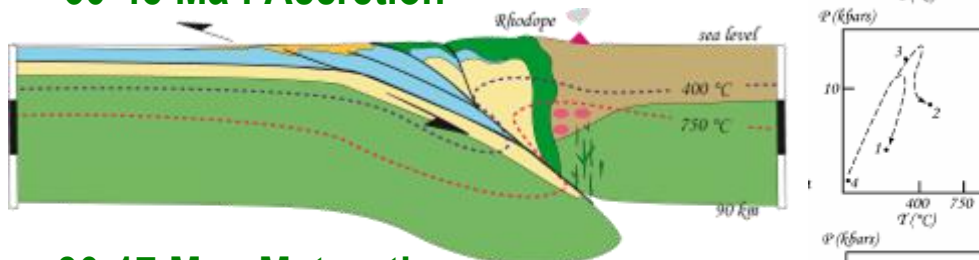
30-17 Ma : Maturation



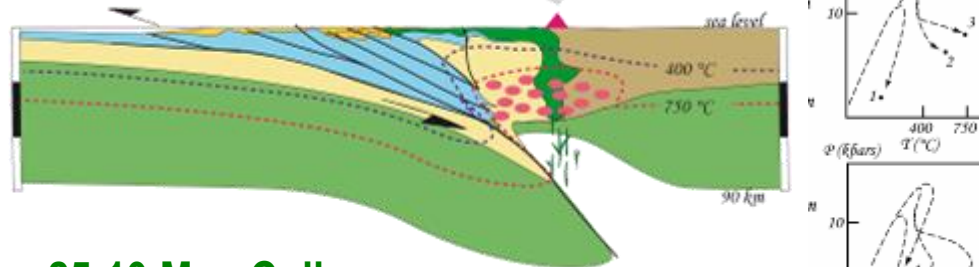
Aegean

(Vanderhaeghe et al., 2007)

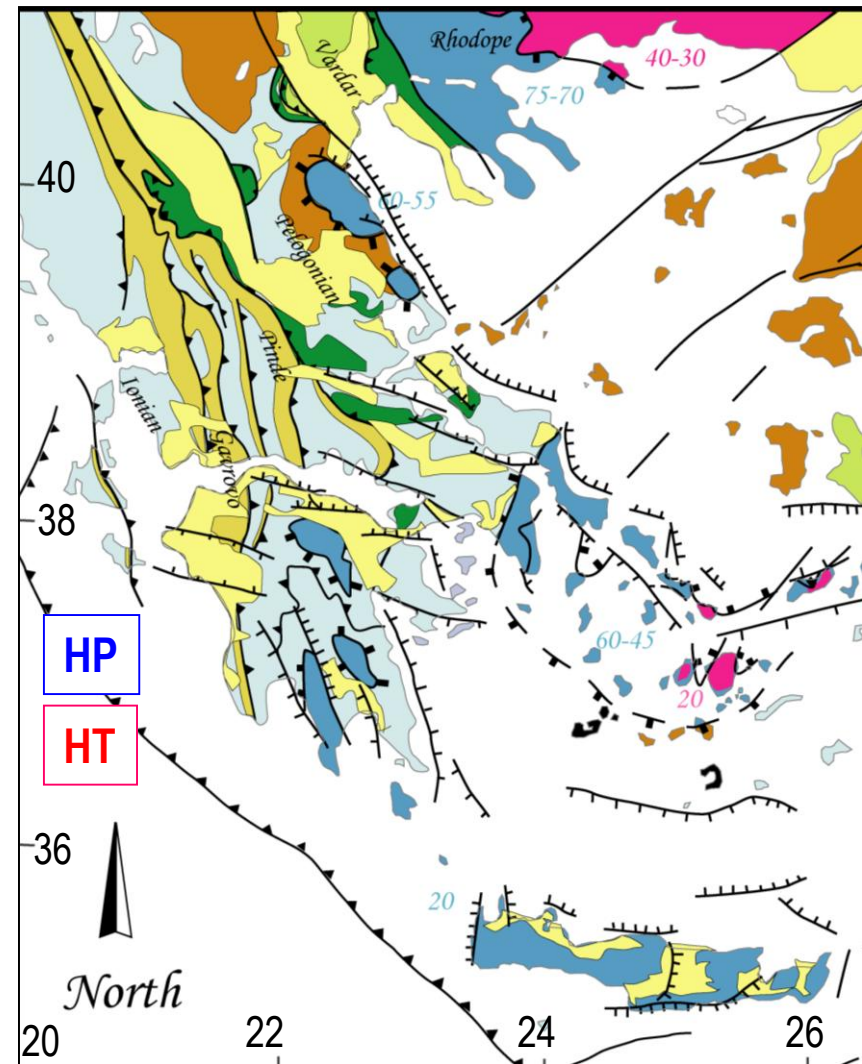
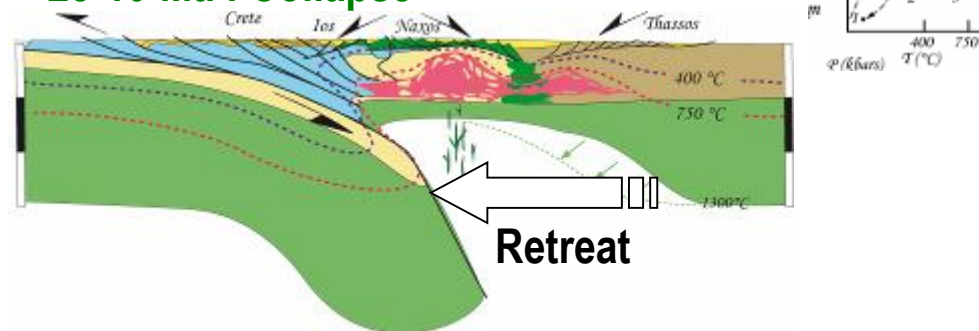
60-45 Ma : Accretion



30-17 Ma : Maturation



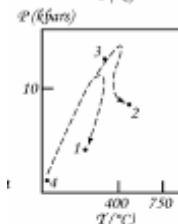
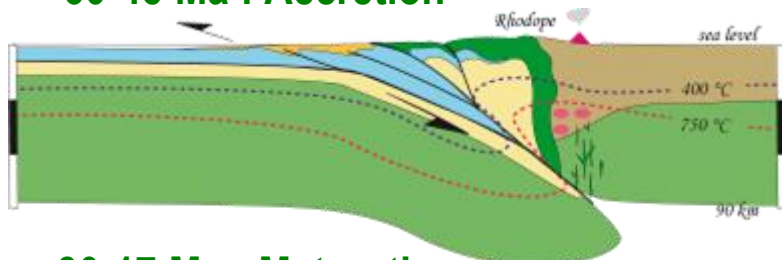
25-10 Ma : Collapse



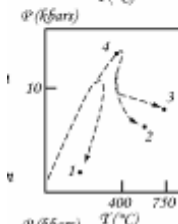
Aegean

(Vanderhaeghe et al., 2007)

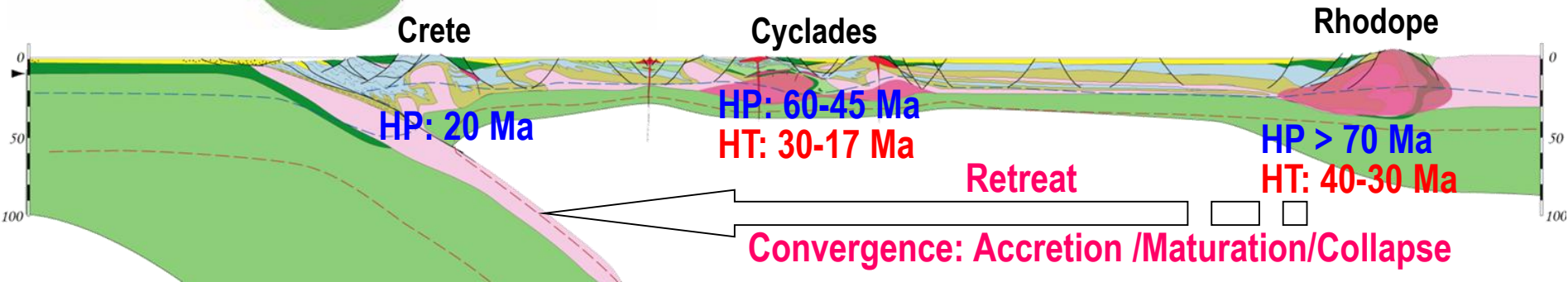
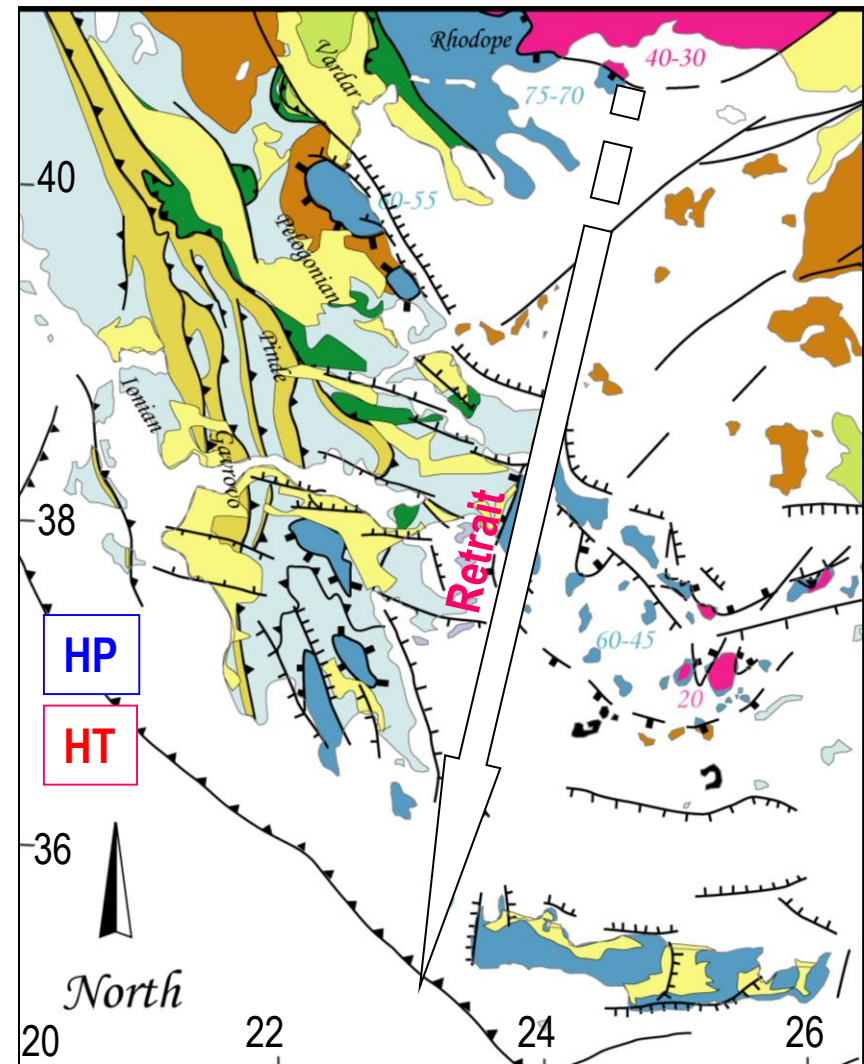
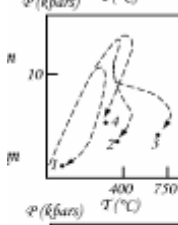
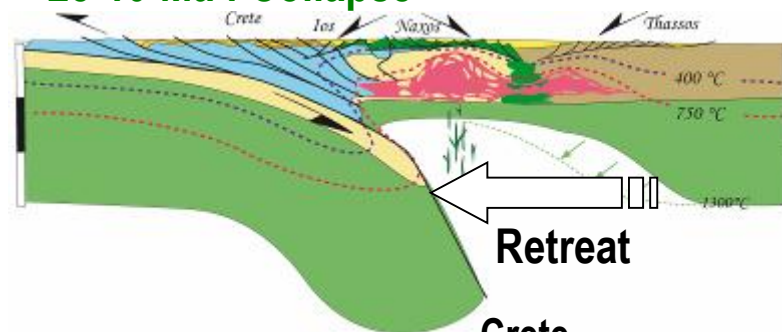
60-45 Ma : Accretion



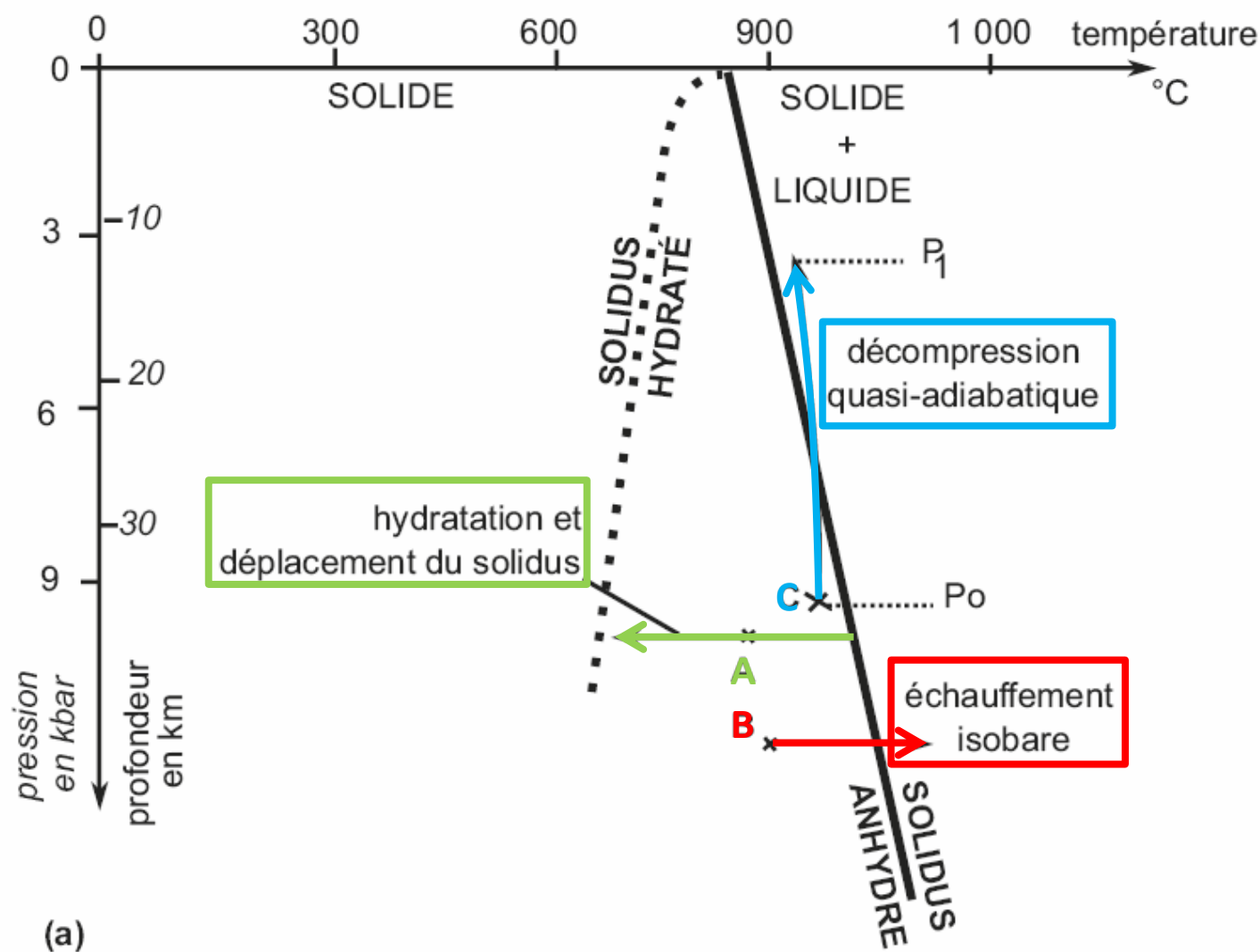
30-17 Ma : Maturation



25-10 Ma : Collapse



Anatexie: conditions P-T



(a) Les conditions (P,T) d'anatexie crustale sont schématisées. L'anatexie peut intervenir à différents moments consécutifs à l'empilement des unités crustales en convergence. Les courbes de fusion des granites (solidus) anhydres et hydratés sont indiquées.

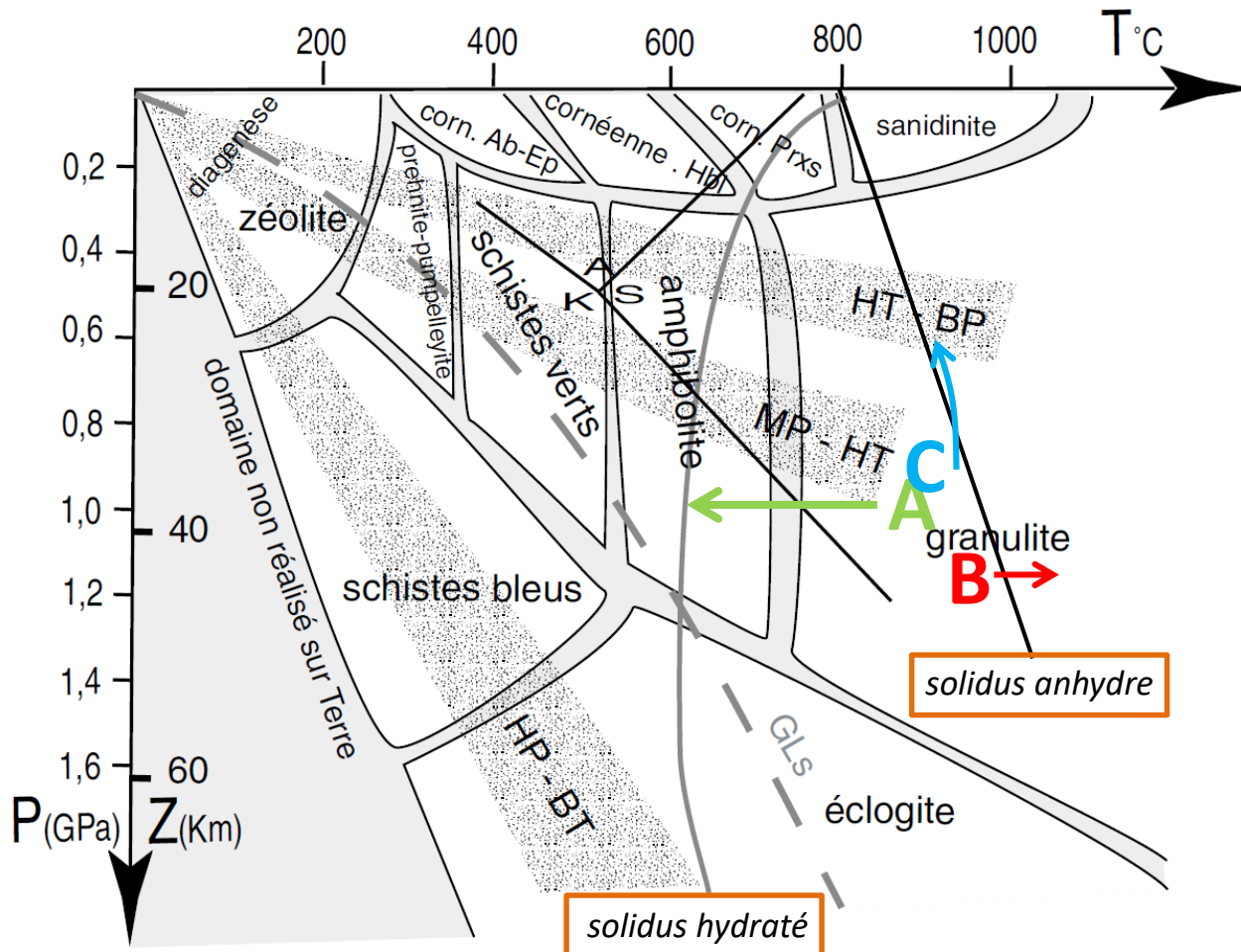
Anatexis: conditions P-T

Gradients métam. **MP-HT** et **HT-BP** franchissent généralement la courbe de fusion des granites hydratés (solidus hydraté; $T > 650\text{ °C}$).

Fusion partielle: métapélites → liquides de composition granitique

métabasites → liquides de composition granodioritique

Les séries de HP-BT ne sont généralement pas affectées par la fusion partielle.

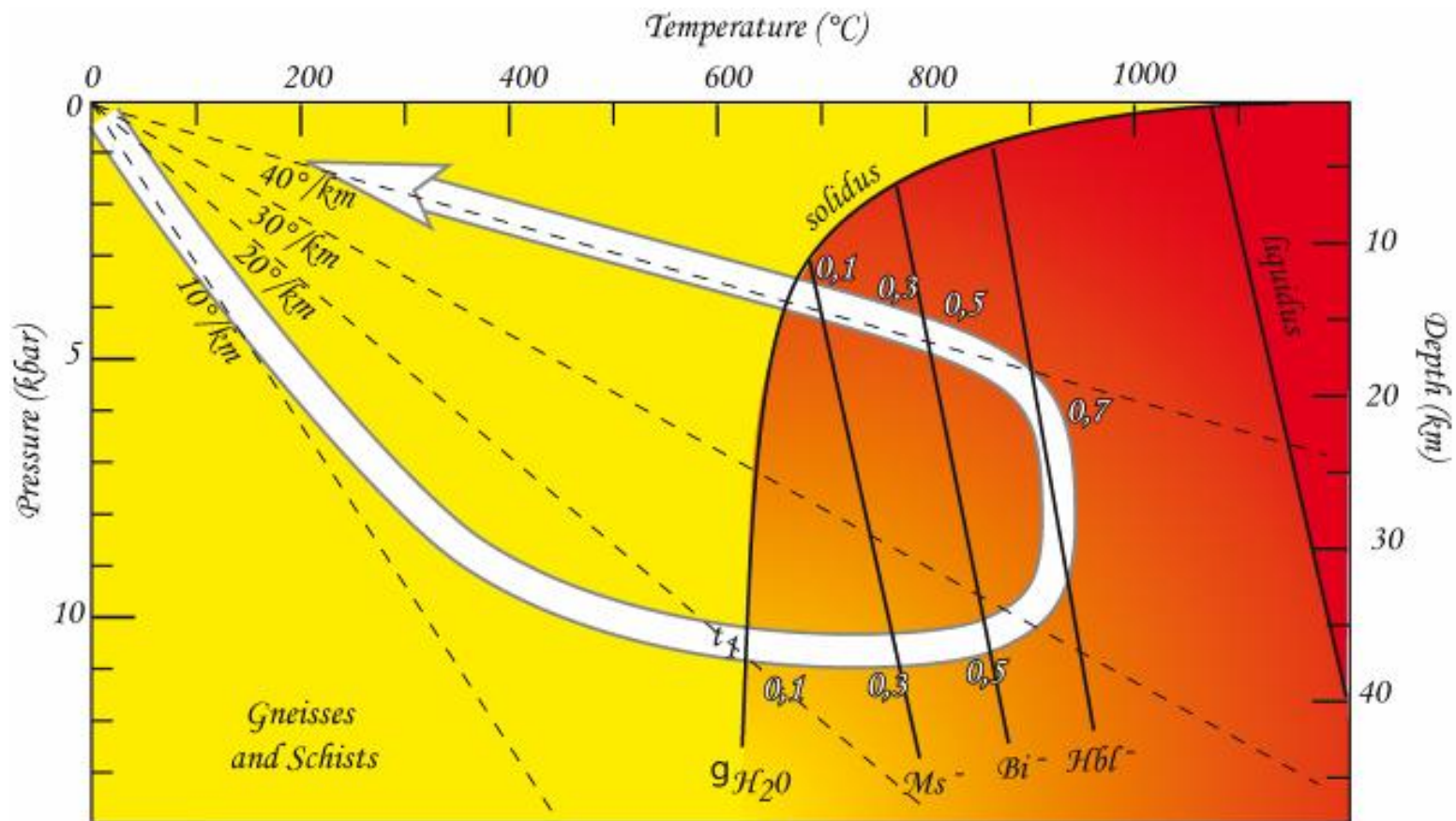


Anatexie: conditions P-T

Gradients métam. **MP-HT** et **HT-BP** franchissent généralement la courbe de fusion des granites hydratés (solidus hydraté; $T > 650^\circ\text{C}$).

Fusion partielle: métapélites $\rightarrow$ liquides de composition granitique
métabasites $\rightarrow$ liquides de composition granodioritique

Les séries de HP-BT ne sont généralement pas affectées par la fusion partielle.



Anatexie: réactions

La croûte continentale est très hétérogène:

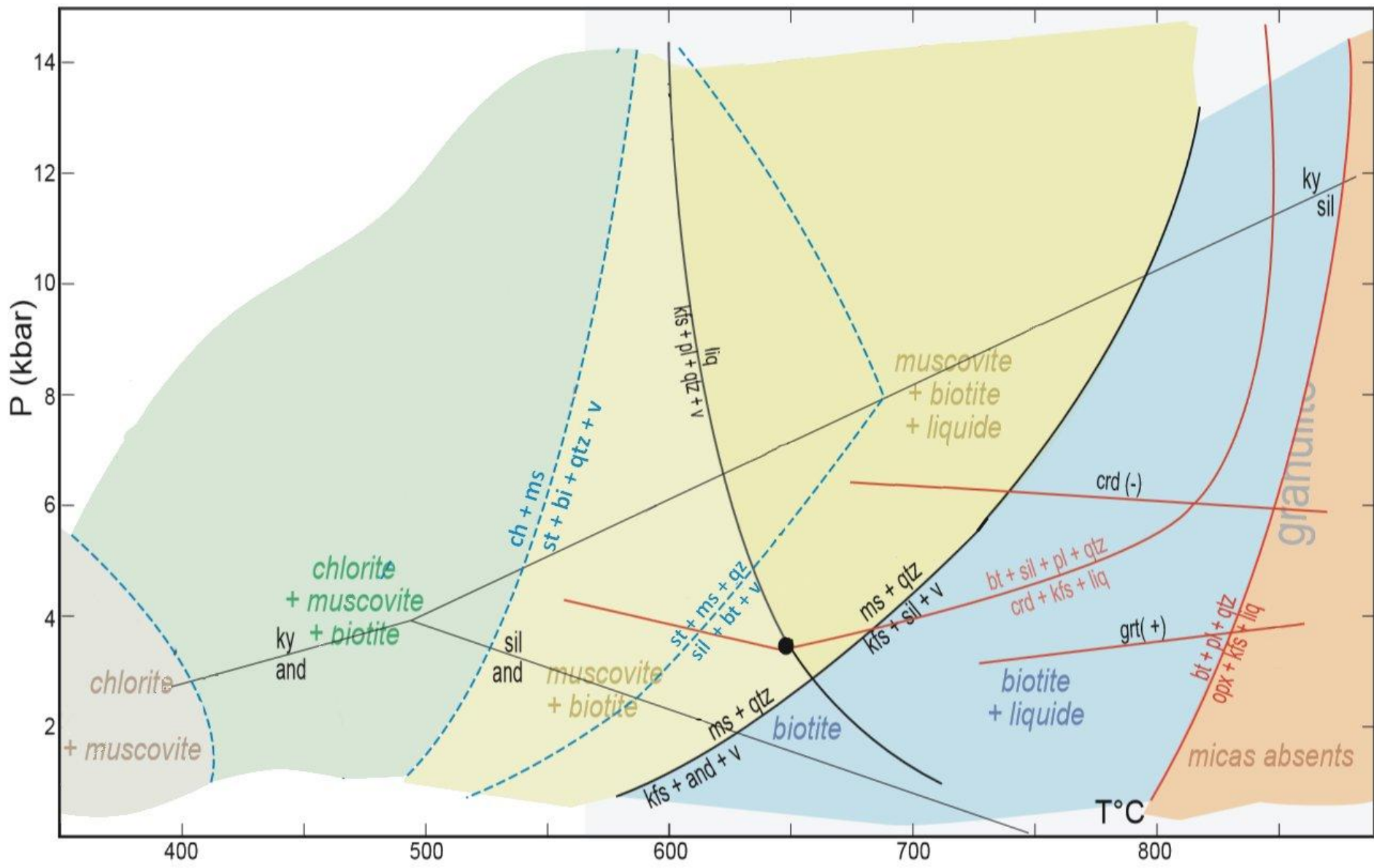
- ✓ roches sédimentaires (grès, grauwacke, pélite, argile, carbonate...)
- ✓ roches magmatiques (rhyolite, dacite, andésite, basalte et leurs équivalents plutoniques).

1. Réactions de fusion congruentes: un solide donné produit un liquide de même composition chimique que l'ensemble des réactants, sans produire de phase péritectique (c'est-à-dire sans nouvelle phase à l'équilibre avec le liquide). C'est le cas de la fusion à l'eutectique dans une roche quartzo-feldspathique en présence d'eau:



⇒ Réaction au solidus saturé en H_2O /hydraté par exemple (dans ce cas là, le liquide produit est saturé en H_2O).

Anatexis: réactions



Anatexie: réactions

2. Réactions incongruentes de déshydratation-fusion: le liquide silicaté s'accompagne de la formation d'une phase minérale dite péritectique. La nature de la principale phase hydroxylée déstabilisée (muscovite, biotite ou amphibole) induit différentes réactions, chacune créant différentes phases à l'équilibre avec le liquide.

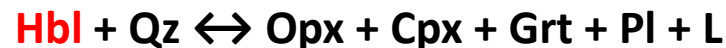
⇒ déshydratation-fusion de la muscovite (entre 625 et 800 °C)



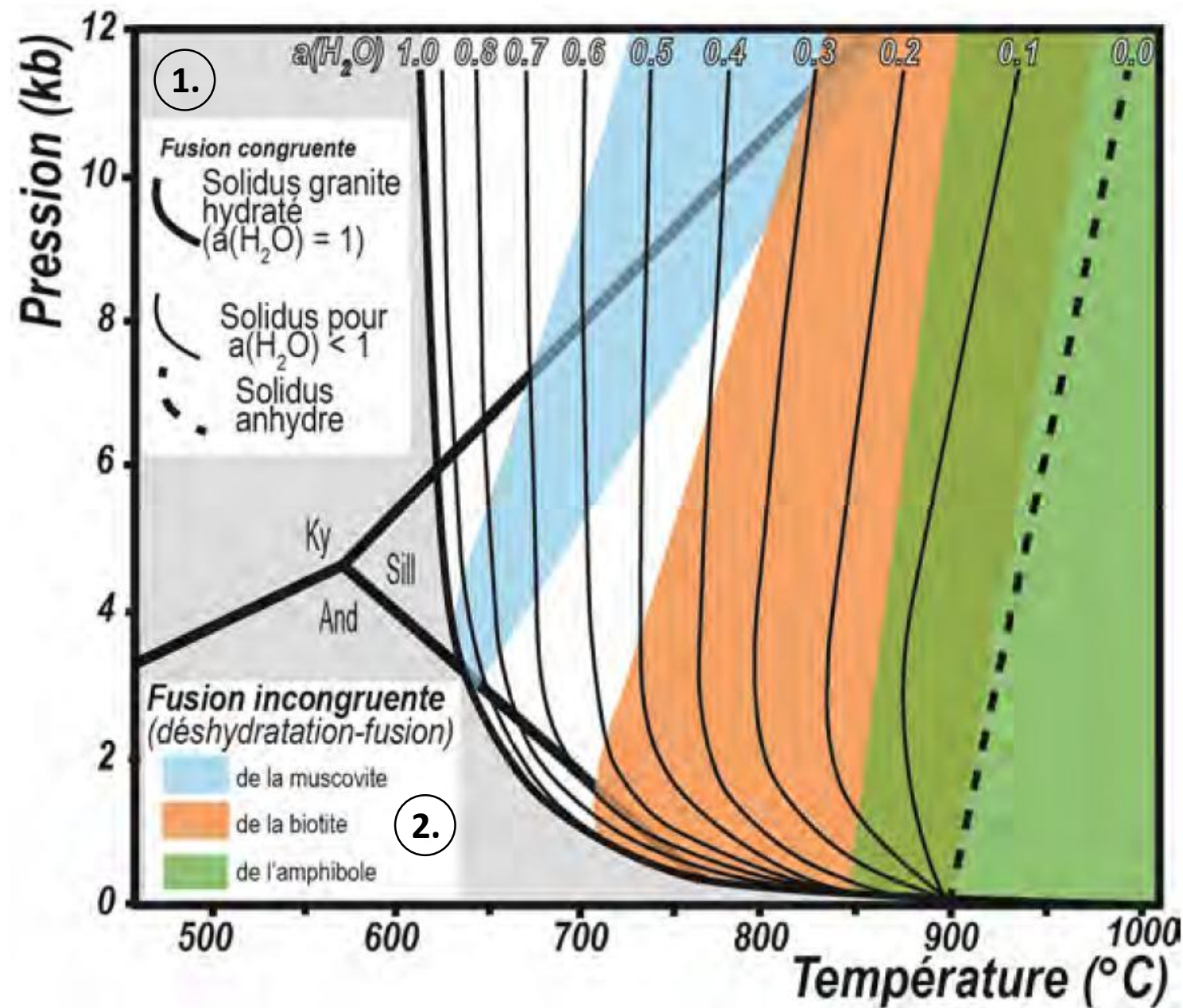
⇒ déshydratation-fusion de la biotite (entre 700 et 950 °C)



⇒ déshydratation-fusion de l'amphibole (entre 800 et 1050 °C)



Anatexis: réactions



Anatexie: réactions

L'eau peut aussi provenir des minéraux hydratés ou hydroxylés, ex:

biotite: $K(Mg,Fe)_3(OH,F)_2(Si_3AlO_{10})$

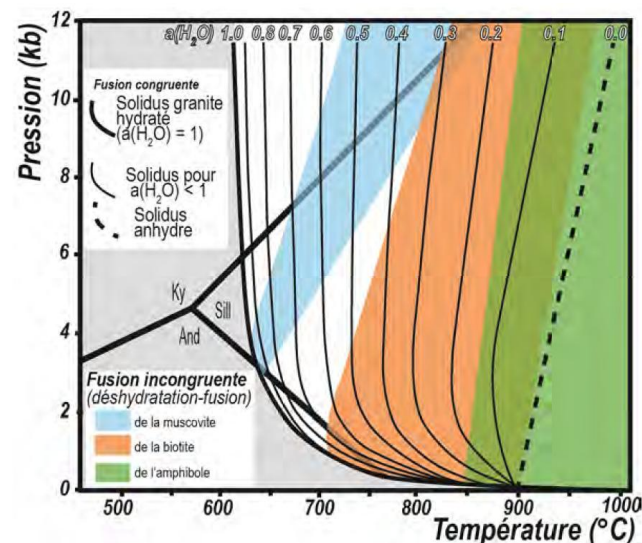
muscovite: $KAl_2[(OH,F)_2 | AlSi_3O_{10}]$

hornblende: $(Ca,Na,K)_2(Mg,Fe^{2+},Fe^{3+},Al)_5[Si_6(Al,Si)_2O_{22}](OH,F)_2$

épidote: $Ca_2(Fe,Al)Al_2(SiO_4)(Si_2O_7)O(OH)$

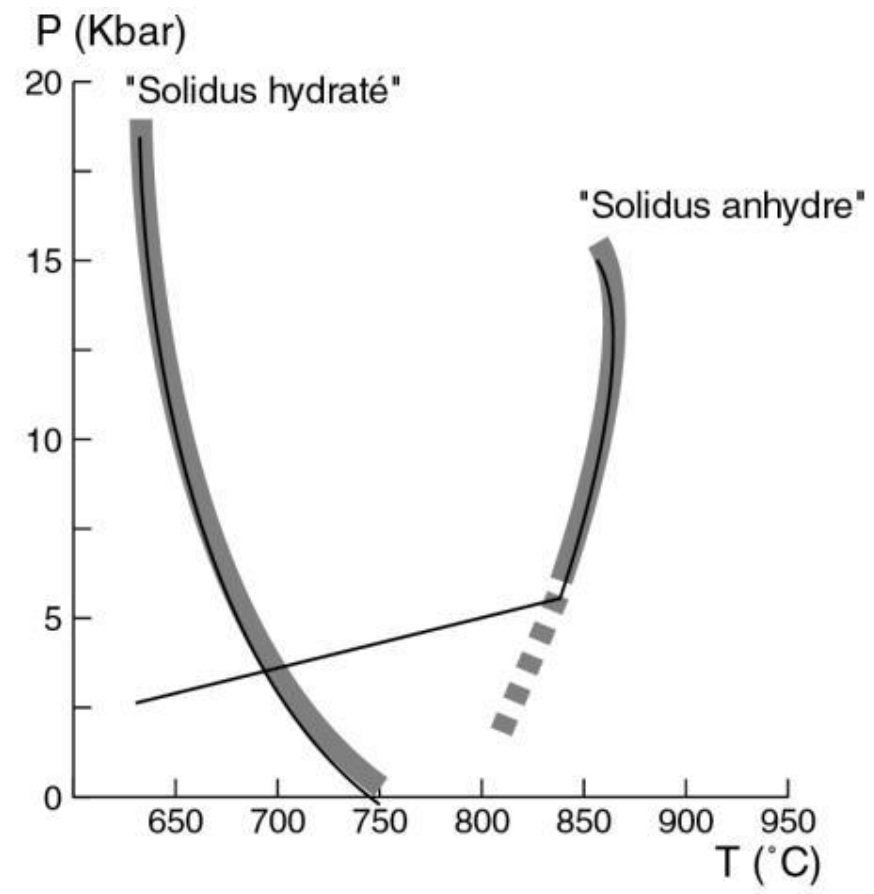
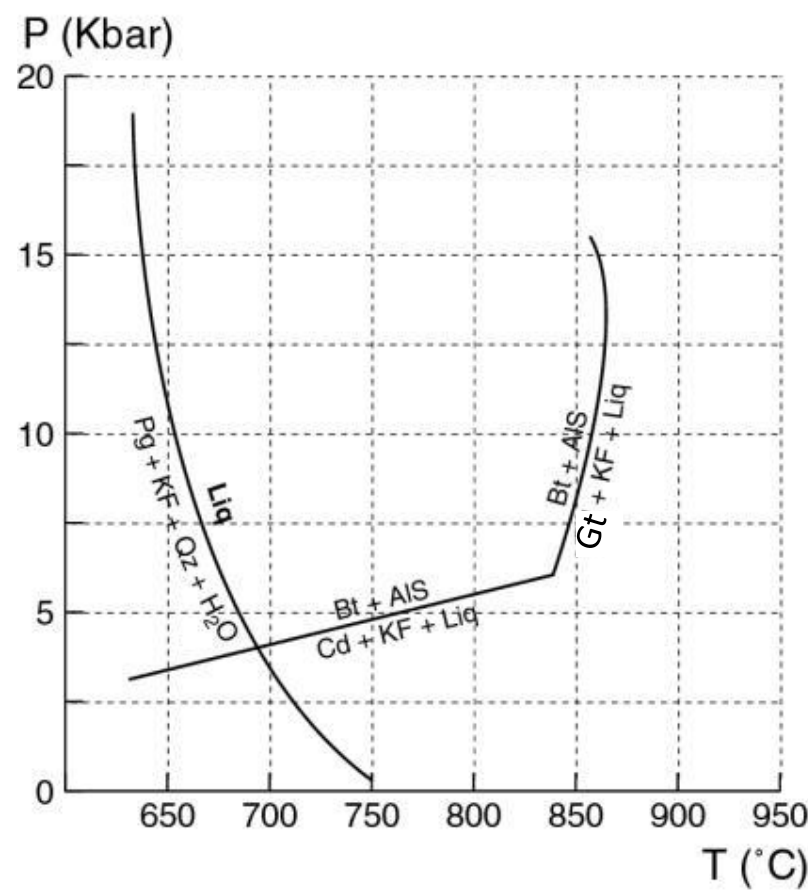
apatite: $Ca_5(PO_4)_3(OH,Cl,F)$

Dans le trajet prograde, la libération de fluides par déshydratation de ces minéraux va permettre d'abaisser la température de fusion du système (déplacement vers de plus basses températures de la courbe du solidus; Tuttle & Bowen, 1958).



Anatexie: réactions

La signification réelle des "solidus sec" et "solidus hydraté" dans les systèmes acides:



Un paragneiss hydraté va fondre à relativement basse température, selon la réaction de fusion eutectique en présence d'eau. En revanche, le même paragneiss, en l'absence d'eau, va fondre par fusion-déshydratation de la biotite. En d'autres termes, un système hydraté va fondre (franchir son solidus) à plus basse température qu'un système sans eau libre : les deux réactions correspondent respectivement au "solidus hydraté" et au "solidus sec" du système granitique !

(Cours J.F Moyen₃₆, 2004)

Anatexie: réactions

Le *résidu solide de la fusion* est communément appelé « **restite** ».

La **restite** est composée par:

- ✓ les phases réfractaires qui n'ont pas été affectées par la réaction de fusion ;
- ✓ les phases en excès, qui n'ont été que partiellement consommées par la réaction de fusion ;
- ✓ les phases péritectiques, produites lors de la réaction de fusion ;
- ✓ les phases accessoires (par exemple : zircon, monazite, oxydes), qui ne sont pas nécessaires à la réaction de fusion, mais qui peuvent être partiellement dissoutes par le liquide.

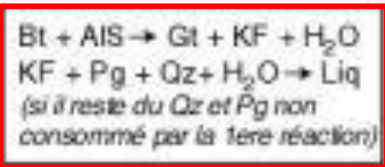
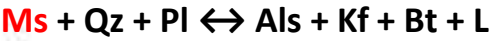
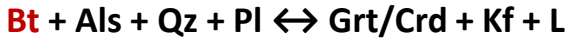
En fonction de leur nature et de leur taille, les phases résiduelles peuvent connaître des devenir différents. Les phases péritectiques de tailles réduites sont produites de façon concomitante au liquide silicaté. Celles-ci, ainsi que les phases accessoires qui sont souvent de très petite taille (< 1 mm), vont être plus facilement entraînées avec le liquide lors de son extraction.

Au contraire, les phases en excès ou réfractaires, de plus grande taille, ont tendance à constituer la matrice de la restite.

Anatexie: réactions

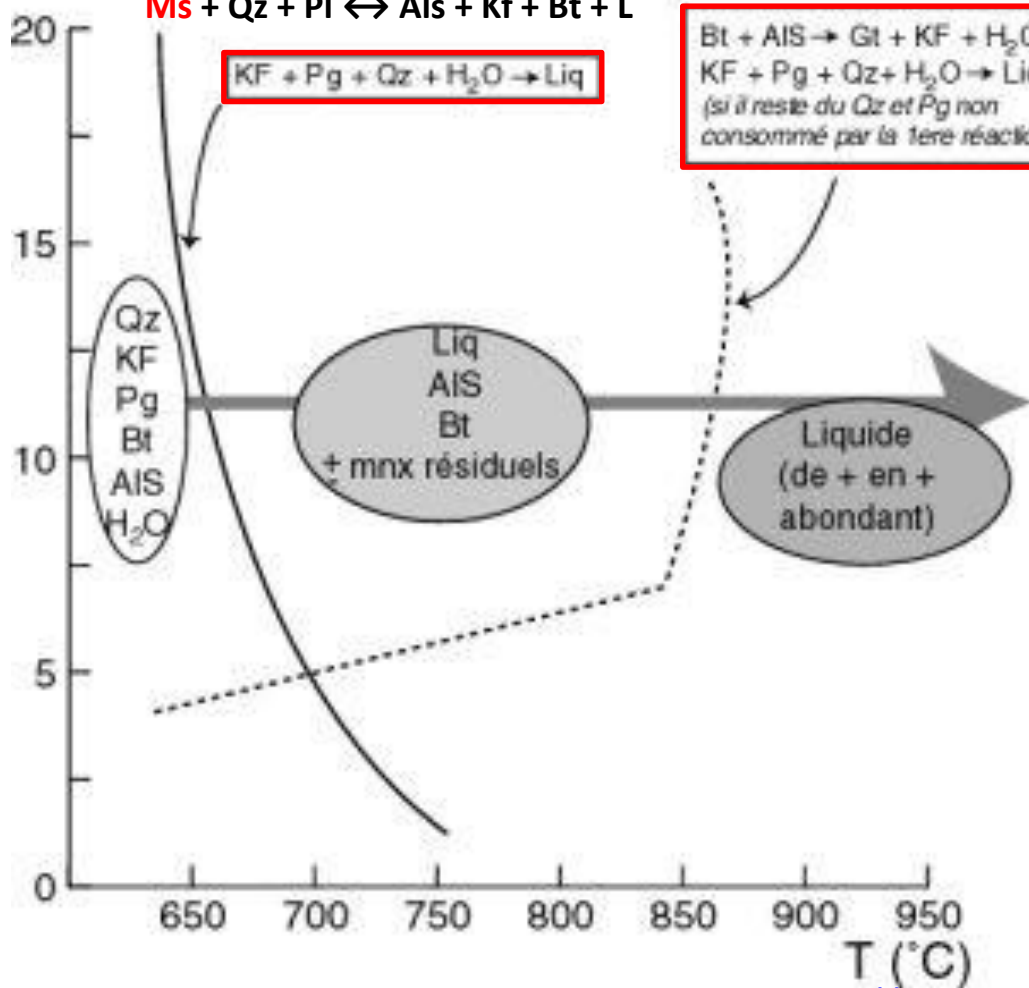
Système Qz-KF-Pg-Bt-AIS-H₂O
(Paragneiss hydraté)

P (Kbar)



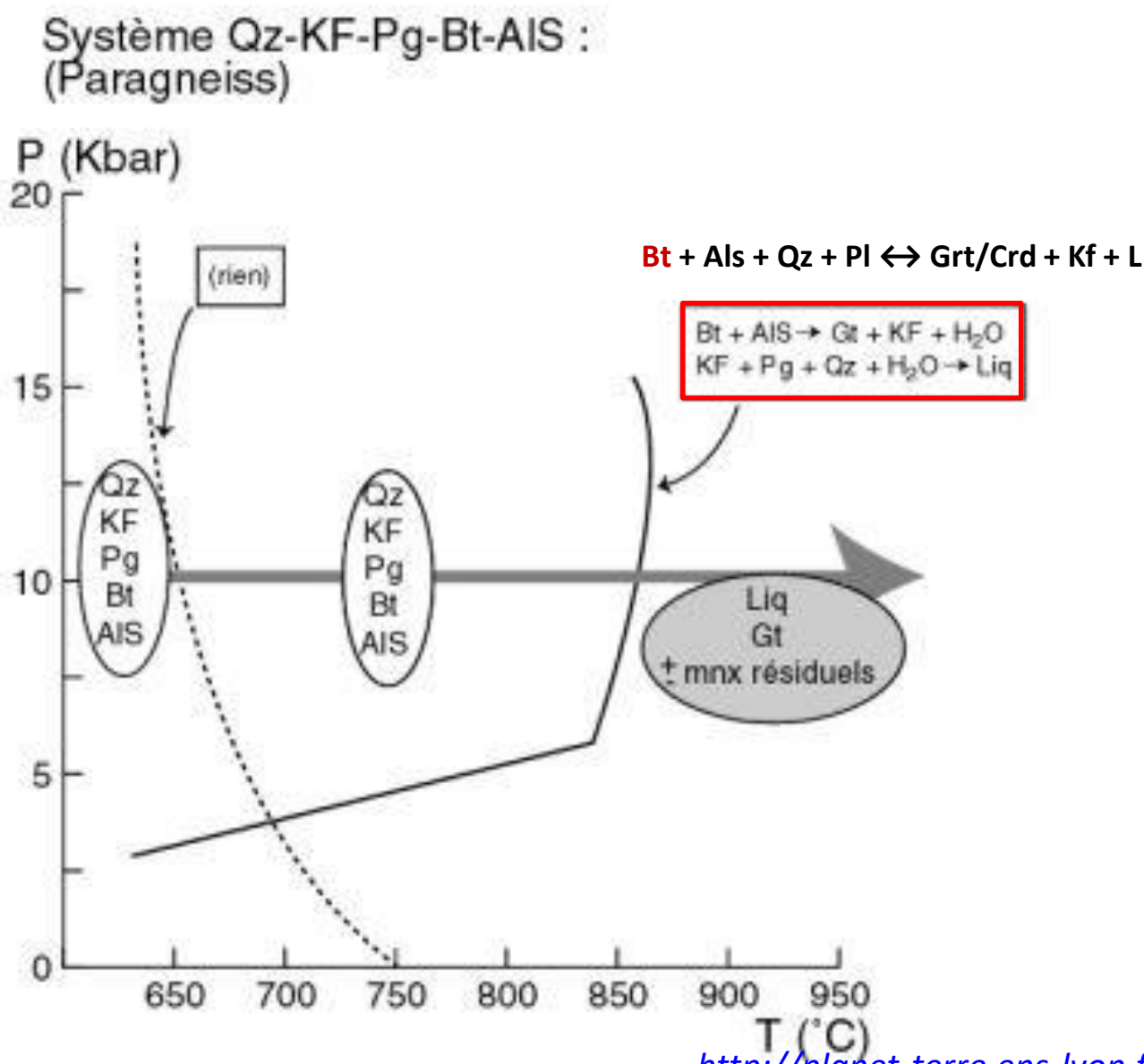
Fusion-déshydratation =
réaction métamorphique
+ fusion eutectique

Bilan: Bt + Pl + Qz + AIS $\rightleftharpoons$ Liquide +
Crd/Gt + KF



(Cours J.F Moyen₃₈ 2004)

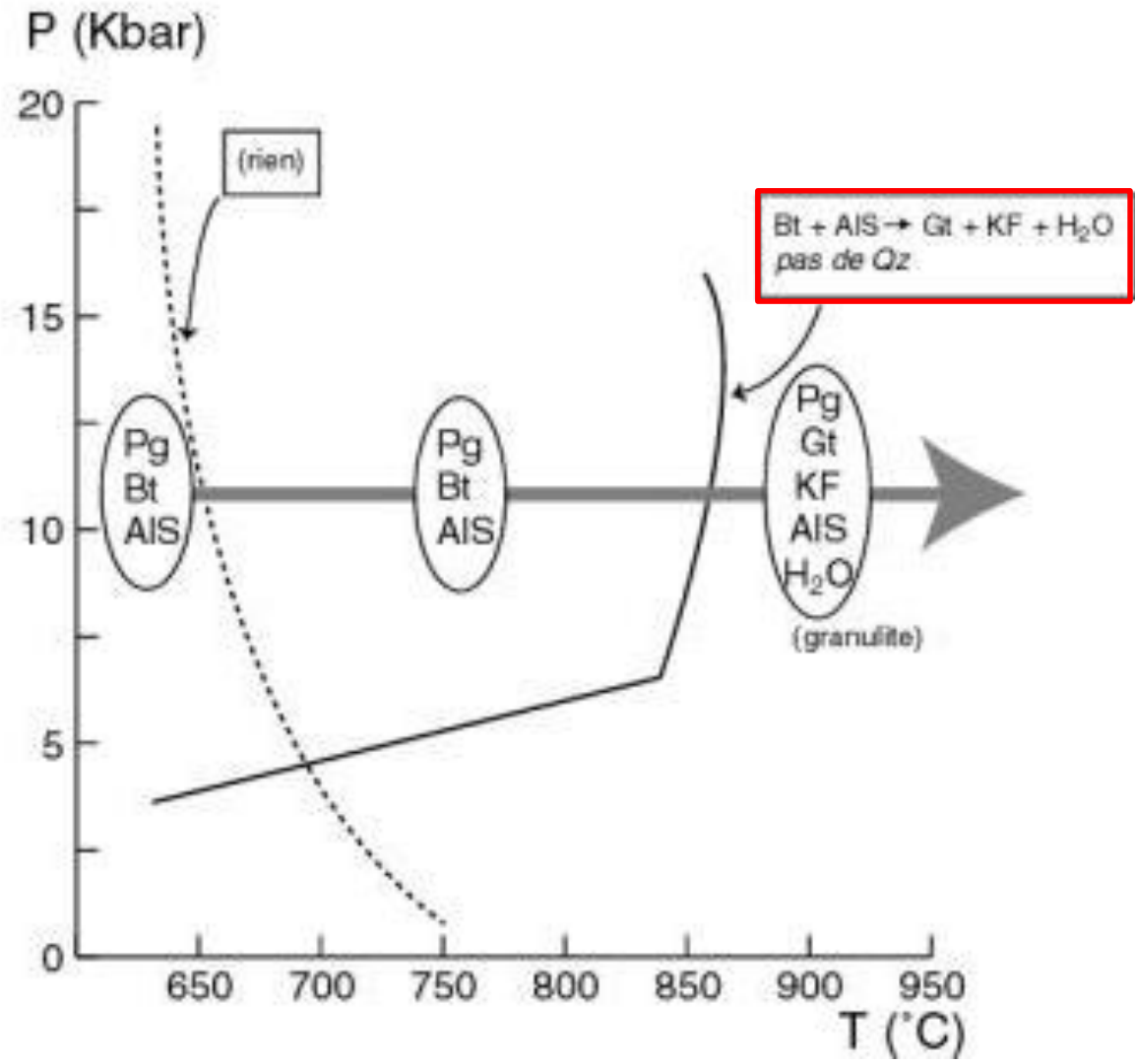
Anatexie: réactions



(Cours J.F Moyen₃₉ 2004)

Anatexie: réactions

Système Pg-Bt-AIS :
(Orthogneiss tonalitique)

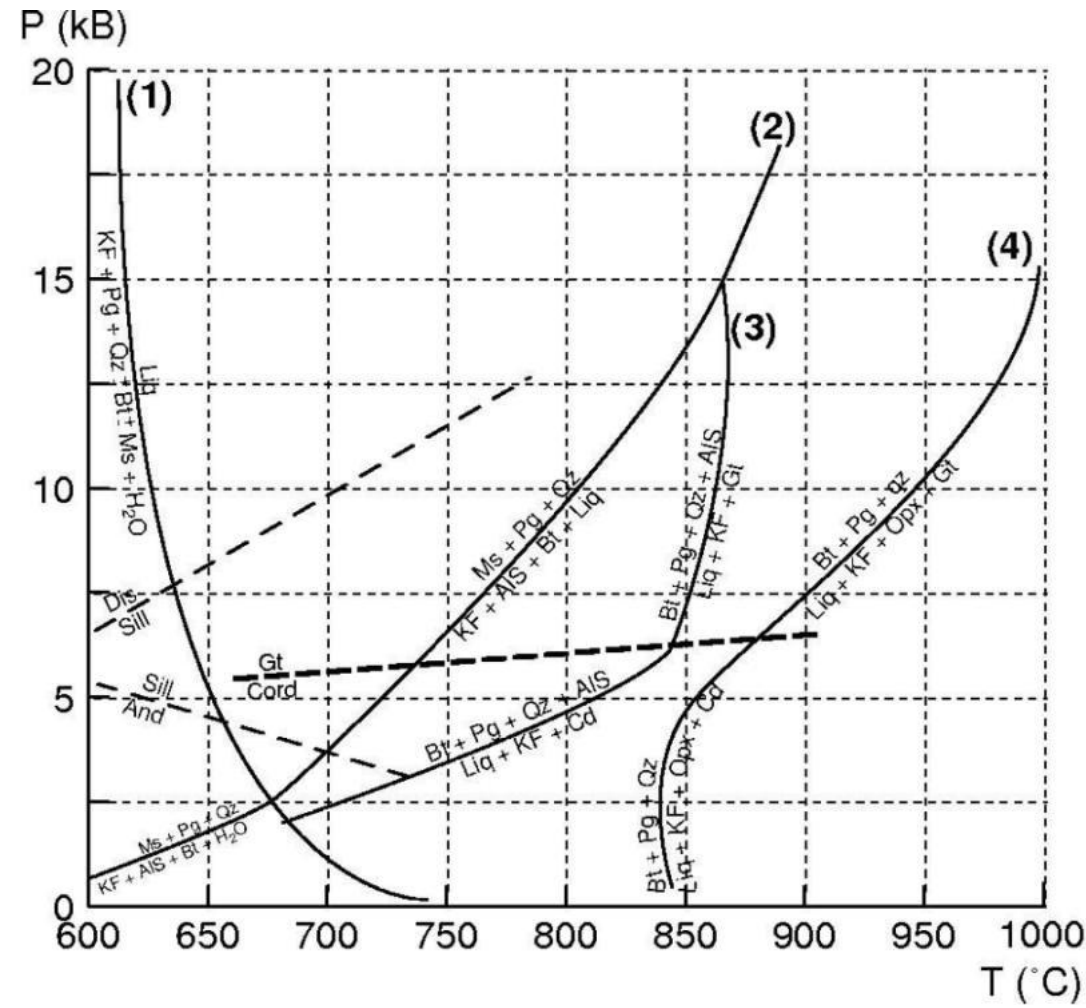


(Cours J.F Moyen, 2004)

Anatexie: réactions

Quelques réactions impliquées dans la fusion partielle de métasédiments et, par extension, de roches crustales en général:

(1) Fusion en présence d'eau (solidus hydraté) ; (2) Fusion-déshydratation de la muscovite ; (3) et (4) Fusion-déshydratation de la biotite. Ces réactions sont celles qui produisent le plus de liquide.

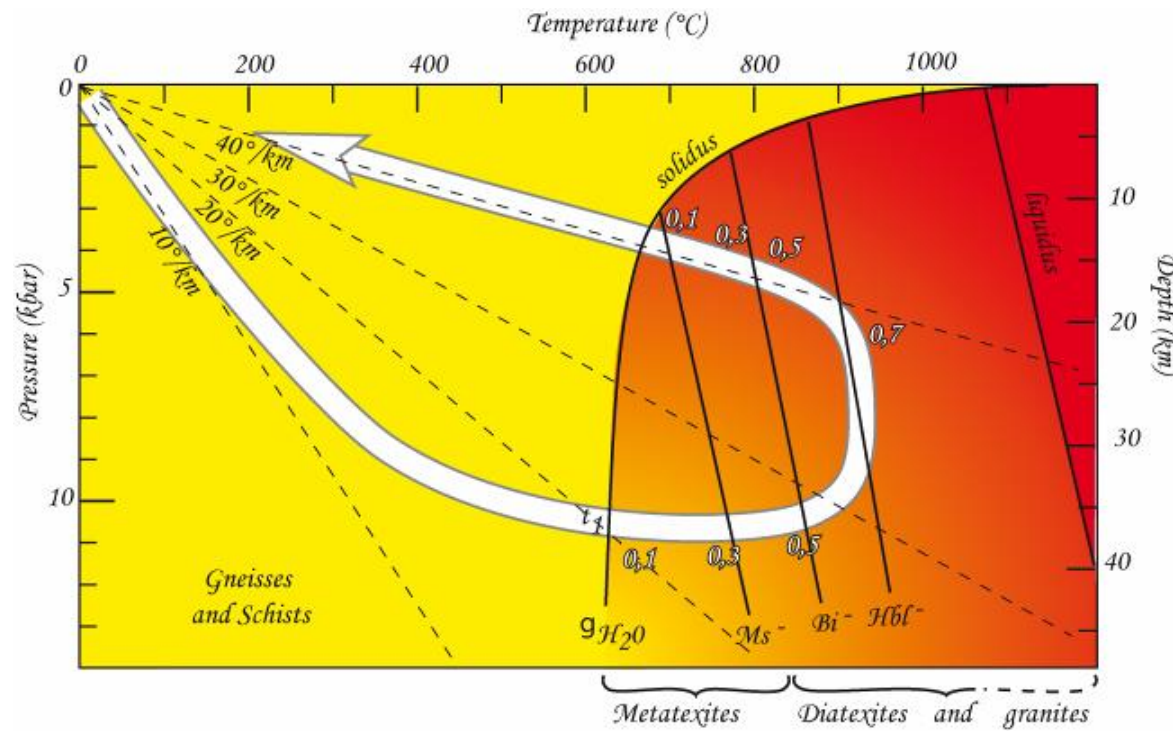
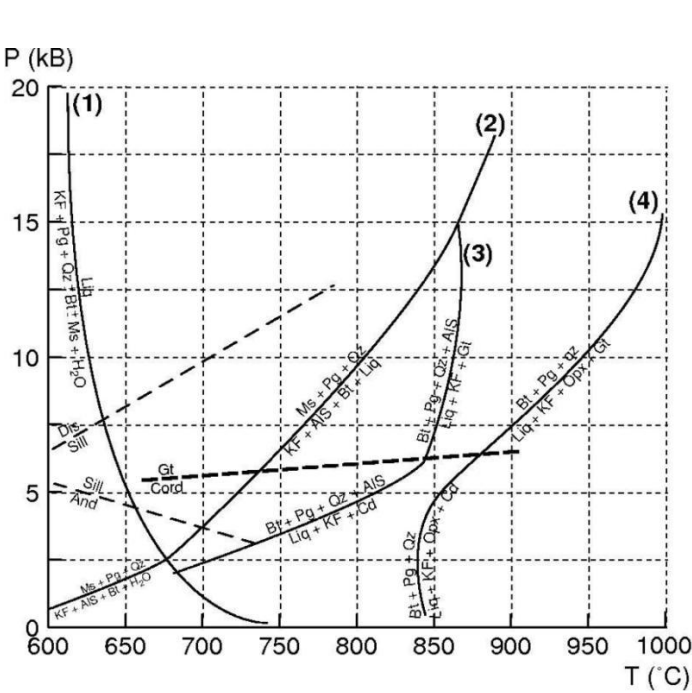


(Cours J.F Moyen, 2004)

Anatexie: réactions

Quelques réactions impliquées dans la fusion partielle de métasédiments et, par extension, de roches crustales en général:

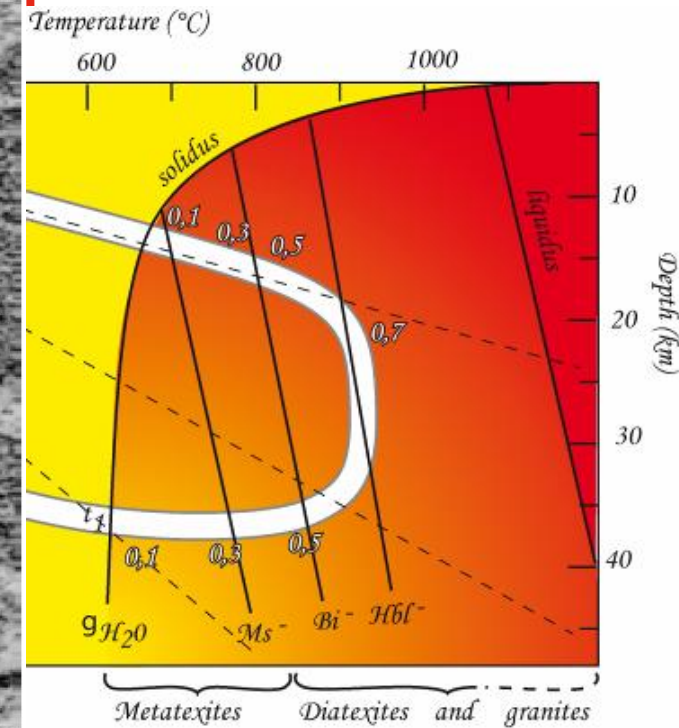
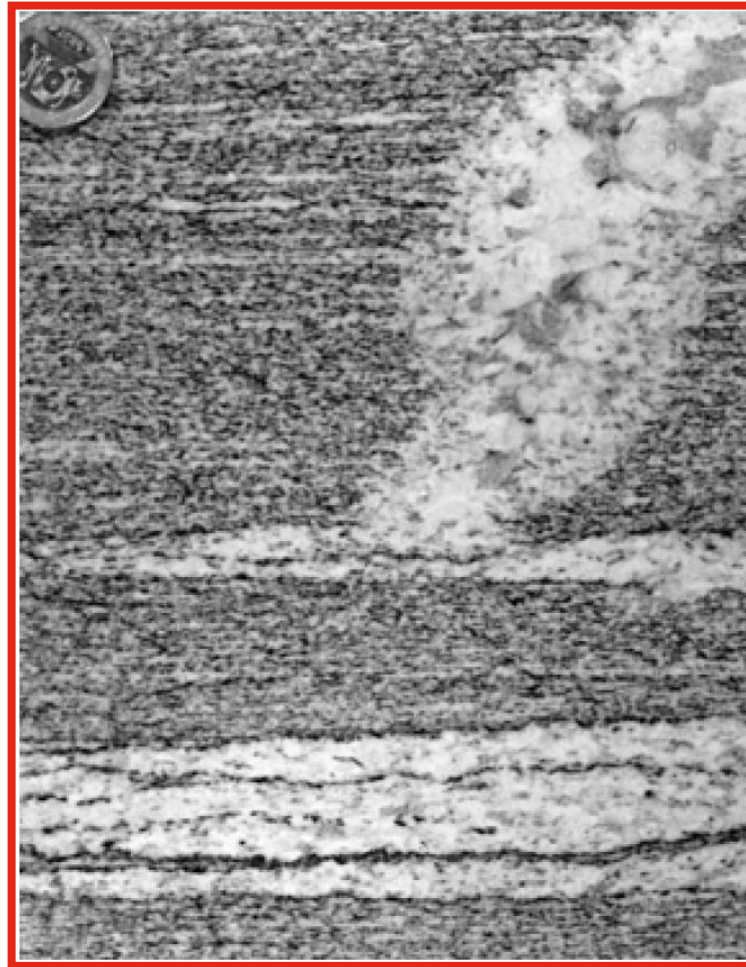
(1) Fusion en présence d'eau (solidus hydraté) ; (2) Fusion-déshydratation de la muscovite ; (3) et (4) Fusion-déshydratation de la biotite. Ces réactions sont celles qui produisent le plus de liquide.



(Cours J.F Moyen, 2004)

Migmatites: description

Qu'observez-vous? Textures, couleurs?



(Cours J.F Moyen, 2004)

<http://planet-terre.ens-lyon.fr/article/reactions-de-fusion.xml>

Migmatites: description

Qu'observez-vous? Textures, couleurs?

Alternance (litage)
niveaux clairs &
niveaux sombres

(1)



(5)

← Filon discordant,
couleur claire,
aspect roche magmatique:
texture grenue

(2)

← Niveau sombre,
foliation,
aspect roche métamorphique

(3)

← Niveaux clairs,
concordant à la foliation
aspect roche magmatique

(4)

← Niveau très sombre,
concordant à la foliation

Migmatite à quartz, feldspath, biotite

Migmatites: définitions

Migmatite: du grec « *migma* » qui signifie **mélange** (Sederholm, 1907).

Présentent un **litage** constitué d'une **alternance** (mélange) de roches de type **granite** (niveaux clairs) **et gneiss** (niveaux sombres), d'épaisseur centimétrique à décimétrique (syn. gneiss migmatitiques).

Mélano, leuco et mésosome: **définition pétrographique des migmatites.**

Peuvent être appliqués **quelle que soit l'origine** de ces roches.

Classification basée sur la **couleur des différents niveaux.**

Leucosome (du grec « *leukos* » : blanc et « *soma* » : corps).

mx. clairs (feldspaths et quartz) > mx. sombres (biotite, amphibole principalement).

Couleur claire + texture grenue: aspect d'une **roche magmatique** (granitoïdes).

Mésosome (du grec « *mesos* » : au milieu).

intermédiaire entre leucosome et celle du mélanosome.

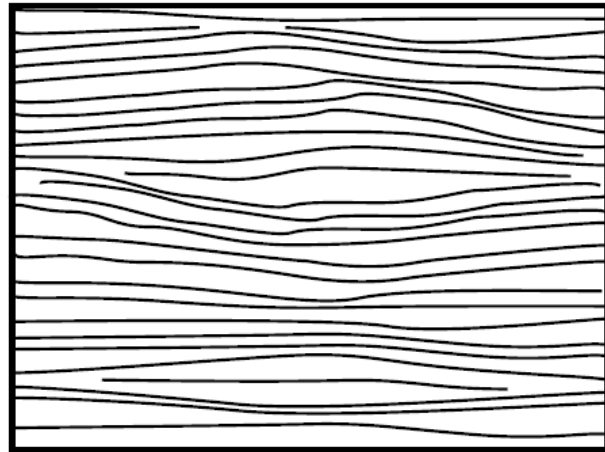
Couleur sombre + foliation: caractéristiques de **roche métamorphique.**

Mélanosome (du grec « *melanos* » : noir) = fins liserés enrichis en minéraux sombres.

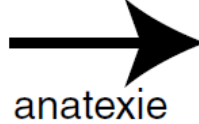
X (mx. clairs / mx. sombres) ↗: mélanosome → mésosome → leucosome.

Migmatites: définitions

Gneiss (foliation)

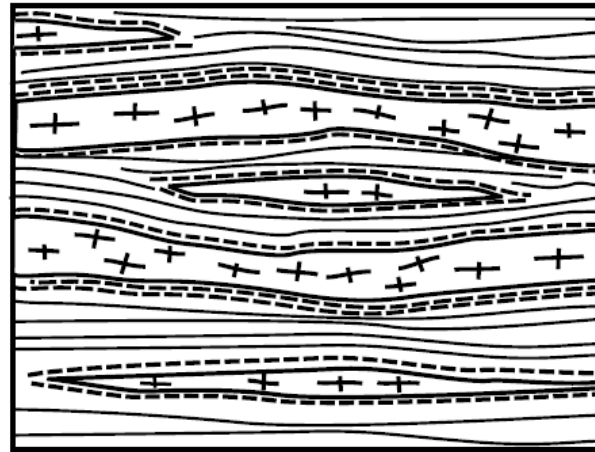


$+\Delta T$ ou
 $-\Delta P$ ou
 $+\Delta H_2O$



anatexie

Migmatite



mélanosome
leucosome

= néosome

mésosome = paléosome

Schéma illustrant la terminologie utilisée pour définir les migmatites

Néosome et paléosome: connotation pétrologique + référence à une origine par anatexie.

Paléosome (syn. mésosome) = roche initiale métamorphique avant la fusion (à g.)

Néosome (leucosome + mélanosome) = partie nouvellement formée par fusion partielle:
la partie claire (leuco) est la partie fondue.
la partie sombre (mélano), **la partie résiduelle non fondue (à nuancer)**.

Migmatites: définitions

Litage des leucosome /
mésosome /
mélanosome
généralement
concordant à la foliation
= ségrégation du magma
limitée à l'échelle de
l'échantillon



Migmatite à quartz, feldspath, biotite

← Leucosome
(filon discordant)
migration du magma

← Mésosome
(foliation bien visible)
= paléosome

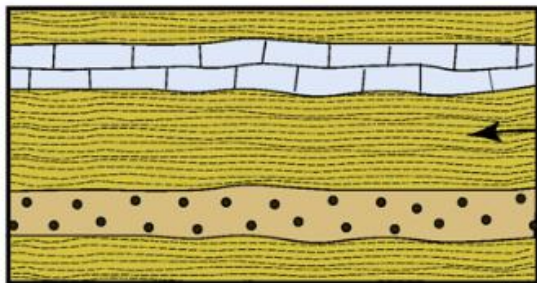
← Leucosome

← Mélanosome
(fin liseré biotitique)

= néosome

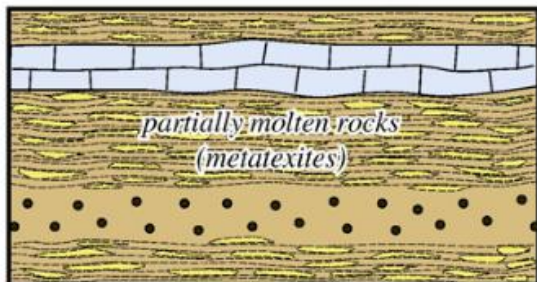
1

Solid rocks (protolith)



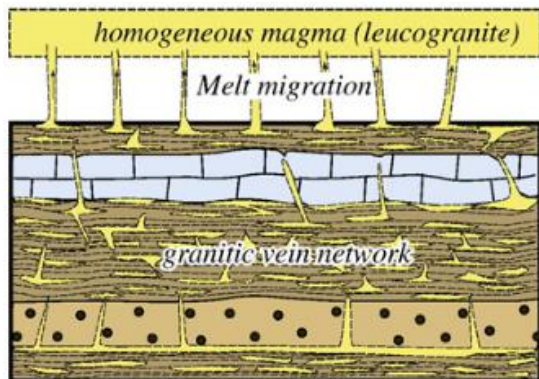
Partial melting
melt/solid segregation

2

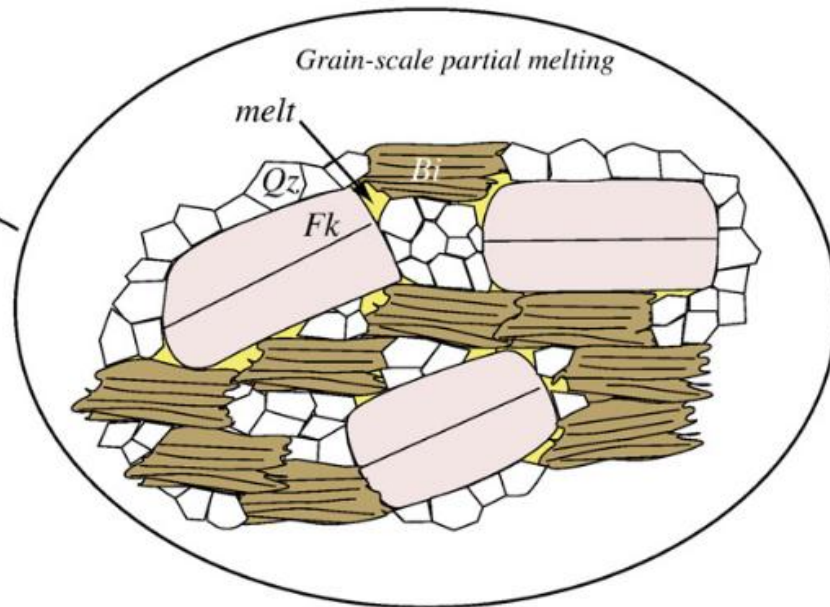


Melt migration

3a

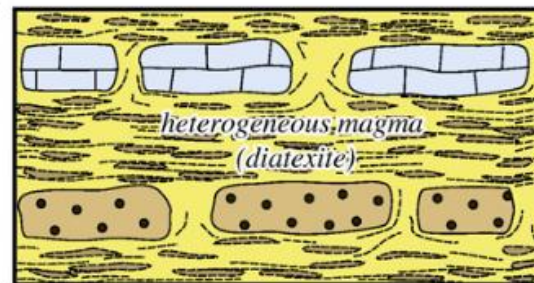


Grain-scale partial melting



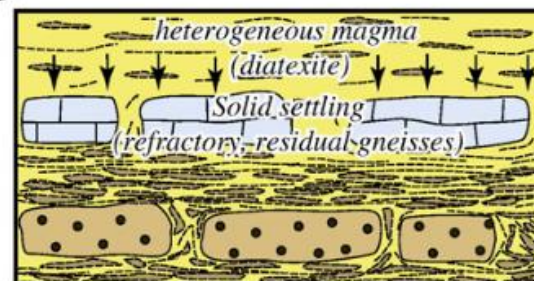
Increase in
melt %

3b



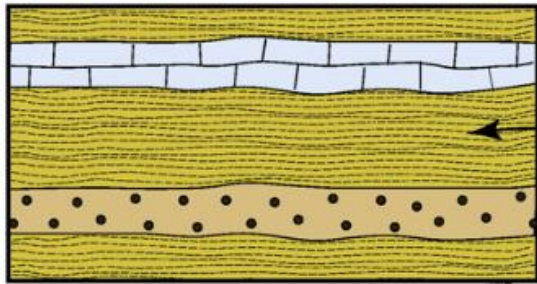
Solid settling

4



①

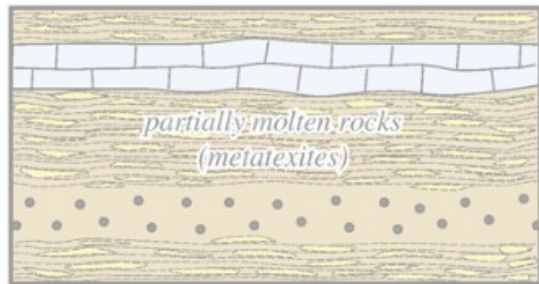
Solid rocks (protolith)



*Partial melting
melt/solid segregation*



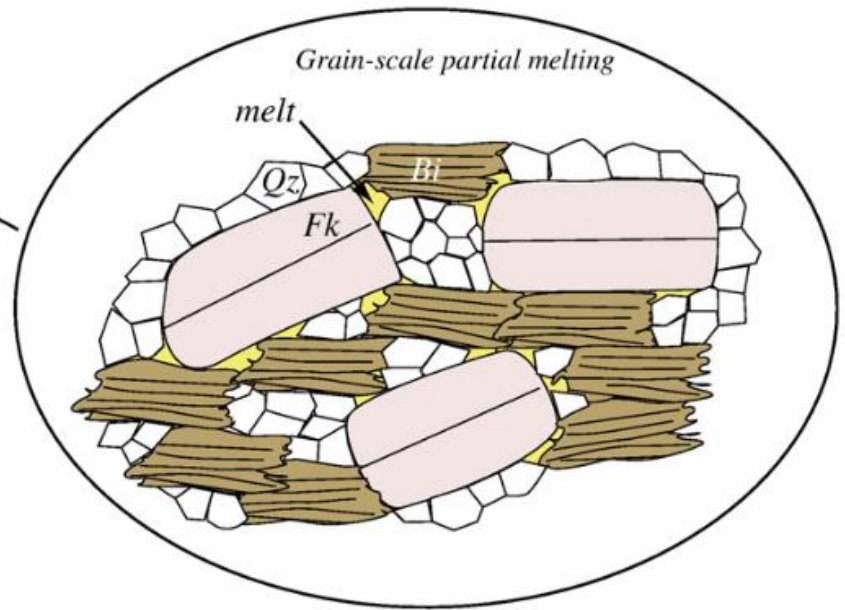
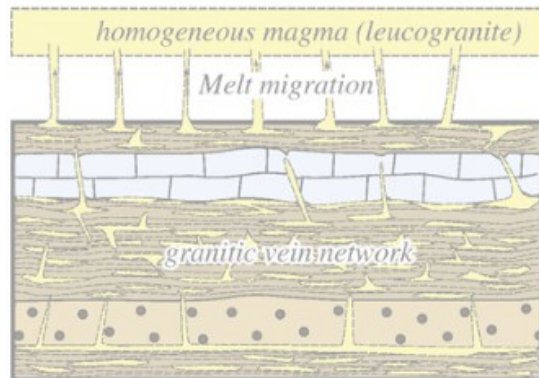
②



Melt migration



③a



*Increase in
melt %*

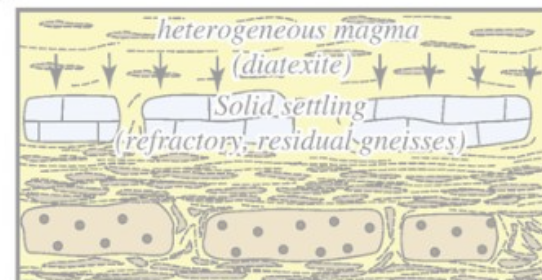
③b



Solid settling



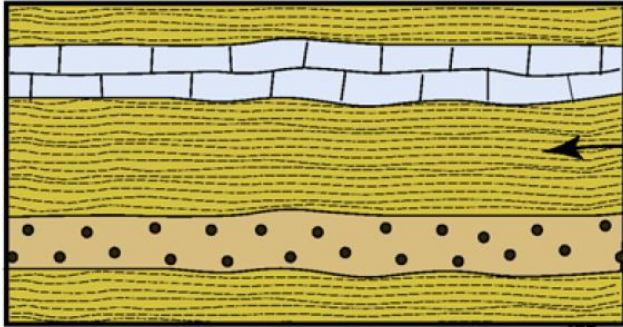
④



Formation des migmatites

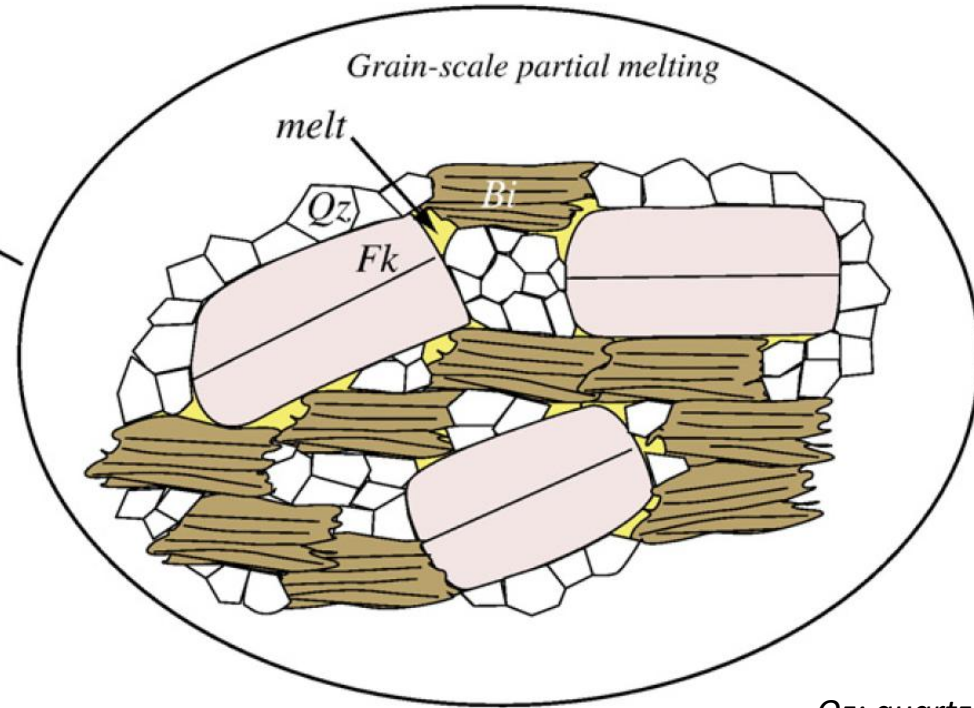
①

Solid rocks (protolith)



*Partial melting
melt/solid segregation*

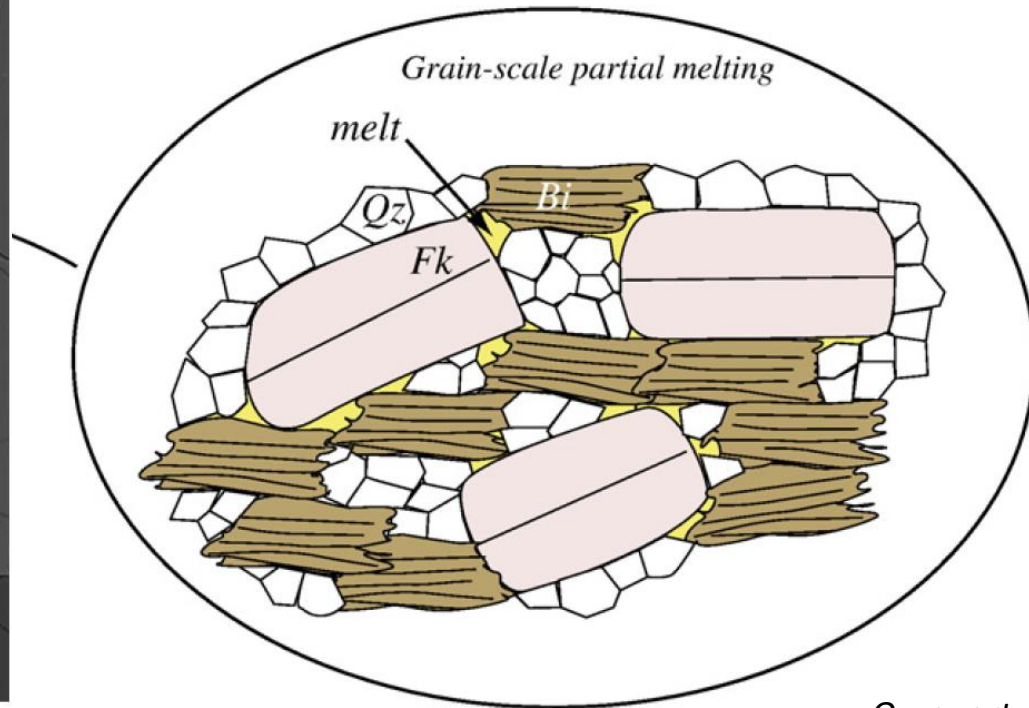
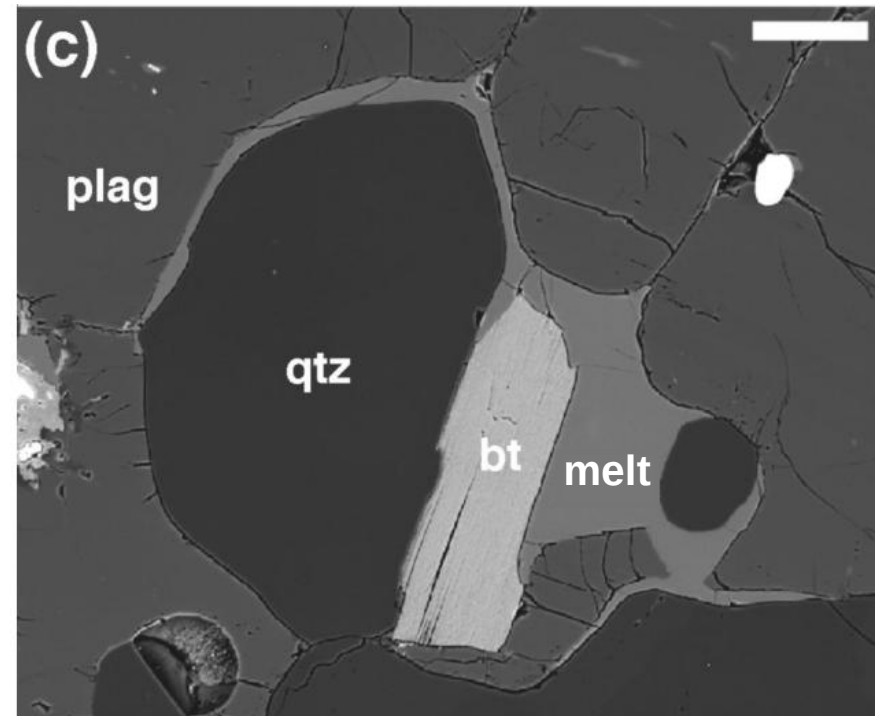
②



*Qz: quartz
Fk: feldspar-K
Bi: biotite*

Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (*Vanderhaeghe, 2009*). **1. Fusion partielle d'une roche conduisant à la formation de liquide silicaté entre les minéraux pré-existants.**

Formation des migmatites

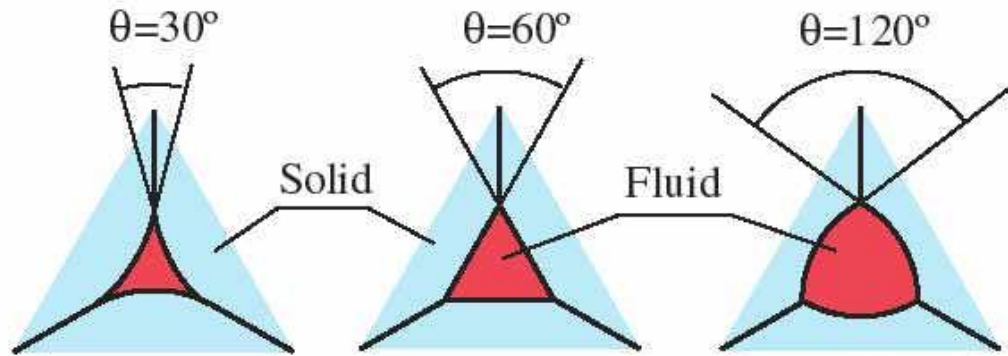


Qz: quartz
Fk: feldspar-K
Bi: biotite

Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (*Vanderhaeghe, 2009*). **1. Fusion partielle d'une roche conduisant à la formation de liquide silicaté entre les minéraux pré-existants.**

Formation des migmatites

Angle de mouillage et perméabilité:
connectivité du liquide



Melt migration:

Geometric condition:

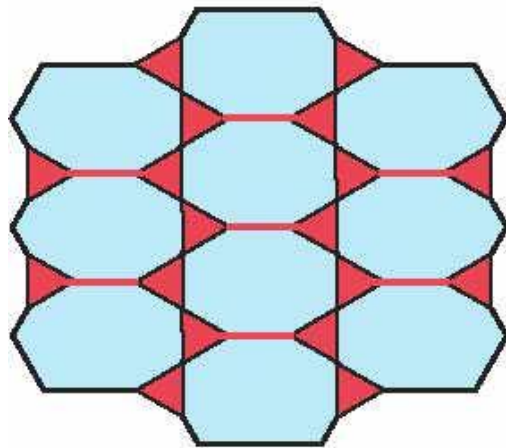
- dihedral angle



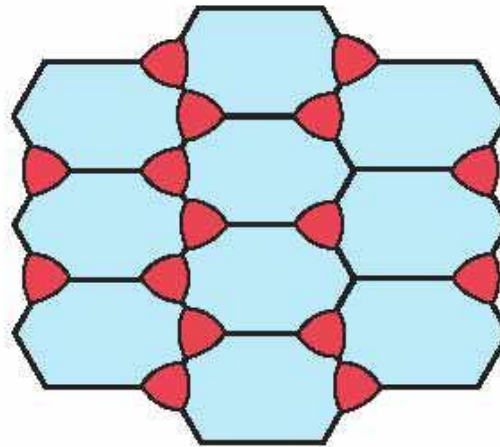
Driving force:

- deformation (viscosity)

- buoyancy (density)



Permeable



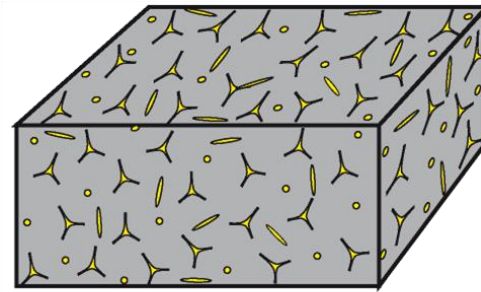
Impermeable

Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (Vanderhaeghe, 2009). **1. Fusion partielle d'une roche conduisant à la formation de liquide silicaté entre les minéraux pré-existants.**

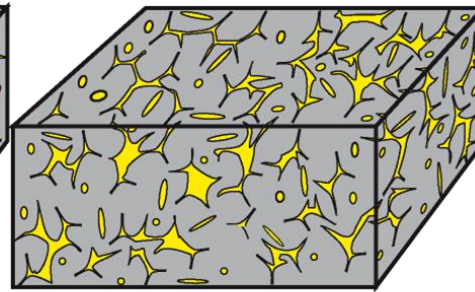
Formation des migmatites

Angle de mouillage et perméabilité:
connectivité du liquide

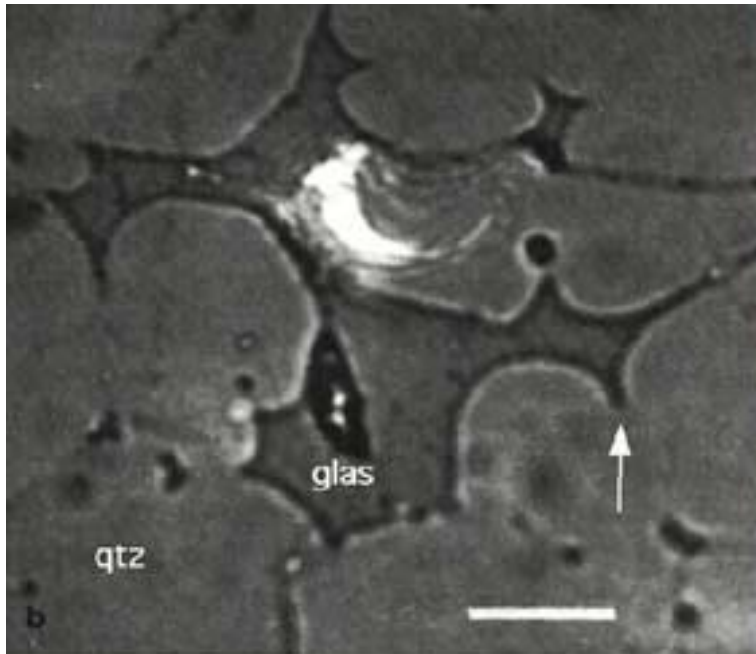
*Microstructures
resulting from melt
segregation in partially
molten rocks*



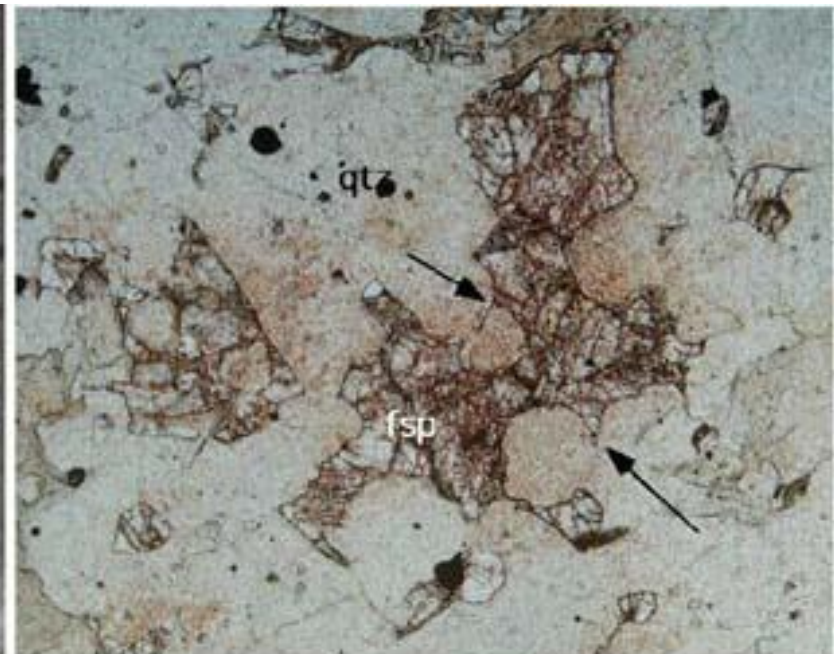
*Liquid disconnected
Solid continuous*



*Liquid connected
Solid continuous*



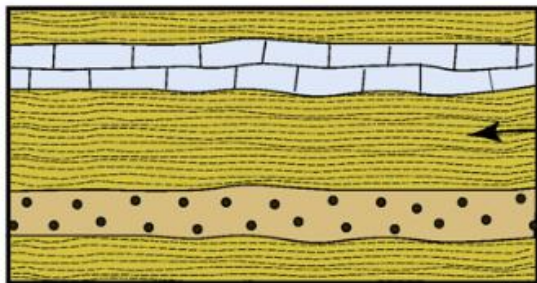
Experimental texture obtained for
granitic melt/quartz samples
(Jurewicz and Watson, 1984)



Thin section of interstitial feldspar in Big Cot-
tonwood Quartzites within the migmatite zone

①

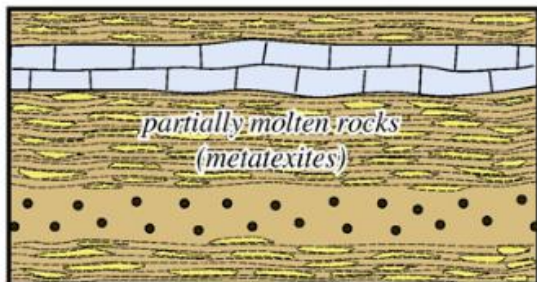
Solid rocks (protolith)



Partial melting
melt/solid segregation



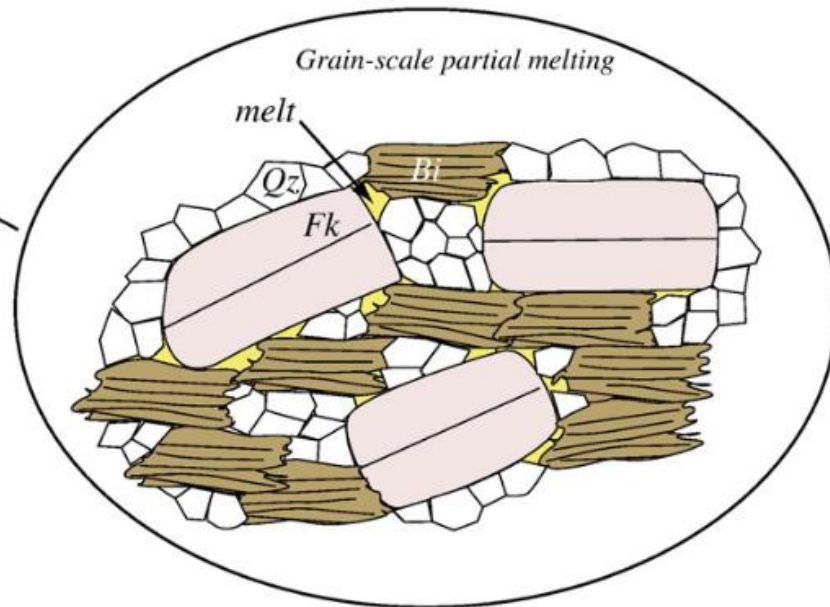
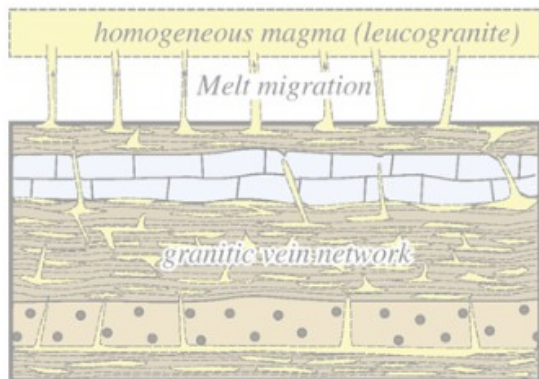
②



Melt migration

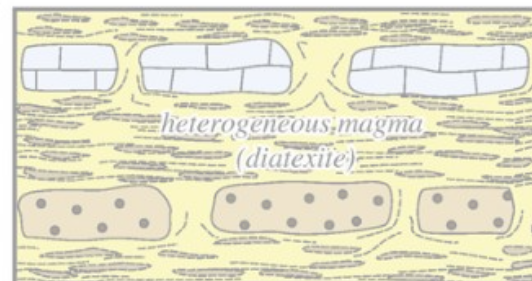


③a



Increase in
melt %

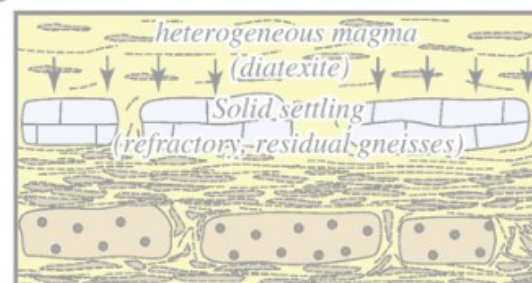
③b



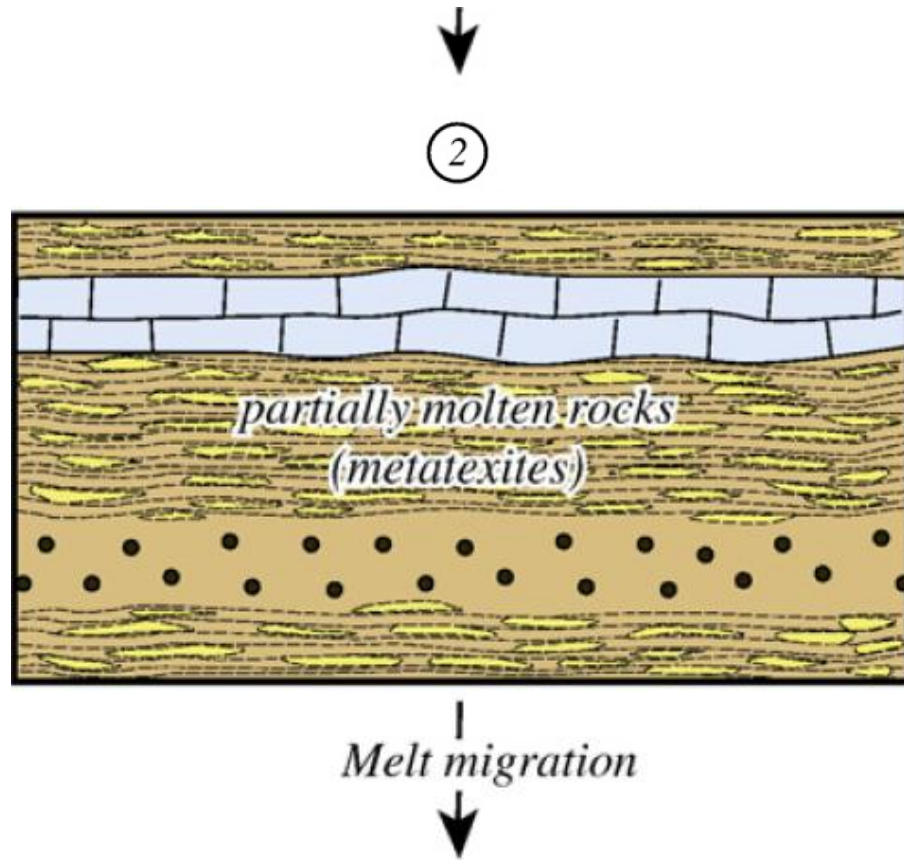
Solid settling



④



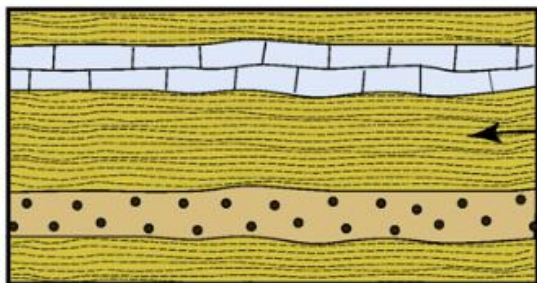
Formation des migmatites



Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (Vanderhaeghe, 2009). 2. Ségrégation du liquide silicaté à l'échelle du grain, permise par une connectivité entre les poches de liquide silicaté, conduisant à la formation de veines granitiques = leucosomes.

①

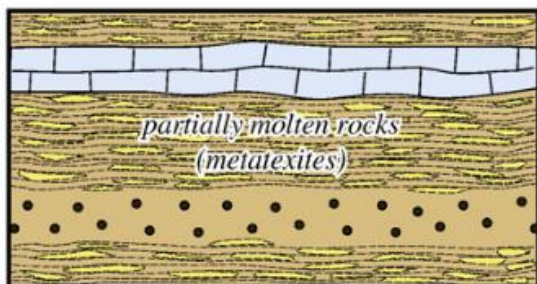
Solid rocks (protolith)



Partial melting
melt/solid segregation



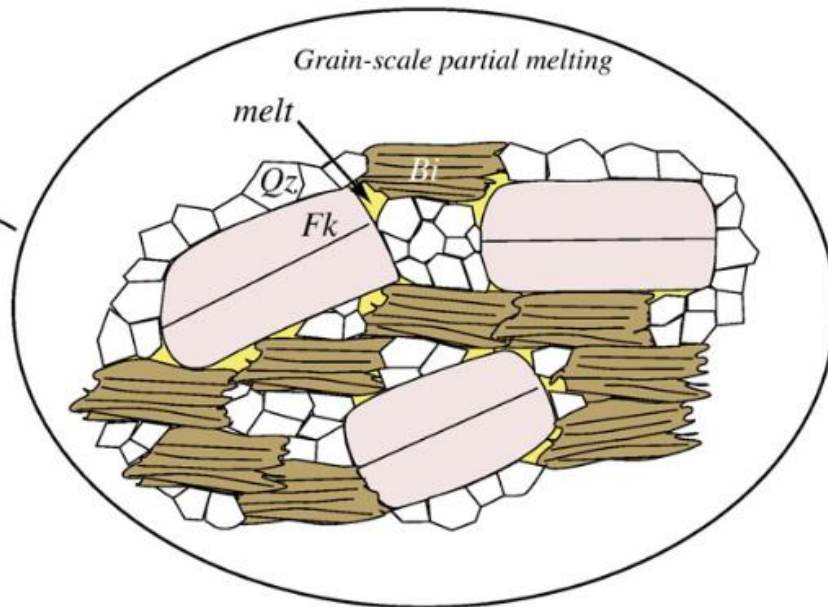
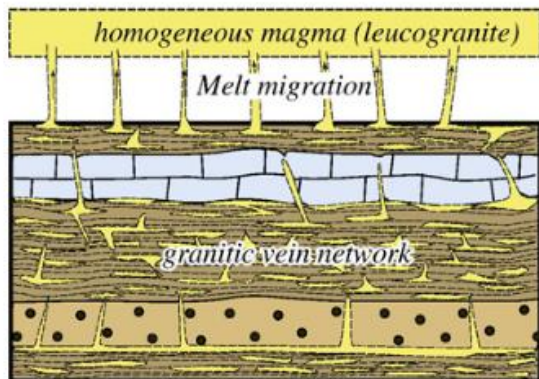
②



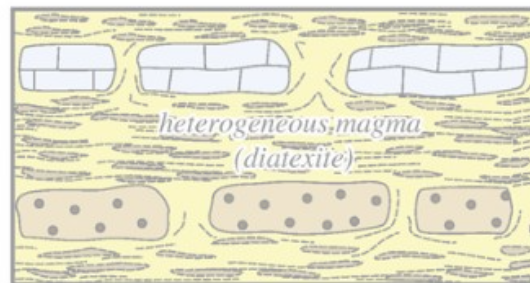
Melt migration



③a



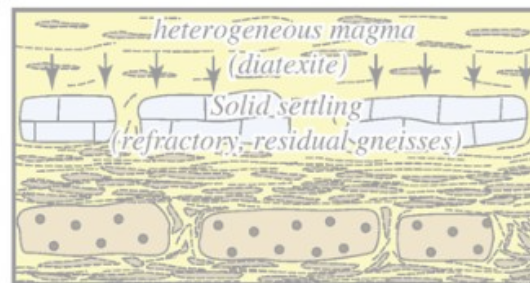
③b
Increase in melt %



Solid settling

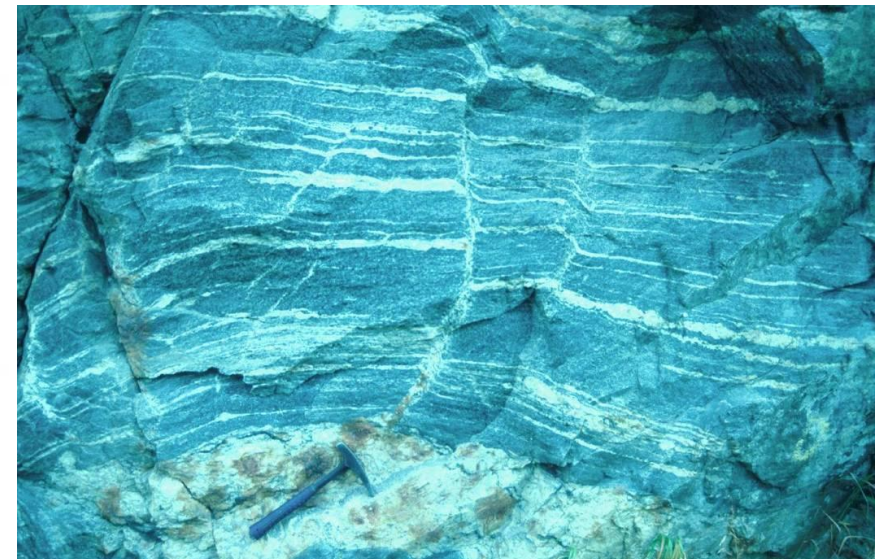
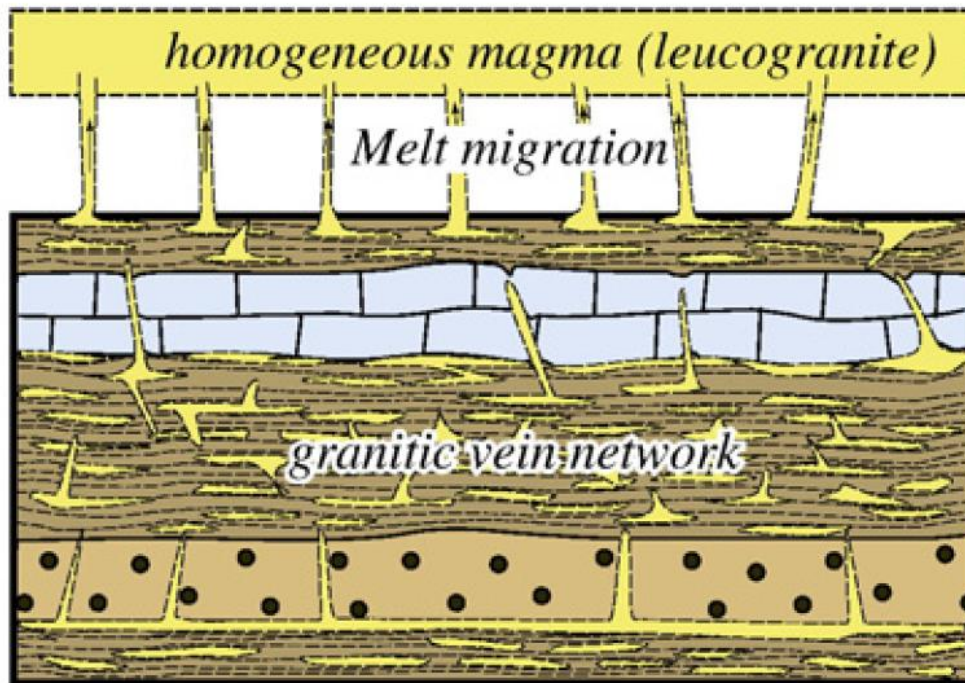


④



Formation des migmatites

↓
Melt migration
↓



Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (*Vanderhaeghe, 2009*). 3a. Migration du liquide silicaté, permise par la connectivité au-delà de l'échelle du grain, conduisant à la formation de laccolites de leucogranite.

Formation des migmatites

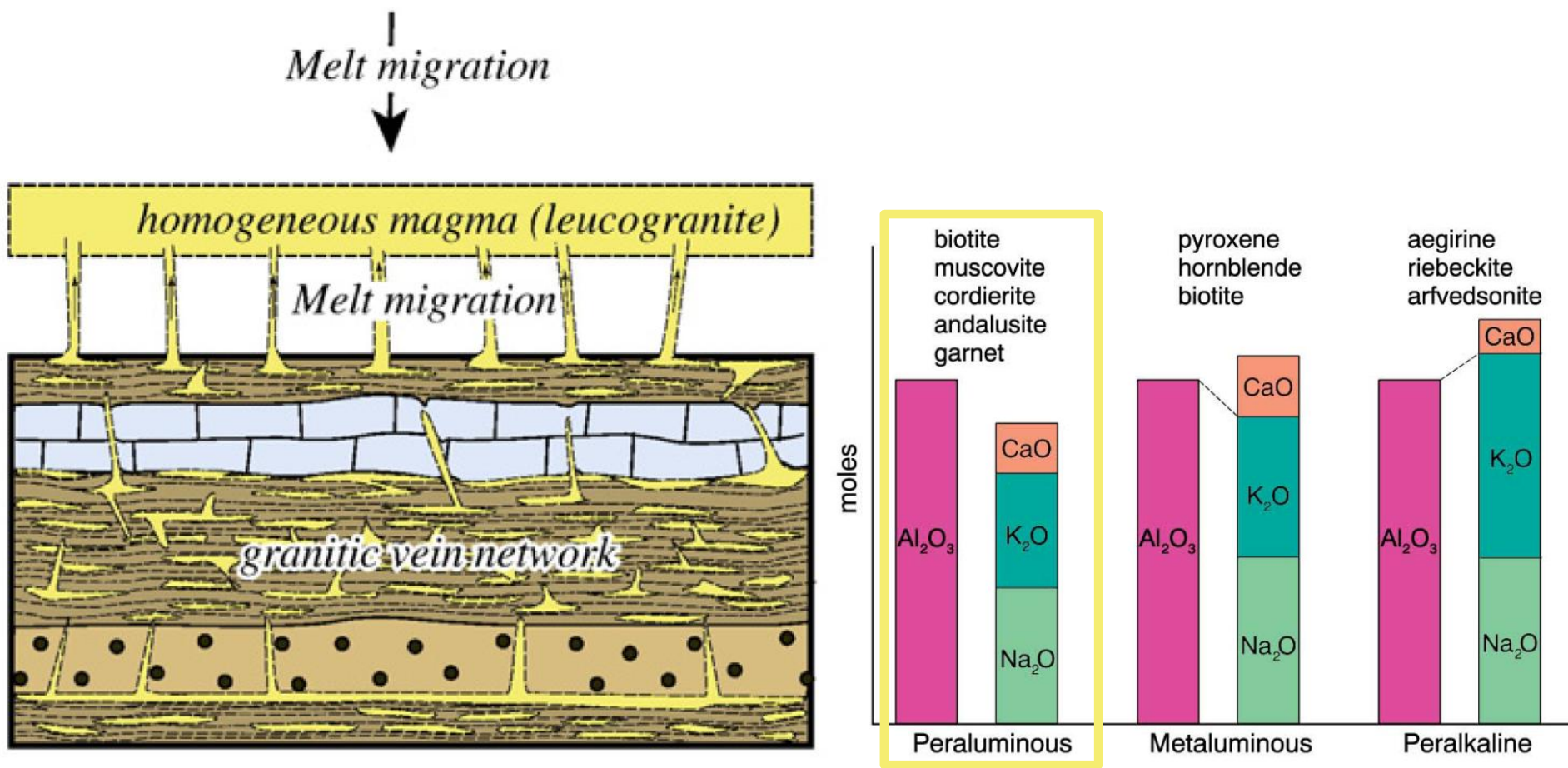


Brittle vein
Shuswap MCC, Canada



Ductile vein
Shuswap MCC, Canada

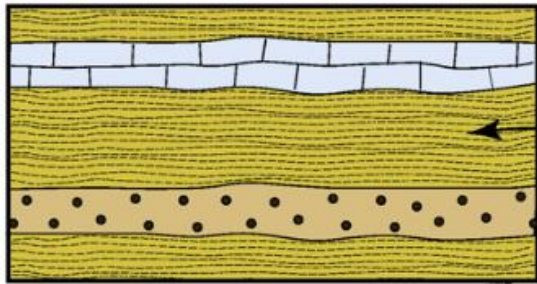
Formation des migmatites



Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (Vanderhaeghe, 2009). 3a. Migration du liquide silicaté, permise par la connectivité au-delà de l'échelle du grain, conduisant à la formation de laccolites de leucogranite.

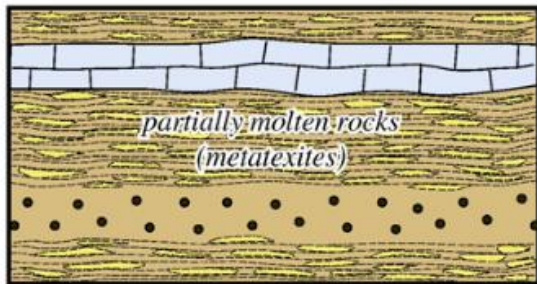
①

Solid rocks (protolith)



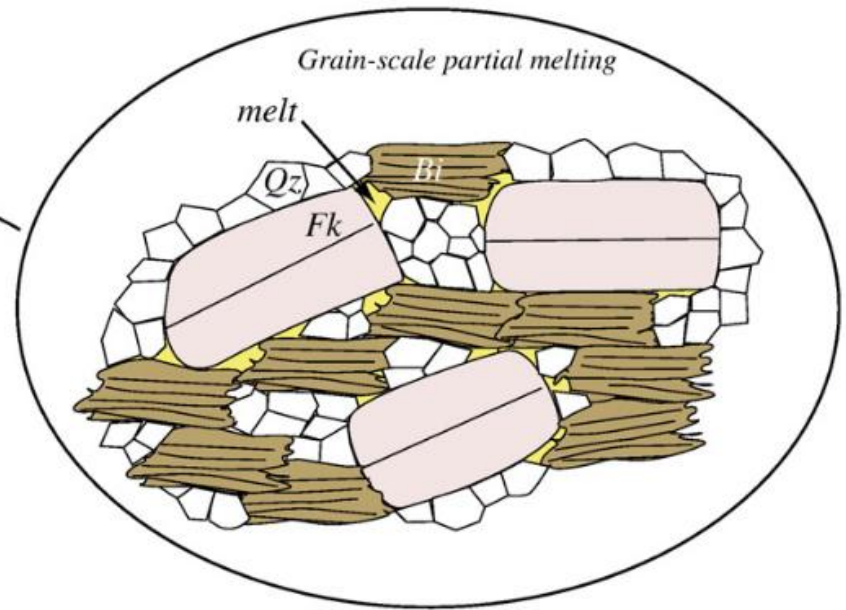
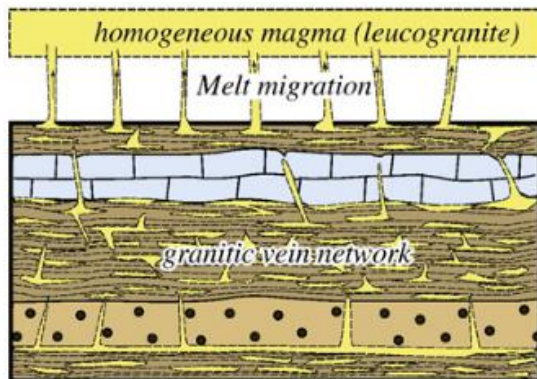
Partial melting
melt/solid segregation

②



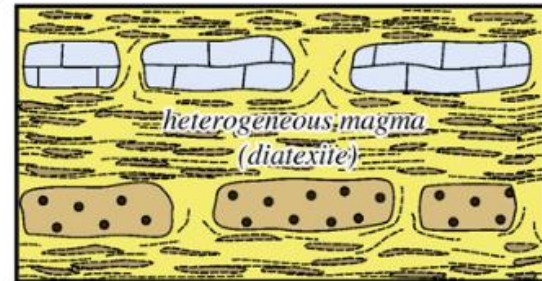
Melt migration

③a



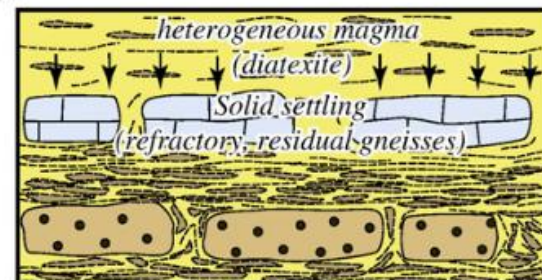
Increase in
melt %

③b

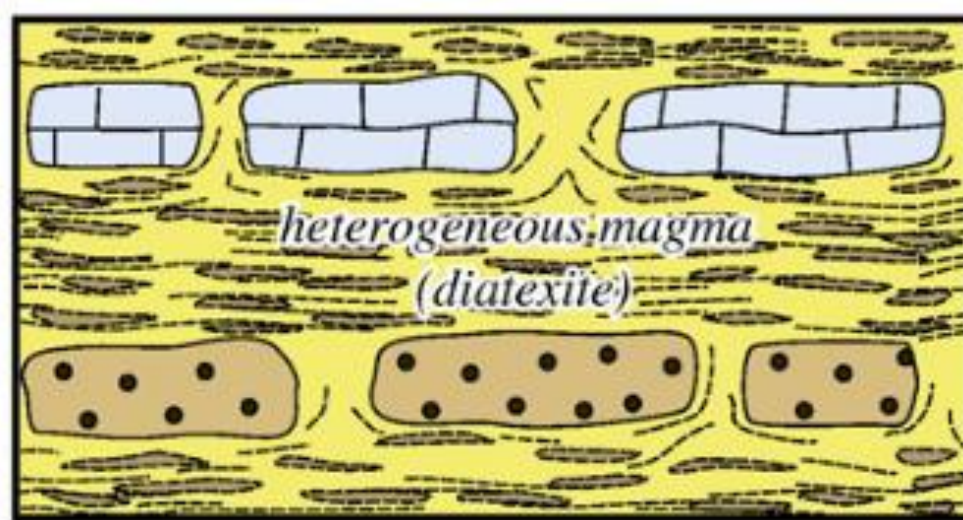


Solid settling

④

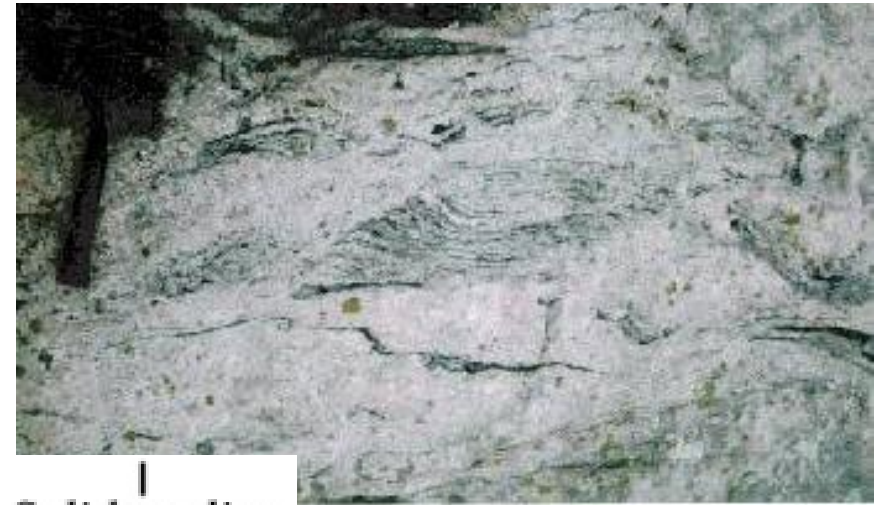
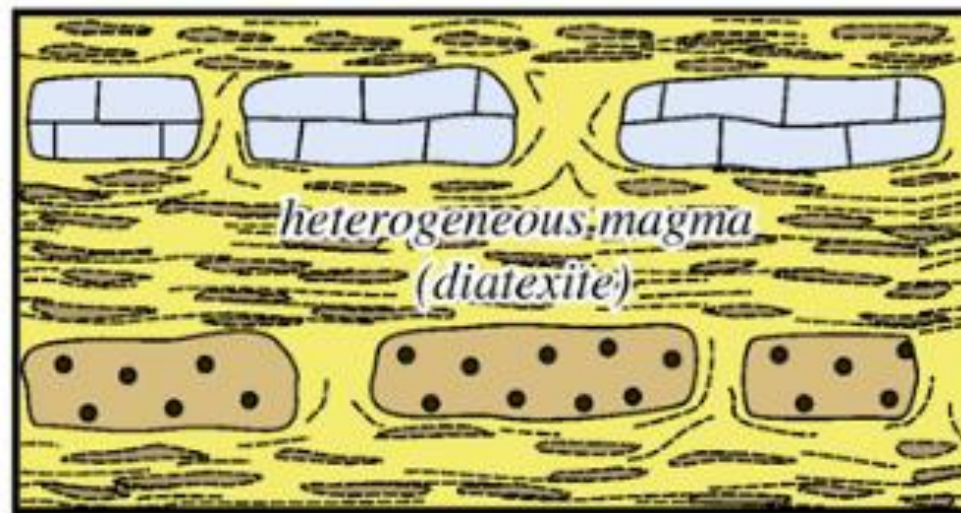


Formation des migmatites

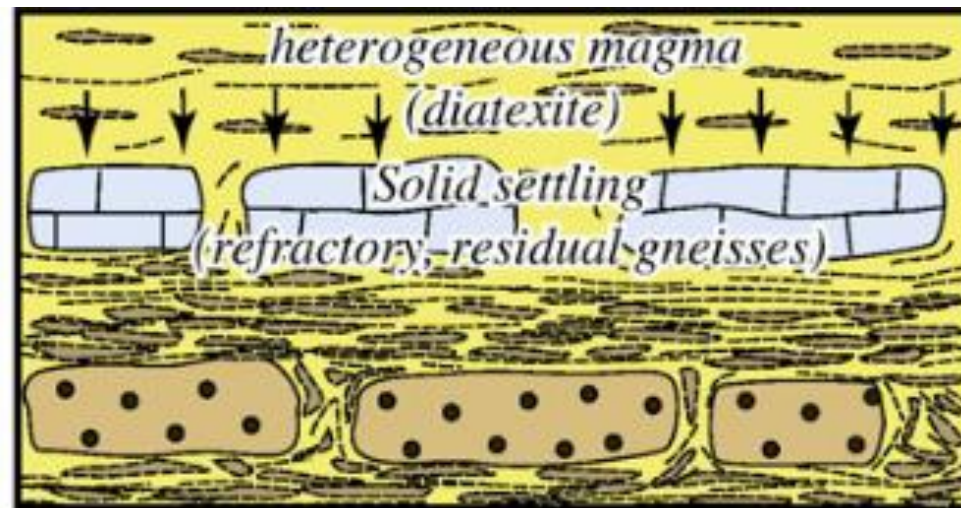


Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (*Vanderhaeghe, 2009*). **3b. Cas d'une poursuite de la fusion partielle et d'un drainage inefficace de la roche partiellement fondue et transition: roche partiellement fondue → magma.**

Formation des migmatites



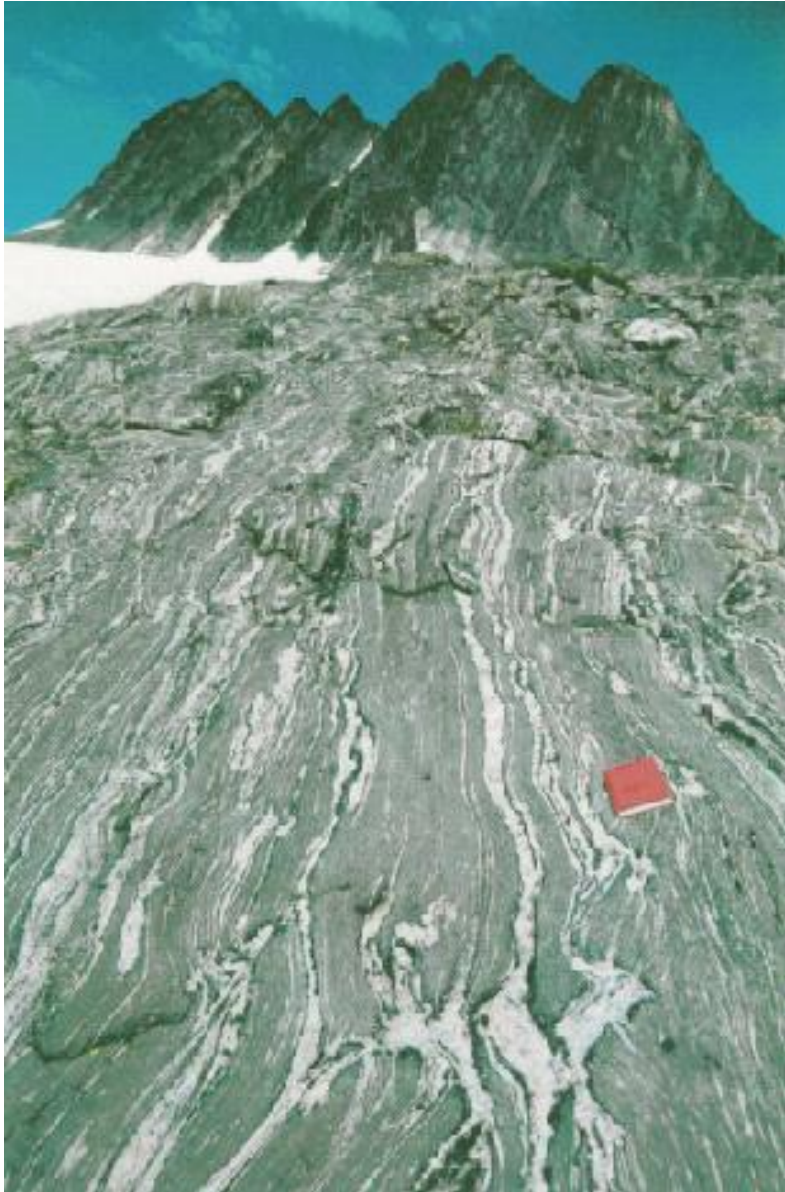
Solid settling
↓



Modèle d'évolution d'un système magma/solide pendant la fusion partielle (Vanderhaeghe, 2009). 4. Ségrégation des solides et du magma associé: accumulation de solides réfractaires laissant place à un magma plus différencié.

Formation des migmatites

Metatexites sur le terrain



Metatexite: ancienne roche partiellement fondue

- ✓ Foliation gneissique continue
- ✓ Le réseau solide accommode la déformation
- ✓ Les liquides silicatés migrent vers les zones de moindre pression



Formation des migmatites

Diatexites sur le terrain



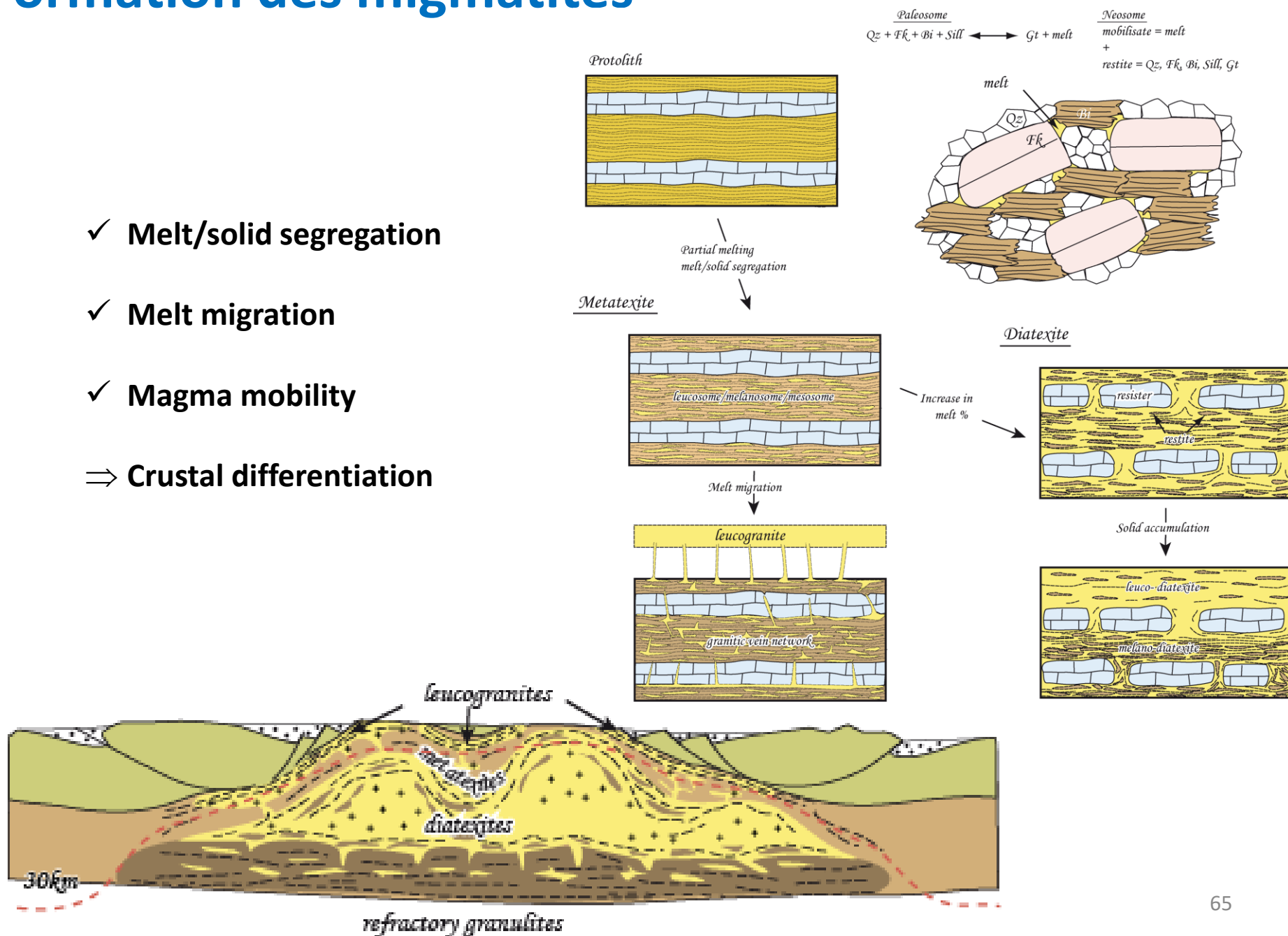
Diatexites: ancien magma

- ✓ Granite hétérogène avec enclaves
- ✓ Foliation magmatique
- ✓ Comportement rhéologique d'un magma
- ✓ Des solides en suspension ségrégés du magma

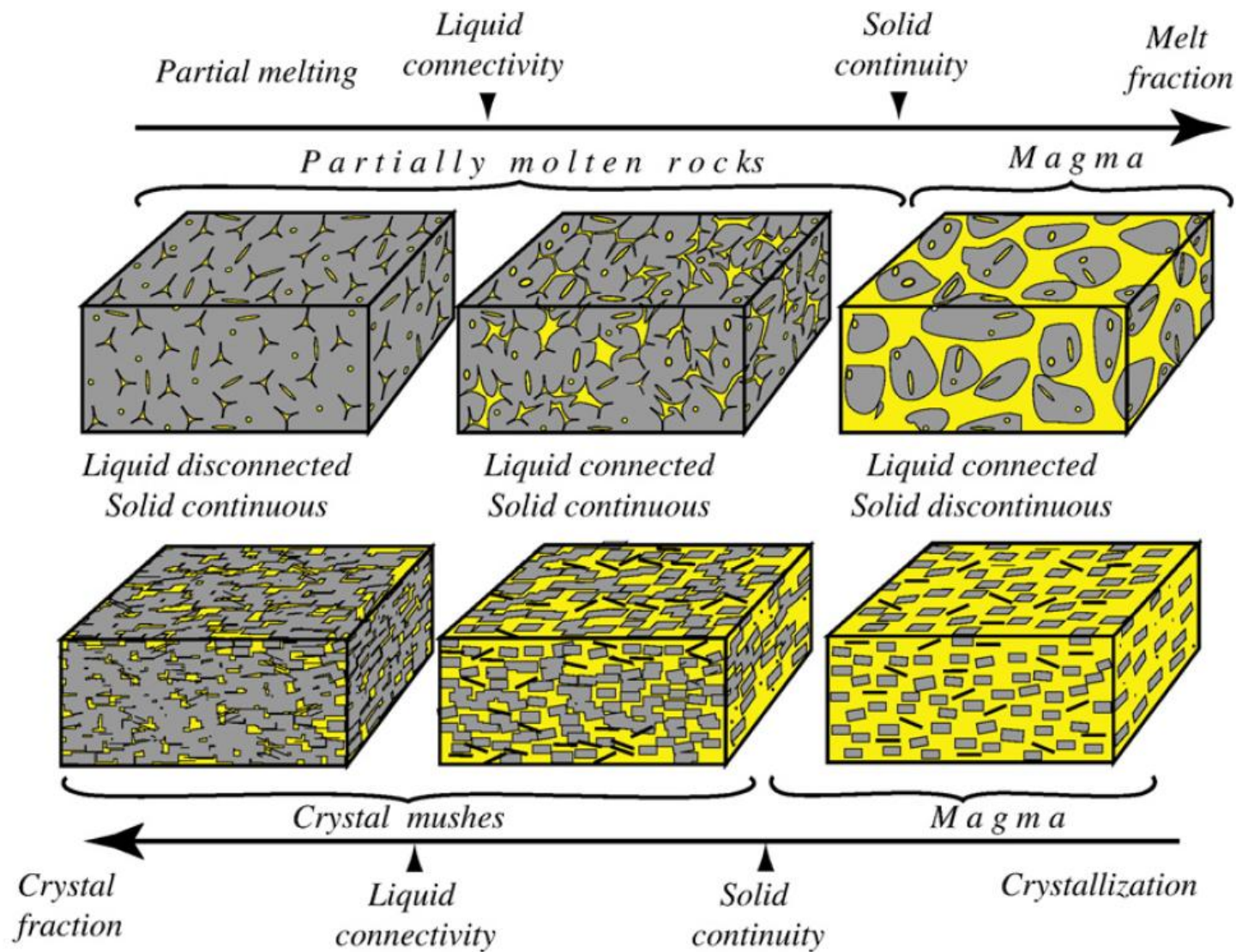


Formation des migmatites

- ✓ Melt/solid segregation
- ✓ Melt migration
- ✓ Magma mobility
- ⇒ Crustal differentiation

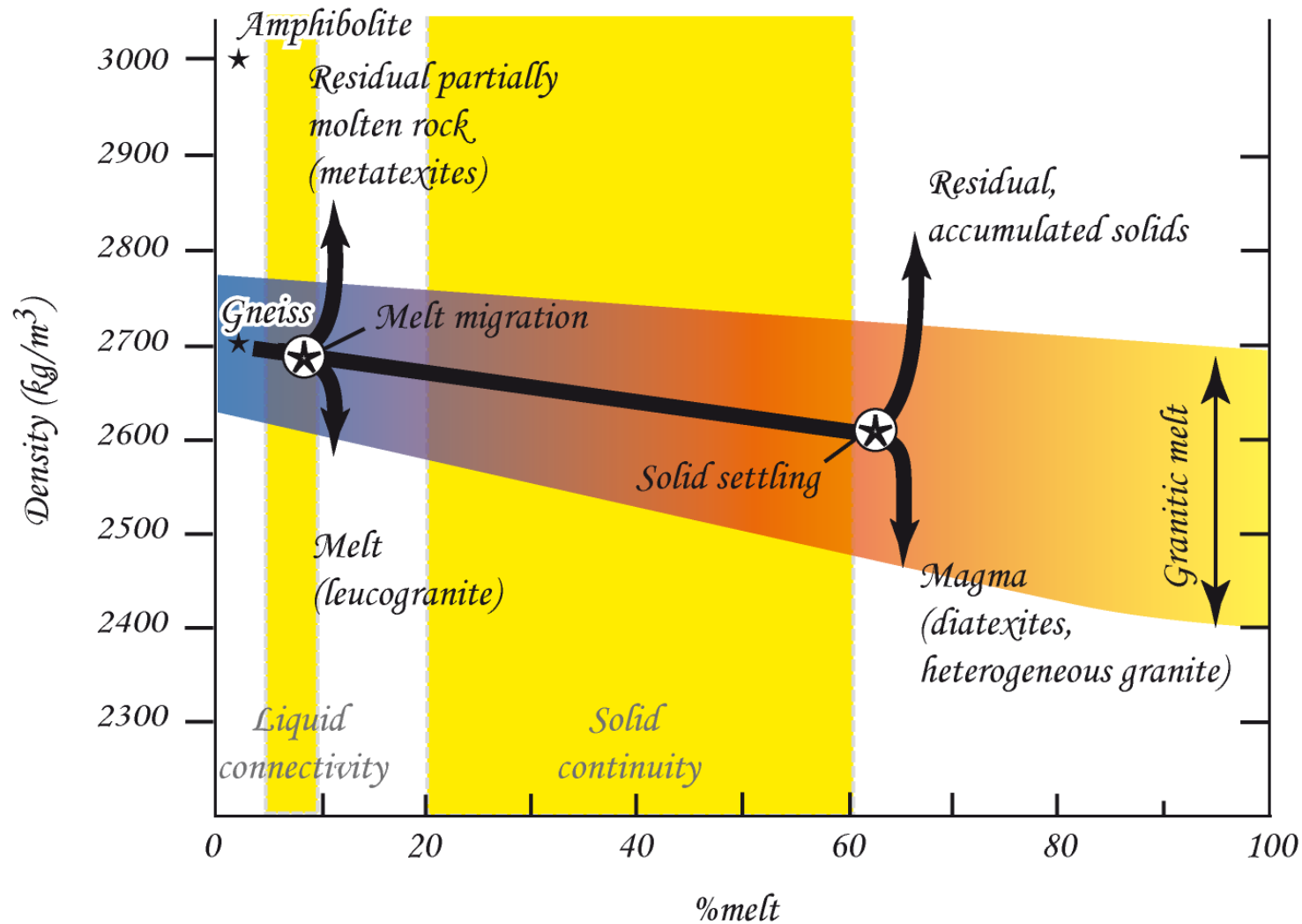


Mobilité et migration du magma



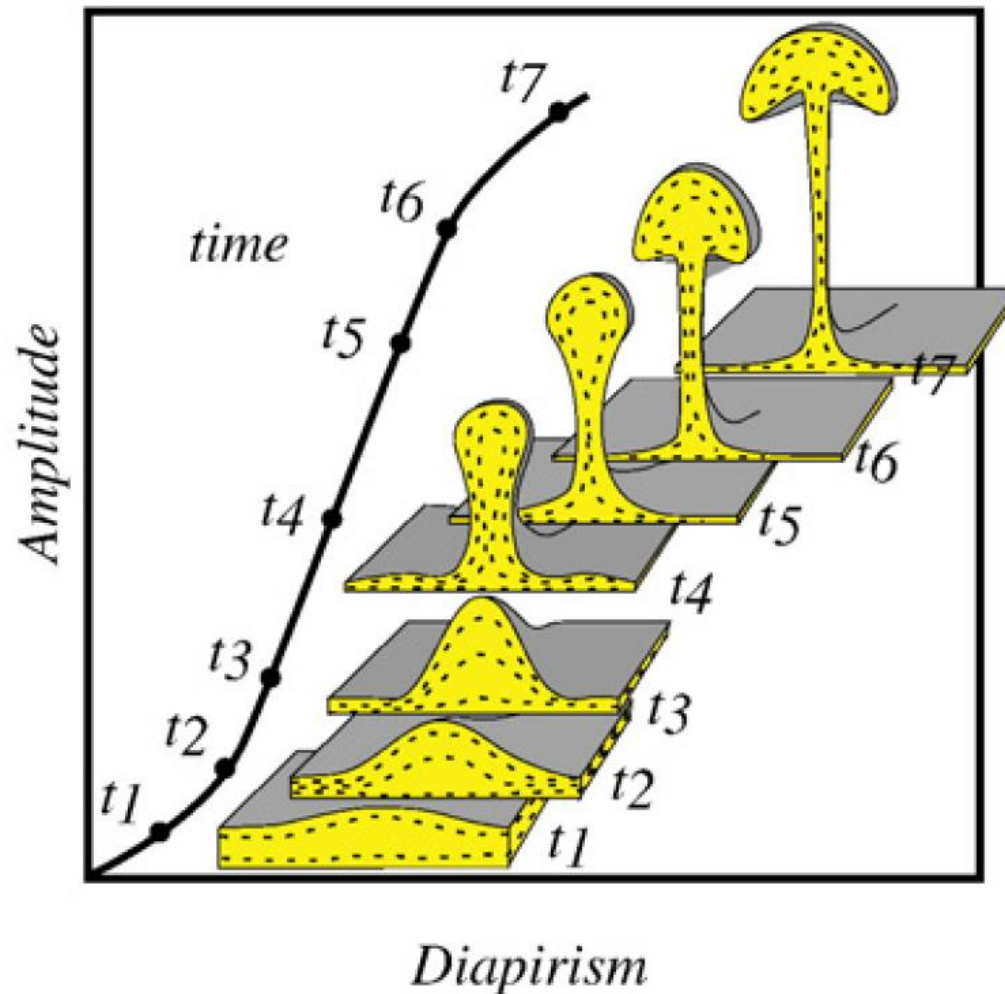
Evolution géométrique des roches partiellement fondues et des magmas pendant la fusion partielle et la cristallisation (Vanderhaeghe, 2009).

Mobilité et migration du magma



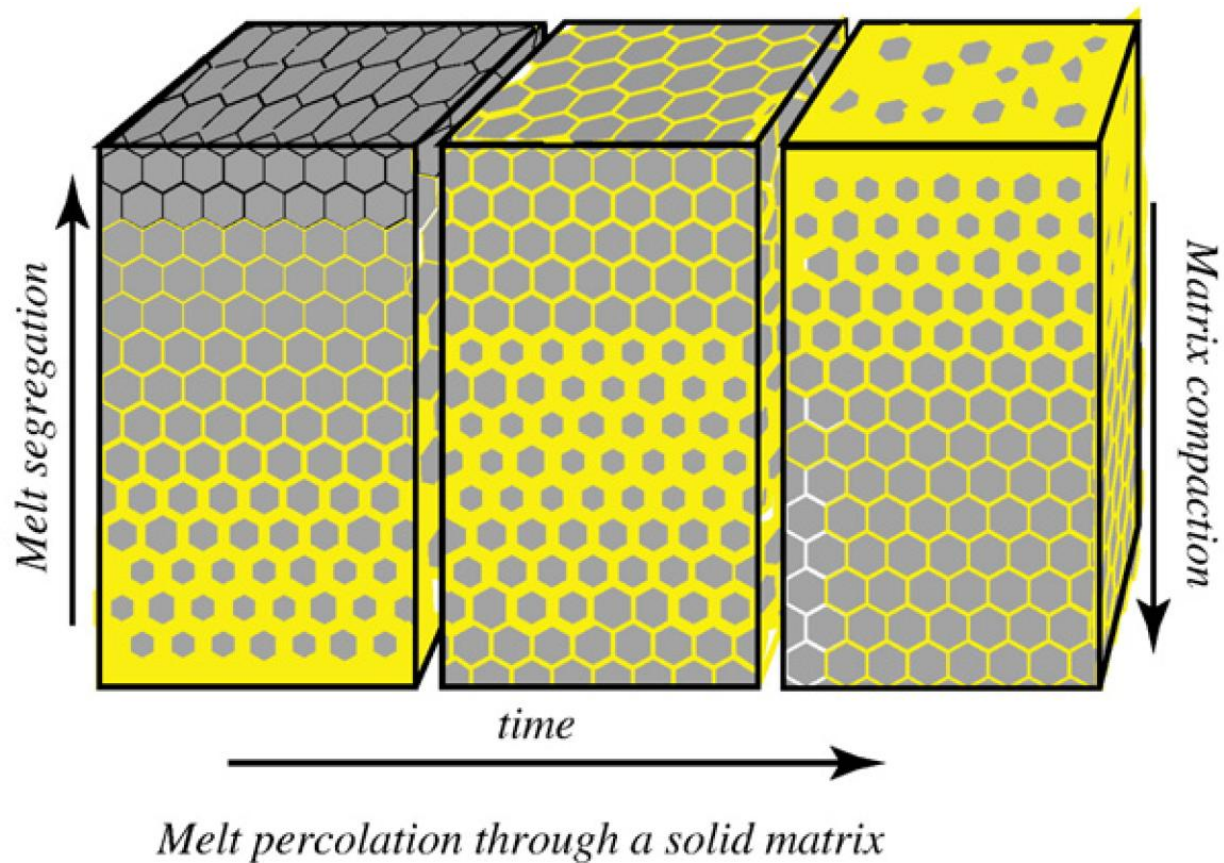
Densité des roches partiellement fondues et des magmas en fonction de la proportion de liquide silicaté (Vanderhaeghe, 2009).

Mobilité et migration du magma



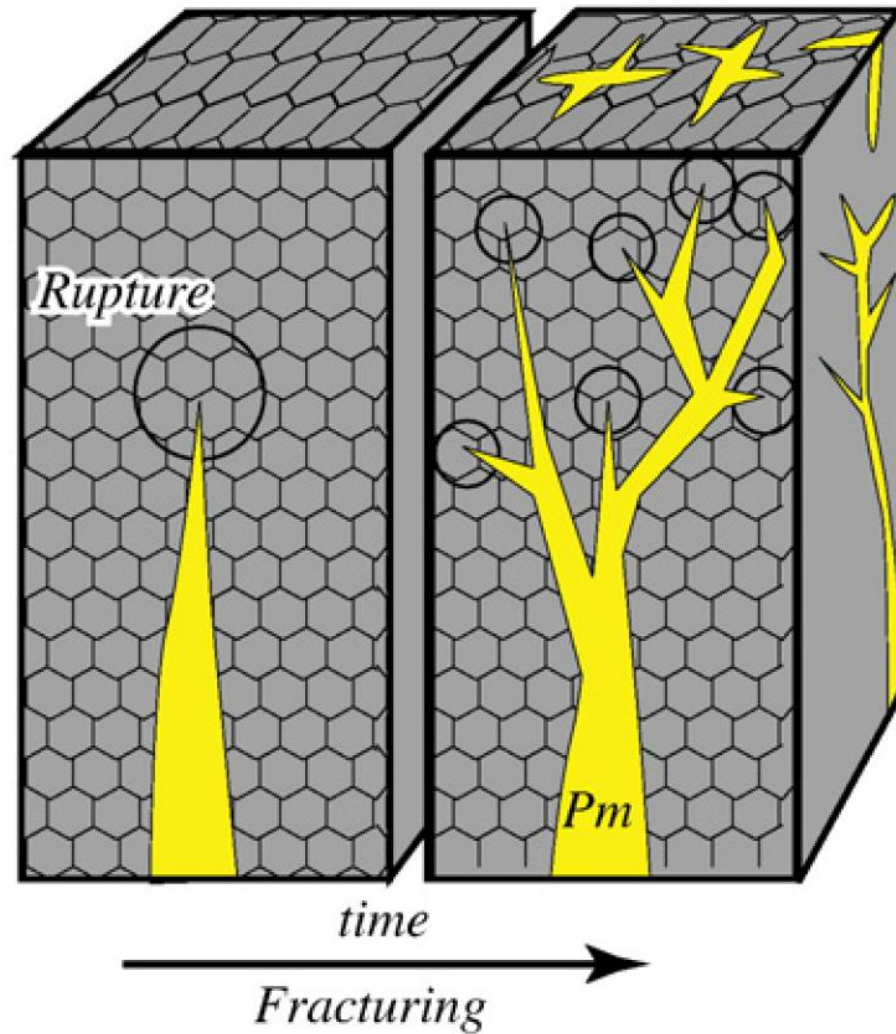
Mécanismes de ségrégation et migration de magma; **Diapirisme**, Percolation, Fracturation ;
gris = solide ; jaune = magma (Vanderhaeghe, 2009)

Mobilité et migration du magma



Mécanismes de ségrégation et migration de magma; Diapirisme, **Percolation**, Fracturation ;
gris = solide ; jaune = magma (Vanderhaeghe, 2009)

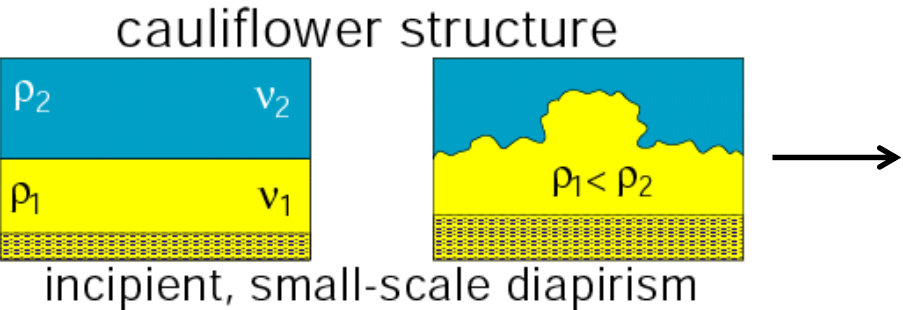
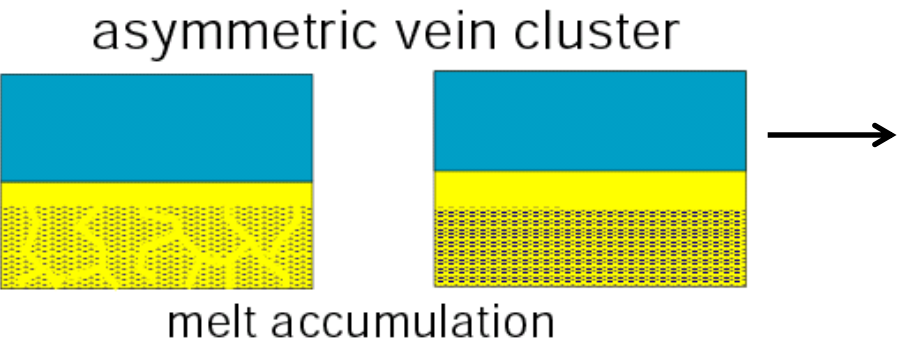
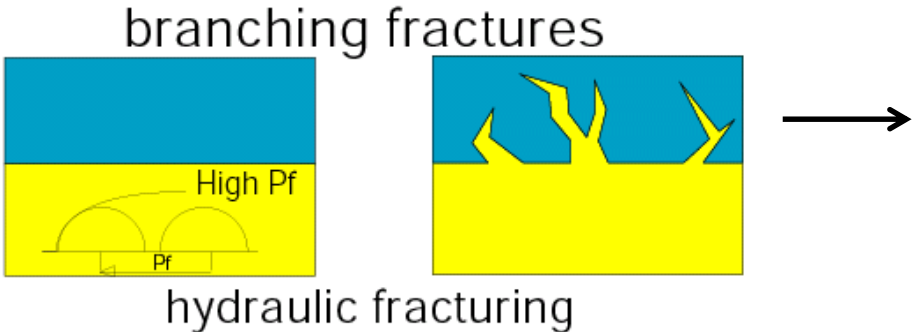
Mobilité et migration du magma



Mécanismes de ségrégation et migration de magma; Diapirisme, Percolation, **Fracturation**;
gris = solide ; jaune = magma (Vanderhaeghe, 2009)

Mobilité et migration du magma

De la ségrégation à la migration de magma



Critères des polarité
(Burg & Vanderhaeghe, 1993, Vanderhaeghe, 2001)

Mobilité et migration du magma

Mobilité du magma: mouvement relatif du magma (liquide silicatés + minéraux) et de la roche encaissante

Moteurs de migrations/mobilités des liquides silicatés et magmas:

- ✓ gradients de densité (buoyancy)
- ✓ gradients de viscosité (viscosity)
- ✓ gradients de pression:
 - . variations latérales de pression lithostatique (profondeur)
 - . déformation hétérogène de la roche encaissante

Importance de la **connectivité du liquide** et de la **continuité du solide**.

Conséquences sur:

Ségrégation Liquide/Solide

Rhéologie du système Liquide/Solide

Mobilité et migration du magma

Ségrégation/migration du magma induite par la déformation

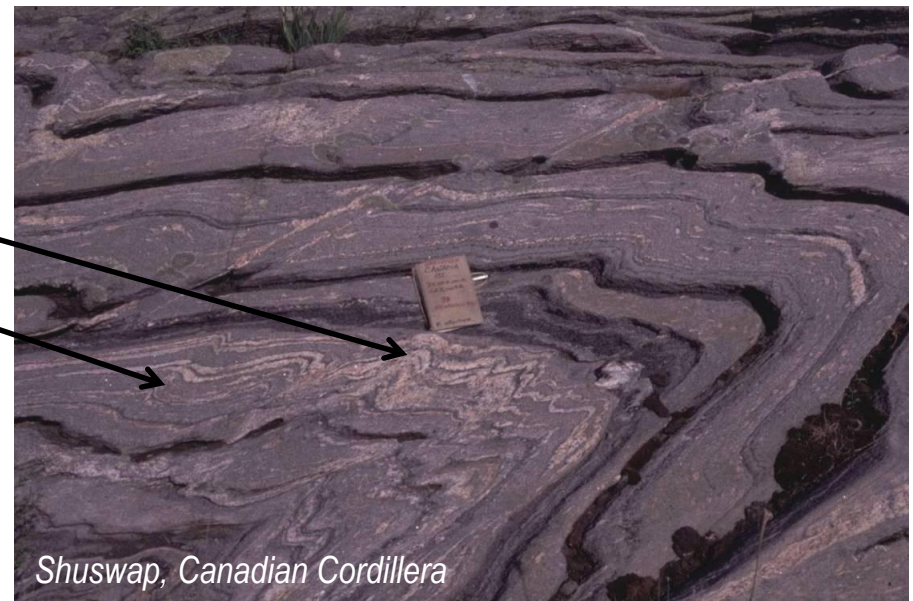
Extension:

Alternance leucosome/mésosome
+ boudins (marqueurs de l'extension)
+ leucosome concordant en interboudins



Compression:

Alternance leucosome/mésosome
+ plis (marqueurs de la compression)
+ leucosomes dans les charnières de plis
+ leucosome discordant dans les plans axiaux des plis



Mobilité et migration du magma

Ségrégation/migration du magma induite par la déformation

Extension + cisaillement ductile:

Alternance leucosome/mésosome

+ leucosome en inter-boudins

+ plans de cisaillement soulignés par le leucosome



Cisaillement ductile:

Leucosome dans les ombres de pression autour des grenats

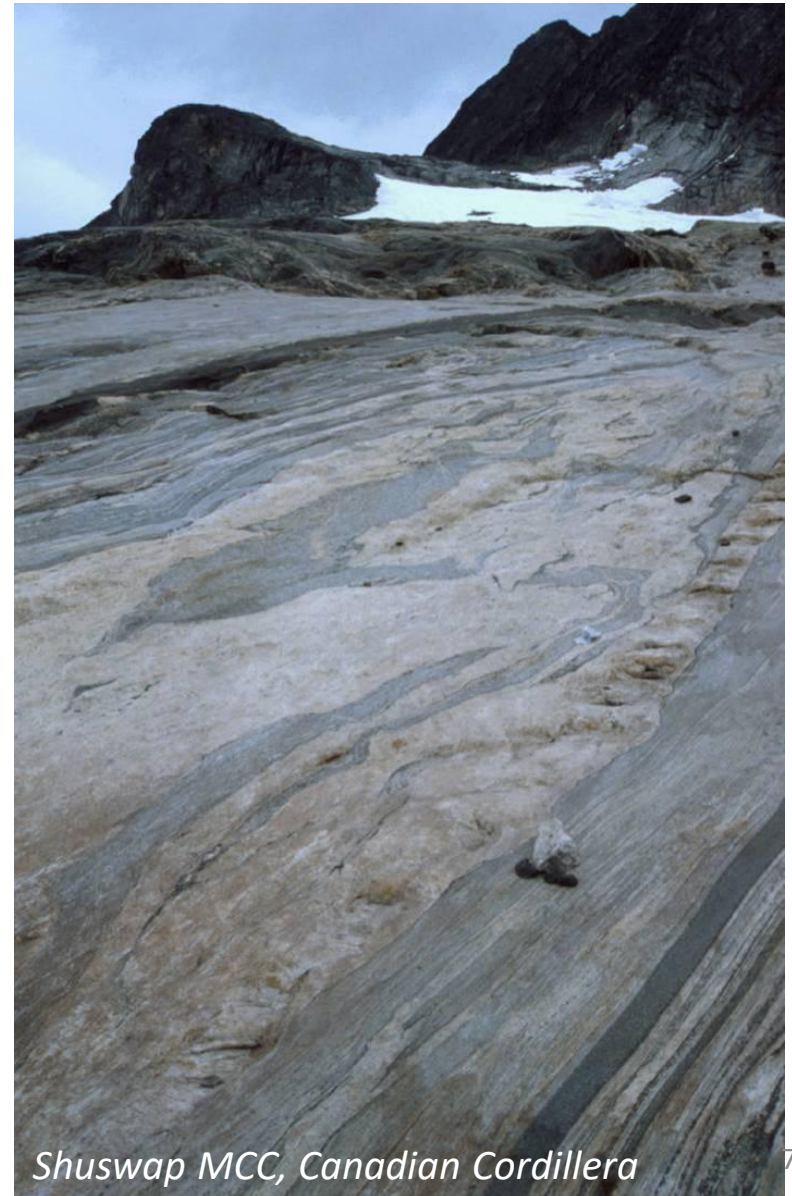


Mobilité et migration du magma

Métatexite/Diatexites? sur le terrain

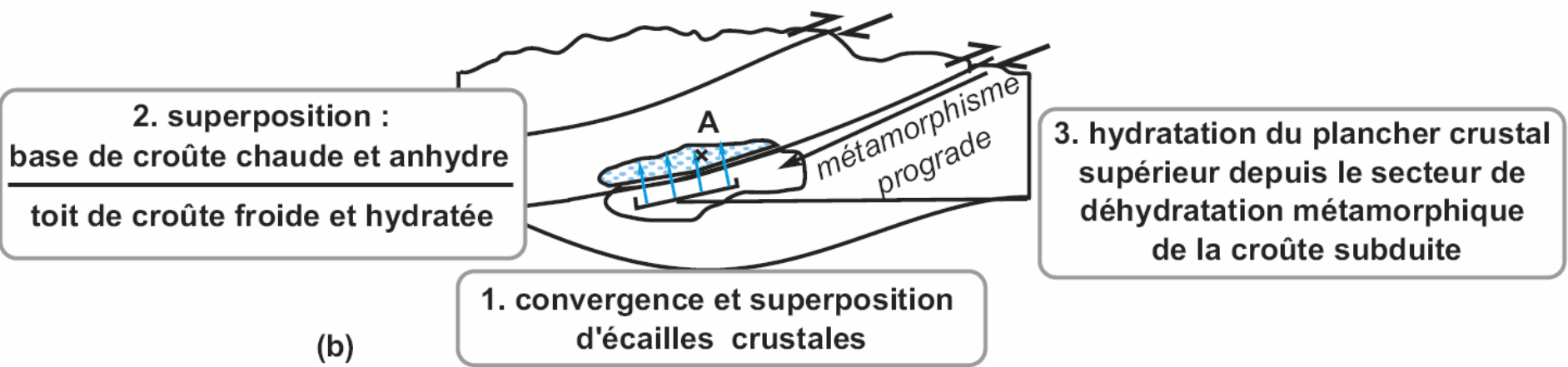


Shuswap MCC, Canadian Cordillera

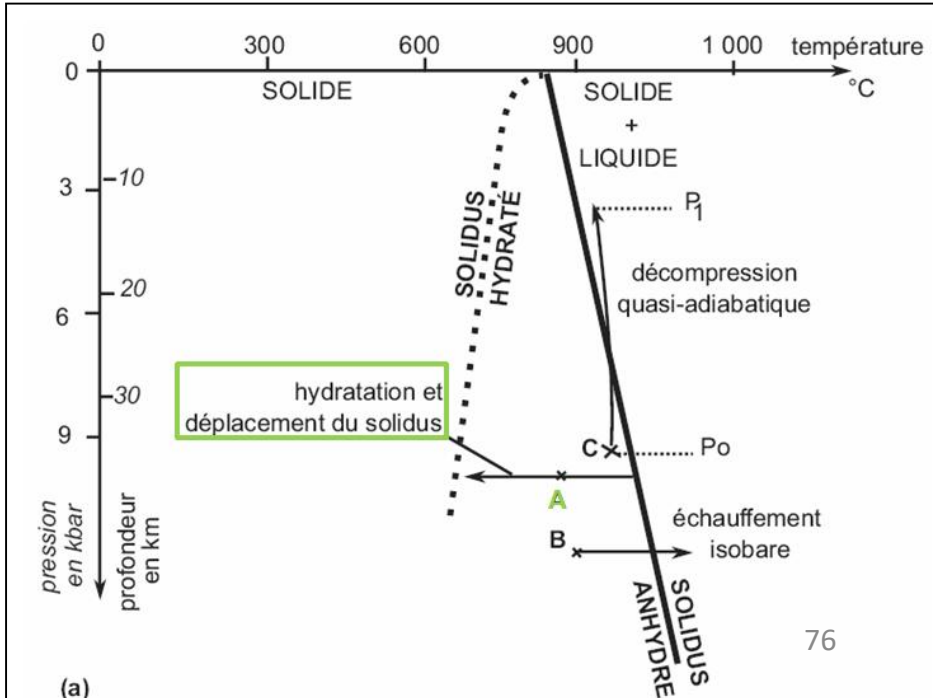


Shuswap MCC, Canadian Cordillera

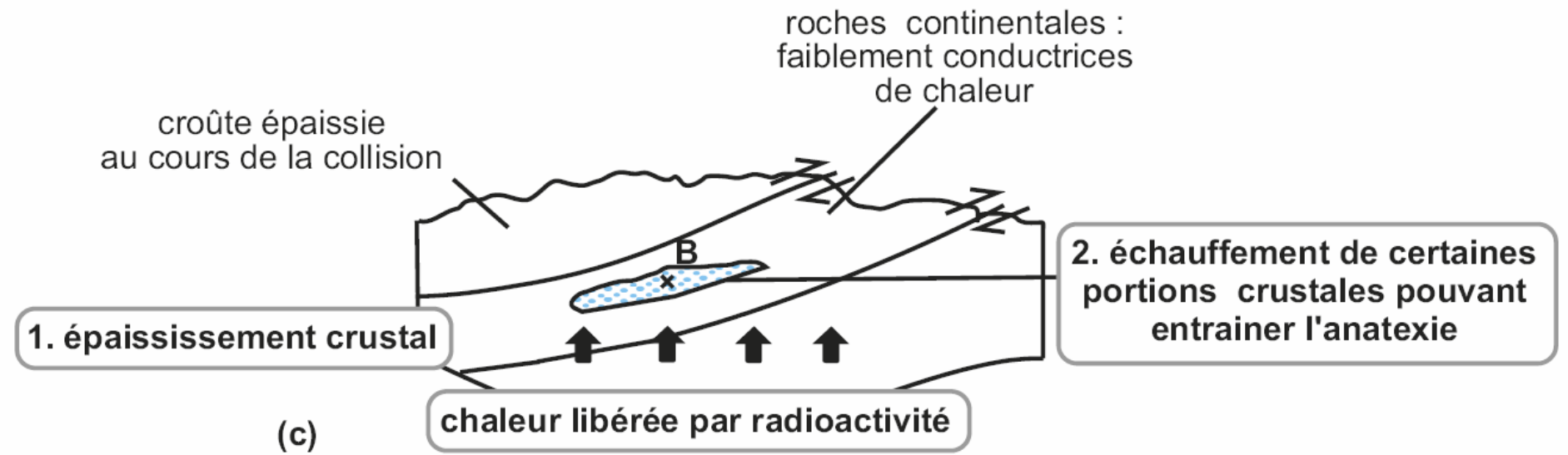
Synthèse géodynamique



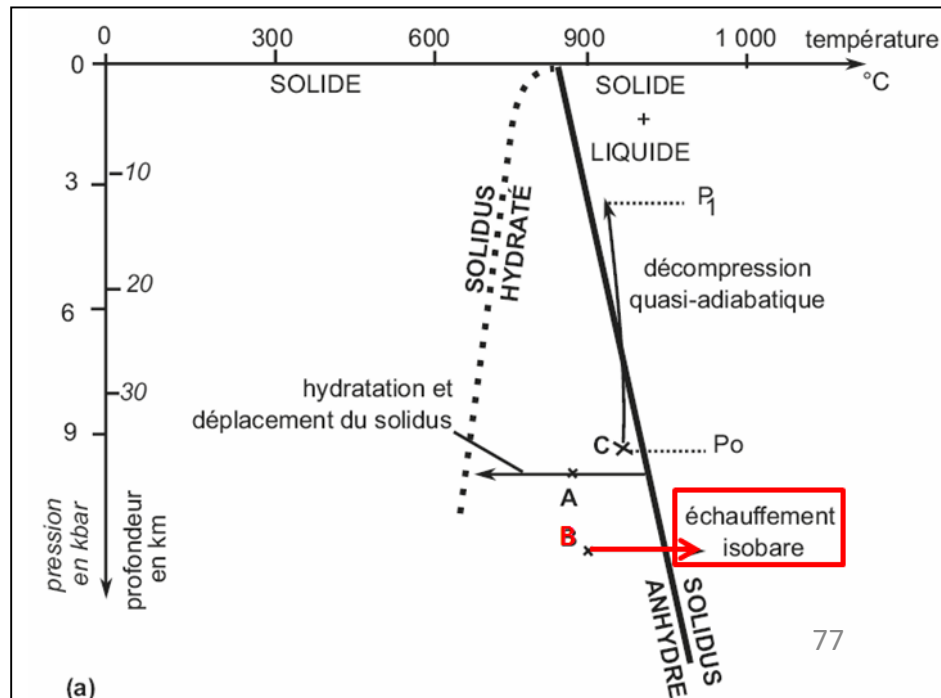
(b) Anatexie précoce liée à la déshydratation de la croûte métamorphisée et à l'humidification de la base chaude et préalablement anhydre de l'écaïlle crustale sus-jacente.



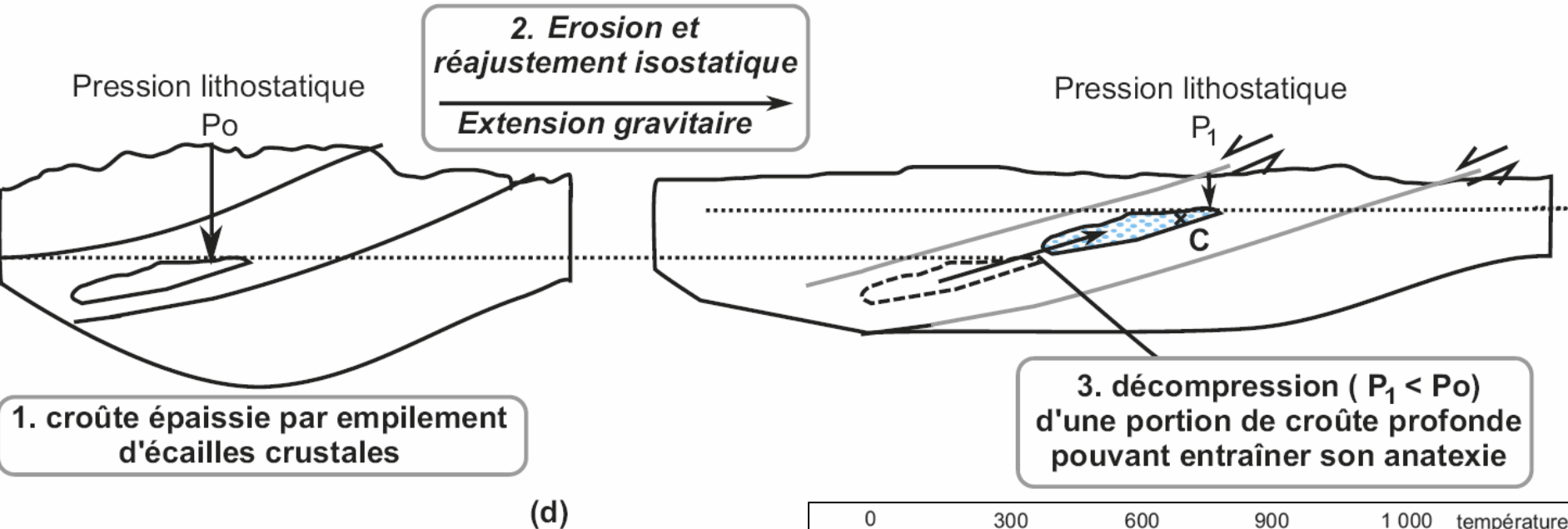
Synthèse géodynamique



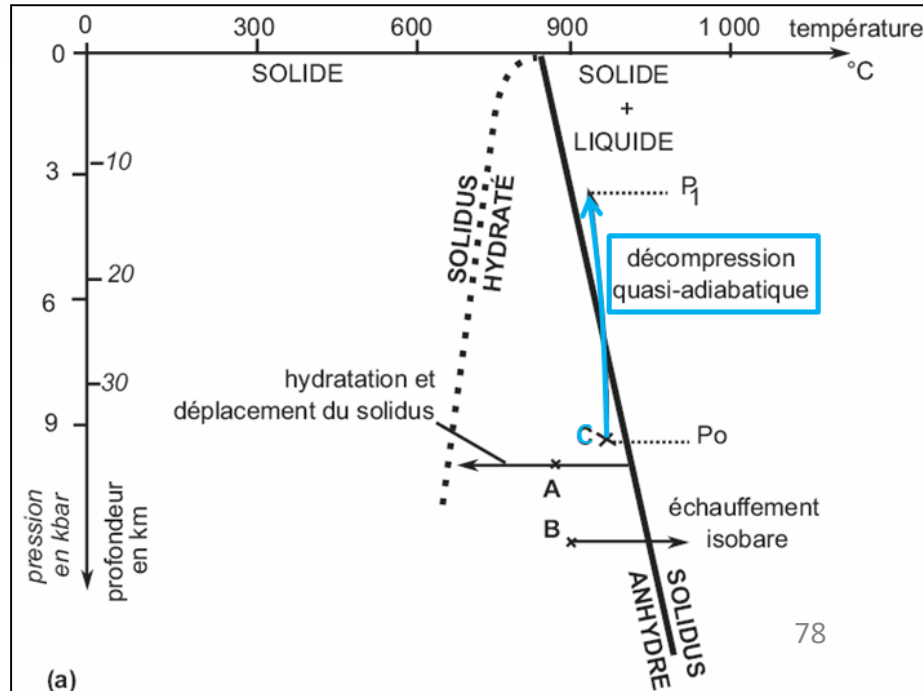
(c) Anatexie liée au réchauffement des roches du fait de leur fort potentiel de libération de chaleur par radioactivité et de leur faible diffusivité thermique.



Synthèse géodynamique

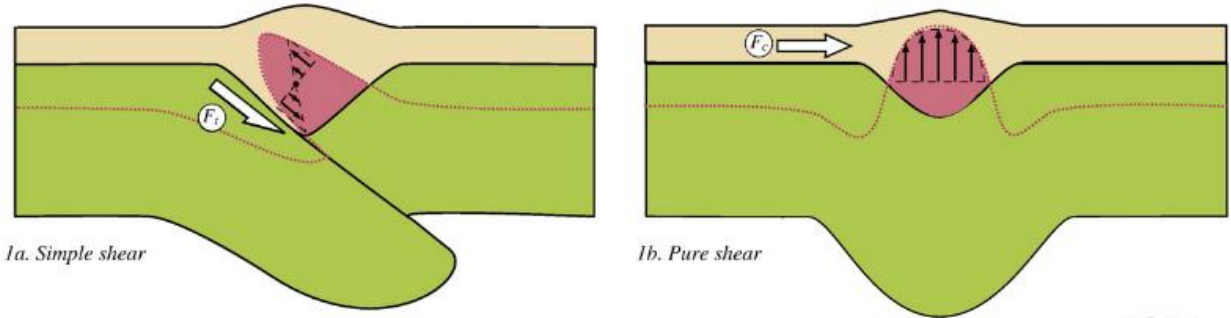


(d) Anatexie liée à la remontée quasi adiabatique des unités profondes du fait de l'érosion ou de la phase de relaxation tardive (effondrement gravitaire extensif) de l'édifice.



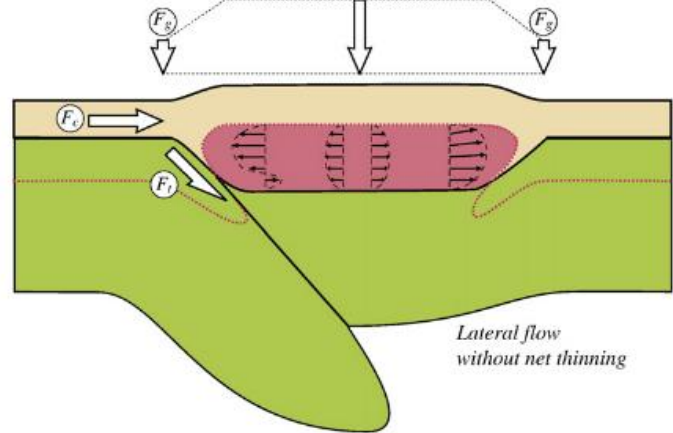
Modes d'écoulement

(a) 1. Accretionary wedge

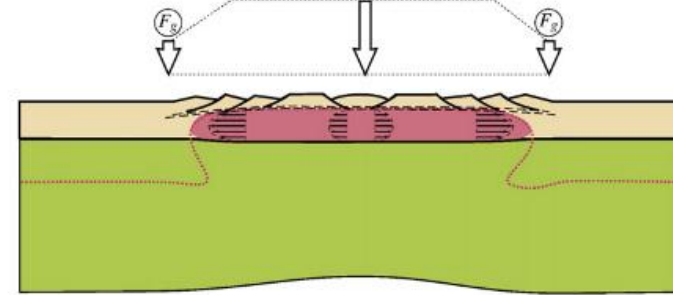


F_t = force de traction
 F_c = force de compression
 F_g = force de gravité

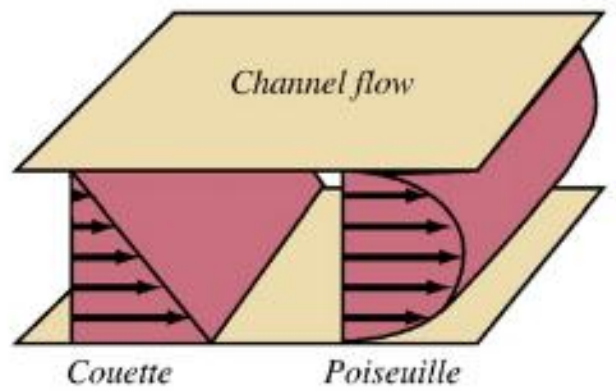
2. Continental plateau



3. Gravitational collapse

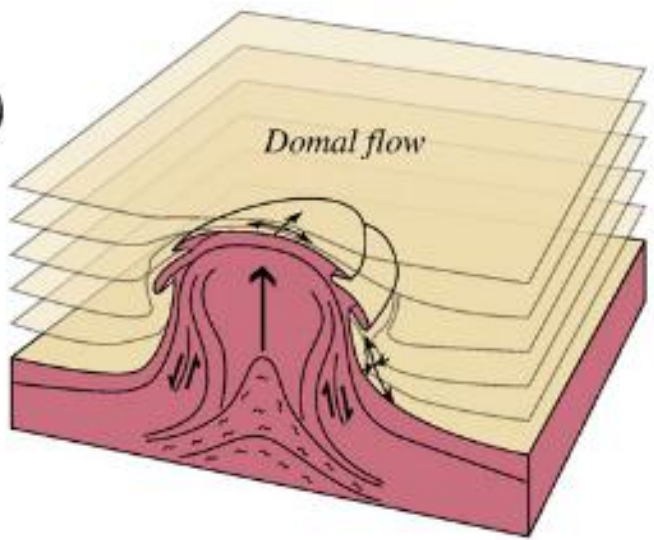


(b)



(Vanderhaeghe, 2009)

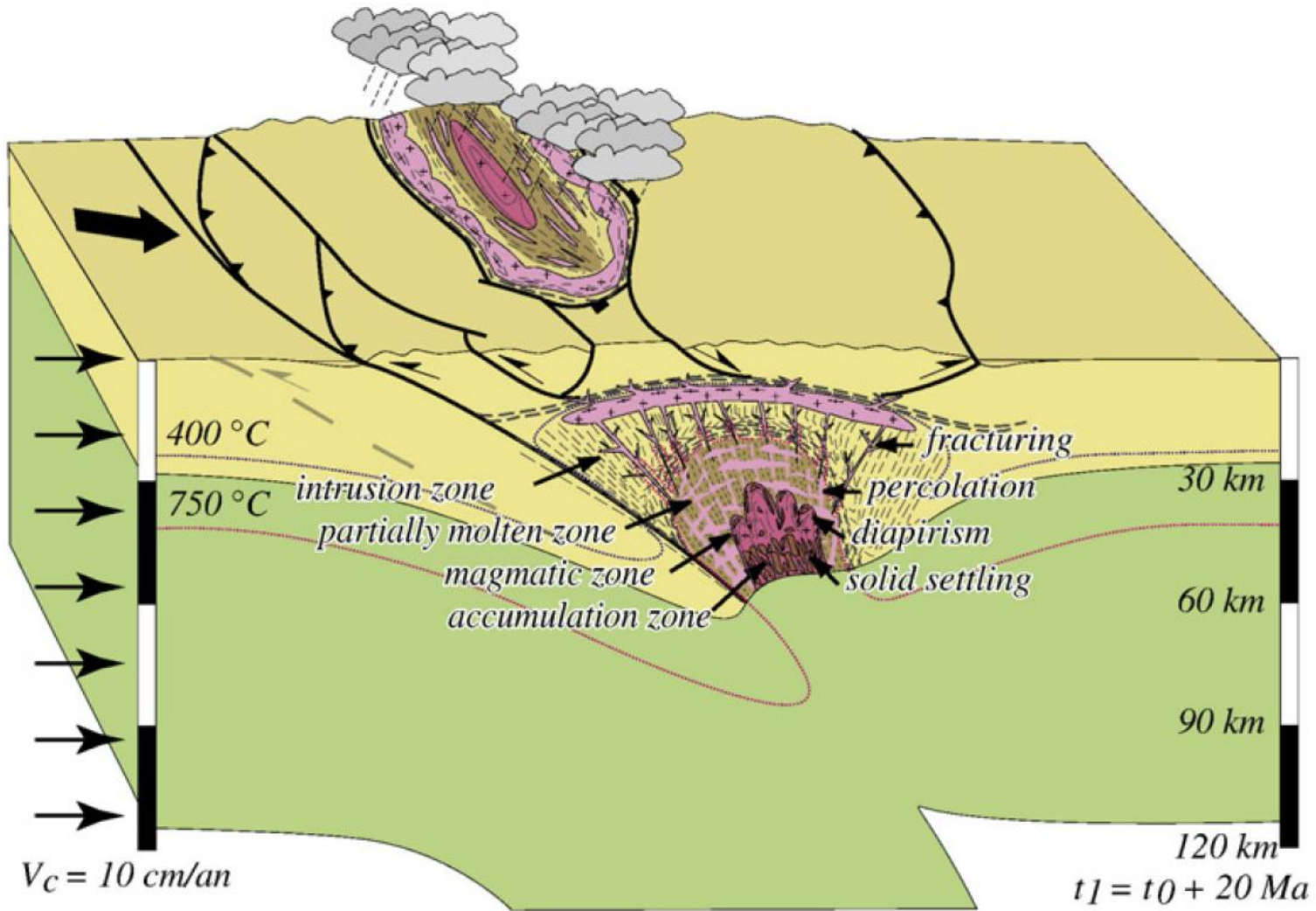
(c)



Synthèse géodynamique

1: formation d'une ceinture orogénique

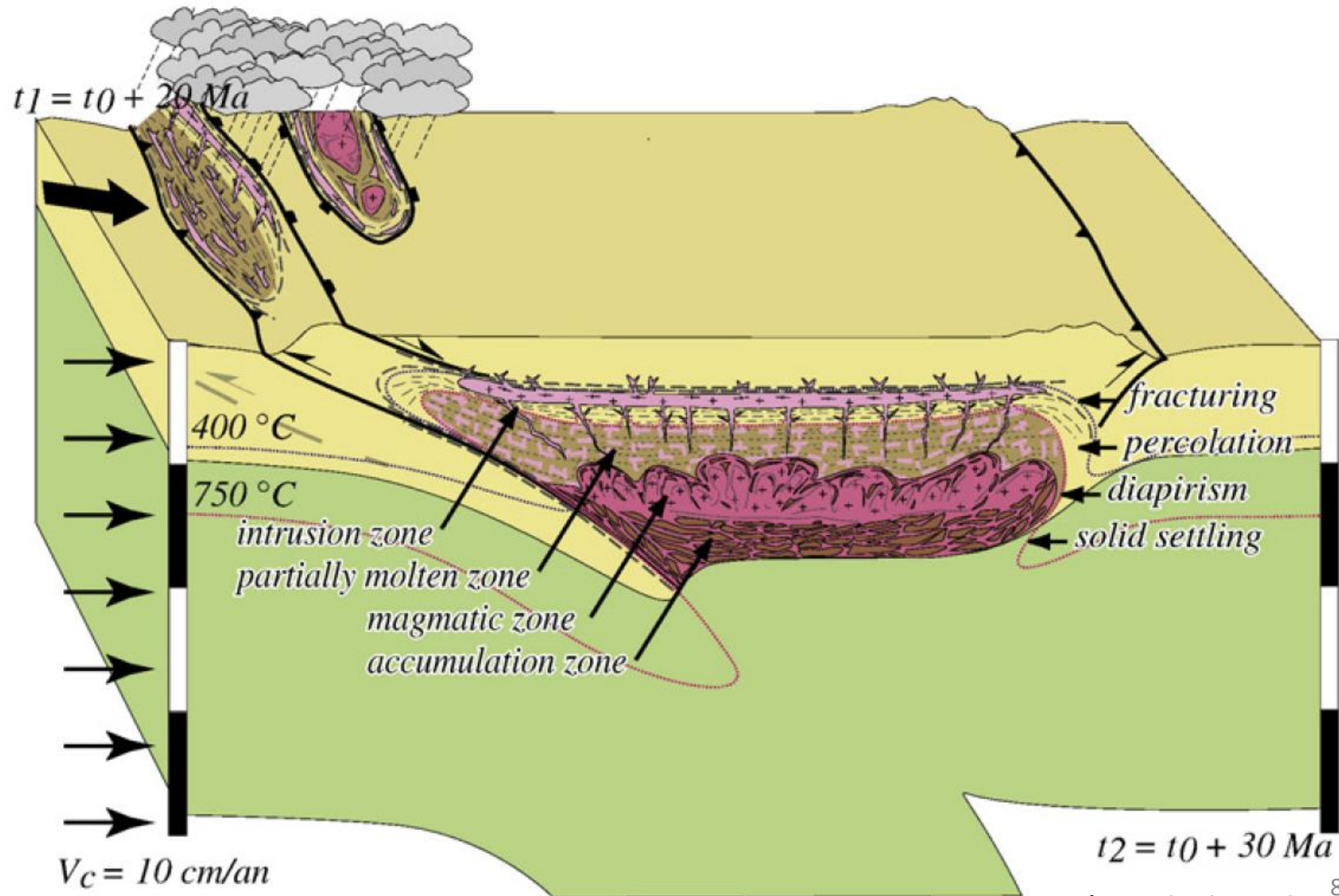
Vertical channel flow + domal flow



Synthèse géodynamique

2: development d'un plateau continental

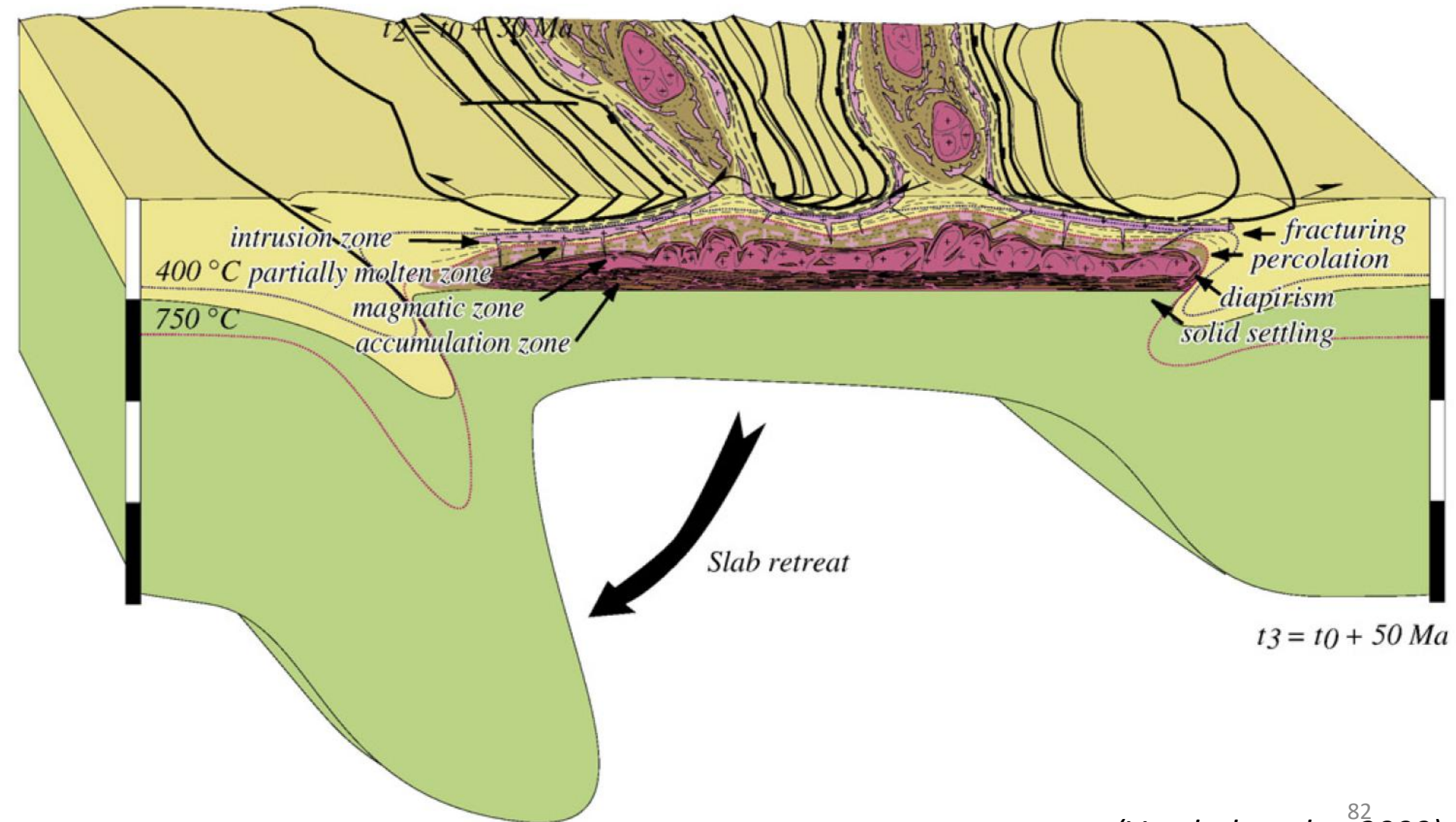
Lateral channel flow + domal flow



Synthèse géodynamique

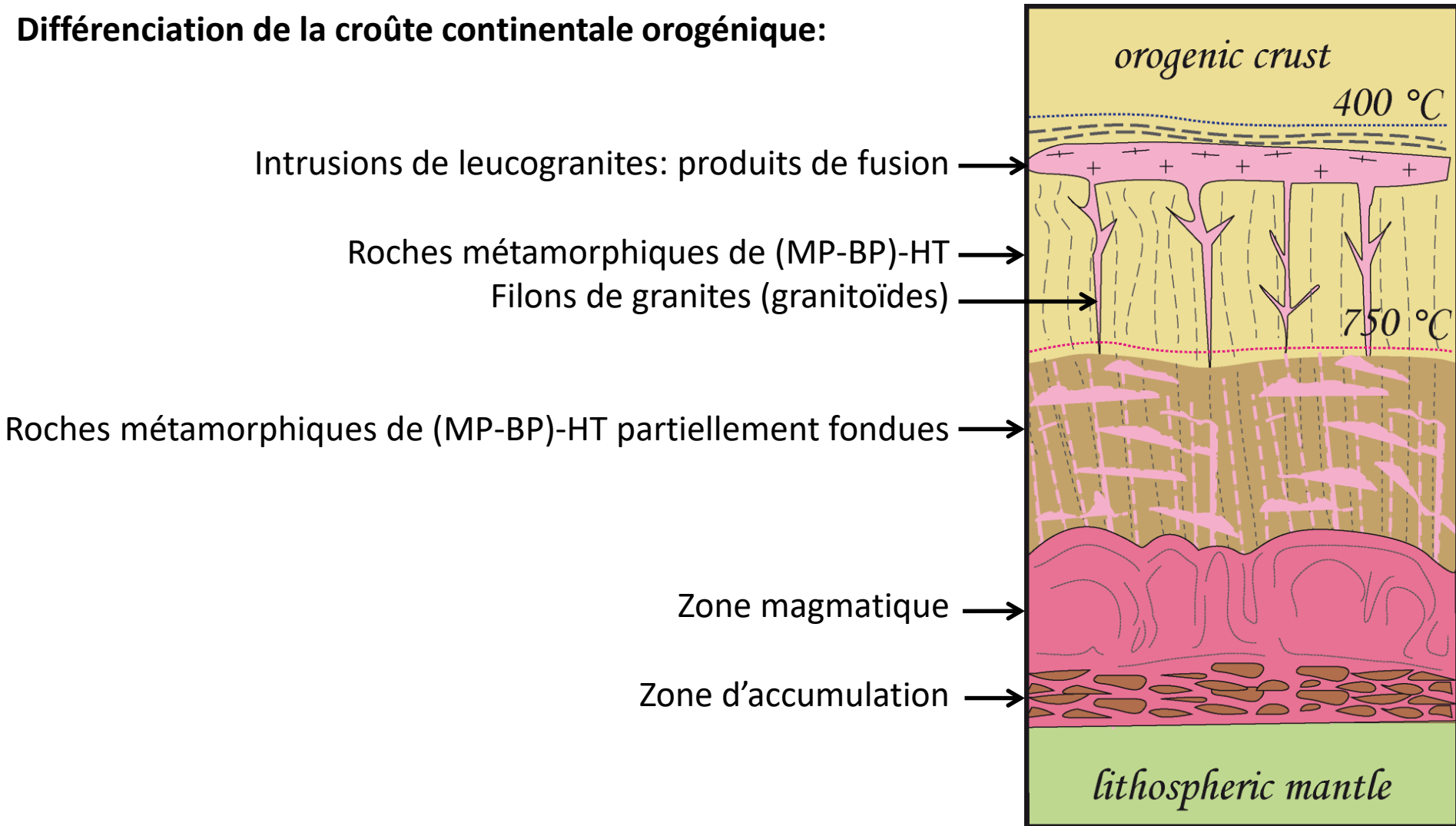
3: Effondrement gravitaire de la ceinture orogénique

Lateral channel flow + domal flow



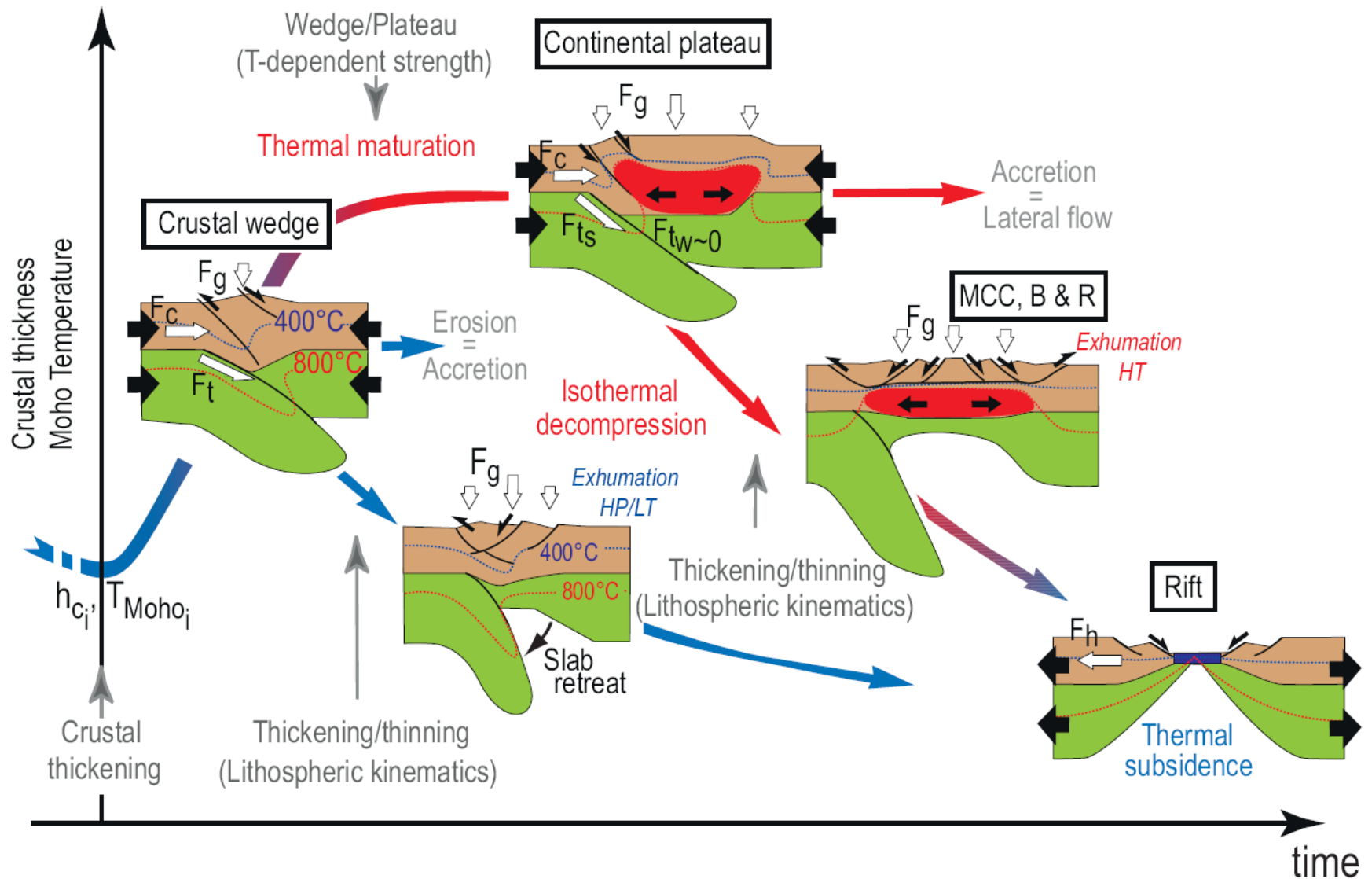
Synthèse géodynamique

Différenciation de la croûte continentale orogénique:



Migmatites et granites (ou leurs équivalents non cristallisés!) sont présents **dans la plupart des ceintures orogéniques à nuancer** depuis l'épaississement de la formation d'un prisme d'accrétion jusqu'à son effondrement (Vanderhaeghe, 2009).

Synthèse géodynamique



Evolution thermo-mécanique de la croûte aux limites de plaques (Vanderhaeghe, 2012)

= « cycle orogénique » à rapprocher d'un autre cycle...

le cycle de Wilson